



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



DÖRT AYAKLI HİDROLİK TAHRİKLİ BİR ROBOTUN MODELLENMESİ VE
UYGULAMASI

Veli Bakırcıoğlu

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık – 2019

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Veli Bakırcıoğlu tarafından hazırlanan "*DÖRT AYAKLI HİDROLİK TAHRİKLİ BİR ROBOTUN MODELLENMESİ ve UYGULAMASI*" adlı tez çalışması 27.12.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı 'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Fatih M. BOTSALI

Danışman

Prof. Dr. Mete KALYONCU

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TINKIR

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

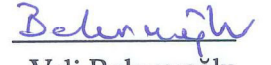
Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
LEE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.


Veli Bakırcıoğlu
Tarih: 27/12/2019

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DÖRT AYAKLI HİDROLİK TAHRİKLİ BİR ROBOTUN MODELLENMESİ VE UYGULAMASI

Veli Bakırcıoğlu

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2019, 275 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mete KALYONCU
Prof. Dr. Fatih M. BOTSALI
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TINKIR
Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK
Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN

Bu tez çalışmasında, yenilikçi bir yaklaşımla dört ayaklı bir robotta kullanılmak üzere bir robot bacağınaın tasarımı yapılmıştır. Tasarımın kendisi için optimizasyon tekniklerinin uygulanması, çalışmanın yenilikçi yönlerinden biridir. Tasarım aşamasında, robot bacağınaın mekanizması ve topolojisi hidrolik güç ünitesinin yükünü azaltmak için optimize edilmiştir ve sonuç olarak, mobil robotlarla ilgili en büyük problemlerden biri olan enerji verimliliği geliştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, imal edilen robot bacağınaın konum kontrolü için çeşitli kontrolcüler tasarlamak ve tasarlanan kontrolcülerin performanslarını ölçmek için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, tasarlanan kontrolcülerin parametrelerini, sistem yanıtını belirlenen metriklere göre şekillendirebilmek için yine optimizasyon temelli yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu bağlamda, benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere tasarlanan robot bacağınaın matematiksel modeli ve fiziksel modeli elde edilmiştir. Daha sonra, gerçekleştirilen benzetimler ile elde edilen kontrolcülerin geçerliliğini ve güvenilirliğini doğrulamak için, bacak modelinin ilk örnek üretimi yapıldıktan sonra gerçek sistem üzerinde kontrol denemeleri yapılmıştır. Bahsedilen optimizasyonlar, sürü zekâsı metasezgisine dayanan yeni bir arama algoritması olan Arı Algoritması ve literatürde yaygın olarak kullanılan aynı zamanda başka bir metasezgisel algoritma olan Genetik Algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak, tasarlanan ve imalatı yapılan robot bacağınaın hâlihazırda elde edilen modeli kullanılarak, kendi kendini dengeleme ve yüksek hareket kabiliyeti olan dört ayaklı bir robot konsepti önerilmiştir. Ayrıca, dört ayaklı bir robotun yürümesi sırasında robot bacağınaın adımı için bir yörünge tasarımı yapılmıştır. Bu bağlamda, dört ayaklı yürüyüş sırasında robot bacağınaın yörüngesinin belirlenmesini sağlamak için bir Merkezi Örüntü Üretici tasarlanmıştır. Tasarlanan ve imalatı yapılan robot bacağınaın hâlihazırda elde edilen modeli kullanılarak dört ayaklı bir robotun yürüyüş analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Arı Algoritması, Dinamik Analiz, Dört Bacaklı Robot, Kinematik Analiz, Matematiksel Model, Optimizasyon

ABSTRACT

PhD THESIS

MODELLING AND IMPLEMENTATION OF A HYDRAULIC ACTUATED QUADRUPED ROBOT

Veli Bakircioğlu

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2019, 275 Pages

Jury

**Prof. Dr. Mete KALYONCU
Prof. Dr. Fatih M. BOTSALI
Asst. Prof. Dr. Üyesi Mustafa TINKIR
Asst. Prof. Dr. Koray KAVLAK
Asst. Prof. Dr. Ümit ÖNEN**

In this thesis, a novel robot leg was designed to use in a quadruped robot with an innovative approach. The application of optimization techniques for the design itself is one of the innovative aspects of the study. In the design phase, the mechanism and the topology of the robot leg was optimized to reduce the load of the hydraulic power unit, and consequently, the energy efficiency, which is one of the major problems related to mobile robots, was tried to be improved. Furthermore, to design various controllers to control position of the designed robot leg, and to benchmark performances of the designed controllers, simulations were performed. In addition, optimization-based approaches were used to shape the parameters of the designed controllers according to the determined metrics. In this context, the mathematical model and the physical model of the designed robot leg were obtained to use in simulations. Then, to verify the validity and reliability of the controllers obtained with the simulations, control experiments were performed on the real system after manufacturing the leg model prototype. The mentioned optimizations were realized by using The Bees Algorithm which is a novel search algorithm based on the swarm-intelligence metaheuristic and Genetic Algorithm which is widely used in the literature and at the same time is another metaheuristic algorithm. Finally, a quadruped robot concept with self-balancing and high mobility was proposed based on the already obtained model of the designed and manufactured robotic leg. Furthermore, a trajectory design was made for the robot leg during the walking of a quadruped robot. In this context, a Central Pattern Generator was designed in order to provide the trajectory determination of the robot leg during quadruped walking. Gait patterns of a quadruped robot were analyzed by using the already obtained model of the designed and manufactured robot leg.

Anahtar Kelimeler: Dynamic Analysis, Kinematic Analysis, Mathematical Model, Quadruped Robot, Optimization, The Bees Algorithm

ÖNSÖZ

İnsanoğlu meraklıdır. Çevresinde olup biteni araştırmak ve bilmek ister, bazen de olup biteni kontrol etmek ister. Bu merak ve araştırma isteği sayesinde Mars'ın yüzeyinde şuanda insan yapımı bir robot gezebilmektedir. Bu insanoğlunun yaratıcılığının bir göstergesidir. Kimi zaman ihtiyaçtan, kimi zaman ise işleri kolaylaştırmak ve zamanı verimli kullanabilmek için insanoğlu yaratıcılığını kullanmıştır. Bu yaratıcılığın ilham kaynağı, insanoğlunun hayal gücünden gelmektedir ve bu hayal gücü çevresinden yani doğadan etkilenmektedir.

Bu bağlamda merak ederek başlayıp, uzun araştırmalar ve çalışmalar sonucunda hazırladığım doktora tezimde, doğadan ilham alınarak tasarlanmış ve yine doğadan ilham alınarak oluşturulmuş algoritmalarla optimize edilmiş bir robotun tasarımı, modellenmesi, optimizasyonu ve kontrolü üzerine yaptığım araştırmalar sunulmuştur. Bu tez çalışmasının, özellikle ayaklı robotlar alanında yürütülecek araştırmalara bir ilham kaynağı ve yol gösterici bir rehber olmasını ummaktayım.

Tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. Mete Kalyoncu'ya, ayrıca, görüş ve önerileriyle çalışmamın ilerlemesine önemli katkılar sağlayan değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Fatih M. Botsalı'ya ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Tınkır'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma sayısız insanın katkısı ve desteği olmadan mümkün olmazdı. Her şeyden önce beni temelde doğru kanallara yönlendiren ve sayesinde yeni bir araştırma alanı ile tanıştığım İlker Örs'e, farklı yerlerde ve farklı konular üzerine yaptığımız verimli ve ufuk açan tartışmalar için Nihat Çabuk'a ve Fatih Yılmaz'a çok teşekkür ederim. Ayrıca, Konya Teknik Üniversitesi bünyesinde geçirdiğim süre boyunca hiçbir yardımını esirgemeyen Abdullah Çakan'a ve yeni fikirlerin şekillenmesinde yardımcı olan ve birlikte yaptığımız çalışmalar için M. Arif Şen'e ve Abdullah Yöngül'e teşekkür ederim.

En son ama en önemlisi, sonsuz sevgi ve desteklerinden dolayı değerli anneme ve babama, sevgili eşime ve canım evlatlarıma en içten sevgi ve saygılarımı, ve de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Veli Bakırcıoğlu

Konya-2019



Alya, Kaan ve Kaya'ya ...

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Motivasyonu	4
1.2. Tezin Amacı ve Yaklaşımı	5
1.3. Tezin Önemi ve Literatüre Katkısı	6
1.4. Tez Planı ve Sunuş	8
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
2.1. Yürüyen Makineler Tarihçesi	10
2.2. Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar	12
2.2.1. Statik Yürüyüşte Tam Otomatik sistemlere Geçiş Dönemi	17
2.2.2. Aktif Uyum Kavramının Ortaya Çıkışı	19
2.2.3. Ayaklı Robotların Gerçek Görevlerde Kullanılmaya Başlanması	23
2.2.4. Statik ve Dinamik Yürüyüş Stratejilerinin Karşılaştırılması	25
2.3. Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar	26
2.3.1. Yarı-Dinamik Yürüyüş Çalışmaları ve Aktif Dengeleme	26
2.3.2. Yay Yüklü Ters Sarkaç (SLIP) Modeli ve Raibert'ın Çalışmaları	29
2.3.3. Son On Yılda Dört Ayaklı Robotlar Alanında Yapılan Çalışmalar	34
2.4. Bölüm Özeti	42
3. SİSTEME AİT TASARIM ÇERÇEVESİNİN BELİRLENMESİ	45
3.1. Tasarım Özelliklerinin Belirlenmesi	45
3.1.1. Performans Ölçütlerinin Belirlenmesi	46
3.1.2. Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi	47
3.2. Robot Yapılandırmasının Belirlenmesi	49
3.2.1. Bacak Sayısının Belirlenmesi	49
3.2.2. Bacak Yapılandırmasının Belirlenmesi	50
3.2.3. Eyleyici Tiplerinin Belirlenmesi	53
3.3. Bölüm Özeti	54
4. BACAK MEKANİZMASININ TASARIMI ve OPTİMİZASYONU	56
4.1. Rijit Cisimlerin Hareketi	58
4.2. Bacak Mekanizmasının Kinematik Analizi ve Sentezi	77
4.2.1. İki Serbestlik Dereceli Bacak Mekanizmasının Kinematik Analizi	78
4.2.2. İki Serbestlik Dereceli Bacak Mekanizmasının Sentezi	86
4.3. Optimal Bacak Mekanizmasının Evrimsel Algoritmaya Dayalı Tasarımı	93

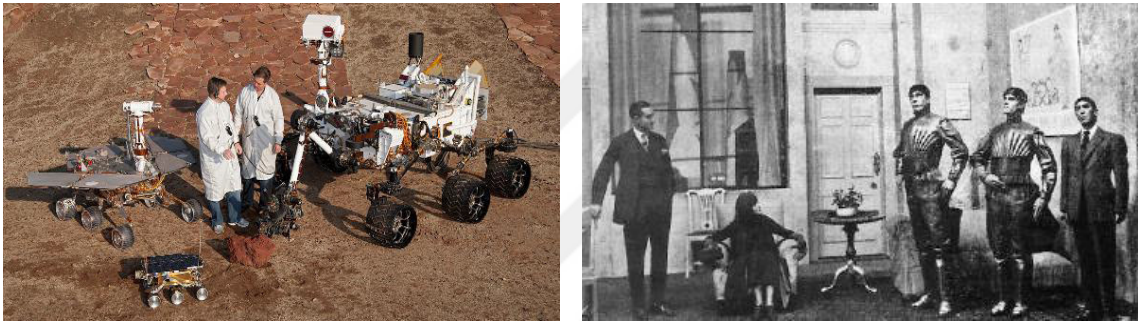
4.3.1. Evrimsel Algoritmalar	93
4.3.2. Optimizasyon Probleminin Tanımlanması	95
4.3.3. Bacak Mekanizmasının Genetik Algoritma Tabanlı Optimizasyonu	98
4.3.4. Bacak Mekanizmasının Yörünge Takibi Bağlamında Optimizasyonu.....	99
4.3.5. Bacak Mekanizmasının Kuvvet İletimi Bağlamında Optimizasyonu	102
4.4. Bölüm Özeti.....	104
5. SİSTEMİN FİZİKSEL ve DİNAMİK MODELLENMESİ.....	107
5.1. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağının Fiziksel Modeli.....	108
5.1.1. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağın Katı Model Tasarımı	109
5.1.2. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağın Hareket ve Yapısal Analizleri	114
5.1.3. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağın Fiziksel Özellikleri ve Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesi	122
5.2. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağının Dinamik Modeli.....	124
5.2.1. Euler–Lagrange Denklemleri	124
5.2.2. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağın Matematiksel Modeli	128
5.3. Hidrolik Eyleyici Sisteminin Tanılaması ve Modellenmesi.....	131
5.3.1. Elektrohidrolik Yön Valfinin Dinamik Özelliklerinin Elde Edilmesi	132
5.3.2. Hidrolik Eyleyici Kuvvet Profili Hesabı ve Tasarımı.....	141
5.4. Bölüm Özeti.....	146
6. BACAK MEKANİZMASININ KONTROLÜ	149
6.1. Benzetim Modelinin Tanımlanması	149
6.2. Konum Kontrolü	153
6.2.1. PID Kazançların Optimizasyon Temelli Belirlenmesi	153
6.2.2. Arı Algoritması ve Optimizasyon Süreci	156
6.2.3. PID Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı	160
6.2.4. Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı.....	172
6.3. Bölüm Özeti.....	181
7. İLK ÖRNEK İMALATI ve BAŞARIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	183
7.1. İlk Örnek Mekanik Tasarımı ve İmalatı	183
7.2. Deney Düzenğinde Kullanılan Eyleyici Sistem	184
7.2.1. Hidrolik Güç Ünitesi	185
7.2.2. Hidrolik Pompa ve Elektrik Motoru.....	186
7.2.3. Basınç Kontrol Bileşenleri.....	187
7.2.4. Elektrohidrolik Oransal Yön Valfi	188
7.2.5. Hidrolik Silindirler	189
7.3. Deney Düzenğinde ve İlk Örnekte Kullanılan Sensörler	190
7.3.1. İlk Örnekte Kullanılan Açısız Konum Sensörü	190
7.3.2. Deney Düzenğinde Kullanılan Basınç Sensörü	191
7.4. Deney Düzenğinde Kullanılan Kontrol Sistemi	192
7.5. İlk Örnek Modelinin Gerçek–Zamanlı Konum Kontrolü	195
7.6. İlk Örnek Başarımının Değerlendirilmesi ve Tartışılması	203
7.7. Bölüm Özeti.....	206
8. DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN YÜRÜYÜŞÜNÜN İNCELENMESİ.....	208
8.1. Serbest Hareketli Ana Eksen Kinematığı	208

8.2. Dört Ayaklı Bir Robotun Kinematik Analizi	215
8.3. Merkezi Örüntü Üretici Tasarımı ve Bacak Yörünge Planlaması	228
8.4. Merkezi Örüntü Üretici ile Gerçekleştirilen Yürüyüş Benzetimi	234
8.5. Bölüm Özeti.....	238
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	241
9.1. Tez Çalışması Sonucunda Elde Edilen Çıktılar	243
9.2. Öneriler ve Gelecekteki Çalışmalar	246
KAYNAKLAR.....	250
ÖZGEÇMİŞ	272



1. GİRİŞ

Robot teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak destek birim olarak robotik sistemlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır ve artık günlük işlerde bile, robotlar, kendilerine yer bulmaya başlamışlardır. Günümüzde robotlar, boya, kaynak, montaj, lehimleme, taşıma ve iletme gibi üretim işlemlerinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, nükleer atıkların işlenmesi, uzay araştırmaları gibi tehlikeli ve insan gücünü aşan işlerde de kullanılmaktadır. Örneğin NASA tarafından geliştirilen Curiosity robotu, Mars yüzeyine inerek, insanoğlu için neredeyse imkânsız bir görevi yapabilmektedir (Şekil 1.1a).



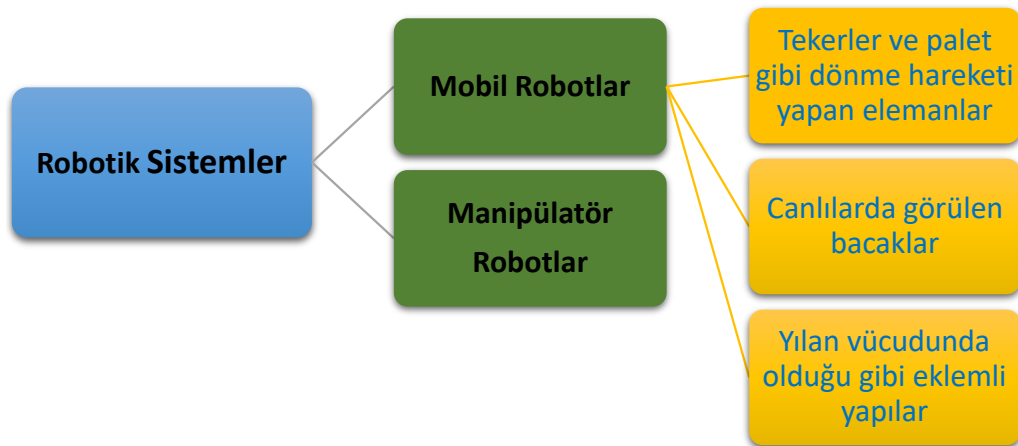
(a) Nasa tarafından Mars'a gönderilmiş üç robot (b) "Rossum's Universal Robots" oyunundan bir sahne

Şekil 1.1. Robot teknolojisinin günümüzde geldiği nokta ve tarihte robot kelimesinin ilk defa kullanıldığı tiyatro oyunundan bir sahne.

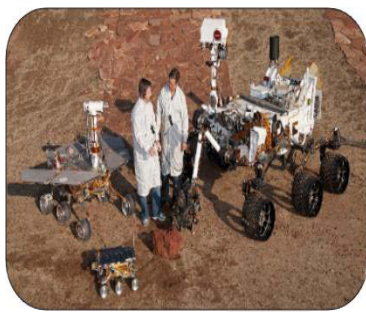
Robot kelimesi ilk olarak, Karel Čapek isimli oyun yazarının, Şekil 1.1b'de bir sahnesi gösterilen, 1920'de yazdığı "Rossum's Universal Robots" isimli oyunda karşımıza çıkmaktadır (Spong ve ark., 2005). Amerika Robotik Enstitüsü¹ (RIA) tarafından yapılan tanıma göre bir robot, çeşitli görevlerin yerine getirilmesi için değişken ve programlanmış hareketlerle malzemeleri, parçaları, araçları veya özel cihazları taşımak üzere tasarlanmış yeniden programlanabilir çok işlevli bir manipülatördür (Nonami ve ark., 2014). Buna ek olarak, herhangi bir robotik sistem geliştirebilmek için, robotik alanının, farklı tasarım alanlarının (mekanik, elektrik–elektronik ve yazılım vd.) başarılı bir şekilde çok karmaşık bir sistemde toplandığını ve disiplinler arası bir alanı temsil ettiğinin bilinmesi gerekir. Uygulama açısından bakıldığında, robot yapılandırılmasını sadece mekanik gereklilikler değil, elektrik ve yazılım gereklilikleri de büyük ölçüde etkiler ve hatta bazen daha baskın olur (Nof, 1999).

Robotik sistemleri kendi altında, sabit bir çalışma uzayına sahip olan Manipülatör

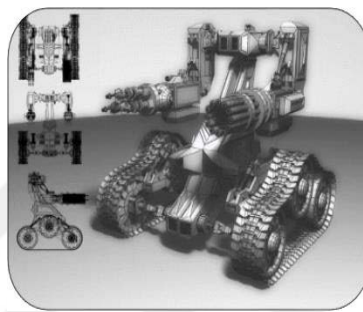
¹Robotic Institute of America



(a) Mobil robotların temel hareket yapılandırılma stratejileri.



(b) Tekerlekli Mobil Robot



(c) Paletli Mobil Robot

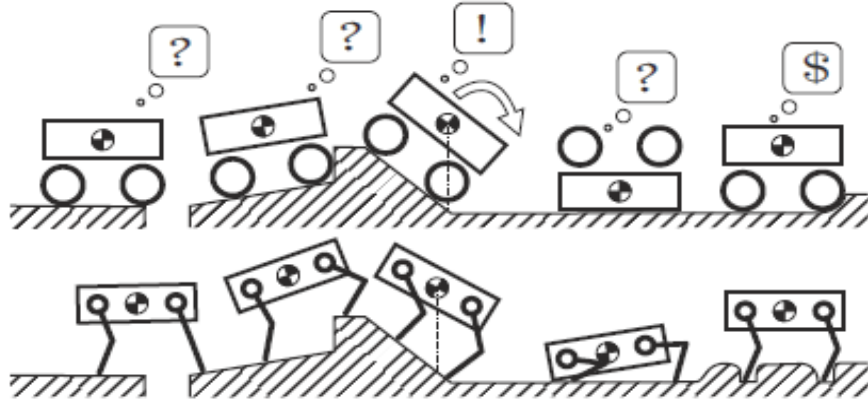


(d) Ayaklı Mobil Robot

Şekil 1.2. Mobil robotların temel hareket yapılandırma şekilleri

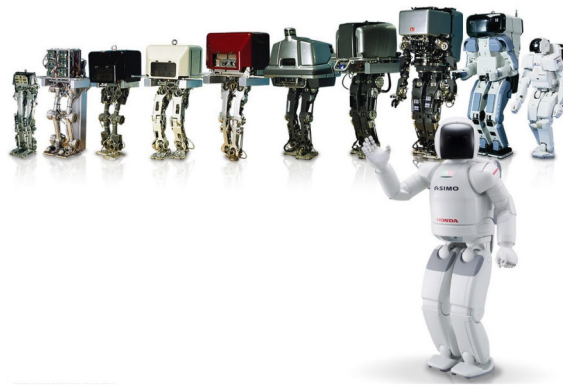
Robotlar ve taşınabilir bir çalışma uzayına sahip olan Mobil Robotlar diye iki ana alanda sınıflandırılabilir. Bir mobil robot tasarlanırken, hareket stratejisi problemi için robotun tamamlaması istenen görevlerin gerektirdikleri, çalışma ortamının ve çevrenin kısıtlamaları, kullanılan eyleyicilerin kısıtları ile güç kaynağı ve enerji ihtiyacı gibi konulara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda düşünüldüğünde, Şekil 1.2’de gösterildiği gibi, mobil robotların hareketini sağlayacak üç temel yapılandırma şekli vardır. Her bir hareket yapılandırması belirli bir uygulama alanına yönelik kendine özgü karakteristikler göstermektedir.

Tekerlekli robotlar çok hızlı hareket edebilirler, fakat düz bir arazi üzerinde hareket gerekliliği vardır. Paletli robotlar daha engebeli arazilerde hareket edebilirler ancak tekerlekli robotlara göre daha yavaştır. Ayaklı robotlar, daha fazla hareketlilik ve esneklik gösterdiğinden, yüksek arazi adaptasyonuna sahip olduklarından ve çevreye daha az hasar verdiklerinden dolayı tekerlekli ve paletli robotlara nazaran zorlu arazilerde daha üstündür (Şekil 1.3). Bu üstünlük ve yeryüzünün yaklaşık %80’inin geleneksel tekerlekli taşıtlar ile erişilemez olduğu (Silva ve Machado, 2012) gerçeği göz önüne alındığında, ayaklı robotlar, mobil robotlar alanında daha çok ön plana çıkmaktadır.



Şekil 1.3. Tekerlekli ve ayaklı robotların zorlu arazi koşullarındaki performanslarını karşılaştıran piktogram (Remy (2011)'nin çalışmasından alınmıştır.)

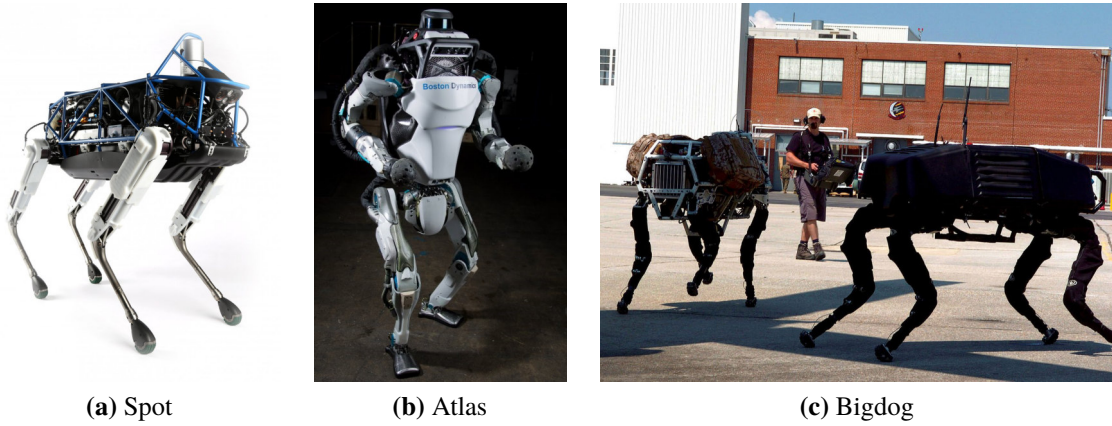
Bu yüzden, ayaklı robotlar, literatürde yeni olmamasına rağmen günümüzde halen birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Teknolojinin gelişimine paralel, algılayıcılar ve eyleyiciler gibi mobil robotların önemli bileşenlerindeki teknolojik gelişmeler bu ilgiyi güncel tutmaktadır. Buna en iyi örnek olarak Honda R&D Co.Ltd. firmasına ait Humanoid Robot projesi gösterilebilir (Şekil 1.4). 1986 yılında başlayan bu projenin geliştirilmesine günümüzde halen devam edilmektedir. Birçok insan benzeri hareketi taklit edebilen ve proje kapsamında geliştirilen robotların son sürümü olan ASIMO¹ (Hirai ve ark., 1998; Sakagami ve ark., 2002; Chestnutt ve ark., 2005) ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte, Amerikan Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA²) desteği ile Boston Dynamics firması tarafından tamamlanan ve bugün dört ayaklı robotlar alanında standartları belirleyen BigDog projesi (Raibert ve ark., 2008), bu ilginin ticari firmalar ve devlet kuruluşları tarafından da paylaşıldığını göstermektedir (Şekil 1.5c).



Şekil 1.4. Honda R&D Co.Ltd. firması tarafından iki ayaklı robotlar üzerine yürütülen proje kapsamında 1986 yılından günümüze kadar geliştirilen robotlar

¹Advanced Step in Innovative MObility

²The Defense Advanced Research Projects Agency



Şekil 1.5. Boston Dynamics firması tarafından geliştirilen ayaklı robotlar

Üstelik, daha sonra Google® firmasının, ayaklı robotlar üzerine birçok araştırması olan Boston Dynamics firmasını satın alarak, robotik alanında büyük bir etki yaratan, Bigdog robotunun halefi Spot (Şekil 1.5a) ve antropomorfik¹ bir robot olan Atlas (Şekil 1.5b) gibi yeni ayaklı tasarımlar geliştirmesi, ayaklı robotlar üzerine olan bu ilginin sürdürülmeye devam edeceğini ve hatta artacağını göstermiştir.

1.1. Tezin Motivasyonu

Bölüm 1’de bahsedilen gelişmelere ve diğer mobil robotlara olan üstünlüklerine rağmen, ayaklı robotlar ile ilgili yapılan çalışmalar henüz deneysel ortamların ötesine geçememiştir. Araştırmacılar tarafından geçtiğimiz on yılda geliştirilen ve günümüzde üzerinde araştırmalara devam edilen birçok ayaklı robot, kararlı bir şekilde yürüme, koşma, zıplama gibi dinamik hareketleri ancak engebesiz ve düz bir zeminde yapabilmektedir ve üstelik bu robotların, endüstriyel veya günlük işlerde destek eleman olarak diğer mobil robotlar gibi tam anlamıyla kullanımı henüz mümkün değildir. Bunun başlıca sebebi, ayaklı robotların yapısından dolayı çok yüksek derecede doğrusal olmayan kararsız dinamik özellikler göstermesi ile birlikte çok serbestlik dereceli kararsız bir sistemin gerçek zamanlı kontrolünün oldukça güç ve karmaşık olmasıdır. Buna ek olarak, mobil robotlarda enerji ihtiyacının sınırlı bir güç kaynağından karşılanması gerektiğinden çalışma sürelerinin kısıtlı olmasıdır.

Yukarıda belirtilen konuların ışığında, ayaklı bir robotik sistemin destek eleman olarak kullanılabilmesi için halen geliştirilmesi gereken yüksek hareket yeteneği, kendini dengeleme becerisi ve enerji verimliliği gibi birçok yönü olduğu açıkça görülmektedir. Sözü

¹Antropomorfizm, sözlük anlamı olarak insana ait özelliklerin insan dışındaki varlıklara yüklenmesi durumudur.

edilen yetersiz yönlerinin araştırılıp geliştirilmesi ve sonucunda yüksek hareket kabiliyetine sahip dört ayaklı bir robot dizayn edilebilmesi için mekanik, elektrik-elektronik, yazılım ve kontrol teorisi gibi birçok disiplini kesiştiren disiplinler arası bir çalışma gerekmektedir. Nitekim, dinamik yürüyüşü dengeli ve kararlı bir şekilde gerçekleştirebilme becerisine sahip hidrolik tahrikli dört ayaklı bir robot geliştirilmesinin çok yönlülüğü sayesinde birçok disiplin alanına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu noktada, bu tez çalışmasının başlıca motivasyon kaynağı; ayaklı robotlar alanında, özellikle dört ayaklı robotlar üzerine bugüne kadar yapılmış çalışmaların dokunmadığı eksik ve yetersiz yönler belirlenerek bunlardan hangilerine nasıl bir katkı sağlanabileceği ve şu andaki mevcut durumun nasıl geliştirilebileceği konularına değinen bir cevap aramaktır.

1.2. Tezin Amacı ve Yaklaşımı

Bu tez çalışmasının ana amacı imalat sanayi, savunma sanayi, askeri operasyonlar, lojistik, arama ve kurtarma, havacılık ve uzay bilimleri gibi geniş uygulanma alanlarında konvansiyonel mobil robotların yerine kullanılacak ve özellikle bilimsel amaçlı kontrol teorisi, dört ayaklı dinamik ve statik yürüyüş tipleri ve şablonları, ayaklı robotların adım atma çevrimleri ve adım evreleri arası geçişleri, ayaklı robotlarda denge gibi konuların araştırılmasında ve geliştirilmesinde kullanılacak yetenekte ve beceride hidrolik tahrikli dört ayaklı bir robot geliştirilmesine katkı sağlamaktır.

Böylesine karmaşık ve gelişmiş yeni bir robot tasarımı yapabilmek için öncelikle mevcut yaklaşımlar ve metodlar değerlendirilmeli ve sonrasında gerekli görülen konularda bazı yeni yaklaşımlar ve metodlar sunulmalıdır. Bu bağlamda, ilk önce geçmiş çalışmalar irdelenerek, tasarlanması düşünülen robotun özellikleri ve yapılandırması belirlenmiş ve tanımlanmıştır. Robot özelliklerine ve yapılandırmasına karar verildikten sonra ayaklı robotlar alanındaki mevcut tasarım çalışmalarında başvurulan yöntemler irdelenmiş ve benzetim çalışmalarının desteği ile tasarım çalışmalarına başlanmıştır. Bu noktada, ayaklı bir robotun performansını etkileyen en önemli bileşenin bacak mekanizması olduğu gerçeği dikkate alınarak ilk önce bacak mekanizmasının tasarımına odaklanılmıştır.

Literatürde bacak tasarımı için sıklıkla başvurulan yöntem olan biyomimetik¹ yaklaşımın bacak mekanizmasının tasarımını kısıtladığı düşünülerek, bu noktada tasarımı iyileştirebilmek için yine doğadan esinlenilerek oluşturulmuş algoritmalara başvurulmuştur.

¹Sözlük anlamı olarak doğadaki modelleri inceleyen, sonra da bu tasarımları taklit ederek veya bunlardan ilham alarak insanların problemlerine çözüm getirmeyi amaçlayan bir bilim dalıdır.

Robotun hareketi için gerekli silindir kuvvetleri ve dolayısıyla hidrolik güç kaynağının yükü azaltılmaya çalışılmıştır. Bu sayede bacak mekanizmasının başlangıçta bazı kabuller ile kısıtlanması önlenmiştir ve enerji verimliliği açısından optimal bir yaklaşımla mekanizma tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca bacak mekanizması tasarımı ile eşzamanlı olarak tasarıma uygun hidrolik eyleyici tasarımı da gerçekleştirilmiştir. Bu noktada, hidrolik güç ünitesinde kullanılan servovalfin benzetim çalışmalarında kullanılabilmesi için sistem tanılaması optimizasyon temelli alternatif bir metoda başvurularak yapılmıştır. Bacak mekanizması tasarımı tamamlandıktan sonra yine benzetim çalışmaları ile desteklenerek tasarımın doğrulama ve geçerli kılma testleri gerçekleştirilmiştir. Burada, robotun planlanan yük taşıma kapasitesi ve kendi ağırlığı göz önüne alınarak ve yine enerji verimliliği açısından bacak ağırlığını azaltabilmek için, ayaklı robotlar literatüründe daha önce uygulanmamış topoloji optimizasyonu metoduna başvurulmuştur.

Enerji verimliliği ve mekanik özellikler temelli bir yaklaşımla optimize edilen bacak tasarımı tamamlandıktan sonra adım atma ve yürüyüş analizlerine başlanmıştır. Robot bacağın çalışma uzayı elde edilerek buna uygun bir yörünge sentezlenmiştir. Bu noktada, adım atma çevrimini farklı dört ayaklı yürüyüş modellerine göre ayarlayabilmek için, literatürde sıklıkla başvuru Merkezi Örüntü Üretici¹ (MÖÜ) metoduna başvurulmuştur. Yörünge sentezi tamamlandıktan sonra konum kontrolü için farklı kontrolcü tipleri ile benzetimler gerçekleştirilerek kontrolcü parametrelerinin optimizasyonu için ayaklı robotlar literatüründe daha önce uygulanmamış alternatif metotlara başvurulmuştur. Önerilen kontrolcülerin performansları kendi aralarında karşılaştırılarak kontrolcü tasarımı tamamlanmıştır. Tasarlanan kontrolcülerin doğrulama ve geçerli kılma testlerini gerçek zamanlı yapabilmek için gerçek zamanlı kontrol ve veri okuma yazılımı geliştirilmiştir.

Son olarak, dört ayaklı yürüyüş analizlerine başlanmıştır. Farklı tipteki dinamik yürüyüş modelleri incelenerek robot hareketinin kinematik analizleri yapılmıştır. Bu noktada, farklı yapılandırmalardaki ve boyutlardaki robotlarda dört ayaklı dinamik yürüyüş tiplerinin analizlerini yapmak için kullanılacak bir yazılım geliştirilmiştir.

1.3. Tezin Önemi ve Literatüre Katkısı

Bölüm 1.2'de belirtilen konular ışığında, gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmalarının tamamlanmasıyla literatüre önemli katkıların sağlanacağı düşünülmektedir.

¹Türkçe literatürde "Central Pattern Generator" tamlamasının karşılığı olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasının sağladığı düşünülen katkılar aşağıda belirtilmiştir.

- Dört ayaklı bir robotta kullanılmak üzere iki serbestlik dereceli hidrolik tahrikli bir robot bacağı tasarımının yapılması.
 - Yüksek hareket kabiliyeti ve yük taşıma kapasitesi göz önüne alınarak, literatürde genelde yapılan biyomimetik yaklaşımların aksine hem mekanik hem de topolojik özelliklere dayanan yeni bir optimizasyon yaklaşımı ile sıfırdan bir bacak tasarımı yapıldı.
- Tasarımı yapılan robot bacağın konum kontrolü için farklı yapılarda ve farklı algoritmalarda çeşitli kontrolcüler tasarlanarak performanslarının karşılaştırılması.
 - Konum kontrolü için tasarımı yapılan robot bacağın dinamik modeli elde edilerek, basit ama etkili, ve de uygulama açısından en yaygın olarak kullanılan PID kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu yapılarak, PID tabanlı bir Bulanık Mantık kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu yapıldı. Ayrıca Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolcü eğitimi yapılarak, elde edilen iki farklı Bulanık Mantık Kontrolcü ile temel alınan PID kontrolcü performansları karşılaştırıldı.
 - Tasarımı tamamlanan robot bacağın çalışma uzayı belirlenerek, adım mesafesi ve adım yüksekliği parametrelerine bağlı bir referans yörünge hesaplaması yapıldı.
 - Ayaklı robotlar alanında, ileride yapılacak her bir bacak için konum kontrolü çalışmalarında, önerilen kontrolcülerin uygulanabilmesi veya geliştirilebilmesi için gerekli stratejiler ve yöntemler belirlendi.
- Tasarımı yapılan robot bacak için özel olarak hidrolik eyleyici tasarımı ve hidrolik güç ünitesi bileşenlerinin sistem tanılamasının yapılması.
 - Yüksek hareket kabiliyeti ve yük taşıma kapasitesi göz önüne alınarak, dört ayaklı bir robotun hareketi için gerekli kuvvetleri üretebilecek bir hidrolik eyleyici boyutlandırması yapıldı.
 - Hidrolik güç ünitesinde kullanılan endüstriyel bir servovalfin sistem tanılaması, literatürdeki genel yaklaşımdan farklı olarak optimizasyon temelli bir yaklaşım kullanılarak yapıldı.
- Tasarımı yapılan robot bacak ile dört ayaklı bir robotun ileri ve ters kinematik analizleri ve dört ayaklı bir robotun statik veya dinamik yürüyüşü sırasında bacağın

izlemesi gereken referans bir yörüngeyi sentezi yapılarak bir MÖÜ tasarımının yapılması.

- Tasarımı tamamlanan robot bacağına çalışma uzayı belirlenerek, adım mesafesi ve adım yüksekliği parametrelerine, ve ayrıca adım atma fazları arasında geçişlerde yer tepki kuvvetlerine bağlı bir referans yörünge hesaplaması yapıldı.
- Farklı dört ayaklı yürüyüş modellerine göre, robotun hareketi boyunca her bir adım atma döngüsü için referans yörüngeyi üretecek bir MÖÜ tasarlandı.
- Tasarlanan bacağın kinematik özellikleri kullanılarak, dört ayaklı bir robotun yapılandırılması ve yönelimi ile birlikte farklı yürüyüş tipleri için gerekli kinematik analizleri yapabilecek ve görsel çıktılar verebilecek bir yazılım geliştirildi.
- Robot bacağın gerçek zamanlı konum kontrolü ve yine gerçek zamanlı veri okuma için bir yazılım geliştirilmesi.

Ayrıca, literatürde ayaklı robotlar üzerine birçok yayın olmasına rağmen, henüz ayaklı robotların performanslarını etkileyen en önemli bileşen olan bacak mekanizmasının tasarımında izlenebilecek tamamen benimsenmiş genelgeçer bir metodoloji veya strateji ortaya konmadığı gerçeği (Semini ve ark., 2017) ile hareketle, ayaklı robotlar için ileride yapılacak bacak mekanizması tasarımı ve optimizasyonu uygulamalarında izlenebilecek bir metodoloji geliştirilmiştir. Buna ek olarak, önerilen metodolojinin uygulanabilmesi veya geliştirilebilmesi için gerekli stratejiler ve yöntemler verilmiştir.

1.4. Tez Planı ve Sunuş

Bölüm 1’de robotlar ve mobil robotlar ile ilgili genel bilgiler verilerek, mobil robotların temel hareketlilik yapılandırılmalarından bahsedilmiştir. Ayaklı robotların üstünlüklerine ve eksik yönlerine değinilerek yapılan çalışmanın motivasyonu ve kapsamına değinilmiştir. Bölüm 2’de literatürde bulunan ayaklı robotlar üzerine yapılmış çalışmalar temel yürüyüş stratejilerine göre sınıflandırılarak kronolojik sıraya göre verilmiştir. Ayaklı robotlar literatürü incelinirken özellikle çalışmanın temel çıkış noktası olan dört ayaklı robotlar ile ilgili araştırmalara odaklanılmıştır. Bu çalışma kapsamında tasarımı yapılan sisteme ait özelliklerin belirlenmesinde kullanılan performans ölçütleri ve tasarım kriterleri Bölüm 3’de tanımlanmıştır. Ayrıca, sistem yapılandırılmasının belirlenmesi yine bu bölümde anlatılmıştır. Bacak mekanizmasının, literatürde genelde yapılan biyomimetik yaklaşımların aksine optimizasyon yaklaşımı ile tasarımı Bölüm 4’de tartışılmıştır. Bacak mekanizmasının kinematik analizi ve sentezi yine bu bölümde açıklanmıştır ve bu bölümde

tamamen evrimsel algoritmaya dayanan sıfırdan bir tasarım elde edilmesine yönelik bir yaklaşım önerilmiştir. Elde edilen bacak mekanizması boyutlarını temel alarak robot bacağıın fiziksel ve dinamik model tasarımı Bölüm 5’de sunulmuştur. Tasarım çalışması kapsamında gerçekleştirilen hareket ve yapısal analizler bu bölümde raporlanmıştır. Robot bacağıın belirlenen bir hareketi yapabilmesi için gerekli eklem torklarının ne olması gerektiği ile ilgilenen konum kontrolü probleminin çözümüne Bölüm 6’da bir yanıt aranmıştır. Kontrolcü tasarımı ile eşzamanlı ilerleyen bacak modeli tasarımının tamamlanmasının ardından imal edilen bacak ilk örnek modeli ve tasarlanan kontrolcü performansını değerlendirmek için gerçek sistem üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar Bölüm 7’de sunulmuştur. Son olarak, sonuç ve önerilerin tartışıldığı Bölüm 9 ile tez sunumu sonuçlandırılmıştır.

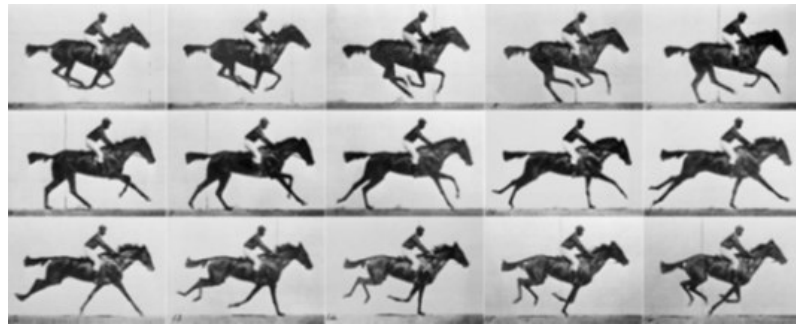


2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

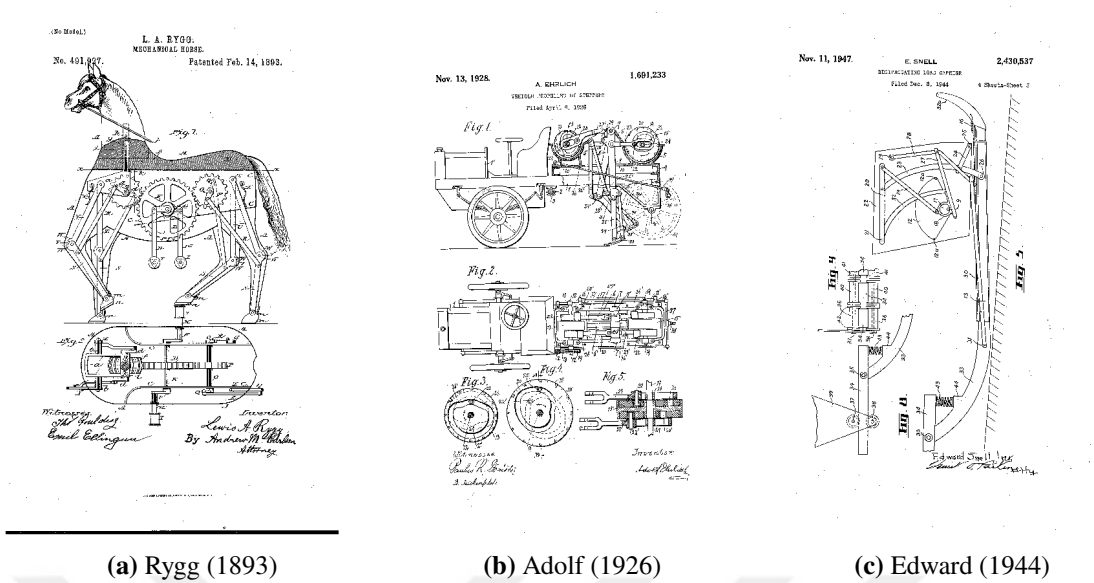
Bu bölümde, ayaklı hareket üzerine yapılan geçmiş dönem araştırmalara; özellikle, ayaklı robotlar literatürünün önemli kilometre taşlarına değinilmiştir. Geçmiş dönem araştırmalardan, öncelikle canlıların yürüyüşü ve bunu taklit edebilen makineler üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Daha sonra, çalışmanın konusu olan ayaklı robotların tarihçesinden bahsedilmiştir. Ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalarda yürüyüş stratejisi olarak iki temel yaklaşım söz konusudur; statik yürüyüş ve dinamik yürüyüş. Bu sebepten dolayı ayaklı robotlar tarihçesi; Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar ve Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar olmak üzere iki temel başlık altında kronolojik sırayla anlatılmıştır. Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar başlığında, engebeli yüzeylerde hareket ve engelleri aşma gibi arazi adaptasyonunun daha karmaşık problemleriyle başa çıkmak için çok bacaklı sistemlerin kontrol edilmesine yönelik tekniklerin geliştirilmesi üzerine yapılan araştırmalar; Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar başlığında ise, koşma ve zıplama gibi oldukça gelişmiş hareket kabiliyetlerine sahip ayaklı sistemler geliştirebilmek için dinamik kontrol kavramlarının ve tekniklerinin ilerletilmesi üzerine yapılan araştırmalar verilmiştir.

2.1. Yürüyen Makineler Tarihçesi

Literatürde canlıların yürüyüşü üzerine yapılan çalışmaların ilki ve belki de en önemlisi, 19. yüzyılda İngiliz fotoğrafçı Muybridge (1883)'in insan da dahil olmak üzere kırkın üzerinde canlının yürüme, koşma, zıplama gibi hareketleri yaparken fotoğraflarını çektiği çalışmadır (Muybridge, 1887, 1957). Şekil 2.1'de bir kısmı gösterilen tek resim tekniği ile çekilen bu fotoğraf kareleri canlıların hareketlerini anlamamızda bir dönüm noktası olmuştur ve hala özellikle dört ayaklı canlıların yürüyüşü üzerine yapılan araştırmalarda referans gösterilerek varlığını sürdürmektedir.



Şekil 2.1. Eadweard Muybridge'in resimlerinden elde edilmiş kareler.



(a) Rygg (1893)

(b) Adolf (1926)

(c) Edward (1944)

Şekil 2.2. Ondokuzuncu yüzyıl sonları ve Yirminci yüzyılın ilk yarısında yürüyen makineler ile ilgili yapılan patent başvurularından ve çizimlerinden örnekler.

Yürüeyebilen makinelerle ilgili yapılan önemli çalışmaların başlangıcı da yine 19. yüzyıl olmuştur. Yürüeyebilen ilk mekanizma, 1878 yılında Paris'te düzenlenen Dünya Fuarı¹'nda karşımıza çıkmaktadır. "The Plantigrade Machine"² adındaki bu makine, Rus matematikçi Pafnutiy L. Tchebyshev'e ait, dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürebilen lambda mekanizmasını temel almaktadır (Lucas, 1891). Buna ek olarak, geçtiğimiz yüzyılın son çeyreğinde son derece popüler olan iki yürüeyebilen makine Melwalk Mark III (Kaneko ve ark., 1985a,b) ve Dante (Wettergreen ve ark., 1993) bu mekanizmayı esas alarak tasarlanmıştır. 20. yüzyılın son çeyreğine kadar yürüeyen makineler üzerine yapılan çalışmalarda, sabit bir adım atma hareketini taklit edebilecek mekanizmalar tasarlamak üzerine olan bu yaklaşım benimsenmiştir ve bu yaklaşım ile birçok tasarım uygulaması ve patent başvurusu (Şekil 2.2) yapılmıştır (Drederick ve Grass, 1868; Lucas, 1891; Adolf, 1926; Edward, 1944; Urschel, 1945). Şekil 2.2a'da bir çizimi gösterilen Mekanik At isimli yürüeyebilen bir makine için Rygg (1893) tarafından yapılan patent başvurusunun ayaklı bir makine için yapılan ilk patent başvurusu olduğu, ancak bu çizimin sadece fikir aşamasında kaldığı düşünülmektedir.

Yukarda bahsedilen yaklaşım ile tasarlanan makineler, kullanılan mekanizmaların sabit bir yörüngesi olduğundan sınırlı bir hareket kabiliyetine sahipti ve aynı zamanda bu tip yürüyüş taklidi yapan makinelerin adım atma şekillerinin kontrol edilebilmesi

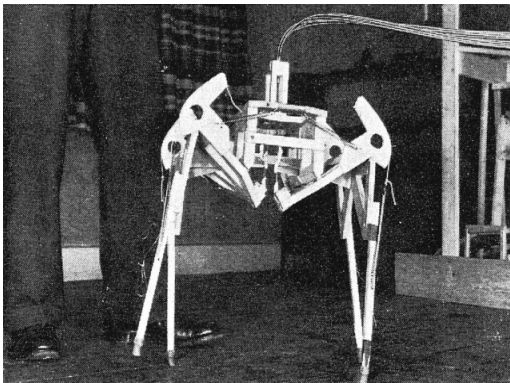
¹Exposition Universelle

²Türkçe karşılığı düz taban yada ayakta yürüeyen makine demektir.

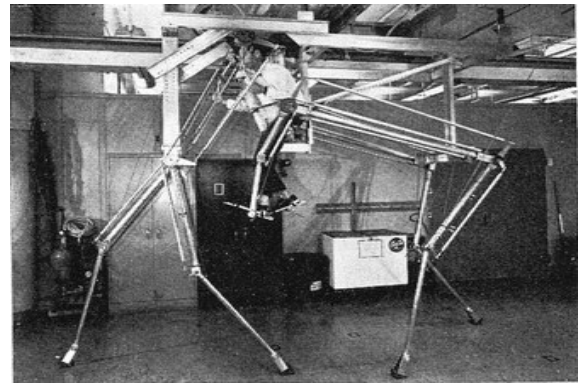
mümkün değildi. Farklı arazi şartlarına uyumlu, adım atma şeklinin kontrol edilebileceği, birbirinden bağımsız bacaklara sahip yürüyebilen makineler tasarlayabilmek için daha sofistike bir yaklaşımın gerekliliğini gören araştırmacılar, 20. yüzyılın ikinci yarısında, özellikle bilgisayar teknolojisinin icadı (Eckert ve Mauchly, 1947; Shurkin, 1996) gibi teknolojik gelişmelerin kazandırdığı ivme ile yürüyüşün kontrol edilebildiği makineler geliştirmeye başlamışlardı. Bu noktada, askeri ve uzay araştırmalarının çok büyük etkisi olmuştur; tekerlekli ve paletli harekete göre arazi uyumu yönünden göstermiş olduğu üstün performanstan dolayı askeri ve uzay araştırmalarında çalışan araştırmacılar yürüyebilen makineler üzerine odaklanmışlardır (de Santos ve ark., 2006b).

2.2. Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar

Bağımsız olarak kontrol edilebilen bacaklara sahip yürüyebilen bir makine tasarlamaya yönelik bilinen ilk ciddi girişim, 1940 yılında Birleşik Krallık Savaş Departmanı desteğiyle Hutchinson (1967) tarafından denenmiştir. W. H. Allen & Company Ltd. firması için çalışan Hutchinson, çok büyük zırhlı bir araç için ayaklı hareketin paletli hareketten daha iyi olacağını öne sürmüştü ve zırhlı araç tasarımı için, yaklaşık 60cm yüksekliğinde, operatörün oturduğu bir konsola bağlı dört adet esnek kablo tarafından kontrol edilebilen, toplamda sekiz ekleme sahip, dört ayaklı bir model oluşturmuş ve test etmiştir (Şekil 2.3a). Ancak o yıllarda İngiltere İkinci Dünya Savaşı'na girdiğinden, Birleşik Krallık Savaş Departmanı bu tür gelişmelere daha fazla ilgi gösterememiş ve sonuç olarak bu proje tamamlanamadan sonlandırılmıştır (Todd, 1985a).



(a) Her bir bacağı kontrol etmek için operatörün bir uzvunu kullandığı Hutchinson'a ait deneme modeli.



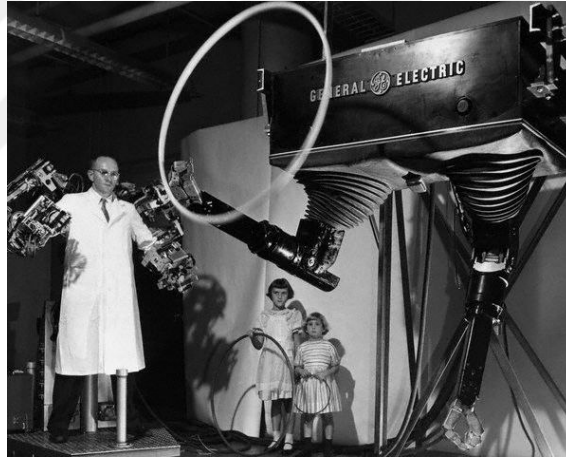
(b) General Electric Araştırma ve Geliştirme Merkezi tarafından yürüyebilen makineler üzerine yapılan uygulanabilirlik çalışması.

Şekil 2.3. Yirminci yüzyıl ortalarında ayaklı makineler üzerine yapılan iki önemli çalışma.

Hutchinson'ın yaptığı çalışmaların devamında, yaklaşık yirmi yıl boyunca ayaklı

bir sistem kullanılmasının daha iyi bir sonuç verebileceği düşünülmüştür. Önerilen hidrolik tasarımda (Şekil 2.4b), her köşede dört ayak olacak şekilde toplamda 16 ayak vardı ve eyleyicilerin yatay ve dikey hareketlerini ayaklara aktarmak için pantograf mekanizması (Şekil 2.4a) kullanılmıştır. Ne yazık ki, böyle bir makinenin engebeli bir zeminde ve engeller arasında kontrol edilmesine yönelik uygun bir yöntem bulunamamıştır ve bu çalışmadan da tamamlanamadan vazgeçilmiştir. Ancak tüm bu çalışmalar, yürüyen makineler literatüründe bir kilometre taşı olarak görülen başka bir çalışmanın mümkün olmasını sağlamıştır.

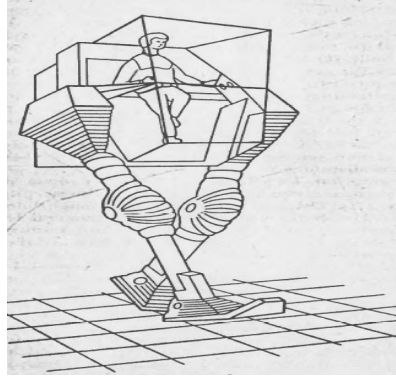
Bahsi geçen çalışmanın temeli ATAC bünyesindeki yürüyüş laboratuvarının 1962 yılında General Electric (GE) firması ortaklığında, sonrasında ayaklı hareket literatüründe büyük bir etki yaratacak, bir proje üzerine çalışmaya başlaması ile atılmış oldu. Bu anlaşmanın yapıldığı yıllarda Liston ve Shigley çalışmalarını kontrol problemi üzerine yoğunlaştırmışlardı (Liston, 1969). GE ise aynı zamanlarda Siberetik Antropomorfik Makineler¹ (CAMs) adını verdiği, operatörün kollarına kuvvet geri beslemesi kullanarak kontrol edilebilen telemanipülatörler üzerine çalışmalar yapmaktaydı.



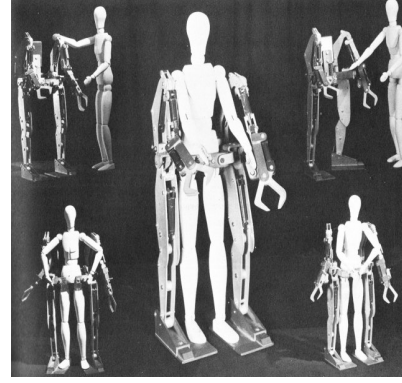
Şekil 2.5. Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde geliştirilen Handyman.

Şekil 2.5’de gösterilen Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde 1958-59 yılları arasında Birleşik Devletler Ordusu Hava Kuvvetleri ve Birleşik Devletler Atom Enerjisi Komisyonu ortaklığında yürütülen Uçak Nükleer Tahrik Programı için geliştirilen Handyman (Mosher, 1968a) adındaki telemanipülatör zamanının en popüler çalışmasıydı ve haptik teleoperasyon teknolojisinde bir kilometre taşı olma özelliğine sahiptir. GE, o yıllarda, zaten Hardiman adında bir dış iskelet geliştirdiğinden (Şekil 2.6b), ATAC için insan boyutlarına göre dışiskelet sayılmayacak kadar büyük, iki ayaklı, operatörünün içerisinde bulunduğu, yürüyebilen bir makine yapmak için Handyman’de kullanılan kuvvet geribesleme servo

¹Cybernetic Anthropomorphous Machines



(a) GE tarafından ATAC için önerilen yürüyebilen iki ayaklı makineye ait şematik çizim.



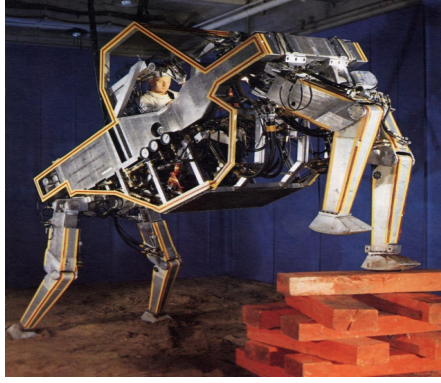
(b) Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde geliştirilen Hardiman adındaki dış iskelet modeli

Şekil 2.6. GE bünyesinde yapılan iki ayaklı makine ve dışiskelet çalışmalarına ait görseller.

prensibini kullanmayı önermişti (Şekil 2.6a). Fakat ATAC tarafından gelen talep üzerine, dört ayaklı bir makine yapılmasına karar verilmiş ve Hutchinson'ın çalışmaları ile hemen hemen aynı yıllarda yapılan fizibilite çalışmalarının (Şekil 2.3b) başarıyla tamamlanması üzerine tam ölçekli dört ayaklı bir yürüyüş makinesi yapılması için GE ile ATAC arasında bir sözleşme imzalanmıştı (Mosher, 1968a).

Todd (1985a) tarafından belirtildiği gibi bu araştırma başlangıçtaki fikre bağlı kalarak iki ayaklı makineler üzerine yapılırdı, belki de operatör, insan doğasına benzerliğinden dolayı iki ayaklı bir makineyi dört ayaklı bir makineye göre daha iyi kontrol edebilecekti ve devamında yürüyen makineler tarihi şimdikinden çok farklı olabilecekti. Fakat yine de, 1962-1968 yılları arasında, Ralph S. Mosher tarafından dört ayaklı olarak tasarımı ve imalatı yapılan bu makine ayaklı robotlar alanında birçok çalışmaya esin kaynağı olarak yön vermiştir ve günümüze kadar ayaklı hareket üzerine yapılan çalışmalarda referans gösterilerek popülerliğini korumuştur.

Günümüzde halen Birleşik Devletler Ordusu Ulaşım Müzesi'nde sergilenmekte olan, Walking Truck (Mosher, 1968b, 1969; Liston ve Mosher, 1968) adındaki yürüyebilen bu makine, yaklaşık 3 m boyundaydı, 1400 kg ağırlığındaydı ve saatte 8 km gibi bir hıza çıkabilmekteydi. Ek olarak, Hutchinson (1967)'in çalışmasına benzer bir kontrol stratejisi kullanılmaktaydı. Dört ayaklı ve toplamda 12 serbestlik dereceli aracın, 3 serbestlik derecesine sahip her bir ayağı, hidrolik servo döngülerle operatörün bir kol veya bacağına bağlıydı; aracın ön bacakları operatörün kol hareketlerini takip ederken, aracın arka ayakları operatörün bacak hareketlerini takip ediyordu. Aracın hareketi için gerekli hidrolik güç, 90 Beygir gücünde içten yanmalı bir motor ile çalışan pompalar tarafından üretiliyordu.



(a) Ralph S. Mosher operatörlüğünde yapılan Walking Truck denemelerine ait görsel



(b) Birleşik Devletler Ordusu Ulaşım Müzesinde sergilenen Walking Truck

Şekil 2.7. Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde geliştirilen Walking Truck isimli dört ayaklı yürüyebilen makineye ait görseller.

Walking Truck imal edildiği zamana göre çok iyi bir performans göstermişti, ancak Raibert (1986)'ın belirttiği gibi kontrolü için çok iyi bir eğitime ve uzmanlığa ihtiyaç duyulmaktaydı ve operasyon süresi oldukça kısıtlıydı. Buna rağmen, Walking Truck, ayakların birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebildiği yürüyebilen makinelerin uygulanabilirliğini kanıtladığı için ve kendi zamanının ötesine geçerek ayaklı robotlarla ilgili birçok çalışmayı teşvik eden bir çalışma olması sebebiyle ayaklı hareket teknolojisinde son derece önemli bir dönüm noktası olmuştur. Aynı yıllarda, yine Birleşik Devletler Ordusu ve uzayda, Ay'da ve diğer gezegenlerde hareketlilik problemlerine ilgi duyan NASA, GE firması ile olan projelere paralel, Space General Corporation (Aerojet General Corporation) firması ile askeri taşımacılık, gezegensel keşif ve engelli destek birimi olmak üzere en az üç uygulama alanı için ayaklı makinelerin geliştirilme olanaklarının araştırılması üzerine ortak projelere destek sağlamıştı (Morrison, 1968). Bu araştırma ve geliştirme serisi içerisinde geliştirilen yürüyen makinelere ait görseller Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Bu çalışmaların en önemli çıktısı, askeri taşımacılık için geliştirilen ve ayaklı makinelerin gelişim tarihinde bir başka kilometre taşı olarak kabul edilen, Iron Mule Train isimli sekiz ayaklı yürüyebilen makinenin imalatı olmuştur. Todd (1991) daha sonra herhangi bir teknik iyileştirme yapmadan sadece bazı bileşenlerinde küçük değişiklikler yaparak Iron Mule Train makinesine dayanan bir robot üretmişti ve yaptığı çalışmada denge problemi bağlamında ayaklı robotların avantajlarını ve sınırlarını göstermek için hala değerli bir buluş olduğunu belirtmişti. 21. yüzyıl başlarında, Morrison ve Mosher'in yaptığı çalışmalardan yaklaşık kırk sene sonra, bu görüşü destekleyen önemli bir gelişme olmuştur; DARPA, ayaklı hareket konseptini temel

alan zorlu ve engebeli arazi taşımacılığı fikrine tekrar başvurmuş ve Boston Dynamics firmasına BigDog robotunun geliştirilmesi için fon sağlamıştır.

Ayaklı hareket literatürüne ait önemli çalışmalar olmasına rağmen GE Walking Truck ve Iron Mule Train, ayaklı makinelerin tamamen mekanik olarak tasarlanmasına yönelik son girişimleri temsil etmektedir. Bu yaklaşımda, tasarım sadeliğinin getirdiği avantajlara nispeten zemin koşullarına uyum sağlayamamadan kaynaklanan dezavantajlar çok daha fazlaydı ve bu dezavantajların giderilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, 20. yüzyılın son çeyreğinde, Bölüm 2.1’de belirtildiği gibi ayaklı hareket alanında çalışan araştırmacıların bilgisayar ve elektronik alanındaki gelişmelerden etkilenmesi ile, ayaklı makinelerin tasarımında ve kontrolünde bilgisayar desteğine başvurulmuş yeni bir döneme geçilmiştir. 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren, analog veya kablolu elektronik mantık devreleri ile sınırlandırılan birkaç çalışma hariç, ayaklı robotların hemen hemen hepsinde belirli bir dereceye kadar bilgisayar kontrolü kullanılmıştır.

2.2.1. Statik Yürüyüşte Tam Otomatik sistemlere Geçiş Dönemi

Bu dönemdeki bilgisayar boyutları gözönüne alındığında, hareket eden sistemler için esnek depolanmış program kontrolünün gerekliliği aşılması gereken bir problemdi, ancak ilk önce mini bilgisayarların ve daha sonra mikroişlemcilerin icadı ile çok küçük makinelere bile bir çeşit bilgisayar işlem gücünün entegre edilebilmesi bu problemin aşılmasını mümkün kılmıştı. Ayrıca tam otomatik sistemlere geçiş döneminde, yürüyebilen makinelerin çoğu sonuçta bir operatör tarafından kontrol ediliyordu ve insan-makine arasında kontrol görevinin nasıl paylaşılacağına karar verilmesi gerekmektedir. Bu noktada, araştırmacılar, yürüyebilen makinelerin kontrol sistemlerini, stratejik kararların operatör tarafından alındığı ancak eklemlerin servo kontrolü gibi daha spesifik kararların bilgisayarlar



(a) Moon Rover

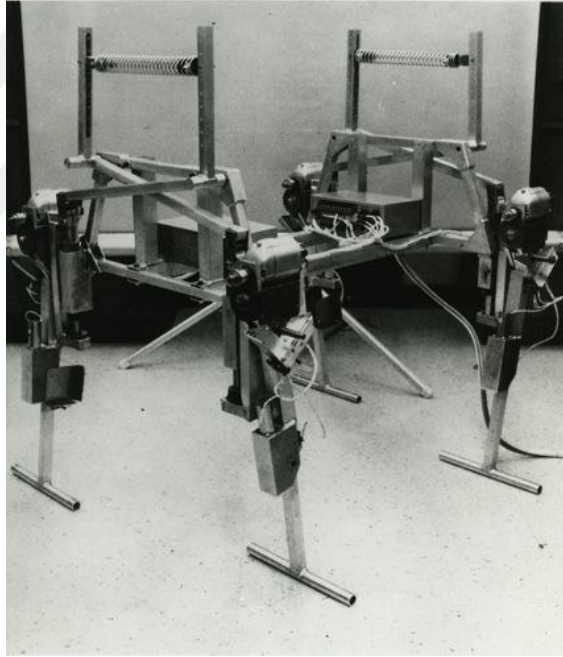
(b) Walking Chair

(c) The Iron Mule

Şekil 2.8. Space General Corporation firması tarafından 20. yüzyıl son çeyreğinde Birleşik Devletler Ordusu ve NASA tarafından sağlanan destek ile geliştirilen yürüyebilen makineler.

tarafından denetlendiği alt sistemler şeklinde yapılandırılarak bu problemin aşılmasını amaçlamışlardı.

Bilgisayar kullanılarak mevcut hareket etme tekniklerinin geliştirilmesine yönelik bilinen ilk ciddi girişim, Robert B. McGhee'nin önce South California Üniversitesi ve daha sonra Ohio State Üniversitesi bünyesinde yürüttüğü araştırma çalışmaları olmuştur. McGhee o yıllarda GE Walking Truck ile ilgili bir tanıtım gösterisini izlemişti ve makineyle ilgili asıl sorunun, operatörün kısa bir süre için bile olsa makinenin bacak hareketlerini koordine edememesi olduğunu fark etmişti. McGhee böyle bir makinenin bilgisayar veya elektronik bir mantık tarafından oluşturulan otomatik bir adım döngüsü kullanılarak kontrol edilebileceğini göstermeye karar verdi. O yıllarda Robert B. McGhee'nin, Belgrad Üniversitesi'nden Rajko Tomovic ile Sonlu-Durum Kontrol Teorisi¹ (Tomovic ve McGhee, 1966) üzerine çalışmaları vardı ve operatörü ikame edebilen otomatik bir döngü sistemi tasarlamak için bu yöntemi önermişti (McGhee, 1967).



Şekil 2.9. Andrew A. Frank ve Robert B. McGhee tarafından South California Üniversitesi bünyesinde geliştirilen Phony Pony isimli dört ayaklı robot.

South California Üniversitesi'nde çalışmalarına devam eden McGhee (1968), daha sonra, doktora danışmanlığını yaptığı Andrew A. Frank ile birlikte dört ayaklı yürüyüş üzerine araştırmalar yapmıştı (McGhee ve Frank, 1968; Frank ve McGhee, 1969). Aynı dönemde, insan hareketleri için bir model olarak sonlu durum makinesini öneren Robert B. McGhee ve Rajko Tomović tarafından teorik çalışmalarının yapıldığı Frank (1968)'in

¹The Theory of Finite-State Control

doktora çalışması kapsamında, Phony Pony¹ (Şekil 2.9) olarak adlandırılan, dönemin ilk otonom dört ayaklı robotunun imalatı gerçekleştirilmişti (Bekey, 2005). Phony Pony robotunda her bacak, birbirinin eşleniği ve iki serbestlik dereceli olacak şekilde tasarlanmıştı. Robotun bacakları ön ve arka çiftler aynı olacak şekilde monte edilip kontrol edilmişti. Ayrıca mikroişlemcilerin varlığından çok önce imal edildiğinden, bu robot, bitişik bir binanın ikinci katında yer alan uzak bir mini bilgisayar vasıtasıyla kontrol ediliyordu. Robotu bilgisayara bağlayan kablo Şekil 2.9'un sağ kenarında görülebilir. Robot, dahili herhangi bir kinematik veya dinamik modeli olmaksızın, limit sensörler ile eklemlerin durum geribeslemesi kullanılarak sonlu durumlu bir makine tarafından kontrol edilmişti.

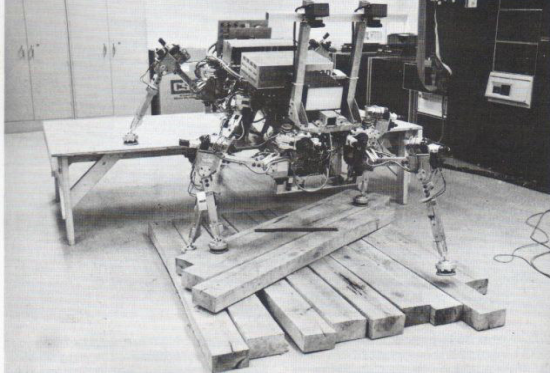
Ayaklı robotlar literatüründe, bilgisayar kullanımına geçiş dönemi içerisinde bir ilk olması sebebiyle, Phony Pony robotu son derece önemli bir kilometre taşıdır ve bu robotun asıl önemi McGhee'ye, robotların yürümesinde önemli bir dönüm noktası olacak olan, daha sofistike yürüyebilen robotlar üzerine çalışmalar (McGhee ve Jain, 1972; McGhee ve Pai, 1974; Gubina ve ark., 1974) yapması için ilham kaynağı olmasıdır. Ayrıca, Phony Pony çalışmasının o dönemdeki başarısı, Andrew A. Frank'e, antropomorfik sistemler üzerine önemli çalışmaları olan (Vukobratović ve Juricic, 1969; Vukobratović, 1973) ve iki ayaklı robotların hareket planlamasında çok önemli bir kavram olan Sıfır Moment Noktası² (ZMP) kavramını (Vukobratović ve Stepanenko, 1972, 1973; Vukobratović ve ark., 2001) literatüre kazandıran Miomir Vukobratović ile birlikte çalışma fırsatı sağlamıştır (Frank ve Vukobratović, 1969; Vukobratović ve ark., 1970a,b; Frank ve Vukobratović, 1970).

2.2.2. Aktif Uyum Kavramının Ortaya Çıkışı

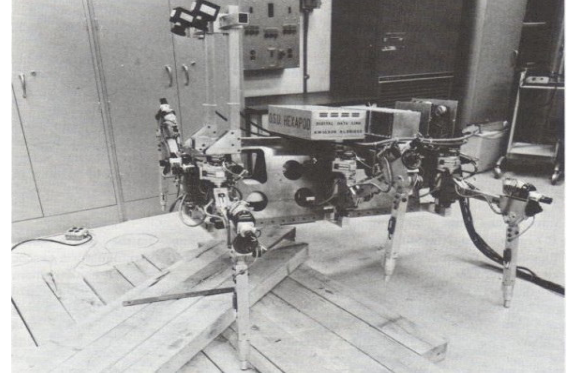
Yukarıda belirtildiği gibi Phony Pony robotundan sonra McGhee, ayaklı yürüyüş üzerine çalışmalarına Ohio State Üniversitesi'nde devam etmiş ve 1977 yılında, OSU Hexapod isimli, altı bacaklı, belirli bir kaç yürüyüş şeklini taklit edebilen, dönebilen, yana yürüyebilen, basit engelleri aşabilen, eklem bacaklılara benzer yapıda bir robot imalatını gerçekleştirmiştir (McGhee, 1977). Bu robot, 3 serbestlik dereceli birbirine benzer bacaklara sahipti. Ayrıca, altı adet bacakta, eyleyici olarak toplamda 18 adet elektrik motoru kullanılmıştı. Bu robotun en büyük özelliği bilgisayar kontrollü yürüyebilen ilk robot olmasıydı. Bilgisayarın asıl görevi, bacakları hareket ettiren elektrik motorlarının sürülebilmesi için yürüyüş boyunca makinenin kütle merkezinin ayakların sağladığı destek

¹Bazı kaynaklarda "The Californian Horse" ismiyle de anılmaktadır.

²Zero Moment Point



(a) Yüksek bir masadan inerken



(b) Engeli bir yüzeyde ilerlerken

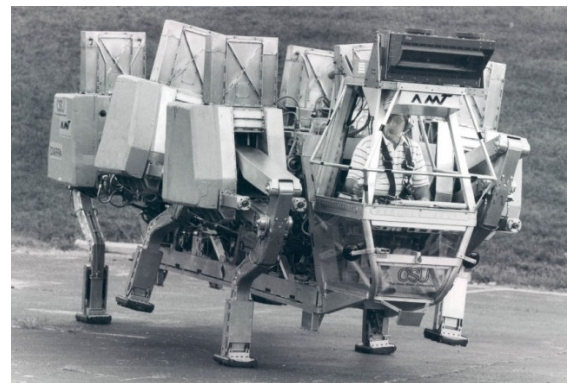
Şekil 2.10. Robert B. McGhee tarafından Ohio State Üniversitesi bünyesinde geliştirilen OSU Hexapod isimli altı ayaklı robot.

poligonunun içerisinde kalacak şekilde kinematik denklemleri çözmekti. Şekil 2.10'da OSU Hexapod robotunun iki ayrı versiyonu gösterilmektedir. Bu robotun diğer bir önemi ise robot kontrolü, yürüyüş üretimi, merdivenlere çıkmak ve engellerin aşılması, dönme, aktif uyumluluk, sensörlerin kullanımı ve çok işlemcili kontrol gibi çok sayıda deneysel çalışma için kullanılmış olmasıdır (McGhee ve Iswandhi, 1979; McGhee ve ark., 1979; McGhee, 1979; McGhee ve ark., 1980; Orin ve McGhee, 1981).

Çoğu temel bilimsel araştırmada olduğu gibi, OSU Hexapod robotuyla ilgili en dikkat çekici şey robotun kendisi değil, geliştirilmesi sırasında ortaya koyulan veya doğrulaması yapılan yeni kavramlardı. Bu robot sayesinde yapılan çalışmalarda, robotta kullanılan algılayıcı sistemler ile ayağın temas noktasındaki zemin yüzeyinin kesin seviyesi bilinemediğinden dolayı, tek başına konum kontrolünün yürüyen bir robot için yeterli olmadığı, bu yüzden de kontrol algoritmasında yüzeye uygulanan kuvvet geribeslemesinin



(a) Engeli arazide ilerlerken



(b) Düz bir zeminde ilerlerken

Şekil 2.11. DARPA tarafından desteklenen, Robert B. McGhee ve Kenneth J. Waldron tarafından Ohio State Üniversitesi bünyesinde geliştirilen ASV isimli altı ayaklı robot.

de kullanılması gerekliliği görülmüştü ve bu sayede aktif uyum kavramı ortaya çıkmıştı (Holland, 1983).

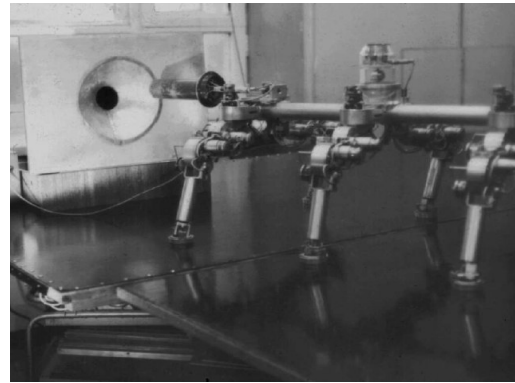
Ayrıca, Mcghee, o yıllarda hala Ohio State Üniversitesi'nde olan ve ayaklı robotlar üzerine önemli çalışmaları olan Kenneth J. Waldron ile birlikte, 1983 yılında, yine DARPA tarafından desteklenen, başka bir ayaklı robot çalışması gerçekleştirmişti (Waldron ve ark., 1984; Waldron ve Mcghee, 1986a,b; Song ve Waldron, 1989). Adaptif Süspansiyonlu Araç¹ (ASV) adındaki bu robot, arazi adaptasyonu açısından o zamana kadar yapılmış en üstün ve en büyük araçtı (Şekil 2.11). ASV, toplamda yaklaşık 3 ton gibi bir ağırlığa ve 250 kg taşıma kapasitesine sahipti, 5.6 m boyundaydı ve içten yanmalı bir motor ile çalışıyordu. Ayakların hareket kontrolü bir bilgisayar tarafından yapılıyordu, ancak aracın durumu, hareketi, hızı ve yapılan manevralar bir operatör tarafından yapılıyordu (Todd, 1985b).

1976 yılında, USSR Bilimler Akademisi işbirliği ile Moscow State Üniversitesi bünyesinde, Phony Pony robotuna benzer özelliklere ve performansa sahip, Masha adında (Şekil 2.12), eklem bacaklılara benzer yapıda altı ayaklı bir robot geliştirilmişti. Masha robotunda, üç serbestlik dereceli boru şeklinde mafsallı bacaklar kullanılmıştı. Bacaklar, elektrikli motorlar ve dişliler ile tahrik ediliyordu ve eklemlerde açılma konumları ölçmek için potansiyometre sensörleri kullanılmıştı. Robot, engelleri bir yakınlık sensörü ve ayaklardaki kontak sensörleri ile aşabiliyordu ve engellerin üzerinden geçmek ve tırmanmak gibi hareketler dahil olmak üzere tüm hareketleri otonom bir şekilde yapabiliyordu (Gurfinkel ve ark., 1981; Devjanin ve ark., 1983).

Yine aynı yıllarda, Japonya'da Tokyo Teknoloji Enstitüsü² (TIT) bünyesinde,



(a) Masha Robotu

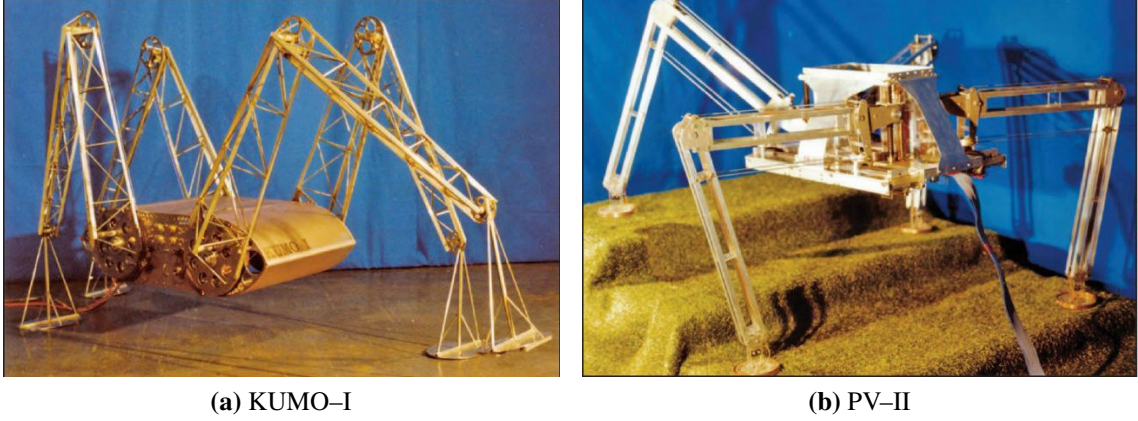


(b) Kuvvet geribeslemesi deneyleri yapılırken

Şekil 2.12. USSR Bilimler Akademisi işbirliği ile, E. V. Gurfinkel tarafından Moscow State Üniversitesi bünyesinde geliştirilen Masha isimli altı ayaklı robot.

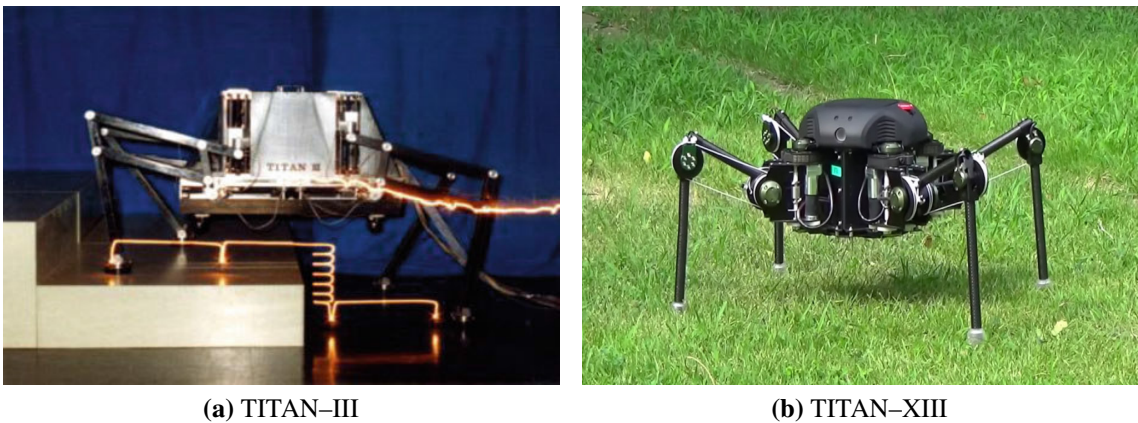
¹Adaptive Suspension Vehicle

²Tokyo Institute of Technology



Şekil 2.13. Shigeo Hirose tarafından TIT bünyesinde geliştirilen robotlardan ilk ikisi

Shigeo Hirose ve Yoji Umetani, daha sonra çok sayıda ayaklı robot çalışmasına öncülük edecek olan KUMO-I (Şekil 2.13a) ve genel olarak ayaklı robotların geliştirilmesinde önemli bir kilometre taşı olarak kabul edilen PV¹-II (Şekil 2.13b) üzerine araştırmalar yapmışlardı (Hirose ve Umetani, 1978, 1981; Hirose ve Kato, 2000; Hirose, 2001). PV-II robotunda, PANTOMEK (Hirose, 1984; Hirose ve Arikawa, 2001) ismiyle patentli olan üç serbestlik dereceli bir pantograf mekanizmasını temel alan bacaklar kullanılmıştı. Pantograf mekanizması sayesinde, her bir eyleyicinin hareketi ayağın her bir kartezyen koordinatlarda hareketine karşılık geliyordu. Her ayağın x, y ve z hareketlerini sadece bir eyleyici ile gerçekleştirebilme yeteneği ile, robotun kontrolü için kullanılan bilgisayarın, hareket etmek için karmaşık kinematik çözümler yapmasına gerek kalmıyordu. Bu mekanizma daha sonra geliştirilen diğer ayaklı robotlarda da kullanılmıştır (de Santos ve ark., 2006b). PV-II robotunda, bacak hareketleri harici bir elektrik enerjisi kaynağından beslenen DC motorlar



Şekil 2.14. Shigeo Hirose tarafından TIT bünyesinde geliştirilen TITAN serisi robotlardan ilki, TITAN-III ve sonuncusu, TITAN-XIII.

¹Preambulating Vehicle

sayesinde sağlanıyordu, ayrıca yer teması ve engelleri tespit edebilmek için bacaklarda kontak sensörleri kullanılmıştı. Hirose daha sonra, 1984 yılında, PV-II'nin gelişmiş bir versiyonu olan TITAN¹-III isimli bir robot geliştirdi (Hirose, 1985). TITAN-III, Hirose'ye ait TITAN serisi robotların ilk üyesiydi (Şekil 2.14) ve bu serinin devamında TIT bünyesinde günümüze kadar birçok ayaklı robot geliştirilmiştir (Hirose ve ark., 1991; Hirose ve Kunieda, 1991; Arikawa ve Hirose, 1996; Hirose ve ark., 1997; Hirose ve Arikawa, 1999, 2001; Kato ve Hirose, 2000; Hodoshima ve ark., 2004, 2010; Kitano ve ark., 2013, 2016).

2.2.3. Ayaklı Robotların Gerçek Görevlerde Kullanılmaya Başlanması

1992 yılında Carnegie Mellon Üniversitesi (CMU) bünyesinde bulunan Saha Robotik Merkezi²'nde (FCR), aktif volkanik kraterler gibi zorlu yerleri keşfetmek ve bu yerlerden veri toplamak için sekiz bacaklı, Dante adında (Şekil 2.15a), başarılı bir saha robotu tasarlanmış ve imal edilmiştir (Wettergreen ve ark., 1993; Christian, 1993). Dante projesi, fikirden uygulamaya geçiş süreci sadece 10 ay süren iddialı bir girişimdi ve bu projenin sonucunda Antarktika'da aktif bir yanardağ olan Erebus Dağı'nda bir keşif yapıldı. Ancak krater'e yaklaşık 6 metrelik bir iniş yaptıktan sonra iletişimi sağlayan kablolardan birisi kopunca görev iptal olmuştu. Daha sonra, 1994 yılında yine FCR bünyesinde, NASA tarafından desteklenen, selefının daha sağlam bir versiyonu olan ve Alaska'da aktif bir volkanik dağ olan Spurr Dağı kraterine başarılı bir keşif gerçekleştiren Dante-II (Şekil 2.15b) robotu geliştirilmişti (Wettergreen, 1995). Bu araştırmanın en büyük özelliği, volkanik araştırmalara katkıda bulunmasının yanı sıra, bunun gibi insanlar için zor ve



(a) Dante-I



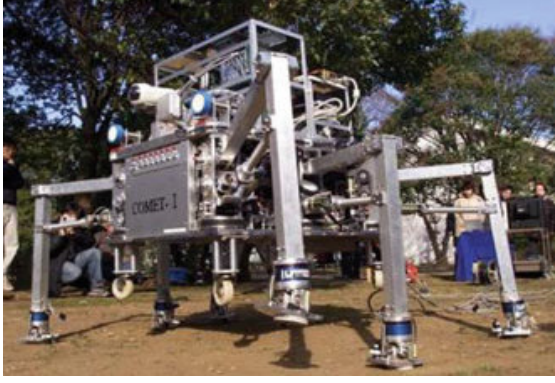
(b) Dante-II

Şekil 2.15. FCR bünyesinde volkanik araştırmalarda kullanılmak üzere geliştirilen Dante serisi robotlar; (a) Dante-I ve (b) Dante-II

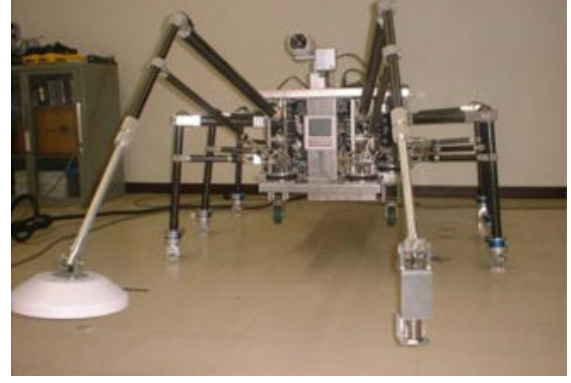
¹Tokyo Institute of Technology, TIT ve Japonca "yürüyen araç", Aruku Norimono, AN

²Field Robotics Center

tehlikeli görevlerde robotların kullanımının mümkün olduğunu göstermesidir.



(a) COMET-I



(b) COMET-II



(c) COMET-III



(d) COMET-IV

Şekil 2.16. Chiba Üniversitesi bünyesinde Kenzo Nonami tarafından insani amaçlı mayın temizleme işi için geliştirilen COMET serisi robotlar

21. yüzyıl başlarında Japonya’da Chiba Üniversitesi bünyesinde, Kenzo Nonami tarafından, zorlu ve engebeli arazilerde kuvvet ve empedans kontrolü ile yürüme, lazer haritalama ile tam otonom navigasyon ve teleoperasyon kontrollü yürüme konularını kapsayan ve günümüzde halen geliştirilmeye devam edilen proje kapsamında (Tedeschi ve Carbone, 2015), insani amaçlı mayın temizleme işi için arazi mayınlarının tespitini ve imhasını yapmak üzere, daha sonra üç farklı versiyonu da geliştirilecek olan, altı ayaklı COMET¹ adında bir robot geliştirilmişti (Nonami, 2002; Huang ve Nonami, 2003; Nonami ve ark., 2003). Nonami tarafından geliştirilen COMET serisi robotların (Şekil 2.16) farklı tipteki arazi koşullarında hareket etkinliğini göstermek için, farklı algoritmalara sahip kontrolcüler ile başarılı denemeler gerçekleştirilmiştir (Irawan ve ark., 2013). Bu serideki robotlardan, COMET-I ve COMET-II, elektrik motorlarıyla tahrik edilirken, COMET-III ve serinin en son versiyonu olan COMET-IV robotlarında, engebeli arazilerde ağır yükler

¹Chiba University Operating Mine Detection Electronics Tools

altında yürümeye yetecek güçleri sağlayabilmek için hidrolik tahrik tercih edilmiştir. COMET-IV robotunda, dört serbestlik dereceli ve iki adet içten yanmalı motor ile çalışan bir hidrolik pompaya bağlı hidrolik eyleyiciler tarafından sürülen bacaklar kullanılmıştır (Oku ve ark., 2007; Nonami ve ark., 2014).

2.2.4. Statik ve Dinamik Yürüyüş Stratejilerinin Karşılaştırılması



- (a) Statik Yürüyüş – Dört ayaklı bir robotun statik yürüyüş esnasında yerdeki ayakların oluşturduğu destek poligonu ve ağırlık merkezinin izdüşümü gösterilmektedir. Yürüyüşün her anında en az üç ayak yerde olmaktadır. Destek poligonunun her bir köşesinde bir destek ayağı bulunmaktadır.
- (b) Dinamik Yürüyüş – Dört ayaklı bir robotun dinamik yürüyüş esnasında yerdeki ayakların oluşturduğu destek poligonu ve ağırlık merkezinin izdüşümü gösterilmektedir. Yürüyüşün herhangi bir anında ayaklar yere temas etmeyebilir. Dengein korunabilmesi için sürekli hareket etmelidir.

Şekil 2.17. Statik ve dinamik yürüyüş yaklaşımlarının dengeleme stratejisi bakımından karşılaştırılması.

Şuana kadar bahsedilen yürüyen robotlar üzerine yapılan araştırmalar, daha önce bahsedilen iki temel yaklaşımdan ilk yaklaşımı temsil eden statik yürüyüş üzerine yapılan çalışmalardır. Tasarım yaklaşımlarında, kontrol edilmelerinde kullanılan algoritmalarda ve bilgisayar teknolojilerinde temel bazı farklılıklar olsa da, konu edilen robot ve makinelerin hepsinde denge ve kararlılık için ortak bir yaklaşıma gidilmiş ve yürüyüş şekli olarak statik yürüyüş diye tanımlanan bir yürüme stratejisi tercih edilmiştir. Statik yürüyüş stratejisinde, yürüyüşün her anında denge ve kararlılığı sağlayacak yeterli derecede geniş bir destek poligonunun oluşması için yeterli sayıda ayağın yerde olması sağlanmaktadır (Şekil 2.17a) ve hareket esnasında, robotun ağırlık merkezi bu destek poligonunun içerisinde hareket edecek şekilde gövde ve ayaklar hareket ettirilmektedir. Bunun sonucu olarak da, statik yürüyüş stratejisinde hareket oldukça yavaş olmaktadır.

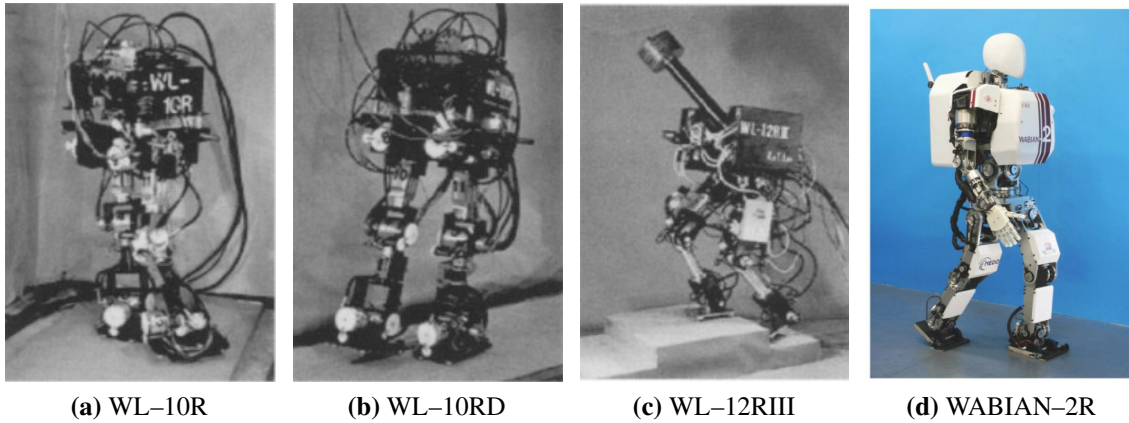
2.3. Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar

Dinamik yürüyüş stratejisinde temel yaklaşım denge ve kararlılığın yürüyüş esnasında bir destek poligonunun oluşmasına ihtiyaç duymadan aktif olarak sağlanmasıdır. Yani kısaca bu yürüyüş stratejisinde robot hareket ederken ayakların yerle temas etmediği bir an olabilir (Şekil 2.17b). Bu nedenle dinamik yürüyüş esnasında, robot davranışını öngörebilmek, kararlılık ve dengeyi sağlayabilmek için robot yapılandırmasının ve robot duruş şeklinin yanı sıra, bu yaklaşımda, robotun sahip olduğu kinetik ve potansiyel enerjiler ve bunlar arasındaki değişimler de önem arz etmektedir.

2.3.1. Yarı-Dinamik Yürüyüş Çalışmaları ve Aktif Dengeleme

Aktif olarak dengelenen ilk makineler, otomatik olarak kontrol edilen küçük bir taşıyıcı üzerine monte edilmiş ters sarkaçlardır. Bu şekilde dizayn edilmiş bir makine imalatı üzerine yapılan bilinen ilk çalışma, 1951 yılında, "*Bilgi Kuramı'nın babası*" olarak tanımlanan (James, 2009) Amerikalı matematikçi Claude Shannon tarafından gerçekleştirilmiştir (Raibert, 1986). Stanford Üniversitesi bünyesinde bulunan Robert H. Cannon, Shannon'ın bu çalışmasından esinlenerek ikili ters sarkaç kullanılan bir aktif dengeleme sistemi geliştirmiştir. Cannon daha sonra tek giriş ve çok çıkış prensibine dayalı sistemler üzerine çalışmalar yaparak, sadece taşıyıcı araba tahrik edilerek ikili ters sarkacın açılarının kontrol edilebilmesini araştırmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, Cannon, kontrol edilebilirlik sınırlarını sistemin fiziksel parametrelerinin açık işlevleri olarak ifade edebilmiştir (Higdon ve Cannon, 1963; Schaffer ve Cannon, 1966). Ters sarkaçlar üzerine yapılan bu aktif dengeleme araştırmaları, ayaklı yürüyüş üzerine yapılan çalışmalara öncü çalışmalar olmuştur, ayrıca ayaklı robotlarda aktif dengeleme probleminin çözümüne ilham kaynağı olması bakımından oldukça önemli çalışmalardır (Hemami ve Golliday, 1977; Miura ve Shimoyama, 1984; Raibert, 1986; Poulakakis ve Grizzle, 2009; Piovan ve Byl, 2012; Bae ve Oh, 2018).

Aktif dengeleme prensibini temel alarak ayaklı bir robot geliştirilmesine yönelik gerçekleştirilen ilk ciddi araştırmalar (Frank, 1970; Vukobratović ve Stepanenko, 1972), bu ilkelere dayalı fiziksel bir sistemin o dönemlerde oluşturulmasındaki zorluklar nedeniyle deneysel çalışmalar olmadan yapılmıştır. Ancak, antropomorfik robotlar üzerine ciddi çalışmaları olan Ichiro Kato ve Atsuo Takanishi, 20. yüzyılın sonlarına doğru, Waseda



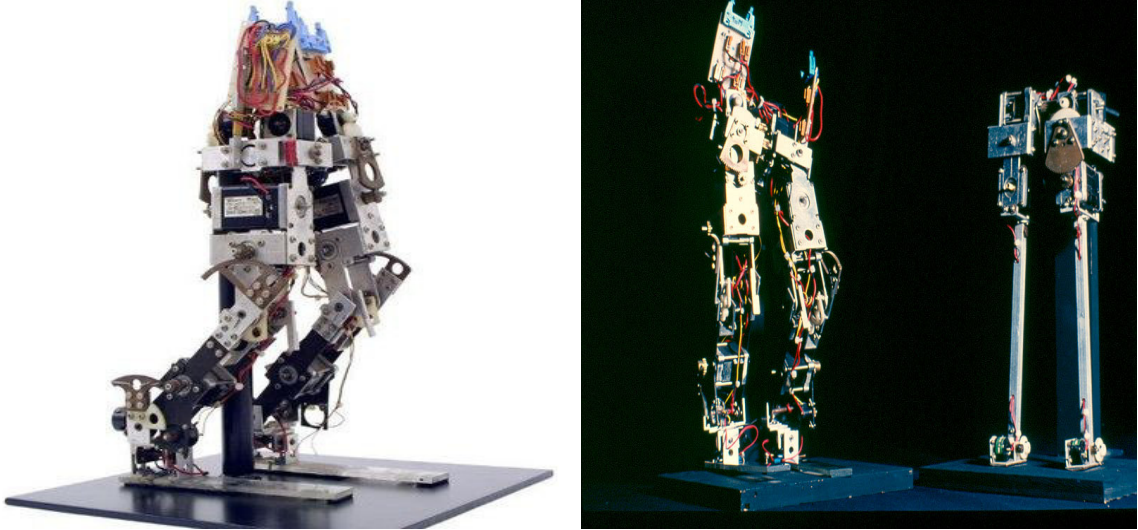
Şekil 2.18. Waseda Üniversitesi bünyesinde Kato ve Takanishi tarafından geliştirilen antropomorfik robotlar.

Üniversitesi bünyesinde WL¹ serisi (Şekil 2.18a, 2.18b, 2.18c) ve daha sonra Şekil 2.18d'de son sürümü gösterilen WABIAN² serisi isminde bir dizi antropomorfik robot geliştirmeye başlamışlardır. (Takanishi ve ark., 1985; Yamaguchi ve ark., 1993, 1996; Lim ve ark., 2004; Lim ve Takanishi, 2005, 2007; Hashimoto ve ark., 2012; Kryczka ve ark., 2013). Hidrolik olarak tahrik edilen 10 serbestlik derecesine sahip, toplamda dakikada 0.4m adım atabilen WL serisi robotlarda, ters sarkaç modelini esas alan bir hareket planı kullanılmıştır. Tam anlamıyla aktif bir dengeleme sistemine sahip olmasa da WL serisi robotların geliştirilmesindeki en dikkat çekici nokta, kullanılan dinamik geçiş evreleri sayesinde, ayaklı robotların basit bir kontrolcü ile çok karmaşık dinamik davranışlar sergileyebileceğinin gösterilmesidir. Bu yönüyle WL serisi robotlar, ayaklı robotlar literatüründe statik yürüyüşten dinamik yürüyüşe geçiş döneminin en önemli kilometre taşlarından biri olma özelliğine sahiptir.

1980'li yılların ortalarında Tokyo Üniversitesi bünyesinde, Isao Shimoyama ve Hirofumi Miura, antropomorfik bir robot geliştirebilmek için Biper isimli bir dizi robot üzerine çalışmalar yapmışlardır (Miura ve Shimoyama, 1984; Kimura ve ark., 1989; Bezerra ve Zampieri, 2004). Beş farklı robota sahip bu serinin ilk iki sürümü olan BIPER-1 ve BIPER-2 sadece yanlara yürüyebilmektedir. BIPER-3 yaklaşık 2kg ağırlığında ve 30.8cm yüksekliğindedir. Bu robotun ayakta durması için bir dizi adım atması gerekmektedir, çünkü her iki ayak da yere temas ettiğinde kendini dengelemeyi başaramamaktadır. Yedi serbestlik derecesine sahip Biper-4, insan bacakları ile hemen hemen aynı serbestlik derecesine sahipti ve her bir eklemden sekiz adet DC motor kullanılmıştır. Şekil 2.19'da

¹Waseda Leg

²WAseda BIpedal humANoid



(a) Bilgisayar Tarih Müzesi'nde sergilenmekte olan Biper-4 robotu (b) Sağdaki Biper-3 robotu, Soldaki Biper-4 robotu

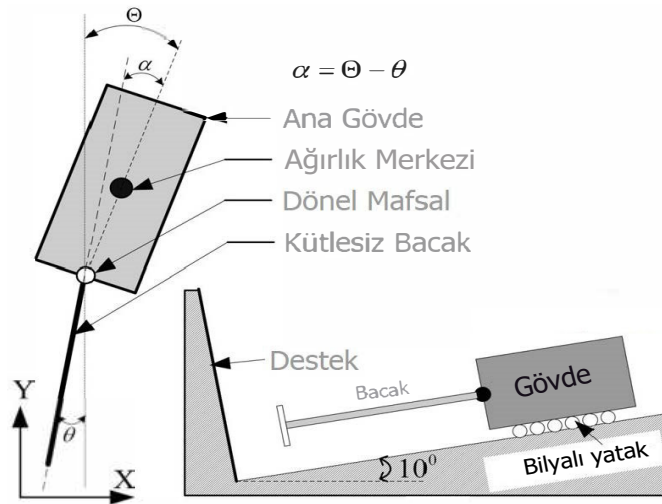
Şekil 2.19. Tokyo Üniversitesi bünyesinde Shimoyama ve Miura tarafından geliştirilen iki ayaklı robotlar.

gösterilen Biper-4, günümüzde halen, Kaliforniya'da bulunan Bilgisayar Tarih Müzesi¹'nde sergilenmektedir. BIPER-5, üzerine monte edilen bilgisayar haricinde BIPER-3 benzeri bir yapıya sahiptir. Biped serisi robotlar, statik olarak kararsız bir yapıya sahipti ancak dinamik olarak kararlı bir yürüyüş yapabilen robotlardır. Kısaca, Isao Shimoyama ve Hirofumi Miura tarafından geliştirilen BIPER serisi robotlar, aktif dengeleme prensibinin ilk defa tam anlamıyla uygulandığı deneysel çalışmalar olması sebebi ile ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahiptir. Buna ek olarak, koşma ve zıplama gibi yüksek hareket becerisini sergileyebilecek çalışmalar yapılabilmesine de öncü olmuşlardır.

Koşabilen bir robot üzerine bilinen ilk deneysel araştırma çalışmaları Kyushu Teknoloji Enstitüsü² bünyesinde Kiyotoshi Matsuoka tarafından gerçekleştirilmiştir (Matsuoka, 1979, 1980; Raibert, 1986; Sayyad ve ark., 2007). Burada koşma kavramı, daha net bir ifade ile, daha hızlı ilerleyebilmek için ayakların yerden kesildiğinde balistik uçuş yaptığı anların varlığı ile tanımlanmaktadır. Matsuoka, insanların zıplayarak ilerlemesine benzer bir hareketi taklit ederek ilerleyebilen, ana bir gövdeye dönel bir mafsal ile bağlanmış kütsüz bir bacadan oluşan bir sistemin modelini formüle etmiştir. Sistem modelini formüle ederken, zıplayarak ilerleme esnasında yerle temas süresinin balistik uçuş evresine kıyasla çok daha kısa olduğunu varsayarak problemi basitleştirmiştir. Tüm çevrim süresinin neredeyse balistik uçuş evresi içerisinde tamamlandığı bu *koşma* modeli

¹Computer History Museum

²Kyushu Institute of Technology



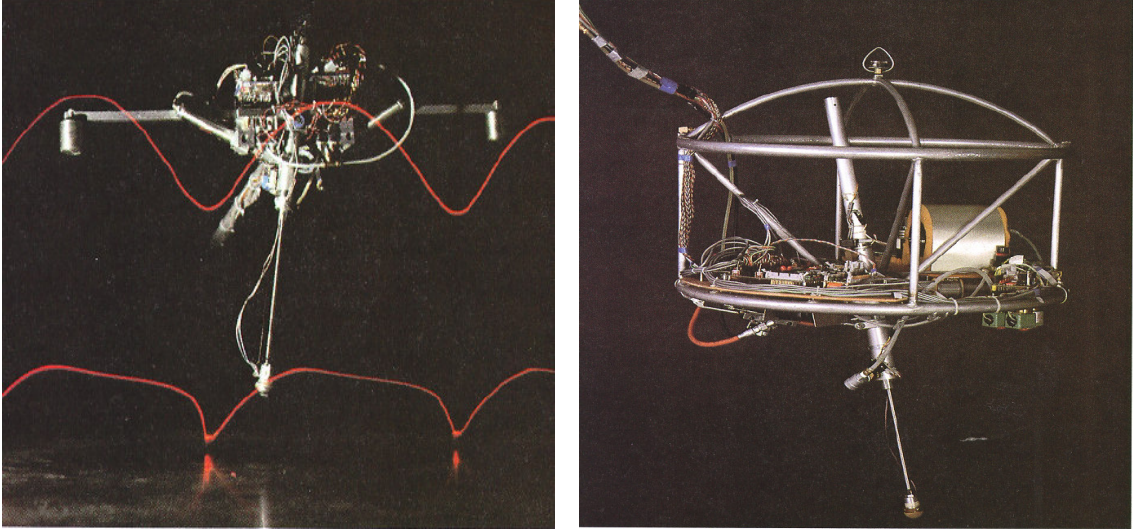
Şekil 2.20. Kyushu Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Kiyotoshi Matsuoka tarafından geliştirilen tek bacaklı zıplayan robota ait kavramsal model (soldaki) ve deney düzeneği modeli (sağdaki) (Sayyad ve ark., 2007)'nin çalışmasından uyarlanmıştır.

sayesinde Matsuoka, zıplayarak düşük bir hızda ilerleme için optimal bir zaman durum geribildirim kontrolörü elde edebilmiştir. Daha sonra, Şekil 2.20'de gösterilen deney düzeneğini kullanarak, elde ettiği modeli deneysel çalışmalar ile doğrulamayı başarmıştır. Bilyalı rulmanlar ile sürtünmenin azaltıldığı, yatayda 10 derecelik eğimli bir masa üzerinde hareket eden bir bacak modelinden oluşan deney düzeneği ile yaptığı çalışmalar, ayaklı robotlar literatüründe aktif olarak dengelenmiş ilk deneysel çalışma olması nedeniyle önemli bir yere sahiptir (Raibert, 1986; Todd, 1985b; Popović, 2013; Sayyad ve ark., 2007).

2.3.2. Yay Yüklü Ters Sarkaç (SLIP) Modeli ve Raibert'in Çalışmaları

Ayaklı robotlar literatüründe, aktif dengeleme prensibini temel alarak ayaklı bir robot geliştirilmesine yönelik yapılan en önemli çalışmalar ve ilk ciddi girişimler, robotik alanının öncülerinden Marc H. Raibert tarafından, önceleri CMU bünyesinde ve daha sonra Massachusetts Teknoloji Enstitüsü bünyesinde (MIT) yürütülen araştırma çalışmaları olmuştur (Todd, 1985a; Semini, 2010; Remy, 2011; Popović, 2013). Özellikle dört ayaklı robotlar alanında gerçekleştirdiği çalışmalar ve literatüre kazandırdığı kavramlar ile Marc H. Raibert bugünün en etkili robotistlerinden biridir. Ayaklı robotların geliştirilmesi için DARPA tarafından desteklenen birçok proje yürütmüştür. Spot, LS3, BigDog (Raibert ve ark., 2008), Petman (Nelson ve ark., 2012), Atlas (Feng ve ark., 2015), Wildcat ve RHex (Saranli ve ark., 2001) gibi dünyanın en gelişmiş dinamik robotlarını geliştiren bir şirket olan Boston Dynamics'in kurucusudur ve halen başkanlığını yürütmektedir.

Robotikte önemli bir dönüm noktası olan, aktif olarak kendini dengeleyen ve



(a) Düzlemsel zıplayan tek ayaklı robot

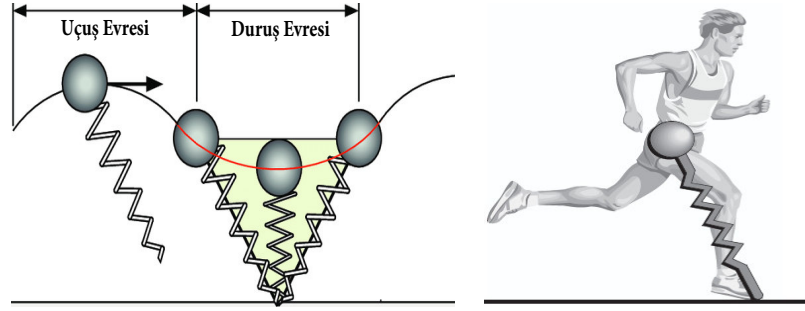
(b) Üç boyutlu zıplayan tek ayaklı robot

Şekil 2.21. Marc H. Raibert tarafından geliştirilen tek ayaklı robotlar.

dinamik yürüyüş yapabilen robotların ilk geliştircilerinden biri olan Raibert (Raibert ve ark., 1983, 1989; Raibert, 1986) çalışmalarına, ilk başta, Şekil 2.21a'da gösterilen hareketi dikey bir düzleme kısıtlanmış zıplayan tek ayaklı bir robot geliştirerek başlamıştır (Raibert ve Brown, 1984) ve devamında Şekil 2.21b'de gösterilen üç boyutlu zıplayabilen tek ayaklı bir robot geliştirmiştir (Raibert ve ark., 1984). İki ve üç boyutlu hareket eden tek ayaklı robotların her ikisinde de zıplama yüksekliğinin ayarlanmasının yanında enerji depolayan elemanlar olarak da kullanılabilmesi için yay eklenmiş pnömatik silindirler teleskopik bacak olarak kullanılmıştır. İki boyutta hareket edebilen ilk robotta, teleskopik bacak gövdeye döner mafsal ile bağlanmıştır. Ayrıca, robot üzerine gövdenin eğim açısını, ayak açısını, ayak boyunu, bacağa eklenmiş yaydaki gerilmeyi ve yer temasını ölçen sensörler eklenmiştir.

Ayaklı robotlarda aktif dengeleme ile koşma ve zıplama gibi hareketlerin incelenmesi amacıyla geliştirilen bu robotlar sayesinde, Raibert, daha sonra çok bacaklı sistemlere de uygulanabilecek basit ama etkili, koşma ile arasındaki analogi Şekil 2.22'de gösterilen Yay Yüklü Ters Sarkaç¹ (SLIP) modelini temel alan bir algoritma geliştirmiştir. Matsuoka'nın çalışmasına benzer şekilde *koşma* çevrimini duruş evresi ve uçuş evresi olarak iki ayrı evrede inceleyen Raibert, duruş evresini göz ardı etmeden; duruş evresinde ayak yerde sabit bir noktada dururken sistemi ters sarkaç gibi, ayağın yerden kesildiği uçuş evresinde ise yine kütle merkezinin hareketini balistik uçuş gibi modellemiştir. Daha sonra tek bir çevrimi

¹Spring Loaded Inverted Pendulum



(a) Duruş evresinin başlangıcında bacak sıkışmakta ve enerji duruş sonunda kalkışa geçerken gövdeyi ivmelendirmek için tekrar kullanılmaktadır (Poulakakis, 2010)'in çalışmasından uyarlanmıştır.

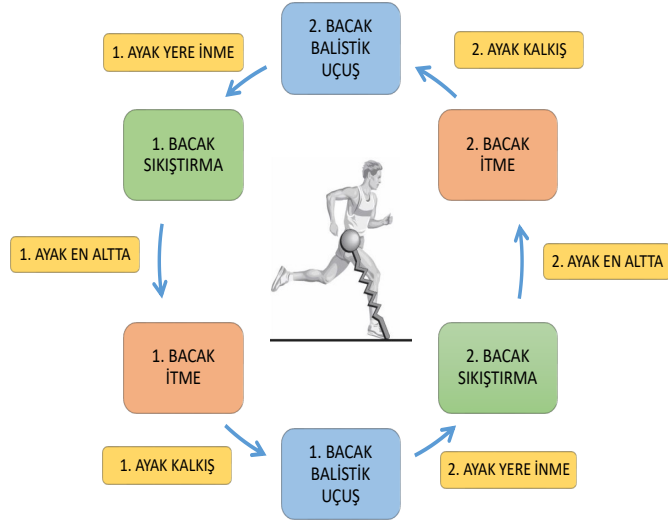
(b) Koşan bir insan üzerinde SLIP model analogisinin gösterimi (Schwind ve Kolditschek, 2000)'in çalışmasından uyarlanmıştır.

Şekil 2.22. Koşma modeli ile SLIP modelinin benzeşimini gösteren çizim.

zıplama yüksekliği, ilerleme ve gövde duruşu olmak üzere üç ana kısımda ayrı ayrı dikkate alan bir yaklaşım sunmuştur. Bu şekilde tek ayaklı bir robotun aktif olarak dengelemesi için kullanılacak kontrolcü algoritmasının, birbirleriyle eşzamanlı çalışan ve ilerleme hızının, gövde duruşunun ve son olarak zıplama yüksekliğinin ayrı ayrı düzenlendiği üç ayrı ve çok basit kısımdan oluşturulabileceğini göstermiştir. Kontrolcülerini eşzamanlamak için sistem durumları arasında geçiş yapan bir sonlu durum makinesi kullanılmıştır (Şekil 2.23). Etkinlikler arasındaki bağlantı, bağlantıların üç ayrı kontrolcüde bozucu sinyal olarak işleme alınmasıyla sağlanmıştır.

Raibert daha sonra, iki boyutta hareket için önerdiği bu hareketlilik algoritmasının, üç boyutta çalışan tek bacaklı bir makinenin hareketini kontrol etmek için de yeterli olduğunu göstermiştir (Raibert ve ark., 1984). Hareketlilik algoritmasının bu şekilde ayrıştırılması basit bir kontrolcü tasarımına imkan vermesinin yanında, ayaklı robotlarda hareketliliğin daha karmaşık problemlerine odaklanılmasını sağlayan kavramsal bir çerçeve de sunmaktadır. Bu kontrol prensibi genellikle Raibert'in üç parçalı kontrolü olarak adlandırılır ve ayaklı hareketlilik araştırmasında çok önemli bir kilometre taşıdır. Raibert, ayaklı robotlarda aktif denge ve dinamik temellerinin anlaşılabilmesi için, basitleştirilmiş bir hareketlilik problemi bağlamında tek ayaklı robotlar üzerinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalar ile ortaya koyduğu bu kavramsal çerçevenin, bir takım kabuller ile çok bacaklı sistemler için de kullanılabileceğini göstermiştir.

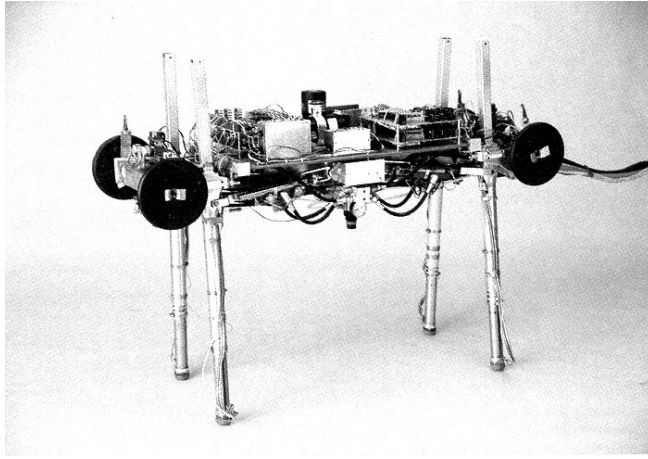
İlk önce, iki ayaklı koşan bir robot üzerinde (Hodgins ve Raibert, 1991), daha sonra Şekil 2.24a'da gösterilen dört ayaklı bir robot üzerinde, tek ayak için önerilen kontrol algoritmalarının doğrudan uygulanabileceği gösterilmiştir (Raibert ve ark., 1986).



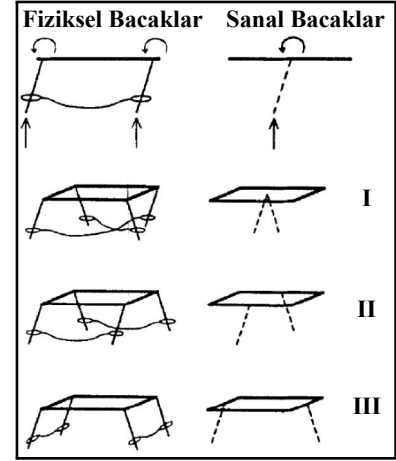
Şekil 2.23. Raibert tarafından dört ve iki ayaklı yürüyen robotlar için önerilen kontrol algoritmasını eşzamanlayan durum makinesinin şematik gösterimi. Durumlar arasında geçişler zıplama hareketine bağlı olarak sensörler aracılığıyla sağlanmaktadır (Raibert, 1986)'ın çalışmasından uyarlanmıştır.

Buradaki temel yaklaşımın dayanağı, insanlarda olduğu gibi, koşarken bacakların dönüşümlü kullanılmasından dolayı her iki baktan sadece birinin aktif olması gerçeğinden yola çıkarak, tek bacak için oluşturulan kavramsal çerçevenin iki ayaklı bir robotta aktif bacak için uygulanabilir olmasıdır. Prensipde bu yaklaşımın, hareket boyunca sadece bir bacağın aktif olduğu herhangi bir ayaklı sistem için uygulanabilir olmasına rağmen, hareket boyunca birden fazla bacağın aktif olduğu durumlarda bu yaklaşımın uygulanması mümkün değildir. Bu problemi aşır, oluşturduğu kavramsal çerçeveyi dört ayaklı robotlarda da kullanabilmek için, Raibert, Ivan Sutherland tarafından önerilen (Sutherland ve Ullner, 1984) birden fazla aktif bacağın tek bir bacakmış gibi davrandığı *sanal bacak* kavramına başvurmuştur. Bu yöntemle, Şekil 2.24b'de gösterildiği gibi dört bacaklı bir robot, ikili eşleştirmeler ile Raibert'in üç parçalı kontrolünün uygulanabildiği iki ayaklı bir sisteme indirgenebilmektedir. Burada, bacaklarda yapılan eşleştirmeler robotun yürüyüş şeklini belirlemektedir. İki çapraz bacağın eşzamanlı hareketi, Tırıs yürüyüş şekline, aynı taraftaki iki bacağın eşzamanlı hareketi, Rahvan yürüyüş şekline neden olurken, Zıplayarak yürüyüş şekli arka bacakların ve ön bacakların eşzamanlı hareketiyle elde edilmektedir.

Raibert tarafından aktif dengeleme ve dinamik yürüyüş üzerine yapılan bu araştırma çalışmaları sonrasında, ayaklı robotlar alanında çalışan birçok araştırmacının ilgi odağı, antropomorfik robotlarda daha çok tercih edilen ZMP kontrollü sistemler yerine hızlı, dinamik ve çok yönlü hareketler sunabilen dinamik yürüyüş şekli üzerine yoğunlaşmıştır. Nitekim araştırmacılar, iki ayaklı robotlar ile karşılaştırıldığında yapılandırmasından dolayı



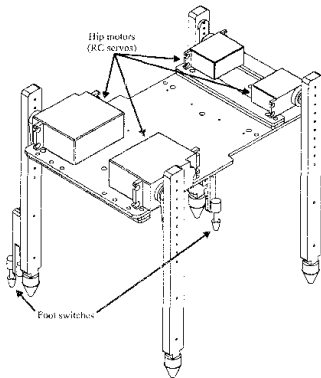
(a)



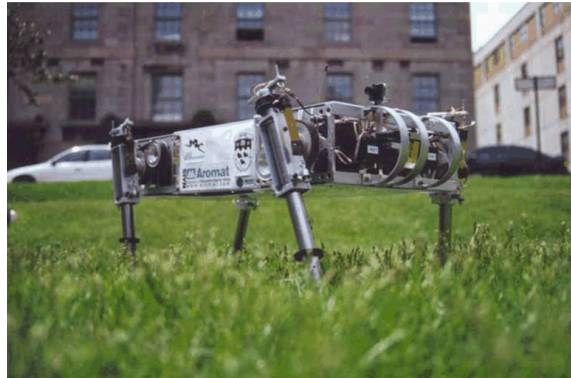
(b) Tırıs Yürüyüş (I), Rahvan Yürüyüş (II), Zıplayarak Yürüyüş (III)

Şekil 2.24. (a) Marc H. Raibert tarafından geliştirilen dört ayaklı robot ve (b) sanal bacak kavramının farklı yürüyüş tipleri için uygulamasını gösteren şematik çizim (Raibert ve ark., 1986)'nin çalışmasından uyarlanmıştır.

denge problemine daha basit bir çözüm sunan, daha hızlı ve çeşitli yürüyüş şekilleri olan dört ayaklı robotlar geliştirilmeye başlamıştır. 1990'lı yılların sonunda McGill Üniversitesi Gezici Robotik Laboratuvarı¹ (ARL) bünyesinde bulunan Martin Buehler tarafından, mekanik sadeliği temel alan Scout isimli robot serisi geliştirilmeye başlanmıştır (Buehler ve ark., 1998, 1999; Battaglia, 1999). Dört ayaklı hareket için tasarlanan, Şekil 2.25a'da tasarıma ait bir çizimi de gösterilen, serinin ilk robotu Scout-I her bacakta sadece bir serbestlik deceresine sahip oldukça basit bir tasarımdı. Oldukça basit bir mekaniğe sahip olmasına rağmen bu robotun, hareket stratejisinde ters sarkaç dinamiklerinin temel alındığı deneysel çalışmalar sonucunda yüksekliği yaklaşık bacak boyunun %45'i olan merdivenleri



(a) Scout-I robotuna ait çizim



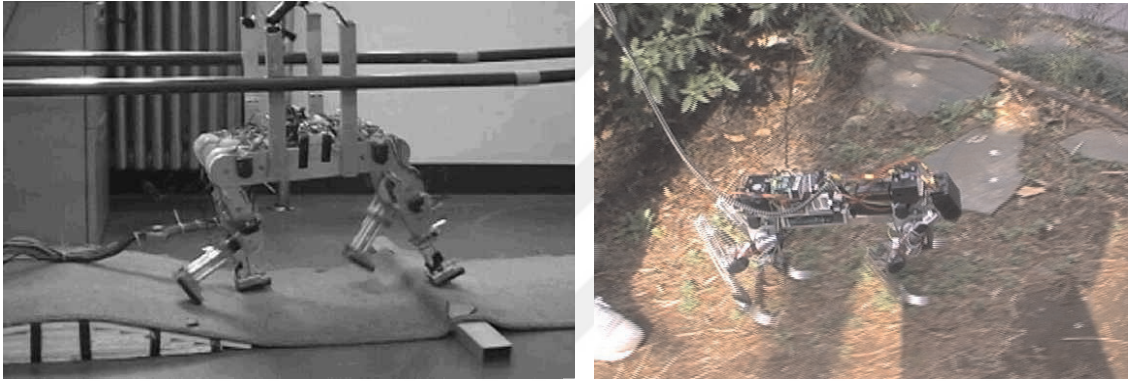
(b) Scout-II robotu

Şekil 2.25. McGill Üniversitesi Gezici Robotik Laboratuvarı bünyesinde Martin Buehler tarafından geliştirilen Scout serisi dört ayaklı robotlar.

¹Ambulatory Robotics Lab

tırmanabildiği gösterilmiştir (Buehler ve ark., 1998). Şekil 2.25a’de gösterilen serinin ikinci ve son robotu olan Scout-II robotunda, yine mekanik basitlik korunmuş, sadece bacağa yaylı prizmatik mafsal eklenerek bacağın serbestlik derecesi biri aktif diğeri pasif olmak üzere ikiye çıkarılmıştır. Saatte 1,3 m/s gibi bir hıza erişebilen bu ikinci robotun ağırlığı 27 kg’dır (Poulakakis ve ark., 2005). Bu çalışma, bacaklarda sadece bir eyleyicinin kullanıldığı oldukça basit bir tasarıma sahip dört ayaklı bir robotun yürüme, koşma, merdiven tırmanma gibi yüksek hareket kabiliyeti sergileyebileceğini göstermesi açısından ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahiptir.

2.3.3. Son On Yılda Dört Ayaklı Robotlar Alanında Yapılan Çalışmalar



(a) Patrush-I robotu

(b) Tekken-II robotu

Şekil 2.26. Kyoto Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Hiroshi Kimura ve Yasuhiro Fukuoka tarafından geliştirilen dört ayaklı robotlar.

21. yy. başlarında, Hiroshi Kimura ve Yasuhiro Fukuoka, Kyoto Teknoloji Enstitüsü bünyesinde, canlılardaki sinir sisteminden esinlenerek geliştirdikleri Merkezi Örüntü Üretici (MÖÜ) modeli kullanılan, Patrush serisi ve Tekken serisi (Şekil 2.26) isiminde bir dizi dört ayaklı robot geliştirilmeye başlamıştır. Canlılarda görülen vestibülo-spinal refleks¹, gerilme refleksi² gibi spinal refleksleri³ taklit edebilen bir MÖÜ geliştirmeyi amaçlamışlardır. Önerdikleri yapay sinir sistemi yaklaşımını deneysel çalışmalarla doğrularak, MÖÜ temelli kontrol yöntemini kullanan dört ayaklı bir robotun, bilinmeyen düzensiz bir araziye otonom adaptasyon yeteneğine sahip olduğu gösterilmiştir. 2010 yılında en son sürümü olan Tekken IV isimli robotta kamera ve lazer mesafe algılayıcıları kullanmışlardır (Kimura

¹Canlılarda vücut ağırlık merkezini korumaya çalışarak yürümeyi kolaylaştıran kulak ile iskelet-kas sistemi arasında işleyen bir reflekstir.

²İskelet kası boyunda meydana gelen uzamaya karşı kasılarak cevap veren canlılarda görülen en hızlı reflekstir.

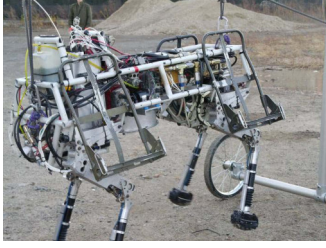
³Canlılarda bazı otonom olayları kontrol eden ve yerçekimine karşı ayakta durmayı sağlayan reflekslerdir.

ve Fukuoka, 2000; Kimura ve ark., 2001, 2005, 2007; Fukuoka ve ark., 2010). O yıllara kadar yapılan çalışmalarda, ayaklı robotların hareketi esnasında genellikle bacakların yörünge planlamasına dayalı bir arazi adaptasyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Ancak Hiroshi Kimura ve Yasuhiro Fukuoka tarafından yapılan çalışmalarda, MÖÜ ve reflekslerin kullanıldığı tork tabanlı bir kontrol sisteminin çevreyle olan etkileşimi sonucu otonom şekilde gerçekleştirilen bir arazi adaptasyonu yaklaşımı sunulması ve bu yaklaşımın deneysel çalışmalarla doğrulanmasından dolayı ayaklı robotlar literatüründe bu çalışmalar bir fark yaratmıştır ve önemli bir yere sahiptir.

Yine aynı yıllarda, DARPA tarafından desteklenen ayaklı robotlar üzerine bir proje yürüten Boston Dynamics firması, daha önce de belirtildiği gibi günümüzde halen dört ayaklı robotlar alanında standartları belirleyen BigDog adında bir robot geliştirmiştir. Martin Buehler tarafından yürütülen proje kapsamında, 2005 yılında BigDog robotunun ilk versiyonu 1 m boyunda, 1 m uzunluğunda, 0,3 m genişliğinde ve yaklaşık 90 kg ağırlığındaydı, ayrıca zorlu arazilerde saatte 6,5 km gibi bir hıza çıkabilmektedir. Her bacak, hidrolik olarak tahrik edilen üç aktif serbestlik derecesi ve ayakucu ile bacak arasında pnömatik bir yay kullanılmış prizmatik mafsal bulunan bir pasif serbestlik derecesi olmak üzere toplamda dört serbestlik derecesine sahiptir (Playter ve ark., 2006). Şekil 2.27a'da görüldüğü üzere, BigDog robotunun ilk versiyonunda diz eklemlerinin dört bacakta da aynı yönde olduğu bir bacak yapılandırılması tercih edilmiştir. Kendi ağırlığı 109 kg ve yaklaşık 50 kg ek yük taşıma kapasitesi olan ikinci versiyonda en temel farklılık bacak yapılandırmasında yapılmış ve yine hidrolik olarak tahrik edilen dördüncü bir serbestlik derecesi eklenmiştir (Raibert ve ark., 2008). Şekil 2.27b'de gösterilen bu robotta, gövdenin duruşunu ve ivmesini ölçen atalet sensörleri, eklemleri tahrik eden hidrolik eyleyicilerin hareketini ve kuvvetini ölçen eklem sensörleri ile hidrolik basınç, akış ve sıcaklık gibi nicelikleri ölçen toplamda yaklaşık elli adet sensör kullanılmıştır. Ayrıca, sensörlerden gelen bu bilgileri işleyip BigDog robotunun hareketini kontrol eden yerleşik bir bilgisayar ve güç kaynağı olarak içten yanmalı bir motor kullanılmıştır.

2009 yılında, robotik alanında BigDog ile müthiş bir başarı ve etkinin elde edilmesinden dolayı, DARPA, BigDog projesinin gelişmiş versiyonu olan ve AlphaDog (Şekil 2.27c) adıyla da bilinen Bacaklı Birim Destek Sistemi¹ (LS3) projesini başlatmıştır ve 2015 yılında bu proje sonlandırılmıştır. LS3 robotu, yaklaşık 600kg ağırlığa ve 200kg bir

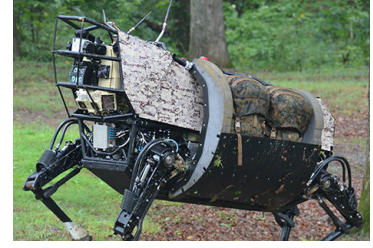
¹Legged Squad Support System



(a) BigDog robotunun 2005 yılındaki ilk versiyonu



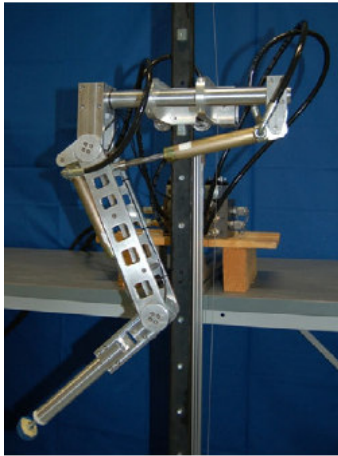
(b) BigDog robotunun 2008 yılındaki versiyonu



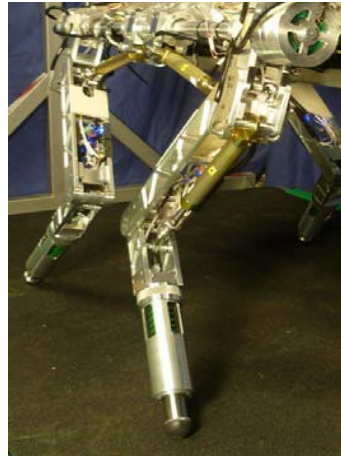
(c) BigDog robotunun, AlphaDog ismiyle de bilinen, 2015 yılındaki son versiyonu

Şekil 2.27. Boston Dynamics firması bünyesinde Martin Buehler ve Marc H. Raibert tarafından DARPA için geliştirilen dört ayaklı robotlar.

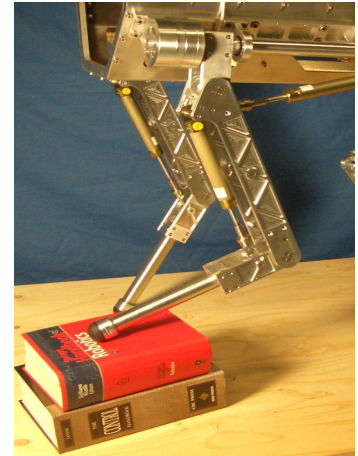
yük taşıma kapasitesine sahiptir, ayrıca zorlu arazi şartlarında 32km gidebilecek bir yakıt kapasitesine sahiptir. Yine güç kaynağı olarak içten yanmalı bir motor kullanılmıştır. Ayaklı robotlar alanında yapılan diğer çalışmalara birer referans olmalarının yanında BigDog ve LS3 robotları, bu alanda çalışan bilim insanlarının dikkatini çektiği gibi büyük ölçekli askeri uygulamalar olmasından dolayı kamuoyunda da büyük bir ilgi uyandırmıştır. Askeri projeler olmasından dolayı literatürde bu robotlar hakkında neredeyse hiç bir bilimsel kaynak bulunmamaktadır. Bu robotlar ve Boston Dynamics firması tarafından geliştirilen diğer robotlar hakkında daha geniş bir bilgiye firmanın internet adresinden¹ erişilebilir.



(a) HyQ robotunda kullanılmak üzere geliştirilen ilk bacak tasarımı



(b) HyQ robotunun versiyon 1.1 modelinde kullanılan bacak tasarımı



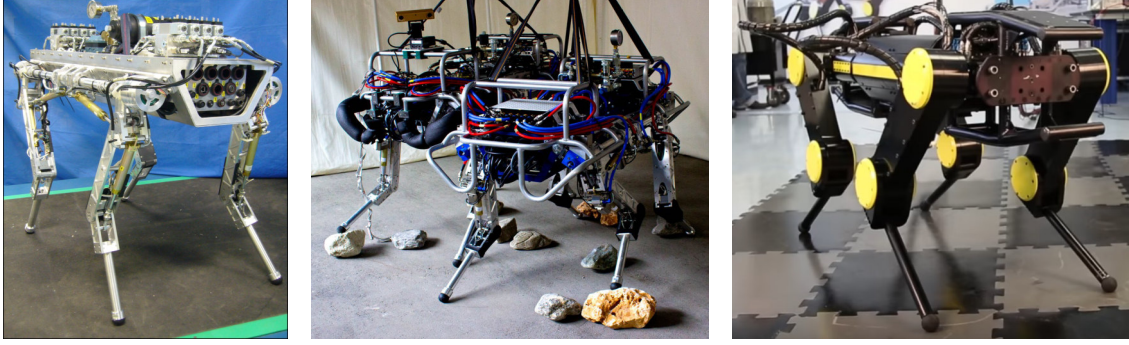
(c) HyQ robotunun versiyon 1.2 ve sonrasında kullanılan bacak tasarımı

Şekil 2.28. İtalya Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Claudio Semini tarafından geliştirilen HyQ robotunda kullanılmak üzere geliştirilen bacak tasarımları.

Aynı yıllarda Claudio Semini, İtalya Teknoloji Enstitüsü² (IIT) bünyesinde Hydraulic Quadruped (HyQ) isminde yine dört ayaklı ve hidrolik tahrikli bir robot geliştirmeye

¹www.bostondynamics.com

²Italian Institute of Technology



(a) HyQ robotunun 2011 yılındaki ilk versiyonu (b) HyQ robotunun 2013 yılındaki son versiyonu (c) HyQ robotunun selefi HyQ2Max robotu

Şekil 2.29. İtalya Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Claudio Semini tarafından geliştirilen HyQ isimli dört ayaklı robot versiyonları.

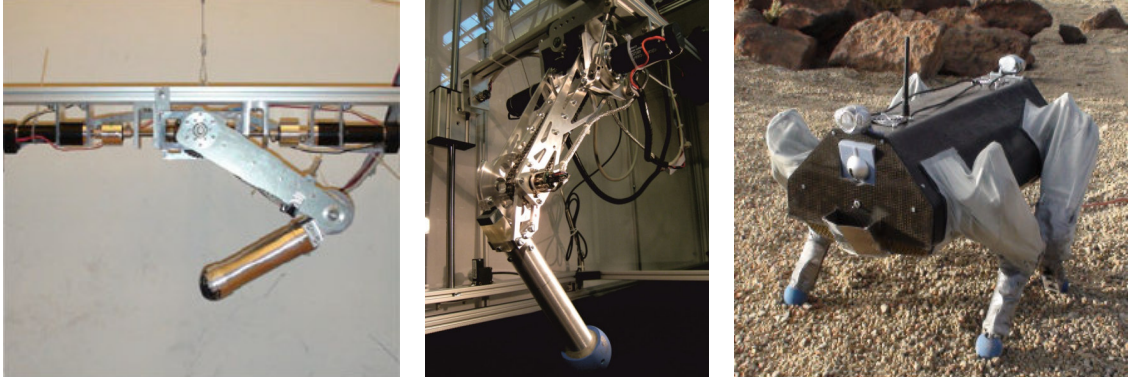
başlamıştır. Semini'nin kendi doktora tezinde de belirttiği gibi, bu çalışmanın asıl motivasyon kaynağı Marc. H. Raibert'ın çalışmaları ve BigDog robotunun yarattığı büyük etkidir (Semini, 2010). Semini 2007 yılında, BigDog robotuna benzer bir robot geliştirebilmek için, çalışmalarına ilk olarak ayaklı robotların en önemli bileşeni olan bacak mekanizması ve yapılandırması üzerine yaptığı araştırmalar ile başlamıştır (Semini ve ark., 2008, 2010; Yang ve ark., 2009). Elektro-mekanik yapıların ve özellikle hidrolik eyleyicilerin tasarımının ve performansının değerlendirildiği deneysel çalışmalarda kullanılması için geliştirilen ve Şekil 2.28a'da gösterilen HyQ robotuna ait bacağın ilk versiyonu, sadece dikey düzlemde hareket edebilecek şekilde birbirine döner mafsallarla bağlanmış iki adet uzuvdan oluşan basit bir mekanizmaya sahipti. Bacak mekanizması, hidrolik silindirler ile tahrik edilen her biri 0.3m uzunluğunda olmak üzere toplamda iki serbestlik derecesine sahipti. Şekil 2.28b'de gösterilen ikinci bacak versiyonunda, ayakucu ve bacak arasına yay eklenerek, sistemin toplam serbestlik derecesi üçe çıkartılmıştır (Semini ve ark., 2011), fakat Şekil 2.28c'de gösterilen sistem empedansının aktif olarak kontrol edildiği HyQ robotunun son versiyonunda kullanılan bacak tasarımında bu yay eklenmemiştir (Semini ve ark., 2011, 2016; Focchi ve ark., 2012). Şekil 2.29a'da ilk versiyonu gösterilen 2011 yılında imal edilen HyQ robotu ile dört ayaklı robotların dinamik yürüyüşü ve kontrolü üzerine birçok deneysel araştırma-geliştirme çalışmaları gerçekleştirildikten sonra, robota ait eyleyiciler, hidrolik bileşenler, elektro-mekanik yapı ve sensörler iyileştirilerek, 2013 yılında Şekil 2.29b'de gösterilen HyQ robotuna ait son versiyon imal edilmiştir. Hidrolik olarak tahrik edilen toplamda 12 serbestlik derecesine sahip, 75kg ağırlığında, 1m uzunluğunda, 0.5m genişliğinde, 1m boyunda olan son versiyon HyQ robotunun tüm eklemlerinde manyetik

mutlak ve optik bağıl kodlayıcılar vardır, ayrıca robot, gerinim ölçme tabanlı kuvvet–tork sensörlerine sahiptir. Bunlara ek olarak robotta, hidrolik bileşenlere ait basınç sensörleri ve gövde duruşunun belirlenmesinde kullanılan atalet ölçüm birimi de mevcuttur. Ayakucunda yüksek frekanslı darbelerin sönümlenmesini sağlayan ve robota çekiş gücü sağlayan yüksek oranda sıkıştırılmış araba lastiği kauçuğu benzeri bir malzeme kullanılmıştır (Boaventura ve ark., 2012; Havoutis ve ark., 2013b; Ugurlu ve ark., 2013; Semini ve ark., 2015; Winkler ve ark., 2015; Boaventura ve ark., 2015).

Tablo 2.1. HyQ2Max robotuna ait sistem özellikleri (Semini ve ark., 2017)'nin çalışmasından uyarlanmıştır.

Boyutlar	Boy: 1.306m Genişlik: 0.544m Yükseklik: 0.918m	Üst Uzuvdaki Eyleyici ve Maksimum Tork	Tek Kanatlı Döner Hidrolik Eyleyici 45N·m (@20 MPa)
Uzuv Boyutları ve Ağırlıkları	Bacağın Kalça Uzvu: 0.117m, 3.54kg Bacağın Üst Uzvu: 0.36m, 4.95kg Bacağın Alt Uzvu: 0.38m, 1.40kg	Alt Uzuvdaki Eyleyici ve Maksimum Tork Kalça Uzvundaki Eyleyici ve Maksimum Tork	Hidrolik Silindir & Dört Çubuk Mekanizması 250N·m (@20 MPa) Çift Kanatlı Döner Hidrolik Eyleyici 120N·m (@20 MPa)
Maksimum Ayak Uzunluğu	0.740m	Toplam Serbestlik Derecesi	12
Toplam Ağırlık	80kg (Güç Kaynağı Hariç)	Konum Sensörleri	Tüm eklemlerde Mutlak Konum Sensörü (Çözünürlük: 262.144 CPR)
Eklemlerin Açılış Aralığı	Kalça Uzvu: 80° Üst Uzuv: 270° Alt Uzuv: 165°	Kontrolcü Frekansı	1 kHz Tork & Konum Kontrolcüsü (EtherCAT arayüzü)

HyQ robotu ile düz, eğimli ve engebeli arazide yürüme, dış darbeler altında dengeyi sağlama (Barasuol ve ark., 2013), koşma (Semini ve ark., 2015), adım refleksleri, sezgisel yürüyüş, engeller üzerinden atlama (Havoutis ve ark., 2013a; Bazeille ve ark., 2014) ve engebeli yüzeylerde yürüme ve merdiven çıkma için optimize edilmiş yürüyüş (Winkler ve ark., 2014) gibi yüksek hareket kabiliyetlerinin değerlendirildiği birçok başarılı deneysel çalışma gerçekleştiren Semini, laboratuvar ortamının dışına çıkarak gerçek hayatta kullanılacak bir robot imal edebilmek amacıyla 2015 yılında Şekil 2.29c'de gösterilen HyQ2Max adını verdiği HyQ robotunun daha gelişmiş bir versiyonunu geliştirmeye başlamıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen bilgi ve birikimler ışığında HyQ robotunun sağlamlığını, bacağın çalışma uzayını ve eklemlerde üretilen torkları artırabilmek ve zayıf yönlerini güçlendirebilmek için bacakları ve gövdeyi tamamen yeniden tasarladıkları



(a) FerrETH ismindeki ilk versiyonu (b) ScarLETH ismindeki son versiyonu (c) ScarLETH'nin kullandığı ALoF ismindeki ilk robot

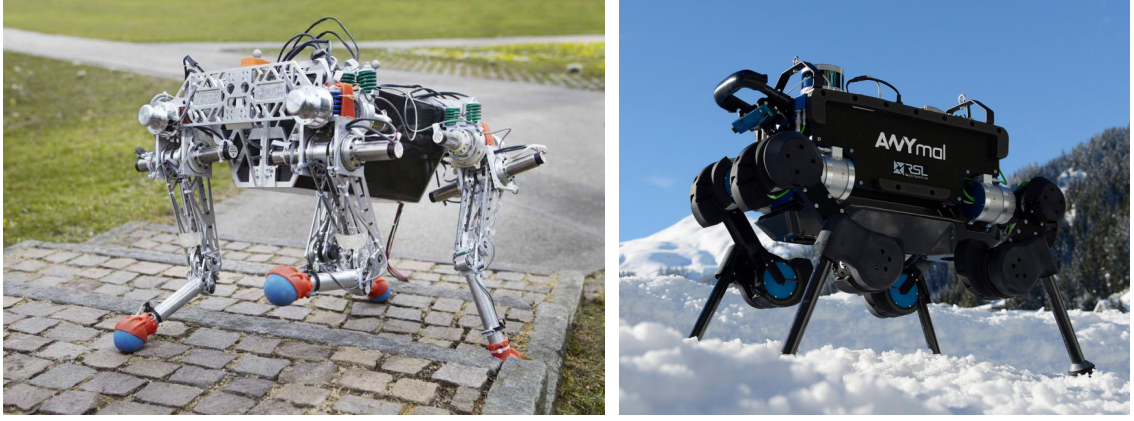
Şekil 2.30. Zürih Federal Teknoloji Üniversitesi bünyesinde ayaklı robotlarda kullanılmak üzere geliştirilen robotik bacaklar (a,b) ve kullandığı ilk dört ayaklı robot (c).

HyQ2Max robotundaki en dikkat çekici değişiklikler bacak ile gövde arasındaki eklemin yapılandırılmasında ve bacaklarda tork üretimi için kullanılan eyleyicilerde yapılmıştır. Bacağın üst kısmını tahrik etmek için hidrolik silindir yerine hidrolik döner eyleyici tercih edilmiştir. Bacağın alt kısmında tork üretimini iyileştirebilmek için yine hidrolik silindirler dört çubuk mekanizması ile birlikte kullanılmıştır (Semini ve ark., 2017). Bu tezin yazımı sırasında halen IIT bünyesinde geliştirilmeye devam edilen ve günümüzün en gelişmiş dört ayaklı robotlarından biri olan HyQ2Max robotuna ait sistem özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Gerçek hayatta kullanılmaya en yakın diğer bir dört ayaklı robot, özellikle dört ayaklı robotlar üzerine bir çok araştırmanın yapıldığı Zürih Federal Teknoloji Üniversitesi¹ (ETHzürich) Robotik ve Akıllı Sistemler Enstitüsü bünyesinde, ANYbotics firmasının kurucularından Marco Hutter tarafından geliştirilen ANYmal ismindeki robottur (Bellicoso ve ark., 2018a). Yukarıda bahsedilen gelişmiş robotların başlangıç noktasının ilk önce tek bir bacak üzerine yapılan araştırma çalışmaları olduğu gibi, ANYmal robotunun geliştirilmesine de ilk önce canlıların yürüyüşlerindeki benzer dinamikleri sağlayabilen, eklemlerde geçici enerji depolayabilen ve arazi uyumunun pasif olarak geliştirilebildiği Seri Esnek Eklemlerli Robotik Bacak² (ScarLETH) adı verilen tek bir robot bacağı üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla başlanmıştır. ETHzürich bünyesinde ayaklı yürüyüş üzerine yapılan birçok araştırma çalışmaları (Fisler, 2008; Hutter ve ark., 2009, 2011) sonucu geliştirilen, Şekil 2.30a'da ilk ve Şekil 2.30b'de son versiyonu gösterilen ScarLETH

¹Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

²Series Compliant Articulated Robotic Leg



(a) StarLETH robotu

(b) ANYmal robotu

Şekil 2.31. Zürich Federal Teknoloji Üniversitesi bünyesinde Marco Hutter tarafından geliştirilen dört bacaklı robotlar.

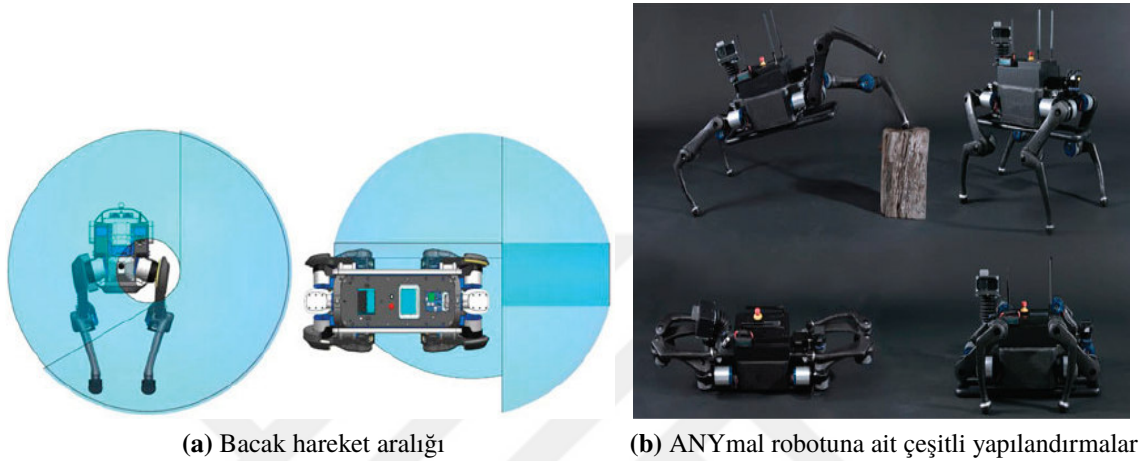
ismindeki robotik bacak, ilk olarak David Remy tarafından 2008 yılında Avrupa Uzay Ajansı tarafından düzenlenen Lunar Robotik Yarışması'na katılmak için geliştirilen ALoF¹ isimli (Şekil 2.30c) dört bacaklı bir robotta kullanılmıştır (Belo ve ark., 2012; Hoepflinger ve ark., 2010; Remy, 2011; Remy ve ark., 2011). Daha sonra Marco Hutter yine ScarLETH adındaki robotik bacakları kullanarak, doktora çalışması kapsamında Eklemlili Robotik Ayaklı Yaylı Tetrapod² (StarLETH) adını verdiği dört ayaklı bir robot geliştirmiştir (Hutter, 2013).

Laboratuvar ortamında mekanik tasarım, hareket kontrol prensipleri ve eyleyici üzerine yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere tasarlanan StarLETH robotu, rijid bir ana gövdeye bağlanmış dört özdeş ve tamamen simetrik eklemlili bacaklara sahiptir. Her bacağın memeli tarzında düzenlenmiş üç serbestlik derecesi vardır. Hızlı bacak hareketleri elde edebilme adına tüm eyleyiciler gövdeye montaj edilerek, hafif bir bacak yapısı tercih edilmiştir. Yaklaşık 0.5 m boyunda ve 23 kg ağırlığındaki bu robotun bacakları 0.2 m uzunluğundaki bölümlerden oluşmaktadır. Canlılardaki kas ve tendon yapısına benzer özelliklere sahip, son derece esnek seri elastik eyleyiciler tarafından tahrik edilen bacaklar sayesinde hareket esnasında enerji depolayabilmektedir. Bu sayede yüksek enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Hutter, StarLETH robotu ile mekanik tasarım (Remy ve ark., 2012), ayaklı robotlarda esnek bacakların kullanımı (Hutter ve ark., 2013), yürüyüş ve tork kontrolü (Gehring ve ark., 2014), dört ayaklı robotların hızı, verimliliği, çok yönlülüğü ve sağlamlığı (Hutter ve ark., 2014a), yürüyüş esnasında kuvvet ve tork optimizasyonu

¹Autonomous Legged Robot on Four Legs

²Springy Tetrapod with Articulated Robotic Legs

(Hutter ve ark., 2014b), eğimli yüzeylerde dinamik yürüyüş (Gehring ve ark., 2015), dört ayaklı koşma ve atlama hareketlerinin matematiksel model kullanılarak durum-geri bildirim ile optimizasyon tabanlı kontrolü (Gehring ve ark., 2016) gibi birçok konu üzerine yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bilgi ve birikimi kullanarak, laboratuvar ortamının dışında, gerçek hayatta zorlu ortamlarda kullanılacak bir robot imal edebilmek amacıyla ANYmal robotunu geliştirmeye başlamıştır (Hutter ve ark., 2016).



Şekil 2.32. Tamamen dönebilen bacak eklemleri sayesinde ANYmal robotunda elde edilen bacak hareket aralığı ve robota ait farklı bacak yapılandırmaları (Hutter ve ark., 2017)'nin çalışmasından uyarlanmıştır.

Tek bir ana karbon fiber gövdeye basit mekanik bağlantılarla bağlanmış 12 adet özdeş eyleyiciye sahip, çevre algısı için iki adet lidar¹ sensör ve geniş açılı kameranın kullanıldığı, toplamda 30kg ve 0.5m yüksekliğinde olan ve farklı uygulamalar için kullanılacak gaz algılama sensörü, ultrason mikrofön, optik yakınlaştırma ve termal kamera gibi sensörler veya manipülasyon için kullanılacak robotik kolların bağlantısına izin veren modüler bir yapıya ve IP67 sınıfı bir koruma derecesine sahip olan ANYmal robotu (Şekil 2.31b), yüksek hareketlilik, hızlı ve dinamik hareket yetenekleri, sağlamlık, basit bakım onarım gibi konulara odaklanılarak zorlu ortamlarda uzun süreli dayanıklı otonom çalışma için özel olarak tasarlanmıştır (Hutter ve ark., 2017). ANYmal robotunda da selefi StarLETH robotunda olduğu gibi memeli canlılarda görülen bir eklem yerleşimi tercih edilmiştir. Ancak StarLETH, ALoF, HyQ, BigDog veya diğer geliştirilen ayaklı sistemlerin aksine bu robotun bacakları, tüm eklemlerin tamamen dönebileceği şekilde, ofsetli olarak birbirlerine bağlanmıştır. Bu sayede ANYmal robotunun bacakları, yüksek hareketliliğin anahtarı olan

¹**Light Detection and Ranging** – Lazer darbeleri kullanılarak bir nesne veya bir yüzeyin uzaklığını anlamaya yarayan Radar benzeri bir teknoloji. Radarda kullanılan radyo dalgaları yerine ışık, yani lazer darbeleri kullanılır.

oldukça geniş bir hareket aralığında çalışabilmektedir (Şekil 2.32a). Bununla birlikte, geniş hareket aralığı sayesinde Şekil 2.32a'da gösterildiği gibi ANYmal robotunun ayakları, kapı açmak veya yüksek engelleri aşmak gibi hareketler için gerekli yüksekliklere çıkabilmekte veya yürüyüş esnasında bacak yapılandırmasını değiştirebilmektedir. Bu tezin yazıldığı tarihte, ETHzürich bünyesinde ANYmal robotunun geliştirilmesine yönelik çalışmalar halen devam etmektedir (Bellicoso ve ark., 2018a,b; Fankhauser, 2018; Winkler, 2018; Fankhauser ve Hutter, 2018).

Son olarak, Mete Kalyoncu ve ekibi tarafından, ilk olarak Selçuk Üniversitesi ve daha sonra Konya Teknik Üniversitesi bünyesinde olmak üzere, literatürdeki başarılı dört ayaklı robotlarda olduğu gibi yine hidrolik tahrikli bir dört ayaklı robot geliştirilebilmek için bu tez çalışmasının da bir parçası olduğu araştırma çalışmaları yürütülmektedir. Yukarıda değinildiği üzere birçok başarılı robotun başlangıç noktasının ilk önce tek bir bacak üzerine yapılan araştırma çalışmaları olmasından dolayı, Kalyoncu ve ekibi çalışmalarına, dört ayaklı bir robot için bir bacak tasarımı da dahil olmak üzere, ilk önce yürüyüşün kendisi ile değil de yürüyüş performansını doğrudan etkileyen adım atma performansı ve adım kontrolü üzerine yaptıkları araştırmalar ile başlamışlardır. Devamında farklı çalışma şartları için adım refleksinin iyileştirilmesi ile yürüyüş performansının artırılması ve dört ayaklı bir robotun ters kinematik analizi gibi konular üzerine yaptıkları araştırmalar ile çalışmalarına devam etmektedirler (Bakırcıoğlu ve ark., 2016b,a, 2017, 2018; Şen ve ark., 2017, 2018; Şen ve Kalyoncu, 2019).

2.4. Bölüm Özeti

Literatürde, son yirmi yılda ASIMO ve BigDog gibi başarılı robotik uygulamalarının yarattığı etki ile ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmaların sayısı giderek yükselen bir ivme ile artmıştır. Ayaklı robotlar alanında 1990'lı yıllardan günümüze 200 adetten fazla robot geliştirilmiştir ve bu robotların yaklaşık %20'sini dört ayaklı robotlar oluşturmaktadır (de Santos ve ark., 2006b). Yapılan çalışmanın dört ayaklı bir robot üzerine olmasından dolayı, kaynak araştırması sırasında dört ayaklı robotlar ile ilgili çalışmalara odaklanılmıştır, ancak sadece bununla sınırlı kalmayıp iki ayaklı ve altı ayaklı robotlar gibi farklı ayak sayılarına sahip robotlar üzerine yapılan, ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahip olduğunu düşündüğüm çalışmalara da yer verilmiştir. Ancak geçmiş dönem ayaklı hareket literatürüne daha detaylı ve kapsamlı bir bakış için, kaynak araştırmasında birçok kez başvurduğum ve ayaklı robotlar alanında çalışan her araştırmacının kütüphanesinde bulunması

gerektiğini düşündüğüm, ayaklı hareket ile ilgili yayımlanan şu eserlere başvurulabilir; Todd (1985c), Raibert (1986), de Santos ve ark. (2006a), Popović (2013), Nonami ve ark. (2014).

Bu bölümde anlatılan ayaklı robotlar literatüründeki önemli kilometre taşları kronolojik sıra ile Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Ayaklı robotlar literatüründeki önemli çalışmaların kronolojik sıralaması.

Çalışmanın İçeriği	Yılı	Sahibi
Erken dönem yürüyen makinelerde kullanılan lambda mekanizmasının tasarımı.	1850	Tchebyshev
Canlıların hareketliliği üzerine yapılan ilk önemli çalışma.	1872	Muybridge
The Plantigrade Machine — Yürüeyebilen ilk mekanizma.	1878	Tchebyshev
Yürüeyebilen bir makineye ait bilinen ilk patent başvurusu.	1893	Rygg
Birbirinden bağımsız kontrol edilebilen bacaklara sahip bir yürüyen makine tasarımına yönelik ilk ciddi girişim.	1940	Hutchinson
ATAC bünyesinde Arazi Hareket Laboratuvar’ının kurulması.	1954	Bekker
Pantograf mekanizmasına sahip yürüeyebilen bir makinenin ilk tasarım konsepti.	1960	Shigley
The Iron Mule Train — Açık arazide yürüeyebilen ilk makine tasarımı.	1961	Morrison
Yürüyen robotların kontrolü için Sonlu–Durum yaklaşımının ilk defa önerilmesi.	1961	Tomovic
Ters sarkaç modelinin aktif dengelenmesi üzerine ilk önemli çalışmalar.	1963	Cannon
The Phony Pony — Basit dijital mantığa dayalı kontrol ile ilk otonom dört ayaklı robot.	1968	McGhee
Handyman, Hardiman ve GE Walking Truck çalışmaları	1968	Mosher
Sıfır Moment Noktası kavramının önerilmesi.	1972	Vukobratović
SSCB’de bilgisayar ile altı ayaklı Masha robotunun hibrid kontrolü.	1976	Gurfinkel
The OSU Hexapod – Dijital bilgisayarı kullanan ilk yürüyen altı ayaklı robot.	1977	McGhee
The PANTOMEK mekanizması ve merdiven tırmanabilen TITAN serisi dört ayaklı robotların başlangıcı.	1980	Hirose ve Umetani
Aktif dengeleme ilkesine dayalı yürüyen bir robot tasarlamak için ilk önemli girişim.	1980	Kato
Robotların koşması üzerine ilk deneysel çalışmalar - Tek ayak üstünde zıplarken aktif dengeleme.	1980	Matsuoka
Aktif dengeleme ilkesine dayalı üç boyutta yürüeyebilen bir robot tasarımı üzerine ilk önemli girişim.	1981	Miura ve Shimoyama
"Sanal Bacak" kavramının ilk kez önerilmesi.	1983	Sutherland
Düzlemsel zıplayan tek bacaklı makine – "Üç Ayrıştırma Algoritması" kavramının ilk defa önerilmesi	1983	Raibert
Honda firmasına ait "İnsansı Robot Projesi".	1986	Honda
Adaptif Süspansiyonlu Araç ismindeki altı ayaklı robot.	1987	Waldron ve McGhee
Sanal bacak konseptine dayanan aktif dengeleme ile yürüeyebilen dört ayaklı bir robot üzerine ilk gelecek vaat eden çalışmalar.	1989	Raibert

Tablo 2.2'nin önceki sayfadan devamı...		
Çalışmanın içeriği	Yılı	Sahibi
Dante Projesi – Yürüyen bir robotun gerçek bir keşif görevinde ilk kez kullanılması.	1992	Whittaker
COMET serisi altı ayaklı robotlar – Özellikle mayın temizleme işleri için tasarlanmış ilk bacaklı robotlar.	2000	Nonami
line Scout serisi koşabilen ve merdiven çıkabilen dört ayaklı robotlar.	1998	Buehler
Merkezi Örüntü Üretici kavramına dayalı dinamik yürüyen dört ayaklı bir robot üzerine ilk umut verici çalışmalar.	2000	Kimura ve Fukuoka
BigDog Projesi — Dört ayaklı robotlar alanında günümüzdeki standartları belirleyen proje.	2005	Raibert
HyQ Robotu — Gerçek hayatta kullanılmaya en yakın dört ayaklı robotlardan biri üzerine ilk çalışmalar.	2007	Semini
StarLETH robotu — Seri elastik eyleyiciler kullanılarak tasarlanan dört ayaklı bir robot üzerine ilk önemli çalışma.	2013	Hutter
ANYmal robotu — Gerçek hayatta kullanılmaya en yakın dört ayaklı robotlardan biri üzerine ilk çalışmalar.	2016	Hutter

3. SİSTEME AİT TASARIM ÇERÇEVESİNİN BELİRLENMESİ

Bu bölümde, öncelikle bu çalışmanın konusu olan dört bacaklı bir robotun tasarım özelliklerinin belirlenmesinde başvurulacak referansların tayini için sistemden beklenen performans ölçütleri ve tasarım kriterleri belirlenmiştir. Tasarımı yapılan sistemden beklenen performans ölçütlerine karar verilirken, Bölüm 1.2’de belirtilen sistemin tasarım amacına uygun çalışma şartları göz önüne alınmıştır. Bu noktada, bu çalışmanın halen ilk örnek aşamasında olması bakımından tasarlanan sistemin çalışma şartlarına karar verilirken daha çok bilimsel çalışmalarda kullanılacak bir platform olması yönünde bir yaklaşım benimsenmiştir. Devamında bacak sayısı, bacakların serbestlik derecesi, bacak çalışma uzayı, bacak mekanizmasının kinematik yapılandırması gibi sistem yapılandırma özelliklerine karar verilirken dikkat edilen konular anlatılmıştır. Son olarak, kullanılacak eyleyicilerin belirlenmesine de bu bölümde yer verilmiştir.

3.1. Tasarım Özelliklerinin Belirlenmesi

Sıfırdan bir sistem oluşturulurken tasarım özelliklerinin belirlenebilmesi için ilk olarak sistemin oluşturulma amacına uygun sistemden beklenen performans ölçütlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle yüksek hareketlilik için geliştirilen ayaklı robotlar için, sonuçta ayaklı robotların ilham kaynağının doğadaki canlılar olmasından dolayı, tasarım kuralları doğada bulunan benzer canlılardan doğrudan uyarlanabilmektedir. Örneğin, ayaklı robotların bacak mekanizmasının tasarımında mafsalların konumuna ve yapılandırılmasına, benzer canlılardaki eklem yapılandırılmasına bakılarak karar verilebilmektedir. Ayaklı robotlar literatüründe genellikle tasarım çalışmalarında biyomimetik diye bilinen bu yöneme başvurulmuştur (Sakagami ve ark., 2002; Li ve ark., 2012; Sprowitz ve ark., 2013; Semini, 2010). Bu yaklaşımın çok sık uygulanmasının nedeni evrimin kendisinin milyonlarca yıl süren en iyi optimizasyon yöntemi olduğu algısıdır. Ancak, uygulama açısından bakıldığında üretim teknolojilerindeki kısıtlar ile mekanik ve fiziksel kısıtların varlığı sebebiyle bu yöntem tek başına yetersizdir. Çünkü, canlıların fiziksel özelliklerini taklit etmek, düşük kontrol edilebilirliğe neden olan yüksek serbestlik dereceli karmaşık mekanizmalara yol açmaktadır. Bu bağlamda düşünüldüğünde tasarımı yapılan sistemin özellikleri belirlenirken mekanik ve fiziksel özelliklerin yanında üretim teknolojileri ve kontrol edilebilirlik gibi birçok kavram gözden geçirilmelidir. Bahsi geçen bu konularla

birlikte, literatürde uygulaması yapılmış başarılı robotlarda izlenen mevcut yaklaşımlar ve metodlar da değerlendirilerek, tasarımı yapılacak olan sistemin amacına uygun performans ölçütleri ve tasarım kriterleri belirlenmelidir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilecek olan dört bacaklı bir robotun tasarım özelliklerine karar verilirken belirlenmiş olan bir takım performans ölçütleri ve bu ölçütlere bağlı olarak belirlenmiş tasarım kriterlerine bu bölümün devamında yer verilmiştir. Belirlenen bu kriterler ve ölçütler sistem özelliklerinin anahatlarını oluşturmaktadır ve sistem yapılandırmasına karar verilirken başvurulacak bir referans olarak kullanılmıştır.

3.1.1. Performans Ölçütlerinin Belirlenmesi

Bölüm 1.2’de belirtildiği gibi tasarlanan sistemin ana amacı çeşitli uygulamalarda konvansiyonel mobil robotlar yerine kullanılması ve ayrıca bilimsel çalışmalarda çeşitli konuların araştırılmasında kullanılacak bir platform olmasıdır. Yapılan tasarımın ilk örnek olmasından dolayı, bir takım sistem özelliklerinin tasarım sürecinde ve sonrasında yapılacak araştırma çalışmaları sonucu iyileştirilebileceği gerçeğinden hareketle daha geniş ve makul performans ölçütleri seçilmiştir. Bunun sonucu olarak, bilimsel çalışmalar bağlamında daha geniş bir uygulama alanına sahip bir tasarım elde edilmiştir.

Öncelikle ilk performans ölçütü olarak tasarımın, ayaklı sistemlerde uygulanan farklı dinamik ve statik yürüyüş tiplerinde yürüyebilecek şekilde yapılmasına karar verilmiştir. Bu sayede uygulama alanına, arazi tipine ve sistemden beklenen hızlara göre yürüyüş şekilleri değişebilecektir. Ayrıca, bu şekilde bilimsel araştırmalarda farklı yürüyüş şekilleri üzerine yapılacak çalışmalara imkan sağlanabilecektir. İkinci performans ölçütü olarak tasarımın, zorlu arazilerde hareket edebilecek şekilde yapılmasına karar verilmiştir. Bu sayede, sistemin zorlu arazilerde hareketi gerektiren farklı uygulama alanlarına uyarlanmasına karar verilirken dengeleme problemleri daha az belirleyici bir sebep olacaktır. Üçüncü performans ölçütü olarak tasarımın, zorlu arazilerde hareket ederken veya dış etkenler altında kendini dengeleme becerisine sahip olacak şekilde yapılmasına karar verilmiştir. Bu sayede kontrol edilebilirlik bağlamında ayaklı sistemlerin en büyük problemlerinden olan dengeleme sorununun çözümü yerine yürüyüş şekilleri, konum ve kuvvet kontrolü gibi konulara odaklanılabilecektir. Bir diğer performans ölçütü olarak tasarımın, ek yük taşıma kapasitesine sahip olmasına karar verilmiştir. Bu sayede, sistemin tasarım amaçlarından olan farklı uygulama alanlarında lojistik destek olarak kullanılabilmesine imkan verilecektir. Son performans ölçütü olarak tasarımın, ayaklı sistemlerde en önemli

bileşenlerin bacaklar olması göz önüne alınarak, enerji verimliliği bakımından iyileştirilmiş bacak yapılandırmasına sahip olmasına karar verilmiştir.

3.1.2. Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi

Performans ölçütlerine karar verildikten sonra tasarım amacına uygun fiziksel ve mekanik özellikler belirlenmelidir. Bu oldukça zorlu bir çalışma olmakla beraber, tasarıma ait bileşenlerin seçiminde, boyutlandırılmasında ve mekanik yapının tasarımında etkili olan oldukça önemli bir süreçtir. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi farklı unsurlara bağlıdır. Örneğin, robotun tek bir operatör tarafından kolayca çalıştırılabilecek boyutlarda olması ve aynı zamanda sistemin çalışması için gerekli elektro-mekanik elemanları taşıyabilecek boyutlarda olması önemli bir gerekliliktir. Bu şekilde birbirine zıt tasarım kriterleri ile birlikte sistemde kullanılacak eyleyiciler, sensörler, kontrolcü sistemi, güç kaynağı gibi mevcut bileşenlerin özellikleri, boyut ve ağırlık gibi tasarıma ait fiziksel özelliklerin seçimini oldukça kısıtlamaktadır.

Bu noktada, tasarım için belirlenmiş performans ölçütleri birer referans olarak kullanılmaktadır. Tasarım sonucu elde edilen sistemin, belirlenmiş performans ölçütlerini sağlayabilecek şekilde olması ve aynı zamanda mevcut bileşenler ile tasarımın gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Örneğin, tasarlanan sistemin, ek yük taşıma kapasitesine ve zorlu arazilerde hareket edebilme gibi performans ölçütlerine sahip olabilmesi için gövde yapısının ve bacaklarının oldukça rijit olması gerekmektedir. Bu sayede bahsedilen yükler altında bileşenlerin şekil değiştirmeleri en aza indirilebilecektir. Ancak sistemin toplam ağırlığının, çalışma süresinin iyileştirilmesi ve enerji verimliliği bağlamında, olabildiğince hafif olması gerekmektedir. Bu gerekliliklere cevap verilebilecek bir yapının tasarımı için uygun mekanik özelliklere sahip materyallerin seçilmesi gerekmektedir. Bunlara ek olarak, tasarımı yapılan sistemin yüksek hızlarda çalışırken istenmeyen atalet kuvvetlerinin oluşmasının önüne geçilebilmesi için bacakların hem ağırlığının olabildiğince hafifletilmesi hem de bacak kütle merkezinin olabildiğince gövdeye yakın olması sağlanmalıdır. Kısaca bacakları oluşturan bileşenlerin topolojisinin iyileştirilmesi sağlanmalıdır.

Bir diğer performans ölçütü olan, sistemin farklı dinamik ve statik yürüyüş tiplerinde yürüebilmesi için tasarıma ait gövde genişliğinin hem statik yürüyüşte denge poligonunu oluşturacak şekilde yeterince geniş seçilmesi hem de dinamik yürüyüşün daha kolay gerçekleştirilebilmesi için yeterince dar bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca dengeleme problemi bağlamında, engebeli arazilerde hareket ederken gövde yüksekliğinin

ve sonucunda bacak boyutlarının gövde boyutlarının seçimine bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bunlara ek olarak tasarımın, bir diğer performans ölçütüne cevap vermesi için farklı yürüyüş tiplerini gerçekleştirebilecek bir bacak serbestlik derecesine sahip olması ancak kontrol edilebilirlik açısından çok karmaşık bir yapıya sahip olmaması gerekmektedir. Yukarıda bahsedilen konuların ve belirlenen performans ölçütleri ile tasarım kriterlerinin kısa bir özeti Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Tasarım için oluşturulan performans ölçütleri ve belirlenen ölçütlerin karşılanması için belirlenen tasarım kriterleri

PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ		TASARIM KRİTERLERİ
P.1	Farklı dinamik ve statik yürüyüş tiplerinde yürüyebilmesi	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gövde ve bacak boyutlandırılmasının farklı yürüyüş tiplerine uygun seçilmesi ■ Bacak serbestlik derecesinin uygun seçilmesi ■ Bacak çalışma uzayının uygun genişlikte seçilmesi
P.2	Zorlu ve engebeli arazilerde hareket edebilmesi	<ul style="list-style-type: none"> ■ Uygun mekanik özelliklere sahip materyallerin seçilmesi ■ Gövde ve bacak boyutlandırılmasının denge problemine uygun seçilmesi
P.3	Kendini dengeleme becerisine sahip olması	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gövde ve bacak boyutlandırılmasının denge problemine uygun seçilmesi
P.4	Ek yük taşıma kapasitesine sahip olması	<ul style="list-style-type: none"> ■ Uygun mekanik özelliklere sahip materyallerin seçilmesi ■ Gerekli torklar için uygun eyleyicilerin seçilmesi
P.5	İyileştirilmiş bacak yapılandırmasına sahip olması	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bacak topolojisinin iyileştirilmesi ■ Bacak mekanizmasında kuvvet iletiminin iyileştirilmesi

Sistemin çevresi ile olan etkileşimini belirleyen sistemin yapısal tasarımındaki yaklaşımlar ayaklı robotlar literatüründe önemli bir tartışma konusudur. Bu noktada, çevre ile etkileşimi güvenli bir şekilde sağlayabilmek için doğal olarak uyumlu esnek yapıların tercih edilmesi yada sistem kontrolünün kesin ve tam olarak yapılabilmesi için tamamen kontrol edilen rijit bir kinematik yapının tercih edilmesi şeklinde iki farklı ana yaklaşım benimsenmiştir (Hutter, 2013). Bu çalışmanın ilk örnek aşamasında olmasından dolayı, tasarım aşamasında, çevreyle olan etkileşim konusunda herhangi bir performans ölçütü belirlenmemiştir. Ancak, Semini ve ark. (2016)’nın önerdiği gibi sistemin çevre ile olan etkileşiminin kontrol edilmesi noktasında empedans kontrolcülerine başvurulması yönünde bir yaklaşım izlenecektir.

3.2. Robot Yapılandırmasının Belirlenmesi

Ayaklı robotlar literatüründeki çalışmalar ayak sayısına göre iki, dört ve altı ayaklı olmak üzere üç ana başlık altında yapılmıştır. Bacak sayılarının bu şekilde çiftli simetrikler şeklinde olmasının ana sebebi doğadaki canlılarda görülen simetridir ve ayaklı robotların esin kaynağının yine doğa olmasıdır. Ayaklı sistemlerin tasarımında sistem yapılandırılması doğrudan bacak sayısı ile alakalıdır. Bu yüzden öncelikle sistemde kullanılacak bacak sayısına karar verilmelidir. Daha sonra bacak yapılandırılmasına karar verilip kullanılacak eyleyicilerin seçimi için gerekli kuvvet profilleri oluşturulmalıdır.

Bu çalışma kapsamında bacak sayısının belirlenmesi, eyleyici seçimi ve bacak mekanizmasının yapısı gibi robot yapılandırmasını belirleyen unsurlara karar verilirken, Bölüm 3.1.1'de belirlenen performans ölçütleri ve Bölüm 3.1.2'de belirlenen tasarım kriterleri temel alınmıştır. Bölümün devamında sistem modelinin çerçevesini oluşturmak için temel alınan yaklaşımlara yer verilmiştir.

3.2.1. Bacak Sayısının Belirlenmesi

Ayaklı robotlar literatüründe kendi sınıflarının en başarılı robotları, iki ayaklı robotlarda ASIMO robotu, dört ayaklı robotlarda BigDog robotu ve altı ayaklı robotlarda COMET-IV robotu gösterilebilir. Ayak sayısına karar verilirken hareket kabiliyeti, yürüyüş tipi, taşıma kapasitesi, denge problemi gibi konulara dikkat edilmelidir. Bacak sayısı seçiminin kendi içinde olumlu ya da olumsuz etkileri vardır. Örneğin COMET-IV robotunda olduğu gibi altı ayaklı sistemlerde, bacak sayısı denge problemi açısından oldukça olumlu bir etki yapmaktadır. Yürüyüş esnasında yerde olan bacak sayısının fazla olması nedeniyle denge poligonu oldukça geniş olmaktadır. Ayrıca, yük taşıma kapasiteleri oldukça yüksektir. Ancak, ayaklarda kullanılan sensörler ve ayakların kontrolü için kullanılan eyleyici sayısı bakımından sistem yapılandırması oldukça karmaşık olmaktadır. Ayrıca, bacak sayısının artmasından dolayı robot toplam ağırlığı olumsuz etkilenmektedir. Altı ayaklı robotlarda sadece statik yürüyüş tipinin uygulanabilirliğinden dolayı, ayak sayısının farklı yürüyüş tiplerinin uygulanması noktasında da olumsuz bir etkisi vardır. Tüm bunların aksine ASIMO robotunda olduğu gibi iki ayaklı sistemlerde bacak sayısı sistem ağırlığını olumlu etkilemektedir. Ancak yürüyüş esnasında, yetersiz bacak sayısından kaynaklı çok küçük bir destek alanının oluşmasından dolayı ayaklarda aktif dengeleme ihtiyacı vardır. Bu da ayakuçlarında fazladan atalet oluşturan kontrol elemanlarının varlığına ve bunun sonucunda

da daha karmaşık bir mekanik yapıya neden olmaktadır. Bununla birlikte, aktif dengeleme ihtiyacından dolayı daha karmaşık bir kontrolcü mimarisine ihtiyaç duyulmaktadır.

Statik ve dinamik yürüyüş çeşitlerinin uygulanabileceği ayaklı bir robot tasarımı için en uygun yapılandırma dört ayaklı sistemlerdir. Bunun başlıca sebebi, statik yürüyüş tipi için gerekli en az bacak sayısının dört olmasıdır ve bu sayı aynı zamanda dinamik yürüyüşe de elverişlidir. Yerdeki ayak sayısı bakımından altı ayaklı robotlara nazaran daha az avantajlı olmasına rağmen oluşan denge poligonu statik yürüyüş için yeterlidir. Bu yüzden dört ayaklı sistemlerde, dinamik yürüyüş sırasında ayaklarda aktif dengeleme için fazladan kontrol elemanlarına gerek yoktur. İki ve altı ayaklı sistemlere nazaran daha sade bir sistem yapılandırması ve kontrolcü mimarisi ile farklı yürüyüş tiplerinin uygulanabildiği dört ayaklı sistemler bacak sayısı bakımından optimum bir seçimdir. Tüm bu olumlu yönler göz önüne alındığında, yüksek hareketlilik bağlamında, doğada bulunan en gelişmiş hayvanların dört ayaklı olarak tasarlanmış olması tesadüf değildir. Bu çalışma kapsamında geliştirilecek olan sistemin belirlenen performans ölçütlerine cevap verebilmesi için hem yapılandırma sadeliği hem de kontrol edilebilirliğinin daha iyi olmasından dolayı dört ayaklı bir sistem olması yönünde bir yaklaşım tercih edilmiştir. Ayrıca, ayaklı robotlar literatüründe genelde yapıldığı (bkz. Bölüm 2) gibi tasarım, üretim, kullanım ve kontrol kolaylığı açısından sistemde kullanıcak bacakların hepsinin özdeş olması yönünde bir yaklaşım tercih edilmiştir.

3.2.2. Bacak Yapılandırmasının Belirlenmesi

Ayaklı sistemlerin farklı arazi koşullarında ve farklı tiplerde yürüyüş çeşitliliğini etkileyen en temel unsur bacak yapılandırmasıdır. Bu bağlamda düşünüldüğünde, bacak yapılandırması tasarlanan sistemin belirlenen performans ölçütlerine cevap verebilecek şekilde maksimum hareketliliğe müsaade etmesi gerekmektedir. Kısaca, yürüyüş tiplerinin çeşitlendirilebilmesi ve zorlu arazilerde engellerin rahat aşılabilmesi için bacak çalışma uzayı yeterince geniş planlanmalıdır. Ancak, tamamen aktif olarak kontrol edilen sistemlerde eklenen her serbestlik derecesi ek bir eyleyici ve ek bir sensör sistemi yani bacak üzerinde ek bir yük demektir. Dahası, kontrol edilebilirliği olumsuz yönde etkileyecek ek kontrolcü yükleri demektir. Toplam sistem ağırlığında ve kontrolcü sisteminde gereksiz yükler oluşturacak şekilde fazla sayıda bir serbestlik derecesi seçimi performans ölçütlerini olumsuz etkileyeceğinden, bu çalışmada tasarımda en az sayıda bir serbestlik derecesi tercih edilmesi yönünde bir yaklaşıma gidilmiştir. Belirlenen performans ölçütlerini

karşılatabilecek şekilde bacakların üç boyutta hareket edebilmesi için ise toplamda en az üç serbestlik dereceli bir yapılandırmanın kullanılması gerekmektedir. Ayaklı robotlar literatüründe dört ayaklı robotların bacak yapılandırmalarında eklemli ve teleskopik bacak olmak üzere iki temel yaklaşım söz konusudur. Literatürdeki popüler dört ayaklı robotlar için bahsedilen yapılandırma tercihleri, Tablo 3.2’de yayınlanma tarihine göre sıralanarak gösterilmektedir. Şekil 3.1’de şematik gösterimleri de verilen bu yaklaşımlardan teleskopik bacak yapılandırması genelde, sadece dinamik yürüyüş yapan tasarımlarda tercih edilmiştir. Basit bir yapıya sahip olmasına rağmen HyQ, StarLETH, HyQ2Max ve AnyMAL gibi dört ayaklı robotlarda sıklıkla kullanılan ve etkinliği kanıtlanmış bir yapı olması sebebiyle ve ayrıca tasarımın belirlenen performans ölçütlerini karşılayabilmesi için yeterince geniş bir çalışma uzayına sahip olması gerekliliğinden dolayı bu çalışmada da bacak yapılandırmasında Şekil 3.1c’de görülen bacağın gövdeye eklendiği noktada bir serbestlik derecesi daha kazanacak olan iki serbestlik dereceli eklemli bir bacak yapılandırması yaklaşımı tercih edilmiştir.

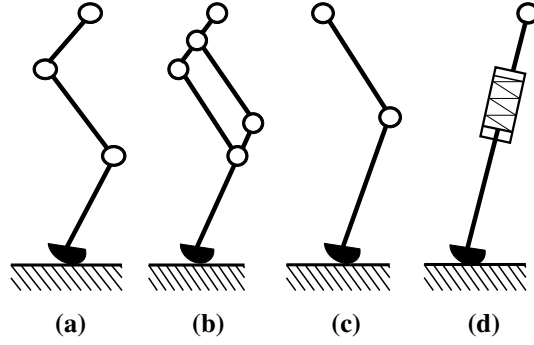
Tablo 3.2. Dört ayaklı robotlarda tercih edilen bacak yapılandırması yaklaşımı ve serbestlik derecesi

Robot İsmi	Yayın Yılı	Serbestlik Derecesi	Yapılandırma Yaklaşımı
Raibert’s Quadruped	1986	3	Teleskopik
Scout II	2005	2	Teleskopik
TITAN XI	2007	3	Eklemli
BigDog	2008	4	Eklemli
HyQ	2011	3	Eklemli
ScarLETH	2011	3	Eklemli
JINPOONG	2013	4	Eklemli
MIT Cheetah Robot	2013	3	Eklemli
Cheetah-cub	2013	4	Eklemli
Spot	2015	3	Eklemli
HyQ2Max	2015	3	Eklemli
ANYmal	2016	3	Eklemli

Bacak yapılandırılmasının belirlenmesinde son aşama olarak eklem yerleşimi ve yöneliminin belirlenmesi gerekmektedir. Kalça Abdüksiyon/Addüksiyon¹ (KAA), Kalça Fleksiyon/Ekstansiyon² (KFE) ve Diz Fleksiyon/Ekstansiyon (DFE) hareketlerini sağlayabilecek üç serbestlik dereceli eklemli bacak yapılandırması için olası eklem yerleşim düzenleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Dört ayaklı robotlar literatürü incelendiğinde bacak yapılandırmasında eklemlerin yerleşimi ve yöneliminin birbirlerine olan üstünlükleri nok-

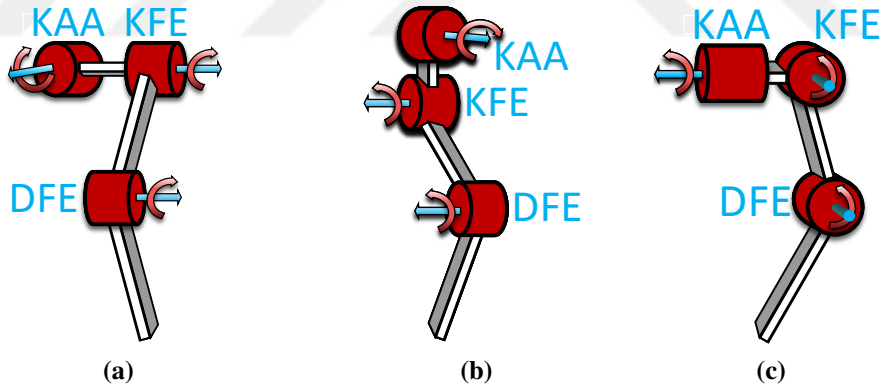
¹Anatomide bir uzvun Frontal düzlemde (Vücudu Ön/Arka olarak ikiye ayıran düzlem) vücuttan uzaklaştırılmasına abdüksiyon, tersine addüksiyon denmektedir.

²Anatomide bir uzvun Saggital düzlemde (Vücudu Sağ/Sol olarak ikiye ayıran düzlem) vücuttan uzaklaştırılmasına Fleksiyon, tersine Ekstansiyon denmektedir.



Şekil 3.1. Ayaklı sistemlerde kullanılan bacak yapılandırma şekillerinin şematik gösterimi; (a) Üç serbestlik dereceli seri mekanizma, (b) Üç serbestlik dereceli paralel mekanizma, (c) İki serbestlik dereceli seri mekanizma, (d) İki serbestlik dereceli teleskopik mekanizma. Her bir yapılandırmada bacağın gövdeye eklendiği noktada serbestlik derecesi bir artmaktadır.

tasında kesin sonuçlar veren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak, HyQ2Max robotunda (Şekil 3.2a) bacak çalışma uzayının robotun kendini daha kolay düzeltebilecek şekilde robot gövdesinin üzerinde ayarlanabilmesi için, kalça eklem yerleşimi halefi HyQ robotundan (Şekil 3.2b) farklı tasarlanmıştır. Aynı şekilde, ANYmal robotunda bacak çalışma uzayını halefi StarLETH robotuna (Şekil 3.2c) göre genişletebilmek için yine memeli canlılarda görülen bir eklem yerleşimi tercih edilmiş ancak eklemler ofsetli bir şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Üç serbestlik dereceli eklemli bacak yapılandırması için olası eklem yerleşim düzenlerinin şematik gösterimi.

Robot gövdesi ve bacak bağlantısının tasarımı etkili olsa da, kullanılacak olan eyleyici tipinin karakteristiği eklem yerleşim düzeninin belirlenmesinde daha baskındır. Örneğin AnyMAL robotunda olduğu gibi elektrik motorlarıyla tahrik edilen eklemlerin ofsetli bir şekilde yerleştirilmesi mümkün iken, eklemler arasındaki ofsetler nedeniyle eklemlerde istenmeyen kısıt kuvvetleri oluşacağından hidrolik pistonlar ile tahrik edilen HyQ2Max robotunda bu yaklaşım mühendislik açısından uygun değildir. Bu sebeple bacağına ait kinematik yapılandırma belirlenirken eyleyici tipinin belirlenmesi ile eş zamanlı

bir tasarım çalışması yapmak gerekmektedir. Tasarlanan sisteme ait performans ölçütleri temel alınarak yapılan eyleyici tipinin seçiminde temel alınan yaklaşımlara Bölüm 3.2.3’de yer verilmiştir. Eş zamanlı olarak yapılan eyleyici seçimi ve kinematik yapılandırmanın belirlenmesi çalışmaları sonucunda bacak yapılandırması belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında geliştirilecek olan dört bacaklı robotun gerektiğinde ayaklarının robot gövdesi üzerindeki bir konuma daha rahat ulaşabilmesi için bacak yapılandırması olarak Şekil 3.2a’da gösterilen bir kinematik yapılandırma tercih edilmiştir. Bu sayede robot, gövdesi üzerinde daha geniş bir KFE hareket alanına sahip olabilecektir ve robot gövdesi üzerinde performans ölçütlerini karşılayabilecek yeterli bir bacak çalışma uzayı elde edilebilecektir.

3.2.3. Eyleyici Tiplerinin Belirlenmesi

Eyleyiciler, hareket için gerekli mekanik enerjiyi farklı enerji kaynaklarından dönüştüren kısaca güç dönüşümü yapan ve hareketi kontrol eden sistemlerdir. Eyleyici tipleri güç kaynağı bağlamında elektrik motorlarında olduğu gibi elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren eyleyiciler veya hidrolik ve pnömatik silindirlere olduğu gibi akışkan gücünü mekanik harekete dönüştüren eyleyiciler olmak üzere iki temel başlıkta incelenebilir. Eyleyici performansları değerlendirilirken hız, hızlanma, üretilen kuvvet ve enerji verimliliği gibi parametrelerin yanında eyleyicinin ağırlığı, boyutları, çalışma koşulları ve dayanıklılığı gibi parametreler de dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda bakıldığında tasarımda kullanılacak eyleyici tiplerinin belirlenmesinde eyleyici performansının tasarıma olan olumlu ve olumsuz etkileri değerlendirilerek bir seçim yapılmalıdır. Dört ayaklı robotlarda kullanılan eyleyiciler noktasında ayaklı robotlar literatürüne çok kapsamlı bir araştırmaya Semini (2010)’nin çalışmasında yer verilmiştir. Burada belirtildiği gibi ayaklı robotlarda, hareket için gerekli hız ve kuvvet profili gibi metriklerin yanı sıra güç–ağırlık oranı, çalışma koşulları gibi metrikler enerji verimliliğini etkilediğinden bu performans ölçütleri eyleyici tipi seçiminde daha baskın olmaktadır.

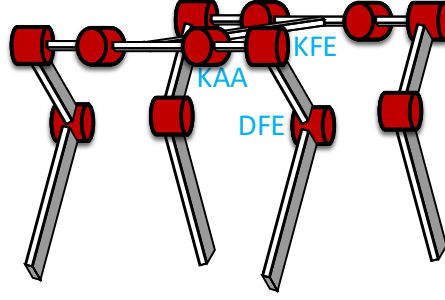
Eyleyici tipi performansı ve Bölüm 3.1.1’de belirlenen performans ölçütleri dikkate alındığında çok yönlülük, verim ve çalışma koşulları noktasında eyleyici seçimi çelişkili olmaktadır. Çok yönlülük bakımından çok yüksek performanslı tork ve konum izleme yeteneklerine sahip eyleyicilerin tercihi söz konusu iken, verimlilik ve çalışma koşulları bakımından yüksek güç–ağırlık oranına sahip eyleyicilerin tercihi söz konusudur. Ayrıca, Bölüm 3.2.2’de belirtildiği gibi eyleyici tipi seçiminde kinematik yapılandırma ile eş

zamanlı bir tasarım çalışması yapılmalıdır. Hareket için gerekli eklemlerdeki tork profili, kinematik yapılandırma ile doğrudan ilişkili olduğu için tasarım aşamasında eyleyici tipi seçimi yukarıda bahsedilen eyleyici performans metrikleri ile kinematik yapılandırma birlikte değerlendirilerek yapılmalıdır. Bu noktada, sistemin KAA, KFE ve DFE hareketlerini yerine getirecek eklemlerdeki kuvvet profili incelenmelidir. Tasarımı yapılan ayaklı sistemde ilerleme, koşma, yük kaldırma gibi hareketler bacağın Sagittal düzlemdeki hareketlerini sağlayan KFE ve DFE eklemleri tarafından yapılmaktadır. Bu sebeple bu eklemlerdeki eyleyici performansları ayaklı sistemin hızını, yük taşıma kapasitesini ve diğer bir çok dinamik hareket performansını doğrudan belirlemektedir. Ayrıca, bu eklemlerdeki eyleyiciler bacak üzerinde olduğu için hareket sırasında bacakta istenmeyen atalet kuvvetlerine neden olmaktadır. Bu yüzden bu eklemlerde hem yük taşıma kapasitesi ve yüksek hareket kabiliyeti bağlamında yüksek performanslı tork kabiliyetine sahip hem de istenmeyen atalet kuvvetlerini azaltmak için yüksek güç-ağırlık oranına sahip eyleyiciler tercih edilmelidir. Bununla birlikte, bacağın Frontal düzlemdeki hareketlerini sağlayan KAA eklemi, tasarımı yapılan ayaklı sistemde ilerleme yada yük taşıma gibi hareketlerden çok robotun dengelenmesi noktasında etkilidir. Ayrıca, KAA eklemi bacağın robot gövdesine eklendiği noktada bulunduğu için hareket sırasında bacakta artı bir atalet kuvveti oluşturmaması için bu eklemden eyleyici gövde üzerinde tasarlanmıştır. Bu sayede, KAA eklemindeki eyleyici için dengeleme probleminin daha hızlı ve kolay sağlanabilmesi için bu eyleyici tipinde yüksek güç-ağırlık oranı değil tepki süresinin ve kontrol edilebilirliğinin daha iyi olduğu eyleyici tipleri seçilebilecektir.

Yukarıda bahsedilen konular dikkate alındığında, KFE ve DFE eklemleri için boyut ve enerji verimliliği bağlamında belirlenen performans ölçütlerini karşılayabilecek en uygun eyleyici tipi olarak yüksek güç-ağırlık oranına sahip hidrolik eyleyiciler seçilmiştir. KAA ekleminde ise gövde üzerine monte edildiği için güç-ağırlık oranının yüksek olmasından ziyade tasarım aşamasında boyutlandırmanın daha kolay yapılabilmesi için daha kompakt, dengeleme probleminin çözümü noktasında KAA ekleminin daha etkin olmasından dolayı daha hızlı ve kontrolü daha basit olan elektrik motorları eyleyici olarak seçilmiştir.

3.3. Bölüm Özeti

Bu bölümde, bu çalışma kapsamında geliştirilen dört ayaklı bir sisteme ait tasarım çerçevesinin ana hatları belirlenmiştir. Tasarımı yapılan sistemden beklenen performans ölçütleri tasarım amacına uygun belirlenmiş ve daha sonra tasarım çalışmaları sırasında bu



Şekil 3.3. Bu çalışma kapsamında tasarlanan 12 serbestlik dereceli dört ayaklı robotun kinematik yapılandırmasının şematik gösterimi.

performans ölçütlerini karşılayabilmek için bir takım tasarım kriterleri belirlenmiştir. Daha sonra bacak sayısı, bacağın kinematik yapılandırması ve eklemlerde kullanılan eyleyici tipleri gibi robot yapılandırmasını tanımlayan bir takım fiziksel özellikler belirlenen tasarım özellikleri doğrultusunda belirlenmiştir. Bacakların gövde üzerindeki duruşu noktasında literatürde farklı teorik ve benzetim çalışmaları olsa da, Hutter (2013)'in çalışmasında belirttiği gibi gelişmiş bir yapılandırma üzerine bu konu için deneysel çalışmaların olmayışından dolayı hangi yapılandırmanın daha iyi olduğunu gösteren net bir kanıt bulunmamaktadır. Bu sebeple bu çalışma kapsamında geliştirilen dört ayaklı robot üzerinde bacakların yerleşimi tamamen isteğe bağlı olarak seçilmiştir. Bu bölümde ortaya konan kavramlar ve yaklaşımlar sonucu sistemin tasarım çerçevesinin ana hatları, KFE ve DFE eklemlerinde hidrolik eyleyicilerin, KAA eklemlerinde elektrik motorlarının olduğu üç serbestlik dereceli özdeş bacak yapılandırmasına sahip dört ayaklı toplamda 12 serbestlik dereceli bir mobil robot olarak belirlenmiştir. Sisteme ait kinematik yapılandırma şematik olarak Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Ayaklı robotların en önemli bileşeni olan bacak mekanizmasının tasarımı bu bölümde belirlenen tasarım özellikleri temel alınarak gerçekleştirilmiştir.

4. BACAK MEKANİZMASININ TASARIMI ve OPTİMİZASYONU

Bu çalışma kapsamında geliştirilecek olan dört bacaklı sistemde kullanılacak bacak mekanizması için kinematik yapılandırma ve kullanılacak eyleyici tipleri tamamen belirlendikten sonra uzuv boyutları ve eklemlerin çalışma aralıkları gibi bacak mekanizmasının tasarım değişkenlerine karar verilmelidir. Bölüm 2’de bahsedildiği gibi yıllar boyunca geliştirilen bir çok ayaklı sistemin tasarımı ve uygulaması farklı kuramlara dayanarak yapılmıştır. Bu noktada Bölüm 3.1’de belirtildiği gibi ayaklı robotlar literatüründe biyomimetik yöntemler en sık görülen yöntemlerdir. Ancak, yine bahsedildiği gibi bu yaklaşımın en önemli dezavantajı ortaya çıkan çok karmaşık robot yapılandırmasıdır. Bu sorunu çözmek için, bazı araştırmacılar ilham alınan canlıların fiziksel özelliklerine bağlı kalmak şartıyla mekanizma tasarımını basitleştirerek serbestlik derecesini azaltmayı denerken (Poulakakis ve ark., 2005; Seok ve ark., 2015) bazı araştırmacılar ise sistem yapılandırmasına karar verdikten sonra uzuvların boyutları ve eklemlerin çalışma aralıkları gibi tasarım ölçülerini doğadaki canlılardan esinlenerek belirlemişlerdir (Semini, 2010; Hutter, 2013; Sprowitz ve ark., 2013). Ayaklı sistemlerin tasarlanması ve uygulanması noktasında bir diğer yaklaşım ise evrimsel tekniklerin kullanıldığı yöntemlerdir. Bu yöntemler, yine biyomimetik yaklaşımda olduğu gibi doğanın bir taklidi olan ancak doğadaki canlıların kendisini değil de doğanın evrim davranışını taklit eden farklı bir yaklaşıma dayanmaktadır. Bilgisayar teknolojilerindeki ve işlem sınırlarındaki gelişmeler çok karmaşık yapılar için evrimi, algoritmalar yoluyla taklit etmeyi mümkün kılmıştır. Ayaklı robotlar literatüründe çok olmasa da bu yöntem ile robot yapısı ve yapılandırması için en uygun çözümü bulmak için çeşitli optimizasyon girişimlerinde bulunulmuştur (Leger, 2000; Roozing ve ark., 2016; Ma ve Wang, 2011; Buttner ve ark., 2016; Semini ve ark., 2017), ancak bu girişimler tamamen evrimsel bir yaklaşımla bacak mekanizmasının sıfırdan tasarımı noktasında oldukça yüzeysel kalmıştır.

Bununla birlikte Semini ve ark. (2017)’nin yaptıkları çalışmada belirttiği gibi araştırmacılar robot yapılandırmasını, bacak mekanizmalarını ve eyleyicileri doğru şekilde tasarlamak ve boyutlandırmak için uygulama özelliklerine veya optimizasyon tekniklerine dayanan sistematik bir yaklaşıma nadiren başvurmuşlardır. Ayrıca, robot tasarımındaki mevcut yaklaşımların ve kavramların halen tamamen kabul gören bir sonuca yaklaşmaktan uzak olduğu görülmektedir. Bu noktada bu çalışmanın en önemli katkısı tamamen

doğadan esinlenilerek oluşturulmuş algoritmalara dayalı sıfırdan optimal bir robot bacak mekanizması tasarlamaya yönelik bir metodoloji önermektir. Bu bağlamda Bölüm 3’de belirlenen tasarım çerçevesi temel alınarak geliştirilecek bacak mekanizması tasarımının genel özellikleri ve optimizasyon yaklaşımının genel kapsamı ile yapılan bir takım kabuller aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

1. Bacağa ait kinematik yapılandırmanın belirlenmesi.
 - Bacak tasarımı için dört ayaklı robot tasarımlarında yaygın olarak kullanılan basit ama etkinliği kanıtlanmış bacağın gövdeye eklendiği noktada bir serbestlik derecesi daha kazanacak olan iki serbestlik dereceli eklemli bir bacak yapılandırması kullanılmıştır.
2. Eklemlerde kullanılacak eyleyicilerin belirlenmesi.
 - Eklemlerde hareket için gerekli torkların üretilmesi için literatürdeki başarılı dört ayaklı robotlardaki mevcut eyleyicilere benzer şekilde hidrolik eyleyiciler kullanılmıştır.
3. Optimizasyon çıktılarını dar bir aralıkta sınırlamaktan kaçınmak için tasarım değişkenlerine mümkün olduğunca az bir kısıtlama uygulanması.
 - Sıfırdan optimal bir bacak mekanizması tasarlayıp boyutlandırabilmek adına tasarıma ait bütün değişkenler tamamen evrimsel algoritmalara dayalı bir optimizasyon sonucunda belirlenecektir.
4. Optimizasyon işleminin maksimum kuvvet iletimi sağlayabilen bir bacak mekanizması tasarlamaya odaklanması
 - Sistemin hareketi sırasında en genel hareket şekli temel alınarak bu hareketi gerçekleştirebilecek ve bu hareket için gerekli eklem torklarının minimum silindirik kuvvetleri ile sağlanacağı mekanizmaya ait tasarım değişkenleri belirlenecektir.

Bu argümanlara, bacak mekanizmasının tasarımında ve optimize edilmesinde optimizasyon sürecini tanımlarken atıfta bulunulmuştur. Bölümün devamında bu argümanların optimizasyon problemine uygulanmasına ilişkin ayrıntılı bir açıklama sunulmaktadır. Ancak, robotik alanında kinematik, dinamik ve kontrol çalışmaları, tam anlamıyla rijit cisimlerin hareketi üzerine yapılan çalışmalar olduğundan dolayı, bu bölümde ilk önce, rijit cisim hareketinin analitik açıklamasına yer verilmiştir.

4.1. Rijit Cisimlerin Hareketi

Üç boyutlu Öklid uzayında (\mathbb{R}^3) hareket eden bir partikülün hareketi, eylemsiz bir koordinat eksenine göre, hareketin her anında partikülün konumunu vererek tanımlanmaktadır. Spesifik olarak üç ortonormal eksenlerden oluşan bir eksen takımı seçilir ve $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ sıralı üçlüsü kullanılarak partikülün konumu belirlenir. Burada her bir koordinat, partikül konumunun ilgili eksene yansımaları göstermektedir. Bir partikülün yörüngesi ise, $p(t) = (x(t), y(t), z(t)) \in \mathbb{R}^3$ parametrik eğri fonksiyonu ile temsil edilir. Ancak robotikte, tek tek partiküllerin hareketi değil de, bir robotik sistemin uzvu gibi bir dizi partikülden oluşan bir gövdenin kollektif hareketi daha önemlidir. Bu bağlamda robotik sistemin uzvunu oluşturan partiküller arasındaki mesafe hareket boyunca sabit kabul edilirse bir partikülün hareketinin tanımlanması gövdenin hareketinin tanımlanabilmesi için yeterli olacaktır. Bu noktada bir varsayıma ihtiyaç duyulur ve bir rijit gövde, gövdenin herhangi bir hareketinden veya gövde üzerine uygulanan kuvvetlerden bağımsız olarak herhangi iki partikül arasındaki mesafenin sabit kaldığı varsayılan partikül topluluğudur tanımlaması yapılır. Nitekim, eğer κ ve ε , rijit bir gövde üzerindeki iki nokta ise, gövdenin hareketi boyunca, κ ve ε Denklem (4.1)'i sağlamalıdır.

$$\|\kappa(t) - \varepsilon(t)\| = \|\kappa(0) - \varepsilon(0)\| = \text{sabit.} \quad (4.1)$$

Bir rijit hareket ise, partiküller arası mesafenin hareketin her anında sabit kaldığı, cisim üzerindeki tüm partiküllerin sürekli bir hareketi olarak tanımlanır. Rijit bir cismin, rijit bir hareketle bir konumdan diğerine net hareketi rijit yer değiştirme olarak adlandırılır. Genel olarak, bir cismin rijit yer değiştirmesi, hem cismin doğrusal yer değiştirmesinden hem de cismin döndürülmesinden oluşabilir. \mathbb{R}^3 alt kümesinde tanımlanan bir nesne göz önüne alındığında, bir cismin rijit hareketi, cisim üzerindeki her bir partikülün eylemsiz bazı koordinat sistemlerine göre nasıl hareket ettiğini zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlayan sürekli işlem kümesi $g(t) : \rightarrow \mathbb{R}^3$ ile temsil edilebilir. Yani, bir nesne sürekli bir yörünge boyunca hareket ederken, $g(t)$, nesne üzerindeki bir noktanın başlangıçtaki koordinatlarını, herhangi bir t anında yine aynı noktanın koordinatlarına eşleyen bir fonksiyondur. Rijit yer değiştirme ise, rijit gövdedeki noktaların başlangıç konfigürasyonundaki koordinatlarını, noktaların gövdenin son konfigürasyonundaki koordinatlarına eşleyen $g : \rightarrow \mathbb{R}^3$ işlemi ile temsil edilmektedir.

$\kappa, \varepsilon \in \mathbb{R}^3$ şeklinde verilen iki noktayı bağlayan $\nu \in \mathbb{R}^3$ vektörü, κ noktasından ε noktasına giden yönlendirilmiş bir doğru parçası ile tanımlanır. Koordinatlarda, $\nu = \kappa - \varepsilon \in \mathbb{R}^3$ şeklinde ifade edilir. Vektörler de noktalar gibi üçlü tanımlama dizileri ile gösterilse de kavramsal olarak birbirlerinden oldukça farklıdır. Bir vektörün yönü ve büyüklüğü vardır. Burada vektörel büyüklük ile $\sqrt{\nu_1^2 + \nu_2^2 + \nu_3^2}$ örneğindeki gibi Öklid norm kastedilmektedir. Noktalar üzerindeki bir rijit dönüşüm eylemi, doğal olarak, vektörler üzerinde bir etkiye neden olur. $g : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ şeklinde rijit bir yer değiştirme işlemi tanımlanırsa, vektörler Denklem (4.2)'e göre işlem görmektedir. Burada eşitliğin sağ tarafının iki nokta arasındaki fark olduğuna ve aynı zamanda bir vektör olduğuna dikkat edilmelidir.

$$g_*(\nu) = g(\kappa) - g(\varepsilon) \quad (4.2)$$

Bir rijit cisim üzerindeki noktalar arasındaki mesafeler rijit hareketler ile değişmediğinden, $g : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ şeklindeki bir işlemin bir rijit hareketi tanımlaması için gerekli tek koşul, mesafelerin işlem tarafından korunmasıdır. Ancak, bu koşul, sadece fiziksel olarak gerçekleştirilemeyen iç etkileri koruduğu için tek başına yeterli değildir. Yani bu şekildeki bir işlem yönelimi değil, aksine, sadece mesafeleri korumaktadır. Bu problemin çözümü için, işlem içerisinde gövdedeki vektörlerin vektörel çarpımlarının da korunması gerekmektedir. Tüm bu gereklilikler, rijit hareketi ifade eden bir işlem olarak $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ şeklinde bir rijit gövde dönüşümünü tanımlayabilmek için kullanılabilir. $g : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ işlemine Denklem (4.3) ve (4.4)'te verilen özellikleri sağlaması durumunda Rijit Gövde Dönüşümü denir.

$$\|g(\kappa) - g(\varepsilon)\| = \|\kappa - \varepsilon\| \quad \forall \kappa, \varepsilon \in \mathbb{R}^3 \quad (4.3)$$

$$g_*(\nu \times \omega) = g_*(\nu) \times g_*(\omega) \quad \forall \nu, \omega \in \mathbb{R}^3 \quad (4.4)$$

$$\nu_1^T \nu_2 = \frac{1}{4} \left(\|\nu_1 + \nu_2\|^2 - \|\nu_1 - \nu_2\|^2 \right) \quad (4.5)$$

$$\|\nu_1 + \nu_2\| = \|g_*(\nu_1) + g_*(\nu_2)\| \quad (4.6)$$

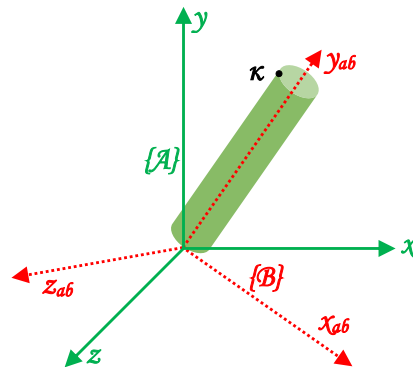
$$\|\nu_1 - \nu_2\| = \|g_*(\nu_1) - g_*(\nu_2)\|$$

$$\nu_1^T \nu_2 = g_*(\nu_1)^T g_*(\nu_2) \quad (4.7)$$

Bu tanımlamanın bir çok değişik sonucu vardır. Bunlardan ilki bu tanım sonucunda rijit gövde dönüşüm işlemleri sırasında vektörlerin iç çarpımı da korunmaktadır. Denklem

(4.5)'de verilen polarizasyon özdeşliği¹ ve Denklem (4.6) eşitlikleri herhangi iki ν_1 ve ν_2 vektörü için geçerli Denklem (4.7) sonucunu elde etmek için kullanılarak bu önerme kanıtlanabilir.

Noktalar arası mesafenin ve vektörler arasındaki vektörel çarpımların korunması rijit bir cisim üzerindeki partiküllerin birbirlerine göre hareket edemedikleri anlamına gelmez, aksine, birbirlerine göre doğrusal hareket edemezler ancak dönme hareketi yapabilirler. Bu nedenle rijit bir cismin hareketini tanımlayabilmek için, rijit gövde üzerindeki herhangi bir partikülün hareketini ve rijit gövdenin bu nokta etrafındaki dönme hareketini takip etmek gerekmektedir. Bunu yapabilmek için, bir rijit gövde üzerindeki herhangi bir noktaya bir Kartezyen koordinat sistemi yerleştirilip eylemsiz bir eksen takımına göre bu cisim üzerindeki koordinat sisteminin hareketi takip edilerek rijit gövdenin konfigürasyonu temsil edilmelidir. Bu sayede, gövdedeki bağımsız parçaların hareketi, gövde üzerine sabitlenmiş koordinat sisteminin hareketinden ve koordinat sisteminin gövdeye sabitlendiği noktanın hareketinden elde edilebilir. Literatürde genelde, sağ el koordinat sistemleri diye adlandırılan ve $x, y, z \in \mathbb{R}^3$ olmak üzere $z = x \times y$ eşitliğini sağlayan üç ortonormal vektör ile tanımlanan koordinat sistemleri kullanılır. $g : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ işleminde vektörel çarpımlar korunduğundan sağ el koordinat sistemleri rijit gövde dönüşümü sırasında yine sağ el koordinat sistemlerine dönüştürülmektedir. Bir cismin konfigürasyonu, cisim üzerindeki bir κ noktasına yerleştirilmiş ve ν_1, ν_2, ν_3 vektörleri ile oluşturulan bir sağ el koordinat sisteminde tanımlanırsa, g ile tanımlanmış bir rijit gövde dönüşümü sonrasında rijit cismin konfigürasyonu, $g(\kappa)$ noktasına yerleştirilmiş ve $g_*(\nu_1), g_*(\nu_2), g_*(\nu_3)$ vektörleri ile oluşturulan bir sağ el koordinat sistemi ile gösterilir.



Şekil 4.1. Rijit bir cismin \mathcal{A} esken takımı üzerindeki bir nokta etrafında döndürülmesi ve sonucunda oluşan yönelim. Kırmızı kesikli çizgiler döndürülen gövde üzerine sabitlenmiş \mathcal{B} esken takımına ait.

¹Polarization Identity

Bir gövdenin yönelimi, gövdeye sabitlenmiş bir koordinat sisteminin eylemsiz bir koordinat sistemine bağlı yönelimi ile tanımlanmaktadır. Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, \mathcal{A} isimindeki eylemsiz bir koordinat sisteminde tanımlı bir rijit cismin bir nokta etrafında döndürülmesi sonucu oluşan yönelim, gövde üzerine yerleştirilmiş ve gövde ile hareket eden \mathcal{B} koordinat sistemine ait ana eksenlerin \mathcal{A} eksenleri üzerindeki $x_{ab}, y_{ab}, z_{ab} \in \mathbb{R}^3$ koordinatları ile tanımlanabilir. Genel notasyon açısından, bu şekilde yönelimi gösterebilmek için x_{ab}, y_{ab}, z_{ab} koordinat vektörleri Denklem (4.8)’de gösterilen R_{ab} matrisi gibi bir arada yazılır. Bu amaçla 3×3 şeklinde oluşturulan matrislere dönme matrisleri denmektedir.

$$R_{ab} = [x_{ab}, y_{ab}, z_{ab}] \quad (4.8)$$

Dönme matrislerinin, oluşturulma şekli kaynaklı iki temel özelliği vardır. Bunlardan ilki, kullanılan koordinat sistemi ortonormal vektörlerden oluştuğu için bir dönme matrisinin sütunları birbirlerine göre ortonormaldir. $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ dönme matrisinin sütunlarını $r_1, r_2, r_3 \in \mathbb{R}^3$ ile tanımlanırsa bu koşul Denklem (4.9) ile ifade edebilir. Bu koşul kullanılarak, bu ilk özellik Denklem (4.10) şeklinde yazılabilir. Ayrıca bu özellik sonucu, Denklem (4.11)’de gösterildiği gibi bir dönme matrisinin determinanı ± 1 olmaktadır.

$$r_i^T r_j = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (4.9)$$

$$RR^T = R^T R = I \quad (4.10)$$

$$\det R = \pm 1 \quad (4.11)$$

$$\det R = r_1^T (r_2 \times r_3) \quad (4.12)$$

Burada R dönme matrisinin determinantının işareti kullanılan koordinat sistemine bağlıdır ve Denklem (4.12) ile hesaplanabilir. Literatürde, genelde, aksi belirtilmedikçe sağ el koordinat sistemi kullanıldığından ve sağ el koordinat sisteminde $r_2 \times r_3 = r_1$ olduğundan, dönme matrislerinin ikinci özelliği olarak dönme matrisinin determinanı her zaman $\det R = r_1^T r_1 = +1$ olmaktadır denebilir. Bu iki özelliğe sahip 3×3 şeklindeki matrisler $SO(3)$ diye adlandırılır. Notasyonda SO özel ortogonalın kısaltması olarak kullanılmaktadır. Burada *özel* ile kasıt R dönme matrisinin determinantının her zaman $+1$ olmasıdır. En genel hali ile $\mathbb{R}^{n \times n}$ içerisinde dönme matrisi uzayı Denklem (4.13) ile

tanımlanmaktadır.

$$SO(n) = \{R \in R^{n \times n} : RR^T = I, \quad \det R = +1\} \quad (4.13)$$

$SO(3) \subset R^{3 \times 3}$, matris çarpımı işlemi için aşağıdaki aksiyomları sağladığından matris çarpımı işlemi altında \mathbb{R}^3 'deki tüm dönme matrislerinin grubudur şeklinde tanımlanır.

1. Kapalılık Özelliği; R_1 ve $R_2 \in SO(3)$ ise,

$$R_1 R_2 (R_1 R_2)^T = R_1 R_2 R_1^T R_2^T = R_1 R_1^T = I \quad (4.14)$$

$$\det(R_1 R_2) = \det(R_1) \det(R_2) = +1 \quad (4.15)$$

olduğundan $R_1 R_2 \in SO(3)$ 'tür ve Kapalılık Özelliği vardır.

2. Birleşim Özelliği; $(R_1 R_2) R_3 = R_1 (R_2 R_3)$ olduğundan Birleşme Özelliği vardır.

3. Birim Eleman; Birim matris, I , matris çarpımı işlemi için birim elemandır.

4. Ters Özelliği; Denklem (4.10)'den ve $R \in SO(3)$ matrisinin tersi $R^T \in SO(3)$ olduğundan Ters Özelliği vardır.

Eylemsiz bir koordinat eksenine göre dönmekte olan bir rijit gövdenin her bir konfigürasyonu özgün bir $R \in SO(3)$ ile tanımlanabilir. Bu tanımlamaya göre, dönme matrislerinin grubu $SO(3)$, sistemin konfigürasyon uzayı olarak adlandırılır ve sistemin yörüngesi, $t \in [0, T]$ için bir $R(t) \in SO(3)$ eğrisidir. Bir dönme matrisi $R \in SO(3)$ ayrıca bir noktanın koordinatlarını bir eksen takımından diğerine taşıyarak bir dönüşüm işlevi görür. Şekil 4.1'de gösterilen, κ noktası ele alındığında, bu noktanın \mathcal{B} eksen takımına göre koordinatları $\kappa_b = (x_b, y_b, z_b)$ olmaktadır. κ noktasının \mathcal{A} eksen takımına göre koordinatları, \mathcal{B} eksen takımının eksenlerinin \mathcal{A} eksen takımı üzerindeki izdüşümleri x_{ab}, y_{ab}, z_{ab} olduğundan ve κ noktasının \mathcal{B} eksen takımı üzerindeki koordinatları x_b, y_b, z_b olduğundan Denklem (4.16)'daki gibi hesaplanabilir. Bu işlem ayrıca Denklem (4.17)'deki gibi matris çarpım işlemi olarak da yazılabilir.

$$\kappa_a = x_{ab}x_b + y_{ab}y_b + z_{ab}z_b \quad (4.16)$$

$$\kappa_a = [x_{ab}, y_{ab}, z_{ab}] \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = R_{ab} \kappa_b \quad (4.17)$$

Bir noktaya uygulanan dönme matrisi işlemi aynı zamanda bir vektörün döndürülmesi içinde uygulanabilir. \mathcal{B} ekseninde tanımlı $\nu_b = \kappa_b - \varepsilon_b$ vektörü \mathcal{A} eksen takımı

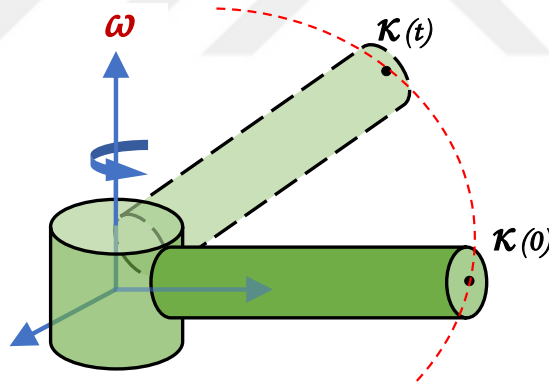
üzerinde Denklem (4.18) şeklinde hesaplanabilir.

$$R_{ab}(\nu_b) := R_{ab}\kappa_b - R_{ab}\varepsilon_b = \kappa_a - \varepsilon_a = \nu_a \quad (4.18)$$

Dönme matrisleri, matris çarpımı kullanılarak yeni dönme matrisleri oluşturmak için kullanılabilir. Bir \mathcal{C} eksen takımı \mathcal{B} eksen takımına göre R_{bc} yönelimine sahipse ve \mathcal{B} eksen takımı da başka bir \mathcal{A} eksen takımına göre R_{ab} yönelimine sahipse, \mathcal{C} eksen takımının \mathcal{A} eksen takımına göre yönelimi Denklem (4.19)'daki gibi hesaplanır.

$$R_{ac} = R_{ab}R_{bc} \quad (4.19)$$

$R_{ac}, \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ şeklinde bir işlem olarak düşünüldüğünde, R_{ac} fonksiyonu için \mathcal{C} eksen takımında tanımlı bir noktanın koordinatlarını önce \mathcal{C} eksen takımından \mathcal{B} eksen takımına döndüren ve sonra \mathcal{B} eksen takımından \mathcal{A} eksen takımına döndüren bir fonksiyondur tanımlaması yapılabilir. Bu fonksiyonun bileşke kuralı Denklem (4.19)'daki gibidir. Ayrıca, dönme matrisleri hem mesafeyi hem de vektörel çarpımları koruduğundan tanımı açısından bir rijit gövde dönüşümünü temsil eder.



Şekil 4.2. Rijit bir cismin eylemsiz ω -ekseni etrafında döndürülmesi sonucunda κ noktasının oluşturduğu yörünge.

Şekil 4.2'de rijit bir cismin eylemsiz bir eksen etrafında dönüşü gösterilmektedir. Burada κ noktasının eylemsiz bir eksen etrafındaki dönüş hızını sabit kabul edersek, bu noktanın hızı Denklem (4.20)'de gibi yazılabilir. Burada $\omega \in \mathbb{R}^3$ dönüş yönünü belirten birim vektörü temsil etmektedir.

$$\dot{\kappa}(t) = \omega \times \kappa(t) \quad (4.20)$$

Eğer ω -ekseni etrafındaki dönüş açısı $\theta \in \mathbb{R}$ ile tanımlanırsa, \mathbb{R}^3 'de herhangi

bir cismin dönüşü özgün bir $R \in SO(3)$ ile tanımlanabildiğinden, R matrisi, ω ve θ cinsinden bir fonksiyon olarak yazılabilir. Bu noktada, vektörel çarpım işlemi yaparken notasyon ve işlem kolaylığı açısından bir tanımlama yapmak gerekmektedir. Doğrusal cebirde, Denklem (4.21)'de gösterildiği gibi transpozu aynı zamanda olumsuzu olan kare bir matrise Çarpık–Simetrik matris denmektedir ve $n \times n$ çarpık–simetrik matris uzayı $so(n)$ ile gösterilmektedir.

$$so(n) = \{S \in \mathbb{R}^{n \times n} : S^T = -S\} \quad (4.21)$$

\mathbb{R}^3 'de çarpık–simetrik matris uzayı $so(3)$ ile gösterilmektedir. Denklem (4.21)'deki tanımdan yola çıkarak, $S \in so(3)$ matrisinin s_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ şeklinde tanımlı terimleri Denklem (4.22)'deki eşitliği sağlamalıdır.

$$s_{ij} + s_{ji} = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.22)$$

Denklem (4.22)'den, $s_{ii} = 0$ olduğu, yani S matrisinin köşegen terimlerinin sıfır olduğu ve köşegen dışındaki terimlerin s_{ij} , $i \neq j$ için $s_{ij} = -s_{ji}$ eşitliğini sağlaması gerektiği görülmektedir. Nitekim, Denklem (4.23)'de gösterildiği gibi $S \in so(3)$ matrisinin sadece üç adet bağımsız elemanı olmaktadır. $a = (a_x, a_y, a_z) \in \mathbb{R}^3$ şeklinde tanımlı bir vektörün, $S(a) \in so(3)$ çarpık–simetrik matrisi ise Denklem (4.24)'deki gibi tanımlanır.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -s_3 & s_2 \\ s_3 & 0 & -s_1 \\ -s_2 & s_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$S(a) = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Bu tanımlama vektörel çarpım açısından oldukça önemlidir. $\nu, \omega \in \mathbb{R}^3$ şeklinde verilen herhangi iki vektörün, vektörel çarpımı çarpık–simetrik matris tanımı kullanılarak Denklem (4.25)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir. Ayrıca, $R \in SO(3)$ dönme matrisi ve $\nu, \omega \in \mathbb{R}^3$ vektörleri için $R(\omega \times \nu) = R\omega \times R\nu$ yazılabildiğinden, $RS(\omega)R^T = S(R\omega)$

yazılabilir. Bu önerme Denklem (4.26) ile kanıtlanabilir.

$$\omega \times \nu = S(\omega)\nu \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} RS(\omega)R^T\nu &= R(\omega \times R^T\nu) \\ &= (R\omega) \times (RR^T\nu) \\ &= (R\omega) \times \nu \\ &= S(R\omega)\nu \end{aligned} \quad (4.26)$$

Denklem (4.20), Denklem (4.25) kullanılarak tekrar düzenlenirse, Denklem (4.27)'de gösterilen doğrusal ve zamanla değişmeyen bir differansiyel denklem elde edilir. Bu differansiyel denklemin integrali alındığında Denklem (4.28) elde edilir. Burada $\kappa(0)$, noktanın $t = 0$ başlangıç anındaki konumu ve $e^{S(\omega)t}$ üstel matristir.

$$\dot{\kappa}(t) = \omega \times \kappa(t) = S(\omega)\kappa(t) \quad (4.27)$$

$$\kappa(t) = e^{S(\omega)t}\kappa(0) \quad (4.28)$$

Buradan, eğer eylemsiz ω -ekseni etrafında birim hızda ve θ birim zamanında döndürüldüğü kabulü yapılırsa, net dönüş Denklem (4.29)'daki gibi yazılabilir.

$$R(\omega, \theta) = e^{S(\omega)\theta} \quad (4.29)$$

$S(\omega) \in so(3)$, $\|\omega\| = 1$, ve $\theta \in \mathbb{R}$ olduğundan, Denklem (4.29)'daki üstel matris ifadesi, Rodrigues Dönme Formülü olarak bilinen ve bütün üstel matrisi hesaplamadan $\exp : so(3) \rightarrow SO(3)$ üstel işleminin hesaplanabilmesi için bir algoritma sunan Denklem (4.30)'daki formül ile hesaplanabilir.

$$e^{S(\omega)\theta} = I + S(\omega) \sin \theta + S(\omega)^2(1 - \cos \theta) \quad (4.30)$$

Matris determinant işlemi ile üstel işlemin sürekliliğinden dolayı ve $\det \exp(0) = 1$ olduğu gerçeğinden hareketle $\det \exp(S(\omega)\theta) = 1$ yazılabileceğinden ve ayrıca $S(\omega) \in so(3)$ ve $\theta \in \mathbb{R}$ olduğundan $e^{S(\omega)\theta}$ üstel çarpık-matrisinin ortogonal, yani, $e^{S(\omega)\theta} \in SO(3)$ olduğu Denklem (4.31) ile basitçe gösterilebilir.

$$[e^{S(\omega)\theta}]^{-1} = e^{-S(\omega)\theta} = e^{S(\omega)^T\theta} = [e^{S(\omega)\theta}]^T \quad (4.31)$$

Denklem (4.31)'den hareketle üstel işlemin, çarpık-simetrik matrisleri ortogonal matrislere dönüştürdüğü söylenebilir. Geometrik olarak ifade edersek, çarpık-simetrik matrisler dönme eksenine karşılık gelir ve üstel işlem, bu eksen etrafında θ kadar bir dönüş karşılık gelen dönme hareketini üretir. Yani, her dönme matrisi bir çarpık-simetrik matrisin üstel ifadesi olarak yazılabilir. Bu amaçla $v_\theta = 1 - \cos \theta$, $c_\theta = \cos \theta$, $s_\theta = \sin \theta$ eşitlikleri kullanılarak Denklem (4.30) tekrar düzenlenirse Denklem (4.32) elde edilir. Ayrıca, notasyon gereği bir R dönme matrisi Denklem (4.33)'deki gibi tanımlanır.

$$e^{S(\omega)\theta} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 v_\theta + c_\theta & \omega_1 \omega_2 v_\theta - \omega_3 s_\theta & \omega_1 \omega_3 v_\theta + \omega_2 s_\theta \\ \omega_1 \omega_2 v_\theta + \omega_3 s_\theta & \omega_2^2 v_\theta + c_\theta & \omega_2 \omega_3 v_\theta - \omega_1 s_\theta \\ \omega_1 \omega_3 v_\theta - \omega_2 s_\theta & \omega_2 \omega_3 v_\theta + \omega_1 s_\theta & \omega_3^2 v_\theta + c_\theta \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Denklem (4.32) ve Denklem (4.33) birbirine eşitlenirse, R matrisinin izi Denklem (4.34)'deki gibi hesaplanır. Buradan $-1 \leq tr(R) \leq 3$ olduğu görülebilir ve θ açısı Denklem (4.35) ile hesaplanabilir. Burada θ açısının değeri $+\theta \pm 2\pi n$ veya $-\theta \pm 2\pi n$ seçilebileceğinden bir belirsizlik olduğuna dikkat edilmelidir.

$$tr(R) = r_{11} + r_{22} + r_{33} = 1 + 2 \cos \theta \quad (4.34)$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{tr(R) - 1}{2} \right) \quad (4.35)$$

$$2\omega_1 s_\theta = r_{32} - r_{23}$$

$$2\omega_2 s_\theta = r_{13} - r_{31}$$

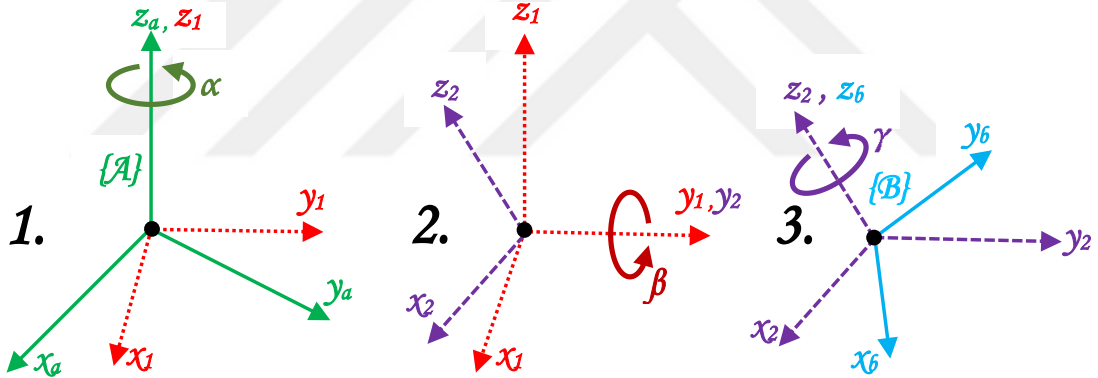
$$2\omega_3 s_\theta = r_{21} - r_{12} \quad (4.36)$$

$$\omega = \frac{1}{2s_\theta} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix}$$

Denklem (4.32) ve Denklem (4.33)'deki matrislerin köşegen olmayan terimleri eşitlenirse ve $\theta \neq 0$ kabulü yapıp matris formunda düzenlenirse Denklem (4.36) elde edilir. Denklem (4.35)'de θ açısı $2\pi - \theta$ seçilirse, dönme ekseninin $-\omega$ olacağına dikkat edilmelidir. Ayrıca, dönme matrisi $R = I$ için, $\theta = 0$ olduğundan dönme eksenini ω keyfi

seçilebilir. Ancak $R \neq I$ olması durumunda, yukarıdaki denklemler, $R = e^{S(\omega)\theta}$ olacak şekilde iki farklı ω ve $\theta \in [0, 2\pi)$ değerinin varlığını göstermektedir. Denklem (4.35) ve (4.36) ile verilen $\omega\theta \in \mathbb{R}^3$ vektörünün bileşenlerine R matrisinin üstel koordinatları denmektedir.

$\omega \in \mathbb{R}^3$ dönme ekseninin birim büyüklükte ve dönme açısının $\theta \in \mathbb{R}$ olduğu düşünülürse, yukarıda bahsedilen konuların birleşimi klasik Euler Dönme Teoremini vermektedir. Euler dönme teoremine göre, herhangi bir yönelim $R \in SO(3)$, sabit bir eksen $\omega \in \mathbb{R}^3$ etrafında bir açı $\theta \in [0, 2\pi)$ boyunca dönmeye eşdeğerdir. Dönüşün bu metod ile gösterimine eşdeğer eksen gösterimi denmektedir. Yukarıdaki açıklamalardan bu tanımın özgün olmadığına dikkat edilmelidir. Yani, θ açısı $2\pi - \theta$ ve dönme eksenini $-\omega$ seçilirse aynı yönelim elde edilebilir. Dahası, $\theta = 0$ olduğunda $R = I$ olduğundan ω eksenini keyfi olabilmektedir. İlk durum, üstel işlemin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. İkinci durum ise, eşdeğer eksen gösteriminin bir tekillikliği olarak adlandırılır ve yönelimin bir fonksiyonu olarak eşdeğer eksenin, $R = I$ yöneliminde süreklilik bağımlılığını yitirdiğini gösterir.



Şekil 4.3. \mathcal{B} eksen takımının \mathcal{A} eksen takımına göre yöneliminin Euler açıları gösterimi.

Üstel koordinatlar, dönme grubunun konanik *–standart–* koordinatları olarak kabul edilir. Ancak, dönme hareketi Euler Açılımları, Roll–Pitch–Yaw ve Quaternion gibi başka koordinatlar ile de gösterilebilir. Bunlardan en bilinen ve literatürde en sık gösterimi olan Euler açılarıdır. Bu metoda göre, bir eksen takımının (\mathcal{B}), başka bir eksen takımına (\mathcal{A}) göre yönelimi şu şekilde olmaktadır; \mathcal{A} ve \mathcal{B} eksen takımları çakışık olarak başlanır. Şekil 4.3’de gösterildiği gibi, öncelikle, \mathcal{B} eksen takımı kendi z -ekseni etrafında (bu anda \mathcal{A} eksen takımının z -ekseni ile çakışık durumdadır) bir α açısı kadar döndürülür, ardından \mathcal{B} eksen takımı yine o andaki kendi y -ekseni etrafında bir β açısı kadar döndürülür, son olarak \mathcal{B} eksen takımı yine o andaki kendi z -ekseni etrafında bir γ açısı kadar döndürülür. Bu işlem net yönelim $R_{ab}(\alpha, \beta, \gamma)$ dönme matrisini verir ve *ZYZ* Euler açıları diye

adlandırılan açı üçlüsü (α, β, γ) dönmeyi göstermek için kullanılır. Tüm dönüşler hareketli eksen takımının ana eksenleri x, y, z eksenleri üzerinde gerçekleştirildiğinden, Denklem (4.37)'de gösterilen temel dönme matrisleri tanımlanabilir.

$$\begin{aligned}
 R_x(\phi) &:= e^{S(x)\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \\
 R_y(\beta) &:= e^{S(y)\beta} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \\
 R_z(\alpha) &:= e^{S(z)\alpha} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

Buradan, \mathcal{B} eksen takımının \mathcal{A} eksen takımına göre dönme matrisi Denklem 4.38 şeklinde hesaplanabilir. Burada okunabilirlik açısından, s ve c sırasıyla, \sin ve \cos ifadelerinin kısaltması olarak kullanılmıştır.

$$\begin{aligned}
 R_{ab} &= R_z(\alpha) R_y(\beta) R_z(\gamma) \\
 &= \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta c_\gamma - s_\alpha s_\gamma & -c_\alpha c_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta \\ s_\alpha c_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma & -s_\alpha c_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta \\ -s_\beta c_\gamma & s_\beta c_\gamma & c_\alpha \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

Temel dönme matrislerinin bir bileşimi olduğu için, Denklem (4.38) sonucu elde edilen herhangi bir matrisin ortogonal olduğu açıktır. Ayrıca, üstel koordinatlarda olduğu gibi bir $R \in SO(3)$ dönme matrisi Euler açıları kullanılarak ifade edilebilir. Euler açıları, Denklem (4.38)'in (α, β, γ) üçlüsü için çözümlenmesiyle hesaplanabilir. Nitekim, $\sin(\beta) \neq 0$ kabulü ile çözüm Denklem (4.39)'daki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
 \beta &= \text{atan2} \left(\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}, r_{33} \right) \\
 \alpha &= \text{atan2} \left(\frac{r_{23}}{s_\beta}, \frac{r_{13}}{s_\beta} \right) \\
 \gamma &= \text{atan2} \left(\frac{r_{32}}{s_\beta}, \frac{-r_{31}}{s_\beta} \right)
 \end{aligned} \tag{4.39}$$

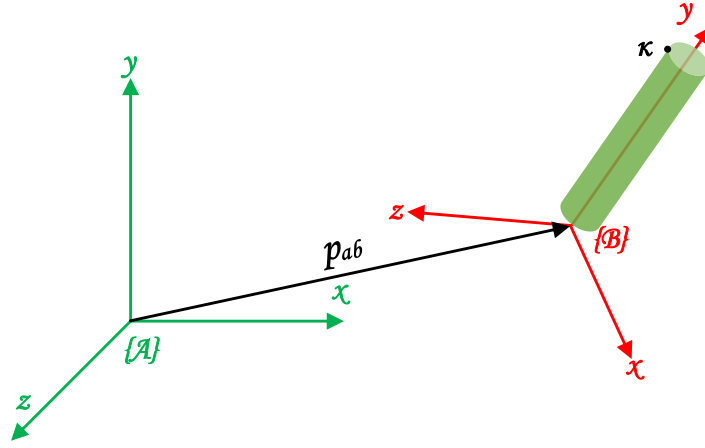
ZYZ Euler açıları, $SO(3)$ uzayının *yeral* parametrelendirilmesine bir örnektir. Eşdeğer eksen gösteriminde olduğu gibi parametrelendirilmedeki tekillik $R = I$ birim dönmede

yine ortaya çıkmaktadır. Daha net bir ifade ile, $(\alpha, 0, -\alpha)$ şeklindeki ZYZ Euler açıları, $R_{ab}(\alpha, 0, \alpha) = I$ sonucunu verir ve bu nedenle, ZYZ Euler açıları parametrelendirilmesinde birim yönelimin sonsuz bir gösterimi vardır.

Farklı sırada dönüş eksenleri seçilerek farklı Euler açıları gösterimi tanımlanabilir. Bunlar arasında en bilinen dönüş eksenleri sıralaması ZYX şeklinde olan ve Fick açıları diye de bilinen Roll–Pitch–Yaw gösterimidir. Burada, R_{ab} dönme matrisi, gövde eksen takımının x -ekseni (Roll), daha sonra yine gövde eksen takımının y -ekseni (Pitch) ve son olarak yine gövde eksen takımının z -ekseni (Yaw) etrafında döndürülmesi ile tanımlanmaktadır. Bu şekilde seçilen dönüş eksenleri sıralamasının tek avantajı, $R = I$ özdeş yöneliminde tekillik içermemesidir. Ancak bu gösterimde de, yine, farklı bir yönelimde hala tekillikler bulunmaktadır. Bunun başlıca sebebi, $SO(3)$ 'ün herhangi bir üç-boyutlu temsilinde tekilliklerin hiçbir zaman elimine edilemeyeceği temel bir topolojik gerçek olmasıdır. Ancak, Euler açılarının aksine, quaternion gösteriminde dört-boyutlu bir gösterim olduğundan ve quaternion gösteriminin doğrudan dönme matrisine karşılık gelmesinden dolayı, quaternion gösterimi, tekillik içermeyen bir parametrelendirme yöntemidir. Bu çalışmada, bu gösterim metodu kullanılmadığı için bu gösterim metodu ile ilgili daha detaylı bilgi verilmeyecektir.

Buraya kadar, rijit hareket bağlamında sadece dönme hareketinin gösterimi ile ilgili konular anlatılmıştır. Ancak, rijit bir cismin hareketi dönme hareketinin yanında öteleme hareketi de içerebilir. Rijit harekette, tek başına öteleme hareketinin gösterimi ise oldukça basittir. Gövde üzerinde seçilen bir noktanın, önceden belirlenen eylemsiz bir eksen takımına göre koordinatlarını takip etmek öteleme hareketinin gösterimi için yeterlidir. Bu işlem sonunda, rijit cismin yörüngesini ifade eden $\kappa(t) \in \mathbb{R}^3, t \in [0, T]$ şeklinde bir eğri fonksiyonu elde edilir.

Ancak, Şekil 4.4'de gösterildiği gibi hem dönme hareketi hem de öteleme hareketi içeren rijit bir cismin hareketinin gösterimi daha karmaşık olabilmektedir. Şekil 4.4'de verilen gövdeye sabitlenmiş \mathcal{B} eksen takımının, eylemsiz \mathcal{A} eksen takımına göre konumu $p_{ab} \in \mathbb{R}^3$ vektörü ile, yönelimi ise $R_{ab} \in SO(3)$ dönme matrisi ile tanımlanmıştır. Bir sistemin yapılandırması bu şekilde (p_{ab}, R_{ab}) çifti ile tanımlanmaktadır ve bir sistemin yapılandırma uzayı \mathbb{R}^3 ile $SO(3)$ 'ün çarpım uzayından oluşmaktadır. Matematikte, Denklem (4.40) şeklinde tanımlı bütün rijit hareketlerin grubuna Özel Öklidyen Grup denmektedir



Şekil 4.4. Rijit hareket gösterimi için belirlenen eksen takımları.

ve bu grup $SE(3)$ ile gösterilmektedir.

$$SE(3) = \{(p, R) : p \in \mathbb{R}^3, R \in SO(3)\} = \mathbb{R}^3 \times SO(3) \quad (4.40)$$

Dönme matrisinin tanımına benzer şekilde, $(p, R) \in SE(3)$ elemanı hem bir sistemin yapılandırmasının özelliklerini tanımlar, hem de bir noktanın bir koordinat sisteminden diğer bir koordinat sistemine dönüşümünü ifade eder. Daha açık bir ifade ile, $\kappa_a, \kappa_b \in \mathbb{R}^3$ sırasıyla \mathcal{A} ve \mathcal{B} eksen takımlarına göre κ noktasının koordinatları ise, κ_a 'yı Denklem (4.41)'de gösterildiği gibi eksenler arası koordinat dönüşümü yapılarak hesaplanabilir.

$$\kappa_a = p_{ab} + R_{ab}\kappa_b \quad (4.41)$$

$$\bar{\kappa} = \begin{bmatrix} \kappa_1 & \kappa_2 & \kappa_3 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4.42)$$

$$\bar{\nu} = \begin{bmatrix} \nu_1 & \nu_2 & \nu_3 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.43)$$

$g_{ab} = (p, R) \in SE(3)$ şeklindeki bu işlem, \mathcal{B} eksen takımının \mathcal{A} eksen takımına göre yapılandırmasını tanımlamaktadır. Rijit dönüşümler ile, bu şekilde nokta ve vektör dönüşümlerinin, \mathbb{R}^4 uzayında çok basit bir gösterimi vardır. Bu gösterim sayesinde, rijit dönüşümlerin bileşkesi basit matris çarpımlarına indirgenebilmektedir. Bu amaçla, \mathbb{R}^4 uzayında bir vektör elde etmek için Denklem (4.42)'de gösterildiği gibi bir noktanın koordinat vektörünün sonuna "1" eklenir. Bu şekilde oluşturulan koordinat vektörüne, *Homojen Koordinatlar* denmektedir. İki noktanın farkı olan vektörler ise Denklem (4.43)'deki gibi gösterilir.

Burada, vektör ve noktaların gösterimi konusunda farklılıklar vardır. Dördüncü

terim olarak noktalara "1", vektörlere ise "0" eklenmektedir. Bunun başlıca nedeni, iki nokta farkının bir vektör olması, iki vektör farkının yine bir vektör olması, bir vektör ile bir noktanın toplamının yine bir nokta olması ve iki noktanın toplamının anlamsız olması gereklilikleridir.

Denklem (4.41)'de verilen, $\kappa_a = g_{ab}(\kappa_b)$ şeklindeki dönüşüm işlemi bir *afine* dönüşüm işlemidir. Yani, bu dönüşüm sonucunda noktalar, doğrular ve düzlemler arasındaki bağıllık korunmaktadır. Noktalar için tanımlanan notasyon kullanılarak, bu dönüşüm, doğrusal bir işlem olarak Denklem (4.44)'deki gibi yazılabilir.

$$\bar{\kappa}_a = \begin{bmatrix} \kappa_a \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ab} & p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_b \\ 1 \end{bmatrix} =: \bar{g}_{ab} \bar{\kappa}_b \quad (4.44)$$

Denklem (4.44)'deki, 4×4 , \bar{g}_{ab} matrisine $g_{ab} \in SE(3)$ dönüşümünün homojen gösterimi veya homojen dönüşüm matrisi denmektedir. Rijit cisim hareketinin homojen yada doğrusal olarak gösterilebilmesi için kullanılan terimlerin boyutu üçden dörde çıkmaktadır. Ancak bu sayede, rijit dönüşüm işlemlerinin bileşkesi basit matris çarpımları olarak hesaplanabilmektedir. Ayrıca, fazlalık olarak nitelendirilebilecek olan homojen dönüşüm matrisinin en son satırı grafik literatüründe oldukça kullanışlı olmaktadır. Örneğin, son satırda kullanılan "1" ölçek faktörü ve son satırdaki sıfır vektörü ise derinlik dönüşümü için kullanılmaktadır. $g = (p, R) \in SE(3)$ olmak üzere Denklem (4.45)'de bir homojen dönüşüm matrisinin en genel şekli verilmiştir.

$$\bar{g} = \left[\begin{array}{c|c} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ \hline f_{1 \times 3} & s_{1 \times 1} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \text{Dönme} & \text{Öteleme} \\ \hline \text{Derinlik} & \text{Ölçek} \end{array} \right] \quad (4.45)$$

Rijit dönüşüm matrisleri kullanılarak yeni rijit dönüşüm matrisleri oluşturulabilir. \mathcal{C} eksen takımının \mathcal{B} eksen takımına göre yapılandırması $g_{bc} \in SE(3)$ ve \mathcal{B} eksen takımının \mathcal{A} eksen takımına göre yapılandırması $g_{ab} \in SE(3)$ ise, \mathcal{C} eksen takımının \mathcal{A} eksen takımına göre yapılandırması Denklem (4.46)'daki gibi hesaplanabilir. Aynı zamanda, Denklem (4.46) rijit cisim dönüşümleri için bileşim kuralının standart matris çarpımı olduğunu tanımlamaktadır.

$$\bar{g}_{ac} = \bar{g}_{ab} \bar{g}_{bc} = \left[\begin{array}{c|c} R_{ab} R_{bc} & R_{ab} p_{bc} + p_{ab} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] \quad (4.46)$$

Dönme matrislerinin ortogonal olduğu gerçeği ile hareketle bir homojen dönüşüm

matrisinin tersi ise Denklem (4.47)'deki gibi basit ters matris işlemi ile belirlenebilir.

$$\bar{g}^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in SE(3) \quad (4.47)$$

$SO(3)$ için tanımlanan üstel gösterim kavramı Öklidyen grup $SE(3)$ için genelleştirilebilir. Bunun için çarpık-simetrik matris uzayı, $so(3)$, tanımına benzer şekilde Denklem (4.48)'de gösterildiği gibi özel bir Öklidyen grup tanımına ihtiyaç vardır.

$$se(3) := \{(v, S(\omega)) : v \in \mathbb{R}^3, S(\omega) \in so(3)\} \quad (4.48)$$

$$\hat{\xi} = \begin{bmatrix} S(\omega) & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4} \quad (4.49)$$

Burada, $se(3)$ 'ün elemanları $\hat{\xi}$ ile gösterilir ve bu elemanlara literatürde *twist* denmektedir. Homojen koordinatlarda, *twist*, Denklem (4.49)'daki gibi tanımlanır. ω ve v , sırasıyla, *twist* koordinatların açısız ve doğrusal bileşenleridir ve $\xi := (v, \omega)$ şeklinde tanımlanmaktadır. Burada çarpık-simetrik matris kavramına benzer şekilde, $\hat{\xi} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ve $\xi \in \mathbb{R}^6$ arasındaki dönüşümler, Denklem (4.50)'de gösterildiği gibi \vee (vee) ve \wedge (wedge) operatörleri ile gerçekleştirilmektedir.

$$\begin{bmatrix} S(\omega) & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{\vee} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}^{\wedge} = \begin{bmatrix} S(\omega) & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Eylemsiz bir eksen takımında tanımlı p noktasında bulunan birim dönme eksen ω etrafında dönen rijit cisim üzerindeki κ noktasının Denklem (4.51a)'da tanımlanan hızı, *twist* tanımlaması kullanılarak tekrar düzenlenirse Denklem (4.51b) elde edilir. Burada $v = -\omega \times p$ olduğuna dikkat edilmelidir.

$$\dot{\kappa}(t) = \omega \times (\kappa(t) - p) \quad (4.51a)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\kappa} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(\omega) & -\omega \times p \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa \\ 1 \end{bmatrix} = \hat{\xi} \begin{bmatrix} \kappa \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{\bar{\kappa}} = \hat{\xi} \bar{\kappa} \quad (4.51b)$$

Denklem (4.51b)'de verilen diferansiyel denklemin çözümü Denklem (4.52)'de verilmiştir. Burada $e^{\hat{\xi}t}$, 4×4 matris $\hat{\xi}t$ 'nin üstel matrisidir ve cismin birim hızda döndürüldüğü kabulü yapılırsa t toplam dönme miktarı olacaktır.

$$\bar{\kappa}(t) = e^{\hat{\xi}t} \bar{\kappa}(0) \quad (4.52)$$

Denklem (4.52)'deki $e^{\hat{\xi}t}$, bir noktanın başlangıç konumunu t radyan kadar döndürdükten sonraki konumuna dönüştürmektedir şeklinde yorumlanabilir. Buradan, toplam dönme miktarı θ kabulü ve gerekli matematiksel işlemler yapıldıktan sonra Denklem (4.53a) elde edilir. Eğer ω ekseninde dönme değil de öteleme hareketi oluyorsa aynı mantıkla ve toplam öteleme miktarı yine θ kabulü ile Denklem (4.53b) elde edilir.

$$e^{\hat{\xi}\theta} = \begin{bmatrix} e^{S(\omega)\theta} & (I - e^{S(\omega)\theta})(\omega \times v) + \omega\omega^T v\theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \omega \neq 0 \quad (4.53a)$$

$$e^{\hat{\xi}\theta} = \begin{bmatrix} I & v\theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \omega = 0 \quad (4.53b)$$

Denklem (4.52)'dekine benzer şekilde, bir rijit cismin eylemsiz bir eksen takımına göre başlangıç yapılandırması $g_{ab}(0)$ kabul edilirse, yine aynı eksen takımına göre son yapılandırılması Denklem (4.54)'teki gibi olmaktadır. Daha net bir ifade ile, $e^{\hat{\xi}\theta}$ üstel işlemi, rijit bir cismin bağlı hareketini tanımlamaktadır.

$$g_{ab}(\theta) = e^{\hat{\xi}\theta} g_{ab}(0) \quad (4.54)$$

Buraya kadar, rijit bir cismin konumu ve yönelimi için gerekli tanımlamalar yapıldı, ancak rijit bir cismin hızı noktasında bir takım yeni tanımlamalara ihtiyaç vardır. Rijit bir gövde üzerindeki bir noktanın eylemsiz bir eksen takımına göre hızı Denklem (4.20) ile tanımlanmıştı. Ancak, robotik alanında, genelde, sadece bir noktanın eylemsiz bir eksen takımına göre hızı değil hareketli bir gövde üzerine yerleştirilmiş bir eksen takımının yine hareketli bir eksen takımına göre hızı ile ilgilenildiğinden, bu notasyon robotik alanı için yetersizdir. Çünkü Denklem (4.20)'de gösterildiği gibi bir noktanın eylemsiz bir eksen etrafında dönüşü sadece düzlemsel olmaktadır, ancak bir eksen takımının hareketli bir eksen takımına göre hızı düzlemsel olmayabilir. Bu yüzden, eksen takımlarının birbirlerine göre yönelimlerindeki değişimlerin takip edilmesi gerekmektedir. Bu amaç için, açılal hızların daha genel bir gösterimine ihtiyaç vardır. Eylemsiz eksen takımı \mathcal{A} ve \mathcal{A} eksen takımı ile merkezleri çakışık ve \mathcal{A} eksen takımına göre gövde ile hareket eden eksen takımı \mathcal{B} ve \mathcal{B} eksen takımının \mathcal{A} eksen takımındaki yöneliminin zamana göre değişimi $R_{ab}(t) \in SO(3)$ ise, gövde üzerinde \mathcal{B} eksen takımında tanımlı bir κ noktasının \mathcal{A} eksen takımına göre yörüngesi Denklem (4.55)'daki gibi hesaplanabilir.

$$\kappa_a(t) = R_{ab}(t)\kappa_b \quad (4.55)$$

Buradan κ noktasının eylemsiz eksen takımına göre hızı Denklem (4.56)'da gösterildiği gibi eşitliğin her iki tarafının zamana göre türevi alınarak hesaplanabilir.

$$v_{\kappa_a}(t) = \frac{d}{dt}\kappa_a(t) = \dot{R}_{ab}(t)\kappa_b \quad (4.56)$$

Burada, \dot{R}_{ab} , gövde üzerindeki noktanın \mathcal{B} eksen takımındaki koordinatlarını, eylemsiz \mathcal{A} eksen takımındaki koordinatlarına dönüştürmektedir. Bu noktada bir dönme matrisinin türevi alınmalıdır. Dönme matrisinin Denklem (4.57)'de verilen kendine özgü yapısı kullanılarak, bir dönme matrisinin türev işlemi için bir tanımlama yapılabilir ve bunun sonucunda daha işlevsel bir gösterim elde edilebilir.

$$R_{ab}(t)R_{ab}^T(t) = I \quad (4.57)$$

Her iki tarafın zamana göre türevi alınır ve okunabilirlik açısından matrislerin zamana bağımlılıkları ve alt simgeler yazılmaz ise Denklem (4.58) elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{R}R^T + R\dot{R}^T &= 0 \\ \dot{R}R^T &= -\left(R\dot{R}^T\right)^T \end{aligned} \quad (4.58)$$

Çarpık-simetrik matrisin tanımından dolayı $\dot{R}R^T$ matrisi çarpık-simetrik bir matristir. Yani, bir dönme matrisinin türevi çarpık-simetrik matrisle dönme matrisinin çarpımına eşdeğerdir. Bu önerme, $R^T R = I$ olduğu gerçeği ve $S := \dot{R}R^T$ şeklinde bir matris tanımı kullanılıp Denklem (4.59)'daki gibi kanıtlanabilir ve bu tanımlama oldukça önemlidir.

$$\begin{aligned} \dot{R}R^T &= S \\ \dot{R}R^T R &= SR \\ \dot{R} &= SR \end{aligned} \quad (4.59)$$

Yapılan bu tanımlamalar kullanılarak Denklem (4.56) tekrar düzenlenirse Denklem (4.60) elde edilir.

$$\begin{aligned} v_{\kappa_a}(t) &= \dot{R}_{ab}(t)\kappa_b = S(\omega_{ab}(t))R_{ab}(t)\kappa_b \\ &= S(\omega_{ab}(t))\kappa_a = \omega_{ab}(t) \times \kappa_a \end{aligned} \quad (4.60)$$

Burada elde edilen sonuç ile Denklem (4.20) karşılaştırıldığında bu gösterim şeklinin geçerliliği kanıtlanmış olur. Hareketli bir eksen takımının yöneliminin takip edilebilmesi

için gerekli ve aynı zamanda işlevsel bir gösterim tanımlaması yapıldıktan sonra rijit cisim hareketinin en genel hali için daha kapsamlı bir tanımlama yapmak gerekmektedir. Bu noktada, Denklem (4.61)'de verilen $g_{ab}(t) \in SE(3)$ homojen dönüşüm matrisinin rijit cismin zamana bağımlı yörüngesini ifade ettiği kabulü yapılırsa ve eşitliğin her iki tarafının türevi alınıp homojen dönüşüm matrisinin tersi ile çarpılırsa Denklem (4.62) elde edilir.

$$g_{ab}(t) = \begin{bmatrix} R_{ab}(t) & p_{ab}(t) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

$$\dot{g}_{ab}g_{ab}^{-1} = \begin{bmatrix} \dot{R}_{ab} & \dot{p}_{ab} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{ab}^T & -R_{ab}^T p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{R}_{ab}R_{ab}^T & -\dot{R}_{ab}R_{ab}^T p_{ab} + \dot{p}_{ab} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.62)$$

Burada, açısal hızdakine benzer bir tanımlama ile $\dot{g}_{ab}g_{ab}^{-1}$ terimi \widehat{V}_{ab} olarak tanımlanırsa ve Denklem (4.62) tekrar düzenlenirse Denklem (4.63) elde edilir. Bu denklem eylemsiz eksen takımına bağlı hız olarak tanımlanmaktadır.

$$\widehat{V}_{ab} = \dot{g}_{ab}g_{ab}^{-1} = \begin{bmatrix} \dot{R}_{ab}R_{ab}^T & -\dot{R}_{ab}R_{ab}^T p_{ab} + \dot{p}_{ab} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

$$V_{ab} = \begin{bmatrix} v_{ab} \\ \omega_{ab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{R}_{ab}R_{ab}^T p_{ab} + \dot{p}_{ab} \\ \left(\dot{R}_{ab}R_{ab}^T\right)^\vee \end{bmatrix}$$

Gövde üzerindeki bir eksen takımında tanımlı bir noktanın eylemsiz eksen takımına göre hızı Denklem (4.63)'de verilen eşitlik yardımıyla Denklem (4.64)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \kappa_a(t) &= g_{ab}(t)\kappa_b \\ v_{\kappa_a} &= \dot{\kappa}_a = \dot{g}_{ab}\kappa_b = \dot{g}_{ab}g_{ab}^{-1}\kappa_a \\ &= \widehat{V}_{ab}\kappa_a = \omega_{ab} \times \kappa_a + v_{ab} \end{aligned} \quad (4.64)$$

Eylemsiz eksen takımına göre hesaplanan hızın bileşenleri hissedilen hızlardan farklıdır. Yani, hızın açısal bileşeni ω_{ab} , gövdenin eylemsiz eksen takımından görünen anlık açısal hızı iken, hızın doğrusal bileşeni v_{ab} , gövde üzerindeki eksen takımının merkez noktasının hareketi değildir. Aksine, v_{ab} , bir t zamanında eylemsiz eksen takımının merkezinden geçen gövde üzerindeki hayali bir noktanın hızıdır. Daha net bir ifade ile eylemsiz eksen takımının merkezinde, rijit gövde üzerinde ve eylemsiz eksen takımı merkezinden geçen bir noktanın anlık hızı ölçülürse bu hız v_{ab} olmaktadır. Bu yüzden,

eylemsiz eksen takımına göre olan hızın daha doğal bir yorumlamasını yapabilmek için rijit gövdenin anlık hızı gövde eksenine göre tanımlanabilir. Burada, notasyon açısından, Denklem (4.63)'de hesaplanan rijit hareketin uzaysal hızı yani uzayda belirlenmiş herhangi bir eylemsiz eksen takımına göre hızı için \widehat{V}_{ab}^a ve bu hızın gövde üzerindeki eksen takımındaki karşılığı Denklem (4.65)'de gösterildiği gibi \widehat{V}_{ab}^b ile tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}\widehat{V}_{ab}^b &= g_{ab}^{-1} \dot{g}_{ab} = \begin{bmatrix} R_{ab}^T \dot{R}_{ab} & R_{ab}^T \dot{p}_{ab} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ V_{ab}^b &= \begin{bmatrix} v_{ab}^b \\ \omega_{ab}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ab}^T \dot{p}_{ab} \\ \left(R_{ab}^T \dot{R}_{ab} \right)^\vee \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (4.65)$$

Denklem (4.64)'dekine benzer şekilde, nokta hızının gövde eksenindeki karşılığı Denklem (4.66)'daki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}v_{\kappa_b} &= g_{ab}^{-1} v_{\kappa_a} = g_{ab}^{-1} \dot{g}_{ab} \kappa_b \\ &= \widehat{V}_{ab}^b \kappa_b = \omega_{ab}^b \times \kappa_b + v_{ab}^b\end{aligned}\quad (4.66)$$

Yani, \widehat{V}_{ab}^b işlemi, noktanın gövde eksenindeki koordinatlarını alıp, bu noktanın hızını gövde ekseninde tanımlayan bir işlemdir. Burada, ω_{ab}^b , eksen takımının mevcut gövde ekseninde görünen açısal hızı, v_{ab}^b ise mevcut gövde ekseninde görünen, gövde üzerindeki eksen takımının merkezinin eylemsiz eksen takımına göre hızıdır. Denklem (4.66)'da hesaplanan hızın, gövdenin, gövde eksenine göre hızı olmadığına dikkat edilmelidir. Gövde eksenini gövde üzerinde sabit olduğu ve gövde ile hareket ettiği için gövdenin gövde eksenine göre hızı her zaman sıfır olmaktadır. Bu hız gövdenin eylemsiz eksen takımına göre hızının gövde eksenindeki karşılığıdır. Rijit hareketin, gövde ekseninde tanımlı hızı ve eylemsiz eksende tanımlı hızı arasındaki ilişki benzerlik dönüşümü ile bulunabilir. Bu ilişki Denklem (4.67)'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}\widehat{V}_{ab}^a &= \dot{g}_{ab} g_{ab}^{-1} = g_{ab} (g_{ab}^{-1} \dot{g}_{ab}) g_{ab}^{-1} = g_{ab} \widehat{V}_{ab}^b g_{ab}^{-1} \\ \omega_{ab}^a &= R_{ab} \omega_{ab}^b \\ v_{ab}^a &= -\dot{R}_{ab} R_{ab}^T p_{ab} + \dot{p}_{ab} = -\omega_{ab}^a \times p_{ab} + \dot{p}_{ab} = p_{ab} \times (R_{ab} \omega_{ab}^b) + R_{ab} v_{ab}^b \\ V_{ab}^a &= \begin{bmatrix} v_{ab}^a \\ \omega_{ab}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ab} & S(p_{ab}) R_{ab} \\ 0 & R_{ab} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab}^b \\ \omega_{ab}^b \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (4.67)$$

Denklem (4.67)'de gösterilen 6×6 matris, g homojen dönüşümü ile ilgili adjoint

dönüşümü olarak tanımlanır ve Ad_g şeklinde gösterilir. Adjoint dönüşümü, hızın gövde eksenindeki koordinatları ile eylemsiz eksenindeki koordinatları arasındaki dönüşüm işlemidir ve tersi alınabilir. Denklem (4.68)'de, verilen bir $g \in SE(3)$ homojen dönüşüm için $Ad_g : \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}^6$ adjoint dönüşümünün en genel hali ve tersi gösterilmiştir. Adjoint dönüşüm kullanılarak, gövde ve eylemsiz eksenlerdeki hızlar arasındaki ilişki Denklem (4.69)'da gösterildiği gibi tanımlanabilir.

$$Ad_g = \begin{bmatrix} R & S(p)R \\ 0 & R \end{bmatrix}, \quad Ad_g^{-1} = Ad_{g^{-1}} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T S(p) \\ 0 & R^T \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

$$V_{ab}^a = Ad_g V_{ab}^b \quad (4.69)$$

Homojen dönüşüm matrislerinin bileşkesinin hesaplanmasına benzer şekilde (Bkz. Denklem (4.46)), birbirlerine göre bağıl hızları tanımlı olan eksenlerin birbirlerine göre hızları adjoint dönüşüm kullanılarak Denklem (4.70)'deki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} V_{ac}^a &= V_{ab}^a + Ad_{g_{ab}} V_{bc}^a \\ V_{ac}^b &= Ad_{g_{bc}^{-1}} V_{ab}^b + V_{bc}^b \end{aligned} \quad (4.70)$$

Bir rijit cismin hareketi ile ilgili konumlar, hızlar ve bunlar arasındaki dönüşümler ile ilgili gerekli tanımlamaların analitik açıklaması yapıldıktan sonra, bölümün devamında, bu çalışma kapsamında geliştirilen bacak mekanizmasına ait kinematik analiz çalışmalarına yer verilmiştir.

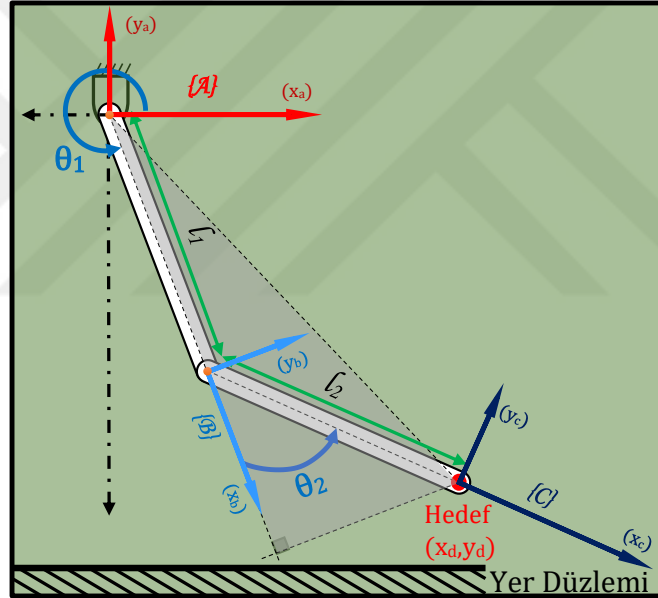
4.2. Bacak Mekanizmasının Kinematik Analizi ve Sentezi

Bu bölümde ilk önce iki serbestlik dereceli bacak mekanizmasının ileri ve ters kinematik analizleri yapılmıştır. Bu bağlamda sistemin hareketini tanımlayan eşitlikler elde edilecektir ve sisteme uygulanan kuvvetler ve eklem torqları arasındaki ilişki tanımlanmıştır. Daha sonra optimizasyon probleminin tanımlanmasında kullanılacak eşitlikler elde edilmiştir. Bu aşamada sadece iki serbestlik dereceli olan bacak mekanizmasının optimizasyon çalışması yapılacağı için ve ayrıca, dönme eksenleri birbirine paralel iki adet dönel mafsala sahip bacak mekanizması sadece düzlemsel hareket ettiği için kullanılan şekillerde ve tanımlamalarda, genelde, üçüncü boyuta yer verilmemiştir. Dört ayaklı bir

robotun kinematik analizi Bölüm 8’de tartışılmıştır.

4.2.1. İki Serbestlik Dereceli Bacak Mekanizmasının Kinematik Analizi

Bu bölümde öncelikle belirli eklem değişkenlerine karşılık mekanizma üzerindeki bir noktanın konumunun hesaplandığı ileri kinematik analizi yapılmış, devamında, mekanizma üzerindeki bir noktanın belirli bir konumuna karşılık eklem değişkenlerinin değerlerinin hesaplandığı ters kinematik analiz yapılmıştır. Kinematik analizde, harekete neden olan kuvvet ve momentleri dikkate almadan hareketin kendisi tanımlanmaktadır. Bu nedenle kinematik analiz geometrik bir tanımlamadır ve bu bağlamda konum, hız ve ivme gibi vektörel büyüklüklerin tanımlanabilmesi için kinematik analizde bir referans koordinat sistemine ihtiyaç vardır. Bacak mekanizmasının basitleştirilmiş şematik çizimi ve belirlenen referans koordinat sistemlerinin konumları ve pozitif yönleri Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Eksen takımlarının ve sistem değişkenlerinin gösterildiği bacak mekanizmasının basitleştirilmiş çizimi.

Şekil 4.5’de, A eylemsiz eksen takımının merkezi birinci uzvu dönme merkezine yerleştirilmiştir. Bu eksen takımı sisteme ait konum, hız ve ivme gibi vektörel büyüklüklerin ve ayrıca diğer hareketli koordinat eksenlerinin merkez konumlarının tanımlamalarında kullanılacak eylemsiz bir referans koordinat eksenidir. Bu bağlamda bu referans koordinat eksenini ana eksen olarak tanımlanmıştır. Birinci uzvu hareketini ana eksene göre tanımlayabilmek için yine merkezi ikinci uzvu dönme merkezine yerleştirilmiş ve birinci uzvu sabitlenerek uzvu ile hareket eden hareketli B eksen takımı tanımlanmıştır. Aynı şekilde ikinci uzvu hareketini B eksen takımı ve ana eksene göre tanımlayabilmek için

merkezi ikinci uzvun uç noktasına yerleştirilmiş ve ikinci uzva sabitlenerek uzuv ile hareket eden hareketli \mathcal{C} eksen takımı tanımlanmıştır. Şekilde görünen l_1 ve l_2 sırasıyla, bacak mekanizmasının üst ve alt kısımlarına ait uzuv boyutlarını, θ_1 ve θ_2 ise eklem değişkenlerini ifade etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi θ_1 , ana eksenin x_a -ekseni ile \mathcal{B} eksen takımının x_b -ekseni arasında saat yönünün tersi yönde ölçülen açı ile ifade edilmiştir. θ_2 ise \mathcal{B} eksen takımının x_b -ekseni ile \mathcal{C} eksen takımının x_c -ekseni arasında saat yönünün tersi yönde ölçülen açı ile ifade edilmiştir. Son olarak şekilde kırmızı nokta ile gösterilen ikinci uzvun uç noktasının ana ekseninde tanımlı hedef pozisyonu x_d, y_d noktası Hedef olarak isimlendirilmiştir.

Eklem değişkenleri, Θ , eklem uzayını oluşturmaktadır ve bu değişkenler uzuvların konumlarını belirlediğinden eklem uzayı aynı zamanda yapılandırma uzayını oluşturmaktadır. Bu yüzden, genelde, Θ , eklem uzayının bileşenleri *genelleştirilmiş koordinatlar* olarak tanımlanır. Bu tanımlamalar yapıldıktan sonra Bölüm 4.1'deki tanımlamalar yardımıyla ileri kinematik formülasyonu yapılabilir. Bunun için, $\theta \in \Theta$ şeklinde tanımlanan eklem değişkenlerine karşılık bacak mekanizmasının yapılandırmasını tanımlayacak, $g_{ac} : \Theta \rightarrow SE(3)$ şeklinde bir dönüşüm matrisi belirlenmelidir. Denklem (4.71)'de, Bölüm 4.1'de yapılan *twist* tanımı kullanılarak ileri kinematik için üstel çarpım formülasyonu verilmiştir.

$$g_{ac}(\theta) = e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} g_{ac}(0) \quad (4.71)$$

Denklem (4.71) kullanılarak, \mathcal{B} ve \mathcal{C} eksen takımlarının birbirlerine ve ana eksene göre yapılandırılmalarını tanımlayan homojen dönüşüm matrisleri Denklem (4.72)'de tanımlanmıştır. Okunabilirlik açısından, denklemde $i = 1, 2$ olmak üzere $c_{\theta_i} = \cos \theta_i$, $s_{\theta_i} = \sin \theta_i$, $c_{\theta_{12}} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ ve $s_{\theta_{12}} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$ kısaltmaları kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} g_{ab}(\theta_1) &= e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} g_{ab}(0) \\ &= \begin{bmatrix} c_{\theta_1} & -s_{\theta_1} & 0 & l_1 c_{\theta_1} \\ s_{\theta_1} & c_{\theta_1} & 0 & l_1 s_{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.72a)$$

$$\begin{aligned}
g_{bc}(\theta_2) &= e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} g_{bc}(0) \\
&= \begin{bmatrix} c_{\theta_2} & -s_{\theta_2} & 0 & l_2 c_{\theta_2} \\ s_{\theta_2} & c_{\theta_2} & 0 & l_2 s_{\theta_2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.72b)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_{ac}(\theta_1, \theta_2) &= e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} g_{ac}(0) \\
&= \begin{bmatrix} c_{\theta_{12}} & -s_{\theta_{12}} & 0 & l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}} \\ s_{\theta_{12}} & c_{\theta_{12}} & 0 & l_1 s_{\theta_1} + l_2 s_{\theta_{12}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ac}(\theta) & p_{ac}(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.72c)
\end{aligned}$$

Denklem (4.72c), \mathcal{C} eksen takımının ana eksene göre yapılandırmasını eklem değişkenleri için tanımlayan ileri kinematik çözümünü vermektedir. Burada, $R_{ac}(\theta)$, \mathcal{C} eksen takımının ana eksene göre yönelimini, $p_{ac}(\theta)$ ise \mathcal{C} eksen takımının ana eksene göre konumunu ifade etmektedir. Ters kinematik problemin çözümü için ise, $g_h \in SE(3)$ şeklinde hedeflenen bir yapılandırma için Denklem (4.73) gösterilen eşitliğin $\theta \in \Theta$ için çözümü gerekmektedir.

$$g_{ac}(\theta) = g_h \quad (4.73)$$

Bu noktada, sistemin serbestlik derecesinin iki olması ve buna ek olarak şuanki aşamada sistemin yönelimi ile değil, sadece izleyeceği yörünge ile ilgilendiğinden, Denklem (4.74)'de gösterildiği gibi hedeflenen sistem konumu için gerekli θ_1 ve θ_2 eklem açılarının hesaplanması yeterlidir. Burada, φ 'nin işareti ψ ile aynı olmalıdır ve seçilen işarete bağlı olarak sistemin yönelimi belirlenmektedir. Daha açık bir ifade ile, aynı hedef noktaya iki farklı yönelim ile ulaşılabilir ve bacak mekanizması için belirlenen bir yörünge iki farklı şekilde takip edilebilir. Yani, ters kinematik analizde φ ve ψ için seçilen işaret bacak mekanizmasının gövde üzerindeki yönelimini belirlemektedir yada tam tersi de söylenebilir, gövde üzerinde tercih edilen yönelim φ ve ψ için seçilen işareti

belirlemektedir.

$$\begin{aligned}
 x_d = l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}} & \implies \theta_1 = \text{atan2}(y_d, x_d) \pm \varphi \\
 y_d = l_1 s_{\theta_1} + l_2 s_{\theta_{12}} & \implies \theta_2 = \pi \pm \psi \\
 & \psi = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - x_d^2 - y_d^2}{2l_1 l_2} \right) \\
 & \varphi = \cos^{-1} \left(\frac{x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{x_d^2 + y_d^2}} \right)
 \end{aligned} \tag{4.74}$$

Konum analizi tamamlandıktan sonra sisteme ait hızların tanımlaması için yine Bölüm 4.1’de yapılan tanımlamalar kullanılabilir. \mathcal{C} eksen takımının ana eksene göre çizgisel hızı Denklem (4.75) ile hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
 v_C^a &= \widehat{V}_{ac}^a \begin{bmatrix} p_{ac} \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \widehat{V}_{ac} &= \dot{g}_{ac}(\theta) g_{ac}^{-1}(\theta)
 \end{aligned} \tag{4.75}$$

Denklem (4.75)’de \widehat{V}_{ac} differansiyel denklemi için zincir kuralı uygulanırsa ve gerekli matematiksel düzenlemeler yapılırsa Denklem (4.76)’daki gibi eklem değişkenleri ve eklemlerin ana eksene göre hızları arasında doğrusal bir ilişki elde edilir. Bu doğrusal ilişkide $J_{ac}^a \in \mathbb{R}^{6 \times n}$, sistemin yapılandırılmasına bağlıdır ve Jakobiyen matris olarak adlandırılmaktadır. Buna ek olarak $J_{ac}^a : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^6$ şeklindeki bu işlem, sistemin yapılandırılmasına bağlı olarak her bir eklem hızını, ana eksende karşılık gelen hızına dönüştürmektedir. Buradan, Denklem (4.76) kullanılarak bacak mekanizmasına ait Jakobiyen matris sistem değişkenleri için hesaplanırsa Denklem (4.77) elde edilir. Burada, J_{ac}^a Jakobiyen matrisin ilk sütunu birinci eklem hızını, ikinci sütunu ise ikinci eklem hızını ana eksende karşılık gelen hızlara dönüştürmektedir. V_{ac}^a ise ikinci eklemin toplam hızının ana eksendeki karşılığıdır. Buradan Denklem (4.75), Denklem (4.77) kullanılarak tekrar düzenlenirse \mathcal{C} eksen takımının ana eksene göre çizgisel hızı Denklem (4.78)’deki gibi olur. Aynı mantık ile, J_{ac}^a Jakobiyen matrisin ilk sütunu kullanılarak \mathcal{B} eksen takımının ana

eksene göre hızı Denklem (4.79)'daki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{aligned}\widehat{V}_{ac}^a &= \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial g_{ac}}{\partial \theta_i} g_{ac}^{-1} \right) \dot{\theta}_i \\ J_{ac}^a &= \left[\left(\frac{\partial g_{ac}}{\partial \theta_1} g_{ac}^{-1} \right)^\vee \quad \left(\frac{\partial g_{ac}}{\partial \theta_2} g_{ac}^{-1} \right)^\vee \right] \\ V_{ac}^a &= J_{ac}^a(\theta) \dot{\theta}\end{aligned}\tag{4.76}$$

$$\begin{aligned}J_{ac}^a &= \left[\left(\frac{\partial g_{ac}}{\partial \theta_1} g_{ac}^{-1} \right)^\vee \quad \left(\frac{\partial g_{ac}}{\partial \theta_2} g_{ac}^{-1} \right)^\vee \right] = \begin{bmatrix} 0 & l_1 s_{\theta_1} \\ 0 & -l_1 c_{\theta_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\ V_{ac}^a &= J_{ac}^a(\theta) \dot{\theta} = \begin{bmatrix} 0 & l_1 s_{\theta_1} \\ 0 & -l_1 c_{\theta_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 s_{\theta_1} \dot{\theta}_2 \\ -l_1 c_{\theta_1} \dot{\theta}_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{4.77}$$

$$\begin{aligned}v_C^a &= \widehat{V}_{ac}^a p_{ac}(\theta) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) & 0 & l_1 s_{\theta_1} \dot{\theta}_2 \\ (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) & 0 & 0 & -l_1 c_{\theta_1} \dot{\theta}_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}} \\ l_1 s_{\theta_1} + l_2 s_{\theta_{12}} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (-l_1 s_{\theta_1} - l_2 s_{\theta_{12}}) \dot{\theta}_1 - l_2 s_{\theta_{12}} \dot{\theta}_2 \\ (l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}}) \dot{\theta}_1 + l_2 c_{\theta_{12}} \dot{\theta}_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{4.78}$$

$$v_B^a = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\theta}_1 & 0 & 0 \\ \dot{\theta}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 c_{\theta_1} \\ l_1 s_{\theta_1} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 s_{\theta_1} \dot{\theta}_1 \\ l_1 c_{\theta_1} \dot{\theta}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}\tag{4.79}$$

Bu noktada Jakobiyen matris hakkında daha geniş bir bilgi vermek gerekebilir. Literatürde, robotik alanında kullanılan Jakobiyen matris kavramı iki şekilde ifade edilmek-

tedir. Birincisi Denklem (4.77)'de elde edilen ve tamamen sistem yapılandırmasına özgün geometrik Jakobiyen, ikincisi ${}_{\mathcal{A}}J_{ac}^a = \frac{\partial p(\theta)}{\partial \theta}$ şeklinde tanımlanan ve tamamen kullanılan parametreleştirme metoduna bağlı olan analitik Jakobiyen. Bu iki kavram birbirinden oldukça farklıdır. Ayrıca Denklem (4.77)'de tanımlanan geometrik Jakobiyen matris, eklemelerin doğrusal ve açısal hızlarının ana eksene göre tanımlanması sonucu elde edilmiştir. Bu, sistemin eklem değişkenlerine bağlı tam bir geometrik yorumudur. Ancak literatürde genelde geometrik Jakobiyen, son eksen takımının hızı ile eklem hızları arasındaki doğrusal ilişki olarak da tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, Denklem (4.76)'da tanımlanan geometrik Jakobiyen matrisinin en genel halini tanımlamak gerekmektedir. Yani, gövde üzerindeki bir noktanın çizgisel ve açısal hızları ile eklem değişkenleri arasındaki ilişkinin geometrik bir ifadesi tanımlanmalıdır. Bölüm 4.1'de yapılan *twist* koordinatlar tanımı kullanılarak, n sayıda eklem sahip bir sistem için geometrik Jakobiyen matrisinin en genel hali Denklem (4.80)'de tanımlanmıştır. Burada, i 'nci eklem döneleli mafsaldir ise, ω_i ve p_i , sırasıyla, ilgili eksene göre dönme ekseninin ve dönme eksen konumunun ana eksenindeki tanımını ifade etmektedir. i 'nci eklem doğrusal mafsaldir ise açısal hızı sıfır olacağından ω_i sıfır olmaktadır ve $\omega_i \times p_i$ ifadesi, ilgili eksene göre i 'nci eklem ilerleme yönünün ana eksenindeki tanımı olmaktadır. Buradan, \mathcal{C} eksen takımı için geometrik Jakobiyen, $J_{\mathcal{C}}^a$, Denklem (4.81)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir. Burada, *twist* koordinatlar \mathcal{C} eksen takımına göre, ancak ana ekseninde tanımlanmıştır.

$$J_{(\theta)} = \begin{bmatrix} -\omega_1 \times p_1 & -\omega_2 \times p_2 & \dots & -\omega_n \times p_n \\ \omega_1 & \omega_2 & \dots & \omega_n \end{bmatrix} \quad (4.80)$$

$$\begin{aligned} \omega_1 = \omega_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ p_1 &= -p_{ac} \\ p_2 &= p_{ab} - p_{ac} \end{aligned} \Rightarrow V_{\mathcal{C}}^a = \begin{bmatrix} v_{\mathcal{C}}^a \\ \omega_{\mathcal{C}}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 s_{\theta_1} - l_2 s_{\theta_{12}} & -l_2 s_{\theta_{12}} \\ l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}} & l_2 c_{\theta_{12}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} := J_{\mathcal{C}}^a \dot{\theta} \quad (4.81)$$

Bu tanımlamalar ile sistemin konum ve hız analizleri tamamen tanımlanmış olur. Son olarak, çevreden sisteme uygulanan kuvvetlerin eklem torklarına etkisi yada uygulanan eklem torklarına karşılık sistemin çevreye uyguladığı kuvvetlerin tanımı yapılabilir. Burada, sisteme uygulanan kuvvet ile kastedilen, bacak mekanizmasının uç noktasına yerleştirilmiş \mathcal{C} eksen takımının merkezinden sisteme uygulanan kuvvetlerdir, yine aynı şekilde sistemin

uyguladığı kuvvet ile kasıt ise bacak mekanizmasının uç noktasına yerleştirilmiş \mathcal{C} eksen takımının merkezinden çevreye uygulanan kuvvetlerdir. Eklem torkları ve sisteme uygulanan yada sistemin çevreye uyguladığı kuvvetler arasındaki ilişki Jakobiyen matris kullanılarak tanımlanabilir. Bu amaçla, sistemin izlediği bir yörünge boyunca sisteme uygulanan kuvvet ile ilgili işi Denklem (4.82)'deki gibi tanımlanabilir. Ayrıca, burada tanımlanan iş ile Denklem (4.83)'de tanımlanan aynı yörünge boyunca eklem torkları tarafından yapılan iş aynı olacaktır. Bu bağlamda eklem torkları ve sisteme uygulanan kuvvetler tarafından gerçekleştirilen iş denklemleri birlikte yazılırsa Denklem (4.84) elde edilir.

$$W = \int_{t_1}^{t_2} V_{ac}^c F_c dt \quad (4.82)$$

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \dot{\theta} \tau dt \quad (4.83)$$

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \dot{\theta} \tau dt = \int_{t_1}^{t_2} V_{ac}^c F_c dt \quad (4.84)$$

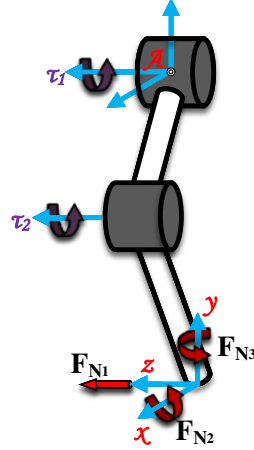
Denklem (4.84)'de, seçilen herhangi bir zaman aralığında bu eşitliğin sağlanabilmesi için integrali alınacak ifadelerin birbirine eşit olması gerekmektedir. Bu bağlamda, Denklem (4.84) tekrar düzenlenirse ve Jakobiyen matris ile eklem hızları arasındaki tanımlama kullanılırsa, sisteme uygulanan kuvvetler ile eklem torkları arasındaki ilişki Denklem (4.85)'deki gibi tanımlanabilir.

$$\dot{\theta}^T \tau = V_{ac}^c F_c = \dot{\theta}^T (J_{ac}^c)^T F_c \implies \tau = (J_{ac}^c)^T F_c \quad (4.85)$$

Burada sisteme uygulanan $F_c \in \mathbb{R}^6$ kuvveti, \mathcal{C} eksen takımına göre tanımlanmıştır. Yani F_c vektörü, sisteme uygulanan kuvvetlerin, \mathcal{C} eksen boyunca tanımlanmış doğrusal ve açısal bileşenleridir ve $F_c = [f_c, \tau_c]^T \in \mathbb{R}^6$ şeklinde tanımlanmaktadır. Bu yüzden Denklem (4.85)'de \mathcal{C} eksen takımında tanımlanmış Jakobiyen matris J_{ac}^c kullanılmıştır. Aynı mantık ile bacak mekanizmasının uç noktasından yani \mathcal{C} eksen takımının merkezinden sisteme uygulanan kuvvetler, ana eksene göre genelleştirilir ise sisteme uygulanan kuvvetler, $F_a = [f_a, \tau_a]^T \in \mathbb{R}^6$ ile eklem torkları arasındaki ilişki ana eksene göre tanımlanmış Jakobiyen matris kullanılarak Denklem (4.86) ile tanımlanabilir.

$$\tau = (J_{ac}^a)^T F_a \quad (4.86)$$

Denklem (4.85) ve Denklem (4.86) ile tanımlanan eşitlikler, sistemin uyguladığı



Şekil 4.6. Denklem (4.87)'de tanımlanan vektörler ve bu doğrultularda etki eden dış kuvvetler. (Kırmızı oklar ile gösterilmiştir.)

yada sisteme uygulanan kuvvetler ile eklem torkları arasında bulunan kuvvet ilişkisini tanımlamaktadır. Yani, bu iki denklem, sisteme etki eden kuvvetleri karşılamak için eklem torklarının ne olması gerektiği yada belirli eklem torkları uygulandığında çevreye nasıl bir kuvvet etki ettiği sorularının cevabını vermektedir. Son durum için sistemin çevre ile arasında bir direnç olduğu varsayılmaktadır. Ancak Şekil 4.5'den de anlaşılacağı üzere, sisteme uygulanan her kuvvet için Denklem (4.85) ve Denklem (4.86) ile tanımlanan eşitlikleri sağlayan eklem torku olmayabilir yada uygulanan eklem torkları ile sisteme uygulanan her kuvvet karşılanamaz. Böyle bir durum, sisteme uygulanan kuvvet, J_{ac}^T matrisinin boşuzayında olduğu zaman ortaya çıkar ve bu durumda eklem torkları tarafından karşılanamayan kuvvetler mekanizma tarafından oluşturulan yapısal kuvvetler ile karşılanmalıdır. Yani kuvvet dengesi, uygulanan kuvvetlerin sistemin mekanik yapısı tarafından karşılanması ile sağlanabilir. Denklem (4.87)'de tanımlanan vektörler, bu bölümde incelenen bacak mekanizmasına ait J_{ac}^T matrisinin boşuzayında bulunmaktadır ve Şekil 4.6'da gösterildiği gibi bu doğrultularda etkiyen dış kuvvetler eklem torkları tarafından karşılanamaz.

$$\begin{aligned}
 F_{N_1} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\
 F_{N_2} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\
 F_{N_3} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned} \tag{4.87}$$

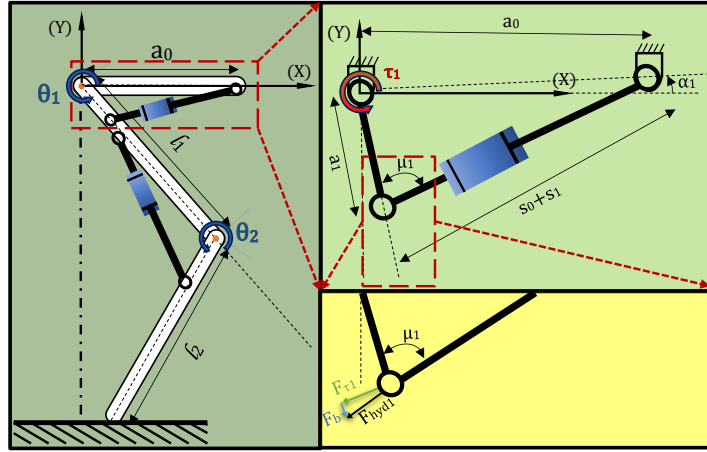
Ayrıca, Jakobiyen matris, eklem değişkenlerine bağlı bir matris olduğundan bazı eklem konumlarında Jakobiyen matrisin derecesi azalabilir. Böyle bir duruma tekillik veya tekil yapılandırma denmektedir ve böyle bir durumda Jakobiyen matrisin bazı sütun veya

satır vektörleri birbiriyle doğrusal bağımlı olmaktadır. Bunun sonucu olarak, tekilliğin olduğu yapılandırmalarda, bazı yönlerde hareket için eklem torkları hesaplanamaz yani sistemin kontrol edilebilir serbestlik derecesi azalır veya tekil yapılandırma konumlarına yaklaşıldığında belirli yönlerde çok düşük derecedeki hızlar için çok yüksek derecede eklem hızları yani belirli yönlerde kuvvet etki etmek için çok yüksek derecede eklem torkları gerekir. Bu yüzden hareket planlanması yapılırken tekil yapılandırmalardan kaçınılmalıdır. Tekil yapılandırmalar genelde sistemin çalışma uzayının limitlerinde bulunur yani sistemin ulaşabileceği en uzak mesafelerde tekillikler oluşmaktadır. Bu bölümde incelenen bacak mekanizmasında olduğu gibi sadece birbirlerine paralel iki adet dönel mafsal olan sistemler için genel bir tekil yapılandırma tanımı yapılabilir. Bu bağlamda, ω_i ilgili eklem ana eksene göre dönme eksenini ve p_i dönme ekseninin ana eksene uzaklığı olmak üzere her iki eklem için *twist* koordinatları tanımlanırsa, bu iki eksen aynı doğrultuda olduklarında, $i = 1, 2$ olmak üzere $\omega_i \times (p_1 - p_2)$ ifadesi sıfır olacaktır. Jakobiyen matris tanımı gereği bu ifadenin sıfır olması demek, Jakobiyen matrisin derecesinin azalması anlamına gelmektedir. Yani, bu iki eksen aynı doğrultuda olduklarında, tekillik oluşmaktadır ve bu yüzden hareket planı buna göre yapılmalıdır. Bunun tam tersi de söylenebilir, yani, tasarlanan sistemin belirli bir yörüngeyi takip etmesi isteniyorsa, sistem boyutlandırılması ve sistem yapılandırılması, hareket boyunca bu tekil yapılandırmaya yaklaşmayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Yapılan bu tanımlamalardan sonra, bacak mekanizmasının kinematiği analitik olarak tamamen tanımlanmış olur. Hareket için gerekli eklem torkları sistem tasarımında belirlenen eyleyiciler tarafından üretileceğinden, burada yapılan tanımlamalar yardımıyla, bu çalışmanın özgünlüğünden biri olan, en az eyleyici kuvvetleri ile gerekli hareketin nasıl sağlanacağı sorusuna yanıt aramak gerekmektedir. Bu bağlamda, bacak mekanizmasına ait kinematik analiz, sistemde kullanılacak eyleyicilerle birlikte değerlendirilerek mekanizma sentezi yapılmış ve bu çalışma kapsamında geliştirilen bacak mekanizmasının önceden tanımlanmış bir yörüngeyi takip ederken ihtiyaç duyulan eyleyici kuvvetleri en aza indirilmeye çalışılmıştır. Bu hem sistem yapılandırması hem de eyleyici alt-sistemlerinin kuvvet iletimi ile ilgili olduğu için, bölümün devamında, sistem değişkenleri ile eyleyici alt-sistemlerinin kuvvet iletim açısı birlikte iyileştirilmeye çalışılmıştır.

4.2.2. İki Serbestlik Dereceli Bacak Mekanizmasının Sentezi

İki serbestlik dereceli bacak mekanizması hidrolik eyleyiciler ile birlikte Şekil 4.7'de şematik olarak gösterilmektedir. Burada l_1 ve l_2 sırasıyla, bacak mekanizmasının



Şekil 4.7. Bölüm 3’de belirlenen tasarım çerçevesi temel alınarak tasarlanmış bacak mekanizmasına ait şematik gösterim.

üst ve alt kısımlarına ait uzuv boyutlarını, θ_1 ve θ_2 eklem değişkenlerini, s_0 ve s_1 sırasıyla hidrolik eyleyicinin kapalı boyunu ve piston kursunun değişimini göstermektedir. a_1 , hidrolik eyleyicinin uzuv üzerindeki bağlantı noktasının dönme eksenine olan uzaklığını, a_0 bacak mekanizmasının üst kısmını tahrik eden hidrolik eyleyicinin robot gövdesi üzerindeki bağlantı noktasının dönme eksenine olan yatay uzaklığını ifade etmektedir. μ_1 ve α_1 açıları ise sırasıyla kuvvet iletim açısı¹ ve hidrolik eyleyicinin gövdeye bağlandığı noktanın yatay ekseninden kaçıklık açısını göstermektedir. Şeklin okunabilirliğinin bozulmaması adına alt kısımdaki uzva ait hidrolik eyleyici alt-sistemine ait şematik gösterim Şekil 4.7’ye dahil edilmemiştir. Ancak alt kısımdaki uzva ait hidrolik eyleyici alt-sistemi için de burada bahsedilen notasyon geçerlidir ve sadece değişkenlere ait alt indis numaralandırması değişmektedir. Sisteme ait tüm parametreler ile ilgili bu notasyon Tablo 4.1’de kısaca özetlenmiştir.

Hidrolik eyleyiciler tarafından uygulanan kuvvet ile eklem torku arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Bu, hidrolik eyleyici mekanizmasının yapısından kaynaklanmaktadır. Hidrolik eyleyiciler, teoride, salınım hareketini dönme hareketine çeviren Kol-Kızak mekanizmaları olarak kabul edilmektedir. Şekil 4.7’de, üst kısımdaki uzvu hareket ettiren hidrolik eyleyici alt-sisteminin Kol-Kızak mekanizması temsili şematik olarak gösterilmektedir. Burada eklem açısı, piston kursu ile değişmektedir, yani tasarlanan bacak mekanizmasında istenen hareket piston kursu ile elde edilmektedir ve hareket için gerekli eklem torkları hidrolik eyleyiciler tarafından uygulanan kuvvetler ile üretilmektedir. Bu bağlamda, Kol-Kızak mekanizması için, hidrolik silindirin toplam boyu giriş ve eklem

¹Bu açıya literatürde bağlama açısı da denmektedir.

Tablo 4.1. Şekil 4.7’de şematik gösterimi verilen bacak mekanizmasına ait sistem değişkenlerinin tanımı

Fiziksel Boyutlar	l_1	Birinci uzvun uzunluğu	Bağımlı Değişkenler	θ_1	Birinci uzvun açısal konumu
	l_2	İkinci uzvun uzunluğu		θ_2	İkinci uzvun açısal konumu
	a_0	Birinci hidrolik eyleyici sabit uzvunun yatay uzunluğu		μ_1	Birinci hidrolik kuvvet iletim açısı
	a_1	Birinci hidrolik eyleyicinin birinci uzva bağlandığı noktanın dönme merkezine olan uzaklığı		μ_2	İkinci hidrolik kuvvet iletim açısı
	a_2	İkinci hidrolik eyleyici sabit uzvunun yatay uzunluğu	Bağımsız Değişkenler	s_0	Birinci hidrolik eyleyici kapalı boyu
	a_3	İkinci hidrolik eyleyicinin ikinci uzva bağlandığı noktanın dönme merkezine olan uzaklığı		s_1	Birinci hidrolik eyleyici piston kursu
	α_1	Birinci hidrolik eyleyici sabit uzvunun yatay eksen den kaçıklık açısı		s_2	İkinci hidrolik eyleyici kapalı boyu
	α_2	İkinci hidrolik eyleyici sabit uzvunun yatay eksen den kaçıklık açısı		s_3	İkinci hidrolik eyleyici piston kursu

açısı çıkış olacak şekilde bir fonksiyon sentezi yapılırsa, her iki hidrolik eyleyici alt–sistemi için Denklem (4.88) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \theta_{1,r} \\ \theta_{2,r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\pi + \alpha_1 - \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + (a_0 \sec \alpha_1)^2 - (s_0 + s_1)^2}{2a_1 a_0 \sec \alpha_1} \right) \\ \pi + \alpha_2 + \cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 + (a_2 \sec \alpha_2)^2 - (s_1 + s_2)^2}{2a_2 a_3 \sec \alpha_2} \right) \end{bmatrix} \quad (4.88)$$

Denklem (4.88), piston kursu ile piston kursu sonucu gerçekleşen eklem açıları $[\theta_{1,r}, \theta_{2,r}]^T$ arasındaki ilişkiyi hidrolik eyleyici alt–sistemlerinin uzuv boyutlarına bağlı olarak tanımlamaktadır. Denklem (4.88) kullanılarak, bacak mekanizmasının önceden belirlenmiş bir yörüngeyi takip etmesi için hidrolik eyleyici alt–sistemlerinin ve bacak uzuvlarının boyutlandırılması kısaca konum korelasyonu yapılarak bacak mekanizmasının sentezi yapılabilir. Ancak, kuvvet iletiminin iyileştirilmesi noktasında tek başına konum korelasyonu yetersizdir. Bunun için, kuvvet iletim açısının piston kursu ile değişiminin uzuv boyutlarına bağlı olarak tanımlanması ve mekanizma sentezi yapılırken hareket boyunca kuvvet iletiminin optimum olması sağlanmalıdır. Bu bağlamda, piston kursu ve kuvvet iletim açısı arasındaki ilişki uzuv boyutlarına bağlı olarak Denklem (4.89)’daki gibi tanımlanabilir. Ayrıca, silindir kuvveti ve eklem torku arasındaki ilişki Denklem (4.90)’da tanımlanmıştır. Burada görüldüğü gibi eklem torku ve silindir kuvveti arasında oldukça

yüksek derecede doğrusal olmayan bir ilişki vardır.

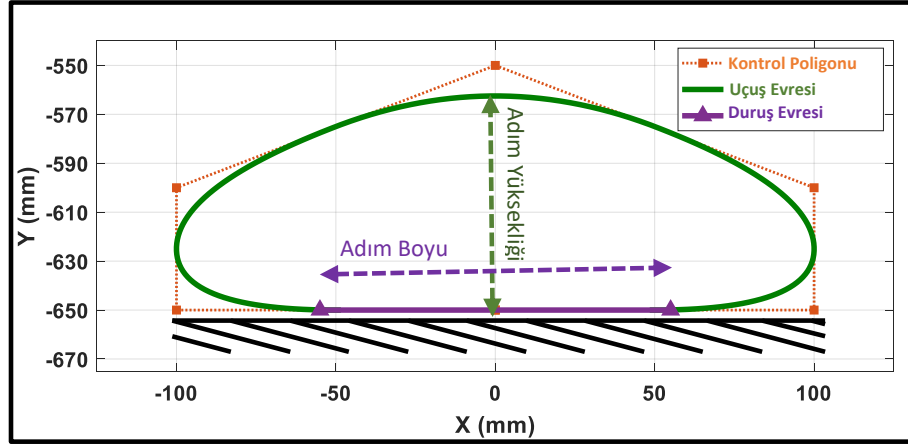
$$\begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 - (a_0 \sec \alpha_1)^2 + (s_0 + s_1)^2}{2a_1(s_0 + s_1)} \right) \\ \cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 - (a_2 \sec \alpha_2)^2 + (s_2 + s_3)^2}{2a_3(s_2 + s_3)} \right) \end{bmatrix} \quad (4.89)$$

$$\begin{bmatrix} F_{\tau_1} \\ F_{\tau_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{hyd_1} \sin(\mu_1) \\ F_{hyd_2} \sin(\mu_2) \end{bmatrix} \quad (4.90)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{hyd_1} a_1 \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 - (a_0 \sec \alpha_1)^2 + (s_0 + s_1)^2}{2a_1(s_0 + s_1)} \right) \right) \\ F_{hyd_2} a_2 \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 - (a_2 \sec \alpha_2)^2 + (s_2 + s_3)^2}{2a_3(s_2 + s_3)} \right) \right) \end{bmatrix}$$

Denklem (4.90)'dan, μ_1 ve μ_2 kuvvet iletim açılarının $\frac{\pi}{2}$ radyan olduğunda kuvvet iletiminin en iyi olduğu ve eklem torklarının maksimum olduğu görülebilir. Bu bağlamda, kuvvet iletimi açısından optimal bir bacak mekanizması elde edebilmek için tasarımı yapılan robotun istenen hareketleri gerçekleştirirken kuvvet iletim açılarının $\frac{\pi}{2}$ radyan'dan sapmalarının en az olması gerekmektedir. Sonuçta ayaklı bir robotun hareket edebilmesi için adım atması gerektiğinden, bahsi geçen hareket ile robotun atacağı adım yani bacak mekanizmasının izleyeceği yörünge kastedilmektedir. Dört ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalarda bacağın izlemesi gereken yörünge yani adım, genellikle yarım daireye benzer şekilde modellenmektedir (Seok ve ark., 2015; Yang ve ark., 2009; Semini ve ark., 2008). Bu noktada, duruş ve uçuş evresi olmak üzere iki ayrı evre olarak tasarlanan bacağın izlemesi gereken yörünge ana eksen takımında (Bknz. Bölüm 4.2.1) tanımlanmıştır. Evreler arasında ani geçişlerden kaçınmak için ve ayağın yere daha yumuşak bir iniş yapabilmesi için yörünge, parametrik bir eğri olan Bézier eğrisinin genelleştirilmiş bir biçimi olan B-spline eğrisi ile tanımlanmıştır. Yörünge'nin şeklinin belirlenebilmesi için şablon olarak bir kontrol poligonu kullanılmıştır. Bu sayede gövde yüksekliği, adım yüksekliği ve adım uzunluğu gibi yörüngeye ait parametreler kontrol poligonu ile belirlenebilmektedir.

Tasarımı yapılan adım yörüngesi yani bacağın izlemesi gereken yörünge Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Burada, bacağın bu yörüngeyi izleyebilmesi için eklem açılarının ne olması gerektiği Bölüm 4.2.1'de Denklem (4.74) ile elde edilen bacağına ait ters kinematik çözümü ile hesaplanabilir. Yörünge'nin izlenebilmesi için ters kinematik çözümü ile hesaplanan gerekli açılar, $[\theta_{1_d}, \theta_{2_d}]^T$ ve Denklem (4.88) ile elde edilen piston kursu ile piston kursu sonucu gerçekleşen eklem açıları, $[\theta_{1_r}, \theta_{2_r}]^T$ birlikte yazılırsa ve istenen eklem



Şekil 4.8. Ana eksen takımında duruş ve uçuş evresi olmak üzere iki ayrı evre olarak tasarlanan adım yürümesi.

açıları ile gerçekleşen eklem açıları arasındaki fark hesaplanırsa Denklem (4.91) elde edilir. Denklem (4.91), eklem uzayında yürüme takip hatasını ifade etmektedir ve bacak mekanizmasına ait bütün uzuv boyutlarını içeren bir ifadedir. Yani, önceden tanımlanmış bir yürümenin izlenebilmesi için bacak mekanizmasının boyutlandırılması Denklem (4.91) ile elde edilen hata denkleminin minimize edilmesi ile yapılabilir. Diğer bir ifade ile, bacak mekanizması parametrelerini Denklem (4.91) ile elde edilen hata denklemini sıfır olana kadar *evrimleştirerek* önceden tanımlanmış bir yürüme için bir bacak mekanizması elde edilebilir. Burada *evrim* ile kasıt, hata denkleminin minimize edilmesinde doğanın evrim davranışını taklit edebilen evrimsel algoritmaların kullanılmasıdır. Bunun yanında, hatanın minimize edilmesinde yine doğadan esinlenerek elde edilmiş optimizasyon teknikleri de kullanılabilir. Böylelikle, tamamen doğadan esinlenerek oluşturulmuş algoritmalara dayalı sıfırdan optimal bir bacak mekanizması elde edilebilecektir.

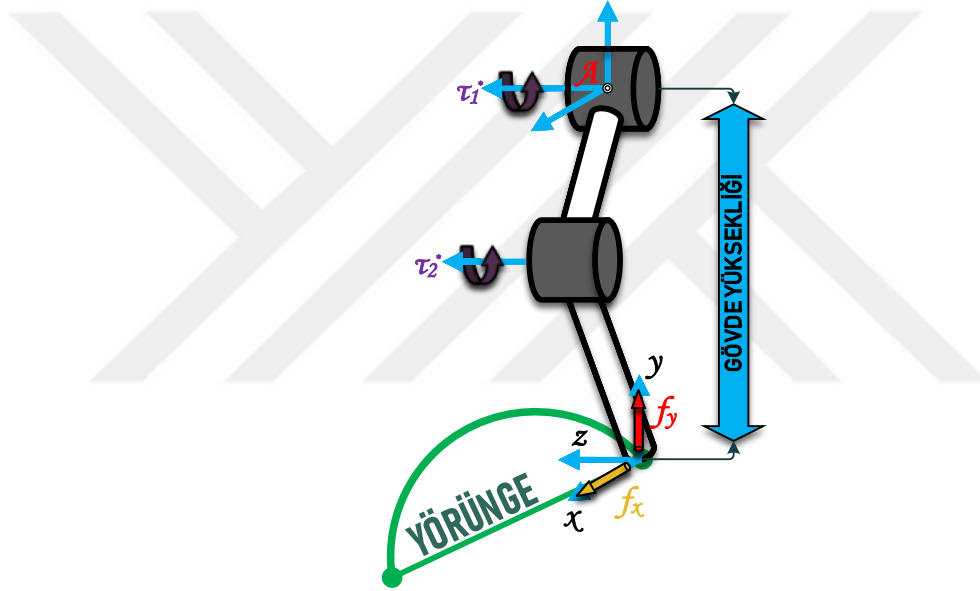
$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \theta_{1_r} \\ \theta_{2_r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 2\pi + \alpha_1 - \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + (a_0 \sec \alpha_1)^2 - (s_0 + s_1)^2}{2a_1 a_0 \sec \alpha_1} \right) \\ \pi + \alpha_2 + \cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 + (a_2 \sec \alpha_2)^2 - (s_1 + s_2)^2}{2a_2 a_3 \sec \alpha_2} \right) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \theta_{1_d} \\ \theta_{2_d} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \text{atan2}(y_d, x_d) \pm \cos^{-1} \left(\frac{x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{x_d^2 + y_d^2}} \right) \\ \pi \pm \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - x_d^2 - y_d^2}{2l_1 l_2} \right) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \varepsilon_{1_j} \\ \varepsilon_{2_j} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \theta_{1_r} - \theta_{1_d} \\ \theta_{2_r} - \theta_{2_d} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.91}$$

Ancak, bu çalışmanın asıl amacı sadece önceden tanımlanmış bir yürüme için izleyebilen bir bacak tasarımı ile sınırlı olmadığından, aksine, asıl odak noktasının eyleyiciler

tarafından önceden tanımlanmış bir yörünge boyunca maksimum kuvvet iletimi sağlayabilen optimal bir bacak mekanizmasını tasarlamaya yönelik stratejileri ortaya koymak olduğundan, yörünge boyunca bacağa etkiyen kuvvet profilinin belirlenmesi ve bu kuvvetlerin minimum eyleyici kuvvetleri ile karşılanabilmesi sağlanmalıdır. Yörünge boyunca bacağa etkiyen kuvvet profilinin belirlenmesi için bacak hareketleri iki ayrı kısımda incenebilir; bacağın adımın atıldığı andaki uçuş evresi ve bacağın gövdeyi taşıdığı ve yerle temas ettiği duruş evresi. Uçuş evresinde, sadece atalet kuvvetlerinin, bir potansiyelden kaynaklanan korunumlu kuvvetlerin ve eklemlerdeki sürtünme kuvvetleri gibi korunumsuz kuvvetlerin bacağa etkideği açıktır. Duruş evresinde ise tüm bu kuvvetlerin yanında yer tepki kuvvetleri ve zemin sürtünme kuvvetleri gibi çevresel kuvvetler de eklenmektedir. Bu çevresel kuvvetler robotun toplam kütlesi ve taşınması gereken yükler ile doğrudan ilişkilidir, ama kuvvet iletiminin optimizasyonunda bu ağırlıkların büyüklüğü değil de bu ağırlıklardan kaynaklanan kuvvetlerin hareket sırasında eklemlerde gerekli torklar açısından bacak mekanizmasını nasıl etkilediği daha önemlidir. Bu önerme, Denklem (4.90) ile elde edilen eyleyici kuvvetleri ve eklem torkları arasındaki eşitlik ile Bölüm 4.2.1’de Denklem (4.86) ile elde edilen sisteme uygulanan ana ekseninde tanımlanmış kuvvetler ile eklem torkları arasındaki ilişki kullanılarak kanıtlanabilir. Bu bağlamda, bacağa etki eden dış kuvvetlerin karşılanması için gerekli eklem torkları Denklem (4.86) yardımı ile hesaplanabilir. Burada, bacak mekanizmasının kinematik yapılandırmasından dolayı dış kuvvetlerin doğrusal bileşenlerinden sadece x- ve y-eksenlerinden etki eden kuvvetlerin eklem torkları ile karşılanabileceği gerçeğine dikkat edilmelidir. Bundan dolayı, bacağa etki eden dış kuvvetler $F_A = [f_x, f_y, 0, 0, 0, 0]^T$ şeklinde tanımlanırsa ve Denklem (4.86)’da yerine yazılırsa, yörünge boyunca bacağa etki eden dış kuvvetlerin karşılanabilmesi için gerekli eklem torkları $\tau^* = [\tau_1^*, \tau_2^*]^T$ Denklem (4.92)’deki gibi hesaplanabilir. Burada, f_x ve f_y kuvvetleri sırasıyla, zemin sürtünme kuvvetinden ve yer tepki kuvvetinden kaynaklanan kuvvetlerdir. Bu kuvvetler ile bacak mekanizmasının izlemesi gereken yörünge Şekil 4.9’da şematik

olarak gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \tau_1^* \\ \tau_2^* \end{bmatrix} &= (J_C^a)^T F_A \\
 &= \begin{bmatrix} -l_1 s_{\theta_1} - l_2 s_{\theta_{12}} & l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -l_2 s_{\theta_{12}} & l_2 c_{\theta_{12}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} f_x (-l_1 s_{\theta_1} - l_2 s_{\theta_{12}}) + f_y (l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}}) \\ f_x (-l_2 s_{\theta_{12}}) + f_y (l_2 c_{\theta_{12}}) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.92}$$



Şekil 4.9. Yörünge, gövde yüksekliği ve dış kuvvetler ile bu kuvvetlerin karşılanabilmesi için gerekli eklem torklarının bacak mekanizması üzerinde şematik gösterimi.

Bacağın izlemesi gereken yörünge boyunca dış kuvvetlerin karşılanabilmesi için gerekli eyleyici kuvvetleri, Denklem (4.92)'de elde edilen gerekli eklem torkları ve Denklem (4.90) yardımı ile Denklem (4.93)'deki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} F_{hyd1}(\theta) \\ F_{hyd2}(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_x (-l_1 s_{\theta_1} - l_2 s_{\theta_{12}}) + f_y (l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}})}{a_1 \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 - (a_0 \sec \alpha_1)^2 + (s_0 + s_1)^2}{2a_1(s_0 + s_1)} \right) \right)} \\ \frac{f_x (-l_2 s_{\theta_{12}}) + f_y (l_2 c_{\theta_{12}})}{a_2 \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 - (a_2 \sec \alpha_2)^2 + (s_2 + s_3)^2}{2a_3(s_2 + s_3)} \right) \right)} \end{bmatrix} \tag{4.93}$$

Denklem (4.93) ifadesi uzuv boyutları, eyleyici bağlantı pozisyonları, eyleyicinin toplam boyu, eyleyici piston kursu ve eklem açıları dahil bacak mekanizması ile ilgili bütün bilgileri içermektedir. Bu ifade yörünge boyunca minimize edilerek hareket için

gerekli eyleyici kuvvetleri iyileştirilebilir, yani kısaca, kuvvet iletimi açısından optimal bir bacak mekanizması elde edilebilir. Bölümün devamında, sıfırdan optimal bir bacak mekanizması elde edebilmek için evrimsel algoritmanın kullanılarak tasarım parametrelerinin *evrimleştirilmesi* anlatılmıştır.

4.3. Optimal Bacak Mekanizmasının Evrimsel Algoritmaya Dayalı Tasarımı

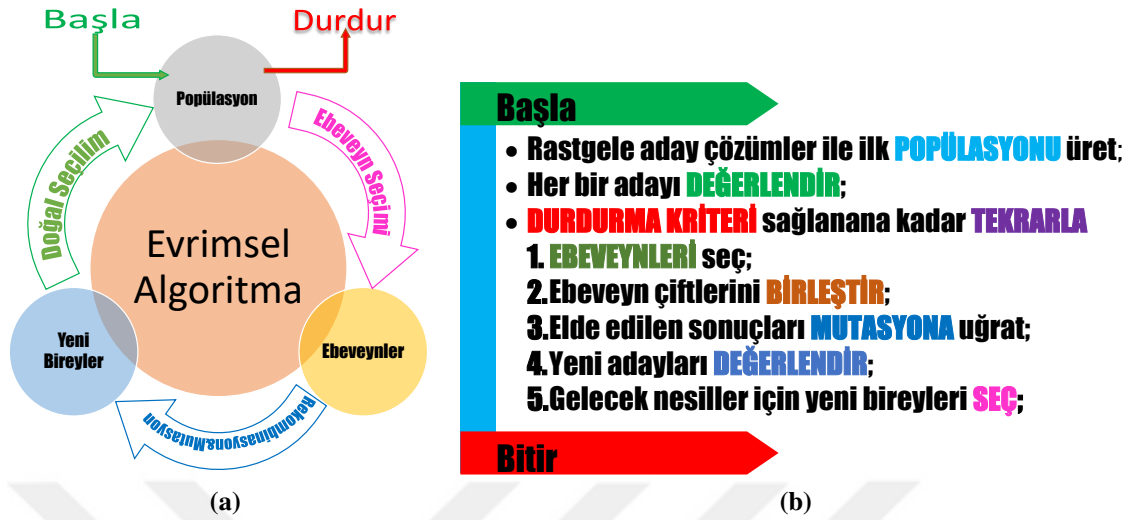
Bu bölümde, ilk olarak, bu çalışmanın ilham kaynağı olan ve doğanın evrim davranışını taklit etmek için kullanılan optimizasyon yönteminin kısa bir açıklaması sunulmuştur. Daha sonra robot bacak mekanizmasının optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Karşılaştırmalı bir çalışma olması açısından optimizasyon probleminin tanımlanmasında üç farklı yaklaşıma gidilmiştir. Bunlardan ilk optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu, eklem uzayında ve sadece yörünge takibi göz önüne alınarak tanımlanmıştır. Bir sonraki optimizasyonda amaç fonksiyonu yine sadece yörünge takibi göz önüne alınarak ancak çalışma uzayında tanımlanmıştır. Son optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu, yörünge takip performansına ek olarak eyleyici kuvvetleri dikkate alınarak çalışma uzayında tanımlanmıştır.

4.3.1. Evrimsel Algoritmalar

Mitchell (1998)'in de çalışmasında belirttiği gibi evrim, aslında, çok sayıda olasılıktan en uygun çözümü arama sürecidir ve evrim, karmaşık sorunlara yenilikçi çözümler tasarlamak için bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu açıdan bakıldığında, sıfırdan optimal bir bacak mekanizması elde etmek için yapılan bu çalışma evrim mekanizmalarından yola çıkarak yapılmıştır. Biyolojik evrimden ilham alan tekniklerle problem çözme işlemi Evrimsel Hesaplama¹ (EC) olarak adlandırılmaktadır. EC, bir bilgisayarda doğanın evrim davranışını taklit eder. Bu taklitin sonucu, bir dizi özelliğe dayanan optimizasyon algoritması sekansıdır. Bu algoritma, optimal bir çözüme yakınsayınca kadar sürekli olarak optimizasyon problemine yönelik çözümlerin kalitesini artırmaktadır. Bunun yanında, Evrimsel Algoritmalar (EA) popülasyon tabanlı meta-sezgisel algoritmaların evrim mekanizmalarını optimal bir çözüm bulma problemine uygulayan EC'nin bir alt-alanıdır. Şekil 4.10a'da akış şeması ve Şekil 4.10b'de sözde kodu gösterilen temel bir EA'nın dört bileşeni vardır; farklı bireylerden oluşan bir Popülasyon, çeşitliliğin kaynağı olan Genetik

¹Evolutionary Computation

Operatörler, üremenin uygunluğunu denetleyen Uygunluk ve son olarak da uygunluğun sürdürülmesini sağlayan Doğal Seçilim.



Şekil 4.10. Temel bir EA'nın akış şemasının, bileşenlerinin ve süreçlerinin şematik gösterimi (a) ve sözde kodu (b).

En bilinen EA olan Genetik Algoritma (GA), biyolojik evrimi yönlendiren doğal seleksiyonun evrimsel fikirlerine dayanan bir meta-sezgisel arama algoritmasıdır. GA, başlangıçta rasgele üretilen olası çözümlerden oluşan bir popülasyonu yinelemeli olarak geliştirir. Her yineleme sonrası elde edilen yeni popülasyona nesil denmektedir. Önceden belirlenen bir uygunluk kriterine göre değerlendirilen mevcut popülasyondaki bireylerden en iyileri ebeveyn çiftleri oluşturmak için rastgele seçilmektedir ve bu ebeveyn çiftleri birleştirilerek gelecek nesli oluşturacak yeni bireyler elde edilmektedir. Bir bireyin uygunluğu, global olarak optimal çözümü aramak için optimizasyon problemi içerisinde tanımlanmış bir amaç fonksiyonu ile belirlenmektedir. Her yinelemede, yeni nesiller önceki nesle göre daha iyi bir çözüme doğru evrimleşir. Bu tekrar eden evrimler sonucunda, bir nesil, önceden belirlenmiş asgari kriterleri sağlayan optimal bir çözüme yakınsadığında veya artık yeni nesillerden daha iyi nesiller elde edilemediğinde, optimizasyon bitmiştir veya sonlandırılmıştır ve optimizasyon bir dizi çözüme yaklaşmıştır denmektedir.

Bu çalışmada GA'nın kendisinden çok, uygulanmasına odaklanıldığından EC, EA ve GA hakkında daha detaylı bir açıklamaya yer verilmemiştir, ancak bu konular hakkında daha detaylı bir bilgiye Bäck ve ark. (1997) ve Mitchell (1998)'in çalışmalarından ulaşılabilir. Sonraki bölümde, GA'nın optimal bir bacak mekanizması tasarımı problemine uygulanmasına yer verilmiştir.

4.3.2. Optimizasyon Probleminin Tanımlanması

Bu çalışmanın en önemli katkılarından birinin, tamamen evrimi taklit eden bir yaklaşımın sonucu olan bir bacak mekanizması elde etmek olduğundan, mekanizmaya ait bütün parametreler sadece bir takım mekanik ve üretim kısıtların dikkate alındığı GA tabanlı bir optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Bunun başlıca sebebi, optimizasyon sonucu elde edilen sonuçları dar bir aralıkta sınırlamaktan kaçınmaktır. Buradan hareketle, tüm olasılıkların değerlendirelebildiği ve aynı zamanda karşılaştırmalı bir çalışma olması bakımından hem eklem uzayında hem de çalışma uzayında tanımlı üç farklı amaç fonksiyonu tanımlanmıştır ve her biri ayrı ayrı optimize edilmiştir. Böylelikle, optimizasyonun hangi uzayda yapılması gerektiği tartışılabilecektir. Literatürde daha önce bu şekilde bir karşılaştırmalı çalışma yapılmadığından, bu yaklaşım ile sıfırdan optimal bir bacak mekanizması tasarımına ait bir strateji belirlenebilmesi noktasında önemli bir katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

Bu amaçla, sadece önceden tanımlanan bir yörüngeyi izleyebilmesi dikkate alınan ilk optimizasyon problemine ait amaç fonksiyonu, bacak mekanizmasına ait bütün tasarım değişkenlerini içeren Denklem (4.91)'de elde edilen eklem uzayında tanımlı yörünge izleme hatası olarak belirlenmiştir. Bu optimizasyon probleminin çözülmesi ile bacak mekanizmasına ait bütün tasarım değişkenleri, önceden herhangi bir kısıtlama getirilmeden, yani sıfırdan, tamamen evrimsel bir yaklaşım ile belirlenebilecektir. Bu bağlamda, ilk optimizasyon problemine ait amaç fonksiyonu Denklem (4.94)'deki gibi tanımlanmıştır.

Tablo 4.2. Bacak mekanizmasına ait değişkenler için tanımlanmış alt ve üst sınır değerleri

Değişken	Alt Sınır	Üst Sınır
l_1	300 (mm)	500 (mm)
l_2	300 (mm)	500 (mm)
a_0	300 (mm)	500 (mm)
α_1	-3 (deg)	3 (deg)
α_2	0 (deg)	3 (deg)
$s_0 + s_1$	200 (mm)	1200 (mm)
$s_2 + s_3$	200 (mm)	1200 (mm)
a_1	20 (mm)	150 (mm)
a_2	300 (mm)	500 (mm)
a_3	20 (mm)	150 (mm)

Ancak, bu yaklaşımın bir sonucu olarak, optimizasyon probleminin arama uzayının olanaksız çözümleri de içermesinden dolayı sonsuz olduğu yani herhangi bir sınırının olmadığı görülebilir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için, öncelikle, üretim kısıtları göz

önüne alınarak mekanizmaya ait herbir tasarım değişkeni için ayrı bir sınır tanımlanmıştır. Tasarım değişkenleri ve bunlar için tanımlanmış sınırlar Tablo 4.2’de verilmiştir. Daha sonra, karmaşık sayılar kümesinde bulunan eklem pozisyonlarının çözümünü içeren bölgelerin ve mekanik kısıtlardan kaynaklanan uygun olmayan bölgelerin arama uzayına dahil edilmesinden kaçınmak için Denklem (4.95) – (4.102)’de gösterildiği gibi bir dizi eşitsizlik kısıtları tanımlanmıştır. Bu şekilde bütün arama uzayı uygulanabilir bir bölgeye indirgenecek ve tasarım değişkenleri mekanik kısıtlamalara uygun şekilde *evrilecektir*.

$$f_J = \min_{\forall \theta \in \mathbb{R}} \sum_{Y \text{ örünge}} (|\varepsilon_{1j}| + |\varepsilon_{2j}|) \quad (4.94)$$

$$g_1 := a_1 - l_1 \leq 0 \quad (4.95)$$

$$g_2 := a_2 - l_1 \leq 0 \quad (4.96)$$

$$g_3 := a_3 - l_2 \leq 0 \quad (4.97)$$

$$g_4 := (a_1 - (a_0 \sec \alpha_1))^2 - (s_0 + s_1)^2 \leq 0 \quad (4.98)$$

$$g_5 := (s_1 + s_0)^2 - (a_1 + (a_0 \sec \alpha_1))^2 \leq 0 \quad (4.99)$$

$$g_6 := (a_3 - (a_2 \sec \alpha_2))^2 - (s_2 + s_3)^2 \leq 0 \quad (4.100)$$

$$g_7 := (s_2 + s_3)^2 - (a_3 + (a_2 \sec \alpha_2))^2 \leq 0 \quad (4.101)$$

$$g_8 := x_d^2 + y_d^2 - (l_1 + l_2)^2 \leq 0 \quad (4.102)$$

Literatürde, bir takım eşitsizlik kısıtlarına tabi optimizasyon problemlerinin GA ile çözümünde kullanılan birkaç yöntem vardır (Deb, 2000). Bu çalışmada, optimizasyon sürecinde Denklem (4.95) – (4.102) ile verilen kısıtlara uygun tasarım değişkenleri seçilebilmesi için bir ceza fonksiyonu kullanılmıştır. Bu yöntem ile temel optimizasyon problemleri kısıt olmayan bir minimizasyon problemlerine dönüştürülebilmektedir. Ceza fonksiyonları ile eşitsizlik kısıtı sorununun ele alınması noktasında iç ve dış yöntemler olmak üzere iki yaklaşım vardır (Rao, 2009). İç ceza fonksiyonlarının uygulanabilir bir çözüm kümesi ile başlaması gerektiğinden, bu çalışmada Denklem (4.103)’de genel bir formu verilen dış ceza fonksiyonu kullanılmıştır. Burada w_k ve α üssü, sırasıyla, pozitif bir ceza parametresi ve negatif olmayan bir sabittir.

$$\xi = w_k \sum_{j=1}^m \max[0, g_j]^\alpha \quad (4.103)$$

İlk optimizasyon probleminde benimsenen perspektif ile, amaç fonksiyonu çalışma uzayında tanımlanmış ikinci optimizasyon problemi için de sadece bacak mekanizmasının yörüngeyi takip edebilmesi asgari kriter olarak belirlenmiştir. Ancak burada, çalışma uzayında tanımlanan yörünge izleme hatasını hesaplayabilmek için gerçekleşen eklem açıları, $[\theta_{1r}, \theta_{2r}]^T$ ile Denklem (4.72c)'de elde edilen ileri kinematik çözümler kullanılmıştır. Sonuç olarak ikinci optimizasyon problemi Denklem (4.104)'deki gibi tanımlanmıştır. Burada, ε_{1T} ve ε_{2T} Denklem (4.105)'de gösterildiği gibi çalışma uzayında tanımlı yörünge takip hatalarıdır. x_r ve y_r ise, sırasıyla, gerçekleşen eklem açıları ile elde edilen ileri kinematik çözümüne dayalı bacak mekanizmasının ana koordinat sistemindeki X ve Y konumlarıdır.

$$f_T = \min_{\forall \theta \in \mathbb{R}} \sum_{Y \text{ yörünge}} (|\varepsilon_{1T}| + |\varepsilon_{2T}|) \quad (4.104)$$

$$\varepsilon_{1T} = x_d - x_r \quad (4.105)$$

$$\varepsilon_{2T} = y_d - y_r$$

Son olarak, bu optimizasyon probleminde de ilk optimizasyon probleminde olduğu gibi arama uzayını uygulanabilir bir bölgeye daraltmak için yine Denklem (4.95) – (4.102) ile verilen eşitsizlikler tanımlanmış ve bu eşitsizliklerin arama sırasında sağlanabilmesi için yine aynı yöntemle başvurulmuştur.

Son optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu, çalışmanın asıl amacının önceden tanımlı bir yörünge boyunca optimal bir kuvvet iletimi sağlayabilecek bir bacak mekanizmasının tasarlanması olduğundan, Denklem (4.93)'de elde edilen yörünge boyunca hareket için gerekli olan hidrolik eyleyici kuvvetleri olarak tanımlanmıştır. Bu noktada, kuvvet iletiminin yörünge boyunca optimal olması gerektiğinden, arama uzayını uygulanabilir bir bölgeye daraltmak için yine Denklem (4.95) – (4.102) ile verilen eşitsizliklere ek olarak, yörünge takip hatası son optimizasyon problemine kısıt fonksiyonu olarak eklenmiştir. Bu perspektif sonucunda, bacak mekanizması hem önceden tanımlanmış bir yörüngeyi takip edebilecek şekilde hem de bu yörünge boyunca kuvvet iletimi bağlamında optimum olacak şekilde boyutlandırılacaktır. Tüm bu açıklamalar ışığında, çözülmesi gereken üçüncü optimizasyon problemi ve yörünge takibini sağlayacak kısıt fonksiyonları Denklem

(4.106)'daki gibi belirlenmiştir.

$$f_F = \min_{\forall \theta \in \mathbb{R}} \sum_{Yörünge} (|F_{hyd1}| + |F_{hyd2}|) \quad (4.106)$$

$$G_1 := \varepsilon_{1T} = 0$$

$$G_2 := \varepsilon_{2T} = 0$$

Bu optimizasyon probleminin çözümünde, kısıt fonksiyonunun yüksek derecede doğrusal olmayan ve karmaşık olmasından dolayı, ilk iki optimizasyon probleminde kullanılan ceza fonksiyonundan farklı bir yaklaşım benimsemek gerekmektedir. Literatürde, genelde, doğrusal olmayan eşitlik kısıtına tabi optimizasyon problemlerinin çözümünde Lagrange çarpanı ve ceza fonksiyonu yaklaşımının bir birleşimi olan Artırılmış Lagrangian¹ (AL) yöntemi kullanılmaktadır (Conn ve ark., 1991; Rao, 2009). Denklem (4.107)'de dış ceza fonksiyonu yaklaşımı ile AL fonksiyonunun en genel hali verilmiştir. Burada, ϖ_k negatif olmayan bir ceza parametresidir ve δ ise optimizasyon boyunca her iterasyon sonunda elde edilen çözüme göre güncellenen Lagrange çarpanının bir tahminidir. Burada bahsedilen optimizasyon problemlerinde kısıtların ele alınması ile ilgili yöntemler ve bu yöntemlerin nasıl çalıştığına dair daha geniş bilgiye, Conn ve ark. (1991) ve Rao (2009)'nun çalışmalarından ulaşılabilir.

$$\xi_F = \sum_{j=1}^m \delta_j G_j + \varpi_k \sum_{j=1}^m G_j^2 \quad (4.107)$$

4.3.3. Bacak Mekanizmasının Genetik Algoritma Tabanlı Optimizasyonu

Önceki bölümde yapılan tanımlamalar ve açıklamalar neticesinde kısıt fonksiyonlarının da dahil edildiği amaç fonksiyonlarının tam denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\min_{\forall \theta \in \mathbb{R}} \Phi_J = \sum_{Yörünge} (|\varepsilon_{1j}| + |\varepsilon_{2j}|) + w_k \sum_{j=1}^m \max[0, g_j]^\alpha \quad (4.108)$$

$$\min_{\forall \theta \in \mathbb{R}} \Phi_T = \sum_{Yörünge} (|\varepsilon_{1T}| + |\varepsilon_{2T}|) + w_k \sum_{j=1}^m \max[0, g_j]^\alpha \quad (4.109)$$

$$\min_{\forall \theta \in \mathbb{R}} \Phi_F = \sum_{Yörünge} (|F_{hyd1}| + |F_{hyd2}|) + \sum_{j=1}^m \delta_j G_j + \varpi_k \sum_{j=1}^m G_j^2 \quad (4.110)$$

Bacak mekanizmasının izlemesi gereken yörünge sürekli tanımlandığından dolayı,

¹Augmented Lagrangian

Tablo 4.3. Optimizasyon problemi kodlanırken kullanılan parametreler

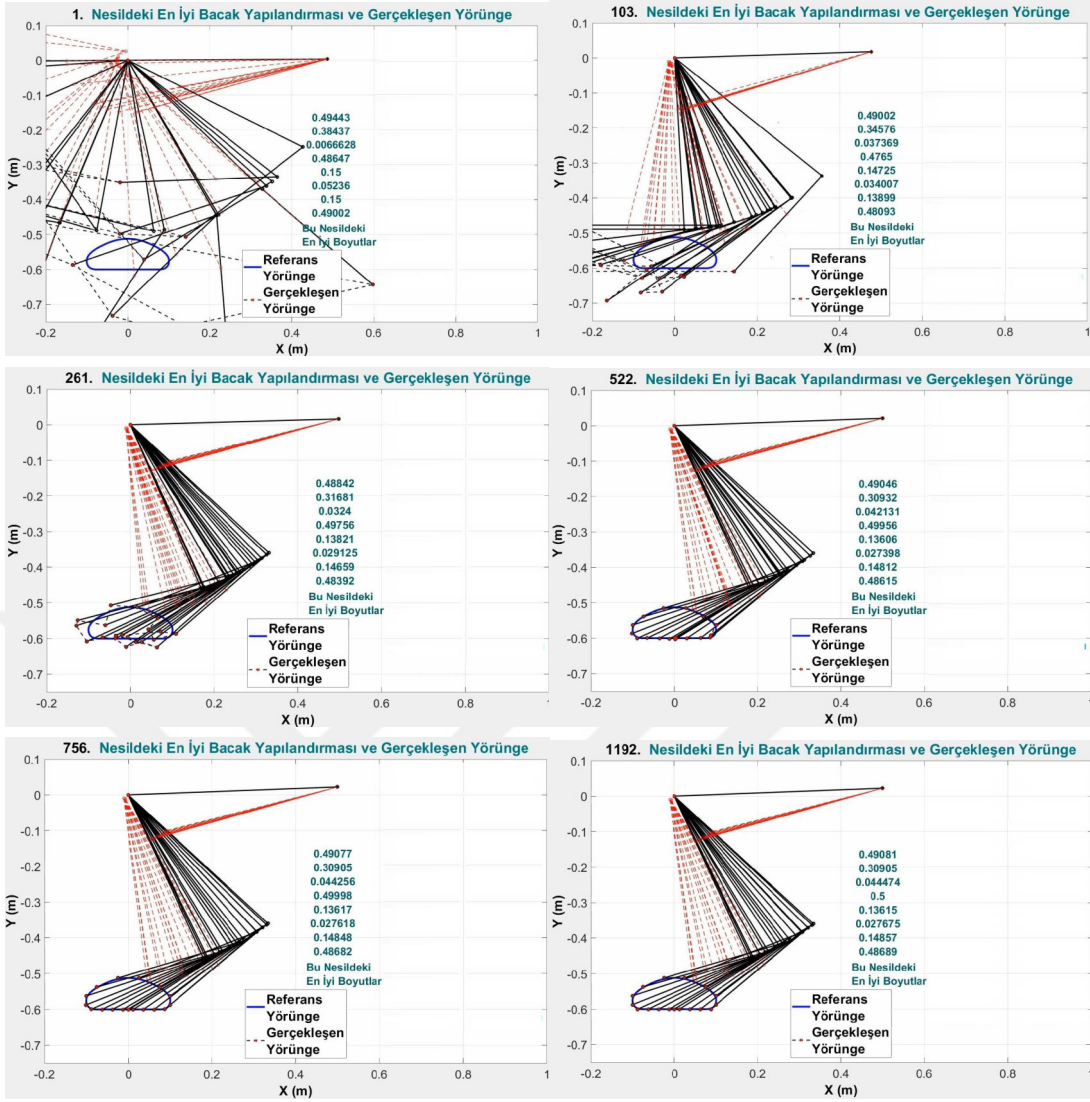
	Parametre	Açıklama	Değer
Popülasyon	Population Type	Amaç Fonksiyonunda kullanılacak değişken tipi	Double Vector
	Population Size	Her bir nesildeki birey sayısının büyüklüğü	1000
	Creation Function	Başlangıç popülasyonunu belirleyen fonksiyon	Nonlinear Feasible Population*
Doğal Seçim	Selection Function	Gelecek nesil için ebeveynlerin seçilmesini belirleyen fonksiyon	Tournament*
Mutasyon & Rekombinasyon	Elite Count	Gelecek nesile aktarılacak bireylerin sayısı	50
	Crossover Fraction	Çaprazlama fonksiyonu ile belirlenen gelecek neslin oranı	0,6
	Crossover Function	Çaprazlama fonksiyonu	Arithmetic*
	Mutation Function	Mutasyon fonksiyonu	Adaptive Feasible*

*Bu fonksiyonlar hakkında daha geniş bilgiye MATLAB Optimization Toolbox™ (2019) kullanım kılavuzundan erişilebilir.

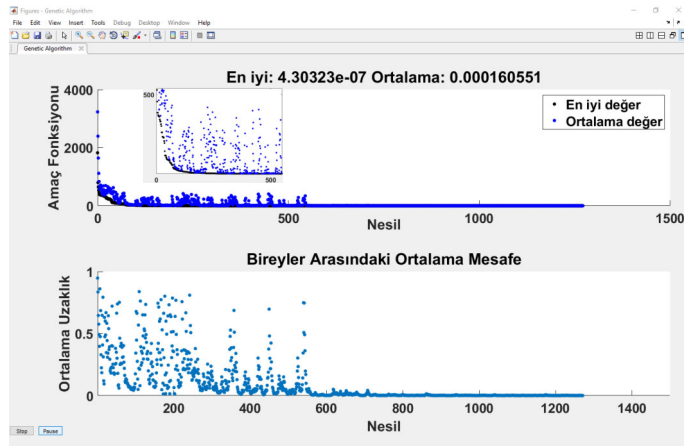
yörünge izleme hatası bu formda sayısal hesaplama ve kodlama için uygun değildir. Bu problemi aşmak için, sürekli tanımlı yörünge boyunca belirli aralıklarla noktalar seçilerek yörüngeyi ayrık hale getirilmesi gerekmektedir. Yörünge boyunca seçilen noktaların sayısı yörüngeyi çözünürlüğünü ve optimizasyonu yapılacak değişkenlerin sayısını belirlemektedir. Bu bağlamda, yörünge boyunca 15 adet nokta seçilerek yörünge ayrık hale getirilmiştir. Optimizasyon işlemi Matlab programlama diline uyarlanmış ve Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonları Matlab programlama dilinde kodlanırken, programda bütünleşik olarak bulunan Optimization Toolbox eklentisinden faydalanılmıştır. Yörüngeyi üretilmesi ve ayrıklaştırılması, optimizasyon parametreleri ve amaç fonksiyonları Matlab programlama dili kullanılarak kodlanmıştır. Optimizasyon probleminin Matlab programlama dilinde kodlanması için kullanılan Optimization Toolbox eklentisine ait parametreler Tablo 4.3'de verilmiştir.

4.3.4. Bacak Mekanizmasının Yörünge Takibi Bağlamında Optimizasyonu

Eklem Uzayında gerçekleştiren optimizasyon sırasında bacak mekanizmasının *evrimi* Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Bacak mekanizması optimizasyon süreci boyunca *evrimleşirken*, yörünge izleme hatası optimizasyon süreci boyunca sifıra yakınsamaktadır. Optimizasyon, ilk popülasyon için uygun bireyleri rastgele bulmakla başlamakta ve bacak mekanizmasına ait değişkenlerden oluşan popülasyon referans yörünge izleme hatası sifıra yaklaşıncaya kadar her yeni nesilde *evrimlemektedir*.

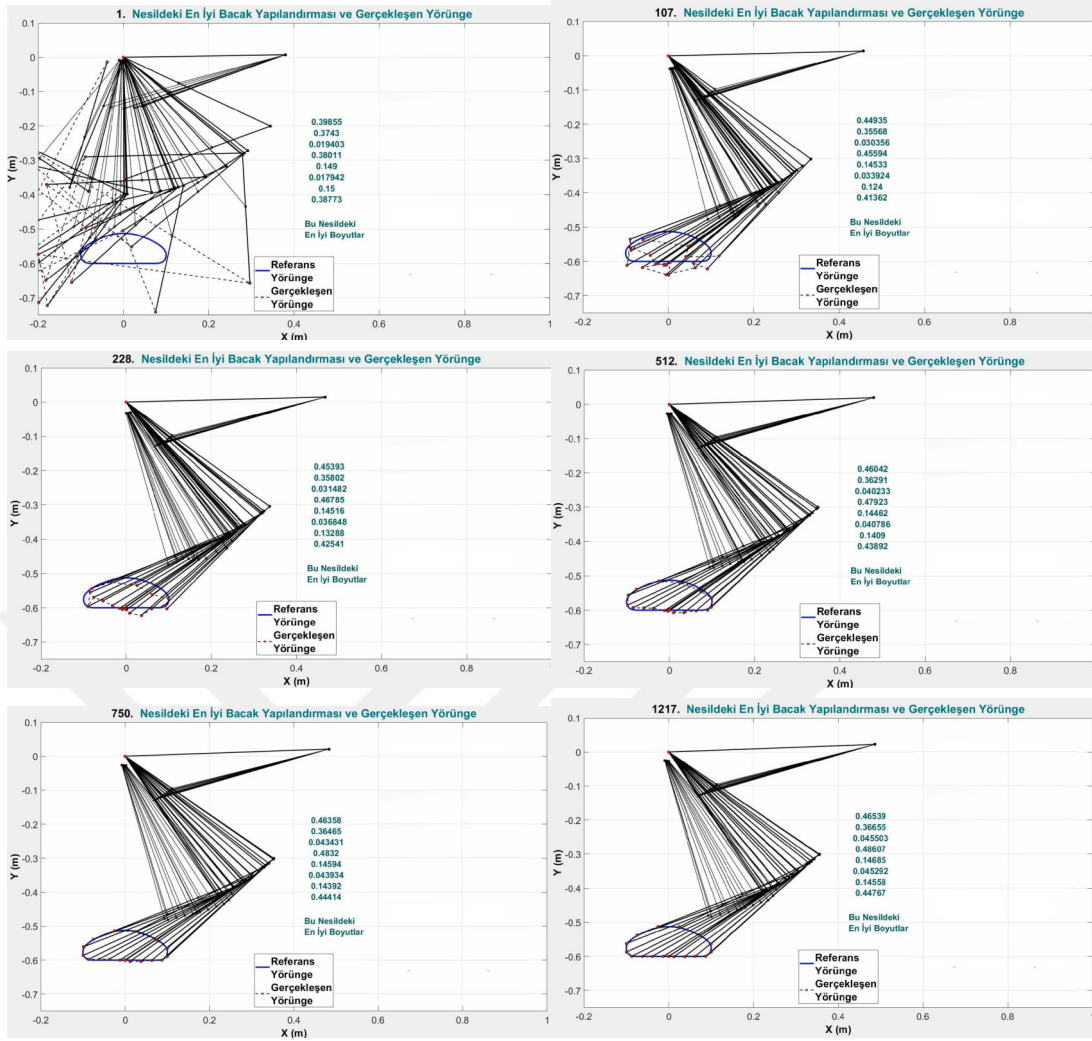


(a) Eklem Uzayında gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde bacak mekanizmasının gelişimi ve yörünge hatası.

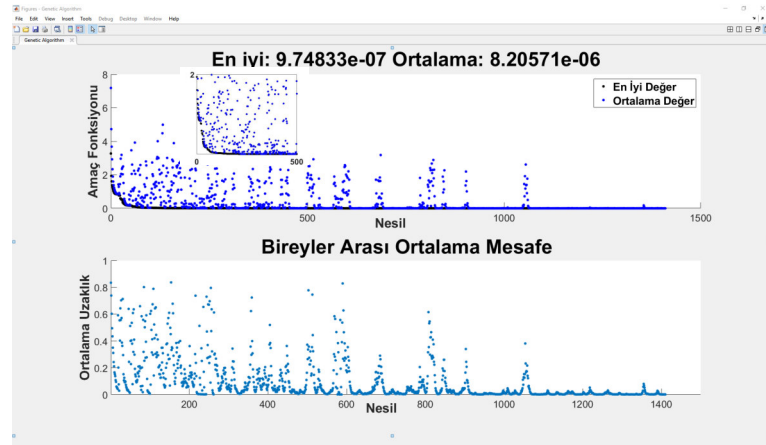


(b) Eklem Uzayında gerçekleştirilen optimizasyon sürecinin sonuca yakınsama performansı ve her bir nesilde bulunan bireyler arasındaki uzaklığın ortalaması.

Şekil 4.11. Eklem Uzayında gerçekleştirilen optimizasyon sırasında elde edilmiş ekran görüntüleri.



(a) Çalışma Uzayında gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde bacak mekanizmasının gelişimi ve yörünge hatası.



(b) Çalışma Uzayında gerçekleştirilen optimizasyon sürecinin sonuca yakınsama performansı ve her bir nesilde bulunan bireyler arasındaki uzaklığın ortalaması.

Şekil 4.12. Çalışma Uzayında gerçekleştirilen optimizasyon sırasında elde edilmiş ekran görüntüleri.

Optimizasyon süreci boyunca, her neslin en iyi amaç fonksiyonu değeri ve sonuca yakınsama performansı, Şekil 4.11b'de gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 4.11b'de her neslin çeşitliliğini gösteren, her yeni nesil ile birlikte değişen popülasyondaki bireyler arasındaki uzaklığın ortalaması da verilmiştir. Arama uzayında dar bir alana sıkışmadan daha geniş bir alanda arama yapılabilmesi ve bu sayede yerel sonuçlardan ziyade evrensel sonuçların elde edilmesinde popülasyondaki çeşitlilik önemlidir. Burada sunulan sonuçlar bir çok kez kendini tekrar eden optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilmiştir.

Aynı şekilde, Çalışma Uzayında gerçekleştiren optimizasyon sırasında bacak mekanizmasının *evrimi* ve sonuca yakınsama performansı ile her bir nesildeki bireyler arasındaki mesafenin ortalaması Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Şekil 4.12b'de açıkça görüldüğü gibi,

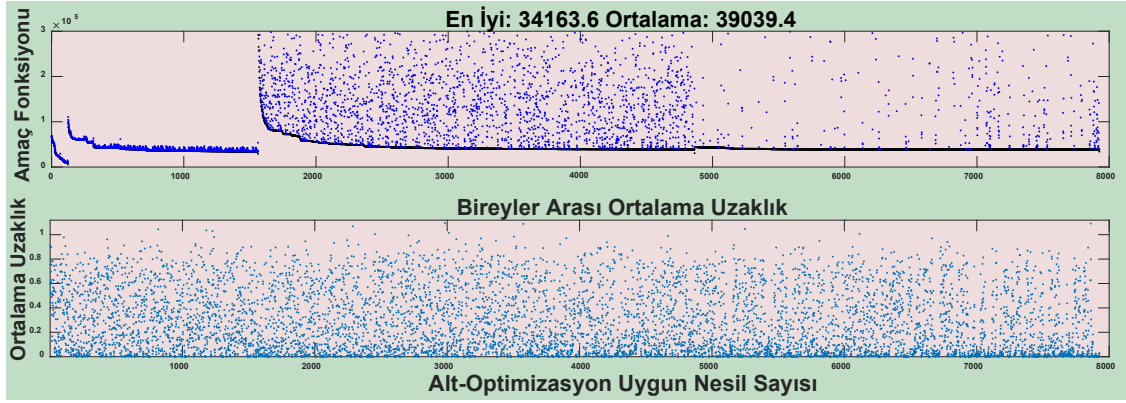
Tablo 4.4. Her iki optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen bacak mekanizmasına ait tasarım değişkenleri. Okunabilirlik açısından 15 nokta için hesap edilen piston kursları ile eyleyici kapalı boylarının toplamı değerlerinden sadece en büyük olan değer verilmiştir.

Değişken Adı [Birimi]	Ekleme Uzayı	Çalışma Uzayı
l_1 [m]	0,3845	0,3882
l_2 [m]	0,3744	0,3684
α_1 [rad]	0,0312	0,0211
α_2 [rad]	0,0354	0,0510
a_0 [m]	0,4256	0,3764
a_1 [m]	0,0322	0,0442
a_2 [m]	0,3652	0,3551
a_3 [m]	0,0813	0,0482
$s_0 + s_1$ [m]	0,3625	0,3590
$s_2 + s_3$ [m]	0,3924	0,3699

Çalışma Uzayında gerçekleştirilen bacak mekanizmasının optimizasyonu, optimum çözüme yakınsama hızı bağlamında daha iyi performans sağlamaktadır. Her iki optimizasyonun performans değerlendirmesi yapıldığında, bacak mekanizmasının kuvvet iletimi bağlamında optimizasyonunun Çalışma Uzayında yapılmasının, Ekleme Uzayında gerçekleştirecek optimizasyona göre optimal çözümlere daha hızlı yakınsama sağlayabileceği belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen bacak mekanizmasına ait tasarım değişkenleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Yörünge takibi bağlamında gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucu elde edilen bacak mekanizması değişkenleri, üçüncü ve son optimizasyon olan kuvvet iletimi optimizasyonunda başlangıç popülasyonu olarak tanımlanmıştır.

4.3.5. Bacak Mekanizmasının Kuvvet İletimi Bağlamında Optimizasyonu

Yörünge takibi bağlamında hem çalışma uzayı hem de eklem uzayında gerçekleştirilen önceki iki optimizasyon çalışmasından farklı olarak kuvvet iletiminin iyileştirilmesine



Şekil 4.13. Çalışma Uzayında gerçekleştirilen kuvvet iletimi optimizasyonu boyunca her bir nesilde gerçekleştirilen alt-optimizasyon işleminin çözüme yakınsama performansı ve her bir nesilde bulunan bireyler arasındaki uzaklığın ortalaması.

yönelik gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında kısıtların sağlanması için kullanılan AL yönteminden dolayı, optimizasyon süreci ilk önce kısıtı sağlayan parametrelerin bulunması için bir alt-optimizasyon probleminin (Denklem (4.107)) oluşturulması ile başlamaktadır. GA her nesil için, özgün optimizasyon probleminin yaklaşık bir değeri olan bu alt-optimizasyon problemini en aza indirmektedir. Bu sebeple, her alt-optimizasyon probleminin çözümü bir nesil olarak değerlendirilmektedir ve nesil sayısı az olsa da optimizasyon sürecinde her neslin iyileştirilmesi için gerçekleştirilen amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı çok fazla olmaktadır. Optimizasyon çalışmaları sırasında elde edilen, optimizasyon boyunca her bir nesilde gerçekleştirilen alt-optimizasyon işleminin çözüme yakınsama performansı grafiği Şekil 4.13’de verilmiştir. Toplamda 12893000 kez amaç fonksiyonu değerlendirmesi gerçekleştirilen bu optimizasyon çalışmasında yakınsama eğrisindeki her bir kırılma toplamda sadece 5 adet olan nesiller arası geçişi temsil etmektedir. Ayrıca yine Şekil 4.13’de gösterilen bireyler arası uzaklık grafiğinden görüleceği üzere alt-optimizasyon sürecinde kısıtların sağlanabilmesi için arama uzayı boyunca homojen ve çok sık dağılmış bireyler kullanılmaktadır. Bunun neticesinde, alt-optimizasyon sürecine ait kısıt şartlarını sağlayamayan ve uygun olmayan değerlere sahip bir alt-nesil olabilmektedir, bu nesiller grafikte gösterebilmek için uygun olmayan değerlere sahip olduğundan yakınsama performansı grafiğinde gösterilememektedir.

Yüksek derecede doğrusal olmayan kısıtlara sahip kuvvet iletiminin optimizasyonu probleminin çözümü için başvurulan bu yöntem ile yapılan ve bir çok kez kendini tekrar eden optimizasyon çalışmaları neticesinde elde edilen boyutlar Tablo 4.5’de verilmiştir. Bacak modelinin tasarım çalışmalarında, elde edilen bu boyutlar kullanılmıştır ve dört ayaklı bir robotun en genel hareketi olan yürüyüş esnasında enerji verimliliğinin iyileştirilmesi

bağlamında kuvvet iletiminin optimal olduğu bir bacak mekanizması elde edilmeye çalışılmıştır. Bölümün devamında optimal bacak mekanizması elde edebilmek için izlenen metodoloji ve enerji verimliliğinde yapılan iyileştirmeler özetlenmiştir.

4.4. Bölüm Özeti

Bu bölümde, önceden tanımlanmış bir yörüngenin izlenmesi için enerji verimliliği bağlamında optimal kuvvet iletimine sahip iki serbestlik dereceli bir robot bacak mekanizması tasarımının tamamen evrimsel algoritmalar ile elde edilmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalara yer verilmiştir. Öncelikle, literatürde bacak mekanizması için önerilen tasarım konseptlerinin tartışıldığı ve bu çalışma kapsamında geliştirilecek bacak mekanizmasının tasarım çerçevesinin belirlendiği Bölüm 3'den elde edilen sonuçlar temel alınarak önerilen optimizasyon yaklaşımının genel kapsamı belirlenmiştir. Bu bağlamda, kinematik yapılandırması belirlenen bacak mekanizmasının ileri ve ters kinematik analizleri yapılarak ve robot için öngörülen en genel hareket yörüngesi temel alınarak mekanizma sentezi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile kuvvet iletimi bağlamında bacak mekanizmasının optimizasyon süreci tanımlanmıştır. Burada, karşılaştırma yapabilmek ve tasarım sürecini sistematik olarak açıklayabilmek için üç farklı optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Yörünge takibi bağlamında hem çalışma uzayı hem de eklem uzayında tanımlanan ilk iki optimizasyon probleminin sonuca yakınsama hızları karşılaştırıldığında önerilen yöntem ile yapılacak çalışmalarda, oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan kısıtlara sahip kuvvet iletimi optimizasyonunun gerçekleştirileceği uzay belirlenmiştir. Bu bölümü kısaca özetlemek ve belirli bir yörünge için optimum bacak mekanizmasını tasarlamaya

Tablo 4.5. Kuvvet iletimi optimizasyonu çalışması sonucunda elde edilen bacak mekanizmasına ait tasarım değişkenleri. Okunabilirlik açısından 15 nokta için hesap edilen piston kursları ile eyleyici kapalı boylarının toplamı değerlerinden sadece en büyük olan değer verilmiştir.

Değişken Adı [Birimi]	Değeri
l_1 [m]	0,396
l_2 [m]	0,386
α_1 [rad]	0.068
α_2 [rad]	0.115
a_0 [m]	0,368
a_1 [m]	0.052
a_2 [m]	0,355
a_3 [m]	0,088
$s_0 + s_1$ [m]	0,349
$s_2 + s_3$ [m]	0,375

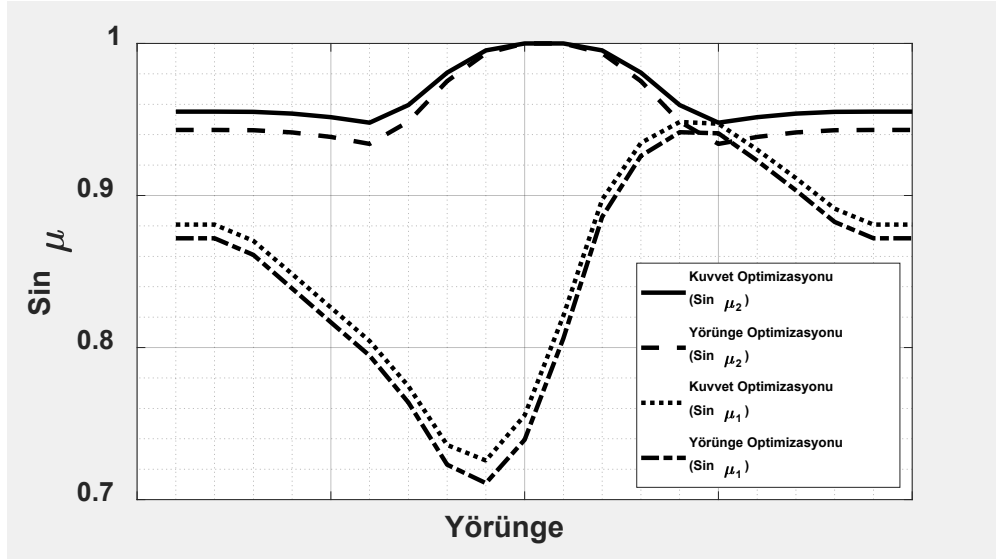


Şekil 4.14. Tez çalışması kapsamında optimal kuvvet iletimine sahip bir bacak mekanizması geliştirebilmek için izlenen metodolojinin akış şeması şeklinde gösterimi.

yönelik bir metodoloji oluşturmak amacıyla önerilen yöntem akış şeması olarak Şekil 4.14’de verilmiştir. Bunun yanında yapılan çalışmalar neticesinde, enerji verimliliğindeki iyileştirmeler tartışılmıştır. Bacak modeli enerji verimliliğinin hesabında kullanılan formül Denklem (4.111)’de verilmiştir.

$$\eta_E = 600 \frac{F_{cyl} \cdot v_{cp}}{P_{hyd} \cdot Q_{hyd}} \quad (4.111)$$

Burada, F_{cyl} hidrolik eyleyicinin bacak üzerindeki bağlantı noktasına etkidiği kuvvet, v_{cp} bağlantı noktasının hızı, P_{hyd} hidrolik güç ünitesinin basıncı ve Q_{hyd} hidrolik güç ünitesinin debisidir. Denklem incelendiğinde, sabit hidrolik güç ünitesi çalışma koşullarında verimi artırabilmenin tek yolu hidrolik silindirler ile birim zamanda yapılan işin artırılması olduğu açıktır. Bu noktada, aynı silindir kuvveti ile daha fazla bir hızlanma elde edildiğinde bunun mümkün olduğu söylenebilir. Burada bir dönme hareketi elde edildiğinden, r dönme eksenine olan uzaklık olarak, μ_c silindir kuvveti ve moment kolu arasındaki açı ve toplam kütle m ağırlık merkezinde tanımlanırsa, etkiyen silindir kuvveti ile açısal hız arasındaki bağıntı $F_{cyl} \sin(\mu_c) = mr \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ olmaktadır. Buradan, açısal hız ve çizgisel hız arasındaki bağıntı $v_{cp} = r\omega$ kullanılarak tekrar düzenlenirse etkiyen kuvvet ve çizgisel hız arasındaki



Şekil 4.15. Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmalar sonucu elde edilen mekanizma ölçüleri ile yörünge boyunca $\sin(\mu_c)$ değerinin değişimi.

bağıntı $F_{cyl} \sin(\mu_c) = m \frac{\Delta v_{cp}}{\Delta t}$ olarak bulunur. F_{cyl} ve m sabit kabulü ile elde edilen bağıntı ve Denklem (4.111) birlikte değerlendirildiğinde birim zamanda yapılan işi artırabilmenin tek yolu $\sin(\mu_c)$ değerinin artırılması olduğu açıktır. Bu bağlamda, bu bölümde yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, çalışma uzayında gerçekleştirilen yörünge takip optimizasyonu sonucunda elde edilen mekanizma ölçüleri ve aynı şekilde, çalışma uzayında gerçekleştirilen kuvvet iletim optimizasyonu sonucu elde edilen mekanizma ölçüleri karşılaştırıldığında, yörünge boyunca $\sin(\mu_c)$ değerinin değişimi Şekil 4.15’de gösterildiği gibi olmaktadır. Buradan, yörünge boyunca $\sin(\mu_c)$ değerinin değişimi hesaplandığında, ortalama %1,2 gibi bir iyileştirme yapıldığı görülmüştür.

5. SİSTEMİN FİZİKSEL ve DİNAMİK MODELLENMESİ

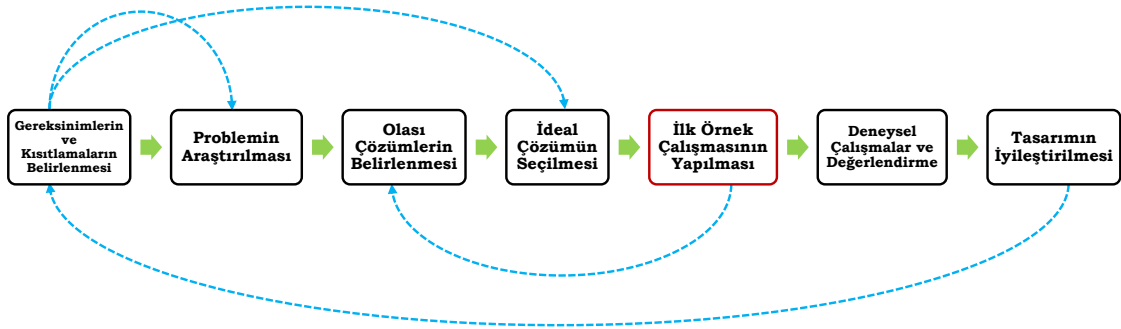
Bölüm 3’de belirtildiği gibi, bu çalışma kapsamında geliştirilen dört ayaklı robotta özdeş bacak tasarımları kullanılması planlanmıştır. Ayrıca, yürüyen robotların en önemli bileşeninin bacak yapılandırması olduğu gerçeği göz önüne alındığında, tasarım ve modelleme çalışmalarının odak noktasının bacak mekanizması olması gerektiği görülmüştür. Bu bağlamda, mekanik–elektronik yapıların deneysel testi için, kontrolcü algoritmalarının geliştirilebilmesi ve değerlendirilebilmesi için, fiziksel ve dinamik modelleme çalışmalarında gövdeye montajı esnasında bir serbestlik derecesi daha kazanacak olan düzlemsel iki serbestlik dereceli bir bacak versiyonu tasarlanmıştır. Bu bölümde, robot bacağına ait fiziksel modelin tasarım aşamalarına yer verilmiştir ve elde edilen bacak modelinin dinamikleri incelenmiştir. Fiziksel model oluşturulurken Bölüm 4’de elde edilen bacak mekanizmasına ait tasarım değişkenleri kullanılmış ve ayrıca, Bölüm 3’de belirlenen tasarım çerçevesi temel alınmıştır.

Fiziksel modelin oluşturulması sırasında, bilgisayar destekli tasarım yazılımı olan SolidWorks programı kullanılmıştır. Robot bacağın katı modeli oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar analizi araçlarına sahip ANSYS programı kullanılarak bacağına ait uzuvların yapısal sağlamlığı incelenmiştir. Bu sayede, olabildiğince hafif ancak mekanik olarak yeterli derecede yapısal sağlamlığa sahip bir bacak modeli tasarımı elde edilmiştir. Fiziksel model tamamen tamamlandıktan sonra tasarımın geçerliliğinin doğrulanması ve kontrol algoritmaları geliştirebilmek için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere robot bacağın dinamik modeli elde edilmiştir.

Bir robotun dinamik modeli ile eyleyici kuvvetlerine cevap olarak nasıl hareket ettiği açıklanmaktadır. Kinematik denklemler, hareketi üreten kuvvetleri ve momentleri dikkate almadan bir sistemin hareketini tanımlarken, dinamik denklemler kuvvet ve hareket arasındaki ilişkiyi açıkça tanımlamaktadır. Hareket denklemleri, tasarım çalışmalarında, ayrıca benzetim çalışmalarında ve kontrol algoritmalarının tasarımında önemli rol oynamaktadır. Bu bölümde bacak modelinin dinamiği açıklanırken, okunabilirlik ve sunuş açısından, eyleyicilerin kendi dinamiklerine sahip olmadığı ve dolayısı ile eklemlere istenen torkların uygulanabildiği varsayımı yapılmıştır. Bu sayede, eyleyici dinamiklerinin detaylarına girmeden sadece bacak modelinin doğal mekaniği incelenmiş, devamında eyleyici dinamikleri ve eyleyici sistemin matematiksel modeli münferit ele alınmıştır.

5.1. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağının Fiziksel Modeli

Yürüyen bir robotta, bacağın boyutları, ağırlığı ve ataleti gibi fiziksel özellikleri robotun genel performansını doğrudan etkileyen önemli belirleyicilerdir. Bu bağlamda, tasarımı gerçekleştirilen robot bacağın fiziksel modeli oluşturulurken Bölüm 3’de belirlenen performans kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Robot bacağın katı modellemesi yapılırken, önceden tanımlanmış bir yörünge takibi sırasında kuvvet iletimi bağlamında optimal bir bacak mekanizması için Bölüm 4.3’de yapılan optimizasyon çalışmaları neticesinde belirlenen bacak boyutlandırmalarına göre bir tasarım yapılmıştır. Ancak uzuvların boyutları, tasarımı gerçekleştirilen robotun genel performansını tek başına belirleyen bir etken olmadığı; aksine, robot bacağa ait hareketli parçaların ağırlık ve atalet gibi fiziksel özelliklerinin de performansı etkileyen etkenler olduğu gerçeğinden hareketle, katı modelleme sırasında bu etkenlerin performansı etkilememesi yada daha doğru bir ifade ile robotun genel performansına etkisinin minimum seviyede olması için çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde, robot bacağın katı modelinin oluşturulmasına yönelik çalışmalara, robot bacağa ait hareketli parçaların ağırlığının azaltılmasına yönelik çalışmalara ve elde edilen fiziksel model ile optimizasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlara uygun bir eyleyici tasarımı üzerine yapılan çalışmalara yer verilmiştir.



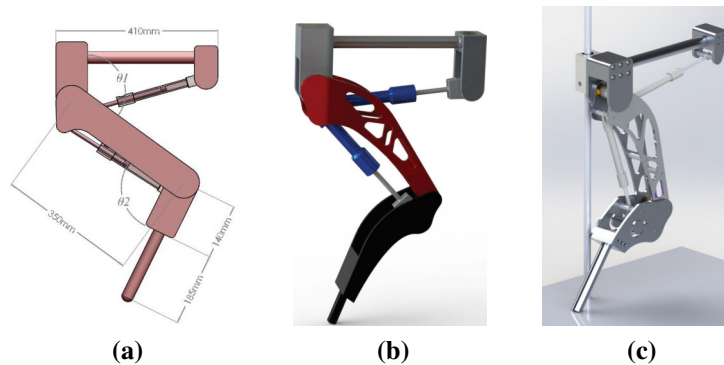
Şekil 5.1. Tasarım sürecinin aşamalarını ve birbirleri arasındaki etkileşimi tanımlayan şematik gösterim. Bu bölümde ele alınan tasarım sürecine ait aşama kırmızı ile vurgulanmıştır.

Şekil 5.1’de gösterildiği gibi tasarım çalışması kendini tekrarlayan ve doğrusal olmayan bir süreçtir. Diğer bir ifade ile bir tasarım süreci sonunda elde edilen sonuç, ilk yapılan varsayımların, anlayışın ve sonuçların gözden geçirilmesi, sorgulanması ve geliştirilmesi için sürekli olarak kullanılabilir. Öncelikle, tasarımı yapılacak sistemden beklenen performans ölçütleri ve kısıtlamalar belirlendikten sonra literatürdeki benzer çalışmalar değerlendirilerek yenilikçi bir yaklaşımla tasarım probleminin olası çözümleri belirlenmektedir. Bu aşamada, mühendislik açısından gerekli analizler yapılarak tasarım

problemi için olası en ideal çözüm tespit edilir. Ancak bu noktaya kadar sadece teorik çalışmalar temelli bir yaklaşım benimsendiği için yapılan analizlerin geçerliliğinin test edilmesi gerekmektedir. Bu ilk örnek çalışması sayesinde gerçekleştirilir ve elde edilen ilk örnek sayesinde sistemin istenen performans kriterlerini sağlayıp sağlayamadığı incelenerek yapılan tasarımın geçerliliği kontrol edilmelidir. Bu noktada, bilgisayar destekli tasarım yazılımları ile bilgisayar destekli mühendislik programları kullanılarak, fiziksel bir ilk örnek oluşturmak yerine sanal ortamda elde edilen bir model yardımıyla benzetim çalışmalarından faydalanılabilir. Son olarak gerekli görülürse tasarlanan sistem iyileştirilerek son tasarım aşaması tamamlanır. Ancak, yukarıda belirtildiği gibi tasarım süreci sürekli kendini tekrarlayan bir süreç olduğundan tasarımın sürekli olarak iyileştirilebilir olduğu göz ardı edilmemelidir. Bölümün devamında robot bacağına katı modelinin elde edilmesi için gerçekleştirilen tasarım çalışmalarına yer verilmiştir.

5.1.1. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağın Katı Model Tasarımı

Bu bölümde katı modeli verilen robot bacağına ait tasarım, bir çok kez kendini tekrar eden tasarım çalışmaları sonucu elde edilmiştir. Bu noktada ilk örnek çalışmaları sırasında mevcut kaynakların en iyi şekilde kullanılabilmesi için çoğunlukla benzetim çalışmalarına başvurulmuştur. Bu sayede, nihai bir karara varmadan önce birçok konsept ve senaryo hızlıca denenebilmiştir. Bilgisayar destekli tasarım yazılımı kullanılarak sisteme ait katı model oluşturulmuş ve malzeme seçimi, topoloji iyileştirilmesi, yapısal sağlamlığın incelenmesi gibi tasarım parametreleri bilgisayar destekli mühendislik programları kullanılarak belirlenmiştir.



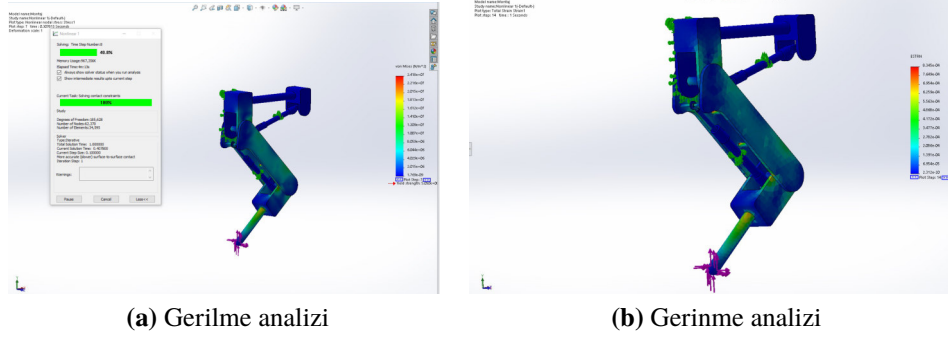
Şekil 5.2. Robot bacağına ait katı modelin tasarım süreci çalışmaları sonucu gelişimleri (a) tasarıma ait ilk katı model, (b) malzeme seçimi ve yapısal sağlamlık analizleri sonucunda oluşturulan ikinci versiyon katı model ve (c) hareketli parçaların ataletinin azaltılmasına yönelik devam eden topoloji iyileştirilmesi ve görsel iyileştirme çalışmaları sonucunda elde edilen ve imalatı gerçekleştirilen son katı model.

Şekil 5.2’de tasarım çalışmaları sonucu bacak modelinin gelişimi verilmiştir. Tasarım süreci boyunca robot performansı sürekli iyileştirilmeye çalışılmıştır. İlk önce Bölüm 4.3’de anlatıldığı gibi boyutların optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Boyutlar belirlendikten sonra bacağın toplam ağırlığını azaltabilmek ve aynı zamanda yapısal sağlamlığın korunabilmesi için malzeme seçimi üzerine bir araştırma yapılmıştır. Robot bacağın ana malzemesi olarak Tablo 5.1’de özellikleri verilen ve yüksek mukavemet–ağırlık oranı nedeniyle havacılık ve uzay endüstrisinde de yaygın olarak kullanılan bir alüminyum alaşımı olan Al 7075–T6 tercih edilmiştir (Cayless, 1990).

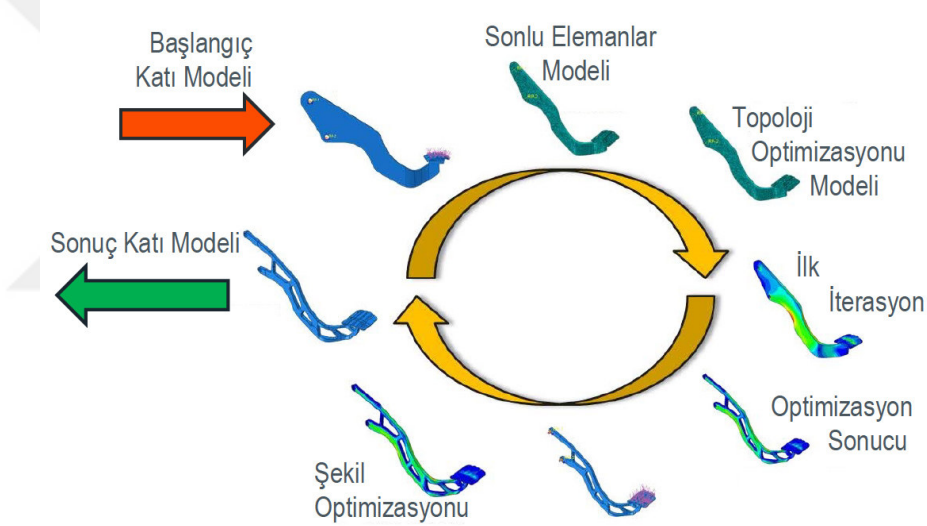
Tablo 5.1. Al 7075–T6 alüminyum alaşım malzemesinin fiziksel–mekanik özellikleri ve kimyasal kompozisyonu

	Özellik	Değer	Birim		Alaşım	Değer (%)
Mekanik	Elastikiyet Modülü	72	GPa	Kimyasal Kompozisyon	Silikon (Si)	0,00–0,40
	Poisson Oranı	0,33			Krom (Cr)	0,18–0,28
	Sertlik	150	Brinel		Manganez (Mg)	0,00–0,30
	Çekme Mukavemeti	570	MPa		Bakır (Cu)	1,20–2,00
	Akma Mukavemeti	505	MPa		Magnezyum (Mg)	2,10–2,90
Fiziksel	Termal Genleşme	2,36e-5	1/K		Titanyum (Ti)	0,00–0,20
	Termal İletkenlik	130	W/mK		Demir (Fe)	0,00–0,50
	Özgül Isı	960	J/kgK		Çinko (Zn)	5,10–6,10
	Kütle Yoğunluğu	2810	kg/m ³		Alüminyum (Al)	87,1–91,4

Tasarıma ait boyutların ve kullanılacak malzemenin belirlenmesinden sonra, bacağın katı modelinin oluşturulması aşamasına geçilmiştir. Şekil 5.2a’da gösterilen robot bacağı tasarımının ilk versiyonu, bilgisayar destekli tasarım yazılımı olan SolidWorks programı ile modellenmiştir. Tasarımı tamamlanan ilk versiyon ile belirlenen boyutların ve malzeme seçiminin uygunluğu gibi konuların geçerliliğini analiz edebilmek için, SolidWorks programında bütünleşik olarak bulunan SolidWorks Simulation ve SolidWorks Motion eklentileri kullanılmıştır. SolidWorks Simulation eklentisi, doğrusal olan ve doğrusal olmayan statik, frekans, termal, yorulma, düşme testi analizleri ile doğrusal olan ve doğrusal olmayan dinamik ve optimizasyon analizleri için sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanan oldukça güçlü bir yapısal analiz sistemidir. SolidWorks Motion eklentisi ise, kuvvet, yay, sönümleyici ve sürtünme gibi hareket elamanlarının tasarım üzerindeki etkilerinin analizini gerçekleştirebilen Msc.ADAMS yazılımı tabanlı oldukça güçlü bir kinematik çözücüdür. Bu her iki eklentinin bütünleşik yapısı sayesinde, hareket analizleri sonucunda elde edilen sonuçların tasarım üzerindeki parçaların gerilim ve gerinim gibi yapısal analizlerine etkisi incelenebilmektedir. Yaklaşık 8,5 kg olan ilk bacak versiyonu ile gerçekleştirilen hareket ve Şekil 5.3’de ekran görüntüleri de verilen yapısal analizleri sonucunda tasarımın performans

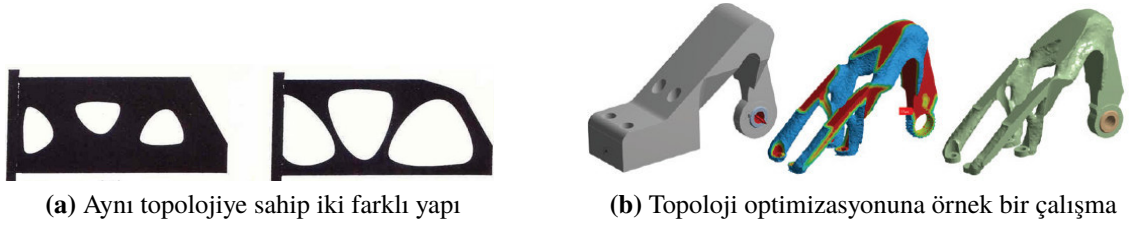


Şekil 5.3. Bacak tasarımının ilk versiyonu ile gerçekleştirilen yapısal analize ait ekran görüntüleri. kriterlerini karşıladığı, ancak ağırlık ve atalet gibi bazı fiziksel özelliklerinin iyileştirilebilir olduğu görülmüştür. Tasarıma ait hareketli parçaların ve dolayısıyla sistemin toplam ağırlığını azaltabilmek için malzeme seçimini değiştirmek yerine, parçaların topolojisini iyileştirerek yapısal anlamda sağlamlık-ağırlık oranının artırılması amaçlanmıştır.



Şekil 5.4. Bir fren pedalında kullanılan malzemenin azaltılmasına yönelik gerçekleştirilen yapısal iyileştirme çalışmasının sürecini gösteren şematik çizim.

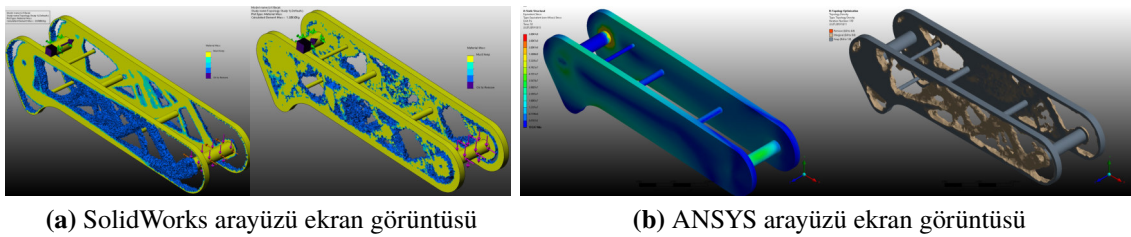
Literatürde genelde, Şekil 5.4’de gösterildiği gibi kullanılan malzemenin azaltılması gibi belirli bir hedef için yapısal iyileştirme çalışmaları üç ana başlık altında yapılmaktadır; boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu (Bendsøe ve Sigmund, 2004). Parametrik optimizasyon diye de bilinen boyut optimizasyonunda, geometrisi önceden tanımlanmış bir yapı üzerinde, tasarıma ait boyutların farklı kombinasyonları araştırılarak en iyi tasarım elde edilmeye çalışılır. Şekil optimizasyonunda ise, yine geometrisi önceden tanımlanmış bir yapı üzerinde, yeni geometriler eklemekten sadece mevcut geometrinin şeklini ve boyutlarını değiştirerek en iyi tasarım elde edilmeye çalışılır. Yani yapının topolojisi aynı kalmak şartıyla tasarımın geometrisi değiştirilebilir. Bu konunun



Şekil 5.5. Bir yapının sürekli değişen şeklinden veya boyutundan etkilenmeyen geometrik özelliklerinin ve uzaysal ilişkilerinin incelenmesine topoloji denmektedir.

daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 5.5a’da farklı geometrik şekillere ancak aynı topolojiye sahip iki farklı yapı gösterilmektedir.

Boyut ve şekil optimizasyon yöntemleri tasarım topolojisi sabit kabul edildiği için sınırlayıcı yöntemlerdir, ayrıca şekil optimizasyonu parametrik olmayan yöntemlerle de yapılabilir olsa da bu iki yöntem parametrik analiz yöntemleridir. Parametrik analiz yönteminde, maksimum gerilme gibi bir kısıt dahilinde belirlenmiş tasarımı hafifletme gibi bir hedefe ulaşabilmek için tasarıma ait değişkenlerin belirli bir aralıkta değiştirilmesi ile yapılan analizler sonucunda optimum tasarım elde edilmeye çalışılır. Ancak topoloji optimizasyonunda, tasarım herhangi bir geometri ile sınırlandırılmamıştır ve sadece tasarım üzerindeki yükler, bağlantılar ve tasarımın üretim metodu göz önüne alınarak, belirlenmiş sınır koşulları dahilinde belirlenen hedeflere ulaşabilmek için tasarım uzayında malzemeyi yeniden dağıtarak yeni bir malzeme düzeni aranmaktadır. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen yeni tasarımın belirlenmiş tüm mekanik ve üretim gereksinimlerini karşılaması beklenir. Topoloji optimizasyonuna örnek bir çalışma Şekil 5.5b’de verilmiştir.

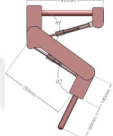




Şekil 5.6. SolidWorks ve ANSYS programlarında en iyi sağlamlık-ağırlık oranını elde etmeye yönelik gerçekleştirilen yapısal iyileştirme çalışmaları sırasında alınmış ekran görüntüleri.

ANSYS ve SolidWorks programları gibi bilgisayar destekli mühendislik programları yapısal optimizasyon için hem parametrik yöntemleri kullanan hem de parametrik olmayan yöntemleri kullanan oldukça güçlü eklentiler sunmaktadır. Tasarım çalışmaları sırasında, tek bir programdan elde edilen sonuçlarla sınırlı kalmayıp, karşılaştırmalı bir şekilde

tasarım sürecinin tamamlanabilmesi için yapısal iyileştirme çalışmalarında ANSYS¹ ve SolidWorks² programları birlikte kullanılmıştır. Şekil 5.6'da ekran görüntüleri de verilen ilk bacak versiyonu ile yapılan boyut ve topoloji optimizasyonu ve son olarak şekil optimizasyonunu kapsayan yapısal iyileştirme çalışmaları sonucu bacak modeline ait uzuvların geometrisi ve topolojisi değiştirilmiştir ve Şekil 5.2b'de gösterilen bacak modelinin ikinci versiyonu elde edilmiştir. İkinci versiyon bacak modeli tasarımının geçerliliğinin değerlendirilebilmesi için Şekil 5.7'de analiz sırasında elde edilmiş ekran görüntülerinde gösterildiği gibi hareket analizleri ile yapısal analizleri yine bilgisayar destekli mühendislik programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

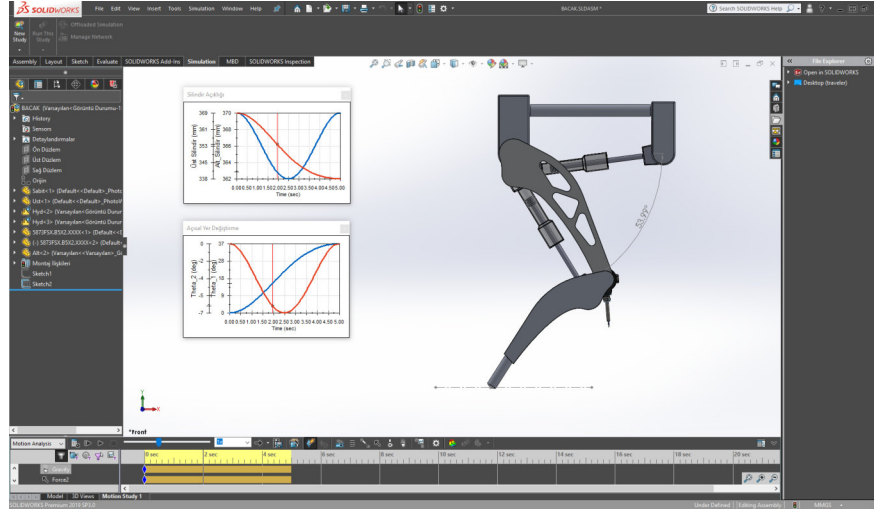
Tablo 5.2. Yapısal iyileştirme çalışmaları sonucu elde edilen bacak tasarım versiyonlarının sağlamlık-ağırlık bağlamında karşılaştırılması

Versiyon	Parametre	Değer	Birim
	Toplam Ağırlık	8,5	kg
	Maksimum von Mises Gerilmesi	143,7	MPa
	Maksimum von Mises Gerinmesi	0,001432	–
	Toplam Ağırlık	7,2	kg
	Maksimum von Mises Gerilmesi	193,5	MPa
	Maksimum von Mises Gerinmesi	0,001917	–
	Toplam Ağırlık	6,12	kg
	Maksimum von Mises Gerilmesi	298,4	MPa
	Maksimum von Mises Gerinmesi	0,003562	–

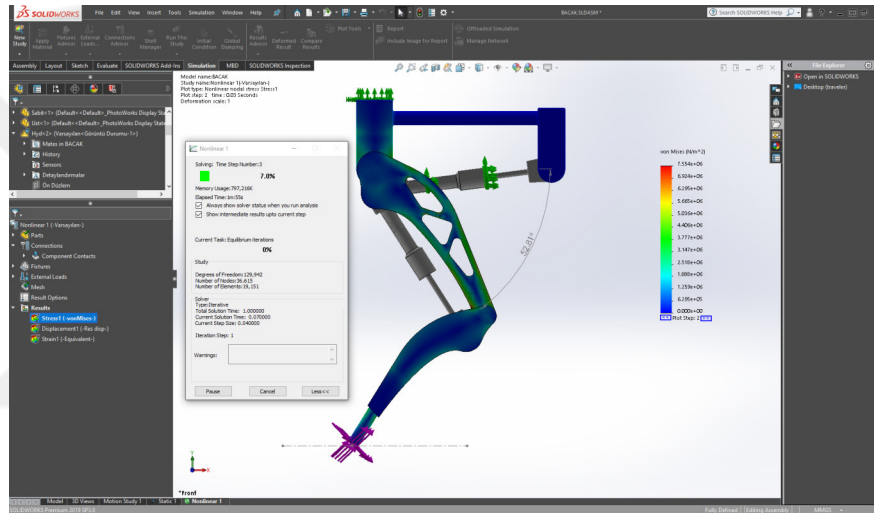
Bölüm 5.1'de belirtildiği gibi tasarım çalışması sürekli ve kendini tekrar eden doğrusal olmayan bir süreç olduğundan elde edilen ikinci versiyon bacak modeli üzerinde de tasarımı iyileştirmeye yönelik ve aynı zamanda görselliği iyileştirmeye yönelik çalışmalar tez çalışması boyunca bacak ilk örneğinin imalat aşamasına kadar devam etmiştir. Bu çalışmalar sonucunda Şekil 5.2c'de gösterilen bacak modelinin üçüncü ve imal edilen versiyonu elde edilmiştir. Tablo 5.2'de bacak versiyonlarının sağlamlık-ağırlık bağlamında karşılaştırılması verilmiştir. Bacak modelinin son versiyonunun geçerliliğinin değerlendirilmesine yönelik yapılan hareket analizi ile yapısal analizlere bir sonraki bölümde daha detaylı değinilmiştir.

¹ANSYS yazılımında temel alınan parametrik ve parametrik olmayan yapısal iyileştirme yöntemlerinin teorisi ile ilgili daha geniş bilgiye programa ait kullanıcı klavuzlarından ulaşılabilir (ANSYS® Workbench, Release 19.1, ANSYS® Mechanical, Release 19.1).

²SolidWorks yazılımında temel alınan parametrik ve parametrik olmayan yapısal iyileştirme yöntemlerinin teorisi ile ilgili daha geniş bilgiye programa ait kullanıcı klavuzundan ulaşılabilir (SolidWorks Simulation® Design Studies, SolidWorks Simulation® Topology Study).



(a) Hareket analizi



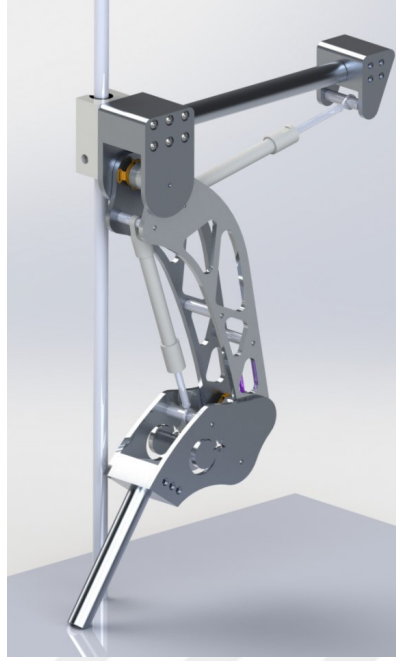
(b) Yapısal analiz

Şekil 5.7. Bacak tasarımının ikinci versiyonu ile gerçekleştirilen hareket ve yapısal analizlere ait ekran görüntüleri.

5.1.2. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağın Hareket ve Yapısal Analizleri

Bölüm 5.1.1’de yapılan tasarım çalışmaları sonucu elde edilen bacak modeline ait katı model Şekil 5.8’de verilmiştir. Bu bölümde, bacak tasarımının geçerliliğini değerlendirmek için yapılan hareket ve yapısal analizlere yer verilmiştir. Önceki bölümlerde değinildiği gibi tasarım çalışması doğrusal olmayan bir süreçtir. Bu bağlamda analizler tasarım süreci boyunca sürekli tekrar edilmiş ancak burada sadece ilk örnek üretimine karar verilen bacak modeli ile gerçekleştirilen analizlere yer verilmiştir.

Hareket analizlerine başlamadan önce, robot bacağın taşıması gereken yükler, adım boyu ve adım yüksekliği gibi başlangıç ve sınır şartları belirlenmiştir. Robot bacağın taşıması gereken yükler karar verilirken öngörülen robot ağırlığı ve taşıma kapasitesi dikkate



Şekil 5.8. Tasarım süreci çalışmaları sonucu elde edilen ve imalatı yapılan, ayrıca bu bölümde değinilen analizlerde kullanılan robot bacağına ait katı model.

alınmıştır. Ayrıca, fikir vermesi açısından, Tablo 5.3’de verilen hali hazırda literatürde bulunan hidrolik tahrikli dört ayaklı robotların ağırlıkları da gözönüne alınmıştır.

Tablo 5.3. Ayaklı robotlar literatüründeki hidrolik tahrikli dört ayaklı robotların ağırlıkları ((Semini ve ark., 2017)’nin çalışmasından uyarlanmıştır.)

Robot İsmi	Yayın Yılı	Serbestlik Derecesi	Ayrı/Bütünleşik Güç Ünitesi
			Ağırlık [kg]
GE Truck	1968	12	– / 1400
Raibert’s Quadruped	1986	12	31 / –
TITAN XI	2007	12	– / 7000
BigDog	2008	16	– / 109
HyQ	2011	12	80 / –
LS3/AlphaDog	2012	12	– / 590
WildCat	2013	14	– / 154
JINPOONG	2013	12	– / 120
HyQ2Max	2015	12	80 / –
HyQReal	2019	12	– / 130

Tablo 5.3 incelendiğinde, bu çalışma kapsamında geliştirilen dört ayaklı robot boyutlarına benzer robotların ağırlıkları bütünleşik güç ünitesi ile birlikte 100-150 kg arasında değiştiği belirlenmiştir. Robot ağırlığına etki eden faktörlerin başında robot gövdesi, bacak mekanizması, hidrolik silindirler, hidrolik güç ünitesi, kontrol ve algılayıcı sistemler gelmektedir. Aynı zamanda bu faktörler kullanılan teknolojiye bağımlı olsa da, 109 kg olan zamanının en son teknolojisi ile tasarlanmış BigDog (Raibert ve ark., 2008) ve 130 kg olan günümüzün en son teknolojisi ile tasarlanmış HyQReal (2019) robotları boyutlar

ve ağırlık bağlamında değerlendirildiğinde, bu çalışma kapsamında geliştirilen robotun ağırlığının da bu aralıkta olacağı yönünde bir kabul yapılmıştır ve bütünleşik güç ünitesi ile birlikte toplam robot ağırlığı 150 kg olarak öngörülmüştür, ayrıca taşıma kapasitesi olarak da 50 kg taşıyabilmesi öngörülmüştür. Bu kabuller ile bu çalışmada geliştirilen dört ayaklı robotun öngörülen toplam ağırlığı 200 kg olmuştur. Sonuç olarak, geliştirilen robot bacağının statik yürüme esnasında yaklaşık 70 kg, dinamik yürüyüş esnasında ise yaklaşık 100 kg taşıması gerektiği öngörülmüş; nitekim, bu kabuller ile robot bacağın dayanıklılığının değerlendirmesi için gerçekleştirilecek analizlerde uygulanacak yük profili belirlenmiştir.

Hareket analizleri için sıçrama, zıplama, koşma, yürüme gibi bir takım dinamik hareket senaryoları ve ayrıca tasarımı yapılan bacak modelinin çalışma uzayı, Bölüm 3’de belirlenen tasarım ölçütleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu bağlamda robot bacağın düzlemsel çalışma uzayı ve yürüyüş anında robot bacağın izlemesi gereken adım profili Şekil 5.10’da verilmiştir. Şekil 5.10, bacak yapılandırmasının kinematik tekilliği bağlamında değerlendirildiğinde, robotun hareketi sırasında bacak hareketinin çalışma uzayının sınırlarına yaklaşmadığı, ayrıca engebeli arazilerde ilerlemesi durumunda ise karşısına çıkabilecek engelleri aşabilmek için çalışma uzayında yeterli bir hareket alanına sahip olduğu görülmüştür.

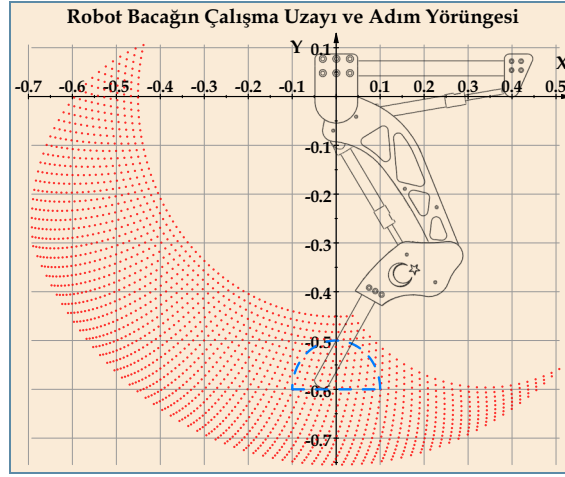
Bu değerlendirmelerden sonra bacak modelinin hareket analizlerine geçilmiştir. Hareket analizleri ile, robot bacağın taşıması gereken yükler altında yürüme, koşma, zıplama, sıçrama gibi dinamik hareketler sonucu meydana gelen yapısal deformasyonların değerlendirebilmesi için gerekli kuvvet profili elde edilmiştir. Hareket analizleri bu bağlamda değerlendirildiğinde, dinamik hareketler içerisinde bacağa etki eden kuvvetler anlamında en uç durumların zıplama–sıçrama hareketleri olduğu çok açık olduğundan, bu bölümde, bacak modeli ile gerçekleştirilen analizlerden sadece bu hareket analizi üzerine yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Hareket analizlerinin benzetimi yine bilgisayar destekli mühendislik programları yardımı ile yapılmıştır. Benzetim çalışması yapılandırılırken, yukarda belirlenen başlangıç ve sınır şartlarının yanında bacağın denge probleminin aşılabilmesi için bacağın dikey bir kızak üzerinde hareket ettiği kabul edilerek bacağın hareketi kısıtlanmıştır. Bu sayede, denge probleminin çözümü yerine hareket analizine odaklanılmıştır. Zıplama–sıçrama hareketlerinin analizlerine başlamadan önce, benzetim yapılandırmasının doğrulamasını

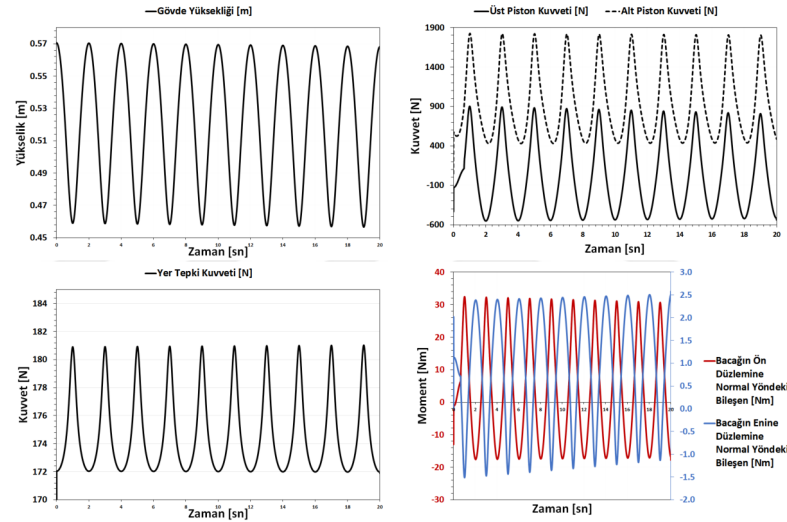


Şekil 5.9. Bacak modelinin 0,5 Hz frekansında ve 13 cm genliğinde dikey salınım hareketinin analizi sırasında elde edilmiş ekran görüntüleri dizisi. Kareler arasında geçen süre 0,2 sn'dir.

yapabilmek amacı ile ayak ucunun yerden kesilmediği dikey salınım hareketi incelenmiştir. Sinüs dalgası şeklinde yapılandırılan dikey salınım hareketinde genlik ve frekans sırasıyla 13 cm ve 0,5 Hz olarak belirlenmiştir. Yer düzlemi, ayak ucunun yer düzlemine penetrasyonunu engellemek için yeterince rijit modellenmiş ve ayak ucunun yer düzlemi üzerinde kaymasını engellemek için yer düzlemi ile ayak ucu arasındaki sürtünme katsayısı yeterince yüksek seçilmiştir. Ayrıca, bu analizin doğrulama çalışması olmasından dolayı, yukarıda bahsi geçen robot bacağın taşıması öngörülen yükler yerine 100 N'luk bir yük ile 20 sn'lik bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir.



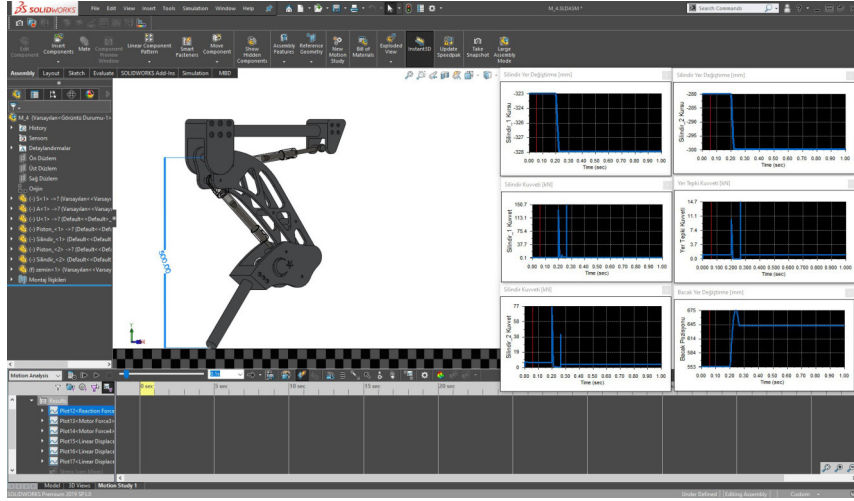
Şekil 5.10. Bacak modelinin ön düzlemdeki çalışma uzayı (kırmızı bölge) ve yürüyüş anında robot bacağın izlemesi gereken adım yürüyüşü (mavi kesikli çizgi).



Şekil 5.11. Bacak modelinin 0,5 Hz frekansında ve 13 cm genliğinde dikey salınım hareketinin analizi sırasında elde edilmiş grafikler; gövde yüksekliği (sol üst), yer temas kuvveti (sol alt), hidrolik silindirlerin etkilediği kuvvetler (sağ üst) ve sanal kızak üzerinde oluşan kısıt kuvvetleri (sağ alt).

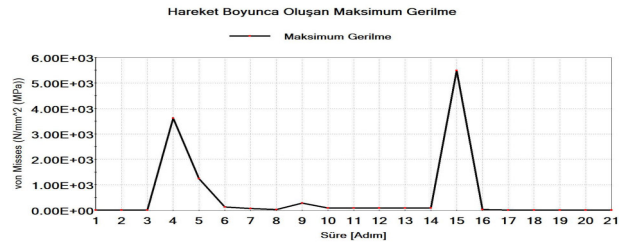
Şekil 5.9’da bacak modelinin dikey salınım hareketinin analizi sırasında elde edilmiş ekran görüntüleri dizisi verilmiştir. Şekil 5.11’de ise, bu hareket esnasında gövde yüksekliği, yer temas kuvveti, hidrolik silindirlerin etkilediği kuvvetler ve sanal kızak üzerinde oluşan kısıt kuvvetleri verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, elde edilen sonuçların fiziksel trendlere uyumlu olduğu, yani benzetim çalışması yapılandırılmasının doğru olduğu görülmüştür. Bu önermeyi hızlıca kanıtlamak için yer tepki kuvvetinin grafiği incelenebilir. 100 N’luk bir yük taşıyan 6,12 kg ağırlığındaki bacak modelinin dikey salınımı sırasında yer tepki kuvveti, beklenildiği üzere yaklaşık 170-180 N’luk bir aralıkta değişmektedir ki, bu sonuç yapılan önermenin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Benzetim yapılandırmasının doğruluğu değerlendirildikten sonra sıçrama hareketi

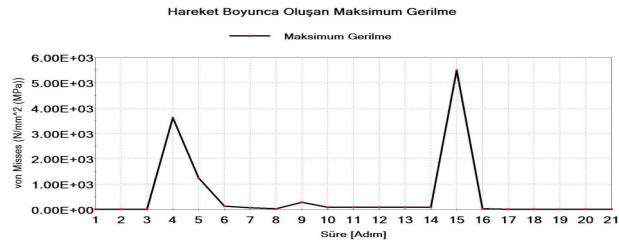


Şekil 5.12. Bacak modelinin 30 mm dikey sıçrama hareketinin analizi sırasında elde edilmiş ekran görüntüsü.

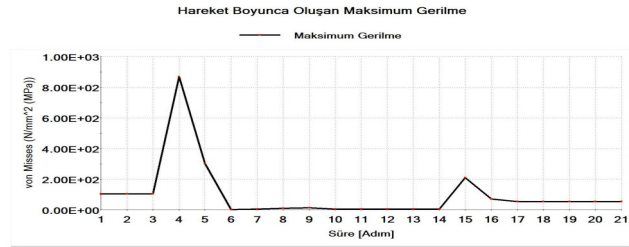
sonucu bacak üzerinde meydana gelen tepki kuvvetleri incelenmiştir. Sıçrama hareketinde, ayacağın yerden kesildiği ve serbest uçuş yaptığı bir an olması gerektiğinden, belirlenen



(a)



(b)



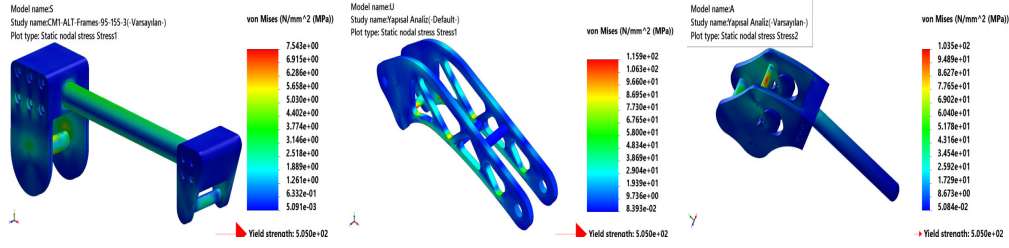
(c)

Şekil 5.13. Hareket boyunca sabit uzuv üzerinde (a), 1. uzuv üzerinde (b) ve 2. uzuv üzerinde (c) meydana gelen maksimum gerilme grafiği.

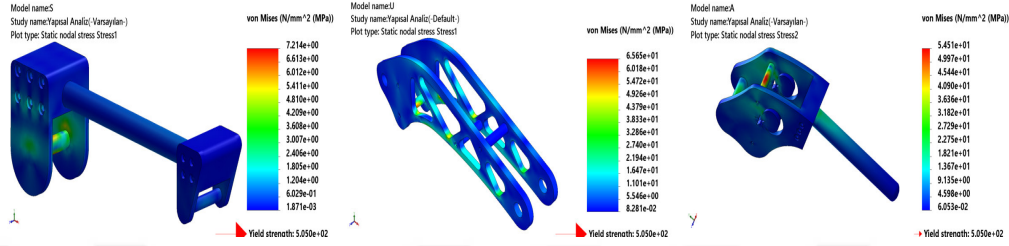
yükler altında bacak modelinin yerle temasının kesildiği bir an olması ve belirli bir yüksekliğe çıkması için benzetim çalışmasında pistonlara bu ivmelenmeyi sağlayacak bir basamak girişi tanımlanmıştır. Benzetim çalışmasının ana amacı bacak modeli üzerindeki oluşan yükleri incelemek olduğundan bacak modelinin sıçrama hareketi yüksekliği kontrol edilmemiştir, ancak piston kuvvetleri ve sıçrama yüksekliği incelenmiştir. Burada, sıçrama yüksekliği kontrol edilmek istenirse, Denklem 4.78 ve Denklem 4.88 kullanılarak belirli bir ayakucu hızı için piston kursu hızlarının ne olması gerektiği hesaplanabilir. Burada belirli bir ayakucu hızı ile istenen yükseklik dikkate alınarak hesaplanacak gerekli ayakucu hızı kastedilmektedir (Bknz Bölüm 5.3.2).

Sıçrama hareketi analizi için yapılan benzetim çalışmasında tanımlanan piston kursları girişi ile bacak gövde pozisyonunun dikey konumdaki yer değiştirmesi ve sıçrama hareketi sonucunda oluşan yer tepki kuvveti ile silindir kuvvetleri Şekil 5.12’de gösterilen hareket analizi sırasında elde edilen ekran görüntüsünde verilmiştir. Şekildeki grafiklerden görülebileceği gibi ayak ucu ile yer teması 0,05 sn’lik bir süre boyunca kesilmekte ve ayak yaklaşık 30 mm’lik bir dikey yüksekliğe sıçramaktadır. Ayrıca, beklenildiği gibi uzuvlar üzerine etki eden yükler sıçrama hareketi boyunca ayağın yer ile temasının kesildiği anda ve tekrar yer ile temas etmeye başladığı anda pik yapmaktadır. Benzetim çalışması sonucu elde edilen, hareket boyunca bacak uzuvlarına etki eden yerçekimi kuvveti, merkez kaç kuvveti, etki-tepki kuvveti gibi uzuvlara etki eden yükleri içeren kuvvet profilleri bacak uzuvlarının yapısal analizlerinde kullanılmıştır. Bu sayede, sıçrama hareketi boyunca bacak uzuvları üzerinde oluşan gerilmeler ve gerinmeler incelenebilmiştir. Şekil 5.12’de görüldüğü gibi sıçrama anının hemen öncesi ve yere temas anının hemen sonrası 0,2 sn ile 0,3 sn aralığıdır. Bu yüzden yapısal analizler bu aralık için 1 adım 0,005 sn olmak üzere toplamda 21 adıma bölünerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.13’de hareket analizinden elde edilen kuvvet profili kullanılarak gerçekleştirilen yapısal analizler sonucunda her bir analiz adımı için uzuvlarda meydana gelen maksimum gerilmelerin hareket boyunca değişimi her bir uzuv için ayrı ayrı verilmiştir.

Sıçrama hareketinin başladığı andan hemen önce ve ayağın yere temas ettiği andan hemen sonra uzuvlar üzerinde oluşan gerilmeler Şekil 5.14’de verilmiştir. Burada, sıçrama hareketinden hemen önceki an ile Şekil 5.13’deki 3. analiz adımı, hemen sonraki an ile Şekil 5.13’deki 16. analiz adımı kastedilmektedir. Bu anlar, robot bacağın genel yük profiline karşılık gelmektedir ve yük taşıma durumunda yürüyüş sırasında uzuvlar üzerinde meydana



(a) Sıçrama anından hemen önceki anda uzuvlar üzerinde meydana gelen gerilme grafikleri.

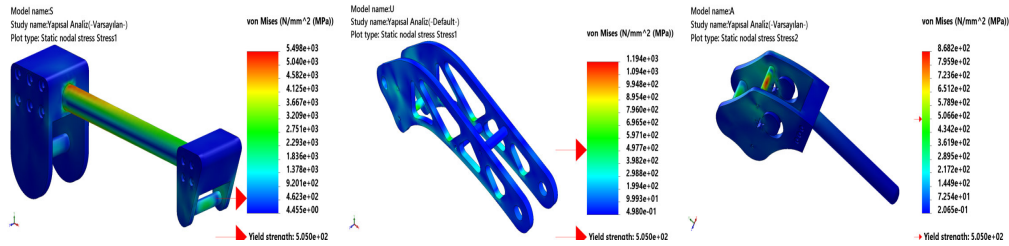


(b) Sıçrama anından hemen sonraki anda uzuvlar üzerinde meydana gelen gerilme grafikleri.

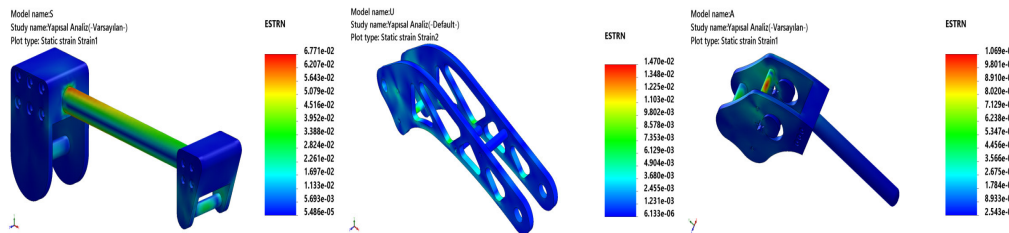
Şekil 5.14. Hareket analizi sırasında sıçrama anından hemen önceki ve hemen sonraki anlarda meydana gelen maksimum gerilme grafikleri.

gelen gerilmeler olarak kabul edilebilir. Hesaplanan maksimum gerilmenin oluştuğu an için gerilme ve gerinme grafikleri Şekil 5.15’de verilmiştir.

Hareket ve yapısal analizler sonucunda tasarımı yapılan dört ayaklı bir robotun dinamik hareketleri arasında en uç durum olan zıplama-sıçrama hareketi için robot bacağıın uzuvlarının yapısal sağlamlık bağlamında yeterli olduğu görülmüştür ve ilk örnek imalatı aşamasına geçilmiştir. Ancak, tasarım çalışması kendini tekrar eden bir süreç olduğu



(a) Uzuvlar üzerinde meydana gelen gerilme grafikleri.



(b) Uzuvlar üzerinde meydana gelen gerinme grafikleri.

Şekil 5.15. Hareket boyunca maksimum gerilmenin oluştuğu an için gerilme ve gerinme grafikleri.

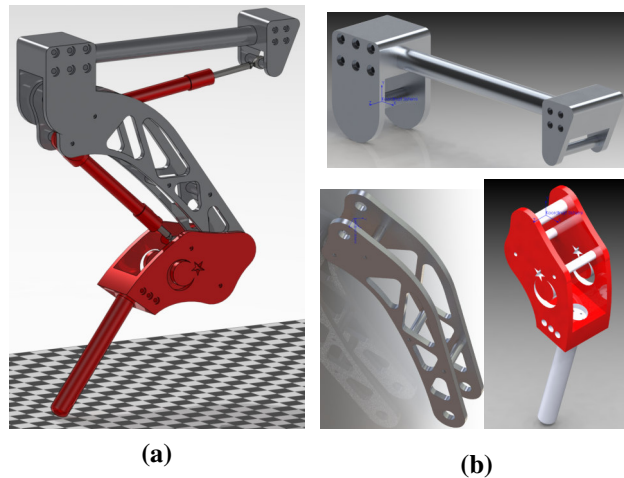
gözardı edilmemelidir. İmalatı gerçekleştirilen ilk örnek ile yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen gerçek veriler ile tasarımın geliştirilebilir yönleri tespit edilebilecektir. Bölümün devamında ilk örnek imalatı gerçekleştirilen robot bacağıın fiziksel özellikleri daha detaylı raporlanmıştır. Tasarıma ait bu fiziksel büyüklükler, özellikle, robot bacağıın dinamik modelinin oluşturulmasında gereklidir.

5.1.3. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağın Fiziksel Özellikleri ve Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde ilk örnek imalatı yapılan robot bacağına ait uzuvların kütlesi, kütle merkezi konumları ve atalet tensörü gibi fiziksel büyüklüklerin detaylı bir sunumuna yer verilmiştir. Bunun yanında yapılan çalışmalar neticesinde, enerji verimliliğindeki iyileştirmeler tartışılmıştır. Bölüm 4’de bacak modeli enerji verimliliğinin hesabında kullanılan formül tekrar Denklem (5.1)’de verilmiştir.




$$\eta_E = 600 \frac{F_{cyl} \cdot v_{cp}}{P_{hyd} \cdot Q_{hyd}} \quad (5.1)$$

Burada, F_{cyl} hidrolik eyleyicinin bacak üzerindeki bağlantı noktasına etkidiği kuvvet, v_{cp} bağlantı noktasının hızı, P_{hyd} hidrolik güç ünitesinin basıncı ve Q_{hyd} hidrolik güç ünitesinin debisidir. Denklem incelendiğinde, sabit hidrolik güç ünitesi çalışma koşullarında verimi artırabilmenin tek yolu hidrolik silindirler ile birim zamanda yapılan işin artırılması olduğu açıktır. Bu noktada, aynı silindir kuvveti ile daha fazla bir hızlanma elde edildiğinde bunun mümkün olduğu söylenebilir. Burada bir dönme hareketi elde edildiğinden, r dönme eksenine olan uzaklık olarak, μ_c silindir kuvveti ve moment kolu arasındaki açı ve toplam



Şekil 5.16. İmalatı gerçekleştirilen ilk örnek (a) ve uzuvlara ait katı modeller (b).

Tablo 5.4. Uzuvlara ait fiziksel özellikler

	Kütle [kg]	2,9827
	Ağırlık Merkezi [m]	$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,13766 \\ 0,06095 \\ 0 \end{bmatrix}$
	Atalet Tensörü [kg.m ²]	$\begin{bmatrix} 0,0047 & 0 & 0 \\ 0 & 0,08550 & 0 \\ 0 & 0 & 0,08590 \end{bmatrix}$
	Kütle [kg]	1,4707
	Ağırlık Merkezi [m]	$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,16376 \\ 0,01577 \\ 0 \end{bmatrix}$
	Atalet Tensörü [kg.m ²]	$\begin{bmatrix} 0,00398 & 0 & 0 \\ 0 & 0,01652 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01672 \end{bmatrix}$
	Kütle [kg]	1,8784
	Ağırlık Merkezi [m]	$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,03513 \\ -0,12073 \\ 0 \end{bmatrix}$
	Atalet Tensörü [kg.m ²]	$\begin{bmatrix} 0,00398 & 0 & 0 \\ 0 & 0,01652 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01672 \end{bmatrix}$

kütle m ağırlık merkezinde tanımlanırsa, etkiyen silindir kuvveti ile açısal hız arasındaki bağıntı $F_{cyl} \sin(\mu_c) = mr \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ olmaktadır. Buradan, açısal hız ve çizgisel hız arasındaki bağıntı $v_{cp} = r\omega$ kullanılarak tekrar düzenlenirse etkiyen kuvvet ve çizgisel hız arasındaki bağıntı $F_{cyl} \sin(\mu_c) = m \frac{\Delta v_{cp}}{\Delta t}$ olarak bulunur. F_{cyl} ve μ_c sabit kabulü ile elde edilen bağıntı ve Denklem (5.1) birlikte değerlendirildiğinde birim zamanda yapılan işi artırabilmenin tek yolu m kütesinin azaltılması olduğu açıktır. Bu bağlamda, bu bölümde yapılan tasarım çalışmaları sonucunda, yaklaşık 8,5 kg olan toplam kütle için yaklaşık 2,4 kg azaltılarak 6,12 kg'a indirilmesi ile aynı silindir kuvveti ile birim zamanda *doğrusal bir yaklaşımla* yaklaşık %28 oranında daha fazla bir hızlanma elde edileceğinden, *yine doğrusal yaklaşım korunarak* enerji verimliliğinde yaklaşık %28'lük bir artış sağlandığı söylenebilir. Bu hesaplamalarda hidrolik eyleyicilerin ağırlıkları hesaba katılmamıştır. Bacağın ilk örnek imalatında kullanılmak üzere tasarlanan ve imalatı yapılan hidrolik eyleyiciler ile ilgili daha detaylı açıklamalara Bölüm 5.3.2'de yer verilmiştir.

Şekil 5.16a'da imalatı gerçekleştirilen ilk örneğe ait katı model verilmiştir. Üç ana uzuvdan (Şekil 5.16b) ve hidrolik eyleyicilerden oluşan modelin toplam ağırlığı 7,76 kg'dır. Tablo 5.4'de her bir uzva ait fiziksel özellikler verilmiştir.

5.2. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacasının Dinamik Modeli

Bölüm 4.2’de elde edilen kinematik model, bacak mekanizmasına ait eyleyici hareketlerinin, bacağı oluşturan katı cisimlerin hareketi ile nasıl ilişkili olduğunu açıklamaktadır. Kinematik model oluşturulurken, eklemlere keyfi bir yörünge komutu verilebildiği ve bu yörüngelerin bacak modeli tarafından tam anlamı ile uygulanabildiği varsayımı yapılmıştır. Bu bölümde, bacak modelinin istenen bir eklem yörüngesini nasıl gerçekleştireceği konusu eklem torkları ve eyleyici kuvvetleri bağlamında daha detaylı açıklanmıştır.

Bacak modelinin kinematik ve atalet özelliklerine bağlı bir dizi doğrusal olmayan, ikinci dereceden, adi diferansiyel denklemler kullanılarak bacak modelinin dinamik modeli elde edilecektir. Her ne kadar prensip olarak bu denklemler, bacak modelini oluşturan rijit cisimlere etki eden tüm kuvvetlerin toplanmasıyla elde edilebilse de, bu çalışmada hareket denklemleri holonomik kısıtlara maruz bir mekanik sistemin davranışını tanımlamakta kullanılan Euler–Lagrange denklemleri ile elde edilmiştir. Bunun başlıca nedeni, bu yöntemin dinamik eşitliklerin yapısal özelliklerinin belirlenmesine ve kullanılmasına izin vermesinin yanı sıra, Euler–Lagrange denklemleri geri besleme kontrol algoritmalarını tasarlamak ve analiz etmek için kullanılacak atalet matrisindeki açık sınırlar, atalet parametrelerinde doğrusallık ve çarpık–simetrik ve pasivite gibi çok önemli özelliklere sahiptir. Ayrıca, bu yöntem, hareket denklemi hesaplanacak sistemin yalnızca kinetik ve potansiyel enerjilerini gerektirdiğinden, sisteme etki eden atalet, merkezkaç, Coriolis, eyleyici ve diğer kuvvetleri ayrı ayrı bir araya getirmekten daha az hataya imkan vermektedir.

5.2.1. Euler–Lagrange Denklemleri

Mekanik sistemlerin dinamik denklemlerini üretmek için pek çok yöntem vardır. Bütün yöntemler, sonuçta, eşdeğer denklem kümeleri oluşturur ancak yapılacak hesaplama ve analiz için daha uygun formda denklem kümeleri oluşturan yöntem seçilmelidir. Bu çalışmada hareket denklemleri elde edilirken mekanik sistemlerin enerji özelliklerine dayanan Lagrangian analizi kullanılacaktır. Bu analiz sonucunda denklemler, sistemin özelliklerinin detaylı analizine izin verecek şekilde kapalı formda elde edilebilmektedir.

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q) \quad (5.2)$$

Hareket denklemlerini yazabilmek için Denklem (5.2)’de gösterildiği gibi sistemin kinetik ve potansiyel enerjilerinin farkı olarak ifade edilen *Lagrangian* tanımı yapılmı-

lıdır. Burada, q sistemin genelleştirilmiş koordinatlarını, T ve V ise, sırasıyla, sistemin genelleştirilmiş koordinatlarda tanımlanmış kinetik enerjisini ve potansiyel enerjisini ifade etmektedir.

Lagrangian tanımı yapıldıktan sonra $q \in \mathbb{R}^m$ genelleştirilmiş koordinatlar olmak üzere mekanik bir sistem için hareket denklemi Denklem (5.3)'de gösterildiği gibi tanımlanabilir. Burada, Υ_i , i 'nci genelleştirilmiş koordinatlarda etki eden dış kuvvet yani i 'nci genelleştirilmiş kuvvet olarak ifade edilmektedir. Denklem (5.3)'de elde edilen hareket denklemi aynı zamanda Euler–Lagrange denklemleri olarak da bilinmektedir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \Upsilon_i \quad i = 1, \dots, m \quad (5.3)$$

Hem öteleme hem de dönme hareketi yapan rijit bir cismin toplam kinetik enerjisi Denklem (5.4)'de verilmiştir. Burada, \dot{p} çizgisel hızı, ω açısal hızı olmak üzere $\widehat{V}^b = g^{-1}\dot{g} \in se(3)$ rijit cismin kütle merkezinin toplam hızı, ve \mathcal{M} ise genelleştirilmiş atalet matrisi şeklinde tanımlanmaktadır. \mathcal{I} ise Denklem (5.5)'de gösterildiği gibi cismin atalet tensörü olarak ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}m|\dot{p}|^2 + \frac{1}{2}\omega^T \mathcal{I} \omega \\ &= \frac{1}{2} (V^b)^T \begin{bmatrix} m\mathbf{I} & 0 \\ 0 & \mathcal{I} \end{bmatrix} V^b =: \frac{1}{2} (V^b)^T \mathcal{M} V^b \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\mathcal{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$T_i(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} (V_i^b)^T \mathcal{M}_i V_i^b = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T J_i^T(\theta) \mathcal{M}_i J_i(\theta) \dot{\theta} \quad (5.6)$$

$$T(\theta, \dot{\theta}) = \sum_{i=1}^n T_i(\theta, \dot{\theta}) =: \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta}$$

$$M(\theta) = \sum_{i=1}^n J_i^T(\theta) \mathcal{M}_i J_i(\theta) \quad (5.7)$$

Kinetik enerji eşitliği robotlarda olduğu gibi rijit cisimlerden oluşan bir sistem için yazılırsa ve $V^b = J(\theta)\dot{\theta}$ dönüşümü kullanılırsa i 'nci uzuv için kinetik enerji denkleminin genel ifadesi Denklem (5.6)'daki gibi elde edilir. Burada, J_i , i 'nci uzvun kütle merkezine göre Jakobiyeni ve $M(\theta)$ ise Denklem (5.7)'de gösterildiği gibi uzuvların Jakobiyeni cinsinden sistemin toplam atalet matrisi olarak tanımlanmaktadır.

Sistemin toplam potansiyel enerji denklemi, $V(\theta)$ ise Denklem (5.8)'de tanımlanmıştır. Burada, $h_i(\theta)$, i 'nci cismin kütle merkezinin yüksekliğidir. Burada yükseklik ile kastedilen kütle merkezi konumunun yerçekimi yönünün tersi yöndeki bileşenidir.

$$V(\theta) = \sum_{i=1}^n V_i(\theta) = \sum_{i=1}^n m_i g_i h_i(\theta) \quad (5.8)$$

Denklem (5.2)'deki Lagrangian, Denklem (5.4) ve (5.8) eşitlikleri kullanılarak robotlar için tekrar düzenlenirse Denklem (5.9) elde edilir. Burada kinetik enerji eşitliği toplam olarak ifade edilmiştir. Daha sonra yapılacak işlemlerde bunun nedeni daha net anlaşılacaktır.

$$L(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} - V(\theta) \quad (5.9)$$

$$L(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n M_{ij}(\theta) \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j - V(\theta)$$

Denklem (5.3)'de verilen hareket denkleminin birinci ve ikinci terimleri Denklem (5.9) eşitliği kullanılarak hesap edilecek olursa Denklem (5.10) elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} = \frac{d}{dt} \left(\sum_{j=1}^n M_{ij} \dot{\theta}_j \right) = \sum_{j=1}^n \left(M_{ij} \ddot{\theta}_j + \dot{M}_{ij} \dot{\theta}_j \right) \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^n \frac{\partial M_{kj}}{\partial \theta_i} \dot{\theta}_k \dot{\theta}_j - \frac{\partial V}{\partial \theta_i}$$

Denklem (5.10) kullanılarak hareket denklemi tekrar düzenlenirse ve Denklem (5.11)'de gösterildiği gibi \dot{M}_{ij} terimi, toplama sırasını değiştirerek ve simetri özelliğinden faydalanarak kısmi türevler şeklinde düzenlenirse Denklem (5.12) elde edilir.

$$\sum_{j=1}^n \dot{M}_{ij} \dot{\theta}_j = \sum_{j,k=1}^n \frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_k} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k = \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^n \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_k} + \frac{\partial M_{ik}}{\partial \theta_j} \right) \quad (5.11)$$

$$\sum_{j=1}^n M_{ij}(\theta) \ddot{\theta}_j + \sum_{j,k=1}^n \Gamma_{ijk} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + \frac{\partial V}{\partial \theta_i}(\theta) = \Upsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad (5.12)$$

$$\Gamma_{ijk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_k} + \frac{\partial M_{ik}}{\partial \theta_j} - \frac{\partial M_{kj}}{\partial \theta_i} \right)$$

Denklem (5.12) eşitliği, açısız konumlara bağlı ikinci dereceden bir diferansiyel denklemdir ve dört ana terimden oluşmaktadır: eklemlerin ivmelenmesine bağlı atalet kuvvetleri; eklem hızlarına bağlı merkezkaç ve Coriolis kuvvetleri; $\frac{\partial V}{\partial \theta_i}$ şeklinde tanımlı

potansiyel kuvvetler ve dış kuvvetler. Merkezkaç ve Coriolis terimleri, hareketli eksenlerde tanımlanan genelleştirilmiş koordinatların kullanımından kaynaklanmaktadır. Klasik mekanik literatüründe, $\dot{\theta}_i \dot{\theta}_j$, $i \neq j$ şeklindeki terimler Coriolis kuvvetleri, $\dot{\theta}_i^2$ şeklindeki terimler ise merkezkaç kuvvetleri olarak tanımlanmaktadır. Denklem (5.12) eşitliğindeki Γ_{ijk} denklemine, $M(\theta)$ atalet matrisine karşılık gelen *Christoffel sembolleri* denmektedir. Dış kuvvetler terimi Υ_i iki bileşen olarak tanımlanabilir. Eklemlerde uygulanan torklar, τ_i ve $-N_i(\theta, \dot{\theta})$ matrisi şeklinde tanımlanan bir potansiyelden kaynaklanan korunumlu kuvvetler de dahil olmak üzere, i 'nci genelleştirilmiş koordinat üzerinde etki eden herhangi diğer kuvvetler. Örnek olarak, eklemlerde β sönümlenme katsayısına sahip bir viskoz sürtünme varsa N_i Denklem (5.13)'deki gibi tanımlanacaktır. Burada, robota etki eden diğer dış kuvvetler Jakobiye matrisinin transpozu kullanılarak eklem uzayına yansıtılarak Denklem (5.13)'ye dahil edilebilir.

$$-N_i(\theta, \dot{\theta}) = -\frac{\partial V}{\partial \theta_i}(\theta) - \beta \dot{\theta}_i \quad (5.13)$$

Hareket denklemlerini tekrar vektör halinde yazabilmek için Denklem (5.12)'deki Γ_{ijk} terimlerini içeren Denklem (5.14)'de gösterildiği gibi $C(\theta, \dot{\theta})$ şeklinde bir matris tanımlanabilir. C matrisi Coriolis matrisi olarak ifade edilmektedir. $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ vektörü hareket denklemindeki Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerini vermektedir.

$$C_{ij}(\theta, \dot{\theta}) = \sum_{k=1}^n \Gamma_{ijk} \dot{\theta}_k = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_k} + \frac{\partial M_{ik}}{\partial \theta_j} - \frac{\partial M_{kj}}{\partial \theta_i} \right) \dot{\theta}_k \quad (5.14)$$

Bu tanımlamalardan sonra robotik sistemler için genel hareket denklemi Denklem (5.15)'deki gibi matris formunda ifade edilebilir. Burada, τ , eklemlerde uygulanan torkları ifade eden tork vektörü, θ , genelleştirilmiş koordinatları ifade eden açısal konum vektörüdür. $N(\theta, \dot{\theta})$ ise yerçekimi terimlerini ve genelleştirilmiş koordinatlarda etki eden diğer kuvvetleri içermektedir.

$$M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (5.15)$$

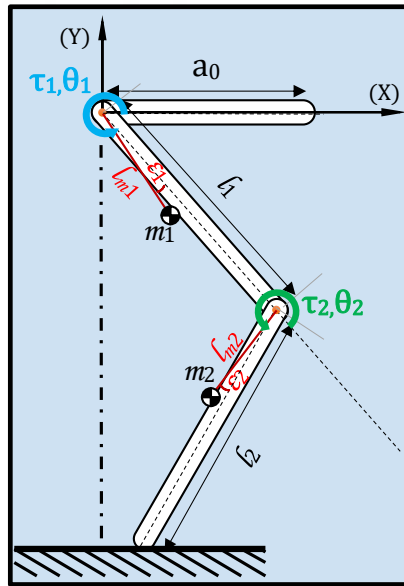
Robotik sistemler için elde edilen genel hareket denkleminin M ve C matrisleri robotun atalet özelliklerini tanımlayan terimlerdir ve bazı önemli özelliklere sahiptirler. $M(\theta)$ terimi doğrudan tanımından dolayı ve robotun kinetik enerjisinin yalnızca sistem durağan olduğunda sıfır olması gerçeğinden dolayı pozitif tanımlı matristir. Diğer bir

özellik ise $\dot{M} - 2C \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ifadesinin çarpık-simetrik olmasıdır. Bu özellik, daha sonraki bölümlerde ele alınmış olan robotun kontrol problemi için temel bir öneme sahiptir. Bu özellik aynı zamanda pasivite özelliği olarak da adlandırılmaktadır, çünkü diğer şeylerin yanı sıra, sürtünme olmadığında, robot sisteminin net enerjisinin korunduğu anlamına gelmektedir. Pasivite özelliği, robotik sistemleri için birçok kontrol yasalarının kanıtlanmasında önemli bir özelliktir.

Robotik sistemlere ait genel hareket denklemleri açıklandıktan sonra bu çalışma kapsamında geliştirilen bacak modelinin dinamik incelemesi yapılmıştır. Dinamik model için gerekli uzuvlara ait kütle, atalet matrisi gibi fiziksel nicelikler bilgisayar destekli tasarım yazılımında oluşturulan katı modelden elde edilmiştir.

5.2.2. İki Serbestlik Dereceli Robot Bacağın Matematiksel Modeli

Bu bölümde, robot bacağın Bölüm 5.1’de elde edilen fiziksel modelin özellikleri ile Bölüm 5.2.1’de elde edilen hareket denklemleri kullanılarak robot bacağın dinamik modeli elde edilmiştir. Robot bacağına ait şematik gösterim Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Robot bacağına ait kütle, atalet matrisi, ağırlık merkezi gibi fiziksel özellikler Tablo 5.4’de (Bknz. Bölüm 5.1.3) verilmiştir.



Şekil 5.17. Dinamik modelin oluşturulmasında kullanılan değişkenlerin tanımını içeren iki serbestlik dereceli robot bacağın şematik çizimi. Üst ve alt bacak bölümlerinin kütle merkezleri hidrolik silindirlerin kütlesi nedeniyle (okunabilirlik açısından çizime dahil edilmemiştir) eksenden saptırılmıştır.

Denklem (5.15)’de tanımlanan hareket denklemindeki matrisler elde edilmeden önce Denklem (5.16)’daki gibi uzuv kütle merkezlerinin Jakobiyen matrislerinin tanımlanması

gerekmektedir. Burada J_i , i 'nci uzvun kütle merkezine ait Jakobiye matrisi olarak, ε_i i 'nci kütle merkezinin ölçüm ekseninden kaçıklık açısı olarak, l_i i 'nci uzvun uzunluğu olarak ve l_{mi} i 'nci uzvun kütle merkezinin bir önceki dönme eksenine olan uzaklığı olarak tanımlanmıştır. Uzuvlara ait atalet matrisinin genel formu Denklem (5.17)'de verilmiştir. Burada m_i , i 'nci uzvun kütlesi, I_{xi} , I_{yi} ve I_{zi} ise i 'nci uzvun x -, y - ve z -eksenlerine göre atalet momentlerini ifade etmektedir.

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_{m1} \sin(\theta_1 - \varepsilon_1) & 0 \\ l_{m2} \cos(\theta_1 - \varepsilon_1) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_{m2} \sin(\theta_1 + \theta_2 - \varepsilon_2) & -l_{m2} \sin(\theta_1 + \theta_2 - \varepsilon_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_{m2} \cos(\theta_1 + \theta_2 - \varepsilon_2) & l_{m2} \cos(\theta_1 + \theta_2 - \varepsilon_2) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{M}_i = \left[\begin{array}{cc|cc} m_i & 0 & & \\ 0 & m_i & & \\ \hline & & I_{xi} & 0 \\ & & 0 & I_{yi} \\ & & & I_{zi} \end{array} \right] \quad i = 1, 2 \quad (5.17)$$

Bölüm 5.2.1'de elde edilen Denklem (5.7) eşitliği kullanılarak sistemin toplam atalet matrisini Denklem (5.18)'deki gibi hesaplanabilir. M matrisinin bileşenleri Denklem (5.19)'de verilmiştir. Uzuvlara ait atalet momentlerinin bazılarının Denklem (5.19)'de görünmemesinin nedeni, robot bacağına kısıtlı serbestlik derecelerinin her bir eklemin her eksen etrafında dönmesine izin vermemesidir.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = J_1^T \mathcal{M}_1 J_1 + J_2^T \mathcal{M}_2 J_2 \quad (5.18)$$

$$M_{11} = m_1 l_{m1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{m2}^2 + 2l_1 l_{m2} \cos(\theta_2 - \varepsilon_2)) + I_{z1} + I_{z2}$$

$$M_{12} = m_2 (l_{m2}^2 + l_1 l_{m2} \cos(\theta_2 - \varepsilon_2)) + I_{z2}$$

$$M_{21} = m_2 (l_{m2}^2 + l_1 l_{m2} \cos(\theta_2 - \varepsilon_2)) + I_{z2}$$

$$M_{22} = m_2 l_{m2}^2 + I_{z2}$$

(5.19)

Atalet matrisi elde edildikten sonra Coriolis ve merkez kaç kuvvetleri yine Bölüm 5.2.1'de elde edilen Denklem (5.14) eşitliği kullanılarak elde edilebilir. Hesaplamalar sonucu elde edilen *Christoffel sembolleri* Denklem (5.20)'de verilmiştir. Hesaplanan *Christoffel sembolleri* Denklem (5.14)'de yerine yazılırsa Coriolis matrisi Denklem (5.21)'deki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned}\Gamma_{111} &= 0 \\ \Gamma_{121} &= -m_2 l_1 l_{m2} \sin(\theta_2 - \varepsilon_2) \\ \Gamma_{221} &= -m_2 l_1 l_{m2} \sin(\theta_2 - \varepsilon_2) \\ \Gamma_{112} &= m_2 l_1 l_{m2} \sin(\theta_2 - \varepsilon_2)\end{aligned}\tag{5.20}$$

$$\begin{aligned}\Gamma_{122} &= 0 \\ \Gamma_{222} &= 0 \\ C(\theta, \dot{\theta}) &= \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_{m2} \sin(\theta_2 - \varepsilon_2) \dot{\theta}_2 & -m_2 l_1 l_{m2} \sin(\theta_2 - \varepsilon_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ m_2 l_1 l_{m2} \sin(\theta_2 - \varepsilon_2) \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{5.21}$$

Son olarak, yer çekimsel kuvvetler ve robot bacağına etki eden diğer kuvvetleri içeren $N(\theta, \dot{\theta})$ matrisinin hesaplanması gerekmektedir. Yer çekimsel kuvvetlerin yanı sıra, ikinci uzvun yerle temas ettiği noktadan bacağına etki eden kuvvetlerin genelleştirilmiş koordinatlarda yani eklem uzayındaki karşılığı ve eklemlerde viskoz sürtünmeden kaynaklanan sönüm kuvvetleri $N(\theta, \dot{\theta})$ matrisine dahil edilebilir. Tüm bu kuvvetler Denklem (5.22)'de tanımlanmıştır. Burada, J_C ikinci uzvun uç noktasına göre Denklem (4.81)'de hesaplanan Jakobiyen matrisi ifade etmektedir. F_A ise ikinci uzvun uç noktasından robot bacağına etki eden dış kuvvetleri ifade etmektedir. β eklemlerdeki viskoz sönüm katsayısını, V ise robot bacağın potansiyel enerjisini tanımlamaktadır. Denklem (5.23)'de $N(\theta, \dot{\theta})$ matrisinin son hali verilmiştir.

$$\begin{aligned}(J_C)^T F_A &= \begin{bmatrix} f_x (-l_1 s_{\theta_1} - l_2 s_{\theta_{12}}) + f_y (l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}}) \\ f_x (-l_2 s_{\theta_{12}}) + f_y (l_2 c_{\theta_{12}}) \end{bmatrix} \\ \frac{\partial V}{\partial \theta} &= \begin{bmatrix} m_1 g l_{m1} \cos(\theta_1 - \varepsilon_1) + m_2 g (l_1 \cos(\theta_1) + l_{m2} \cos(\theta_1 + \theta_2 - \varepsilon_2)) \\ m_2 g l_{m2} \cos(\theta_1 + \theta_2 - \varepsilon_2) \end{bmatrix} \\ \beta \dot{\theta} &= \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{5.22}$$

$$N(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} = \frac{\partial V}{\partial \theta} + \beta \dot{\theta} + (J_C)^T F_A$$

$$N_1 = -l_1 \sin(\theta_1) f_x - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) f_x + l_1 \cos(\theta_1) f_y + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) f_y$$

$$+ m_1 g l_{m1} \cos(\theta_1 - \varepsilon_1) + m_2 g (l_1 \cos(\theta_1) + l_{m2} \cos(\theta_1 + \theta_2 - \varepsilon_2)) + \beta_1 \dot{\theta}_1$$

$$N_2 = -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) f_x + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) f_y + m_2 g l_{m2} \cos(\theta_1 + \theta_2 - \varepsilon_2) + \beta_2 \dot{\theta}_2$$
(5.23)

Tasarımı gerçekleştirilen robot bacağıın dinamik modeli Denklem (5.18), (5.21) ve (5.23) eşitlikleri kullanılarak tamamlanabilir. Denklem (5.24)'de robot bacağı a ait dinamik eşitlikler verilmiştir. Burada τ_i i'nci eklemden uygulanan torku ifade etmektedir.

$$M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) = \tau$$

$$M_{11} \ddot{\theta}_1 + M_{12} \ddot{\theta}_2 + \Gamma_{121} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \Gamma_{221} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \Gamma_{221} \dot{\theta}_2^2 + N_1 = \tau_1$$

$$M_{11} \ddot{\theta}_1 + M_{12} \ddot{\theta}_2 + \Gamma_{112} \dot{\theta}_1^2 + N_2 = \tau_2$$
(5.24)

Böylelikle, sisteme ait dinamik eşitlikler analitik olarak tamamen tanımlanmış olur. Robot bacağına ait hareket denklemlerinin tamamen elde edilmesi sonrasında, robot bacağıın önceden tanımlanmış bir yörünge boyunca hareket edebilmesi için gerekli eklem torklarının hesaplanmasını gerektiren robot bacağıın kontrol problemine bir çözüm aranabilir.

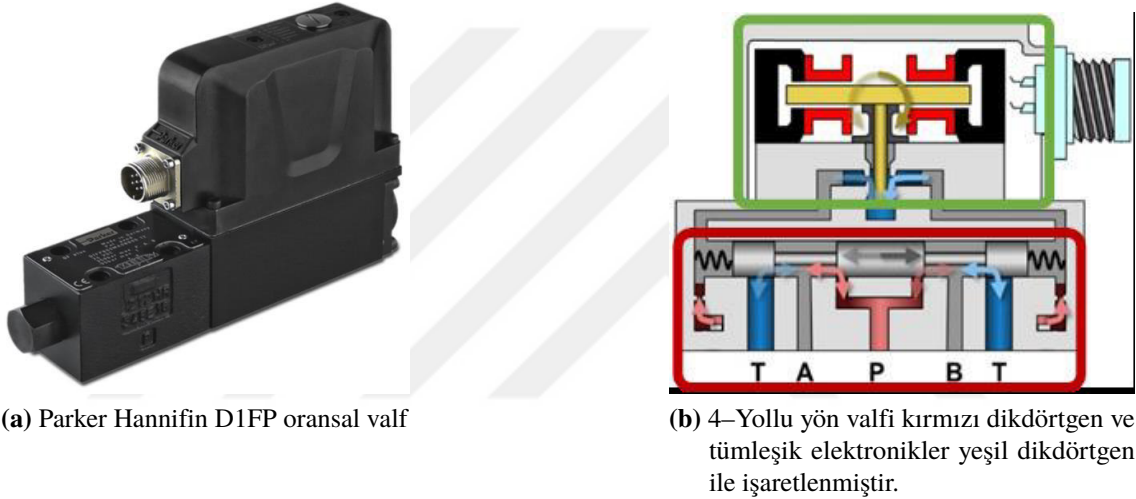
5.3. Hidrolik Eyleyici Sisteminin Tanılaması ve Modellenmesi

Bölüm 5.2'de elde edilen hareket denklemleri sadece robot bacağıın doğal dinamiklerini içerdiğinden kontrol probleminin çözümüne yönelik çalışmalarda tek başına kullanılamaz. Bu bağlamda, sistemde kullanılacak hidrolik eyleyici sisteminin matematiksel modeline de ihtiyaç vardır. Bunun en önemli nedeni, kontrolcü tasarımı sırasında yapılan benzetim çalışmalarının geçerliliği ve doğruluğu, benzetimlerde kullanılan modellerin gerçek sisteme en yakın modeller olmasına bağlı olduğundan dolayı, benzetim çalışmalarında sistem davranışını etkileyen bileşenlerin tam bir modeli gerekmektedir. Daha net bir ifade ile kusursuza yakın çok hassas bir kontrolcü tasarımı için sistemin kesin bir modeline ihtiyaç vardır. Tasarlanan sisteme ait hidrolik güç üretim ve aktarma elemanları; hidrolik bir güç kaynağı, hortumlar, hidrolik sıvı, valfler, servovalfler ve hidrolik pistonlar gibi elemanlardan oluşmaktadır. Tez çalışması kapsamında tasarlanan sistemde kullanılan

hidrolik eyleyici sistemi bileşenlerinin seçimi ile ilgili detaylı açıklamalara Bölüm 7’de yer verilmiştir. Bu bölümde, sistemde kullanılan elektrohidrolik yön valfinin sistem tanılaması ile modellenmesine yer verilmiştir. Elde edilen bu modelin, kontrolcü tasarımı sırasında gerçekleştirilecek benzetimlerde kullanılması ile gerçek sisteme daha yakın sonuçlar elde edilebilecektir. Devamında hidrolik eyleyici tasarımında izlenen yöntemler açıklanmıştır.

5.3.1. Elektrohidrolik Yön Valfinin Dinamik Özelliklerinin Elde Edilmesi

Tasarlanan sistemde, Şekil 5.18’de gösterilen hidrolik konumlandırmada basınç ve hızın kontrolünde yüksek doğruluk sunabilen Parker Hannifin firmasına ait D1FP Serisi oransal yön valfi kullanılmıştır.



Şekil 5.18. Tasarlanan sistemde kullanılan D1FP oransal yön valfi (a) ve şematik gösterimi (b).

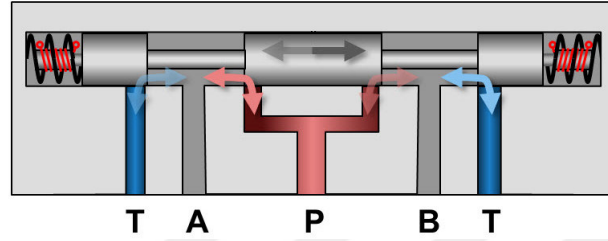
Oransal valfler, hidrolik sistemlerde, akış yönünü, akış debisini, kuvveti, basıncı, konumu, hızı ve ivmeyi kontrol etmek için kullanılan en önemli elektrohidrolik sistem bileşenlerinden biridir ve tümleşik elektroniklerin bulunduğu kontrol ünitesi ve akışın kontrol edildiği mekanik kademe olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Kontrol ünitesi, valfa iletilen elektrik sinyaline göre, akışın kontrol edildiği mekanik kademedeki valf elemanının konumunu kontrol etmektedir. Şekil 5.18b’de D1FP Serisi oransal yön valfine ait, tümleşik elektroniklerin bulunduğu kontrol ünitesi ve dört yollu yön valfinin bulunduğu mekanik kademe şematik olarak gösterilmiştir.

Literatürde, genellikle, tümleşik elektronik kısmına ait dinamikler, Denklem (5.25)’de gösterildiği gibi teorik olarak, eşdeğer bir ikinci dereceden gecikmeli transfer fonksiyonu ile temsil edilmektedir. Burada ω_n , ζ , K ve T_s sırasıyla, valf sisteminin doğal frekansı, sönümlenme katsayısı, valf kazancı ve gecikme zaman sabiti olarak tanımlanmıştır.

$$G(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{\tau}}$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{KT_s}}$$
(5.25)



Şekil 5.19. Tipik bir 4-yollu yön valfinin yapısal konfigürasyonu.

Şekil 5.19’da şematik bir çizimi gösterilen dört yollu valf içerisinde, hidrolik sıvının akış hızı, sabit yük koşullarında, kontrol ünitesine bağlı valf elemanının hareketi ile doğrudan orantılıdır ancak, değişen yük koşulları altında ise orifis boyunca oluşan basınç farkının karakökü ile orantılıdır (Kalyoncu ve Haydim, 2009). Türbülanslı rejimde ideal bir orifisten geçen akış denklemi Denklem (5.26)’daki gibi tanımlanmaktadır. Burada A_{max} ve h_{max} sırasıyla, maksimum orifis alanı ve maksimum orifis açıklığı olarak; C_d akış deşarj katsayısı ve ρ akış yoğunluğu olarak; x_0 ve x kontrol elemanının ilk konumu ve yerdeğiştirmesi olarak; Q ve p ise sırasıyla orifis boyunca oluşan basınç farkı ve orifis boyunca gerçekleşen debi olarak tanımlanmıştır.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} |p| \cdot \text{sign}(p)}$$

$$A = \frac{A_{max}}{h_{max}} \cdot h$$

$$h = x_0 \pm x$$
(5.26)

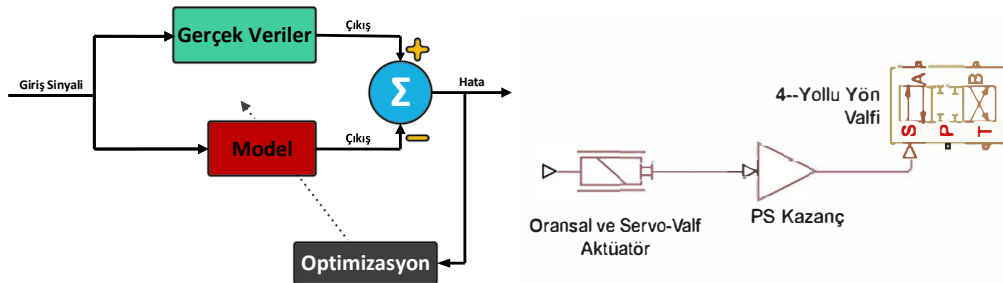
Belirlenen model yapıları, oransal valf sistemi davranışını temsil etmek için kullanılacaktır. Bu yüzden, oransal valfin tam bir modelini elde edebilmek için Denklem (5.25) ve (5.26)’da belirtilen bilinmeyen parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Parametrelerin belirlenmesi kontrol ünitesi için ayrı mekanik kademe için ayrı olmak üzere iki farklı aşamada yapılmıştır. Bunun başlıca sebebi mekanik kademelerin zaman sabitleri kontrol

ünitesine göre oldukça küçük olduğundan frekans cevabında valfin tüm dinamik etkileri kontrol ünitesi modelinin karakteristiğine daha çok bağlıdır. Bu yüzden valfin mekanik kademesi için model parametreleri sistemin kararlı durum özellikleri temel alınarak gerçekleştirilirken, kontrol ünitesi için model parametreleri sistemin frekans cevabı temel alınarak gerçekleştirilmiştir.

Bilinmeyen bir sistemin kesin bir modelini elde etme işlemi iki farklı şekilde yapılabilir; deneysel verileri topladıktan sonra sistem tanımlama yöntemlerini uygulamak veya varsa üreticilerin veri sayfalarını kullanmak. Sistem tanımlama, bilinmeyen veya kısmen bilinen sistemlerin matematiksel modellerini deneysel verilerden oluşturma işlemidir. Deneysel veriler, sistemin giriş ve çıkış verilerinden oluşur. Giriş verileri, sistem verilerini çıktı verileri olarak adlandırılan tepkileri toplamak için kullanılan uyarım sinyalleridir. Deneysel veriler hem zaman alanında hem de frekans alanında elde edilebilir.

Sistem tanımlama yöntemlerinde iki ana yaklaşım söz konusudur; **Kara Kutu** yaklaşımı olarak tanımlanan, sistemin yapısı dahil tamamen bilinmeyen sistemlerin tanımlanması (Zadeh, 1956) ve **Gri Kutu** yaklaşımı olarak tanımlanan kısmen bilinen sistem modelinin bilinmeyen parametrelerinin elde edilmesi (Barbosa ve ark., 2011). Literatürde Hammerstein–Weiner modelleri, NARX modelleri, NARMAX modelleri vb. gibi kara kutu modellemesi ve doğrusal olmayan sistemlerin tanımlanması için değişik teknikler uygulanmıştır (Cavallo ve ark., 2007; Kilic ve ark., 2012; Mercere ve ark., 2014).

Bu tez çalışması kapsamında, sistem modelinin yapısı bilindiğinden dolayı oransal valfin kesin bir modelini elde etmek için optimizasyon teknikleri kullanılarak bilinmeyen parametrelerin belirlenmesine dayalı **Gri Kutu** yaklaşımı kullanılmıştır. Bu bağlamda, Denklem (5.25) ve (5.26)'de belirlenen model yapıları kullanılarak benzetim çalışmaları



(a) Sistem tanımlama metodunun şematik gösterimi. (b) D1FP oransal yön valfinin yapısal modeli

Şekil 5.20. Simulink ortamında oluşturulan model ve optimizasyon temelli tanımlama yaklaşımının blok diagramı.

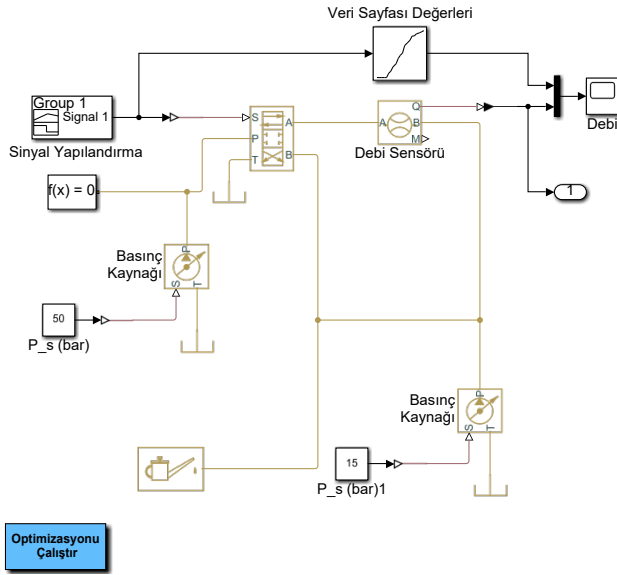
4-Yollu Yön Valfi bloğu, adından anlaşılacağı üzere dört girişli ve akış yollu yön kontrol valfini temsil etmektedir. Modelin blok şeması, Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Şekil 5.20b’de gösterilen fiziksel sinyal portu S , valf elamanı yer değiştirmesini kontrol etmektedir. Her bir akış yoluna göre valf elamanının konumunu ayarlayan yerdeğiştirme bilgisi ile, dolaylı olarak, orifis açıklığı kontrol edilmektedir. Orifis açıklığı ise ilgili akış yolunun orifis alanının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

4-Yollu Yön Valfi bloğuna ait parametre ayarları, akış yollarının orifis açıklık alanları için kullanılan parametreleri belirlemektedir. Hesaplamalar, Şekil 5.23’de gösterilen model parametre sekmesinde belirtilen orifis parametrelerine veya tablo veri setlerine dayanmaktadır. Şekil 5.23’de gösterilen Açıklık vektörü ve Açıklık Alan Vektörü değerleri ile, ayrı ayrı belirlenmiş orifis açıklıklarına karşılık gelen açıklık alanlarını tek boyutlu bir arama tablosu olarak belirlenebilmektedir. Tanımlanan ayrı ayrı verilerin enterpolasyonu veya ekstrapolasyonu yoluyla belirli bir orifis açıklığı için açıklık alanı hesaplanabilmektedir.

Şekil 5.23. 4-Yollu Yön Valfi bloğu parametre ayar penceresi.

Oransal valfin kesin bir modelini elde etmek için, model parametreleri, akış debisi ve frekans tepkisi için üretici veri sayfasından elde edilen özelliklerin, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığı ve gerçek veriler ile simülasyon verileri arasındaki farkı en aza indirmek için parametre değerlerinin optimize edildiği bir optimizasyon prosedürü kullanılarak belirlenmiştir.

Bunun için öncelikle, Şekil 5.24a’de gösterildiği gibi Simulink ortamında üretici veri sayfasından elde edilen akış karakteristiğinin de dahil edildiği bir test modeli oluşturulmuştur. Üretici veri sayfasından alınan akış debi değerlerini karşılaştırmak için yine veri sayfasında belirtildiği gibi valf yolları arasında 35 bar’lık bir basınç farkı varken debi ölçümü yapılmıştır. Ölçülen bu değerler ve veri sayfasından elde edilen değerler (Şekil 5.24b) ile dört yollu yön valfi parametreleri optimize edilmiştir. Optimizasyon için belirlenen amaç fonksiyonu Denklem (5.27)’de verilmiştir. Burada, Q_a ve Q_r sırasıyla, ölçülen akış debisi ve veri



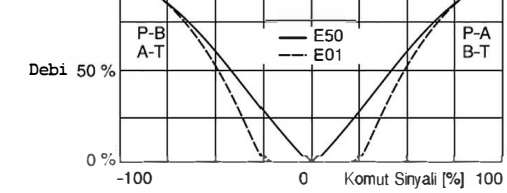
(a) Oransal valf akış test modeli

Debi Grafiği

(Pozitif Çakışık Sürgü Açıklık Noktası 23 %)

 $\Delta p = 35$ bar

Sürgü tipi E01/E50

100 % = Q_{Nom} .

(b) Veri Sayfasından elde edilen akış debi karakteristiği (E01)

Şekil 5.24. 4-Yollu Yön Valfi bloğu parametre değerlerini belirlemek için oluşturulan test modeli (a) ve akış karakteristiği (b).

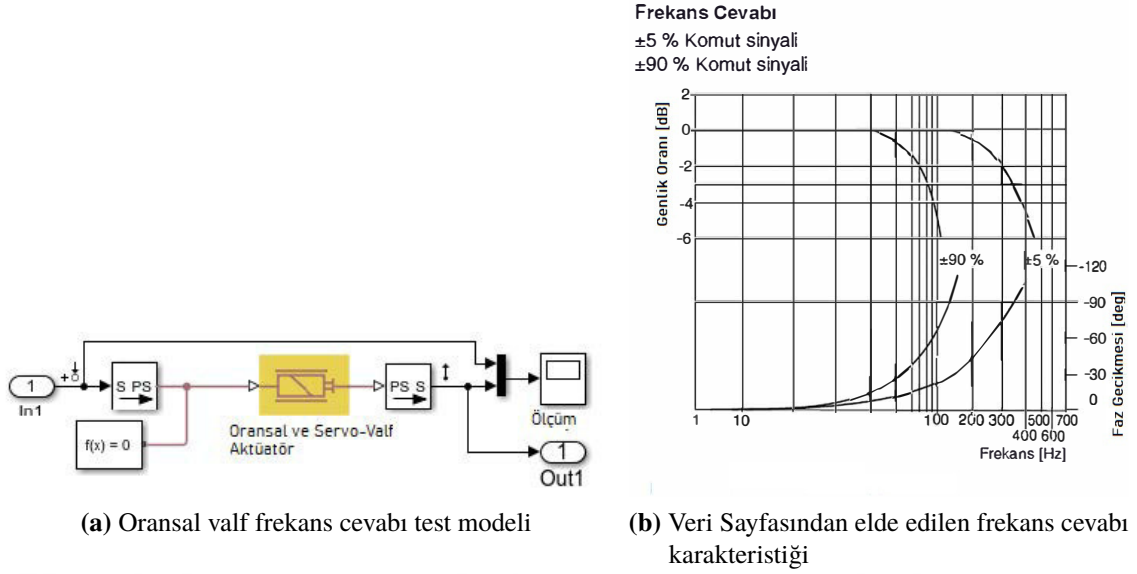
sayfası debi değerleridir. k_i ise ağırlık katsayısıdır.

$$\min F(x) = \sum_i^n k_i (Q_r - Q_a)^2 \quad (5.27)$$

Denklem (5.27)'deki değişken vektörü 21 parametreden oluşmaktadır. Valf elemanının yerdeğiştirmesi oransal valf orifisi boyunca 21 eşit yerdeğiştirme-alan çifti olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda, veri sayfası karakteristiğine mümkün olduğunca yakın benzetim sonucu sağlayan bu 21 orifis alanı değerleri tespit edilmiştir.

Yüksek derecede doğrusal olmayan yapısından dolayı elektrohidrolik sistemlerin frekans özellikleri, kontrol sinyali değeri, akışkan özelliği, besleme basıncı gibi faktörlere bağlıdır. Kontrol ünitesi modelinin parametre değerleri elde edilirken tüm bu karakteristikler dikkate alınmalıdır. Teorik olarak, frekans özellikleri yalnızca doğrusal sistemler için tanımlanmıştır. Bu nedenle, sistem modelinin doğrusal sistem analizi için uygun hale getirilmesi için doğrusallaştırılması ya da giriş ve çıkış sinyallerinin farklı frekanslardaki sinüzoidal girişler kümesinde karşılaştırılmasıyla karakteristiklerin belirlenmesi gerekir. İkinci yöntemdeki çıktı spektral analize tabi tutulmalı ve sadece baskın harmonik çıktı sinyali olarak alınmalıdır.

Oransal valf veri sayfasında sistemin frekans cevabı Şekil 5.25b'de gösterildiği gibi verilmiştir. Bu çalışma kapsamında E01 tipi oransal valf kullanılmaktadır (Bknz. Bölüm



Şekil 5.25. Oransal ve Servo-Valf Aktüatör bloğu parametre değerlerini belirlemek için oluşturulan test modeli (a) ve frekans cevabı karakteristiği (b).

7). Oransal ve Servo-Valf Aktüatör bloğu parametre değerleri, maksimum giriş değeri 10 V olan giriş sinyalinin %90'ı kullanılarak elde edilen frekans cevabı karakteristiği temel alınarak tespit edilmiştir. Bunun nedeni, çalışmada kullanılan E01 tipi oransal valfte valf elemanı açıklığının %23 nominal giriş sinyali noktasında başlamasıdır (Şekil 5.24b). Optimizasyon için belirlenen amaç fonksiyonu Denklem (5.28)'de verilmiştir. Burada, f_a ve f_r sırasıyla, ölçülen frekans cevabı değeri ve veri sayfası frekans cevabı değerleridir. k_i ise ağırlık katsayısıdır.

$$\min F(x) = \sum_i^n k_i (f_r - f_a)^2 \quad (5.28)$$

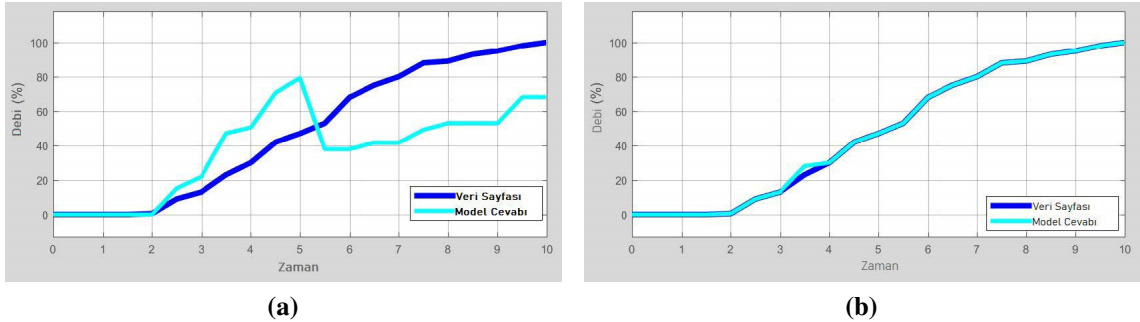
Sistem tanılaması için Denklem (5.27) ve (5.28)'de tanımlanan optimizasyon problemleri farklı optimizasyon algoritmaları ile çözülebilir, ancak bu çalışmada, problemi etkin ama basit bir uygulama ile çözebilmek için MATLAB programında bütünleşik olarak bulunan Optimization Toolbox eklentisi kullanılmıştır. Optimization Toolbox eklentisi optimizasyon problemlerinin çözümü için, *fminunc*, *fmincon*, *ga*, *pso* gibi çeşitli algoritmalara dayalı optimizasyon fonksiyonları sunmaktadır. Optimization Toolbox eklentisi hakkında daha fazla bilgiye (MATLAB Optimization Toolbox™, 2019) kullanım klavuzundan erişilebilir.

4-Yollu Yön Valfi modelinin parametrelerini belirlemek için tanımlanan optimizasyon probleminin çözümünde, kübik hat arama prosedürü ile BFGS (Broyden – Fletcher

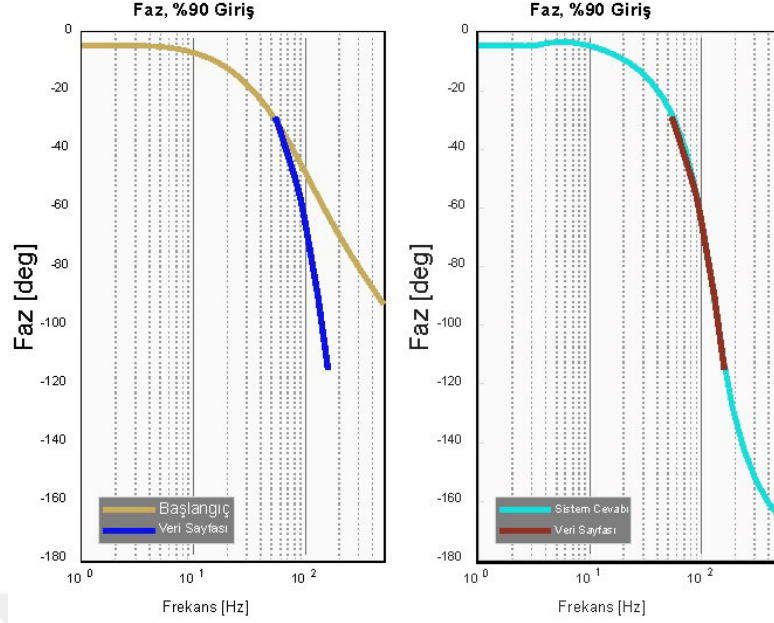
Tablo 5.5. 4-Yollu Yön Valfi modeline ait parametrelerin optimizasyon çıktısı.

Adım	Fonksiyon Sayısı	Amaç Fonksiyonu Değeri
0	21	1.12E+04
1	63	8.05E+01
2	84	1.08E+00
3	105	1.61E-02
4	126	7.99E-05
5	147	6.38E-08
6	168	1.27E-10

– Goldfarb – Shanno) Quasi-Newton metodunu kullanan *fminunc* fonksiyonu kullanılmıştır (Al-Baali ve ark., 2014). 4-Yollu Yön Valfi modelinin başlangıç parametreleri ve optimize edilmiş parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen akış karakteristikleri Şekil 5.26’da gösterilmektedir. Sistemin 10 saniyede %0-100’e yükselen giriş sinyali Şekil 5.24a’da gösterilen *Sinyal Yapılandırma* bloğu kullanılarak elde edilmiştir. Tablo 5.5’de çıktılar verilen optimizasyon 7 adım ve 168 fonksiyon değerlendirmesi gibi kısa bir sürede sonuçlanmıştır. Bu bağlamda oldukça hızlı bir şekilde 4-Yollu Yön Valfi modeline ait parametreler elde edilmiştir. Şekil 5.26b’de görüldüğü gibi, optimizasyondan elde edilen parametreler ile benzetim modeli çıktısı ve veri sayfasından alınan akış karakteristiği örtüşmektedir.

**Şekil 5.26.** 4-Yollu Yön Valfi bloğu akış karakteristiği; tanılama öncesi (a) ve tanılama sonrası (b).

Oransal ve Servo-Valf Aktüatör modelinin parametrelerini belirlemek için tanımlanan optimizasyon probleminin çözümünde, İç-Nokta Optimizasyon Algoritmasını kullanan *fmincon* fonksiyonu kullanılmıştır (Byrd ve ark., 2000; Waltz ve ark., 2006). *Oransal ve Servo-Valf Aktüatör* modelinin başlangıç parametreleri ve optimize edilmiş parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen faz frekans cevabı karakteristikleri Şekil 5.27’de gösterilmektedir. Sistemin faz frekans cevabını elde etmek için kullanılan giriş sinyali belirlenen frekans ve genlikte sinüs dalga sinyalleri üreten



Şekil 5.27. Oransal ve Servo-Valf Aktüatör bloğu frekans cevabı karakteristiği; tanıma öncesi (sol) ve tanıma sonrası (sağ).

Tablo 5.6. Oransal ve Servo-Valf Aktüatör modeline ait parametrelerin optimizasyon çıktısı.

Adım	Fonksiyon Sayısı	Amaç Fonksiyonu Değeri
0	4	4.21E+03
1	12	3.25E+03
2	17	3.19E+03
3	21	2.74E+03
4	25	9.02E+02
5	29	8.43E+02
6	33	1.12E+01
...
18	81	5.27E+00

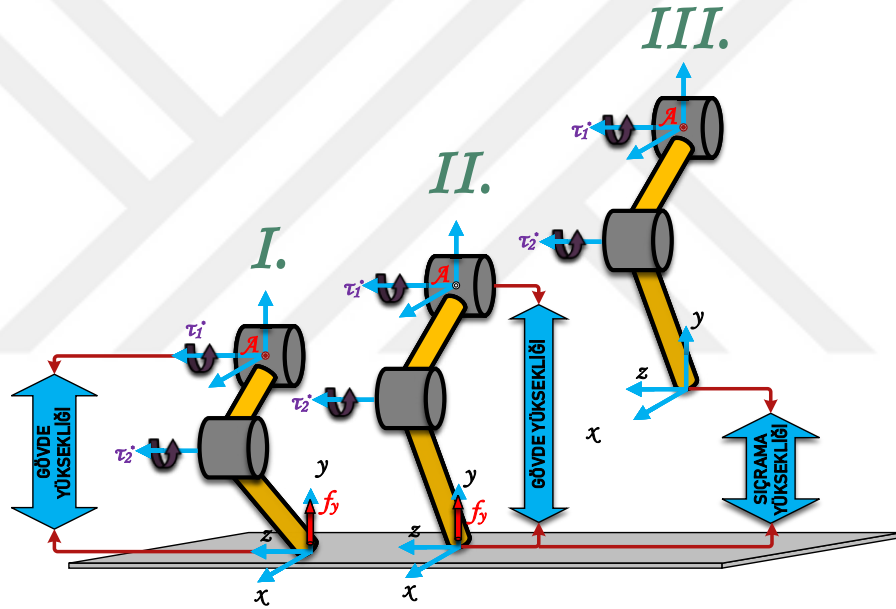
frest.Sinestream komutu kullanılarak elde edilmiştir. Tablo 5.6'de çıktıları verilen optimizasyon 18 adım ve 81 fonksiyon değerlendirmesi gibi kısa bir sürede sonuçlanmıştır. Bu bağlamda oldukça hızlı bir şekilde *Oransal ve Servo-Valf Aktüatör* modeline ait parametreler elde edilmiştir. Şekil 5.27'de görüldüğü gibi, optimizasyondan elde edilen parametreler ile benzetim modeli çıktısı ve veri sayfasından alınan faz frekans cevabı karakteristiği örtüşmektedir.

Bu çalışmada kullanılan oransal valfe benzer şekilde, doğrusal olmayan bir sistemin kesin modelini elde etmek oldukça zorlu bir görev olabilmektedir. Bu bölümde, endüstriyel bir elektrohidrolik oransal yön valfine ait parametreler optimizasyon teknikleri uygulanarak elde edilmiştir. Basit ve hızlı ancak kabul edilebilir ve geçerli sonuçlar veren bir sistem modeli elde etmek için kullanılan bu yöntem ile kısa sürede, sistemin davranışını hızlı

ve güvenilir bir şekilde araştırmak için benzetim çalışmalarında kullanılabilen, valfin doğrusallaştırılmış bir modeli kabul edilebilir bir hata payı ile oluşturulmuştur.

5.3.2. Hidrolik Eyleyici Kuvvet Profili Hesabı ve Tasarımı

Tasarlanan robotta kullanılacak eyleyici sistemin belirlenmesi, boyutlandırılması ve tasarlanması için farklı çalışma şartlarında gerekli kuvvet profillerinin tasarım aşamasında yapılan kabuller dahilinde tanımlanması gerekmektedir. Bölüm 3.2.3’de eyleyici tipinin seçimine değinilmişti, bu bölümde ise, Bölüm 3’de belirlenen performans şartları ve tasarım kriterleri dahilinde ve tasarım aşaması Bölüm 5.1’de yapılan bir takım kabuller ile eyleyici sistemin kuvvet profili oluşturulmuş, bu kuvvet profiline ve Bölüm 4.3’de belirlenen boyutlandırmalara uygun hidrolik eyleyiciler tasarlanmıştır.



Şekil 5.28. Robotun dikey sıçrama hareketini gösteren şematik çizim; (I) başlangıç durumu, (II) ayağın yerden ayrılma anı ve (III) sıçrama yüksekliği ve serbest düşüş anı.

Bölüm 5.1’de değinildiği gibi robot çalışma şartları düşünüldüğünde hidrolik eyleyici kuvvetleri bağlamında en uç durumların robotun sıçrama-zıplama hareketinde ortaya çıktığı açıktır. Bu nedenle, hidrolik eyleyicilerin kuvvet profili hesap edilirken özellikle sıçrama hareketi sırasında gerekli eklem torkları hesabı yapılmıştır. Buradan hidrolik eyleyici kuvvet profili hesaplanmıştır. Şekil 5.28’de dikey sıçrama hareketinin şematik gösterimi verilmiştir. Öncelikle, robotun sıçrama hareketi sırasında belirli bir yüksekliğe erişebilmesi için gerekli yerden ayrılma hızı, hava sürtünmesi ve yerden ayrılma esnasında enerji kaybı olmadığı kabulü ile, Denklem (5.29)’daki gibi hesaplanabilir. Burada,

v_0 , y_{max} ve g sırasıyla yerden ayrılma hızı, sıçrama yüksekliği ve yerçekimi ivmesidir.

$$v_0 = \sqrt{2gy_{max}} \quad (5.29)$$

Başlangıç şartı olarak sistemin durağan halden sıçrama yaptığı ve ivmenin dikey yönde sabit olduğu kabulü yapıldığında, sistemin durağan halden yerden ayrılma hızı v_0 'a ulaşabilmesi için gerekli ivmeyi Denklem (5.30) ile hesaplamak mümkündür. Burada, v_0 yine yerden ayrılma hızı olarak tanımlanmıştır. x_t ve a_0 sırasıyla, yerden ayrılma hızına erişebilmek için gerekli yerdeğiştirme ve ivmedir.

$$v_0 = \sqrt{2a_0x_t} \quad (5.30)$$

Denklem (5.29) ve Denklem (5.30) kullanılarak sıçrama yüksekliği ve gerekli ivmelenme arasındaki ilişki Denklem (5.31)'deki gibi yazılabilir.

$$a_0 = \frac{gy_{max}}{x_t} \quad (5.31)$$

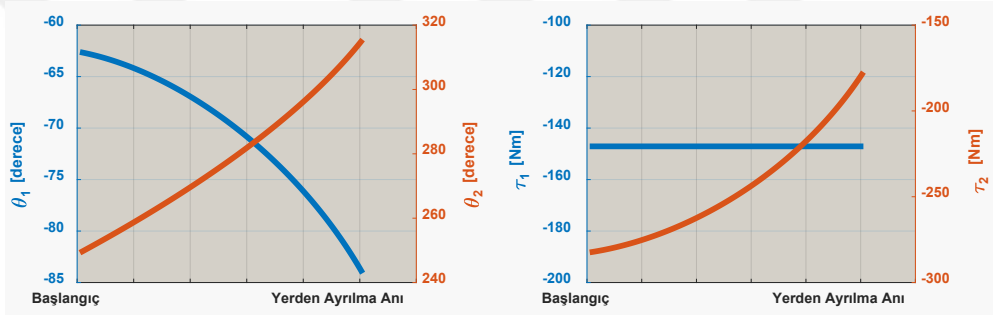
Denklem (5.31)'de açıkça görüldüğü gibi, başlangıç anından ayağın yerden ayrılma anına kadar olan yerdeğiştirme ile v_0 hızına ulaşabilmek için gerekli ivme ters orantılıdır. Bu nedenden dolayı, robotun sıçrama hareketi için gerekli ivmenin –dolaylı olarak gerekli kuvvetin– minimize edilebilmesi için, gövde yüksekliğinin başlangıç şartı mekanik kısıtlar dahilinde en az olması ve ayağın yerden ayrılma anında gövde yüksekliği mekanik kısıtlar dahilinde en fazla olması gerekmektedir. Tasarımı yapılan robot bacağın çalışma uzayı (Şekil 5.30) incelendiğinde ve hızlanmanın hidrolik eyleyici limitlerine ulaşmadan önce tamamlanabilmesi ve kinematik tekillikten kaçınma gereklilikleri dikkate alındığında, ayakucu pozisyonu -0.2 m'de iken dikey konumda gövde yüksekliği en az 0,4 m ve en fazla 0,7 m olması gerektiği görülmüştür. Kısaca, mekanik kısıtlar dahilinde robotun dikey sıçrama hareketinin ayakucu pozisyonu -0.2 m'de gövde yüksekliği 0,4 m'de başlaması ve ayağın yerden kesildiği anda gövde yüksekliğinin 0,7 m olması gerekmektedir. Bu durumda dikey yönde toplam yerdeğiştirme yani ivmelenme için kullanılacak hareket alanı 0,3 m olacaktır.

Bu değerlendirmelerden sonra ve tasarım aşaması Bölüm 5.1'de yapılan robot toplam ağırlığı ve taşıma kapasitesi kabulleri dikkate alındığında, robotun dikey sıçrama

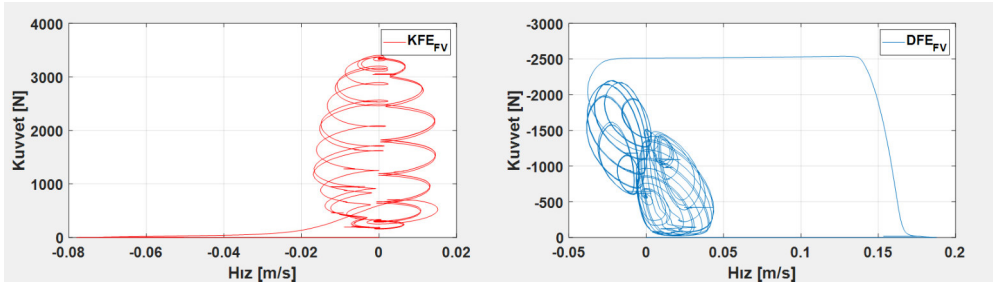
yükseklğine bağlı yer tepki kuvveti Denklem (5.32)'deki gibi hesaplanabilir.

$$f_y = \left(\frac{gy_{max}}{x_t} + g \right) m_{robot} \approx 1634,44y_{max} + 490,33 \quad (5.32)$$

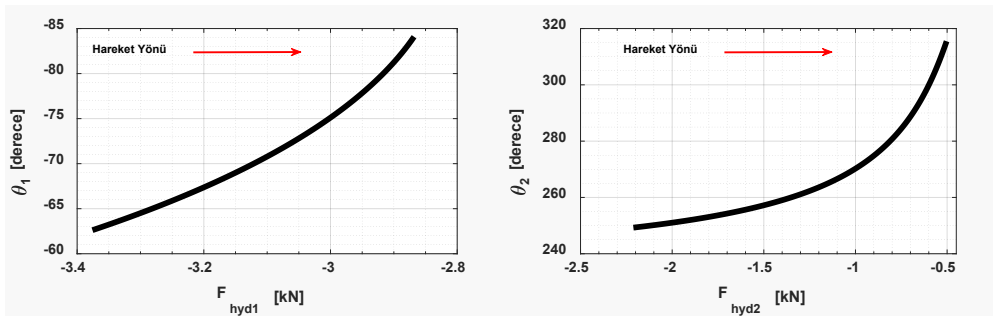
Buradan Denklem (4.92) ile Denklem (4.93) ve Bölüm 4'de belirlenen uzun boyutları kullanılarak sıçrama yüksekliğine bağlı gerekli eklem torkları ve hidrolik eyleyici kuvvetleri hesaplanabilir. Sıçrama yüksekliği, ivmelenme için kullanılabilir toplam yerdeğiştirmenin yarısı olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.29'da $y_{max} = 0.15 m$ sıçrama yüksekliği için eklem açılarının ve torklarının değışimi verilmiştir. Ayrıca burda elde edilen sonuçların doğrulaması için benzetim çalışması gerçekleştirilerek eyleyici kuvveti ve eyleyici hızlarının karşılaştırılması da elde edilmiştir. Şekil 5.29b ve 5.29c'de bu sonuçlar da gösterilmektedir.



(a) Eklem açıları ve Eklem torkları



(b) KFE ve DFE eyleyici Kuvvet-Hız grafikleri



(c) KFE ve DFE eyleyici Kuvvet grafikleri

Şekil 5.29. $y_{max} = 0.15 m$ sıçrama yüksekliği için gerçekleşen eklem açıları ve torkları ile gerekli eyleyici kuvvetleri ve hızlarını içeren grafikler.

Şekil 5.29’da açıkça görüldüğü gibi dikey zıplama hareketi sırasında en yüksek kuvvet genliği KFE eklemine tahrik eden eyleyicide meydana gelmektedir. Bu nedenden dolayı hidrolik eyleyici boyutlandırması yapılırken KFE eklemine ait kuvvet profili temel alınmıştır. Bu bağlamda, tasarımı yapılan hidrolik eyleyiciler için 3500 N genliğinde bir kuvvet üretebilmesi amaçlanmıştır. Hidrolik eyleyicilerde üretilen kuvvet Denklem (5.33)’deki gibi hesaplanabilir.

$$F_{hyd} = A_p (P_1 - P_2)$$

$$\text{İtme için; } A_p = \pi \frac{D^2}{4} \quad (5.33)$$

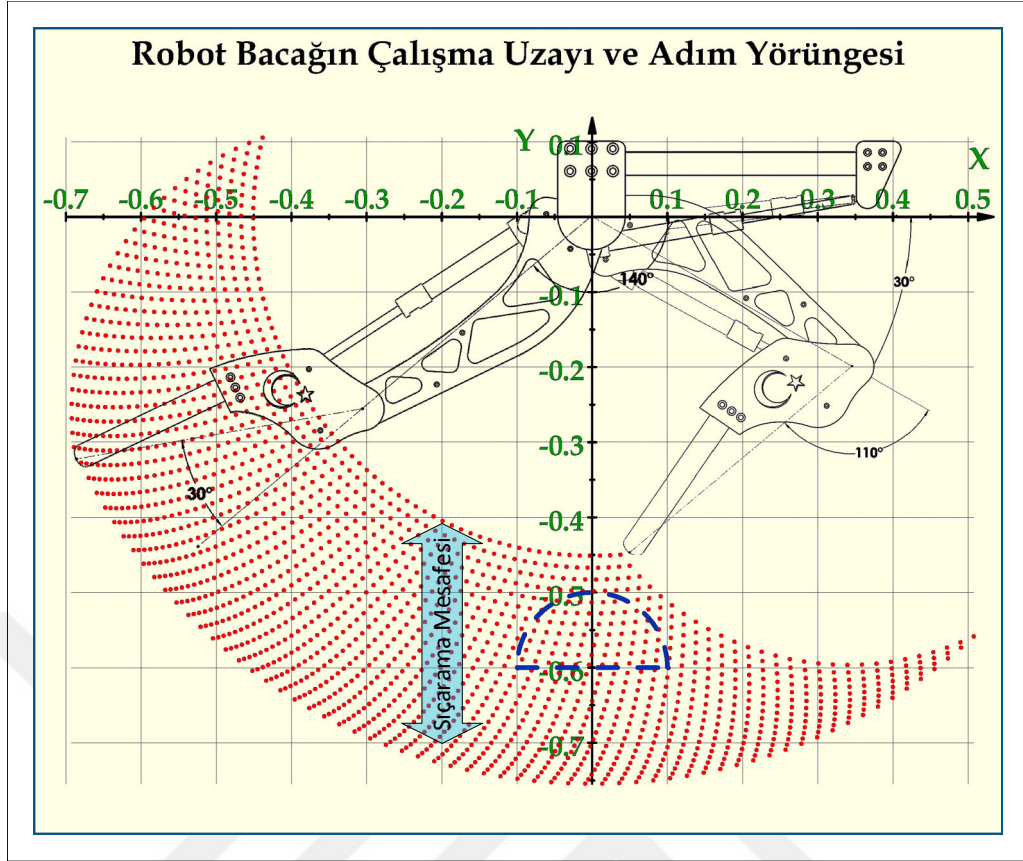
$$\text{Çekme için; } A_p = \pi \left(\frac{D - d}{2} \right)^2$$

Burada D ve d piston çapı ve mil çapı; A_p piston kesit alanı; P_1 ve P_2 ise silindir bölmelerindeki basınçlardır.

Hidrolik eyleyici tasarımı için yapılan fizibilite çalışmaları sonucunda, hidrolik bileşen üreticilerinin büyük bir kısmının standart hidrolik eyleyici kataloglarında silindir başlangıç çaplarının 32 mm olduğu görülmüştür. Bacak mekanizması tasarımında hem toplam ağırlık açısından hem de mekanik yapıya uyum açısından, standart hidrolik eyleyicilerin kullanılması tasarım kriterlerini olumsuz etkileyeceğinden dolayı daha küçük çaplarda ve bacak mekanizmasının mekanik kısıtlarına uygun piston kurslarına sahip hidrolik eyleyiciler imal edilmiştir. Bunun için öncelikle piston ve mil çapları belirlenmiştir. Denklem (5.33) kullanılarak ve hidrolik sistem çalışma basıncı (Bknz. Bölüm 7) olarak 250 bar seçildiğinde piston çapı itme için 13,35 mm hesaplanmaktadır. Bu bağlamda, bu çapa en yakın standart honlanmış boru çapı olan 16 mm piston çapı olarak seçilmiştir. Piston mili çapının belirlenmesinde ise Denklem (5.34)’de verilen Euler kritik yük formülü ile hesap edilen kritik çap dikkate alınmıştır. Burada, F_{cr} kritik yük; E Elastisite modülü; I kiriş kesiti için minimum alan atalet momenti; L desteklenmeyen kiriş uzunluğu ve K ise kirişin bağlantı koşullarına bağlı olan kirişin etkili uzunluk faktörüdür. Genelde mil

Tablo 5.7. Yapılan tasarım çalışmaları neticesinde üretimine karar verilen hidrolik eyleyici boyutlandırması ve belirlenen eklem çalışma aralığı ile bu aralığa karşılık gelen eyleyici çalışma aralığı.

Eklem	Kapalı Boy [mm]	Açık Boy [mm]	Eklem Çalışma Aralığı [derece]	Eyleyici Çalışma Aralığı [mm]
KFE	315	407	(-) 30–140	318,84 – 402
DFE	270	385	(-) 30–110	273,82 – 378



Şekil 5.30. Bacak mekanizmasının çalışma uzayı ve hidrolik eyleyicilerin belirlenen limitler dahilinde açık ve kapalı boyları ile eklem çalışma aralıklarını gösteren çizim.

imalatında kullanılan DIN ST52-3 yapı çeliği için gerekli hesaplamalar yapıldığında 3500 N genliğinde aksenal yük için kritik çap 8,68 mm olarak bulunmaktadır. Yine bu çapa en yakın standart mil çapı olan 10 mm piston mili çapı olarak seçilmiştir.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (5.34)$$

Sonuç olarak, yapılan hesaplamalar ile mekanik kısıtlar birlikte değerlendirildiğinde hidrolik eyleyici boyutları Tablo 5.7'deki gibi olmaktadır. Burada belirlenen açısal limitler, hem hidrolik eyleyiciler için kinematik tekilliklerden kaçınılması, hem de çalışma esnasında uzuvlar ve açısal konum sensörü, bağlantı elemanları gibi diğer bileşenler ile hidrolik eyleyicilerin birbirine çarpmasının engellenmesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Örneğin, KFE eklem açısı, belirlenen açısal limitten daha küçük olduğu durumlarda KFE eklemine tahrik eden hidrolik eyleyicinin çalışma doğrultusu ile dönme eksenini aynı doğrultu üzerinde olabilecektir. Bu durumda, kuvvet kolu sıfır olacağından etkiyen kuvvet uzvu dönderemeyecek ve kinematik tekillik oluşacaktır. Şekil 5.30'da bacak mekanizmasının açısal limitleri çalışma uzayı üzerinde gösterilmiştir.

5.4. Bölüm Özeti

Bu bölümde, önceden belirlenmiş tasarım kriterleri ve performans ölçütleri temel alınarak ve ayrıca birçok kez kendini tekrar eden çalışmalar neticesinde, yüksek hareket kabiliyetine sahip dört ayaklı bir robotta kullanılmak üzere robot bacak modeli tasarlanmış ve bu tasarım temel alınarak sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Robot bacak tasarımı yapılırken, dört ayaklı robot tasarımında özdeş modeller kullanılması kabulü yapılmıştır ve tasarımın gövdeye eklendiği noktada ek bir serbestlik derecesi kazanacağı öngörülmüştür. Öncelikle, tasarım çalışmaları kapsamında bacak modelinin topolojisi sağlamlık–ağırlık oranı bağlamında iyileştirilmeye çalışılmıştır. Daha sonra hareket ve yapısal analiz çalışmaları ile tasarımın yapısal anlamda geçerliliği araştırılmıştır. Eşzamanlı ilerleyen kontrolcü çalışmaları için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere geçerliliği test edilen bacak modelinin matematiksel modeli elde edilmiştir. Aynı zamanda yine benzetim çalışmaları için gerekli, ilk örnek tasarımında kullanılan hidrolik sistemin dinamik karakteristiği, optimizasyon temelli bir yaklaşımla elde edilmiştir. Son olarak hidrolik bileşen üreticilerinin standart hidrolik eyleyici kataloglarında ilk örnek tasarımında kullanılmak üzere uygun bir eyleyici bulunamadığından, ilk örnek modelinde kullanılmak üzere eyleyici tasarımı yapılmış ve modellenmiştir. Sonuç olarak dört ayaklı bir robotta kullanılmak üzere literatürde daha önce başvurulmamış topoloji optimizasyonu yaklaşımı kullanılarak enerji verimliliği açısından sağlamlık–ağırlık oranı iyileştirilmiş bir bacak modeli elde edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tasarım çalışmaları sonucunda, Bölüm 3’de belirlenen tasarım çerçevesine uygun, dört ayaklı bir robot tasarımında kullanılacak bacak modeli elde edilmiştir. Sonuçta ayaklı robot tasarımlarının en önemli bileşeninin bacak mekanizmaları olduğu gerçeğinden hareketle, tasarım çalışmalarında daha çok bacak modeli üzerine odaklanılmıştır. Çalışmanın genelinde izlenen bu yaklaşım ile ilgili daha detaylı açıklamalara Bölüm 9’de yer verilmiştir.

Sisteme ait elde edilen matematiksel modeller, giriş oransal yön valfi voltajı (U) ve çıkış eklemlerin açısal konumu (q) şeklinde tekrar düzenlenirse sistemin genel hareket denklemi Denklem (5.35)’deki gibi elde edilmektedir.

$$\ddot{q} = M^{-1}(q) (\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - N(q, \dot{q})) \quad (5.35)$$

Burada $q = (q_1, q_2)$ genelleştirilmiş koordinat vektörü, $\tau = (\tau_1, \tau_2)$ eyleyici tork vektörü, $M(q)$ atalet matrisi, $C(q, \dot{q})$ Coriolis matrisi; Coriolis ve merkez kaç kuvvetlerini içeren $C(q, \dot{q}) \dot{q}$ vektörü ve son olarak $N(q, \dot{q})$ yer çekimsel kuvvetler ve robot bacağına etki eden diğer kuvvetleri içeren matristir. Denklem (5.35)'in elemanları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Atalet matrisi;

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

$$M_{11} = m_2 l_1^2 + 2m_2 \cos(q_2) l_1 l_{2COG} + m_1 l_{1COG}^2 + m_2 l_{2COG}^2 + I_{zz1} + I_{zz2} \quad (5.37)$$

$$M_{12} = m_2 l_{2COG}^2 + m_2 \cos(q_2) l_1 l_{2COG} + I_{zz2} \quad (5.38)$$

$$M_{21} = m_2 l_{2COG}^2 + m_2 \cos(q_2) l_1 l_{2COG} + I_{zz2} \quad (5.39)$$

$$M_{22} = m_2 l_{2COG}^2 + I_{zz2} \quad (5.40)$$

Coriolis matrisi;

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (5.41)$$

$$c_{11} = (-m_2 l_1 l_{2COG} \sin(q_2)) \dot{q}_2 \quad (5.42)$$

$$c_{12} = (-m_2 l_1 l_{2COG} \sin(q_2)) \dot{q}_1 + (m_2 l_1 l_{2COG} \sin(q_2)) \dot{q}_2 \quad (5.43)$$

$$c_{21} = (m_2 l_1 l_{2COG} \sin(q_2)) \dot{q}_1 \quad (5.44)$$

$$c_{22} = 0 \quad (5.45)$$

Yer çekimsel ve diğer kuvvetleri içeren matris;

$$N(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{21} \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

$$\begin{aligned} n_{11} = & \beta_1 \dot{q}_1 - f_x (l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2)) \dots \\ & - f_y (l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2)) + gm_2 l_{2COG} \sin(q_1 + q_2) \dots \\ & + gm_2 l_1 \sin(q_1) + gm_1 l_{1COG} \sin(q_1) \end{aligned} \quad (5.47)$$

$$\begin{aligned} n_{21} = & \beta_2 \dot{q}_2 - f_x l_2 \cos(q_1 + q_2) - f_y l_2 \sin(q_1 + q_2) \dots \\ & + gm_2 l_{2COG} \sin(q_1 + q_2) \end{aligned} \quad (5.48)$$

KFE ve DFE eklemlerine uygulanan eyleyici torkları;

$$\tau_1 = F_{hyd1} a_1 \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 - (a_0 \sec \alpha_1)^2 + (s_0 + s_1)^2}{2a_1 (s_0 + s_1)} \right) \right) \quad (5.49)$$

$$\tau_2 = F_{hyd2} a_2 \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 - (a_2 \sec \alpha_2)^2 + (s_2 + s_3)^2}{2a_3 (s_2 + s_3)} \right) \right) \quad (5.50)$$

KFE ve DFE silindir kuvvetleri;

$$F_{hyd1} = A_{1p} (P_{11} - P_{12}) \quad (5.51)$$

$$F_{hyd2} = A_{2p} (P_{21} - P_{22}) \quad (5.52)$$

KFE ve DFE silindir bölmelerinde oluşan basınçlar;

$$P_{11} = \frac{\beta}{V_{11}} \int \left(Q_{11} - \frac{dV_{11}}{dt} \right) dt \quad (5.53)$$

$$P_{12} = \frac{\beta}{V_{12}} \int \left(\frac{dV_{12}}{dt} - Q_{12} \right) dt \quad (5.54)$$

$$P_{21} = \frac{\beta}{V_{21}} \int \left(Q_{21} - \frac{dV_{21}}{dt} \right) dt \quad (5.55)$$

$$P_{22} = \frac{\beta}{V_{22}} \int \left(\frac{dV_{22}}{dt} - Q_{22} \right) dt \quad (5.56)$$

KFE ve DFE oransal yön valfi portlarındaki debiler;

$$Q_1 = C_d \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} |\Delta P_1| \cdot \text{sign}(\Delta P_1)} \quad (5.57)$$

$$A_1 = \frac{A_{1max}}{h_{1max}} \cdot h_1 \quad (5.58)$$

$$h_1 = x_{01} \pm x_1 \quad (5.59)$$

$$Q_2 = C_d \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} |\Delta P_2| \cdot \text{sign}(\Delta P_2)} \quad (5.60)$$

$$A_2 = \frac{A_{2max}}{h_{2max}} \cdot h_2 \quad (5.61)$$

$$h_2 = x_{02} \pm x_2 \quad (5.62)$$

KFE ve DFE oransal yön valfi sürgü dinamiği;

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = \omega_n^2 U_1 - 2\zeta \omega_n \frac{d^2 x_1}{dt^2} - \omega_n^2 \quad (5.63)$$

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \omega_n^2 U_2 - 2\zeta \omega_n \frac{d^2 x_2}{dt^2} - \omega_n^2 \quad (5.64)$$

6. BACAK MEKANİZMASININ KONTROLÜ

Bu bölümde, tasarımı yapılan bacak mekanizmasının konum kontrolü için kontrolcü tasarımına yer verilmiştir. Bölüm 5’de elde edilen fiziksel ve matematiksel modeller kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları sonucu tasarlanan kontrolcülerin performansları değerlendirilmiş ve optimizasyon teknikleri uygulanmıştır. Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan algoritmalar problem tanımı ile birlikte açıklanmıştır.

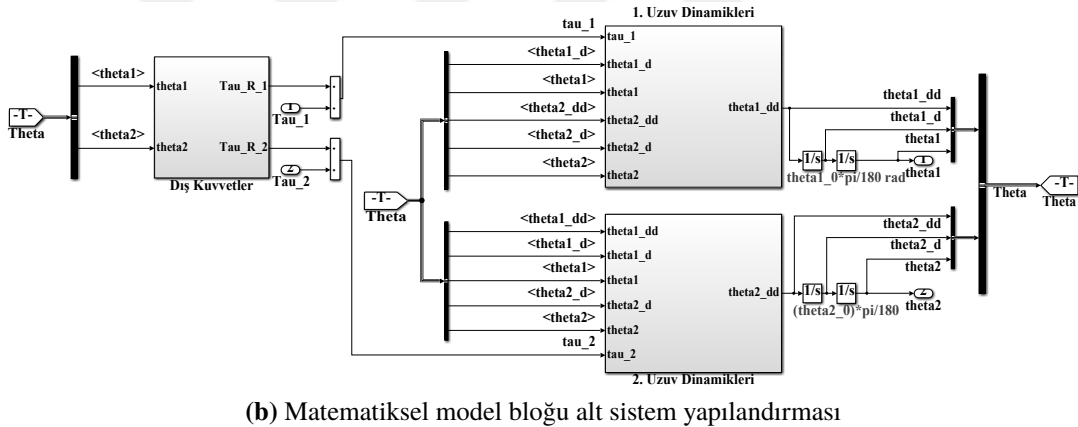
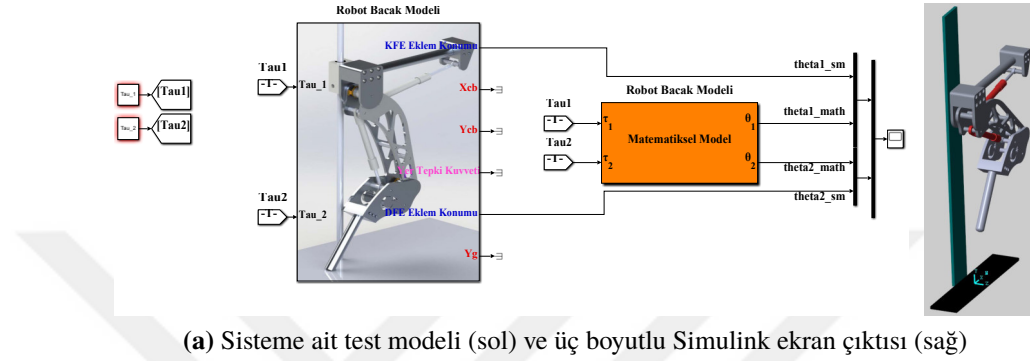
Öncelikle, robot bacağın önceden tanımlanmış bir adım yörüngesinin takip edilebilmesi için eklemlere uygulanan torkların ne olması gerektiğiyle ilgilenen konum kontrolü probleminde bir çözüm aranmıştır. Daha sonra, konum kontrolü probleminin çözümü için tasarlanan farklı algoritmalara sahip kontrolcülerin performansları karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiş ve konum kontrolü performansını artırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Tasarlanan kontrolcülerin performanslarının değerlendirilebilmesi için yapılan benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden, bölümün devamında ilk önce, benzetim çalışmalarında kullanılan model tanıtılmıştır.

6.1. Benzetim Modelinin Tanımlanması

Gerçek sistemlerin sanal bir temsilini oluşturma biçimi olan modelleme ile farklı koşullar altında sistem davranışını inceleyebilmek için benzetimler gerçekleştirilebilir. Özellikle, gerçek sistemler ile oluşturulması güç olan test koşullarının incelenmesinde ve tasarım sürecinin ilk evrelerinde modelleme ve benzetim çalışmaları oldukça önemlidir. Benzetim çalışmaları ile kontrol sistemleri gibi dinamik sistemlerin hızlı ve etkili bir biçimde geliştirebilmesi mümkündür. Bu bağlamda, kontrolcü tasarım çalışmalarında farklı algoritmaların performansını değerlendirebilmek için Bölüm 5’de elde edilen fiziksel ve matematiksel modeller kullanılarak bir benzetim modeli oluşturulmuştur.

Benzetim çalışmaları, Matlab ile bütünleşik çalışan, sistem düzeyinde tasarım, benzetim, otomatik kod oluşturma ve gömülü sistemlerin sürekli test edilmesi ve doğrulanması için özelleştirilebilir blok kütüphaneleri sunan Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Simulink ortamında hızlı bir şekilde fiziksel sistem modelleri oluşturulmasına olanak sağlayan Simscape eklentileri ile doğrudan blok diyagramları ve diğer model paradigmalarıyla bütünleşik fiziksel bağlantılara dayalı bileşen modelleri oluşturulabilmektedir. Sistem modelinin oluşturulmasında, Simulink ortamına entegre bir şekilde bulunan, me-

edilen katı model doğrudan Simulink ortamına aktarılmıştır. Hidrolik model ise, yine Bölüm 5’de elde edilen hidrolik eyleyici sistemine ait bileşenler ve bu bileşenlere ait parametreler ile Simscape Fluids kütüphaneleri kullanılarak Simulink ortamına aktarılmıştır. Şekil 6.2’de 1. Uzuu alt sistemi ve DFE Hidrolik Silindir alt sistemi bloklarının yapısı verilmiştir. Okunabilirlik açısından benzetim modelinde bulunan diğer blokların yapıları verilmemiştir, ancak Şekil 6.2’de gösterilen bloklar ile benzer şekilde yapılandırılmışlardır.



Şekil 6.3. Benzetim modeli doğrulaması için Simulink ortamında oluşturulan test modeli.

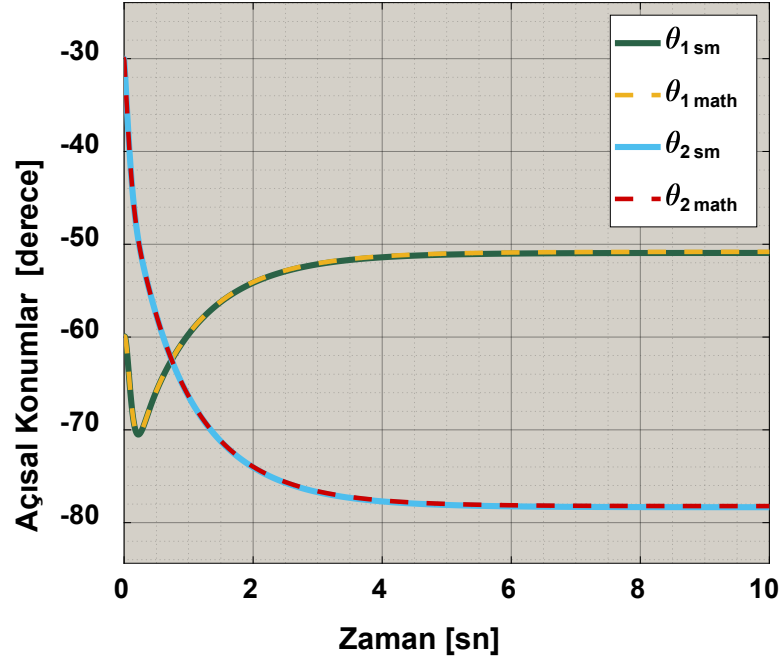
Oluşturulan bu model ile gerçekleştirilecek benzetim çalışmalarından elde edilecek sonuçların geçerliliğinin test edilmesi gerekmektedir. Tasarım aşamalarının ilk evrelerinde henüz bir ilk örnek olmadığı için bu doğrulama işlemi ancak matematiksel model ile yapılabilir. Bu bağlamda, Simulink ortamında elde edilen sanal model ile matematiksel modelin karşılaştırma çalışmaları yapılmıştır. Bunun için Şekil 6.3a’da gösterilen bir test düzeneği modeli oluşturulmuştur. Burada, belirli başlangıç şartları altında sistem davranışı gözlenmiş ve her iki model karşılaştırılmıştır. Test düzeneği oluşturulurken, Şekil 6.3a’da gösterildiği gibi bacağın kızak üzerindeki bir noktada sabit durduğu varsayımı yapılmıştır, ayrıca oransal yön valf modeli elde edilirken veri sayfası kullanıldığı için hidrolik sistem modeli ihmal edilmiştir ve eklemlere istenen torqların hidrolik sistem

tarafından uygulanabildiği varsayımı yapılmıştır. Denklem (5.24) kullanılarak sistem dinamiklerinin Simulink ortamına aktarılmasıyla elde edilen matematiksel model bloğunun yapısı Şekil 6.3b’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Test modelinde kullanılan sistem parametreleri ve başlangıç şartları.

Parametre	Değer	Birim
KFE eklemi başlangıç konumu (θ_{1_0})	-60°	[derece]
DFE eklemi başlangıç konumu (θ_{2_0})	-30°	[derece]
KFE eklemine uygulanan tork (τ_{1_0})	6	[N.m]
DFE eklemine uygulanan tork (τ_{2_0})	-2	[N.m]
Ayakucuna uygulanan x-yönündeki kuvvet (F_{x_0})	-10	[N]
Ayakucuna uygulanan y-yönündeki kuvvet (F_{y_0})	-20	[N]
KFE ve DFE eklemlerinin sönümleme katsayısı (β)	2	[N.m.s/rad]

Modelin doğruluğunu test etmek için kullanılan başlangıç şartları ve sistem parametreleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Tanımlanan bu başlangıç şartları ile gerçekleştirilen benzetim sonucu Şekil 6.4’de verilmiştir. Grafikten açıkça görüldüğü üzere, benzetim modelinden ve matematiksel modelden elde edilen sonuçlar arasında kesin bir benzerlik bulunmaktadır. Sonuç olarak, matematiksel model ile doğrulaması yapılmış bir benzetim modeli elde edilmiştir. Bölümün devamında, aksi belirtilmedikçe, kontrolcü tasarımı çalışmaları bu bölümde elde edilen benzetim modeli ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4. Belirlenen başlangıç şartları ile yapılan benzetim çalışması ve matematiksel model karşılaştırması.

6.2. Konum Kontrolü

Denklem (5.24)'de tanımlanan dinamiklere sahip bir robot bacağıın, θ_r fonksiyonu şeklinde tanımlanmış bir yörüngeyi takip etmesi için gerekli eklem torkları Denklem (6.1)'deki gibi hesaplanabilir.

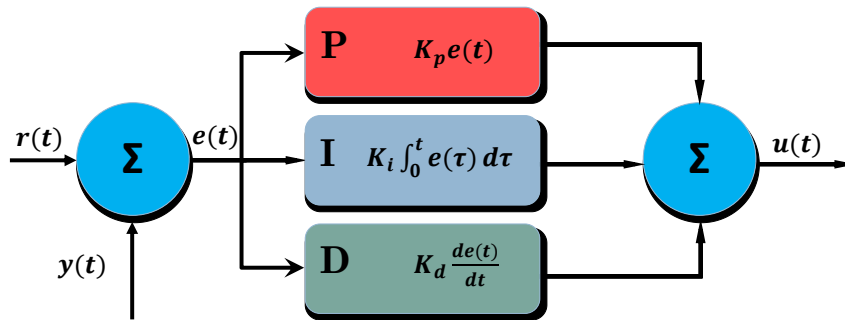
$$\tau = M(\theta_r)\ddot{\theta}_r + C(\theta_r, \dot{\theta}_r)\dot{\theta}_r + N(\theta_r, \dot{\theta}_r) \quad (6.1)$$

Sistem durumlarının kullanılmadığı, yani geribeslemenin olmadığı *Açık Çevrim* kontrol yasası olarak bilinen bu yaklaşımda, sisteme ait dinamik eşitliklerin sistem davranışını tam anlamıyla ifade etmesi, yani mükemmel bir sistem modelinin kullanılması, bununla birlikte iç veya dış bozucu etkilerin olmaması gerekmektedir. Ayrıca, sistemin başlangıç şartlarının, $\theta(0) = \theta_r(0)$, $\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_r(0)$, şeklinde olması gerekmektedir. Çünkü, pozisyon geribeslemesi olmadığı için robotun anlık pozisyonu bilinemeyeceğinden dolayı, $\theta(0) \neq \theta_r(0)$ olduğu durumlarda veya bozucu etkilerin olduğu durumlarda oluşan izleme hataları açık çevrim kontrol yaklaşımı ile giderilemez. Bu yüzden, gerçekleşen robot yörüngesinin, takip edilmesi istenen yörüngeye yakınsamasını sağlayacak bir durum geribeslemesinin yapıldığı *Kapalı Çevrim* kontrol yaklaşımına ihtiyaç vardır.

Literatürde robotların konum kontrolüne uygulanabilecek bir çok kontrol tekniği ve yöntem vardır. Bu tez çalışması kapsamında, robot bacağıın kontrolü için Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrolcü, Bulanık Mantık (BM) kontrolcü, Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık (ANFIS) kontrolcü yaklaşımları incelenmiştir.

6.2.1. PID Kazançların Optimizasyon Temelli Belirlenmesi

Doğrusal olmayan bir sistemin bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmasına dayanan doğrusal bir kontrolcü tasarlanması, doğrusal olmayan sistemler için kontrolcü



Şekil 6.5. PID kontrol algoritmasının blok diyagram gösterimi.

sentezine yönelik sıklıkla başvuru olan bir yaklaşımdır. Bu bağlamda, PID kontrol, basit ama etkili olmasından ve uygulanmasının kolaylığından dolayı literatürde en sık başvuru olan kontrolcü yaklaşımıdır. Özellikle, sistemin matematiksel modelinin bilinmediği ve dolayısıyla analitik tasarım yöntemlerinin kullanılmadığı durumlarda, PID kontrol yaklaşımı oldukça kullanışlı olmaktadır. Doğrusal olmayan sistemlerde optimal bir kontrol sunmasa da, proses kontrol sistemleri alanında, konvansiyonel veya modifiye edilmiş PID kontrol yaklaşımlarının kabul edilebilir bir kontrol sunduğu bilinmektedir (Ogata, 2010).

Konvansiyonel PID kontrol algoritması, Şekil 6.5’de gösterildiği gibi izleme hatasına dayalı bir kontrol çıktısı hesaplamaktadır. İzleme hatası, istenen bir ayar noktası, $r(t)$ ile sistemin gerçekleşen çıktısı, $y(t)$ arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Denklem (6.2)’de kontrolcü çıkışı, $u(t)$ üreten konvansiyonel bir PID kontrolcünün matematiksel modeli verilmiştir. Burada, K_p , T_i ve T_d sırasıyla oransal kazanç, integral zamanı ve türev zamanı sabitidir. $e(t) = r(t) - y(t)$ ise izleme hatası olarak tanımlanmıştır.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (6.2)$$

$$u(t) = K_p \left((b \cdot r(t) - y(t)) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d(c \cdot r(t) - y(t))}{dt} \right) \quad (6.3)$$

Denklem (6.2)’de açıkça görüleceği üzere, kontrol sistemi, hatanın ani değişimine neden olan bir basamak girişe maruz kaldığında, türev etki, kontrolcü çıkışında ani yükselmeler meydana getirerek bir impuls etkisine yol açmaktadır. PID kontrol algoritmasını modifiye edip, türev etkiyi geribesleme yani sistemin gerçekleşen çıktısı üzerine uygulayarak, kontrol sistemini, türev vuruş¹ olarak bilinen bu olaydan arındırmak mümkündür. Bununla birlikte, basamak girişe maruz kalan kontrol sisteminde, kontrolcü çıkışında oransal kazanç etkisine bağlı bir basamak artış meydana gelmektedir. Bu etkinin de istenmediği durumlarda yine oransal etkiyi geribesleme üzerine uygulamak mümkündür. Bu şekilde giriş sinyalinin, konvansiyonel PID algoritmasındaki oransal ve türev kazançlar üzerindeki etkisinin azaltılması ile İki Serbestlik Dereceli bir Oransal-İntegral-Türevsel (2-DOF PID) kontrol algoritması elde edilmektedir. Denklem (6.3)’de kontrolcü çıkışı $u(t)$ üreten bir 2-DOF PID kontrolcünün matematiksel modeli verilmiştir. Burada, yukarıda tanımlanan notasyonlar geçerli olmakla birlikte, b giriş sinyalinin oransal etki üzerindeki ağırlığı ve c ise türev etki üzerindeki ağırlığı olarak tanımlanmıştır. Literatürde, bu şekilde farklı algoritmaları

¹derivative kick

temel olarak geliştirilen bir çok modifiye edilmiş PID kontrol algoritması mevcuttur. Ancak bu çalışmada, konvensiyonel bir PID kontrolcü tasarımı üzerine odaklanıldığından PID kontrol algoritmaları ile ilgili daha fazla detay verilmemiştir. Konuyla ilgili daha detaylı bilgiye şu eserlerden ulaşılabilir; (Ogata, 2010) ve (Åström ve Hägglund, 2006a).

Kontrolcü tasarımı yapılacak sistemin matematiksel modeli elde edilebiliyorsa, sistemin istenen geçici ve kararlı durum özelliklerini karşılayabilecek kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi olarak bilinen kazanç ayarlanması çeşitli tasarım teknikleri uygulanarak yapılabilir. Sistemin, zaman alanı yada frekans alanı cevabını temel olarak kontrol sisteminin kutuplarını, sıfırlarını yada kazançlarını eklemek, değiştirmek veya kaldırmak için grafiksel yöntemler kullanılabilir. Sistemin geçici durum karakteristiğini değiştirmek için kök eğrisi grafiğinde kazancın, kutupların ve sıfırların düzenlenmesine dayalı kök yer eğrisi metodu en bilinen grafiksel yöntemdir. Bunun yanında, bir diğer grafiksel yöntem olan Bode diyagramı metodunda ise sistemin frekans cevabının bant genişliği ve tasarımı istenen kazanç ve faz marjın karakteristiklerine göre ayarlanmaktadır. Frekans cevabına dayalı bu yaklaşım Nichols Grafik yöntemi ile de yapılabilmektedir. Grafiksel yöntemler, birbirlerine üstünlüklerinden ziyade birbirlerini tamamlayıcı yöntemlerdir. Örneğin, Bode diyagramı metodu ile istenen frekans cevabı elde edildikten sonra kök yer eğrisi metodu ile zaman alanı cevabı ayarlanabilir.

Grafiksel yöntemlerden farklı olarak kazançların otomatik ayarlandığı yöntemler de vardır. Bunlar arasında, literatürde en çok bilinen yöntem Ziegler–Nichols (Z–N) metodudur (Ziegler ve Nichols, 1942, 1993). Z–N metodunda hem zaman alanında hem de frekans alanında olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır (Åström ve Hägglund, 2006b,c). Z–N metodu kabul edilebilir bir sonuç vermektense ziyade kazanç değerleri için bir tahmin sunmaktadır ve kazançların ayarlanması için bir başlangıç noktası sağlamaktadır. Bu metod dışında literatürde klasik PID kontrolcü tasarım formülleri olarak adlandırılan, M-Kısıtlı İntegral Kazanç Optimizasyonu¹ temelli yaklaşımlar (Åström ve Hägglund, 1995, 2004), Chien-Hrones-Reswick metodu (Chien ve ark., 1972), Skogestad İçsel Model Kontrol (Skogestad, 2003) yaklaşımları gibi birçok yöntem vardır. Ayrıca, kazançların otomatik olarak ayarlandığı bir diğer yöntem ise optimizasyon temelli yaklaşımlardır. Bu yöntemde, zaman alanı veya frekans alanı cevap karakteristiklerinin belirlenen tasarım kriterlerini karşılaması için kazançlar optimizasyon teknikleri ile ayarlanmaktadır.

¹M-constrained integral gain optimization

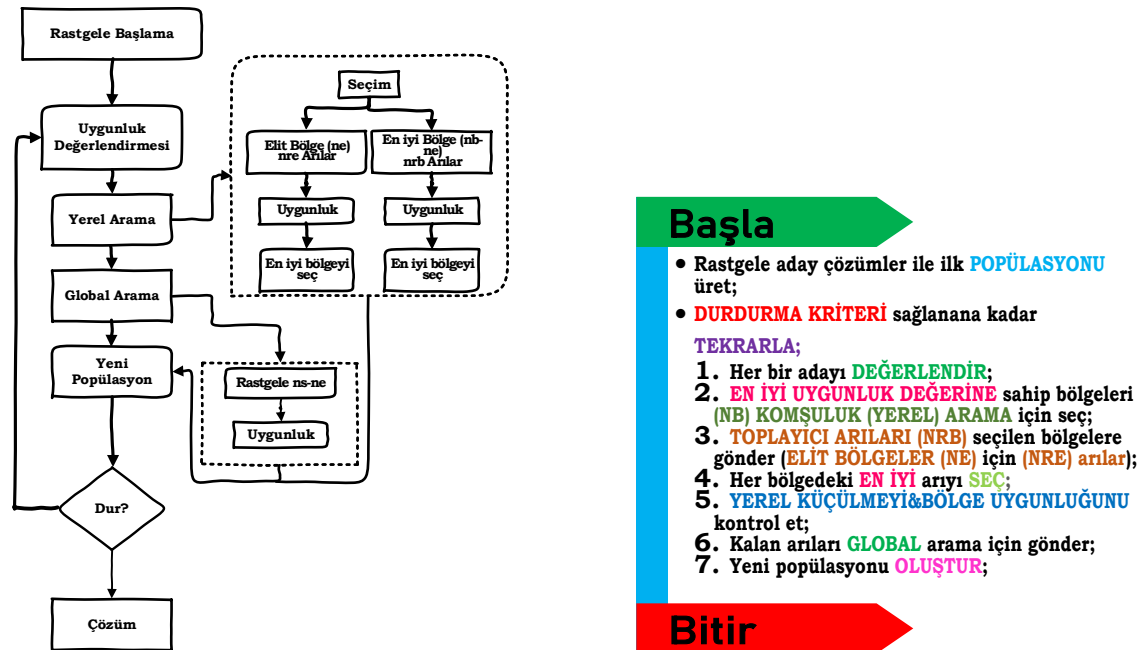
Bu çalışmada, optimizasyona dayalı PID kontrolcü otomatik kazanç ayarlama yaklaşımı kullanılarak kazançlar belirlenmiştir. Bu bağlamda, basamak giriş cevabı için kalıcı hata, maksimum aşma, oturma zamanı gibi sistemin geçici ve kararlı durum karakteristiklerini iyileştirmeyi temel alan bir amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Optimizasyon süresince, belirlenen amaç fonksiyonu iyileştirilmeye çalışılmış, bu sayede optimal bir PID kontrol için kazançların ayarlanması hedeflenmiştir.

$$\Phi_{PID} = \min \sum (a_1(t_s - t_i)^2, a_2 M_o^2) \quad (6.4)$$

Belirlenen amaç fonksiyonu Denklem (6.4)'de tanımlanmıştır. Burada, a_i ile gösterilen katsayılar, ilgili parametrenin amaç fonksiyonu içerisindeki ağırlığı olarak; t_s ve t_i gerçekleşen oturma zamanı ve istenen oturma zamanı olarak; M_o gerçekleşen maksimum aşma olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan amaç fonksiyonu ile belirlenen bir süreden önce aşmanın olmadığı bir oturma zamanı hedeflenmektedir.

6.2.2. Arı Algoritması ve Optimizasyon Süreci

Denklem (6.4) ile tanımlanan optimizasyon probleminin çözümünde, bal arılarının kaynak arama davranışını taklit eden popülasyon tabanlı metasezgisel bir arama algoritması olan Arı Algoritması (AA) kullanılmıştır. Pham ve ark. (2005) tarafından geliştirilen AA, Bilgisayar Bilimi ve Yöneylem Araştırmasında, Sürü Zekası alanına ve daha genel olarak



Şekil 6.6. Arı Algoritması akış diyagramı (sol) ve sözde kodu (sağ).

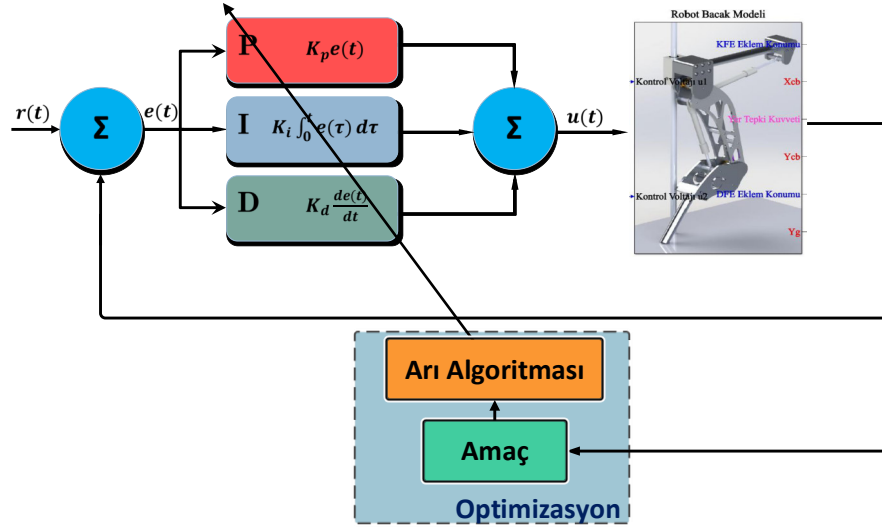
Hesaplamalı Zeka ve Metasezgisel alanlarına dahil bir algoritmadır. AA, global arama ile birleştirilen bir tür yerel arama gerçekleştirir ve hem kombinasyonel optimizasyon hem de fonksiyonel optimizasyon için uygulanabilmektedir (Pham ve ark., 2006). AA'nın etkinliği ve kendine özgü becerileri literatürde farklı optimizasyon problemlerinin çözümü üzerine yapılan çalışmalar ile kanıtlanmıştır (Fahmy ve ark., 2012; Pham ve Castellani, 2014, 2015; Nasrinpour ve ark., 2017).

Şekil 6.6'da sözde kodu ve akış diyagramı verilen AA, çözüm uzayını araştırmak için yapay arılardan oluşan sürü zekasına sahip bir popülasyonu kullanmaktadır. Bu popülasyonun izci arılardan (ns) oluşan bir kısmı çözüm uzayını globalde rastgele örnekleyip yüksek uygunluk bölgelerini belirlemekte ve popülasyondaki geriye kalan toplayıcı arılar (nrb) bu bölgelere yakın alanlarda yerel arama yapmaktadır. Algoritma, *alan küçültme* ve *alan terk etme* diye iki sezgisel özelliğe sahiptir. Alan küçültme sezgisi ile izci tarafından belirlenen bir alanda toplayıcı tarafından yapılan yerel arama gelişimi yavaşladığında, yerel aramanın boyutları devamlı olarak t iterasyon sayısı olmak üzere $ngh(t+1) = 0,8.ngh(t)$ sezgisel formülüne göre her çevrimde küçültülmektedir. Alan terk etme sezgisi ile belirlenen bir yerel arama gelişimindeki durgunluk sayısına (stlim) ulaşıldığında alan terk edilmekte ve yerel arama rastgele seçilmiş farklı bir alanda yeniden başlatılmaktadır. AA ile ilgili daha detaylı bilgiye Pham ve Castellani (2009)'nin çalışmasından ulaşılabilir.

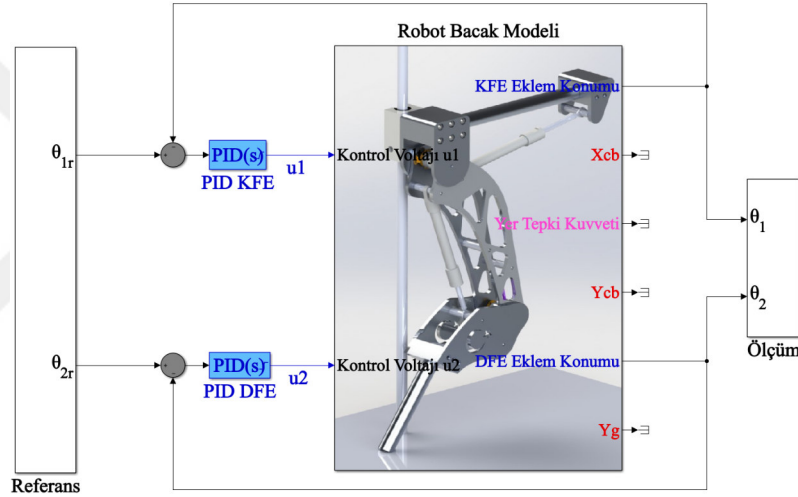
Tablo 6.2. Arı Algoritması parametreleri ve çalışmada kullanılan değerler.

Parametre ve Açıklaması	Değeri
ns izci arı sayısı	12
ne elit bölge sayısı	2
nb en iyi bölge sayısı	10
nre elit bölge arı sayısı	20
nrb en iyi bölge arı sayısı	10
nhg(0) yerel bölge ilk boyutu	1
stlim durgunluk döngü limiti	10

Algoritma, ayarlanması gereken bir takım parametrelere sahiptir. Tablo 6.2'de tanımları ile birlikte algoritma parametreleri ve bu çalışmada kullanılan değerler verilmiştir. AA, Matlab programlama dilinde akış diyagramına ve tabloda belirtilen değerlere uygun olarak programlanmıştır. PID kazançlarının optimizasyon süreci Şekil 6.7'de şematik olarak gösterilmiştir. Burada, optimizasyon evresi Matlab ortamında elde edilen program ile yürütülürken, robot bacak modeli ve PID bloğundan oluşan evre Simulink ortamında, Şekil 6.8'de gösterildiği gibi, Bölüm 6.1'de tanımlanan model ve parametrik tasarlanmış PID



Şekil 6.7. Arı Algoritması temelli PID kazançlarının optimizasyon sürecini tanımlayan şematik gösterim.



Şekil 6.8. Arı Algoritması temelli PID kazançlarının optimizasyonunda zaman alanı cevabı karakteristiklerinin elde edildiği Simulink modeli.

kontrolcü blokları kullanılarak yürütülmüştür. Matlab ve Simulink ortamlarının bütünleşik yapısı sayesinde evreler arasında optimizasyon işlemi süresince çevrimiçi veri alışverişi yapılabilmektedir. Matlab ortamında çalışan algoritmanın arama uzayında belirlediği olası çözümler ile Simulink ortamında benzetimler gerçekleştirilerek, olası çözümlerin Denklem (6.4) ile tanımlanan amaç fonksiyonu ile değerlendirilebilmesi için gerekli zaman alanı cevabı karakteristikleri elde edilmiştir. Optimizasyon işlemi için tanımlanan arama

Tablo 6.3. Optimizasyon işlemi için belirlenen arama uzayı sınırları ve başlangıç değerleri.

	$K_{P_{KFE}}$	$K_{P_{DFE}}$	$K_{I_{KFE}}$	$K_{I_{DFE}}$	$K_{D_{KFE}}$	$K_{D_{DFE}}$
Alt Limit	0	0	0	0	0	0
Üst Limit	10	10	3	3	2	2
Başlangıç	8	3	1,1	0,9	0,15	0,7

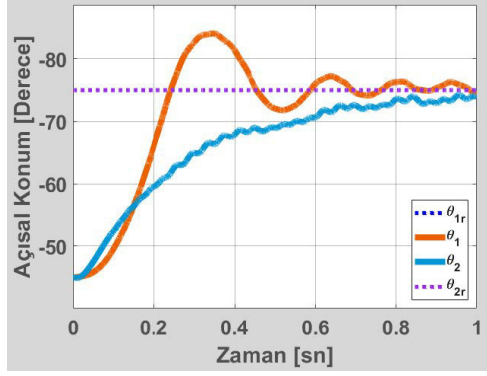
Tablo 6.4. Optimizasyon işleminden önceki ve sonraki kazançlar ile sistemin zaman alanı cevabı karakteristikleri.

	Önce	Sonra	Aşma [%]	Oturma Zamanı [sn]	Yükselme Zamanı [sn]
K_{PKFE}	8	6,3895			
K_{IKFE}	1,1	0,1378	12,97 \rightarrow 0,038	0,982 \rightarrow 0,491	0,142 \rightarrow 0,335
K_{DKFE}	0,15	0,2784			
$K_{P_{DFE}}$	3	5,7402			
$K_{I_{DFE}}$	0,9	0,1654	0,516 \rightarrow 0	0,937 \rightarrow 0,638	0,552 \rightarrow 0,449
$K_{D_{DFE}}$	0,7	0,3214			

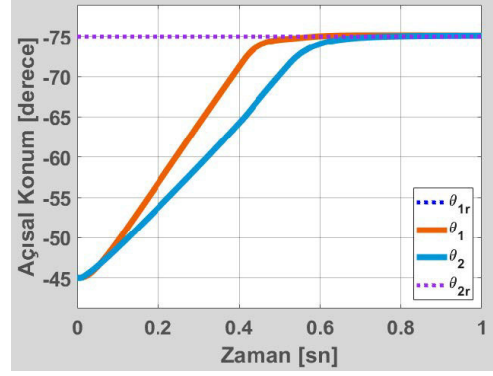
uzayı sınırları ve optimizasyon öncesi deneme–yanılma yöntemi ile belirlenen kazançlar Tablo 6.3’de tanımlanmıştır. Bu limitlerin belirlenmesinde, deneme–yanılma yöntemi ile belirlenen kazançlar temel alınmıştır.

Kazançların optimize edilmesi için gerçekleştirilen benzetim çalışmasında, hidrolik sistem basıncı 30 bar, KFE ve DFE eklemlerinin başlangıç konumu derece cinsinden $\theta_1 = \theta_2 = -45^\circ$ ve basamak giriş $s = -30^\circ$ olacak şekilde $\theta_{1ref} = \theta_{2ref} = -75^\circ$ olarak tanımlanmıştır. Konumların geribeslemesi yine derece cinsinden yapılmıştır. Son olarak, Denklem (6.4)’de tanımlanan amaç fonksiyonundaki istenen oturma zamanı 0,5 sn, a_1 ve a_2 ağırlıkları 10 ve 0,5 olarak tanımlanmıştır ve benzetim süresi 1 sn ile sınırlandırılmıştır. Belirlenen başlangıç şartları ve amaç fonksiyonu ile gerçekleştirilen optimizasyon işlemi, Tablo 6.2’de tanımlanan parametreler kullanılarak 100 defa ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Her optimizasyon işlemi, 100 iterasyon tamamlanana kadar veya amaç fonksiyonu değeri $\Phi_{PID} \leq 0,001$ şartını sağlayan bir çözüme ulaşıncaya kadar devam ettirilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen kazanç değerleri ve kazanç ayarlaması sonucunda sistemin zaman alanı cevabında elde edilen iyileştirmeler Tablo 6.4’de verilmiştir. Elde edilen kontrolcünün etkinliğini değerlendirebilmek için sisteme farklı yapılar da girişler uygulanmış ve sonuçlar Şekil 6.9’da verilmiştir. Kare dalga girişi sırasında hidrolik eyleyici sistemin uzuvlara uyguladığı kuvvet grafikleri Şekil 6.10’da verilmiştir.

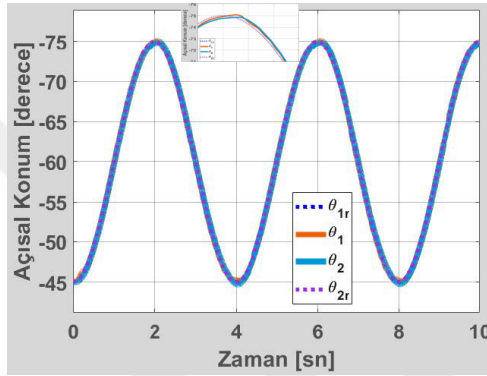
Şekil 6.9 ve Tablo 6.4 değerlendirildiğinde, sistemin optimizasyon işleminden önceki cevabı (Şekil 6.9a) belirlenen amaç fonksiyonu dahilinde iyileştirilerek hedeflenen zaman alanı karakteristiklerine ulaşıldığı görülmektedir. Ancak, doğrusal olmayan sistemlerde kazanç ayarlaması yapılan çalışma noktasından uzaklaştıkça, her ne kadar optimum kazanç ayarlaması yapılsa da, PID kontrol algoritmasının doğrusal yapısından dolayı kontrolcü performansı düşmektedir. Bu sebeple, yüksek derecede doğrusal olmayan sistemlerde daha sofistike bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Bölümün devamında bu soruna bir yanıt aranmıştır.



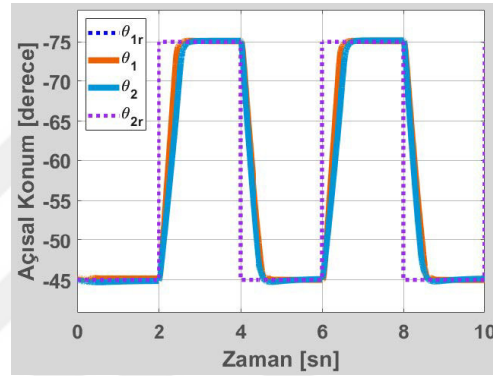
(a) Optimizasyon öncesi sistemin basamak giriş cevabı



(b) Optimizasyon sonrası sistemin basamak giriş cevabı

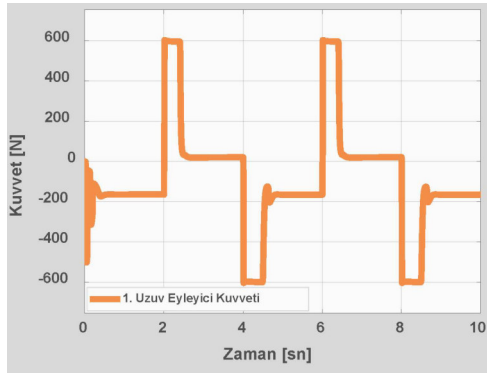


(c) Optimizasyon sonrası sistemin sinüs dalga giriş cevabı

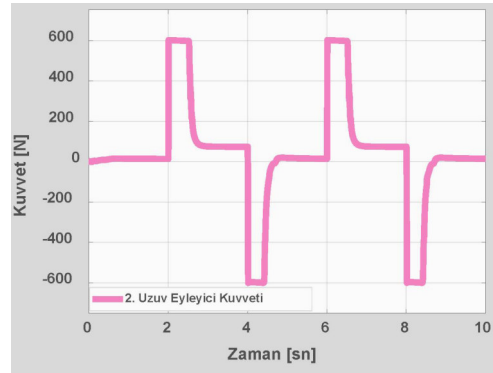


(d) Optimizasyon sonrası sistemin kare dalga giriş cevabı

Şekil 6.9. Optimizasyon işlemi sonucu elde edilen kazançların etkinliğini değerlendirmek için gerçekleştirilen benzetim sonuçları.



(a) 1. uzuv eyleyici kuvveti



(b) 2. uzuv eyleyici kuvveti

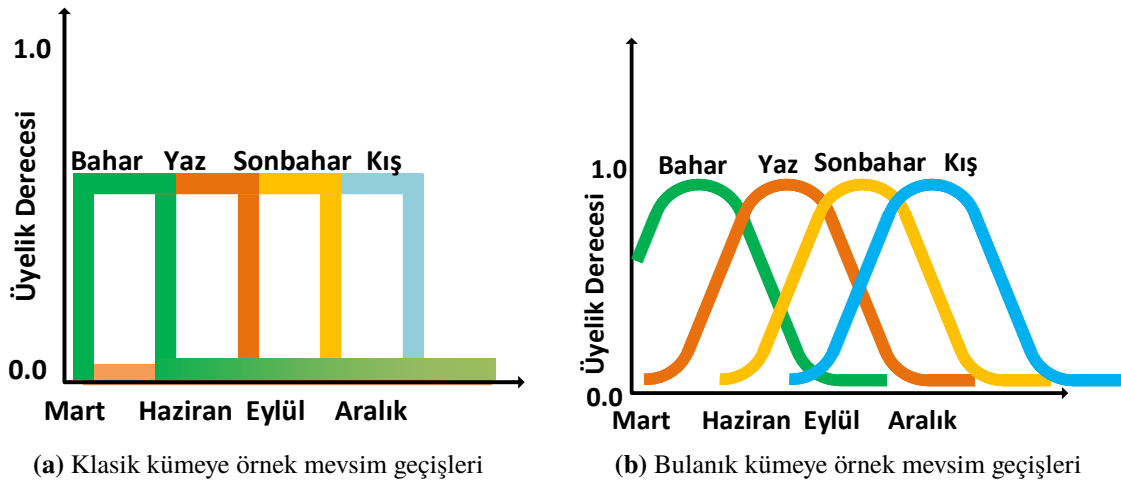
Şekil 6.10. Sisteme uygulanan kare dalga girişi sırasında hidrolik eyleyicilerde oluşan kuvvet grafikleri.

6.2.3. PID Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı

Önceki bölümde anlatıldığı gibi bacağın konum kontrolü için PID kontrolcü kullanımı yürüyüş performansı açısından yeterli olamamaktadır. Bunun en temel nedeni, doğrusal yapısından dolayı doğrusal olmayan sistemlerde kısıtlı bir performans gösterme-

sidir. Özellikle, sabit kontrolcü katsayıları, genelde, sistem dengede olduğu bir noktada doğrusal kabul edilerek ayarlanmaktadır ve sistemin çalışması sırasında bu katsayılar sabit kalmaktadır. Bu nedenle, çalışma koşullarında bir değişiklik olduğunda veya sistem parametrelerinin çevresel etkilerle değiştiği bir durumda, yani kısaca, yapılan doğrusal kabul noktasından uzaklaşıldığında, sabit kontrolcü kazançları ile doğrusal olmayan bir sistemden istenen performans elde edilememektedir. Bu noktada, robot performansını doğrudan etkilediğinden dolayı bacakların konum kontrolünün çok hassas yapılması gerektiğinden, sistem davranışındaki değişime göre kendini ayarlayabilecek bir kontrolcü tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır (Boaventura ve ark., 2012; Semini ve ark., 2015). Kendinden ayarlamalı kontrolcülerde temel düşünce, sistem davranışına göre kendi parametrelerini ayarlayabilen bir algoritma oluşturmaktır. Bugüne kadar, hidrolik eyleyicilerin konum kontrolünde daha kesin sonuçlar elde edebilmek için birçok akıllı kontrol stratejileri geliştirilmiş ve Bulanık Mantık (BM) kontrolcülerin, belirsizlikler içeren doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde oldukça etkili olduğu gösterilmiştir. (Jones ve ark., 2000; Deticek, 2000; Kalyoncu ve Haydim, 2009). Bu bağlamda, sistemin doğrusal olmayan yapısı ile başa çıkabilmek için, robot bacağın yörünge takibinin kontrolü sırasında sistemin davranışına göre PID kazançlarının BM ile ayarlanabildiği bir kontrolcü tasarlanması amaçlanmıştır. Bölümün devamında, temel kavramları ile BM genel yapısı kısaca açıklandıktan sonra, kendinden kazanç ayarlamalı kontrolcü tasarımında benimsenen yaklaşım açıklanmıştır.

BM, Zadeh (1965) tarafından Amekiran Ordusu destekli bir proje kapsamında yürüttüğü çalışmalar sırasında geliştirdiği *Bulanık Küme* kavramını temel almaktadır. Bulanık kümeler, sınırları kesin olarak tanımlanmış klasik kümelerden farklı olarak, net ve



Şekil 6.11. Klasik ve Bulanık kümelerin karşılaştırılmasına örnek bir grafik.

açıkça tanımlanmış bir sınırı olmayan ve sadece kısmi üyelik derecesine sahip unsurlar içeren bir kümedir. Zadeh'in kendi tanımı ile, bulanık küme, her bir nesneye sıfır ile bir arasında değişen bir üyelik derecesi atayan bir üyelik fonksiyonu ile karakterize edilen, devamlılık derecesine sahip nesnelere sınıftır. Bulanık kümelerin daha iyi anlaşılması için bir örnek verilirse; klasik küme yaklaşımında mevsimler yılın belli günleri için kesin sınırlar ile tanımlanmıştır, ancak gerçek hayatta bu şekilde keskin bir geçişin aksine Şekil 6.11'de gösterildiği gibi geçişler *bulanık* olmaktadır. Boole (1854)'ün geleneksel Aristotelesçi semaya dayanarak geliştirdiği iki değerli Boole Mantığını temel alan klasik –veya normal– kümeler bu şekilde bir sınıflandırmayı mümkün kılmamaktadır. Buna karşın bulanık küme yaklaşımında, herhangi bir ifadenin doğruluğu bir derece ile tanımlanmaktadır. Bu tanım matematiksel olarak ifade edilirse, X evrensel kümesinde, klasik bir A kümesi, x 'in A kümesinin elemanı olup olmadığına göre her bir $x \in X$ elemanına 1 veya 0 değeri atayan $\mu_A : X \rightarrow \{0, 1\}$ şeklindeki bir üyelik fonksiyonu ile tanımlanırken, bulanık bir A kümesi, x 'in A kümesindeki üyelik derecesini 0 ile 1 arasında tanımlayan $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$ şeklindeki bir üyelik fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Yani, bulanık bir kümede üyelik fonksiyonu (MF), giriş uzayındaki¹ her bir noktanın 0 ile 1 arasında değişen üyelik değerini tanımlayan bir eğri olarak ifade edilmektedir. Burada, $\mu_A(x)$ değeri 1'e yaklaştıkça x 'in

Tablo 6.5. Literatürde sıklıkla kullanılan üyelik fonksiyonları olan üçgen, Gauss ve sigmoid grafikleri ve denklemleri.

	$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (6.5)$
	$\mu(x) = \exp \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2} \quad (6.6)$
	$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp -a(x-c)} \quad (6.7)$

¹Literatürde, bulanık kümeler tanımlanırken, giriş uzayına, söylem evreni de denmektedir.

üyelik derecesi de artmaktadır. Üyelik fonksiyonları, giriş uzayındaki noktaların kolayca tanımlanabileceği, ihtiyaca uygun herhangi bir eğri olabilmektedir. Literatürde, üyelik fonksiyonlarını tanımlamak için bir çok eğri denklemi kullanılmaktadır, Tablo 6.5’de en sık kullanılan üyelik fonksiyonları olan üçgen (Denklem (6.5)), Gauss (Denklem (6.6)) ve sigmoid (Denklem (6.7)) üyelik fonksiyonları ve grafikleri verilmiştir.

Klasik A ve B kümelerine uygulanan, mantıksal VE (\wedge)/kesişim (\cap), $A \cap B = \{x \mid x \in A \wedge x \in B\}$ ve mantıksal VEYA (\vee)/birleşim (\cup), $A \cup B = \{x \mid x \in A \vee x \in B\}$ ikili işlemleri ile mantıksal DEĞİL (\neg)/tümleyeni ($\bar{\cdot}$), $\bar{A} = \neg A$ tekli işlemi, bulanık kümelerde elemanların üyelik derecesindeki doğal farklılıktan dolayı farklı uygulanmaktadır. Bulanık bir A kümesinin bulanık mantıksal DEĞİL’i, $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$, $\forall x \in X$, şeklinde işlem görmektedir. Ancak, bulanık kümeler için uygulanan bulanık mantıksal VE/kesişim¹ ve VEYA/birleşim² ikili işlemleri için literatürde kullanılan bir çok önerme vardır (Dubois ve Prade, 1980; Yager, 1980; Sugeno, 1993; Tabakow, 2006). Denklem (6.8)’de literatürde en sık kullanılan bulanık mantıksal VE/kesişim operatörleri verilmiştir. Burada, klasik kümeler için $\mu_{A \cap_1 B}(x) = \mu_{A \cap_2 B}(x)$ olmaktadır ancak bulanık kümeler için $\mu_{A \cap_1 B}(x) \geq \mu_{A \cap_2 B}(x)$ olmaktadır.

- Ekstreum Operatörü (min)

$$\mu_{A \cap_1 B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad \forall x \in X \quad (6.8a)$$

- Çarpım Operatörü

$$\mu_{A \cap_2 B}(x) = \mu_A(x)\mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (6.8b)$$

Aynı şekilde Denklem (6.9)’da literatürde en sık kullanılan bulanık mantıksal VEYA/birleşim operatörleri verilmiştir. Burada, klasik kümeler için $\mu_{A \cup_1 B}(x) = \mu_{A \cup_2 B}(x)$ olmaktadır ancak bulanık kümeler için $\mu_{A \cup_1 B}(x) \leq \mu_{A \cup_2 B}(x)$ olmaktadır.

- Ekstreum Operatörü (max)

$$\mu_{A \cup_1 B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad \forall x \in X \quad (6.9a)$$

- Toplama Operatörü

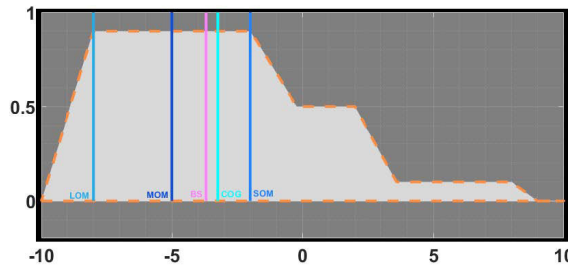
$$\mu_{A \cup_2 B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (6.9b)$$

¹Literatürde, VE bulanık mantıksal işlemi için **t-norm** ifadesi de kullanılmaktadır.

²Literatürde, VEYA bulanık mantıksal işlemi için **t-conorm** veya **s-norm** ifadesi de kullanılmaktadır.

Bulanık kümelerin elemanları arasındaki ilişki ise bulanık bağıntı ile ifade edilmektedir ve $x \in X, y \in Y$ olmak üzere $R(x, y) = \{\mu(x, y) : X \times Y \rightarrow [0, 1]\}$ veya $R = \{(x, y), \mu_R(x, y)\}$ şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, R bulanık bağıntısı $X \times Y$ kartezyen çarpımının alt kümesidir ve X ve Y gibi iki bulanık kümenin elemanları arasındaki bağıntı yani $X \times Y$ kartezyen çarpımı, $\mu_{X \times Y}(x, y) = \top[\mu(x), \mu(y)]$ şeklinde ifade edilmektedir. Burada, \top operatörü olarak genelde min operatörü veya çarpım operatörü kullanılmaktadır. Bulanık kümelerin ve bulanık bağıntıların birleşimi kompozisyon olarak adlandırılmaktadır. $R(x, y), (x, y) \in X \times Y$ ve $S(y, z), (y, z) \in Y \times Z$ şeklinde tanımlı iki bağıntının standart kompozisyonu $C(x, z) \in R \circ S \iff \exists y \in Y : \{(x, y) \in R \wedge (y, z) \in S\}$ şeklinde ifade edilir ve bu ifade, bulanık kompozisyonda, max-min kompozisyonu için $\mu_C(x, z) = \max\{\min(\mu_R(x, y), \mu_S(y, z))\}$ şeklinde, max-çarpım kompozisyonu için $\mu_C(x, z) = \max\{\mu_R(x, y)\mu_S(y, z)\}$ şeklinde tanımlanmaktadır.

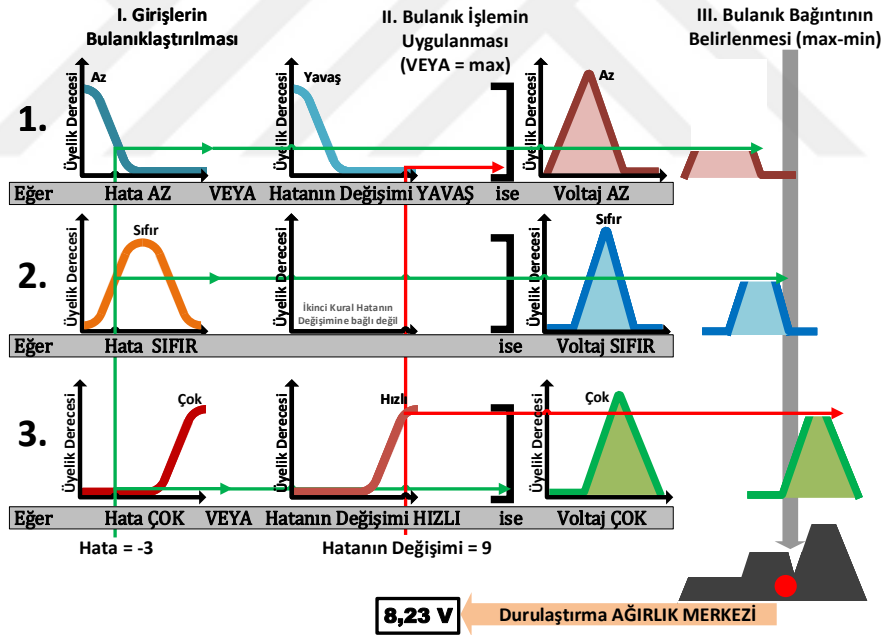
Yukarda genel hatları ile kısa bir tanımlı verilen Bulanık Küme teorisi, Bulanık Çıkarım Sistemi (FIS)¹ kullanılarak sistemlerin modellenmesinde kullanılabilir. FIS, bulanık küme teorisini kullanarak sayısal bir bilgiyi *bulanıklaştırma* işlemiyle dil değişkenlerine dönüştüren, dil değişkenlerinden oluşan bulanık kümeleri bir *kural tabanı* kullanarak işleyen ve *durulaştırma* işlemiyle bu işlem neticesinden sayısal bir sonuç çıkaran işlem birimleridir. Sistemi tanımlamak için kullanılan kural tabanının genel yapısı "**eğer-öyleyse**" şeklindedir ve bulanık mantığı içeren bir takım koşullu dil değişkenleri ile formüle edilmiştir. Bu koşullu kurallar, sistem hakkındaki bilgi, tecrübe ve deneyime dayanan çıkarım kurallarıdır. Burada, çıkarım kuralları öncül koşul olarak bulanık önermeler kullanılmaktadır ve bu çıkarım kurallarının çıktısı belirli bir üyelik derecesine sahip öncül koşula bağlı



Şekil 6.12. Verilen bulanık çıkarım üzerinde maksimum değer ortası (MOM), maksimum değer en küçüğü (SOM), maksimum değer en büyüğü (LOM), bisektör (BS) ve literatürde en çok kullanılan ağırlık merkezi (COG) durulaştırma yöntemleri ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

¹Bulanık Çıkarım Sistemleri, kontrol, görüntü işleme, karar analizleri gibi bir çok farklı alana uygulanmıştır ve bu disiplinler arası özelliğinden dolayı, literatürde bulanık sistemler, bulanık modelleme, bulanık kural tabanlı sistemler gibi bir çok farklı isimle anılmaktadır. Bu çalışmada da Bulanık Çıkarım Sistemleri ve Bulanık Mantık Kontrol isimleri değişmeli kullanılmıştır.

bulanık bir sonuçtur. Çıkarım kuralları, bulanık kümelerin ve bulanık bağıntıların bir birleşimi şeklinde olduğundan bir kuralın sonucu bulanık kompozisyon yöntemleri ile hesaplanmaktadır. Kısaca, bu kurallar, girdi değişkenlerinin belirli bulanık kümelere ait olması durumunda verilen kararlar kümesini temsil etmektedir. Girdi değişkenleri ise, değerleri doğal veya yapay bir dilde kelimeler veya cümleler olan değişkenlerdir (Zadeh, 1973). Literatürde, genelde, kontrol sistemleri için dil değişkenleri olarak *hata* ve *hatanın değişimi* kullanılmaktadır. Uygulanan kural tabanı ile yürütülen çıkarım işleminin sonucu yine bulanık olduğundan işlemin sonucu durulaştırma diye adlandırılan bir süreç ile net bir değere dönüştürülmektedir. Literatürde, durulaştırma süreci için başta dağılım yöntemleri ile maksimum yöntemleri ve türevleri gibi bir çok yöntem önerilmiştir (Leekwijck ve Kerre, 1999). Şekil 6.12’de verilen bulanık çıkarım üzerinde literatürde sıklıkla kullanılan durulaştırma yöntemleri ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Durulaştırma ile elde edilen kesin sonuç ile bulanık çıkarım işlemi tamamlanmış olmaktadır. Bulanık çıkarım sürecinde bilgi akışını basit bir örnekle özetleyen akış diyagramı Şekil 6.13’de gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Giriş olarak hata ve hatanın değişimi ve karar olarak voltajın dil değişkenleri ile ifade edildiği ve toplamda üç adet kural bulunan basit bir bulanık çıkarım sisteminde bilgi akışını ve sistemin nasıl çalıştığını özetleyen akış diyagramı.

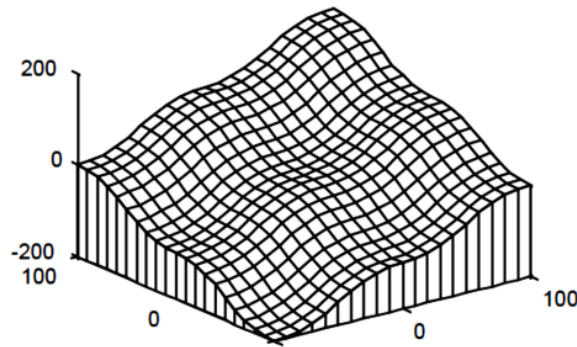
Literatürde, temelde iki çeşit FIS yapısı vardır; Mamdani tipi (Mamdani ve Assilian, 1975) ve Sugeno¹ tipi (Sugeno, 1985). İki bulanık çıkarım sistemi arasındaki temel farklılık karar kümesinde görülmektedir. Literatürde en sık görülen FIS olan Mamdani tipi çıkarım

¹Literatürde TSK (Takagi, Sugeno ve Kang) tipi olarak da adlandırılmaktadır.

sistemlerinde, karar kümeleri olarak durulaştırmayı gerektiren bulanık kümeler vardır. Ancak Sugeno tipi çıkarım sistemlerinde, bulanık karar kümeleri yerine bulanık olmayan ve kesin sonuçlar veren $f = px^n + qy^n + r$ şeklinde giriş değerlerinin bir fonksiyonu¹ yada $p = r = 0$ seçildiğinde tekil çıktı üyelik fonksiyonu olarak da bilinen sabitlerden oluşmaktadır. Burada, f karar kümesi elemanı olarak tanımlanmıştır ve her karar kümesi elemanının kural tabanında tanımlanan koşula bağlı ω_k şeklinde bir ağırlığı vardır. Örneğin $\llcorner \text{EĞER } x==A \text{ VE } Y==B \text{ İSE } \rightarrow f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \gg$ şeklinde tanımlı tek kuralın, koşulda VE operatörü kullanıldığı için ağırlığı $\omega_k = \min\{\mu(x), \mu(y)\}$ şeklinde hesaplanmaktadır². N adet kurala sahip Sugeno tipi FIS çıktısı ise Denklem (6.10)'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$F_{sugeno} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i f_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad (6.10)$$

Bu yaklaşım, ağırlık merkezi bulma gibi durulaştırma işlemi için gerekli hesaplamalar yapılmadığından dolayı çıkarım sisteminin verimliliğini artırmaktadır. Bu çalışmada da, uyarlamalı bir PID kontrolcü tasarlamak için bilinen PID tasarım tekniklerini kullanan ve daha sonra BM uygulanan bir tasarım yaklaşımı benimsenmiştir (Jantzen, 1998) ve kontrolcü tasarımı yapılırken Sugeno tipi FIS kullanılmıştır. Bu bağlamda, öncelikle Bölüm 6.2.1'de kazançları optimize edilmiş PID kontrolcü kullanılarak, konvansiyonel PID kontrolcü ile aynı kontrol performansına sahip bir doğrusal BM kontrolcü elde edilmiştir. FIS genel yapısı açıklanırken değinildiği gibi, genelde, BM kontrolcü tasarımında hata (E) ve hatanın değişimi (CE) olmak üzere iki giriş ve bir kontrolcü çıkışı (u) kullanılmaktadır.



Şekil 6.14. BM kontrolcüye ait iki giriş ve bir çıkış ile giriş-çıkış eşleşmesi sonucu elde edilen kontrol yüzeyi örneği.

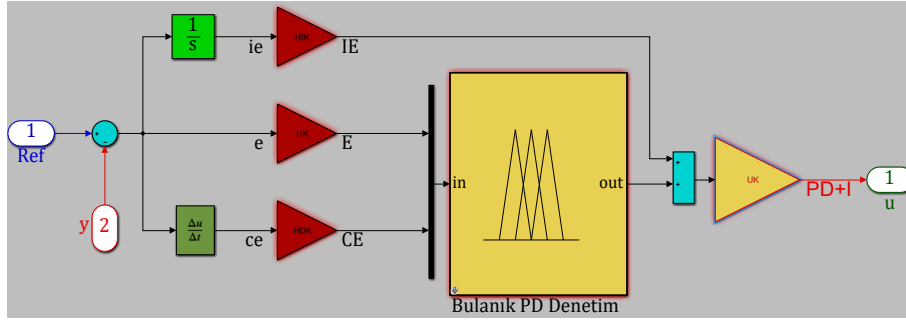
¹Burada n, Sugeno tipi FIS'in derecesi olarak nitelendirilmektedir. $p = r = 0$ seçildiğinde **Sıfır-Dereceli Sugeno Modeli** olmaktadır.

²VE işlemi için ekstremum operatörü kullanıldığında bu şekilde olmaktadır. Çarpım operatörü de kullanılabilir.

Burada, iki giriş ve bir çıkış ile giriş-çıkış eşlemesi yapıldığında Şekil 6.14’de gösterildiği gibi bir yüzey elde edilmektedir. Bu yüzey, kontrol yüzeyi olarak tanımlanmaktadır. BM kontrolcü yapısında, kontrol yüzeyinin doğrusallığını bozan üç temel parametre vardır; kural tabanı, çıkarım mekanizması ve durulaştırma yöntemi. Bulanık kümelerin konumu, şekli ve sayısı ile doğrusal olmayan giriş ölçeklendirmesi doğrusal olmayan dönüşümlere neden olmaktadır. Kurallar genellikle doğrusal olmayan bir kontrol stratejisi ile ifade edilmektedir ve çıkarım mekanizmasında, VE ve VEYA ikili işlemleri için ekstemum operatörleri (min/max) kullanılırsa doğrusallık bozulmaktadır. Durulaştırma yöntemleri de genelde doğrusal değildir. Burada, doğrusal bir kontrol yüzeyi elde ederek BM kontrolcünün, temel alınan konvansiyonel bir PID kontrolcü gibi davranması sağlanabilir. Bunun için, BM kontrolcü tasarlanırken doğrusallığı bozan üç temel parametrenin tayininde bazı

Tablo 6.6. Belirlenen üyelik fonksiyonları için kullanılan parametreler, üyelik fonksiyonu grafikleri ve kural tabanı gibi oluşturulan FIS’e ait yapı.

		Üyelik Fonksiyonları			
		Dil Değişkeni	Tipi	Parametreler	Grafik
Giriş	(E)	Negative Zero Positive	Üçgen Üyelik Fonksiyonu	-10 -5 0 -5 0 5 0 5 10	
	(CE)	Negative Zero Positive		-10 -5 0 -5 0 5 0 5 10	
Çıkış	(u)	LargeNegative SmallNegative Zero SmallPositive LargePositive	Tekil	-10 -5 0 5 10	
Kural Tabanı		E==Negative E==Negative E==Negative E==Zero E==Zero E==Zero E==Positive E==Positive E==Positive	VE	CE==Negative CE==Zero CE==Positive CE==Negative CE==Zero CE==Positive CE==Negative CE==Zero CE==Positive	=>u=LargeNegative =>u=SmallNegative =>u=Zero =>u=SmallNegative =>u=Zero =>u=SmallPositive =>u=Zero =>u=SmallPositive =>u=LargePositive



Şekil 6.15. Bulanık PD+I kontrolcü yapısının blok diyagramı.

kurallar belirlenmelidir. Giriş uzayı, tüm girişleri kapsayacak şekilde geniş olmalıdır. Bunun yanında, her bir giriş için, üyelik değerlerinin toplamı 1 olacak şekilde tasarlanmış bir dizi üyelik fonksiyonları belirlenmelidir. Bu, bulanık kümeler için üçgen üyelik fonksiyonu kullanıldığında ve bulanık kümelerin elemanlarının komşu elemanları $\mu = 0,5$ üyelik değerinde geçtiğinde sağlanabilmektedir. Böylece herhangi bir giriş değeri, en fazla iki bulanık kümenin üyesi olmakta ve her birinin üyeliği giriş değerinin doğrusal bir fonksiyonu olmaktadır. Ayrıca, kural tablosu oluşturulurken tüm girişler için VE ikili işlemi tanımlanmalı ve VE ikili işlemi için çarpım operatörü kullanılmalıdır. Çıkış için, yine üçgen üyelik fonksiyonları kullanılabilir, ancak bu durumda, bulanık bağıntıyı tanımlarken max-çarpım ve durulaştırma için ağırlık merkezi yöntemi kullanılmalıdır. Bununla birlikte, durulaştırma işlemini basitleştirmek için sabit üyelik fonksiyonları kullanılarak Sugeno tipi FIS tanımlanabilir.

Burada bahsedilen tasarım kuralları ile Tablo 6.6'da gösterildiği gibi düzlemsel bir kontrol yüzeyi, yani, doğrusal bir BM kontrolcü elde edilmektedir. Bunun için her bir giriş için üç adet üçgen üyelik fonksiyonu ve çıkış için giriş üyelik fonksiyonları tepe noktası sayısı kadar sabit çıkış fonksiyonu seçilmiştir. Düzlemsel bir kontrol yüzeyi elde etmek için oluşturulan FIS yapısına ait üyelik fonksiyonları, üyelik fonksiyonu grafikleri ve kural tabanı gibi parametreler Tablo 6.6'da özetlenmiştir. Buradan, tasarlanan doğrusal BM kontrolcünün Bölüm 6.2.1'de elde edilen PID kontrolcü gibi davranabilmesi için PID kazançlarının BM parametrelerine uyarlanması gerekmektedir ve bunun için de BM kontrolcü giriş ve çıkış uzaylarının ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Şekil 6.15'de bu amaç için tasarlanmış Bulanık PD+I kontrolcü yapısının blok diyagramı verilmiştir. Burada giriş ve çıkış uzayını ölçeklendirmek için HK , HDK , HIK ve UK olmak üzere dört adet kazanç parametresi belirlenmiştir. Şekil 6.15'de gösterilen Bulanık PD+I kontrolcü çıkışı,

Denklem (6.11)'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$u(t) = \left[f \left(HK \cdot e(t), HDK \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) + HIK \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \cdot UK \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} u(t) &= \left[HK \cdot e(t) + HDK \cdot \frac{de(t)}{dt} + HIK \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \cdot UK \\ &= HK \cdot UK \left(e(t) + \frac{HDK}{HK} \cdot \frac{de(t)}{dt} + \frac{HIK}{HK} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$HK \cdot UK = K_p$$

$$\frac{HDK}{HK} = T_d \quad (6.13)$$

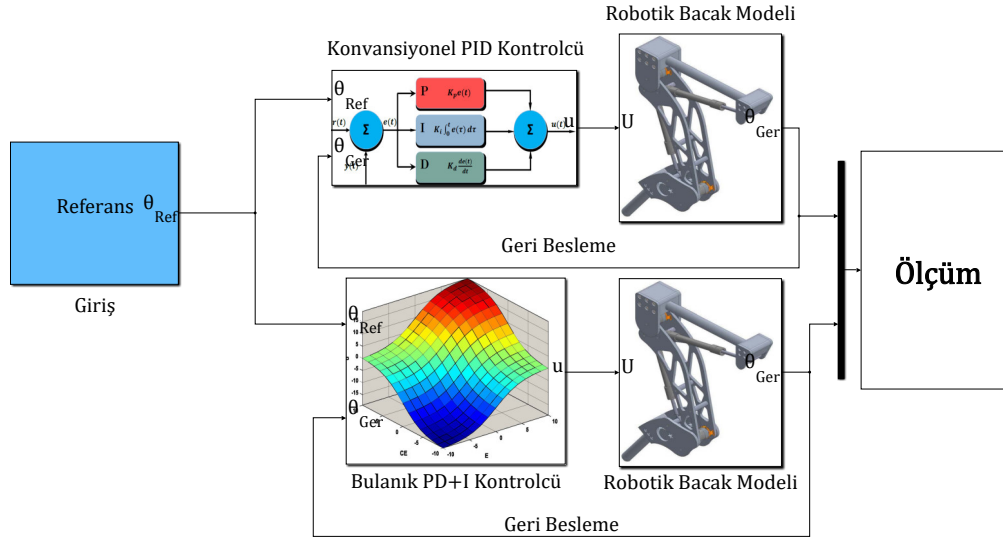
$$\frac{HIK}{HK} = \frac{1}{T_i}$$

BM çıkarım sistemi yukarıda belirtilen tasarım kuralları çerçevesinde tasarlanırsa doğrusal bir kontrol yüzeyi elde edileceğinden, Denklem (6.11) ifadesinin doğrusal yaklaşımı Denklem (6.12)'deki gibi olmaktadır. Denklem (6.12) ve Denklem (6.2) karşılaştırıldığında, kazançlar arasındaki ilişkinin Denklem (6.13)'teki gibi olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 6.15'de görüldüğü gibi, HK kazancı doğrudan giriş uzayını ölçeklendirmektedir. Bu nedenle, giriş uzayının, hatanın (e) alabileceği bütün değerleri kapsayacak şekilde olması için ilk önce HK kazancı ayarlanarak hata değerleri giriş uzayı aralığına normalize edilmelidir. Şekil 6.15 ve Tablo 6.6 değerlendirildiğinde giriş uzayının $[-5, 5]$ aralığına ölçeklendirilmesi gerektiği görülmektedir. Bu bağlamda, başlangıç şartları ile çalışma koşulu dikkate alındığında maksimum basamak referans girişi ± 100 derece olacağı kabulü yapılırsa, maksimum hata 100 olacaktır. Buradan, hata giriş aralığı $[-100, 100]$ olacağından, $HK = 0,05$ olacaktır. Devamında Denklem (6.13) yardımı ile UK , HDK ve HIK değerleri de hesaplanabilir. Hesaplanan BM kontrolcü kazançları Tablo 6.7'de verilmiştir. Kazançlar bu şekilde ayarlandığında, doğrusal bir kontrol yüzeyine sahip BM kontrolcü, PID kontrolcünün tam bir eşleniği gibi davranacaktır. Bunun sağlanmasını yapabilmek için, Şekil 6.16'da gösterildiği gibi kontrolcü karşılaştırılmasının yapıldığı bir model oluşturulmuştur. Elde edilen basamak giriş cevabı Şekil 6.17a'da gösterilmiştir.

PID eşleniği BM kontrolcü elde edildikten sonra, çıkarım metodu, üyelik fonksiyonu

Tablo 6.7. Tasarımı yapılan doğrusal BM kontrolcü için hesaplanan kazançlar.

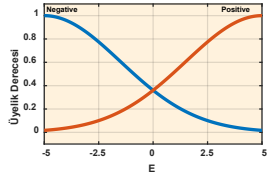
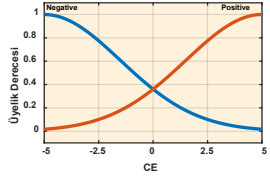
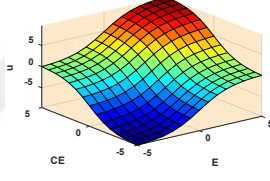
	HK	UK	HDK	HIK
BMK_1	0,05	127,790	0,00218	0,00108
BMK_2	0,05	114,804	0,00280	0,00144



Şekil 6.16. Kontrolcü karşılaştırılmasının yapıldığı benzetim çalışmalarında kullanılan Simulink blok diyagramı.

ve kural tablosu gibi BM parametreleri ayarlanarak doğrusal olmayan bir kontrol yüzeyi elde edilerek, sistem davranışına göre kazançların ayarlanabileceği uyarlamalı bir kontrolcü elde edilebilir. Üyelik fonksiyonlarının şekli ve kuralların seçimi, kontrol yüzeyini yani, kontrol stratejisini ve sistem dinamiklerini doğrudan etkilemektedir. Kontrol yüzeyi olarak, engebeli yüzey, yumuşak yüzey, dik yüzey ve doğrusal yüzey olmak üzere dört farklı yüzey şekli belirlenebilmektedir (Jantzen, 1998). Bu çalışmada, dik yüzey şekline sahip bir kontrolcü yüzeyi tasarlanmıştır. Bu yüzey şeklinde, merkezde yani hata ve hatanın değişim hızının sıfır olduğu yerlerde daha yüksek kontrolcü kazançları elde edilir, köşelerde yani hata ve hatanın değişim hızının yüksek olduğu yerlerde doğrusal kontrol yüzeyindeki değerler ile aynı kontrolcü kazançları elde edilir. Bu sayede, hatanın büyük olduğu durumlarda yine doğrusal yüzeye sahip kontrolcü gibi davranır, ancak hatanın küçük olduğu durumlarda, doğrusal kontrolcüye göre hatayı daha hızlı azaltabilir. Tasarım yönteminin son adımı olarak dik yüzeye sahip bir kontrolcü yüzeyi elde etmek için, üyelik fonksiyonları ve kural tablosunda değişiklikler yapılmıştır. Öncelikle girişler için Gauss eğrisi üyelik fonksiyonu kullanılmıştır ve üyelik fonksiyonu sayısı ikiye düşürülmüştür. Bu şekilde tasarlanan BM kontrolcüye ait kontrol yüzeyi ve oluşturulan FIS yapısına ait üyelik fonksiyonları, üyelik fonksiyonu grafikleri ve kural tabanı gibi parametreler Tablo 6.8’de verilmiştir. Elde edilen kazanç ayarlamalı kontrolcü ile konvansiyonel PID kontrolcünün basamak giriş cevabı Şekil 6.17b’de verilmiştir. Burada Bulanık PD+I kontrolcünün davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için basamak giriş değeri $s = -15^\circ$ derece olarak seçilmiştir. Sonuç incelendiğinde, beklendiği gibi, kazanç ayarlamalı kontrolcünün hatanın büyük olduğu

Tablo 6.8. Belirlenen üyelik fonksiyonları için kullanılan parametreler, üyelik fonksiyonu grafikleri ve kural tabanı gibi oluşturulan Bulanık PD+I kontrolcülerin yapısı.

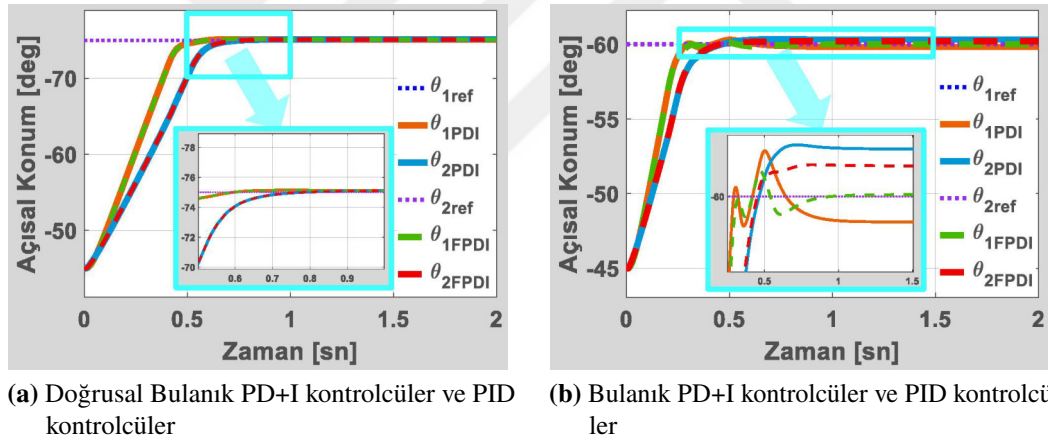
		Üyelik Fonksiyonları			
		Dil Değişkeni	Tipi	Parametreler	Grafik
Giriş	(E)	Negative Positive	Gauss Üyelik Fonksiyonu	$\mu_N(x) = e^{-\frac{(x+5)^2}{2 \cdot (4)^2}}$ $\mu_P(x) = e^{-\frac{(x-5)^2}{2 \cdot (4)^2}}$	
	(CE)	Negative Positive		$\mu_N(x) = e^{-\frac{(x+5)^2}{2 \cdot (4)^2}}$ $\mu_P(x) = e^{-\frac{(x-5)^2}{2 \cdot (4)^2}}$	
Çıkış	(u)	Min Zero Max	Tekil	-10 0 10	 Bu parametreler ile elde edilen kontrol yüzeyi.
Kural Tabanı	E==Negative VE CE==Negative =>u=Min E==Negative VE CE==Positive =>u=Zero E==Positive VE CE==Negative =>u=Zero E==Positive VE CE==Positive =>u=Max				

durumlarda konvansiyonel PID ile eşdeğer davrandığı ancak hata küçüldüğünde daha iyi bir performans gösterdiği ve bunun sonucunda maksimum aşmayı azalttığı ve kalıcı durum hatasını giderdiği görülmektedir. Son olarak, burada elde edilen BM kontrolcü, kazançları sistemin davranışına ve giriş değerine göre ayarlayabilmektedir, ancak, bütün doğrusal olmayan sistemlerde olduğu gibi sistemin cevabı giriş sinyalinin büyüklüğüne ve şekline, bozucu girişlerin varlığına ve algılayıcı sistemde oluşan gürültü gibi farklı değişkenlere bağlıdır. Bu yüzden sistem çalışma şartları ve çevresel etkiler değerlendirilerek kontrolcü kazançları ayarlanmalıdır. Bunun yanında, farklı kontrolcü performansları elde edebilmek için farklı kontrolcü yüzeyleri de denenebilir. Bu çalışma sonucunda, ayaklı bir robotun en önemli bileşeni olan bacakların yürüyüş sırasında çevresel etkilere ya da çalışma şartlarındaki değişimlere daha hızlı uyum sağlayabilmesi için uyarlamalı bir kontrolcü tasarımının BM temel alınarak yapılabileceği ve performans bağlamında konvansiyonel PID kontrolcüler ile karşılaştırıldığında başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bunun yanında, BM kontrolcü parametreleri öğrenme algoritmalarının kullanıldığı yöntemlerle

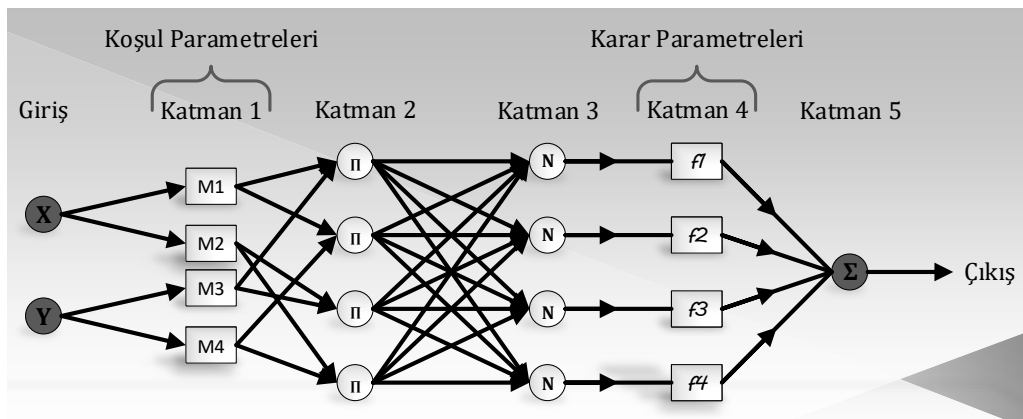
de ayarlanabilmektedir. Bölümün devamında, eğitim verileri kullanılarak BM kontrolcü parametrelerinin öğrenme algoritmaları ile ayarlandığı yöntemin uygulanması tartışılmıştır.

6.2.4. Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı

Bu bölümde, bacağın konum kontrolünde kullanılan BM kontrolcü parametrelerinin iyileştirilmesi için benimsenen yöntem olan Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemleri (ANFIS)'nin uygulaması anlatılmıştır. ANFIS, ilk olarak Jang (1993) tarafından önerilen, yapay sinir ağlarının öğrenme yeteneği ve ilişkisel yapıları ile Sugeno tipi bulanık çıkarım mekanizmalarının birleştirildiği bir karma yapay zeka tekniği olan Nöro-Bulanık bir sistemdir (Karaboga ve Kaya, 2019). Daha net bir ifade ile, ANFIS, Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemini optimize etmek için, giriş üyelik fonksiyonları ve ilgili parametrelerle girişleri, çıkış üyelik fonksiyonları ve ilgili parametrelerle çıkışı eşleştiren çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağına benzer bir yapının öğrenme algoritmaları ile eğitilmesi işlemidir. Şekil 6.18'de iki giriş, tek çıkış, dört üyelik fonksiyonu ve dört kurala sahip



Şekil 6.17. Tasarlanan Bulanık PD+I kontrolcülerin ve temel alınan konvansiyonel PID kontrolcülerin basamak giriş cevaplarının karşılaştırılması.



Şekil 6.18. ANFIS modelinin tipik topolojisi.

Sugeno tipi bir FIS yapısının yapay sinir ağı analogisi gösterilmiştir. ANFIS ağ yapısı koşul ve karar bölümleri olarak adlandırılan iki bölümden ve aşağıda kısaca açıklanan beş katmandan oluşmaktadır:

1. Katman: Bulanıklaştırma katmanı olarak adlandırılan ve tüm düğümlerin uyarlanabilir olduğu bu katmanda, üyelik fonksiyonları kullanılarak giriş değerlerinden bulanık kümeler elde edilmektedir. Koşul parametreleri adı verilen, üyelik fonksiyonunun şeklini belirleyen parametreler bu katmanda eğitilmektedir ve her düğüm çıktısı Denklem (6.14)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$O_k^1 = \mu_{M_{ij}}(x_i) \quad (6.14)$$

Burada, i giriş numarasını; j , i 'nci girişe karşılık gelen üyelik fonksiyonu numarasını; k mevcut katmandaki düğüm numarasını; x_i , i 'nci girişi; O_k^1 Katman 1'de k 'nci düğüm çıktısını ve son olarak $\mu_{M_{ij}}(x_i)$ ise parametrik olarak tanımlanmış üyelik fonksiyonunu temsil etmektedir. Düğüm sayısı genelde, giriş sayısı ve üyelik fonksiyonu sayısının çarpımı kadar olmaktadır.

2. Katman: Kural katmanı olarak adlandırılan ve tüm düğümlerin sabit olduğu bu katmanda, Bulanıklaştırma katmanı çıktısı kullanılarak herbir kuralın ağırlığı ω_k elde edilmektedir. Her düğüm çıktısı kurallar tanımlanırken kullanılan mantıksal operatörlere bağlı olarak hesaplanmaktadır. Denklem (6.15)'de, literatürde genelde kullanılan çarpım operatörü için düğüm çıktısı hesabı verilmiştir.

$$O_k^2 = \omega_k = \mu_{M_{ij}}(x_i)\mu_{M_{ij}}(x_j), \quad i \neq j \quad (6.15)$$

Bu katmanda, yapay sinir ağının klasik yapısının tersine her düğüm önceki katman ile bağlı değildir ve düğüm bağlantıları belirlenen kurallara göre belirlenmektedir. Bağlantılar, farklı girdilere sahip üyelik fonksiyonlarının çıktıları arasındadır.

3. Katman: Normalleştirme katmanı olarak adlandırılan ve tüm düğümlerin sabit olduğu bu katmanda, Kural katmanı çıktısı kullanılarak herbir kuralın normalleştirilmiş ağırlığı $\bar{\omega}_k$, Denklem (6.16)'da gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$O_k^3 = \bar{\omega}_k = \frac{O_k^2}{\sum_{k=1}^k O_k^2} \quad (6.16)$$

4. Katman: Durulaştırma katmanı olarak adlandırılan ve tüm düğümlerin uyarlanana-

bilir olduğu bu katmanda, normalleştirilmiş ağırlıklar ve parametrik olarak tanımlanmış karar fonksiyonları kullanılarak kuralların ağırlıklı değerleri hesaplanmaktadır. Karar fonksiyonları, genelde, $f_k = p_k x + q_k y + r_k$ şeklinde birinci dereceden bir Sugeno modeli için tanımlanmış birinci dereceden polinom fonksiyonlarıdır. Karar parametreleri olarak adlandırılan $\{p_k, q_k, r_k\}$ bu katmanda eğitilmektedir ve düğüm çıktısı Denklem (6.17)'de gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$O_k^4 = \overline{\omega}_k f_k = \overline{\omega}_k (p_k x + q_k y + r_k) \quad (6.17)$$

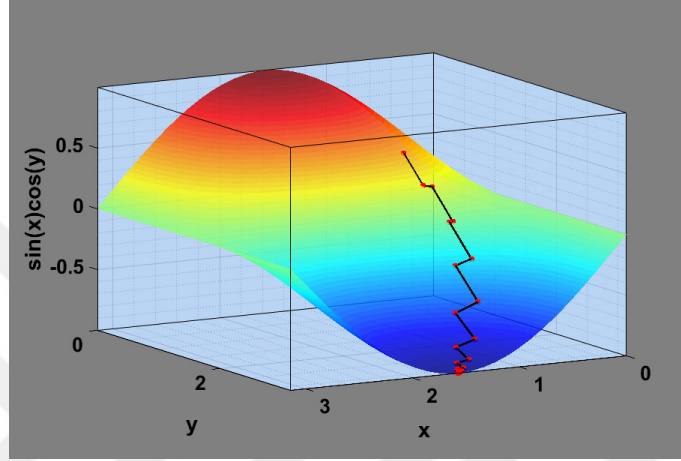
Kullanılan polinom fonksiyonunun yapısından dolayı, her kurala ait karar parametrelerinin sayısı giriş sayısından bir fazla olmaktadır. Bu katmanda, bir önceki katmanla tek bir noktadan bağlantı olduğu ve karar fonksiyonları doğrusal fonksiyon sınıfında olduğu için, literatürde bazen, bu iki Durulaştırma ve Normalleştirme (3. ve 4. Katman) katmanı birleştirilerek Karar Katmanı olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada ANFIS yapısı tanımlanırken, literatürde en sık görülen yapı olduğu için Jang'ın önerdiği ANFIS yapısı kullanılmıştır.

5. Katman: Toplama katmanı olarak adlandırılan ve tek bir sabit düğümden oluşan bu katmanda, Durulaştırma katmanında elde edilen her kuralın ağırlıklı değerleri toplanarak ANFIS'in asıl çıktısı Denklem (6.18)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

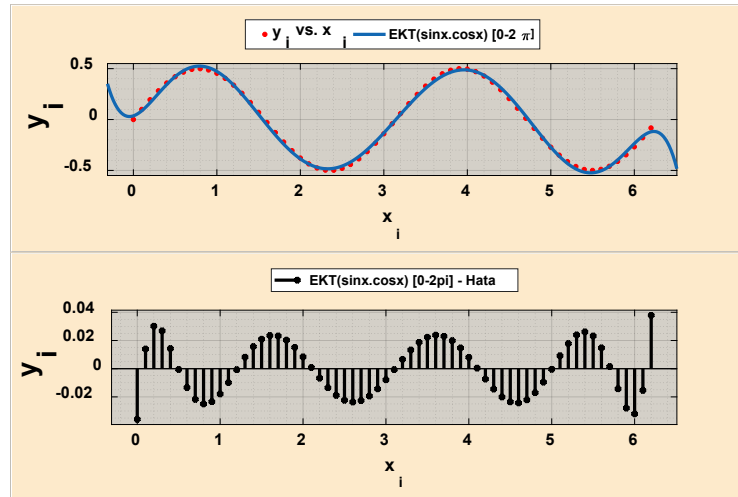
$$O_k^5 = \sum_{k=1}^k \overline{\omega}_k f_k = \frac{\sum_{k=1}^k \omega_k f_k}{\sum_{k=1}^k \omega_k} \quad (6.18)$$

ANFIS'in eğitilmesi, bir öğrenme algoritması kullanılarak yapısındaki koşul ve karar parametrelerinin belirlemesi anlamına gelmektedir. Yani, yukarıda tanımlanan beş katmanlı mimari için öğrenme algoritmasının görevi, ANFIS çıktısının eğitim verileriyle eşleşmesini sağlamak için değiştirilebilir tüm parametreleri ayarlamaktır. ANFIS'in klasik eğitim algoritmasının ayrıntılı matematiksel arka planı Jang (1993)'in çalışmasında bulunabilir, ancak literatürde ANFIS'in ilk defa Jang tarafından önerilmesinden bu yana, daha iyi performans elde etmek için farklı eğitim yaklaşımları önerilmiştir; bu yaklaşımlar türev tabanlı, sezgisel tabanlı ve karma öğrenme yaklaşımları olarak üçe ayrılmaktadır. Bu çalışmada ANFIS uygulaması üzerine odaklanıldığından, öğrenme algoritmaları ile ilgili detaylara yer verilmemiştir. Ancak, literatürde ANFIS eğitimi için önerilen öğrenme algoritmaları ile ilgili detaylı bir literatür araştırmasına Karaboga ve Kaya (2019)'nın

çalışmasından ulaşılabılır. Bu çalışmada, ANFIS eğitimi için literatürde en sık kullanılan yöntem olan, koşul parametrelerinin gradyan iniş geriye yayılım algoritması¹ ile ve karar parametrelerinin ise en küçük kareler tahmini ile eğitildiği türev tabanlı bir karma öğrenme yaklaşımı tercih edilmiştir. Gradyan iniş metoduna basit bir örnek Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Şekilde, $f(x, y) = \sin(x)\cos(y)$ şeklinde tanımlanmış bir fonksiyon üzerinde, $(x, y) = (1, 1)$ noktasından başlayarak gradyan vektörünün tersi yönde ilerleyerek her iterasyonda fonksiyonun minimumuna doğru *inilmiştir*. Gradyan iniş geriye yayılım



Şekil 6.19. Gradyan iniş metodu ile $f(x, y) = \sin(x)\cos(y)$ fonksiyonunun $[0 - \pi]$ aralığında minimumunun bulunmasını gösteren grafik. Her kırmızı nokta bir iterasyonu temsil etmektedir ve noktalar her adımda fonksiyonun minimumuna doğru *inmektedir*.



Şekil 6.20. $f(x) = \sin(x)\cos(x)$ fonksiyonunun $[0 - 2\pi]$ aralığında 8. dereceden polinom model fonksiyonu kullanılarak en küçük kareler metodu ile tahmini ve hataları gösteren grafik.

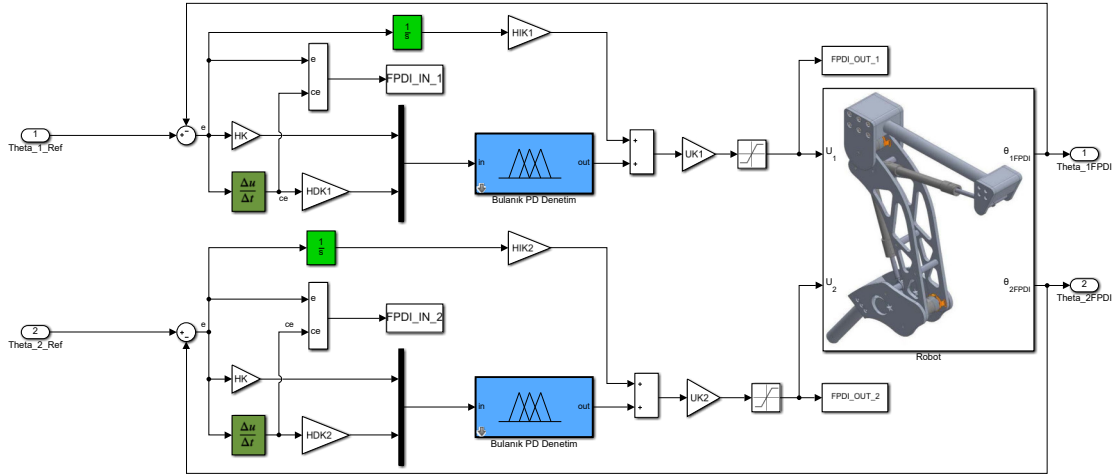
¹Burada geriye yayılım terminolojisi ile ilgili bir açıklama gereği görülmüştür. Çünkü yapay sinir ağı terminolojisinde geriye yayılım ile doğrudan gradyan iniş algoritmasına atıfta bulunmaktadır. Ancak sinir ağı eğitiminde kullanılan Levenberg–Marquardt ve BFGS Quasi-Newton gibi bir çok öğrenme algoritması da geriye yayılımı kullanabilmektedir. Bu yüzden, yalnızca geriye yayılma teriminin kullanılmasına yerine, özellikle kullanılan algoritmanın adının kullanılmasının daha doğru olduğu düşünülmüştür.

Tablo 6.9. ANFIS için kullanılan karma öğrenme yaklaşımında parametrelerin eğitim aşamaları ve kullanılan algoritmalar. (Jang (1993)'in çalışmasından uyarlanmıştır.)

	İleri Geçiş Evresi	Geri Geçiş Evresi
Koşul Parametreleri	Sabit	Gradyan İniş Geriye Yayılım
Karar Parametreleri	En Küçük Kareler Tahmini	Sabit
Kullanılan Sinyal	Düğüm Çıktıları	Hatanın Gradyanı

algoritmasında, ileri beslemeli bir ağı parametreleri, her iterasyonda hesaplanan hata fonksiyonunun gradyanı kullanılarak, hata fonksiyonunun en hızlı biçimde azaldığı yön olan gradyanın tersi yönüne doğru geriye yayılarak güncellenmektedir. Gradyan iniş geriye yayılım algoritmasının bir iterasyonu $\theta^{k+1} = \theta^k - \alpha g_k$ şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, k iterasyon sayısı, θ^k mevcut ağ parametreleri vektörü, α öğrenme oranı ve $g_k = \frac{\partial E(X, \theta^k)}{\partial \theta}$ şeklinde hesaplanan mevcut hata fonksiyonunun gradyanı olarak ifade edilmektedir. Hata fonksiyonundaki X , sırasıyla giriş ve çıkış olmak üzere (x_i, y_i) şeklinde tanımlanmış veri seti kümesidir. Klasik geri yayılımdaki hata fonksiyonu, $E(X, \theta) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)$ şeklinde tanımlı ortalama kare hatasıdır. Burada \hat{y}_i , x_i girişi için ağı hesaplanan çıkışı olarak tanımlanmıştır ve N veri seti kümesinin boyutunu tanımlamaktadır. Eğitim de kullanılan diğer bir algoritma olan en küçük kareler tahmini ise, sırasıyla giriş ve çıkış olmak üzere (x_i, y_i) şeklinde verilen bir veri seti kümesini $y_i = f(x_i, \beta) + \varepsilon_i$ şeklinde bir fonksiyon ile tanımlanabilmesini amaçlamaktadır. Burada, $f(x_i, \beta)$ fonksiyonu veri seti modelini tanımlayan fonksiyon, β ise ayarlanabilir parametrelerin olduğu bilinmeyenler vektörüdür ve ε tahmin modelinin hatası olarak tanımlanmıştır. Her nokta için $s = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$ şeklinde hesaplanan hataların karelerinin toplamını sıfıra yakınsayacak bir $\hat{\beta}$ vektörünün bulunması işlemine en küçük kareler tahmini denmektedir. Eğer, model fonksiyonu $f(x_i, \beta) = X \cdot \hat{\beta}$ şeklinde doğrusal olarak tanımlanırsa, hatayı sıfıra yakınsayan model $y = X \cdot \hat{\beta}$ olacaktır. Buradan en küçük kareler tahmininin çözümü $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$ olmaktadır. En küçük kareler tahmini metoduna basit bir örnek Şekil 6.20'de gösterilmiştir.

ANFIS karma eğitim yaklaşımında, eğitimin her iterasyonu ileri geçiş ve geri geçiş olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. İleri geçiş evresinde, giriş sinyalleri ağa beslenerek karar parametreleri en küçük kareler metodu kullanılarak ayarlanır ve belirlenen karar parametreleri ile ağ çıkışı hesap edilerek hata hesaplanır. Geri geçiş evresinde ise hesaplanan hata gradyanının çıkıştan girişe doğru geri yayılması ile koşullu parametreleri gradyan iniş kullanılarak hesaplanır. ANFIS eğitimi için kullanılan karma eğitim süreci Tablo 6.9'da özetlenmiştir.



Şekil 6.21. ANFIS modelinin eğitimi için gerekli veri setinin elde edilmesinde kullanılan benzetim modeli.

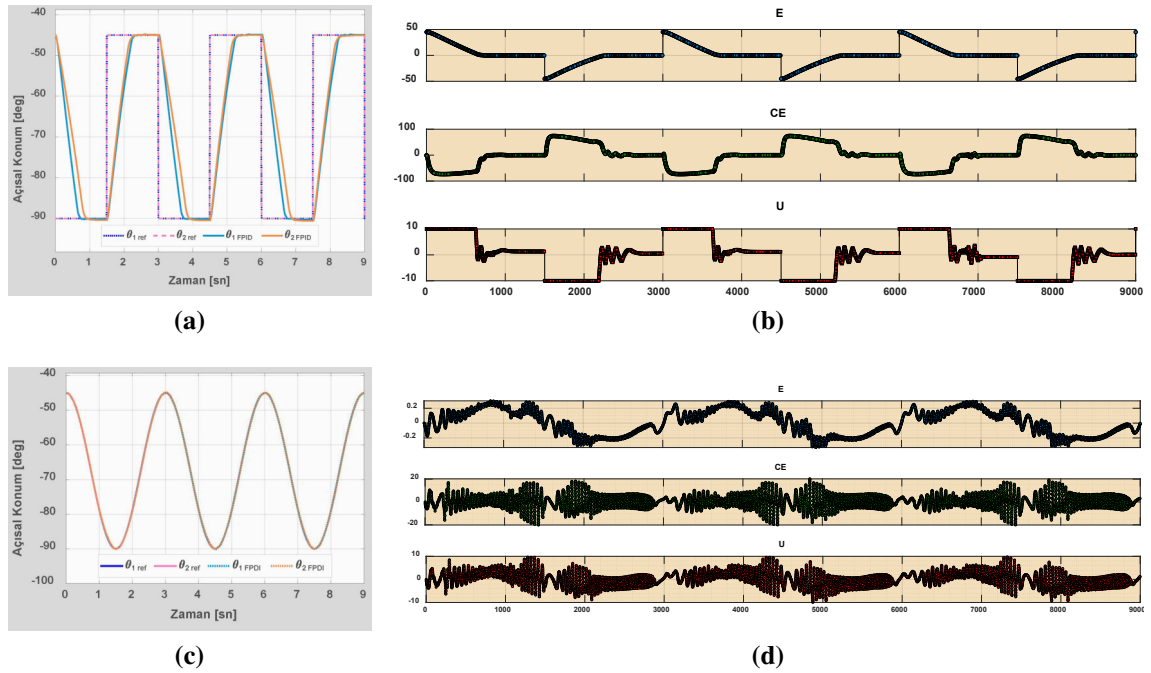
Bacağın konum kontrolü için oluşturulan ANFIS eğitim modeli Tablo 6.10'da özetlenmiştir. ANFIS modelinin eğitimi için kullanılan veri seti Bölüm 6.2.3'de elde edilen kapalı çevrim Bulanık PD+I kontrolcü kullanılarak elde edilmiştir. Veri setini oluşturmak için Şekil 6.21'de gösterilen model kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi eğitim için elde edilen veri seti Bulanık PD+I kontrolcü girişi (E , CE) ve çıkışından (U) oluşmaktadır. Eğitim için anlamlı bir veri seti elde edebilmek için KFE ve DFE eklemlerinin çalışma

Tablo 6.10. Eğitilen ANFIS modeli parametreleri ve yapısı.

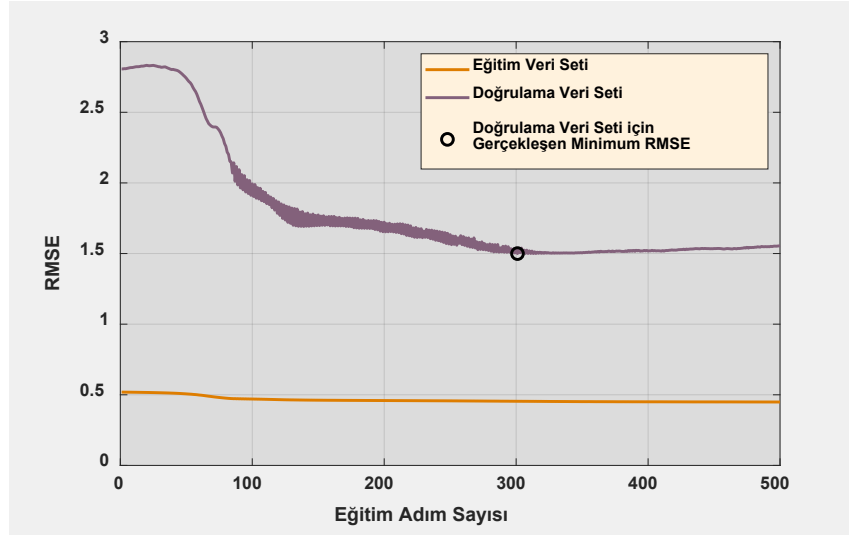
ANFIS Parametreleri		ANFIS Yapısı
Toplam Düğüm Sayısı	35	
Durulaştırma Üyelik Fonksiyonu	$f = ax + by + r$	
Karar Parametre Sayısı	27	
Bulanıklaştırma Üyelik Fonksiyonu	2x3 Adet Genel Çan Eğrisi $\mu = \frac{1}{1 + \left \frac{x - c}{a} \right ^{2b}}$	
Koşul Parametre Sayısı	18	
Toplam Parametre Sayısı	45	
Giriş-Çıkış Veri Seti Adeti	9001	
Toplam Kural Sayısı	9	

aralıkları dikkate alınarak başlangıç konumları derece cinsinden $\theta_1 = \theta_2 = -45^\circ$ ve genlik $s = -45^\circ$ olacak şekilde 3 saniye periyoda sahip bir kare dalga 9 sn boyunca sisteme uygulanmıştır ve 0,001 sn örnekleme zamanı ile 3×9001 adet giriş-çıkış verisi elde edilmiştir. ANFIS eğitiminin doğrulaması için kullanılan veri seti ise aynı yaklaşım ile kare dalga yerine sinüs dalga uygulanarak elde edilmiştir. Uygulanan sinyaller, sistem cevabı ve elde edilen giriş-çıkışlara ait grafikler Şekil 6.22’de gösterilmiştir.

Öncelikle, ANFIS eğitim modelinin başarımını değerlendirmek için 600 döngülük bir eğitim çalışması yapılmıştır ve hem eğitim verisi hem de doğrulama verisi için her bir döngüde elde edilen ortalama hata kareleri toplamı kökü (RMSE) grafiği Şekil 6.23’de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen doğrulama verisi için minimum RMSE’nin gerçekleştiği 300. eğitim adımından sonraki döngülerde eğitim verisi için RMSE değeri azalırken doğrulama verisi için RMSE değeri artmaya başlamaktadır. Yani, bu adımdan sonraki eğitim döngülerinde ANFIS parametreleri eğitim veri setine uyarlanırken genellik kaybedilmektedir. Bu yüzden, genelliğin kaybedilmemesi için eğitim döngüsü 300 adım ile sınırlandırılmıştır. Gerçekleştirilen ANFIS eğitim çalışması sonucunda elde edilen FIS modeli ile Bulanık PD+I kontrolcü modelinin eğitim verisi ve doğrulama verisi bağlamında karşılaştırılması Şekil 6.24’de verilmiştir. Şekil 6.24’de açıkça görüldüğü gibi ANFIS



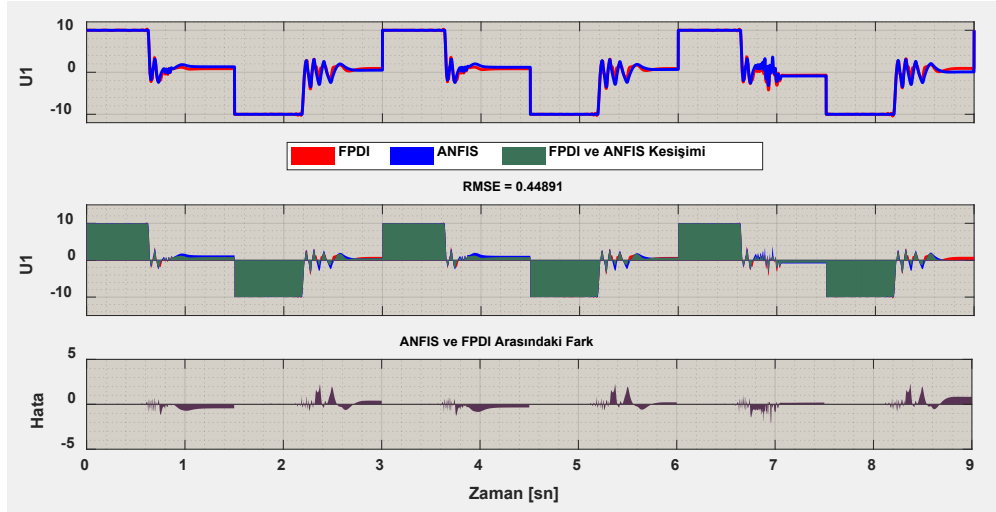
Şekil 6.22. ANFIS eğitimi için, (a) sisteme uygulanan kare dalga giriş ve (b) elde edilen giriş-çıkış veri seti grafiği ile ANFIS doğrulaması için, (c) sisteme uygulanan sinüs dalga giriş ve (d) elde edilen giriş-çıkış veri seti grafiği (Okunabilirlik açısından sadece KFE eklemi için elde edilen giriş çıkışlar gösterilmiştir).



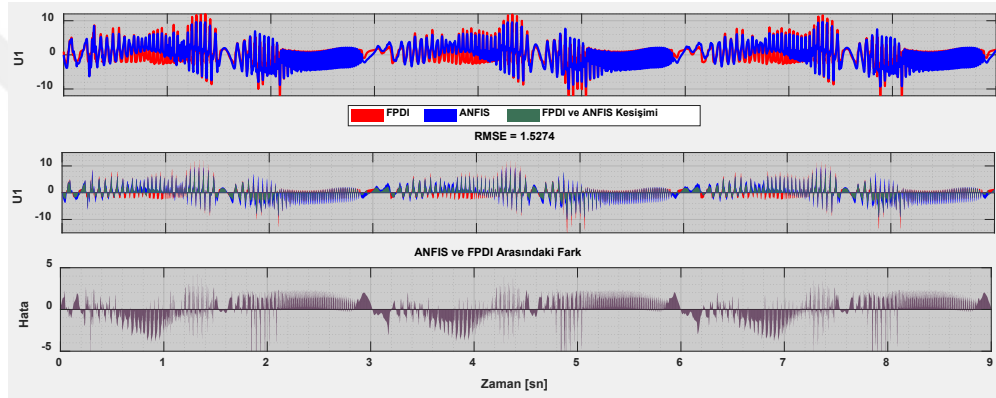
Şekil 6.23. ANFIS modelinin eğitimi sırasında her bir döngü için tahmin hatası kareleri toplamı kökü değerlerini gösteren grafik.

çıktıları ile eğitim verileri örtüşmektedir, yani eğitilen ANFIS modeli, giriş verileri ile çıkış verileri çıkarımını başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmektedir.

Bu aşamadan sonra ANFIS eğitimi ile elde edilen FIS modelinin performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Bunun için Şekil 6.21'de gösterilen benzetim modeli, elde edilen FIS modelinin Bölüm 6.2.3'de elde edilen Bulanık PD+I kontrolcü ile karşılaştırılabilmesi için Şekil 6.25'de gösterildiği gibi düzenlenmiştir. FIS modelinin performans değerlendirilmesinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi ve farklı girişler için başarımının ölçülebilmesi için, eğitim veri seti elde edilirken kullanılan kare dalga giriş sinyalinin genliği $s = -30^\circ$ olarak değiştirilerek sisteme uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı bir şekilde Şekil 6.26'da verilmiştir. Şekil 6.26'da açıkça görüldüğü gibi ANFIS eğitimi ile elde edilen FIS modeli Bulanık PD+I kontrolcüye göre hem maksimum aşma hem de kalıcı durum hatası bağlamında daha iyi bir performans göstermektedir. Bu çalışma sonucunda, ayaklı bir robotun en önemli bileşeni olan bacakların yürüyüş sırasında çevresel etkilere ya da çalışma şartlarındaki değişimlere daha hızlı uyum sağlayabilmesi için uyarlamalı bir kontrolcü tasarımının, Sugeno tipi bir bulanık çıkarım sisteminin öğrenme algoritmaları kullanılarak eğitilmesi *-kısaca ANFIS eğitimi-* sonucunda yapılabileceği ve temel alınan kontrolcü performansında iyileştirme elde edilerek başarılı sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir.

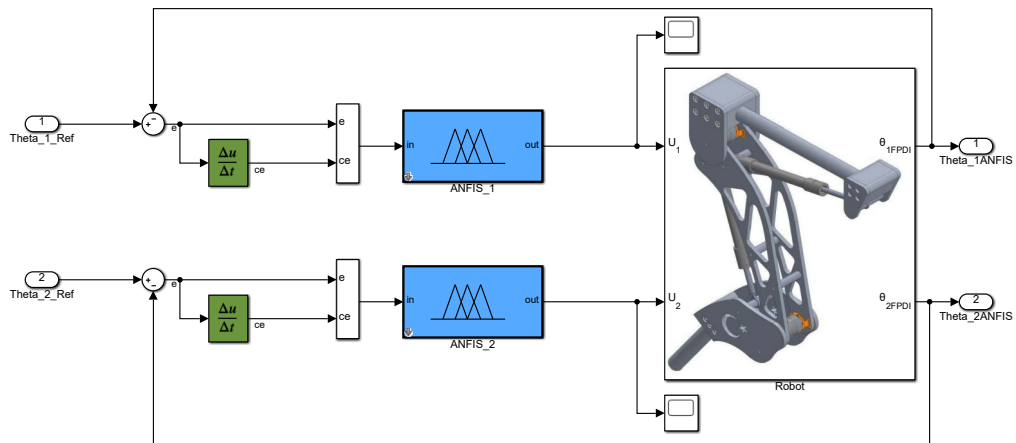


(a) Eğitim veri seti ile karşılaştırma

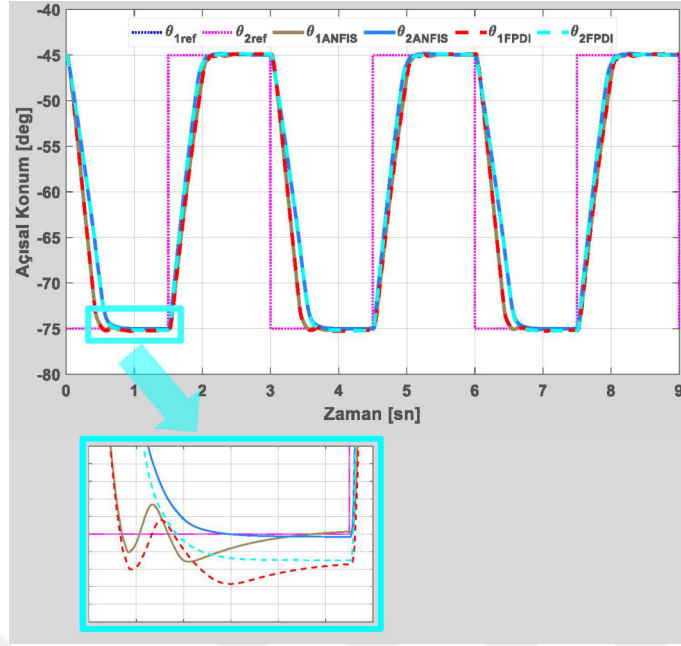


(b) Doğrulama veri seti ile karşılaştırma

Şekil 6.24. Elde edilen FIS modeli ile Bulanık PD+I kontrolcü modelinin eğitim verisi ve doğrulama verisi bağlamında karşılaştırılması.



Şekil 6.25. ANFIS modelinin eğitimi için gerekli veri setinin elde edilmesinde kullanılan benzetim modeli.



Şekil 6.26. Eğitilen ANFIS modeli ve Bulanık PD+I kontrolcünün kare dalga giriş için performans karşılaştırması.

6.3. Bölüm Özeti

Bu bölümde, robot bacağıın konum kontrolü problemine bir çözüm aranmıştır. Bu amaçla, öncelikle, literatürde sıklıkla başvurulan PID kontrol yaklaşımına başvurulmuş ve optimizasyona dayalı kazanç ayarlama yöntemi ile kazançlar elde edilmiştir. Optimizasyon probleminin çözümünde Arı Algoritması kullanılmıştır ve sistemin zaman alanı cevabı kullanılarak belirlenen metriklere göre kontrolcü performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Daha sonra, yüksek derecede doğrusal olmayan bir sistem olan robot bacağıın konum kontrolü için daha sofistike bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmuş ve belirsizlikler içeren doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde oldukça etkili olan Bulanık Mantık kontrol yaklaşımına başvurulmuştur. Bu noktada, elde edilen PID kontrolcü parametrelerini temel alan kendinden ayarlamalı bir Bulanık PD+I kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan Bulanık PD+I kontrolcü ile PID kontrolcü performansları karşılaştırılmış ve sistemin zaman alanı cevabı incelendiğinde, Bulanık PD+I kontrolcünün daha üstün olduğu görülmüştür. Son olarak, kontrolcü tasarımına yönelik çalışmalar ilerletilerek BM kontrolcü parametrelerinin ayarlanmasında öğrenme algoritmalarının kullanıldığı Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolcü yaklaşımı incelenmiştir. Tasarımı yapılan Bulanık PD+I kontrolcüler kullanılarak elde edilen veri setleri ile ANFIS modeli eğitilmiş ve elde edilen Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolcü ile Bulanık PD+I kontrolcü performansları karşılaştırılmıştır.

Daha sağlıklı bir karşılaştırma olması adına, eğitim verisi elde edilirken sisteme uygulanan girişten farklı bir giriş uygulanmış ve kontrolcü başarımı değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ANFIS eğitimi sonucunda elde edilen kontrolcü performansının daha iyi olduğu görülmüştür.

Bu bölümde sunulan çalışmalar neticesinde robot bacağıın konum kontrolü noktasında, ayaklı robotlar literatüründe karşılaşılan genel yaklaşımlara alternatif yöntemler kullanılarak, bir takım iyileştirmeler yapılmıştır. Ancak, robot bacağıın dört ayaklı bir robotta kullanılması planlandığından dolayı robotun çevresi ile olan etkileşimini de kontrol etme gerekliliği vardır. Bu noktada, robot bacağıın çevresine etkidiği kuvvetinde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasının odak noktasının tasarım üzerine yoğunlaştırılmasından dolayı, tez çalışmasının kapsamı dışında olan kuvvet kontrolü problemine bir yanıt aranması gerekmektedir. Bu değerlendirme Bölüm 9’da daha detaylı açıklanmıştır.

7. İLK ÖRNEK İMALATI ve BAŞARIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen robot bacak modeli kullanılarak imal edilen ilk örnek, devamında ilk örnek modeli kullanılarak oluşturulan deneysel sistem ve son olarak deneysel sistemde kullanılan bileşenler tanıtılmıştır. Ayrıca, imalatı gerçekleştirilen ilk örneğin başarımlar değerlendirilmesi yine bu bölümde ele alınmıştır. Robot bacağın ilk örnek imalatında, optimizasyon çalışmaları ile fiziksel boyutları belirlenen katı model temel alınarak üretim gerçekleştirilmiştir. İlk örnek imalatının finansmanı için araştırmacılara maddi kaynak sunan Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne başvuru yapılmıştır ve ilk örnek imalatı, Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce sağlanan destek *-16401148 numaralı proje-* ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, mevcut kaynakların en iyi şekilde kullanılabilmesi adına deneysel sistemin oluşturulmasında halihazırda mevcut olan altyapı kaynakları değerlendirilmiş ve kullanılmıştır.

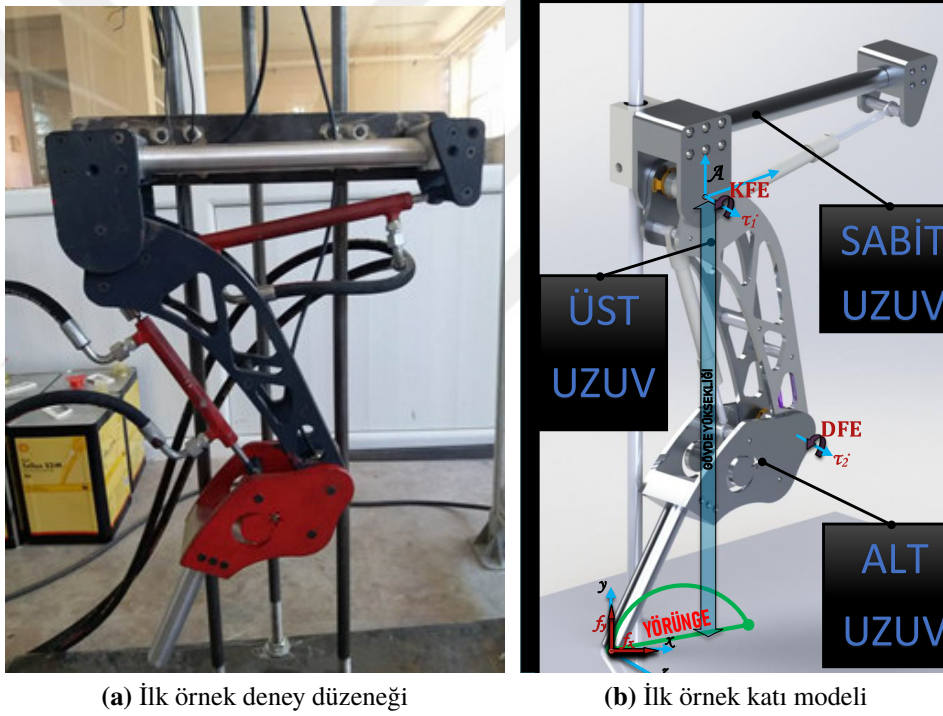
7.1. İlk Örnek Mekanik Tasarımı ve İmalatı

İlk örnek üretimi, Bölüm 5'de elde edilen katı model temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5'de belirtildiği gibi robot bacak uzuvlarının, ataletlerinin mümkün olduğunca düşük tutulması, darbelere karşı dayanıklı olması ve sağlam olması için, ilk örnek modelinin ana malzemesi olarak yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip Al 7075-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Bu bağlamda, katı model temel alınarak imalat resimleri oluşturulmuş ve ilk örneği oluşturulan parçaların geneli 8 mm kalınlığındaki alüminyum levhadan lazer kesim teknolojisi kullanılarak imal edilmiştir. Alüminyum levhadan üretimi mümkün olmayan ve kesilen levhaları birleştirmek için kullanılan bazı parçalar alüminyum lamadan; ve yine kesilen levhaları birleştirmek için kullanılan bazı parçalar ile sabit uzuvda ve ayak ucunda kullanılan bazı parçalar ise alüminyum milden imal edilmiştir. Şekil 7.1'de bacak modelini oluşturan parçalardan örnek olarak alt ve üst uzuvların imalatında kullanılan



Şekil 7.1. Alt ve Üst uzvun imalatında kullanılan levhaların katı model resimleri.

levhaların katı model resimleri gösterilmektedir. İmalatı gerçekleştirilen ilk örneğe ait parçalar daha sonra uygun bağlantı elemanları kullanılarak montajlanmıştır ve sistemin başarımının değerlendirilebilmesi için deney düzeneği hazırlanmıştır. Şekil 7.2’de ilk örnek katı modeli ile imal edilmiş ve montajlanmış deney düzeneği gösterilmektedir. Deney düzeneğinde, bacak modeli hareketli bir kızak üzerine montajlanmış ve deneysel çalışmalarda gerekli hareketleri yapabileceği bir yükseklikte sabitlenmiştir. Şekil 7.2 üzerinde bacak modelini oluşturan uzuvların tanımlamaları ayrıca gösterilmiştir. Sistem; alt ve üst uzuv, sabit uzuv, hareketli ray, hidrolik güç ünitesi, iki adet hidrolik silindir, iki adet açılabilir konum sensörü ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Bölümün devamında, sistemi oluşturan bileşenler daha detaylı açıklanmıştır.



Şekil 7.2. İlk örnek katı modeli ile imal edilmiş ve montajlanmış deney düzeneği görüntüleri.

7.2. Deney Düzeneğinde Kullanılan Eyleyici Sistem

Bu bölümde, deneysel sistemin oluşturulmasında kullanılan eyleyici sistem tanıtımı yapılmıştır. Hidrolik güç ünitesine kısa bir genel bakıştan sonra, hidrolik bileşenler ve özellikleri bölümün devamında açıklanmıştır.

7.2.1. Hidrolik Güç Ünitesi

Deney düzeneğinde kullanılan hidrolik güç ünitesi resmi Şekil 7.3’de gösterilmektedir. Hidrolik güç ünitesi halihazırda mevcut olan altyapı kaynakları arasındadır ve güç ünitesi teknik özellikleri deneysel çalışmalar için yeterli görüldüğünden deney düzeneğinde kullanılmıştır. Hidrolik ünite; hidrolik tank, 8 adet servo yön valfi, hidrolik pompa, elektrik motoru, basınç kontrol valfi, 8 adet basınç transmeteri, sıcaklık sensörü, fanlı soğutucu, seviye şalteri, manometre, hidrolik blok, hidrolik hortum ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Hidrolik ünite elemanları Parker marka olup azami 250 bar çalışma basıncına ulaşabilmektedir. Hidrolik güç ünitesi bileşenleri Tablo 7.1’de özetlenmiştir.

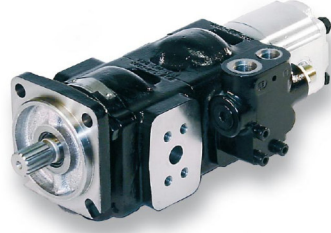


Şekil 7.3. Deney düzeneğinde kullanılan hidrolik güç ünitesi.

Tablo 7.1. Deney düzeneğinde kullanılan hidrolik güç ünitesi bileşenleri.

Ürün Tanımı	Marka	Ürün Kodu	Adet
Hidrolik Tank	Hidroser	NG 120	1
Depo Kapak Filtresi	Parker	MX1591	2
Sıcaklık ve Seviye Göstergesi	Parker	FL69213	1
Dönüş Filtresi Elektrik Gös.	Parker	TPR120QBP2EG121	1
Fanlı Soğutucu	–	60 LT/DK	1
Seviye Şalteri	–	L250	1
Sıcaklık Sensörü	–	PT100	1
Hidrolik Pompa	Parker	PGP511A0060CS2D3NL1L1B1B1	1
Elektrik Motoru EFF1	Gamak	AGM2E 112 M4	1
Oransal Basınç Kontrol	Parker	RE06M35W2V1KW	1
Basınç Kontrol Valfi	Parker	RS10R35S4SN1JW	1
Elektronik Kart	Parker	PCD00A-400	1
Oransal Yön Valfi	Parker	D1VW020BNJW	1
Basınç Sensörü	Gems	3200 Heavy Duty Series	8
Manometre	Pakkens	63*315 A.Ç. GLİS.	1
Hidrolik Silindirler	–	Ø16/Ø10	2

7.2.2. Hidrolik Pompa ve Elektrik Motoru



Şekil 7.4. Parker marka PGP 511 serisi sabit deplasmanlı dişli pompa.

Hidrolik güç ünitesinde, Parker marka gövde malzemesi olarak alüminyum kullanılan PGP 511 serisi sabit deplasmanlı dişli pompa ve GAMAK marka yine alüminyum gövde malzemeli AGM2E 112 M4 serisi 4 kW anma gücü ve 1500 d/dk anma hızı olan üç fazlı asenkron elektrik motoru kullanılmıştır. Kullanılan motora ait teknik detaylar Tablo 7.2’de verilmiştir. Şekil 7.4’de resmi gösterilen PGP 511 serisi pompaya ait veri sayfasından alınan teknik detaylar Tablo 7.3’de verilmiştir. Deneysel sistemde kullanılan model kırmızı ile işaretlenmiştir.

Tablo 7.2. GAMAK AGM2E 112 M4 serisi asenkron elektrik motoruna ait detaylı teknik değerler.

Anma Gücünde					Kalkışta			
Akım [A]	Moment [Nm]	Güç Katsayısı $\cos \phi$	Verim $\% \eta$		Akım Oranı		Moment Oranı	
			4/4	3/4	Doğrudan	Y/ Δ	Doğrudan	Y/ Δ
8,2	26,3	0,81	88,6	88,7	6,6	2,1	2,5	0,8

Tablo 7.3. Parker marka PGP 511 serisi sabit deplasmanlı dişli pompaya ait teknik veriler.

Deplasman xxxx	cm ³ /rev	Boyutlar				Giriş Portu				Çıkış Portu				Devir Hızı		Çalışma Basıncı max. bar
		A	B	C	SS	d	D	G	PP	d	D	G	min. d/dk	max. d/dk		
0040	4.0	42.6	47.0	86.7	L1	13	30	M6	L1	13	30	M6	500	3500	250	
0060	6.0	44.1	50.1	89.8	L1	13	30	M6	L1	13	30	M6	500	3500	250	
0080	8.0	45.7	53.3	93.0	L1	13	30	M6	L1	13	30	M6	500	2500	250	
0100	10.0	47.3	56.5	96.1	L2	19	40	M8	L1	13	30	M6	500	3500	250	
0110	11.0	48.1	58.0	97.7	L2	19	40	M8	L1	13	30	M6	500	3500	250	
0140	14.0	50.4	62.8	102.4	L2	19	40	M8	L1	13	30	M6	500	3100	250	
0160	16.0	52.0	65.9	105.6	L2	19	40	M8	L1	13	30	M6	500	2700	250	
0190	19.0	54.4	70.6	110.3	L2	19	40	M8	L2	19	40	M8	500	2300	250	
0230	23.0	57.5	76.9	116.6	L2	19	40	M8	L2	19	40	M8	500	1900	225	
0270	27.0	60.7	83.2	122.9	L2	19	40	M8	L2	19	40	M8	500	1600	190	
0310	31.0	63.8	89.5	129.2	L2	19	40	M8	L2	19	40	M8	500	1500	165	
0330	33.0	65.4	92.6	132.3	L2	19	40	M8	L2	19	40	M8	500	1500	155	

*PGP511 A XXXX Y S2 D3 N SS PP B1 B1 “Y” = C (Saat Yönü),
= A (Saat Yönü Ters)



(a) RE06M*W serisi oransal basınç emniyet valfi



(b) PCD00A-400 dijital amplifikatör modülü

Şekil 7.5. Deney düzeneğinde basıncı kontrol etmek için kullanılan oransal basınç emniyet valfi (a) ve dijital amplifikatör modülü (b).

7.2.3. Basınç Kontrol Bileşenleri

Hidrolik güç ünitesinde çalışma basıncının kontrolü için oldukça hızlı tepki süresi sunabilen Parker marka RE06M*W serisi doğrudan kumandalı oransal basınç emniyet valfi ve hidrolik pompayı ani basınç artışlarından korumak için yine Parker marka RS serisi pilot kumandalı basınç emniyet valfi kullanılmıştır. Sistem basıncını elektronik olarak kontrol edebilmek için yine Parker marka ve özellikle kullanılan valfler için tasarlanmış PCD00A-400 dijital amplifikatör modülü kullanılmıştır. Modül, birbirinden bağımsız iki bobini sürmek için tasarlanmıştır ve dijital tasarımı sayesinde, solenoid sürücü akımı,

Tablo 7.4. Parker marka PCD00A-400 dijital amplifikatör modülü ve RE06M*W serisi oransal basınç emniyet valfi teknik verileri.

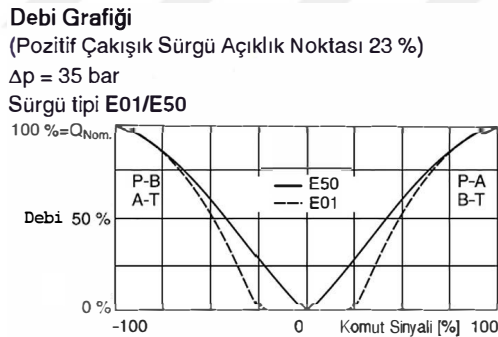
PCD00A-400			RE06M*W		
Genel					
Model		PCD00A-400	Nominal Boyut		DIN NG06
Ürün Malzemesi		Polikarbonat	Arayüz		ISO 6264
Yanmazlık Sınıfı		UL 94'ya göre V0	Montaj Şekli		Yatay
Çalışma Sıcaklık Aralığı	[°C]	-20...+60	Çalışma Sıcaklık Aralığı	[°C]	-20...+60
Koruma Sınıfı		IP20	Koruma Sınıfı		IP65
Ağırlık	[g]	160	Ağırlık	[kg]	1,8
Elektriksel					
Besleme Gerilimi	[V]	18...30	Nominal Gerilim	[V]	12, 16
Akım Tüketimi Maks.	[A]	5,0	Bobin Direnci	[Ω]	4.28 (12 V), 12 (16 V)
Komut Sinyali	[V]	0...+10	Amplifikatör		PCD00A-400
Bağlantı Arayüzü		RS232C	Hidrolik		
Ayarlama Min	[%]	0...50	Çalışma Basıncı	[bar]	Port P ve A 350
Max	[%]	50...100	Basınç Aşamaları	[bar]	105, 175, 250, 350
Rampa	[s]	0...32,5	Akışkan		DIN 51524
Akımı	[A]	0,8/1,3/1,8/2,7/3,5			

minimum, maksimum, rampa ve ayar noktası gibi parametreler programlanabilmektedir. Şekil 7.5’de basıncı kontrol etmek için kullanılan oransal basınç emniyet valfi ve dijital amplifikatör modülü gösterilmektedir ve veri sayfalarından elde edilen teknik detaylar Tablo 7.4’de verilmiştir.

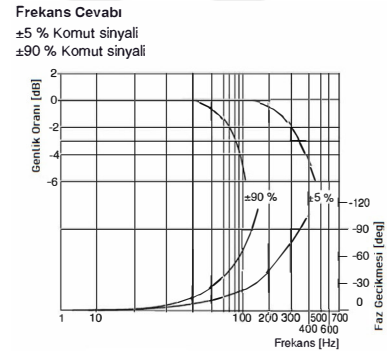
7.2.4. Elektrohidrolik Oransal Yön Valfi



(a) Parker marka D1FP serisi oransal yön valfi



(b) Veri sayfasından elde edilen akış debi karakteristiği (E01).



(c) Veri sayfasından elde edilen frekans cevabı karakteristiği (E01).

Şekil 7.6. Deney düzeneğinde hidrolik silindirlerin kontrolü için kullanılan D1FP oransal yön valfi.

Deney düzeneğinde silindirleri kontrol etmek için, Şekil 7.6’da gösterilen hidrolik konumlandırmada, basınç ve hızın kontrolünde yüksek doğruluk sunabilen ve halihazırda mevcut olan altyapı kaynakları arasında olan Parker marka D1FP serisi oransal yön valfi kullanılmıştır. Oransal valfler, hidrolik sistemlerde, akış yönünü, akış debisini, kuvveti, basıncı, konumu, hızı ve ivmeyi kontrol etmek için kullanılan en önemli elektrohidrolik sistem bileşenlerinden biridir. Bu bağlamda, bütünleşik elektroniği ile D1FP serisi oransal yön valfi oldukça yüksek frekans tepkisine ulaşabilmektedir ve ayrıca, valf boyunca 350

bar gibi bir basınç düşüğü olan uygulamalarda bile yüksek akış kabiliyeti sunabilmektedir. D1FP serisi oransal yön valfine ait akış karakteristiğı ve frekans cevabı grafikleri Şekil 7.6'da verilmiştir. D1FP serisi oransal yön valfine ait veri sayfasından alınan teknik detaylar Tablo 7.5'de verilmiştir. Deneysel sistemde kullanılan model kırmızı ile işaretlenmiştir.

Tablo 7.5. D1FP serisi oransal yön valfi teknik verileri.

Genel		
Model		Doğrudan kumandalı servo oransal DC valf
Boyut		NG06
Montaj Arayüzü		DIN 24340 / ISO 4401 / CETOP RP121 / NFPA
Çalışma Sıcaklık Aralığı	[°C]	-20...+50
Ağırlık	[kg]	3,6
Hidrolik		
Maks. Çalışma Basıncı	[bar]	350
Akışkan		DIN 51524...535
Viskozite		
İzin verilen	[cSt]/mm ² /s	20...400
Tavsiye edilen	[cSt]/mm ² /s	30...80
Nominal Akış $\Delta p=35$ bar	[l/dk]	3 / 6 / 12 / 16 / 25 / 40
Maks. Akış	[l/dk]	90 ($\Delta p=350$ bar)
Kaçak ($\Delta p=100$ bar)	[ml/dk]	<400 (sıfır örtüşme); <50 (üst üste örtüşme)
Açılış Noktası	[%]	23 *komut sinyaline ayarlanmış
Statik/Dinamik		
Basamak Cevabı (% 100 Sinyal)	[ms]	<3,5
Frekans Cevabı (% ± 5 Sinyal)	[Hz]	350 (genlik oranı -3 dB) 350 (faz gecikmesi -90°)
Elektriksel Karakteristik		
Koruma Sınıfı		IP65
Besleme Gerilimi	[V]	DC 22...30
Akım Tüketimi	[A]	3,5
Ön Sigorta	[A]	4
Kontrol Sinyali		
Tip B	Voltaj	10...0...-10
	Empedans	100
Tip E	Akım	20...0...-20
	Empedans	<250

7.2.5. Hidrolik Silindirler

Bölüm 5.3.2'de verilen tasarım ve modelleme çalışmaları neticesinde elde edilen sonuçlar ile hidrolik silindirler imal edilmiştir. Şekil 7.7'de ilk örnek üzerine montajı gerçekleştirilmiş hali gösterilen çift etkili silindirlerin teknik özellikleri Tablo 7.6'da verilmiştir.

Tablo 7.6. Hidrolik silindir teknik özellikleri.

Özellik	Değeri [Birimi]
Silindir Çapı	16 [mm]
Piston Kesit Alanı	201 [mm ²]
Mil Çapı	10 [mm]
Azami Kuvvet	3500 [N]
Silindir Kursu	KFE 90 [mm] DFE 115 [mm]
Silindir Ağırlığı	KFE 0,72 [kg] DFE 0,82 [kg]



Şekil 7.7. İlk örnek üzerine montajı gerçekleştirilmiş KFE silindiri.

7.3. Deney Düzeneginde ve İlk Örnekte Kullanılan Sensörler

Deney düzeneginde ve ilk örnekte, açısal konumları ölçmek için iki adet açısal konum sensörü, silindirlerdeki basıncı ölçmek için iki adet basınç sensörü olmak üzere toplamda dört adet sensör kullanılmıştır. Bölümün devamında kullanılan sensörlerin teknik özellikleri açıklanmıştır.

7.3.1. İlk Örnekte Kullanılan Açısal Konum Sensörü



Şekil 7.8. Deney düzeneginde kullanılan Kübler marka, Sendix 3651/3671 model, tek yönlü, mutlak açısal konum sensörü.

Uzuvların açısal konumlarını ölçmek amacıyla, sistemde uzuvların bağlantı noktalarına montajlanmış iki adet Kübler marka, Sendix 3651/3671 model, tek yönlü, mutlak açısal konum sensörü kullanılmıştır. Tam bir turu 12 bit (4096 nokta) gibi oldukça hassas bir şekilde ölçebilen ve 46 mm dış çap gibi oldukça kompakt bir boyuta sahip açısal konum sensörüne ait resim Şekil 7.8'de verilmiştir. Yüksek hızlarda konum kontrol döngüsü için yüksek çözünürlükteki hassasiyet ve iletişim hızı oldukça önem arz etmektedir. Bunun yanında, deney düzeneginde, mutlak açısal konum sensörlerinin kullanılmasının bir diğer nedeni, bağıl açısal sensörlerden farklı olarak güç verildiği anda açısal pozisyonun ölçülebilmesidir. Bağıl sensörlerde ise ilk güç verildiği anda bir *sıfırlama* işlemine ih-

tiyaç duyulmaktadır. Sendix 3651/3671 model mutlak açısız konum sensörüne ait veri sayfasından alınan teknik detaylar Tablo 7.7’de verilmiştir.

Tablo 7.7. Sendix 3651/3671 model mutlak açısız konum sensörü teknik verileri.

Mekanik Özellikler		
Maks. Hız		6000 min ⁻¹
20 ° C’de Başlangıç Torku		<0,06 Nm
Şaft Yük Kapasitesi	radyal	40 N
	eksenel	20 N
Ağırlık		Yaklaşık 0,2 kg
EN 60529’a göre Koruma Sınıfı		IP67 / IP69k
Çalışma Sıcaklık Aralığı		-40°C ... +85°C
Elektriksel Özellikler Voltaj Arayüzü		
Besleme Gerilimi	Çıkış 0... 5 V	10... 30 V DC
	Çıkış 0... 10 V	15... 30 V DC
Akım Tüketimi		Maks. 35 mA
Ölçme Aralığı		45°, 90°, 180°, 360°
Çözünürlük		12 bit
Voltaj Çıkışı		
Akım		max. 10 mA
Hazırlanma Zamanı		<1 ms

7.3.2. Deney Düzeninde Kullanılan Basınç Sensörü



Şekil 7.9. Deney düzeninde kullanılan GEMS marka 3200 serisi basınç sensörü.

Deney düzeninde çalışma basıncını ölçmek için piezorezistif gerinim ölçer sensörü olan GEMS marka 3100/3200 serisi basınç sensörü (dönüştürücüsü) kullanılmıştır. 250 bar basınca kadar ölçüm yapabilen ve 0–10 V çıkış sinyali üreten GEMS marka 3100/3200 serisi basınç sensörüne ait resim Şekil 7.9’da verilmiştir ve veri sayfasından alınan teknik detaylar Tablo 7.8’de verilmiştir.

Tablo 7.8. GEMS marka 3200 serisi basınç sensörü teknik verileri.

Performans ve Mekanik	
Tepki Süresi	1 ms
Doğruluk	Tam Ölçeğin %0,25
Termal Hata	%1,5 Tam Ölçek/100°C
Ağırlık	35 gr
Koruma Sınıfı	IP67
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40. . . +125°C
Elektriksel Özellikler Voltaj Arayüzü	
Besleme Gerilimi	2. . . 30 V DC @ 4,5 mA
Voltaj Çıkışı	0. . . 10 V

7.4. Deney Düzenesinde Kullanılan Kontrol Sistemi

Deney düzenesinde kullanılan eyleyici sistemi kontrol edebilmek için National Instruments (NI) marka 667 MHz çift çekirdekli kontrol cihazı ve Artix-7 FPGA¹ modülü (cRIO-9063) kullanılmıştır. Yeniden yapılandırılabilir FPGA ile gömülü gerçek zamanlı kontrol cihazı cRIO-9063 Şekil 7.10'de gösterilmektedir.

**Şekil 7.10.** Deney düzenesinde kullanılan NI marka cRIO-9063 kontrol cihazı.

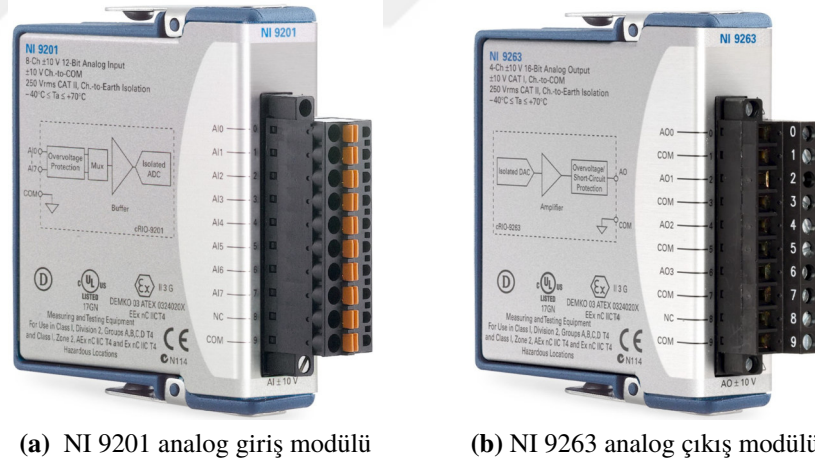
Kullanılan kontrol cihazı NI Linux Real-Time gerçek zamanlı bir işletim sistemini çalıştıran bir işlemciye, programlanabilir bir Xilinx Zynq-7020 FPGA'ya ve görüntü, hareket ve görüntüleme gibi özelliklere sahip 4 adet doğrudan sensör bağlantısı ve özel işlevler sağlayan modüler giriş-çıkış için genişleme yuvalarına sahiptir. NI Linux gerçek zamanlı işletim sistemi ve Artix-7 FPGA çalıştıran 667 MHz çift çekirdekli ARM Cortex-A9 işlemcisi bulunan bu sistem, gelişmiş kontrol ve izleme uygulamaları için çok uygundur ve cihaz gömülü işletim için 256 MB DDR3 bellek, veri kaydı için 512 MB kalıcı bellek ve Gigabit Ethernet, USB ve seri portlar da dahil olmak üzere çok çeşitli bağlantı seçenekleri sunmaktadır. NI cRIO-9063 kontrol cihazına ait özellikler Tablo 7.9'da özetlenmiştir.

¹(Field Programmable Gate Array - Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri), programlanabilir mantık blokları ve bu bloklar arasındaki ara bağlantılardan oluşan ve geniş uygulama alanlarına sahip olan sayısal tümleşik devrelerdir.

Tablo 7.9. Deney düzeneğinde kullanılan NI marka cRIO-9063 kontrol cihazı özellikleri.

İşlemci		Ağ Bağlantısı	
Tip	Xilinx Zynq-7000, XC7Z020	Ağ Arayüzü	10Base-T, 100Base-T 1000Base-T Ethernet
Mimari	ARM Cortex-A9	İletişim Hızı	10 Mbps, 100 Mbps 1,000 Mbps
Hız	667 MHz	Dahili Gerçek Zamanlı Saat	
Çekirdek	2	Doğruluk	5 ppm
İşletim Sistemi		USB Portları	
Desteklenen	NI Linux Real-Time (32-bit)	Tip	USB 2.0 (480 Mbps)
Hafıza ve Depolama		Yeniden Yapılandırılabilir FPGA	
Depolama	512 MB	Tip	Xilinx Zynq-7020
Geçici Hafıza	256 MB (DRAM)	Mantık Hücrelerinin Sayısı	85000
Güç Gereksinimi		Kullanılabilir Blok RAM	4480 kbits
Güç Girişi	18 W	DMA Kanal Sayısı	16
Voltaj Girişi	9...30 V DC	Mantıksal Kesinti Sayısı	32

Deney düzeneğinde kullanılan sensörlerden veri okuyabilmek ve kontrol çevrimine geri besleyebilmek için kontrol cihazı ile uyumlu, yine NI marka 500 kS/s örnekleme hızı ile 12 bit çözünürlüğe sahip 8 adet ± 10 V giriş kanalı sunan NI 9201 analog giriş modülü ve yine NI marka 100 kS/s/ch örnekleme hızı ile 16 bit çözünürlüğe sahip eşzamanlı 4 adet ± 10 V çıkış kanalı sunan NI 9263 analog çıkış modülü kullanılmıştır. Giriş-çıkış modüllerine ait resimler Şekil 7.11'de gösterilmiştir.

**Şekil 7.11.** Deney düzeneğinde kullanılan NI marka giriş-çıkış modülleri.

Giriş-çıkış modülleri doğrudan kontrol cihazına bağlanabilmektedir ve ayrı alt sistemlere ihtiyaç duyulmadığından daha kompakt bir kontrol sistemi elde edilmektedir. Bu şekilde bir cihaz seçimi yapılmasının diğer bir nedeni ise, ilk örnek modelinin dört ayaklı bir robotta kullanılacak olması gerçeğinden hareketle hem gömülü bir kontrolcü sistemi hem de dört ayaklı bir robot için yeterli genişlemeyi sağlayabilen bir sistem yapılandırması elde edilmiştir. Böylelikle, gömülü sistemler ile veri toplama ve kontrol konularında çalışmalar



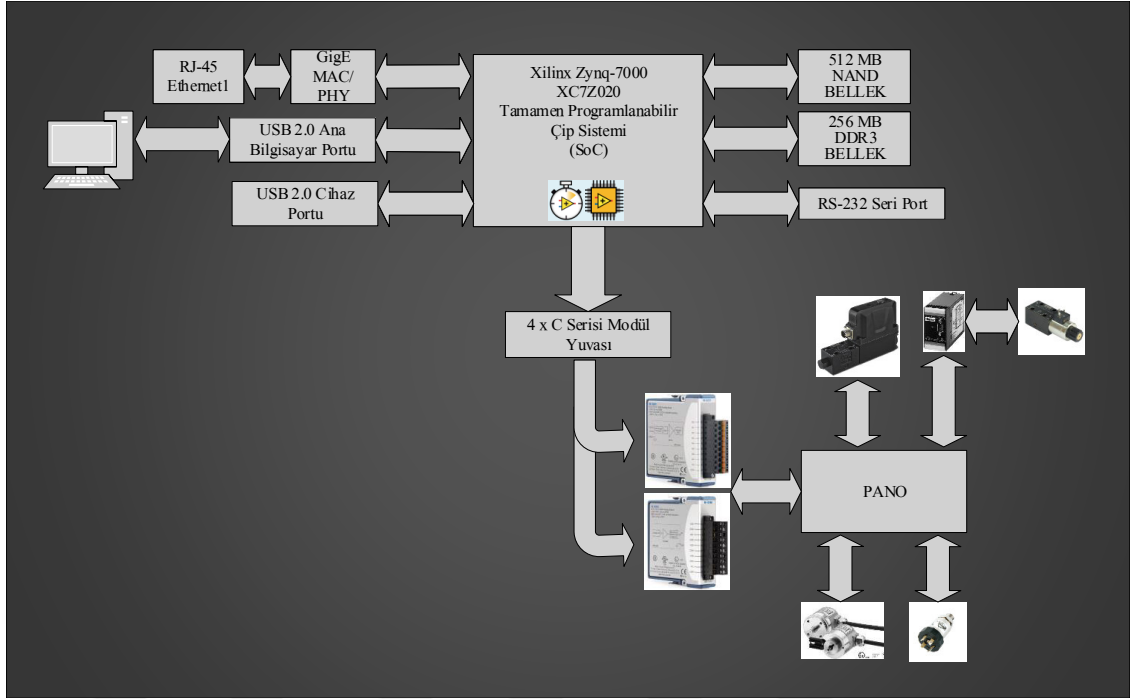
Şekil 7.12. Deney düzeneğinde kullanılan kontrol cihazı ve giriş-çıkış modüllerinin yapılandırılmış hali.

yapılmasına olanak sağlanmıştır. Kontrol cihazı ve giriş-çıkış modüllerinin yapılandırılmış hali Şekil 7.12’de gösterilmektedir.

Deney düzeneğinde kontrol cihazı ile eyleyici sistem ve sensörler arasında kablolu işlemi için bir elektronik pano kullanılmıştır. Hidrolik güç ünitesi üzerine monte edilen elektronik panonun kurulmuş hali Şekil 7.13’de gösterilmektedir. Elektronik pano sistemde kullanılan bütün giriş-çıkış kablolarının yanı sıra hidrolik güç ünitesi için ya-



Şekil 7.13. Deney düzeneğinde kullanılan elektronik pano.



Şekil 7.14. Deney düzeneği kontrol sistemi mimarisi.

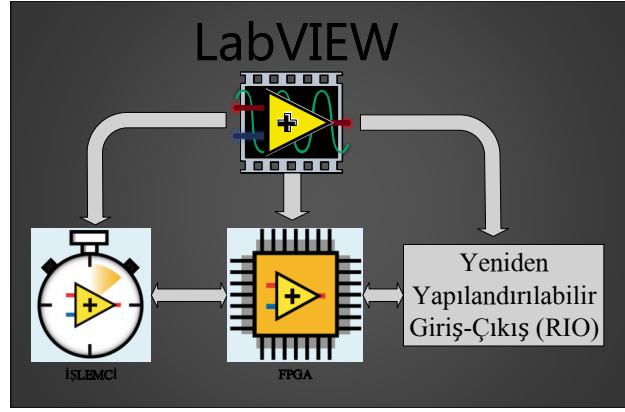
pılan bütün kablolama işlemini de tek bir merkezde toplamaktadır. Bu sayede, sistemin karmaşıklığı azaltılmış ve çevresel etkiler asgari seviyede tutularak sistemin güvenilirliği artırılmıştır. Giriş-çıkışlar ve kontrol cihazı arasındaki iletişim tek bir bağlantı üzerinden gerçekleştirilmiştir ve sistemdeki tüm kablolar, kolay bakım, bileşen değiştirme ve hata ayıklama için her iki ucunda da konektörlere sahiptir. Deney düzeneği için oluşturulan kontrol sisteminin mimarisi Şekil 7.14’de gösterilmektedir.

Kontrol sistemi mimarisinde kullanılan FPGA ve gerçek zamanlı NI Linux Real-Time işletim sistemi çalıştıran işlemcinin kullanıldığı bir yazılım geliştirmek için LabVIEW¹ sistem tasarım yazılımı kullanılmıştır. Bölümün devamında LabVIEW yazılımı kısaca açıklandıktan sonra deney düzeneği başarımının değerlendirilmesi için geliştirilen gerçek zamanlı kontrol yazılımının geliştirme aşamaları anlatılmıştır.

7.5. İlk Örnek Modelinin Gerçek-Zamanlı Konum Kontrolü

İlk örnek modeli ile oluşturulan deney düzeneğinin gerçek zamanlı kontrolü için LabVIEW yeniden yapılandırılabilir giriş-çıkış (RIO) mimarisinden faydalanılmıştır. Her türlü sensör veya özel giriş-çıkış ile arayüz oluşturma, gelişmiş sinyal işleme ve özel analitik uygulama ve gelişmiş kontrol algoritmalarını uygulama yeteneğine sahip olan LabVIEW RIO mimarisi ile gelişmiş kontrol veya ölçüm sistemleri tasarlanabilmektedir. Bu mimari,

¹Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench



Şekil 7.15. LabVIEW RIO mimarisini gösteren diyagram.

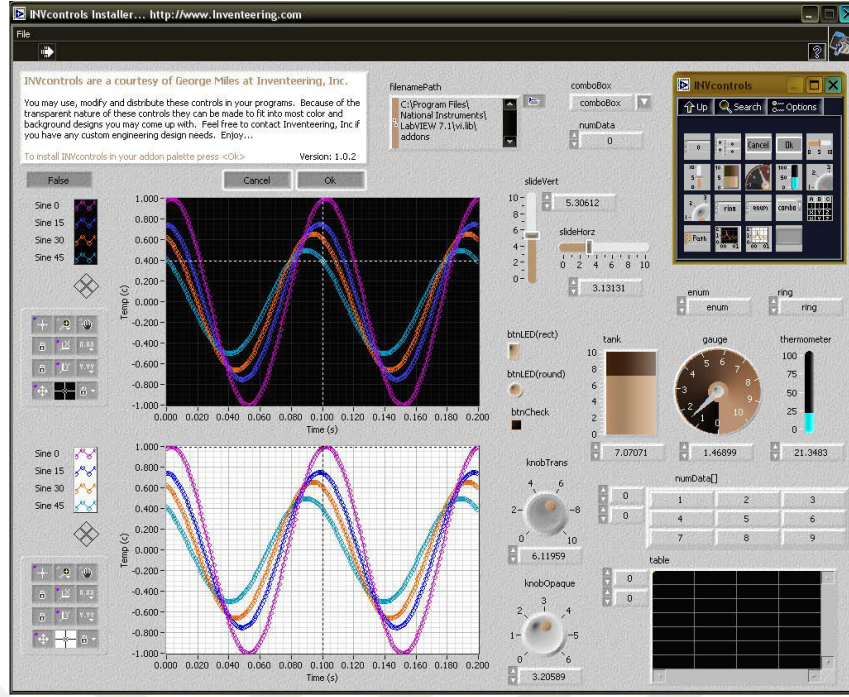
gerçek zamanlı işlemcileri, kullanıcı tarafından programlanabilen FPGA'ları, modüler giriş-çıkış arayüzlerini ve sistemin her bir elemanını programlamak ve özelleştirmek için kullanılan bir yazılım araç zincirini¹ tek bir ortamda birleştirmektedir. LabVIEW RIO mimarisini kısaca özetleyen diyagram Şekil 7.15'de gösterilmiştir. Şekil 7.15'deki diyagramda gösterilen işlemci, LabVIEW programlama dili kullanılarak, uygulamaları çalıştırmak, veri kümelerini değiştirmek, sinyalleri işlemek, verileri kaydetmek gibi bir çok genel görevi gerçekleştirmek için programlanabilmektedir. Bunun için bir işletim sistemine ihtiyaç vardır ve bu noktada, NI belirli donanımlarında, NI Linux Real Time adında Linux tabanlı bir gerçek zamanlı işletim sistemi sunmaktadır. Genel olarak, işletim sistemleri bir bilgisayarın donanım kaynaklarını yönetmek ve bilgisayarda çalışan uygulamaları barındırmaktan sorumludur. Gerçek zamanlı bir işletim sistemi, yine bu görevleri yerine getirmektedir, ancak aynı zamanda uygulamaları çok hassas zamanlama ve yüksek derecede güvenilirlikle çalıştırmak için özel olarak tasarlanmıştır. Burada temel nokta, eğer doğru programlanmışsa, gerçek zamanlı bir işletim sistemi bir programın kesin bir zamanlama ile çalışacağını garanti edebilmektedir. Kontrol sistemlerinde bunun anlamı, gerçek zamanlı bir işletim sistemi ile kontrol sistemi giriş verilerinin tutarlı ve belirli bir sürede işlenmesi ve güvenilir çıkış verisi elde edilmesi sağlanabilmektedir. Bunun yanında, Şekil 7.15'deki diyagramda gösterilen FPGA ise, doğası gereği herhangi bir işletim sistemi gerektirmez ve gelişmiş sinyal işleme uygulamaları, karmaşık hesaplamalar ve karar verme algoritmalarının uygulanması için kullanılabilir. Özellikle FPGA, kendiliğinden hızlı, deterministik ve paralel çalışması nedeniyle kontrol için idealdir; her biri MHz seviyesine çıkabilen döngü hızlarında farklı zamanlama ve veri aktarma mekanizmalarına sahip paralel olarak

¹Yazılım literatüründe *Araç Zinciri*, bir yazılım ürünü oluşturmak için kullanılan programlama araçları setine verilen isimdir.

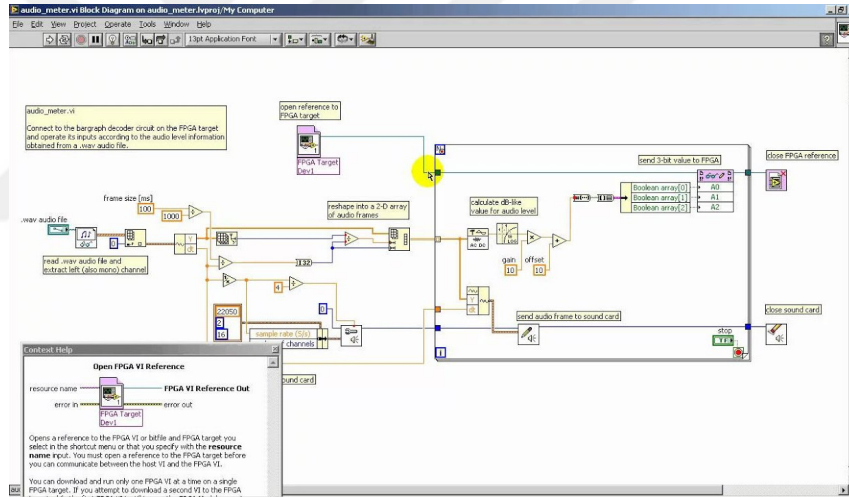
bir çok kontrol döngüsü uygulamasını çalıştırabilmektedir. Bu bağlamda FPGA, LabVIEW RIO mimarisinin ana çekirdeğidir ve kritik veya yoğun işler işlemci üzerinde değil, FPGA üzerinden yürütülebilmektedir ve bu sayede son derece yüksek verim ile güvenilir, deterministik uygulama sağlamak için kullanılabilir. FPGA, yüksek performanslı sinyal işleme ve özelleştirilebilir zamanlama, tetikleme ve senkronizasyon işlemleri için – bir veriyolu yerine – doğrudan giriş-çıkışlara bağlanabilmektedir ve bu doğrudan bağlantı özelliği sayesinde en gelişmiş kontrol algoritmaları için gereken performansı sağlayan neredeyse sıfır kontrol döngüsü gecikmesi sunabilmektedir. Örnek olarak, FPGA kullanılarak, tek bir kontrol cihazı ile aynı anda 100 kHz hızında yirmiden fazla analog PID kontrol döngüsü çalıştırabilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan kontrol sistemine ait işlemci, FPGA ve yeniden yapılandırılabilir giriş-çıkış birimleri hakkında teknik bilgiler Bölüm 7.4’de verilmiştir.

Gerçek zamanlı programlama ve FPGA için gerekli tüm araçları tek bir ortamda sunan LabVIEW sistem tasarım yazılımı ise uygulamalar oluşturmak için metin satırları yerine simgeleri kullanan grafiksel bir programlama dilidir. Program yürütme sırasını belirlemek için direktiflerin kullanıldığı metin tabanlı programlama dillerinin aksine, LabVIEW veri akışı programlamasını kullanmaktadır. Veri akışı programlamasında, blok şemadaki düğümler üzerinden veri akışı sanal araçlar (VI) ve fonksiyonların yürütme sırasını belirlemektedir. Sanal araçlar, fiziksel araçları taklit eden LabVIEW programlarıdır. LabVIEW programlama dilinde, öncelikle, bir dizi araç ve nesnelere kullanarak ön panel olarak bilinen bir kullanıcı arayüzü oluşturulmaktadır. Şekil 7.16a’da bir örneği gösterildiği gibi bir ön panel oluşturulduktan sonra, Şekil 7.16b’de bir örneği gösterildiği gibi ön panel nesnelere kontrol etmek için işlevlerin grafik gösterimlerini kullanarak kodlar akış şemasını andıran blok şemasına eklenmektedir. Blok şema, ön panel ve kodun grafik gösterimleri bir VI oluşturmaktadır.

Gerçek-zamanlı veri okuma ve kontrol yazılımı geliştirmek için yapılan çalışmalarda, ilk önce, sistemin herhangi bir referans girişine karşı gösterdiği tepkiyi görmek ve sistemin işlevselliğini doğrulamak amacıyla; Farklı frekanslarda ve genlikteki sinüs şeklindeki bir sinyal sistemin girişine olarak tanımlanarak, sistemin fiziksel trendleri gözlenmiş ve sistemin performansı test edilmiştir. Bunun yanında, uzuvların konumlarına ve elektrohidrolik oransal yön valflerinin çıkış basınçlarına ait deneysel veriler elde edilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde; elektrohidrolik oransal yön valflerine verilen girişe karşı, açılmal



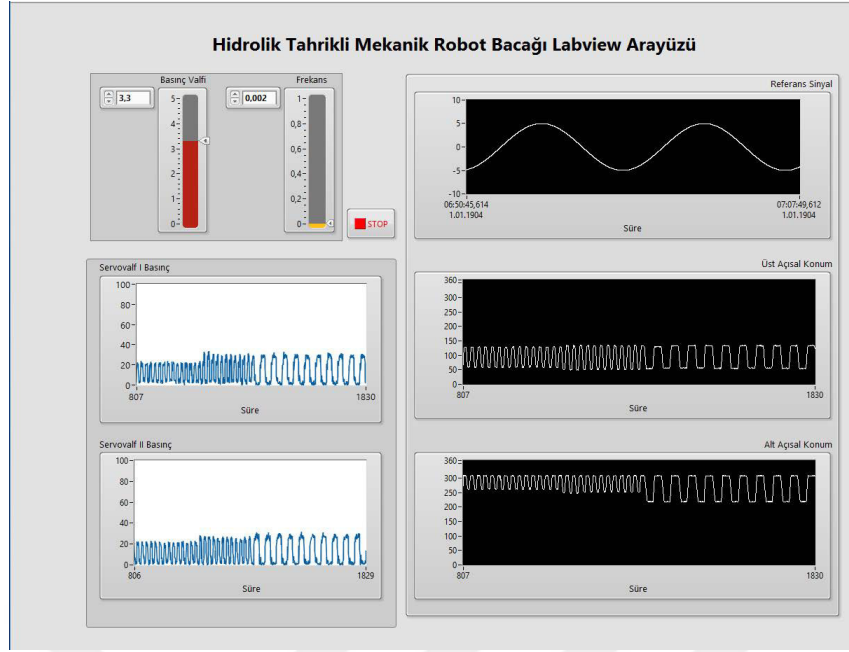
(a) Ön Panel



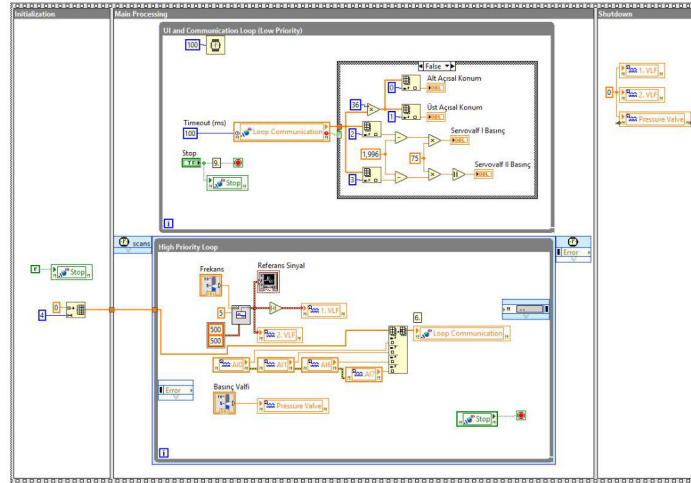
(b) Blok Diyagramı

Şekil 7.16. LabVIEW VI örnek gösterimi.

konum ve basınç sensörlerinden okunan değerlerin fiziksel trendler ile uyumlu olduğu ve sistemin sağlıklı bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Bu ilk aşama için geliştirilen VI ekran alıntıları Şekil 7.17’de gösterilmektedir. Şekil 7.17’de görüldüğü üzere farklı frekans ve basınç değerlerine karşın, uzuvların açılma konumları ve servo valf çıkış basınçları ölçümleri giriş sinyali ile uyumlu bir şekilde sonuçlanmıştır. Şekil 7.17’de *Referans Sinyal* servo valflere giden ± 10 voltaj değeridir. *Basınç Valfi* PCD00A-400 dijital amplifikatör modülünü tetikleyen voltaj değeridir. *Servovalf I* ve *Servovalf II* ise elektrohidrolik oransal yön valflerinin A portundan okunan basınç değerleridir.



(a) Ön Panel



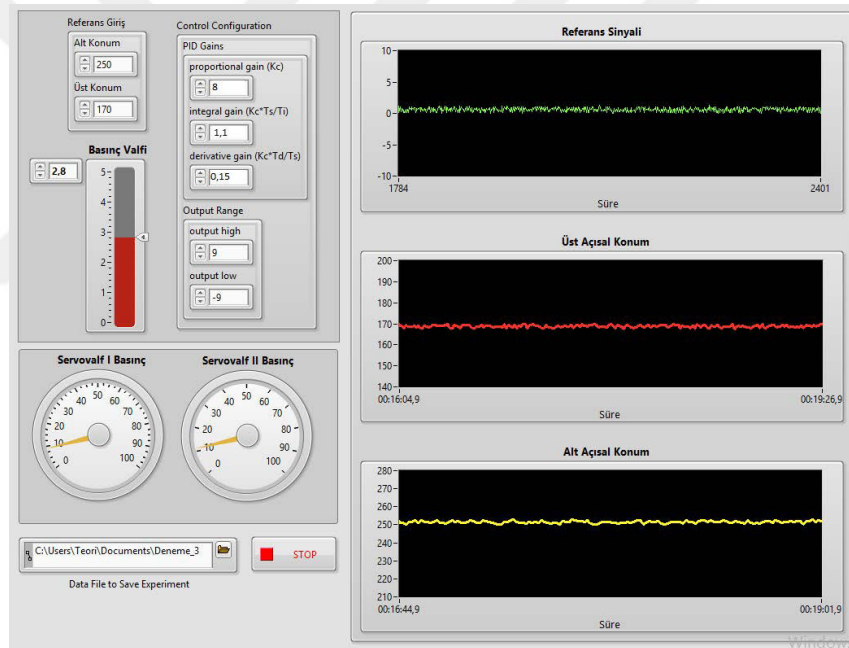
(b) Blok Diyagramı

Şekil 7.17. Deney düzeneğini doğrulama için geliştirilen VI ekran görüntüleri.

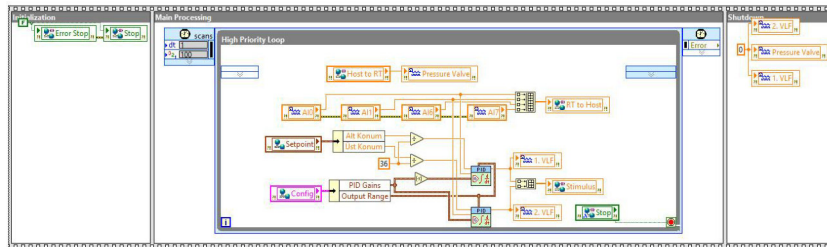
Doğrulama işlemi gerçekleştirildikten sonra, Şekil 7.18'de gösterildiği gibi gerçek-zamanlı PID kontrolcü yazılımı geliştirilmiş ve ilk örnek modelinin alt ve üst uzuvlarının açılmal konumları kontrol edilmeye çalışılmıştır. Labview ile programlanan arayüzde PID kontrolcü kazançları ve sistem basıncı anlık ayarlanabilmektedir, ayrıca yön valflerindeki basınçlar, uzuvların açılmal konumları ve kontrolcü çıkış sinyali anlık görüntülenebilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, bacağın alt ve üst uzuvları için girilen referans açılmal konumlara karşın PID kontrolcü başarılı bir şekilde kontrol sağlamakta ve uzuvlar istenilen açılmal konumları karşılamaktadır. Devamında, ayak uç noktasının KFE eklemine dönme merkezine yerleştirilen referans eksen takımına göre konum kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 4.2’de elde edilen ters kinematik denklemler kullanılarak gerekli açısız konumlar hesaplanmış ve elde edilen açısız konumlar kontrolcü referansı olarak tanımlanmıştır. Şekil 7.19’da ayak uç noktasının konum kontrol performansı ve kontrolcü sinyali grafiği verilmiştir.

Ayak uç noktasının konum kontrolü sağlandıktan sonra sisteme adım şeklinde bir yörünge tanımlanarak yörünge kontrolü gerçekleştirilmiştir. Yörünge Matlab programlama dili kullanılarak kodlanmış ve LabVIEW programında bütünleşik bir şekilde kullanılarak yörünge takibi için gerekli referans ayak ucu konumları elde edilmiştir. Şekil 7.20’de ayak uç noktasının yörünge kontrol performansı ve kontrolcü sinyali grafiği verilmiştir. Şekil 7.20’de görüldüğü üzere sistem belirlenen adım profilini sağlayacak açısız konumları belirli bir hata ile takip edebilmektedir. Hidroik sistem yapılandırmasından kaynaklanan bu hatanın nedenleri bir sonraki bölümde tartışılmıştır.

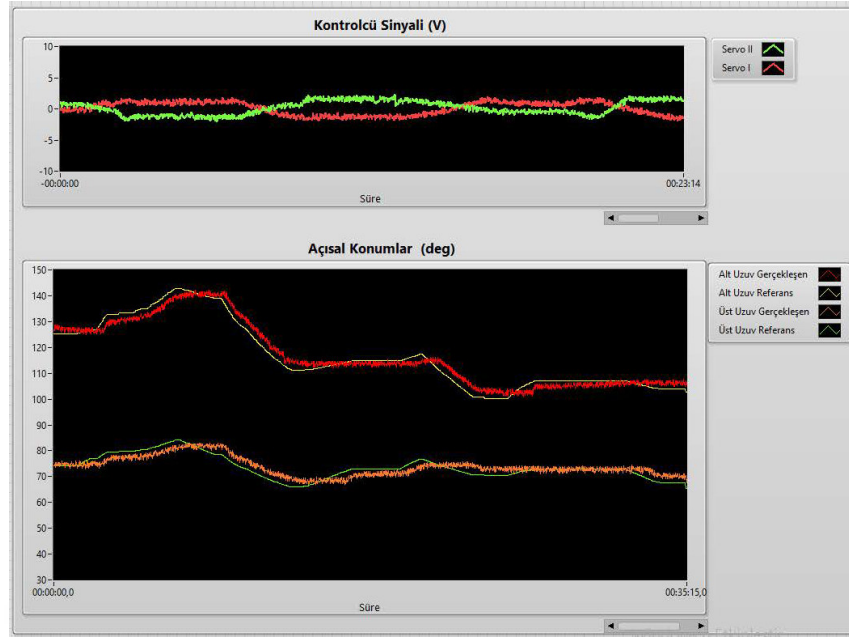


(a) Ön Panel



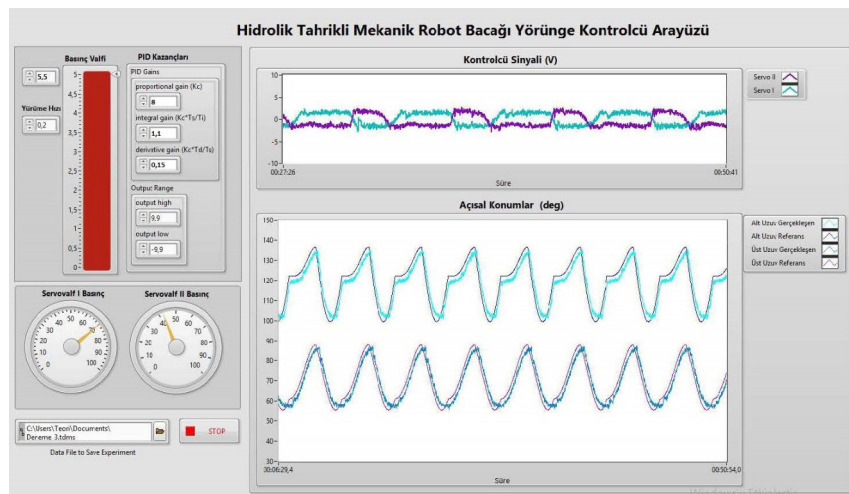
(b) Blok Diyagramı

Şekil 7.18. Deney sisteminin açısız konum kontrolü için PID kontrolcü başarımını değerlendirmek üzere oluşturulan gerçek zamanlı veri okuma ve kontrol yazılımına ait ekran görüntüleri.

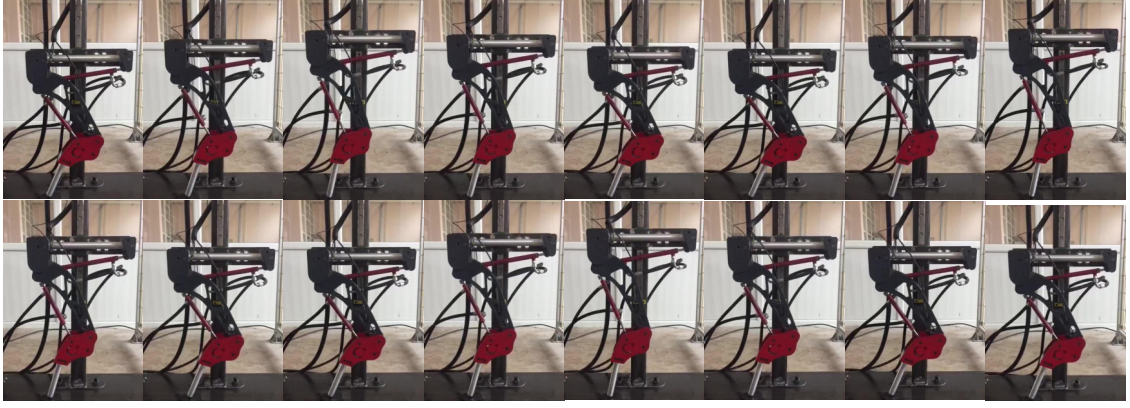


Şekil 7.19. Deney sisteminin ayak ucu konum kontrolü başarımını değerlendirmek üzere oluşturulan gerçek zamanlı veri okuma ve kontrol yazılımına ait ekran görüntüsü.

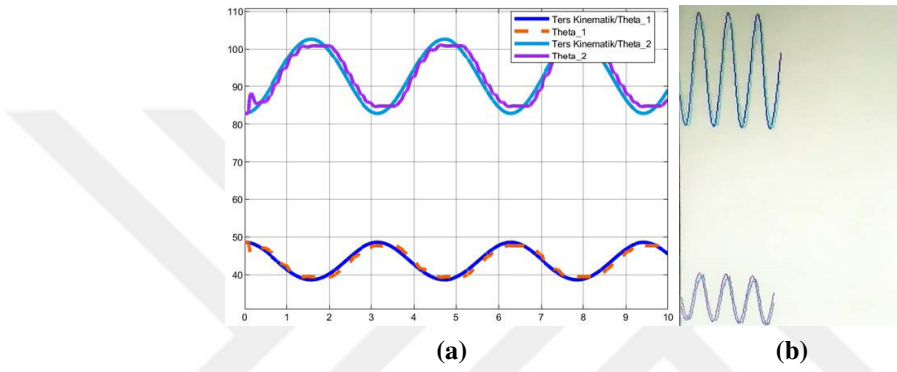
Kızak üzerine sabitlenmiş olarak gerçekleştirilen bu testlerden sonra, ayak uç noktasının yer düzlemine temas edebilecek ve ilk örnek modelinin yaklaşık 8 kg olan bağlantı parçasını taşıyarak kızak üzerinde serbest hareket edebilecek şekilde deney düzeneği tekrar oluşturulmuştur. Daha sonra, ayak uç noktasının referans eksen takımına göre yatayda 0,05 m’de sabit ve dikeyde 0,65 m’den başlayarak, 0,05 m genliğinde ve 0,125 Hz frekansında Sinüs dalgası şeklinde hareket ettiği bir salınım hareketi ilk örnek modeli için tanımlanarak konum kontrolü gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında kayıtlı edilen görüntüler yaklaşık 1,5 saniyelik örneklem zamanı ile sıralı olarak Şekil 7.21’de



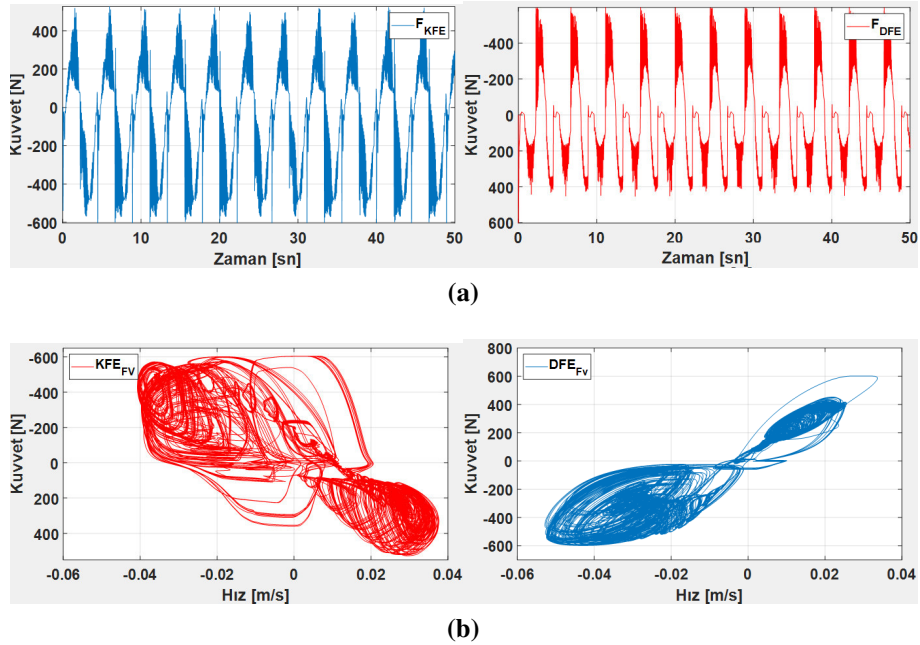
Şekil 7.20. Deney sisteminin ayak ucu yörünge kontrolü başarımını değerlendirmek üzere oluşturulan gerçek zamanlı veri okuma ve kontrol yazılımına ait ekran görüntüsü.



Şekil 7.21. İlk örnek modelinin salınım hareketi sırasında elde edilmiş görüntü dizisi.



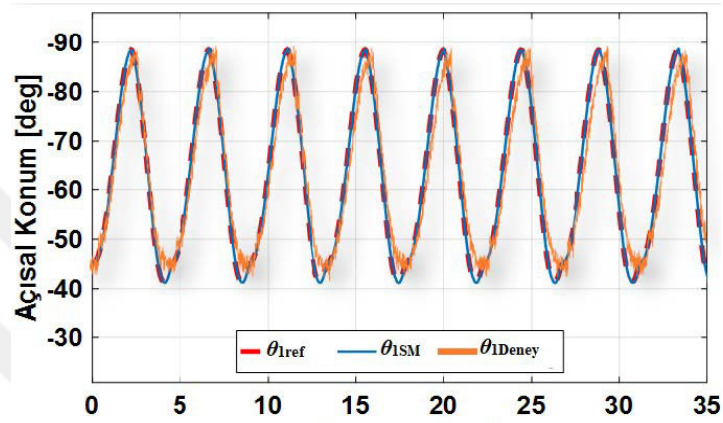
Şekil 7.22. Salınım hareketi sırasında referans takip performans grafiği; (a) Matlab programında kayıtlı verilerden elde edilmiş grafik, (b) Deney anında yazılım ekranından elde edilmiş ekran görüntüsü (üst-KFE, alt-DFE eklemi).



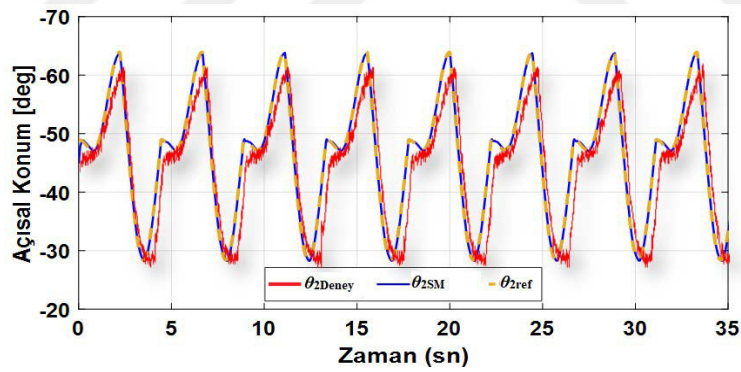
Şekil 7.23. Salınım hareketi sırasında oluşan kuvvet grafikleri; (a) Eyleyicilerin ürettiği kuvvet grafikleri (KFE eklemi - mavi, DFE eklemi - kırmızı renk), (b) Eyleyici kuvveti ve eyleyici hızı grafiği (KFE eklemi - kırmızı, DFE eklemi - mavi renk).

verilmiştir. Referans takip performansını gösteren grafikler Şekil 7.22’de ve referans takibi sırasında eyleyicilerde oluşan kuvvet grafiği Şekil 7.23’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, konum takip performansının ilk örnek modelinin yerde olduğu durumda iyileştiği görülmektedir. Bu iyileşme, sistem üzerinde ön bir yük olması ile açıklanabilir. Bu durum bir sonraki bölümde daha detaylı tartışılmıştır.

7.6. İlk Örnek Başarımının Değerlendirilmesi ve Tartışılması



(a) KFE eklemi



(b) DFE eklemi

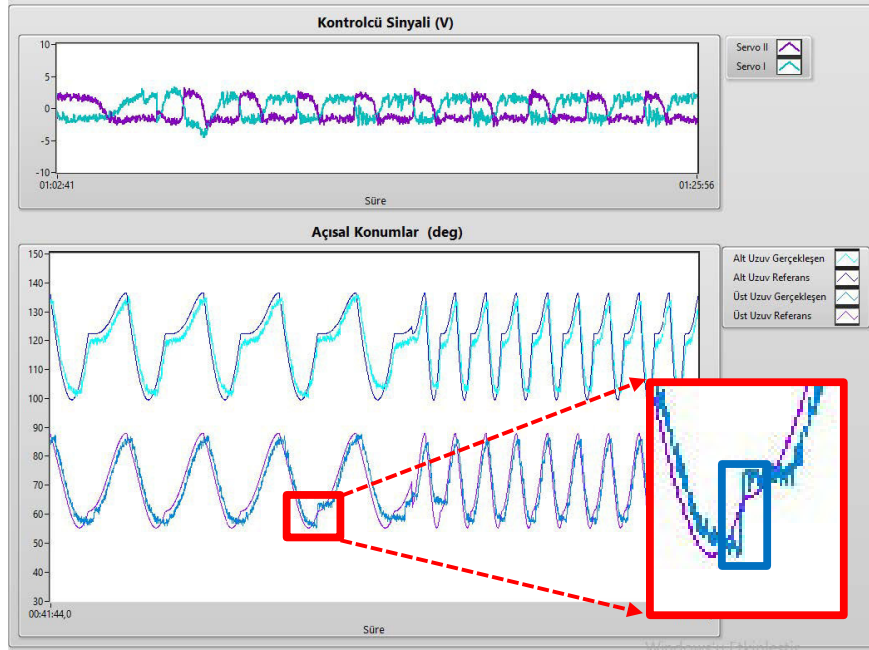
Şekil 7.24. Yörünge takibi performansı bağlamında benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmaların karşılaştırılması.

Şekil 7.24’de yörünge takibi performansı bağlamında benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmaların karşılaştırılması verilmiştir. Grafikler incelendiğinde deneysel çalışmalarda yörünge takibi bağlamında eklemlerin referans açısai konumları yaklaşık 0.2sn’lik bir gecikme ile takip ettiği açıkça görülebilir. Bu anlamda tek başına konum kontrolü için kontrolcü performansı oldukça iyidir ve bu matematiksel modelin çok az bir hata ile elde edildiğini göstermektedir. Diğer taraftan, bu hatanın sistemdeki süreksizliklerin

matematiksel modele dahil edilememesi ve konum kontrolünün tek başına yetersiz olması gibi farklı nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu açıdan, yapılan deneyler ile ilk örnek modelinin tasarım anlamında başarılı olduğu ve öngörülen hareketleri başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, ilk örnek modelinin başarımının dört ayaklı bir robot tasarımında kullanılabilirliği doğrulanmıştır. Ancak, hidrolik sistem ve kontrolcü performansları bağlamında arzu edilen bir başarıım yakalanamamıştır ve bu sebepten dolayı ileride yapılacak olan dört ayaklı bir robot tasarımında, hidrolik sistem için daha gelişmiş teknolojilerin ve kontrolcü tasarımında daha sofistike yaklaşımların tercih edilmesi gerekliliği tespit edilmiştir. Bölümün devamında bu tespitlere ve başarımın iyileştirilebilmesi noktasında yapılan yorumlara ve görüşlere yer verilmiştir.

Deneyler sırasında gözlemlenen hidrolik sistem performansı başarımını olumsuz etkileyen faktörlerin başında kullanılan yön valfinin tipi gelmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan yön valfi sürgüsünün çakışması %23 kontrol sinyali oranı ile pozitif ve bu durum yön değişimleri sırasında sistemi oldukça olumsuz etkilemektedir. Yön değiştirilirken bütün portların birbirleri ile bağlantısı kesildiğinden ani basınç yükselmesi ile darbeleri ve sert bir geçiş olmaktadır. Bununla birlikte, neden olduğu süreksizlikten dolayı kontrolcü performansını da olumsuz etkilemektedir ve kontrolcü tepkisini geciktirmektedir. Bu durum Şekil 7.25’de mavi ile gösterilen alanda çok açık görülmektedir. Sonuç olarak, hidrolik tahrikli bir robot bacağın konum kontrolü için seçilecek yön valfinin en doğru sürgü tipi sıfır çakışmalı olan olarak düşünülmektedir. Sıfır çakışmalı yön valflerinde yön değiştirme yolu kısaldığından yön değişimleri oldukça hızlı olmaktadır, bu durum pozitif çakışmalı tipe göre kontrolcü tepkisini geciktiren süreksizlikleri ortadan kaldıracak ve kontrolcü performansını olumsuz etkilemeyecektir.

Bunun yanında hidrolik silindirler ile yön valfi bağlantısı için kullanılan hidrolik hortumların varlığı hidrolik sisteme fazladan ek bir hacim eklemekle beraber yapısından dolayı basınç altında genişleyen hidrolik hortumlar bu ek hacmin oranını daha da fazlalaştırmaktadır. Sistemde kullanılan hidrolik sıvıların sıkıştırılabilir olduğu gerçeğinden dolayı, yön valfi ve silindirler arasındaki hacmin kontrolcü performansını olumsuz etkilediği bilinmektedir ve valf ile silindirler arasına ayrıca ek bir hacim eklenmesi kontrolcü performansını daha da olumsuz etkileyeceği çok açık bir gerçektir. Bu durum, yapılan deneyler sırasında net bir şekilde gözlemlenmiş ve matematiksel modele dahil edilmeyen bu ek hacim ve hidrolik akışkanın sıkıştırılabilir özelliği sonucu teorik çalışmalarda elde edilen



Şekil 7.25. Bu bölümde bahsedilen yön valfi tipi, valf ve silindirler arasındaki hacim ve yapışma-etkisi nedeni ile gözlemlenen olumsuzlukları gösteren deneysel çalışmalar sırasında elde edilen yörünge takibi kontrolü performansı grafiği.

kontrolcü performansı deneysel çalışmalarda yakalanamamıştır. Şekil 7.25 incelendiğinde kontrolcü tepkisinin teorik çalışmalarda elde edilen sonuçlara (Bknz. Şekil 6.22c) göre gecikmesi çok açık görülmektedir. Kontrolcü tasarımı sırasında yapılan teorik çalışmalarda bu süreksizliklerin modellenmesi oldukça karmaşık olduğundan, bu olumsuz etkilerin asgariye indirilmesinin daha geçerli bir çözüm olacağı düşünülmektedir. Bu durum, hidrolik silindir ve yön valfinin bütünleşik olduğu hidrolik eyleyici kullanımı ile sağlanabilecektir. Bu tip hidrolik eyleyicilerde, valf ile silindir arasında hidrolik hortumlardan kaynaklanan fazladan bir hacim olmadığından, bu tip eyleyici seçimi ile hidrolik sıvıların sıkıştırılabilir özelliğinden dolayı sistem tepkisinin gecikmesi asgariye indirilecektir. Ancak yine de, bu tip eyleyiciler kullanılsa bile silindir bölmelerinde bulunan hacimler olacağından, bu hacimlerdeki hidrolik sıvıların sıkıştırılabilir özelliğinin teorik çalışmalara dahil edilmesinin tasarlanan kontrolcülerin gerçek sistem üzerindeki performanslarını olumlu etkileyeceği söylenebilir. Bununla birlikte, bu durumda teorik çalışmalarda sadece konum kontrolü değil model tabanlı bir yaklaşımla kuvvet kontrolüne ve buna ek olarak empedans kontrolüne yönelik çalışmalara ihtiyaç olduğu tespiti yapılabilir. Çünkü, harekete karşı bir kapasitans gibi davranış sergileyen bu sıkıştırılabilir özelliğin etkisinin teoride dahil edilebilmesi ve kontrolcü performansının artırılması bu yolla mümkündür.

Bunlara ek olarak, deneysel çalışmalar sırasında gözlemlenen ve hidrolik sistem ve

kontrolcü performansını olumsuz etkileyen diğer bir durum ise, statik ve kinetik sürtünme katsayıları arasındaki farklılıktan kaynaklanan ve iki nesnenin birbirleri üzerinden kayarken meydana gelen yapışma–kayma etkisinin kullanılan hidrolik eyleyicilerde oldukça güçlü olduğu gözlemlenmiştir. Hidrolik eyleyicilerde, yapışma–kayma etkisi sıcaklık, piston hızı, silindir yüzey pürüzlülüğü, sızdırmazlık elemanı malzemesi gibi birçok değişkene bağlıdır. Özellikle hidrolik eyleyicilerde kullanılan sızdırmazlık malzemesi ve silindir yüzey pürüzlülüğü bu etkinin yüksek oranda hissedilmesine yol açmaktadır. Şekil 7.25’de görünen açısız konum geri beslemesindeki titreşime çevresel gürültülere ek bu etkinin de neden olduğu düşünülmektedir, ayrıca mavi ile gösterilen alandaki sıçramanın valf tipi ile yine bu etkiden kaynaklandığı düşünülmektedir. Deneyler sırasında, bu etkinin konum kontrolü ve hareket hassasiyetine olan etkisi özellikle ilk örnek modeli kızak üzerinde sabit yüksüz durumdayken ve düşük hızlarda büyük oranda gözlemlenmiştir. Ancak, sistem kızak üzerinde serbest halde yer ile temas ettiğinde, hem üstündeki yük hem de kendi ağırlığı ile silindirler üzerindeki karşı direnç artmakta ve bunun sonucu olarak açısız konum kontrolünde daha hassas bir izleme performansına ulaşılabilmektedir. İlk örnek tasarımının dört ayaklı bir robot üzerinde kullanılması durumunda, yapışma–kayma etkisinin kontrolcü performansına olumsuz yansımaları asgariye indirmek için kullanılacak hidrolik eyleyicilerde silindir yüzey pürüzlülüğüne ve kullanılacak sızdırmazlık malzemesinin seçimine dikkat edilmelidir. Ayrıca, adım esnasında uçuş evresinde daha fazla hissedilecek bu durumun etkinliği adım yörünge tasarımı ve yürüyüş planlama ile asgariye indirilmesi sağlanabilir.

Yapılan deneyler ve tüm bu değerlendirmeler sonucunda, ilk örnek modelinin tasarım başarımı ile dört ayaklı bir robotta kullanılabilir olduğu tespiti ve dört ayaklı bir robot tasarımında kullanılabilmesi için geliştirilmeye ihtiyaç duyulan yönlerin tespiti yapılmıştır. Bu bağlamda, gelecek çalışmalar ve öneriler ile ilgili daha detaylı açıklamalara Bölüm 9’de yer verilmiştir.

7.7. Bölüm Özeti

Bu bölümde, ilk örnek imalatı, deney düzeneğinde kullanılan bileşenlerin teknik detayları, gerçek-zamanlı kontrol ve veri okuma yazılımının geliştirilmesi ve son olarak ilk örnek başarımının değerlendirilmesi tartışılmış ve anlatılmıştır. Sonuç olarak bu bölümde anlatılan çalışmalar kapsamında;

- Tasarımı yapılan bacağın boyutlandırılması ve boyutlandırmaların geçerliliğinin

araştırılması sonrasında ilk örnek imalatının ve montajının yapılması,

- Deney düzeneğinin oluşturulmasında kullanılan hidrolik sistem, sensör sistemi, kontrolcü cihazı ve yazılımı gibi bileşenlerin seçiminin yapılması ve teknik detayların raporlanması,
- Deney düzeneği tamamlanan ilk örnek modeline ait teorik olarak tasarlanmış kontrolcülerin gerçek sistem üzerinde uygulanması ve deneysel sonuçların elde edilmesi,
- Deneylemlerden elde edilen sonuçların teorik sonuçlarla karşılaştırılması, farklılıkların nelerden kaynaklandığının tartışılması, kontrolcü performanslarının araştırılması ve kontrol teorisi açısından nasıl iyileştirmeler yapılabileceğinin değerlendirilmesi aşamaları gerçekleştirilmiştir.



8. DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN YÜRÜYÜŞÜNÜN İNCELENMESİ

Bu bölümde, dört ayaklı bir robot için ileri ve ters kinematik hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalar kullanılarak yürüyüş analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için, bu tez kapsamında geliştirilen hidrolik tahrikli tek robot bacağı kullanılarak dört ayaklı bir robot konsepti önerilmiş ve kinematik hesaplamalar bu model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, girilen farklı robot oryantasyonlarına ve ayakucu koordinatlarına göre kinematik analizleri yapabilen ve oluşan üç boyutlu robot formunu grafiksel olarak gösteren Matlab programı geliştirilmiştir.

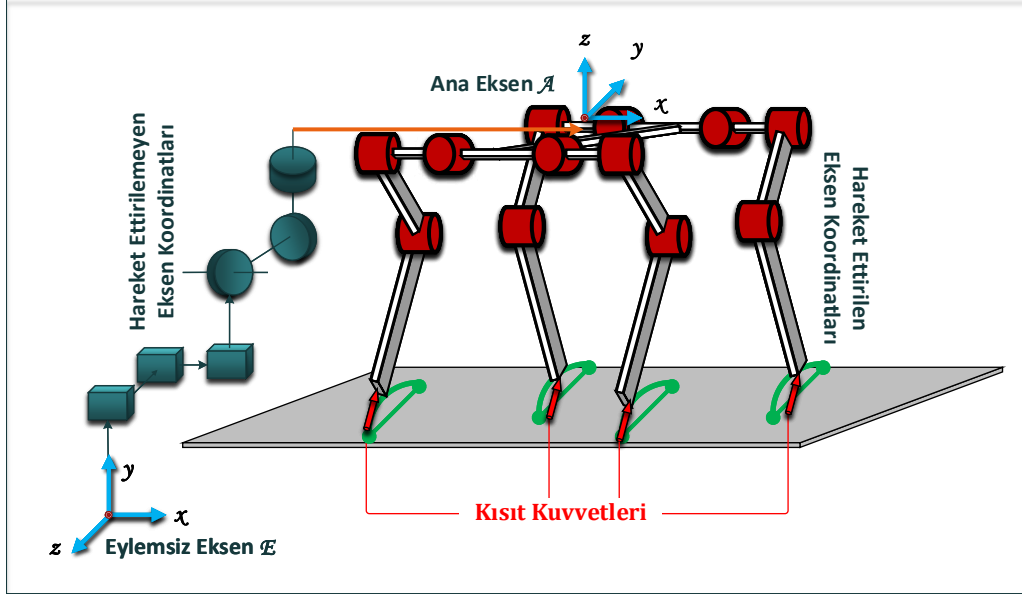
Kinematik hesaplamalar Bölüm 4.1’de anlatılan analitik yöntem ve çözümlerle elde edilmiştir. Ancak, ayaklı robotlar, ana koordinat ekseninin sabit bir noktada olmadığı, yani taşınabilir çalışma uzayına sahip ve yer düzlemini destek olarak kullanarak üç boyutlu uzayda sürekli değişen temas noktaları aracılığıyla serbest hareket edebilen mobil robotlardır. Bu bağlamda, dört ayaklı bir robotun kinematik analizi için serbest hareketli ana eksene sahip sistemlerin kinematiğinin açıklanması gerekmektedir. Bölümün devamında bu konu ele alınmıştır. Devamında bu tez kapsamında önerilen dört ayaklı robot ve bu robota ait kinematik denklemlere yer verilmiştir. Son olarak, robotun hareketi sırasında bacakların yörüngesinin belirlenmesinde kullanılmak üzere bir MÖÜ elde edilmiş ve robotun yürüyüş analizleri gerçekleştirilmiştir.

8.1. Serbest Hareketli Ana Eksen Kinematiği

Bu bölümde, hareketli sistemlerin kinematiğini modellemek için kullanılan yaklaşıma genel bir bakış sunulmuştur. Genelleştirilmiş koordinatlar kavramını kullanarak, yer temas kısıtları ve sonuçta ortaya çıkan kinematik denklemler elde edilmiştir. Dört ayaklı robotun yürüyüş analizlerinde kullanılan kinematik denklemler bu bölümde anlatılan yaklaşım ile elde edilmiştir.

Şekil 8.1’de gösterilen dört ayaklı robot gibi üç boyutlu uzayda serbest hareketli robotlar, Denklem (8.1)’de gösterildiği gibi n_b adet hareketsiz eksen koordinatları q_b ve n_j adet tahrikli eklem koordinatları q_j ile ifade edilmektedir.

$$q = \begin{bmatrix} q_b \\ q_j \end{bmatrix} \quad (8.1)$$



Şekil 8.1. Dört ayaklı bir robotun serbest hareketli ana eksen takımı ile şematik gösterimi. Serbest hareketli sistemlerin kinematik yapısı, hareket ettirilen eklem koordinatları q_j ve hareket ettirilemeyen eylemsiz eksen koordinatları q_b ile ifade edilmektedir. Temas kuvvetleri, temas kısıtları nedeniyle oluşmaktadır.

Şekil 8.1’de gösterildiği gibi robot eylemsiz eksen takımı E ’ye göre üç boyutlu uzayda serbest hareket edebilmektedir ve robot uzuvlarının koordinatları eylemsiz eksen takımında tanımlı robot gövdesine sabit ana eksen takımı \mathcal{A} ’da tanımlanmıştır. Eylemsiz ekseninde tanımlı hareket ettirelemeyen eksen koordinatları Denklem (8.2)’de gösterilmiştir. Burada konumlar q_{b_P} ve yönelimler q_{b_R} farklı gösterimler kullanılarak parametrelendirilebilir. Bu nedenle, serbest hareketli sistemin genelleştirilmiş koordinat vektörünün boyutu $n_b + n_j$, yönelimin parametreleştirilmesine bağlı iken, hareket ettirilemeyen koordinatlar için minimum genelleştirilmiş koordinat sayısı $n_{b_0} = 6$ ’dır.

$$q_b = \begin{bmatrix} q_{b_P} \\ q_{b_R} \end{bmatrix} \in \mathbb{R} \times SO(3) \quad (8.2)$$

Serbest hareketli sistemler ile bağlantılı çeşitli zorluklar vardır. Birincisi, ana eksen takımı \mathcal{A} ’nın konumunu ve yönelimini eylemsiz eksen takımı E ’de doğrudan ölçmeye izin veren yerleşik sensör teknolojisi yoktur. Bununla başa çıkmak için, bazı araştırma alanları hareket izleme sistemleri, yani robotun ana eksen takımının konum ve yönelimini ölçmeye izin veren harici kameralar ve işaretleyiciler kullanmaktadır. Aksi takdirde, farklı diğer sensör bilgilerinden konum ve yönelimi tahmin etmek için sensör füzyon algoritmalarının kullanılması gerekmektedir. Diğer bir zorluk ise, robot gövdesi doğrudan harekete geçirilemediğinden, sisteminin hareketi (toplam doğrusal ve açısal darbeler gibi)

sadece temaslardan kaynaklanan ek harici kuvvetler ile değiştirilebilmektedir.

Serbest hareketli sistemler ile sabit bir ana eksene sahip sistemler arasındaki önemli farklardan bir diğeri ise genelleştirilmiş hız ve ivme vektörlerinde görülmektedir. Hareketli gövde üzerindeki bir P noktasının hızı v_P , r_{EP} konum vektörünün zamana göre türevi ile bulunamaz, yani, genelde $v_P \neq \dot{r}_{EP}$ olmaktadır. Bu eşitlik, zamana göre türev eylemsiz eksen takımında yapılırsa sağlanmaktadır, yani ${}^E v_P = E\dot{r}_{EP}$ olmaktadır. Bu noktanın hızının, hareketli eksen takımı \mathcal{A} 'daki gösterimi ${}^{\mathcal{A}}v_P$ Denklem (8.3)–(8.6)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$${}^{\mathcal{A}}v_P = R_{AE} \left(R_{EA} \cdot \mathcal{A}\dot{r}_{EP} + \dot{R}_{EA} \cdot \mathcal{A}r_{EP} \right) \quad (8.3)$$

$$= R_{AE} \left(R_{EA} \cdot \mathcal{A}\dot{r}_{EP} + S({}^E\omega_{EA}) R_{EA} \cdot \mathcal{A}r_{EP} \right) \quad (8.4)$$

$$= \mathcal{A}\dot{r}_{EP} + R_{AE} \cdot S({}^E\omega_{EA}) R_{EA} \cdot \mathcal{A}r_{EP} \quad (8.5)$$

$$= \mathcal{A}\dot{r}_{EP} + {}^E\omega_{EA} \times \mathcal{A}r_{EP} \quad (8.6)$$

Bu noktada, $SO(3)$ 'deki türev işleminin \mathbb{R}^3 'den farklı olmasından dolayı, genelleştirilmiş hız ve ivme vektörleri Denklem (8.7)'deki gibi tanımlanabilir.

$$u = \begin{bmatrix} {}^E v_{\mathcal{A}} \\ \mathcal{A}\omega_{EA} \\ \dot{\varphi}_1 \\ \vdots \\ \dot{\varphi}_{n_j} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6+n_j} = \mathbb{R}^{n_u}, \quad \dot{u} = \begin{bmatrix} {}^E a_{\mathcal{A}} \\ \mathcal{A}\alpha_{EA} \\ \ddot{\varphi}_1 \\ \vdots \\ \ddot{\varphi}_{n_j} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6+n_j} \quad (8.7)$$

Burada, genelleştirilmiş koordinat vektörünün zaman göre türevi ve genelleştirilmiş hız vektörü arasındaki ilişki Denklem (8.8)'deki gibi olmaktadır.

$$u = \mathcal{E}_{sa} \dot{q}$$

$$\mathcal{E}_{sa} = \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0 & \mathcal{E}_{\mathcal{X}_R} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbb{I}_{n_j \times n_j} \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

Denklem (8.8)'deki $\mathcal{E}_{\mathcal{X}_R}$ matrisi yönelimin parametreleştirilmesine bağlı hız ile açısal hız arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Buradan, hareketli eksen takımı \mathcal{A} 'ya bağlı kinematik bir zincirin sonuna sabitlenmiş bir κ noktasının ${}^E r_{E\kappa} = {}^E r_{E\kappa}(q)$ konum vektörü

olmak üzere, eylemsiz eksen üzerindeki konumu Denklem (8.9)'daki gibi yazılabilir. Denklem (8.9)'da $R_{EA}(q)$ hareketli eksenin eylemsiz eksene göre yönelimini, ${}^{E}r_{EA}(q)$ hareketli eksenin eylemsiz eksene göre konumunu, ${}^{\mathcal{A}}r_{A\kappa}(q)$ κ noktasının hareketli eksene göre konumunu ve $q = q(t)$ zamana bağımlı bir fonksiyonu ifade etmektedir.

$${}^{E}r_{E\kappa}(q) = {}^{E}r_{EA}(q) + R_{EA}(q) \cdot {}^{\mathcal{A}}r_{A\kappa}(q) \quad (8.9)$$

Genelleştirilmiş u hızları ve κ noktasının çalışma uzayındaki hızı ${}^{E}v_{\kappa}$ arasındaki ilişki ise Denklem (8.10)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} {}^{E}v_{\kappa} &= {}^{E}v_{\mathcal{A}} + \dot{R}_{EA} \cdot {}^{\mathcal{A}}r_{A\kappa} + R_{EA} \cdot \dot{{}^{\mathcal{A}}r}_{A\kappa} \\ &= {}^{E}v_{\mathcal{A}} + R_{EA} \cdot S({}_{\mathcal{A}}\omega_{EA}) \cdot {}^{\mathcal{A}}r_{A\kappa} + R_{EA} \cdot \dot{{}^{\mathcal{A}}r}_{A\kappa} \\ &= {}^{E}v_{\mathcal{A}} - R_{EA} \cdot S({}^{\mathcal{A}}r_{A\kappa}) \cdot {}_{\mathcal{A}}\omega_{EA} + R_{EA} \cdot \dot{{}^{\mathcal{A}}r}_{A\kappa} \\ &= {}^{E}v_{\mathcal{A}} - R_{EA} \cdot S({}^{\mathcal{A}}r_{A\kappa}) \cdot {}_{\mathcal{A}}\omega_{EA} + R_{EA} \cdot \mathcal{A}J_{P_{q_j}}(q_j) \cdot \dot{q}_j \\ &= \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{n_j \times n_j} & -R_{EA} \cdot S({}^{\mathcal{A}}r_{A\kappa}) & R_{EA} \cdot \mathcal{A}J_{P_{q_j}}(q_j) \end{bmatrix} \cdot u \end{aligned} \quad (8.10)$$

Eğer κ noktasına bir eksen takımı yerleştirilirse, aynı yaklaşım ile bu noktadaki κ eksen takımının açılma hızı ile genelleştirilmiş u hızları arasındaki ilişki Denklem (8.11)'deki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} R_{E\kappa} &= R_{EA} \cdot R_{A\kappa} \\ S({}_{E}\omega_{E\kappa}) \cdot R_{E\kappa} &= S({}_{\mathcal{A}}\omega_{AE}) \cdot R_{EA} \cdot R_{A\kappa} + R_{EA} S({}_{\mathcal{A}}\omega_{A\kappa}) \cdot R_{A\kappa} \\ &= S({}_{\mathcal{A}}\omega_{AE}) \cdot R_{E\kappa} + R_{EA} \cdot R_{AE} \cdot S({}_{E}\omega_{A\kappa}) \cdot R_{A\kappa}^T \\ &= S({}_{\mathcal{A}}\omega_{AE}) \cdot R_{E\kappa} + S({}_{E}\omega_{A\kappa}) \cdot R_{E\kappa} \\ {}_{E}\omega_{E\kappa} &= {}_{E}\omega_{EA} + {}_{E}\omega_{A\kappa} \\ &= \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & R_{EA} & R_{EA} \cdot \mathcal{A}J_{R_{q_j}}(q_j) \end{bmatrix} \cdot u \end{aligned} \quad (8.11)$$

Böylelikle, κ eksen takımının çalışma uzayındaki hızı $\begin{bmatrix} {}^{E}v_{\kappa}^T & {}_{E}\omega_{E\kappa}^T \end{bmatrix}^T$ ile genelleştirilmiş u hızları arasındaki ilişki Denklem (8.12)'de verilen uzaysal Jakobiye ile tanımlanabilmektedir.

$${}^E J_Q(q) = \begin{bmatrix} {}^E J_P \\ {}^E J_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{n_j \times n_j} & -R_{EA} \cdot S({}^{\mathcal{A}}r_{A\kappa}) & R_{EA} \cdot \mathcal{A}J_{P_{q_j}}(q_j) \\ 0_{3 \times 3} & R_{EA} & R_{EA} \cdot \mathcal{A}J_{R_{q_j}}(q_j) \end{bmatrix} \quad (8.12)$$

Robot ve çevresi arasındaki temaslar ise kinematik kısıtlar olarak tanımlanabilir. Robotun, çevresi ile temas ettiği eylemsiz eksen takımında tanımlı her T_i noktası Denklem (8.13)'deki gibi üç kısıtlama getirmektedir.

$${}^E r_{ET_i} = \text{sabit}, \longrightarrow {}^E \dot{r}_{ET_i} = {}^E \ddot{r}_{ET_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.13)$$

Bu temas kısıtları, temas noktasının uzaysal Jakobiyei kullanılarak genelleştirilmiş hızların ve ivmelerin bir fonksiyonu olarak Denklem (8.14)'deki gibi ifade edilebilir.

$${}^E J_{T_i} \cdot u = 0, \longrightarrow {}^E J_{T_i} \cdot \dot{u} + {}^E \dot{J}_{T_i} \cdot u = 0 \quad (8.14)$$

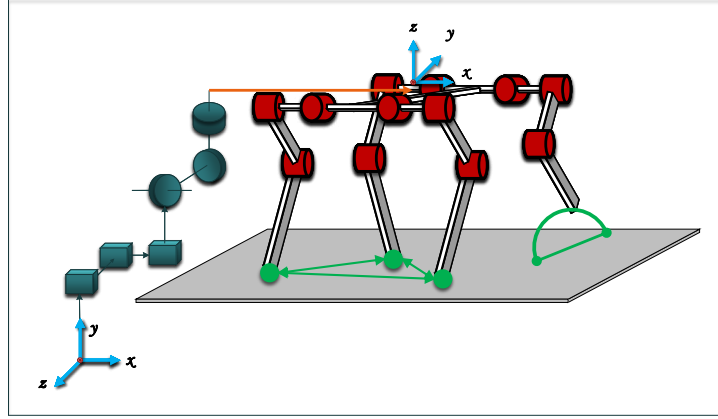
n_T adet aktif temas noktasının olması durumunda kısıtlar Denklem (8.15)'deki gibi bir arada yazılabilir.

$$J_T = \begin{bmatrix} J_{T_1} \\ \vdots \\ J_{T_{n_T}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3n_T \times n_n} \quad (8.15)$$

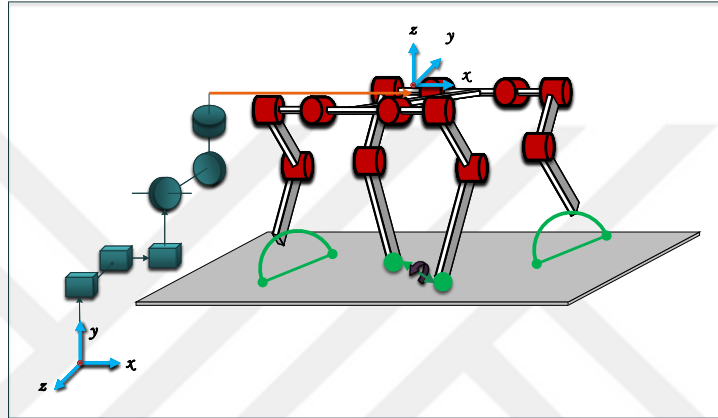
Burada, J_T matrisinin derecesi birbirinden bağımsız temas kısıtlarını belirtmektedir, ayrıca bir arada yazılan J_T matrisi Denklem (8.16)'deki gibi ayrıştırılabilmektedir. Burada, $J_{T,b}$ hareketli eksen ile temas kısıtları arasındaki bağıntıyı tanımlamaktadır ve $J_{T,b}$ matrisinin derecesinin 6 olması durumunda, sistem, hareketli eksenin eklem hareketleri ile kontrol edilebileceği yeterli kısıtlara sahip olmaktadır.

$$J_T = \begin{bmatrix} J_{T,b} & J_{T,j} \end{bmatrix} \quad (8.16)$$

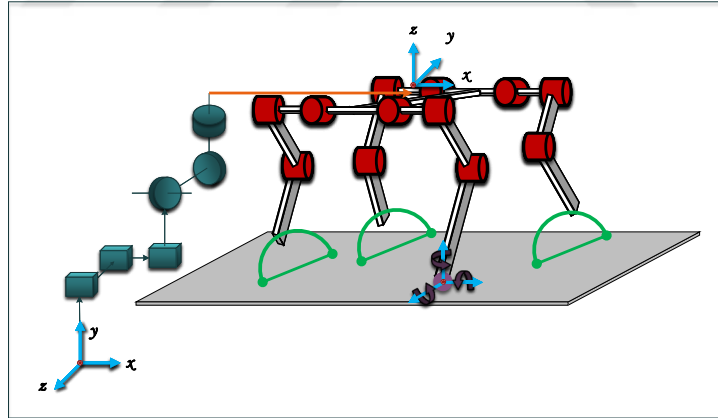
Birbirinden bağımsız temas kısıtlarının sayısını veren J_T matrisinin derecesi ile hareketli eksen kısıtlarının sayısını veren $J_{T,b}$ matrisinin derecesi arasındaki fark, uyulması gereken iç kinematik kısıtların sayısını vermektedir. Dört ayaklı bir robotta, her bir ayağın yere teması üç adet kısıt uygulamaktadır (Şekil 8.2c). Bunun aksine, iki noktadan temas halinde, J_T matrisinin derecesi 6 olmaktadır, ancak $J_{T,b}$ matrisinin derecesi 5 olmaktadır. Bu, sistemin yetersiz kısıtlandığı ve hareketli eksenin eklemler tarafından istendiği gibi hareket ettirilemeyeceği anlamına gelmektedir. Çünkü robot destek hattı eksenindeki oryantasyon eklemlere uygulanacak torklar ile değiştirilemez, Şekil 8.2b'de bu net olarak



(a) Üç noktadan temas eden tamamen kısıtlı konfigürasyon



(b) İki noktadan temas eden tamamen kısıtlanmamış konfigürasyon



(c) Tek noktadan temas eden tamamen kısıtlanmamış konfigürasyon

Şekil 8.2. Temas noktasının sayısı ve düzenine göre dört ayaklı bir robotun hareketli eksenin eklem hareketleri ile kontrolü için kısıtları gösteren şematik çizimler.

görülmektedir. Buna ek olarak, Şekil 8.2a'da gösterildiği gibi üç noktalı temas durumunda, J_T matrisinin derecesi 9 ve $J_{T,b}$ matrisinin derecesi 6 olmaktadır, yani, gövde konumunun ve yönünün eklemler aracılığıyla tamamen kontrol edilebileceği anlamına gelmektedir ve aynı zamanda, üç bacağın bir diğerine göre hareket ettirilememesi ile yorumlanabilecek üç iç kısıt olmaktadır.

Serbest hareketli sistemlerde ters kinematik analiz ile temas kısıtlarını ihlal etmeden istenen bir çalışma uzayı hareketlerini elde etmek için bireysel eklemlerin nasıl hareket ettirilmesi gerektiği sorusuna yanıt aranmaktadır. Burada hem kısıtların sağlanmasını hem de istenen hareketlerin yapılmasını içeren çoklu bir amaç vardır. Bu noktada, amaçlar arasında önceliklendirme yapılarak, temas kısıtlarının çalışma uzayı hareketlerinden daha yüksek önceliğe sahip olduğu çok amaçlı bir yaklaşımla ters kinematik analiz yapılabilir. Belirli amaçların diğerlerine göre öncelik verildiği bir yaklaşım olan, çoklu görev önceliklendirilmesi yaklaşımında ters kinematik problemin çözümünü belirlemek için boşuzay izdüşüm matrisi kullanılmaktadır. Boşuzay izdüşüm matrisinin belirlenmesinde bir çok yöntem vardır. En bilinen ve basit izdüşüm yöntemi Denklem (8.17)'de tanımlanmıştır. Burada, N , Denklem (4.80)'de tanımlanan J_{e0} geometrik Jakobiyen matrisinin boşuzay izdüşümüdür. J_{e0}^+ ise J_{e0} geometrik Jakobiyen matrisinin Moore-Penrose sözde–ters matrisidir.

$$N = \mathbb{I} - J_{e0}^+ J_{e0} \quad (8.17)$$

Berlirli bir yörüngeyi takip etmek yada kinematik kısıtları sağlamak için istenen amaçlar öncelik sırasına göre $O_i = \{J_i, w_i^*\}$ şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, w_i^* istenen hızlar ve J_i belirlenen görevin Jakobiyenini olarak ifade edilmiştir. n_t adet amaç için çoklu görev önceliklendirilmesi yaklaşımı ise Denklem (8.18)'de tanımlanmıştır. Burada, $\bar{N}_i, \bar{J}_i = \left[J_1^T \quad \dots \quad J_{i-1}^T \right]^T$ ile tanımlanan birlikte yazılmış görev için tanımlanan Jakobiyenlerin boşuzay izdüşümünü ifade etmektedir. \dot{q} ise belirlenen amaçların sağlanması için geliştirilmiş hızların ne olması gerektiğinin cevabıdır.

$$\dot{q} = \sum_{i=1}^{n_t} \bar{N}_i \dot{q}_i \quad (8.18)$$

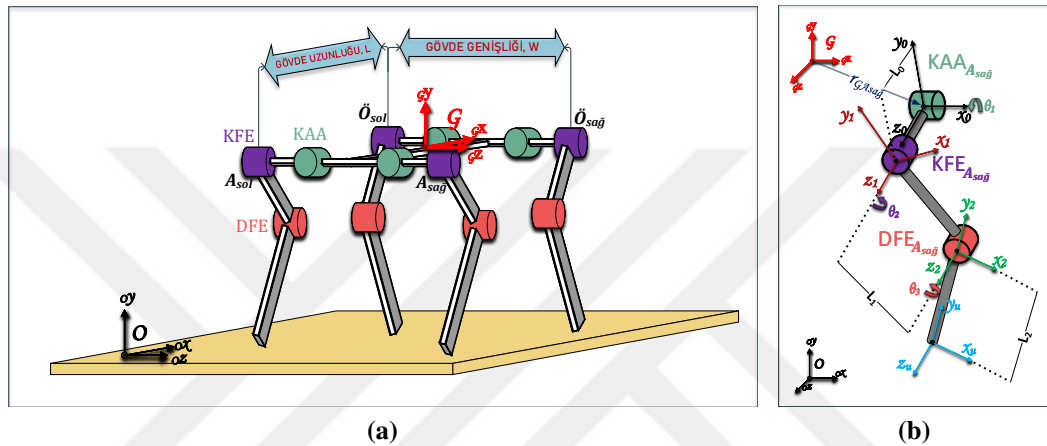
$$\dot{q}_i = (J_i \bar{N}_i)^+ \left(w_i^* - J_i \sum_{k=1}^{i-1} \bar{N}_k \dot{q}_k \right)$$

Yukarıdaki ifadenin dört ayaklı bir robot için anlamı, çalışma uzayında, $w_t = J_t u_t$ şeklinde tanımlanmış istenen bir görevi gerçekleştirirken, daha öncelikli olan Denklem (8.15)'de tanımlanan n_T adet ayağın yere temas ettiği durumda temas kısıtlarının sağlanması için geliştirilmiş hızların ne olması gerektiğinin cevabı Denklem (8.19)'daki gibi olmaktadır. Burada, N_T, J_T kısıt Jakobiyen matrisinin boşuzayı olarak tanımlanmıştır.

$$u = N_T (J_T N_T)^+ w_t \quad (8.19)$$

8.2. Dört Ayaklı Bir Robotun Kinematik Analizi

Bu bölümde, bu tez kapsamında tasarımı yapılan dört ayaklı robotun kinematik analizlerine yer verilmiştir. Şekil 8.3'de bu tez çalışmasının konusu olan dört ayaklı bir robotun kinematik yapılandırması ve bacak üzerinde tanımlanan eksen takımları ile sistem değişkenlerinin şematik gösterimi verilmiştir. Okunabilirlik açısından sadece arka sağ bacak için eksenler ve değişkenler gösterilmiştir. Diğer bacaklar için de aynı gösterim geçerlidir.



Şekil 8.3. Bu tez çalışmasının konusu olan dört ayaklı bir robotun kinematik yapılandırması ve bacak üzerinde tanımlanan eksen takımları ile sistem değişkenlerinin şematik gösterimi.

Şekil 8.3'de gösterilen \mathcal{O} eksen takımı eylemsiz eksen takımı olarak tanımlanmıştır. Gövde üzerine sabitlenmiş \mathcal{G} eksen takımı ise gövde ile birlikte uzayda serbest hareket edebilmektedir. Sistem gövde üzerindeki eksen takımına göre her bacakta 3 serbestlik derecesi olmak üzere toplamda 12 serbestlik derecesine sahiptir. Ancak \mathcal{G} eksen takımının serbest hareketli olmasından dolayı toplamda 18 adet genelleştirilmiş koordinat olmaktadır. q genelleştirilmiş koordinat vektörü olmak üzere sistemi tanımlayan genelleştirilmiş koordinatlar ve u genelleştirilmiş hız vektörü olmak üzere sistemi tanımlayan genelleştirilmiş hızlar Denklem (8.20)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 q &= \left[q_b^T \ q_j^T \right]^T \\
 q_b &= \left[\varphi_{x_G} \ \varphi_{y_G} \ \varphi_{z_G} \ \alpha \ \beta \ \gamma \right]^T \\
 q_j &= \left[\theta_{1_{\mathcal{O}_{sol}}} \ \theta_{2_{\mathcal{O}_{sol}}} \ \theta_{3_{\mathcal{O}_{sol}}} \ \theta_{1_{\mathcal{O}_{sağ}}} \ \theta_{2_{\mathcal{O}_{sağ}}} \ \theta_{3_{\mathcal{O}_{sağ}}} \ \theta_{1_{A_{sağ}}} \ \theta_{2_{A_{sağ}}} \ \theta_{3_{A_{sağ}}} \ \theta_{1_{A_{sol}}} \ \theta_{2_{A_{sol}}} \ \theta_{3_{A_{sol}}} \right]^T \\
 u &= \left[\varphi_{\dot{x}_G} \ \varphi_{\dot{y}_G} \ \varphi_{\dot{z}_G} \ \varphi_{\dot{\omega}_{x_{\mathcal{O}_G}}} \ \varphi_{\dot{\omega}_{y_{\mathcal{O}_G}}} \ \varphi_{\dot{\omega}_{z_{\mathcal{O}_G}}} \ \dot{q}_{j[12 \times 1]}^T \right]^T
 \end{aligned} \tag{8.20}$$

Burada ${}^o(\bullet)_{\mathcal{G}}$ ve ${}^o(\dot{\bullet})_{\mathcal{G}}$, \mathcal{G} eksen takımının eylemsiz eksen takımında tanımlı sırasıyla konumunu ve hızını ifade etmektedir. ${}^g\omega_{iO\mathcal{G}}$, \mathcal{G} eksen takımında tanımlanmış \mathcal{O} eylemsiz eksen takımının ilgili eksenine göre \mathcal{G} eksen takımının açılmal hızlarını ifade etmektedir. α , β ve γ ise \mathcal{G} eksen takımının eylemsiz eksen takımında tanımlı yönelimini ifade etmek için kullanılan XYZ Euler açıları ifade etmektedir ve \mathcal{G} eksen takımının eylemsiz eksen takımında tanımlı yönelimi $R_{O\mathcal{G}}$ birim dönme matrisleri kullanılarak Denklem (8.21)'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada okunabilirlik açısından, s ve c sırasıyla, \sin ve \cos ifadelerinin kısaltması olarak kullanılmıştır.

$$\begin{aligned}
{}^oR_{O\mathcal{G}} &= R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(\alpha) & -s(\alpha) \\ 0 & s(\alpha) & c(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c(\beta) & 0 & s(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -s(\beta) & 0 & c(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c(\gamma) & -s(\gamma) & 0 \\ s(\gamma) & c(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} c(\beta)c(\gamma) & -c(\beta)s(\gamma) & s(\beta) \\ c(\alpha)s(\gamma) + c(\gamma)s(\alpha)s(\beta) & c(\alpha)c(\gamma) - s(\alpha)s(\beta)s(\gamma) & -c(\beta)s(\alpha) \\ s(\alpha)s(\gamma) - c(\alpha)c(\gamma)s(\beta) & c(\gamma)s(\alpha) + c(\alpha)s(\beta)s(\gamma) & c(\alpha)c(\beta) \end{bmatrix} \quad (8.21)
\end{aligned}$$

Buradan, \mathcal{G} eksen takımının \mathcal{O} eylemsiz eksen takımına göre yapılandırmasını tanımlayan homojen dönüşüm matrisi Denklem (8.22)'deki gibi tanımlanabilir.

$${}^oT_{\mathcal{G}} = \begin{bmatrix} {}^oR_{O\mathcal{G}[3 \times 3]} & \begin{matrix} {}^o x_{\mathcal{G}} \\ {}^o y_{\mathcal{G}} \\ {}^o z_{\mathcal{G}} \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.22)$$

Devamında, Şekil 8.3b'de gösterildiği gibi \mathcal{G} eksen takımında tanımlı $r_{\mathcal{G}_i}^{-1}$ konum vektörüne göre yerleştirilmiş KAA eklemlerinin homojen dönüşüm matrisleri elde edilebilir. Bu bağlamda, bacakların KAA eklemlerine sabitlenmiş eksen takımlarının \mathcal{G} eksen takımına göre yapılandırmasını tanımlayan homojen dönüşüm matrisleri Denklem (8.23)'deki gibi tanımlanabilir. Burada KAA eklemlerine yerleştirilen eksen takımları, bacakların robotun sagittal düzlemine göre simetrik yerleştirilmesine rağmen eklemlerin sıfır konumlarında \mathcal{G} eksen takımına göre yönelimleri değişmeyecek şekilde asimetric yerleştirilmiştir. Bu tercih neticesinde sagittal düzleme göre bacakların kinematik denklemlerinde farklılıklar meydana gelmektedir. Bu durum bölümün devamında daha net açıklanmıştır.

¹Burada, i Sağ-Sol ve Ön-Arka şeklinde gövdeye göre konumları belirleyerek bacakları tanımlamaktadır.

- Sağ Ön Bacak KAA Eklemi

$${}^g T_{\mathcal{K}AA}^{\ddot{O}_{sağ}} = \begin{bmatrix} R_x(\theta_{1\ddot{O}_{sağ}})_{[3 \times 3]} & r_{\mathcal{G}_{\ddot{O}_{sağ}}[3 \times 1]} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.23a)$$

- Sağ Arka Bacak KAA Eklemi

$${}^g T_{\mathcal{K}AA}^{A_{sağ}} = \begin{bmatrix} R_x(\theta_{1A_{sağ}})_{[3 \times 3]} & r_{\mathcal{G}_{A_{sağ}}[3 \times 1]} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.23b)$$

- Sol Ön Bacak KAA Eklemi

$${}^g T_{\mathcal{K}AA}^{\ddot{O}_{sol}} = \begin{bmatrix} R_x(\theta_{1\ddot{O}_{sol}})_{[3 \times 3]} & r_{\mathcal{G}_{\ddot{O}_{sol}}[3 \times 1]} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.23c)$$

- Sol Arka Bacak KAA Eklemi

$${}^g T_{\mathcal{K}AA}^{A_{sol}} = \begin{bmatrix} R_x(\theta_{1A_{sol}})_{[3 \times 3]} & r_{\mathcal{G}_{A_{sol}}[3 \times 1]} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.23d)$$

Aynı şekilde, bacakların KFE eklemelerine sabitlenmiş eksen takımlarının KAA eklemelerine sabitlenmiş eksen takımlarına göre yapılandırmasını ve bacakların DFE eklemelerine sabitlenmiş eksen takımlarının KFE eklemelerine sabitlenmiş eksen takımlarına göre yapılandırmasını tanımlayan homojen dönüşüm matrisleri Denklem (8.24)'deki gibi tanımlanabilir.

- Sağ Ön Bacak KFE Eklemi

$${}^{\mathcal{K}AA} T_{\mathcal{K}FE}^{\ddot{O}_{sağ}} = \begin{bmatrix} R_z(\theta_{2\ddot{O}_{sağ}})_{[3 \times 3]} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ L_0 \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.24a)$$

- Sağ Arka Bacak KFE Eklemi

$${}^{\mathcal{K}AA} T_{\mathcal{K}FE}^{A_{sağ}} = \begin{bmatrix} R_z(\theta_{2A_{sağ}})_{[3 \times 3]} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ L_0 \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.24b)$$

- Sol Ön Bacak KFE Eklemi

$$\kappa_{AA}T_{\mathcal{KFE}}^{\ddot{O}_{sol}} = \begin{bmatrix} R_z(\theta_{2\ddot{O}_{sol}})_{[3 \times 3]} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ -L_0 \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.24c)$$

- Sol Arka Bacak KFE Eklemi

$$\kappa_{AA}T_{\mathcal{KFE}}^{A_{sol}} = \begin{bmatrix} R_z(\theta_{2A_{sol}})_{[3 \times 3]} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ -L_0 \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.24d)$$

- Sağ Ön Bacak DFE Eklemi

$$\kappa_{FE}T_{\mathcal{DFE}}^{\ddot{O}_{sağ}} = \begin{bmatrix} R_z(\theta_{3\ddot{O}_{sağ}})_{[3 \times 3]} & \begin{matrix} 0 \\ -L_1 \\ 0 \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.24e)$$

- Sağ Arka Bacak DFE Eklemi

$$\kappa_{FE}T_{\mathcal{DFE}}^{A_{sağ}} = \begin{bmatrix} R_z(\theta_{3A_{sağ}})_{[3 \times 3]} & \begin{matrix} 0 \\ -L_1 \\ 0 \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.24f)$$

- Sol Ön Bacak DFE Eklemi

$$\kappa_{FE}T_{\mathcal{DFE}}^{\ddot{O}_{sol}} = \begin{bmatrix} R_z(\theta_{3\ddot{O}_{sol}})_{[3 \times 3]} & \begin{matrix} 0 \\ -L_1 \\ 0 \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.24g)$$

- Sol Arka Bacak DFE Eklemi

$$\kappa_{FE}T_{\mathcal{DFE}}^{A_{sol}} = \begin{bmatrix} R_z(\theta_{3A_{sol}})_{[3 \times 3]} & \begin{matrix} 0 \\ -L_1 \\ 0 \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.24h)$$

Buradan, robot bacaklarının uç noktalarına yerleştirilmiş eksen takımlarının \mathcal{G} eksen takımına göre yapılandırmasını tanımlayan homojen dönüşüm matrisleri Denklem (8.25)'deki gibi tanımlanabilir.

- Sağ Ön Bacak Uç Noktası

$${}^G T_U^{\ddot{O}_{sağ}} = {}^G T_{\kappa_{AA}}^{\ddot{O}_{sağ}} \kappa_{AA}T_{\mathcal{KFE}}^{\ddot{O}_{sağ}} \kappa_{FE}T_{\mathcal{DFE}}^{\ddot{O}_{sağ}} \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{[3 \times 3]} & \begin{matrix} 0 \\ -L_2 \\ 0 \end{matrix} \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.25a)$$

- Sağ Arka Bacak Uç Noktası

$${}^G T_U^{A_{\text{sağ}}} = {}^G T_{\mathcal{KAA}}^{A_{\text{sağ}}} \mathcal{KAA} T_{\mathcal{KFE}}^{A_{\text{sağ}}} \mathcal{KFE} T_{\mathcal{DFE}}^{A_{\text{sağ}}} \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{[3 \times 3]} & 0 \\ 0_{[1 \times 3]} & -L_2 \\ & 0 \\ & 1 \end{bmatrix} \quad (8.25b)$$

- Sol Ön Bacak Uç Noktası

$${}^G T_U^{\ddot{O}_{\text{sol}}} = {}^G T_{\mathcal{KAA}}^{\ddot{O}_{\text{sol}}} \mathcal{KAA} T_{\mathcal{KFE}}^{\ddot{O}_{\text{sol}}} \mathcal{KFE} T_{\mathcal{DFE}}^{\ddot{O}_{\text{sol}}} \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{[3 \times 3]} & 0 \\ 0_{[1 \times 3]} & -L_2 \\ & 0 \\ & 1 \end{bmatrix} \quad (8.25c)$$

- Sol Arka Bacak Uç Noktası

$${}^G T_U^{A_{\text{sol}}} = {}^G T_{\mathcal{KAA}}^{A_{\text{sol}}} \mathcal{KAA} T_{\mathcal{KFE}}^{A_{\text{sol}}} \mathcal{KFE} T_{\mathcal{DFE}}^{A_{\text{sol}}} \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{[3 \times 3]} & 0 \\ 0_{[1 \times 3]} & -L_2 \\ & 0 \\ & 1 \end{bmatrix} \quad (8.25d)$$

Burada, arka sağ bacak uç noktası için \mathcal{G} eksen takımına göre yapılandırmasını tanımlayan homojen dönüşüm matrisi hesap edilirse arka sağ bacak uç noktasının \mathcal{G} eksen takımında tanımlı konum vektörü ${}^G p_{Gu}$ ve yönelimi ${}^G R_{Gu}$ Denklem (8.26)'deki gibi elde edilir.

$${}^G T_U^{A_{\text{sağ}}} = \begin{bmatrix} {}^G R_{Gu}^{A_{\text{sağ}}} [3 \times 3] & {}^G p_{Gu}^{A_{\text{sağ}}} [3 \times 1] \\ 0_{[1 \times 3]} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.26)$$

Son olarak, bacak uç noktalarının \mathcal{O} eylemsiz eksen takımına göre yapılandırmasını tanımlayan homojen dönüşüm matrisleri Denklem (8.27)'deki gibi tanımlanabilir. Burada sadece bir bacak için homojen dönüşüm matrisi verilmiştir, ancak diğer bacaklar için uç noktaların homojen dönüşüm matrisleri aynı şekilde tanımlanabilir.

$${}^O T_U^{A_{\text{sağ}}} = {}^O T_G {}^G T_U^{A_{\text{sağ}}} \quad (8.27)$$

Buradan bacak uç noktalarının \mathcal{O} eylemsiz eksen takımına göre ve \mathcal{G} eksen takımına göre konum vektörleri genelleştirilmiş koordinatlar ile Denklem (8.28)'deki gibi hesaplanabilir. Burada yazım kolaylığı açısından ve tüm bacaklar için özdeş olmasından dolayı bacak uç noktasının konum vektörü tanımlanırken bacak tanımı için kullanılan $(\bullet)^{A_{\text{sağ}}}$ üstel ifadesi kullanılmamıştır. Ayrıca bu iki konum vektörü arasındaki ilişki Denklem (8.29)'deki gibi ifade edilebilir.

$${}^{\circ}p_{ou}(q) = [{}^{\circ}T_u(1, 4) \quad {}^{\circ}T_u(2, 4) \quad {}^{\circ}T_u(3, 4)]^T \quad (8.28)$$

$${}^{\mathcal{G}}p_{gu}(q) = [{}^{\mathcal{G}}T_u(1, 4) \quad {}^{\mathcal{G}}T_u(2, 4) \quad {}^{\mathcal{G}}T_u(3, 4)]^T$$

$${}^{\circ}p_{ou}(q) = {}^{\circ}p_{og}(q) + {}^{\circ}R_{og}(q) \cdot {}^{\mathcal{G}}p_{gu}(q) \quad (8.29)$$

Gerekli hesaplamalar yapıldığında arka sağ bacak uç noktasının \mathcal{O} eylemsiz eksen takımına göre konum vektörü bileşenleri ${}^{\circ}p_{ou} = [{}^{\circ}x_u \quad {}^{\circ}y_u \quad {}^{\circ}z_u]^T$ Denklem (8.28)'deki gibi elde edilmektedir. Burada sadece sağ arka bacak için geometrik Jakobiyen matrisi hesap edilmiştir, ancak diğer bacaklar için de aynı hesaplamalar yapılabilir. Sağ arka bacak KAA eklemının gövde üzerindeki konumunu \mathcal{G} eksen takımına göre tanımlayan konum vektörü $r_{\mathcal{G}_i} = [-l_G \quad 0 \quad w_G]^T$ şeklinde tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} {}^{\circ}x_u = & x_B - L_2 \left[c\theta_{3A_{sağ}} \left(c\theta_{2A_{sağ}} \left(s\beta s\theta_{1A_{sağ}} - c\beta s\gamma c\theta_{1A_{sağ}} \right) - c\beta c\gamma s\theta_{2A_{sağ}} \right) \right. \\ & \left. - s\theta_{3A_{sağ}} \left(s\theta_{2A_{sağ}} \left(s\beta s\theta_{1A_{sağ}} - c\beta s\gamma c\theta_{1A_{sağ}} \right) + c\beta c\gamma c\theta_{2A_{sağ}} \right) \right] \\ & - L_1 \left[c\theta_{2A_{sağ}} \left(s\beta s\theta_{1A_{sağ}} - c\beta s\gamma c\theta_{1A_{sağ}} \right) - c\beta c\gamma s\theta_{2A_{sağ}} \right] + w_G s\beta \\ & + L_0 \left[s\beta c\theta_{1A_{sağ}} + c\beta s\gamma s\theta_{1A_{sağ}} \right] - l_G c\beta c\gamma \\ {}^{\circ}y_u = & y_B - L_2 \left[c\theta_{3A_{sağ}} \left(c\theta_{2A_{sağ}} \left(c\theta_{1A_{sağ}} (c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma) - c\beta s\alpha s\theta_{1A_{sağ}} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. - s\theta_{2A_{sağ}} (c\alpha s\gamma + c\gamma s\alpha s\beta) \right) - s\theta_{3A_{sağ}} \left(c\theta_{2A_{sağ}} (c\alpha s\gamma + c\gamma s\alpha s\beta) \right. \right. \\ & \left. \left. + s\theta_{2A_{sağ}} \left(c\theta_{1A_{sağ}} (c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma) - c\beta s\alpha s\theta_{1A_{sağ}} \right) \right) \right] - w_G c\beta s\alpha \\ & - L_1 \left(c\theta_{2A_{sağ}} \left(c\theta_{1A_{sağ}} (c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma) - c\beta s\alpha s\theta_{1A_{sağ}} \right) \right. \\ & \left. - s\theta_{2A_{sağ}} (c\alpha s\gamma + c\gamma s\alpha s\beta) \right) - l_G (c\alpha s\gamma + c\gamma s\alpha s\beta) \\ & - L_0 \left(s\theta_{1A_{sağ}} (c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma) + c\beta s\alpha c\theta_{1A_{sağ}} \right) \\ {}^{\circ}z_u = & z_B - L_2 \left[c\theta_{3A_{sağ}} \left(c\theta_{2A_{sağ}} \left(c\theta_{1A_{sağ}} (c\gamma s\alpha + c\alpha s\beta s\gamma) + c\alpha c\beta s\theta_{1A_{sağ}} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. - s\theta_{2A_{sağ}} (s\alpha s\gamma - c\alpha c\gamma s\beta) \right) - s\theta_{3A_{sağ}} \left(c\theta_{2A_{sağ}} (s\alpha s\gamma - c\alpha c\gamma s\beta) \right. \right. \\ & \left. \left. + s\theta_{2A_{sağ}} \left(c\theta_{1A_{sağ}} (c\gamma s\alpha + c\alpha s\beta s\gamma) + c\alpha c\beta s\theta_{1A_{sağ}} \right) \right) \right] + w_G c\alpha c\beta \\ & - L_1 \left(c\theta_{2A_{sağ}} \left(c\theta_{1A_{sağ}} (c\gamma s\alpha + c\alpha s\beta s\gamma) + c\alpha c\beta s\theta_{1A_{sağ}} \right) \right. \\ & \left. - s\theta_{2A_{sağ}} (s\alpha s\gamma - c\alpha c\gamma s\beta) \right) - l_G (s\alpha s\gamma - c\alpha c\gamma s\beta) \\ & - L_0 \left(s\theta_{1A_{sağ}} (c\gamma s\alpha + c\alpha s\beta s\gamma) - c\alpha c\beta c\theta_{1A_{sağ}} \right) \end{aligned} \quad (8.30)$$

Bu tanımlamalardan sonra genelleştirilmiş hızlar ve genelleştirilmiş koordinatların zamana göre türevleri arasındaki ilişki tanımlanabilir. Bu bağlamda, gövdenin yönelimini ifade eden $R_{\mathcal{O}\mathcal{G}}$ dönme matrisine bağlı, \mathcal{O} eylemsiz eksen takımına göre gövdenin açısal hızları $[\omega_{x\mathcal{O}\mathcal{G}} \ \omega_{y\mathcal{O}\mathcal{G}} \ \omega_{z\mathcal{O}\mathcal{G}}]^T$ ile yönelimi ifade etmek için kullanılan XYZ Euler açılarının değişim hızı $[\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]^T$ arasındaki ilişki Denklem (8.31)'deki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} \omega_{x\mathcal{O}\mathcal{G}} \\ \omega_{y\mathcal{O}\mathcal{G}} \\ \omega_{z\mathcal{O}\mathcal{G}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & \cos(\alpha) & -\cos(\beta)\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (8.31)$$

Benzer şekilde, \mathcal{O} eylemsiz eksen takımına göre gövdenin açısal hızlarının \mathcal{G} eksen takımındaki karşılığı $[\omega_{x\mathcal{O}\mathcal{G}} \ \omega_{y\mathcal{O}\mathcal{G}} \ \omega_{z\mathcal{O}\mathcal{G}}]^T$ ile yönelimi ifade etmek için kullanılan XYZ Euler açılarının değişim hızı $[\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]^T$ arasındaki ilişki Denklem (8.32)'deki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} \omega_{x\mathcal{O}\mathcal{G}} \\ \omega_{y\mathcal{O}\mathcal{G}} \\ \omega_{z\mathcal{O}\mathcal{G}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta)\cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\cos(\beta)\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (8.32)$$

Buradan, genelleştirilmiş koordinat vektörünün zamana göre türevi ve genelleştirilmiş hız vektörü arasındaki ilişki Denklem (8.33)'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} u &= \mathcal{E}_{sa} \dot{q} \\ \mathcal{E}_{sa} &= \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{[3 \times 3]} & 0 & 0 \\ 0 & \mathcal{E}_{[\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]_R} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbb{I}_{[12 \times 12]} \end{bmatrix} \\ \mathcal{E}_{[\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]_R} &= \begin{bmatrix} \cos(\beta)\cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\cos(\beta)\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8.33)$$

Devamında, \mathcal{O} eylemsiz eksen takımına göre bacak uç noktası hızının doğrusal bileşeni ${}^{\mathcal{O}}v_u$ Denklem (8.29)'de tanımlanan bacak uç noktası konum vektörünün zamana

göre türevi alınarak Denklem (8.34)'deki gibi elde edilebilir.

$$\begin{aligned}
{}^{\circ}v_u &= {}^{\circ}v_g + {}^{\circ}\dot{R}_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}p_{gu} + {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}\dot{p}_{gu} \\
&= {}^{\circ}v_g + {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot S(\mathcal{G}\omega_{\mathcal{O}\mathcal{G}}) \cdot {}^{\mathcal{G}}p_{gu} + {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}\dot{p}_{gu} \\
&= {}^{\circ}v_g - {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot S({}^{\mathcal{G}}p_{gu}) \cdot \mathcal{G}\omega_{\mathcal{O}\mathcal{G}} + {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}J_{P_{q_j}}(q_j) \cdot \dot{q}_j \\
&= \left[\mathbb{I}_{[3 \times 3]} \quad -{}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot S({}^{\mathcal{G}}p_{gu}) \quad {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}J_{P_{q_j}}(q_j) \right] \cdot u
\end{aligned} \tag{8.34}$$

Aynı yaklaşım ile, \mathcal{O} eylemsiz eksen takımına göre bacak uç noktası hızının açısıl bileşeni ${}^{\circ}\omega_u$ bacak uç noktasının yönelimini tanımlayan ${}^{\circ}R_{ou} = {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}R_{gu}$ ifadesinin her iki tarafının zamana göre türevi alınarak Denklem (8.35)'deki gibi elde edilebilir.

$$\begin{aligned}
{}^{\circ}\dot{R}_{ou} &= {}^{\circ}\dot{R}_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}R_{gu} + {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}\dot{R}_{gu} \\
S(\mathcal{O}\omega_{ou}) \cdot {}^{\circ}R_{ou} &= S(\mathcal{O}\omega_{\mathcal{O}\mathcal{G}}) \cdot {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}R_{gu} + {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot S(\mathcal{G}\omega_{gu}) \cdot {}^{\mathcal{G}}R_{gu} \\
S(\mathcal{O}\omega_{ou}) \cdot {}^{\circ}R_{ou} &= S(\mathcal{O}\omega_{\mathcal{O}\mathcal{G}}) \cdot {}^{\circ}R_{ou} + {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}R_{g\mathcal{O}} \cdot S(\mathcal{O}\omega_{gu}) \cdot {}^{\circ}R_{g\mathcal{O}}^T \cdot {}^{\mathcal{G}}R_{gu} \\
S(\mathcal{O}\omega_{ou}) \cdot {}^{\circ}R_{ou} &= S(\mathcal{O}\omega_{\mathcal{O}\mathcal{G}}) \cdot {}^{\circ}R_{ou} + S(\mathcal{O}\omega_{gu}) \cdot {}^{\circ}R_{ou} \\
\mathcal{O}\omega_{ou} &= \mathcal{O}\omega_{\mathcal{O}\mathcal{G}} + \mathcal{O}\omega_{gu} \\
&= \left[0_{[3 \times 3]} \quad {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \quad {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}J_{R_{q_j}}(q_j) \right] \cdot u
\end{aligned} \tag{8.35}$$

Böylelikle, bacak uç noktasının çalışma uzayındaki hızı $\left[{}^{\circ}v_u^T \quad {}^{\circ}\omega_u^T \right]^T$ ile genelleştirilmiş u hızları arasındaki ilişki Denklem (8.36)'de verilen bacak uç noktasının Jakobiyeni ile tanımlanabilmektedir.

$${}^{\circ}J_u(q) = \begin{bmatrix} {}^{\circ}J_{UP} \\ {}^{\circ}J_{UR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{[3 \times 3]} & -{}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot S({}^{\mathcal{G}}p_{gu}) & {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}J_{P_{q_j}}(q_j) \\ 0_{[3 \times 3]} & {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} & {}^{\circ}R_{\mathcal{O}\mathcal{G}} \cdot {}^{\mathcal{G}}J_{R_{q_j}}(q_j) \end{bmatrix} \tag{8.36}$$

Denklem (8.36)'de ${}^{\mathcal{G}}J_{P_{q_j}}(q_j)$ ve ${}^{\mathcal{G}}J_{R_{q_j}}(q_j)$ bacak uç noktasının \mathcal{G} eksen takımına göre tanımlanmış geometrik Jakobiyen matrisinin doğrusal ve açısıl bileşenleridir. Gerekli hesaplamalar yapıldığında sağ arka bacak uç noktasının \mathcal{G} eylemsiz eksen takımına göre tanımlanmış geometrik Jakobiyen matrisinin açısıl bileşeni Denklem (8.37)'deki gibi ve doğrusal bileşeni Denklem (8.38)'deki gibi elde edilmektedir. Burada sadece sağ arka bacak için geometrik Jakobiyen matrisi hesap edilmiştir, ancak diğer bacaklar için de aynı hesaplamalar yapılabilir. Sağ arka bacak KAA eklemının gövde üzerindeki konumunu \mathcal{G} eksen takımına göre tanımlayan konum vektörü $r_{g_i} = [-l_G \ 0 \ w_G]^T$ şeklinde tanımlanmıştır.

$${}^G J_{Rq_j}^{A_{sağ}}(q_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \theta_{1A_{sağ}} & -\sin \theta_{1A_{sağ}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{1A_{sağ}} & \cos \theta_{1A_{sağ}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.37)$$

$${}^G J_{Pq_j}^{A_{sağ}}(q_j) = \begin{bmatrix} {}^G J_{Pq_j}^{(1,1)} & {}^G J_{Pq_j}^{(1,2)} & {}^G J_{Pq_j}^{(1,3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ {}^G J_{Pq_j}^{(2,1)} & {}^G J_{Pq_j}^{(2,2)} & {}^G J_{Pq_j}^{(2,3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ {}^G J_{Pq_j}^{(3,1)} & {}^G J_{Pq_j}^{(3,2)} & {}^G J_{Pq_j}^{(3,3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^G J_{Pq_j}^{(1,1)} = 0$$

$${}^G J_{Pq_j}^{(2,1)} = L_1 \cos \theta_{2A_{sağ}} \sin \theta_{1A_{sağ}} - L_0 \cos \theta_{1A_{sağ}} \\ + L_2 \cos \theta_{3A_{sağ}} \cos \theta_{2A_{sağ}} \sin \theta_{1A_{sağ}} - L_2 \sin \theta_{3A_{sağ}} \sin \theta_{1A_{sağ}} \sin \theta_{2A_{sağ}}$$

$${}^G J_{Pq_j}^{(3,1)} = L_2 \cos \theta_{1A_{sağ}} \sin \theta_{3A_{sağ}} \sin \theta_{2A_{sağ}} - L_1 \cos \theta_{1A_{sağ}} \cos \theta_{2A_{sağ}} \\ - L_2 \cos \theta_{3A_{sağ}} \cos \theta_{1A_{sağ}} \cos \theta_{2A_{sağ}} - L_0 \sin \theta_{1A_{sağ}} \quad (8.38)$$

$${}^G J_{Pq_j}^{(1,2)} = L_2 \cos (\theta_{2A_{sağ}} + \theta_{3A_{sağ}}) + L_1 \cos \theta_{2A_{sağ}}$$

$${}^G J_{Pq_j}^{(2,2)} = \cos \theta_{1A_{sağ}} \left(L_2 \sin (\theta_{2A_{sağ}} + \theta_{3A_{sağ}}) + L_1 \sin \theta_{2A_{sağ}} \right)$$

$${}^G J_{Pq_j}^{(3,2)} = \sin \theta_{1A_{sağ}} \left(L_2 \sin (\theta_{2A_{sağ}} + \theta_{3A_{sağ}}) + L_1 \sin \theta_{2A_{sağ}} \right)$$

$${}^G J_{Pq_j}^{(1,3)} = L_2 \cos (\theta_{2A_{sağ}} + \theta_{3A_{sağ}})$$

$${}^G J_{Pq_j}^{(2,3)} = L_2 \sin (\theta_{2A_{sağ}} + \theta_{3A_{sağ}}) \cos \theta_{1A_{sağ}}$$

$${}^G J_{Pq_j}^{(3,3)} = L_2 \sin (\theta_{2A_{sağ}} + \theta_{3A_{sağ}}) \sin \theta_{1A_{sağ}}$$

Bu sonuçlar ile dört ayaklı bir robotun ileri kinematik analizi elde edilmiştir. Buradan bacak uç noktasının istenen bir konumuna karşılık eklem açılarının ne olması gerektiği sorusunun yanıtı için ters kinematik analizlerin de yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda, G eksen takımında tanımlı istenen bir bacak uç noktası konumu ${}^G p_{Gu}^* = [{}^G x_u^* \ {}^G y_u^* \ {}^G z_u^*]^T$ için θ_i^* bacak eklem açılarının ne olması gerektiği Denklem (8.39)'da verilmiştir. Burada hem robotun kinematik yapılandırmasından hem bacakların gövde üzerindeki yerleşiminden hem de bacak eklemlerine yerleştirilen eksenlerin yönelimlerinden kaynaklanan farklılıklar olmaktadır. Ters kinematik işlemler karmaşık hale gelse de bu tercihler neticesinde hareket yönü, gövde ve bacaklar için aynı yönde olmaktadır. Bu yaklaşımın önemi bacakların

yörünge planlamasının anlatıldığı Bölüm 8.3'de daha net anlaşılmaktadır.

- Sağ Ön Bacak $r_{\mathcal{G}^{\delta_{\text{sağ}}}} = [l_G \ h_G \ w_G]^T$

$$\begin{aligned} \theta_{1_{\delta_{\text{sağ}}}}^* &= \text{atan2}(-({}^G y_u^* - h_G), ({}^G z_u^* - w_G)) \\ &\quad - \text{atan2}\left(\sqrt{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* - w_G)^2 - L_0^2}, L_0\right) \\ \theta_{2_{\delta_{\text{sağ}}}}^* &= \text{atan2}\left({}^G x_u^* - l_G, \sqrt{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* - w_G)^2 - L_0^2}\right) \\ &\quad - \text{atan2}\left(L_2 \sin \theta_{3_{\delta_{\text{sağ}}}}, L_1 + L_2 \cos \theta_{3_{\delta_{\text{sağ}}}}\right) \\ \theta_{3_{\delta_{\text{sağ}}}}^* &= \text{atan2}\left(\sqrt{1 - D^2}, D\right) \\ D &= \frac{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* - w_G)^2 + ({}^G x_u^* - l_G)^2 - L_0^2 - L_1^2 - L_2^2}{L_1 L_2} \end{aligned} \quad (8.39a)$$

- Sağ Arka Bacak $r_{\mathcal{G}^{\text{A}_{\text{sağ}}}} = [-l_G \ h_G \ w_G]^T$

$$\begin{aligned} \theta_{1_{\text{A}_{\text{sağ}}}}^* &= \text{atan2}(-({}^G y_u^* - h_G), ({}^G z_u^* - w_G)) \\ &\quad - \text{atan2}\left(\sqrt{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* - w_G)^2 - L_0^2}, L_0\right) \\ \theta_{2_{\text{A}_{\text{sağ}}}}^* &= \text{atan2}\left({}^G x_u^* + l_G, \sqrt{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* - w_G)^2 - L_0^2}\right) \\ &\quad - \text{atan2}\left(L_2 \sin \theta_{3_{\text{A}_{\text{sağ}}}}, L_1 + L_2 \cos \theta_{3_{\text{A}_{\text{sağ}}}}\right) \\ \theta_{3_{\text{A}_{\text{sağ}}}}^* &= \text{atan2}\left(-\sqrt{1 - D^2}, D\right) \\ D &= \frac{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* - w_G)^2 + ({}^G x_u^* + l_G)^2 - L_0^2 - L_1^2 - L_2^2}{L_1 L_2} \end{aligned} \quad (8.39b)$$

- Sol Ön Bacak $r_{\mathcal{G}^{\text{A}_{\text{sol}}}} = [l_G \ h_G \ -w_G]^T$

$$\begin{aligned} \theta_{1_{\delta_{\text{sol}}}}^* &= -\text{atan2}(-({}^G y_u^* - h_G), -({}^G z_u^* + w_G)) \\ &\quad + \text{atan2}\left(\sqrt{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* + w_G)^2 - L_0^2}, L_0\right) \\ \theta_{2_{\delta_{\text{sol}}}}^* &= \text{atan2}\left({}^G x_u^* - l_G, \sqrt{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* + w_G)^2 - L_0^2}\right) \\ &\quad - \text{atan2}\left(L_2 \sin \theta_{3_{\delta_{\text{sol}}}}, L_1 + L_2 \cos \theta_{3_{\delta_{\text{sol}}}}\right) \\ \theta_{3_{\delta_{\text{sol}}}}^* &= \text{atan2}\left(\sqrt{1 - D^2}, D\right) \\ D &= \frac{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* + w_G)^2 + ({}^G x_u^* - l_G)^2 - L_0^2 - L_1^2 - L_2^2}{L_1 L_2} \end{aligned} \quad (8.39c)$$

- Sol Arka Bacak $r_{\mathcal{G}^{\text{A}_{\text{sol}}}} = [-l_G \ h_G \ -w_G]^T$

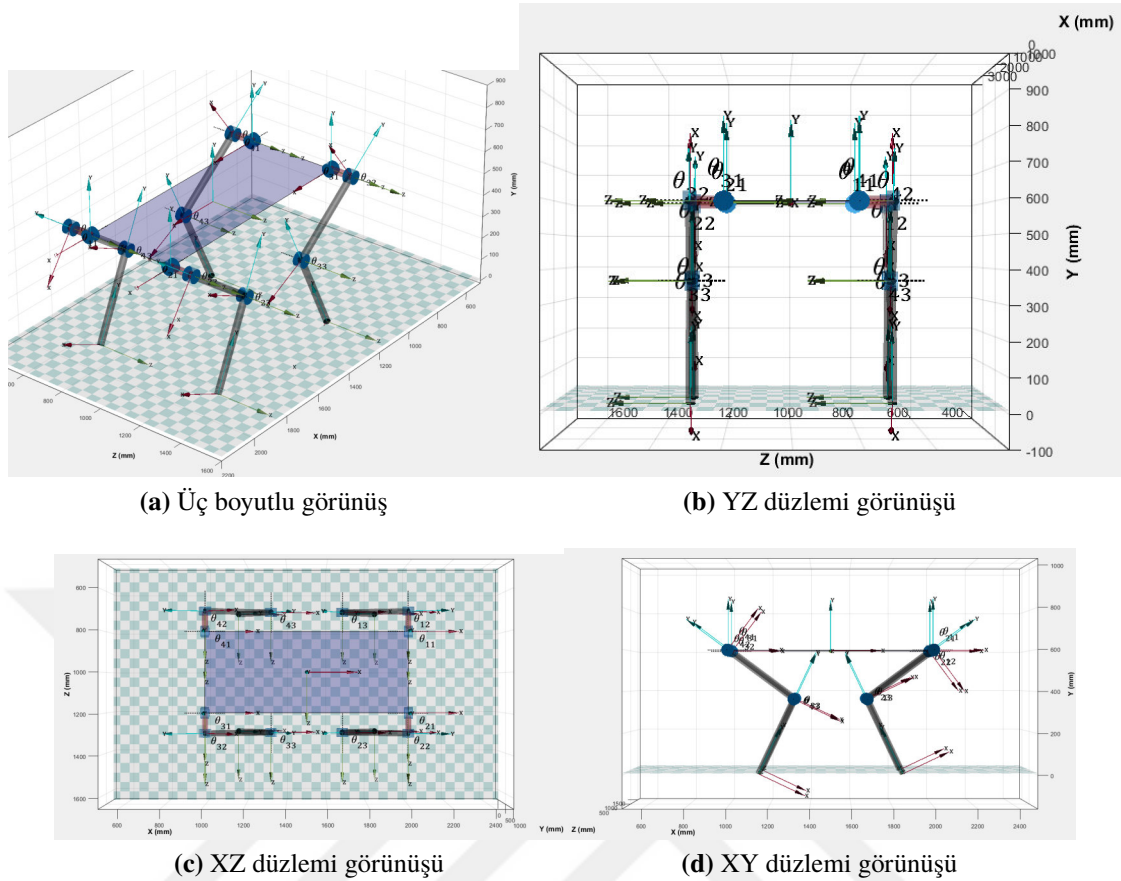
$$\begin{aligned}
\theta_{1_{\text{Sol}}}^* &= -\text{atan2}(-({}^G y_u^* - h_G), -({}^G z_u^* + w_G)) \\
&\quad + \text{atan2}\left(\sqrt{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* + w_G)^2} - L_0^2, L_0\right) \\
\theta_{2_{\text{Sol}}}^* &= \text{atan2}\left(({}^G x_u^* + l_G), \sqrt{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* + w_G)^2} - L_0^2\right) \\
&\quad - \text{atan2}\left(L_2 \sin \theta_{3_{\text{Sol}}}, L_1 + L_2 \cos \theta_{3_{\text{Sol}}}\right) \\
\theta_{3_{\text{Sol}}}^* &= \text{atan2}\left(-\sqrt{1 - D^2}, D\right) \\
D &= \frac{({}^G y_u^* - h_G)^2 + ({}^G z_u^* + w_G)^2 + ({}^G x_u^* + l_G)^2 - L_0^2 - L_1^2 - L_2^2}{L_1 L_2}
\end{aligned} \tag{8.39d}$$

Elde edilen bu kinematik denklemler kullanılarak üç boyutlu uzayda eylemsiz bir eksen takımına göre dört ayaklı bir robotun istenen yapılandırması ve yönelimi için gerekli kinematik analizleri yapabilecek ve görsel çıktılar verebilecek bir yazılım geliştirilmiştir. Programlama dili olarak Matlab yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yazılım ile yine bu çalışma kapsamında belirlenen kinematik yapılandırmaya ve iki boyutlu düzlemsel bir gövdeye sahip, robot gövde eksen takımının robotun sagittal düzlemi ve frontal düzleminin gövde ile kesiştiği noktaya x-ekseni ilerleme yönü olacak şekilde yerleştirildiği dört ayaklı bir robotun eylemsiz eksen üzerinde istenen gövde konumu, yönelimi ve bacak uç noktaları konumu için elde edilmiş örnek bir ekran çıktısı Şekil 8.4'de verilmiştir. Tablo 8.1'de, gövde konumu, yönelimi, bacak uç noktaları konumu ve uzunlukların boyutları gibi Şekil 8.4'de ekran çıktısı verilen örnek hesaplama için kullanılan parametrelerin değerleri ve bu değerlere karşılık hesap edilen eklem açıları verilmiştir.

Bu sonuçlar ile gövde konumu, yönelimi ve bacak uç noktaları konumları ile ilgili bütün hesaplamalar elde edilmiştir. Ancak, istenen bir gövde hareketinin nasıl sağlanacağı

Tablo 8.1. Şekil 8.4'de ekran çıktısı verilen hesaplama için kullanılan parametrelerin değerleri ve bu değerlere karşılık hesap edilen eklem açıları.

Robot Gövde Boyutları [m]			Bacak Uzun Boyutları [m]			
En (w_G)	Boy (l_G)	Genişlik (h_G)	L_0	L_1	L_2	
0.4	1	0	0.1	0.4	0.4	
Gövde Konumu [m] ve Yönelimi [deg]						
x_G	y_G	z_G	α	β	γ	
1.5	0.6	1	0	0	0	
Bacak Ucu Konumu [m]			Hesaplanan Eklem Açılı [deg]			
	x	y	z	θ_1	θ_2	θ_3
1. Sol Ön	2	0.6	0.8	0	-53.4048	78.7370
2. Sağ Ön	2	0.6	1.2	0	-53.4048	78.7370
3. Sağ Arka	1	0.6	1.2	0	53.4048	-78.7370
4. Sol Arka	1	0.6	0.8	0	53.4048	-78.7370



Şekil 8.4. Bu tez çalışmasının konusu olan dört ayaklı bir robotun kinematik yapılandırması ve bacak üzerinde tanımlanan eksen takımları ile sistem değişkenlerinin şematik gösterimi. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılım ile elde edilmiştir.

konusunun aydınlatılması gerekmektedir. Belirtildiği gibi ayaklı robotlar yer düzlemini destek olarak kullanarak üç boyutlu uzayda sürekli değişen temas noktaları aracılığıyla hareket edebilmektedirler. Yani doğrudan gövde ekseninden bir tahrik söz konusu değildir. Daha açık bir ifade ile, istenen bir gövde hareketi yer ile temas eden bacaklar sayesinde elde edilmektedir. Bu bağlamda istenen bir gövde hareketi için yer ile temas eden bacakların nasıl hareket etmesi gerektiği sorusu yanıtlanmalıdır.

Öncelikle eylemsiz eksen takımına göre gövde hareket ederken yer ile temas eden bacakların sabit olması gerekmektedir. Yani, istenen bir gövde hızına göre robot hareket ederken ${}^O p_{GU}$ konum vektörü sabit kalmalıdır. Bu durum, Denklem (8.40)'de gösterildiği gibi konum vektörünün zamana göre türevi alınarak ve Denklem (8.36) kullanılarak elde edilen üç adet kinematik kısıt ile ifade edilmektedir.

$${}^O v_u = 0$$

$${}^O J_{UP}.u = 0, \longrightarrow {}^O J_{UP}.\dot{u} + {}^O \dot{J}_{UP}.u = 0 \quad (8.40)$$

$\varrho_G^* = J_i * u_i$ şeklinde tanımlanmış istenen bir gövde hareketi sırasında hareket boyunca Denklem (8.36)'de tanımlanan kinematik kısıt denklemleri sağlanmalıdır. Bunun için, kısıtların önceliklendirildiği bir yaklaşımla, istenen bir gövde hareketi sırasında kısıtların sağlanması için geliştirilmiş hızlar Denklem (8.41)'deki gibi hesap edilmektedir.

$$u = N_{UP}(J_i N_{UP})^+ \varrho_G^* \quad (8.41)$$

Denklem (8.41)'de N_{UP} terimi, ${}^O J_{UP}$ bacak temas noktası Jakobiyenin boş uzayı olarak tanımlanmıştır. Denklem (8.41) kullanılarak Şekil 8.4'de verilen örnek robot yapılandırması anında robot gövde hızının eylemsiz eksen takımına göre x yönünde 1 m/s olması için eklemlerin açısal hızları hesaplanabilir. Bu bağlamda sadece gövde hızı ile ilgilendiğinden istenen geliştirilmiş hız u_i Denklem (8.42a)'deki gibi ve Jakobiyen matris J_i Denklem (8.42b)'deki gibi tanımlanırsa istenen gövde hızı ϱ_G^* Denklem (8.42c)'deki gibi x yönünde 1 m/s olarak elde edilir. Dört bacağın yer ile temas ettiği Şekil 8.4'de verilen örnek robot yapılandırması anında bacak temas noktası Jakobiyeni ${}^O J_{UP}$ Denklem (8.42d)'deki gibi olmaktadır. Bu ifadeler Denklem (8.41)'de yerine yazıldığında gövde hızının x yönünde 1 m/s olması için eklem açısal hızlarının ne olması gerektiği Denklem (8.42e)'deki gibi bulunur. Elde edilen sonuçlar Denklem (8.36)'de yerine yazılarak Denklem (8.42)'deki hesaplamaların doğrulaması yapılabilir.

$$u_i = [1 \ 0_{[1 \times 17]}]^T \quad (8.42a)$$

$$J_i = [\mathbb{I}_{[6 \times 6]} \ 0_{[6 \times 12]}] \quad (8.42b)$$

$$\varrho_G^* = J_i * u_i = [1 \ 0_{[1 \times 5]}]^T \quad (8.42c)$$

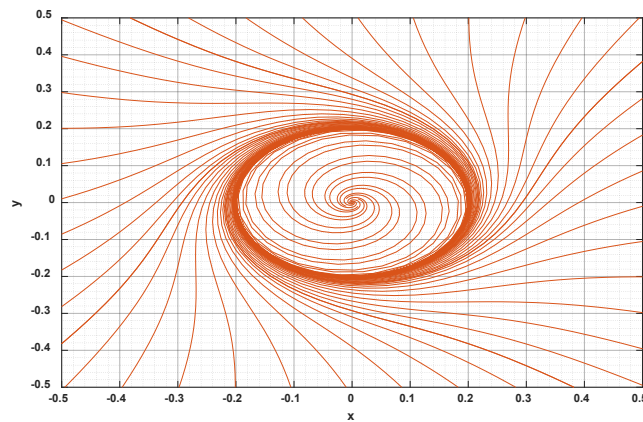
$${}^O J_{UP} = [{}^O J_{UP}^{\ddot{\theta}_{sol}^T} \ {}^O J_{UP}^{\ddot{\theta}_{sağ}^T} \ {}^O J_{UP}^{A_{sağ}^T} \ {}^O J_{UP}^{A_{sol}^T}]^T \quad (8.42d)$$

$$u = N_{UP}(J_i N_{UP})^+ \varrho_G^* = \left[1 \ 0_{[1 \times 5]} \ 0 \ -2.44 \ -1.57 \ 0 \ -2.44 \ -1.57 \ 0 \ -2.44 \ -1.57 \ 0 \ -2.44 \ -1.57 \right]^T \quad (8.42e)$$

Böylelikle, istenen bir robot gövde hareketi için yer ile temas eden bacakların sabit kalması için eklem açılarının nasıl hareket etmesi gerektiği sorusu yanıtlanmış olmaktadır. Bölümün devamında robotun hareketi yani yürüyüşü sırasında bacakların nasıl hareket etmesi gerektiği sorusu yanıtlanmıştır.

8.3. Merkezi Örüntü Üretici Tasarımı ve Bacak Yörünge Planlaması

Bu bölümde dört ayaklı bir robotun yürüyüş şekilleri ve bu yürüyüş şekillerine göre bacakların izlemesi gereken yörüngeler anlatılmıştır. Devamında yürüyüş için gerekli referans yörüngenin tanımlaması için kullanılan Merkezi Örüntü Üretici (MÖÜ) açıklanmıştır. Bu bağlamda, yürüyüş için yapılan adım hareketini tanımlamak gerekmektedir. Adım hareketi kendi içerisinde uçuş fazı ve destek fazı olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır ve yürüyüş sırasında adım hareketi gövde eksen takımına göre sürekli kendini tekrar eden bir dögüdür. Bu dögü hareketi adım yüksekliği, adım mesafesi ve adım hızı gibi parametreler ile tanımlanmaktadır ve adım hareketi sürekli kendini tekrar eden periyodik bir durum olduğu için bu durumun bir osilatör ile ifade edilebilmesi mümkündür. Aslında doğadaki canlılarda da yürüme, nefes alıp-verme, kanat çırpma gibi ritmik ve kendini tekrar eden motor davranışları MÖÜ adı verilen ritmik olmayan girdilere karşı ritmik çıktılar üreten biyolojik nöral ağlar ile yapılmaktadır (Kimura ve ark., 2005). Ayaklı robotlar literatüründe MÖÜ modellerini kullanan biyolojik olarak esinlenen kontrol stratejileri yaygın olarak kullanılmaktadır (Buchli ve ark., 2006; Zhang ve ark., 2014). Bu tür kontrolcülerin kullanılmasının en büyük avantajı, limit çevrim davranışı göstermesi ve geçici bozulmaların hızla unutulduğu kararlılık özellikleri sergilemesidir. Diğer bir avantajı ise, robot ve çevresi ile güçlü bir şekilde bağlanmasını sağlayan kendiliğinden senkronizasyon özelliklerine sahip osilatörler kullanılmasıdır (Righetti ve Ijspeert, 2008). Şekil 8.5’de limit çevrim eğrisine bir örnek $\dot{x} = \gamma y^2 + x(R^2 - x^2 - y^2)$ ve $\dot{y} = -\gamma x^2 + x(R^2 - x^2 - y^2)$ dinamik sistemi için gösterilmektedir.



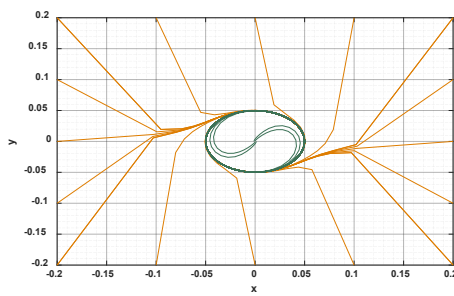
Şekil 8.5. $\dot{x} = \gamma y^2 + x(R^2 - x^2 - y^2)$ ve $\dot{y} = -\gamma x^2 + x(R^2 - x^2 - y^2)$ dinamik sisteminin limit çevrim eğrisi ($\gamma = 0.1$ ve $R = 0.2$ için). Burada farklı başlangıç noktalarına sahip eğrilerin 0.2 yarıçaplı daire üzerine yakınsadığı görülmektedir.

Ayaklı robotların yürüyüş kontrolünde MÖÜ uygulamasındaki en yaygın yaklaşım, MÖÜ'yü birbirine bağlı doğrusal olmayan osilatörlerin kullanıldığı otonom dinamik sistemler olarak modellemektir (Tran ve ark., 2014). Ancak genel yaklaşım eklem uzayında ritmik hareketler üreten MÖÜ'ler kullanılması üzerine olmuştur (Kimura ve ark., 2007; Liu ve ark., 2011; Sprowitz ve ark., 2013; Fukui ve ark., 2019). Bu tez çalışmasında, çalışma uzayında periyodik hareketler üreten bir MÖÜ tasarımı kullanılmıştır. MÖÜ ile ilgili daha detaylı bilgiye şu eserden ulaşılabilir; (Ijspeert, 2008). Bölümün devamında bu tez çalışması kapsamında geliştirilen hidrolik tahrikli dört ayaklı robotun hareketi sırasında adım yörüngesinin belirlenmesi için geliştirilen MÖÜ'nün yapısı detaylı olarak sunulmuştur.

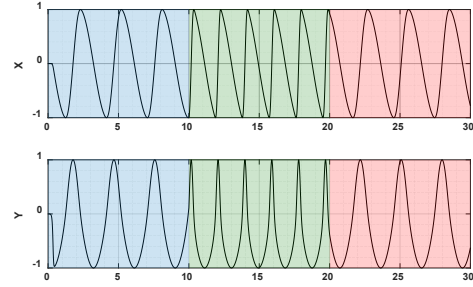
Hareket sırasında gövde eksenine göre periyodik olarak değişen referans bacak yörüngesini MÖÜ ile modelleyebilmek için öncelikle bir osilatör modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında literatürde MÖÜ yapılandırmasında sıklıkla kullanılan ve ilk olarak (Righetti ve Ijspeert, 2006) tarafından önerilen faza bağlı frekans ayarlaması yapılabilen değiştirilmiş bir Hopf Osilatörü modeli kullanılmıştır. Bu sayede, adım hareketi sırasında destek fazı ve uçuş fazı frekansları ve genlikleri birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol edilebilmiştir. Osilatör modeli Denklem (8.43)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(\mu - r^2)x - \lambda\omega y \\ \dot{y} &= \beta(\mu - r^2)y + \lambda\omega x \end{aligned} \quad (8.43)$$

Denklem (8.43)'de α ve β değişkenleri osilatörün çıktısı olan x ve y değişkenlerinin limit çevrime yakınsama hızını belirlemektedir, yani farklı başlangıç noktalarından başlasa da osilatörün çıktısı olan x ve y değişkenleri α ve β değişkenlerine bağlı bir hızda limit çevrim üzerindeki noktalara yakınsamaktadır. λ ise limit çevrimin dönüş yönünü -1 için saat yönü, +1 için saat yönünün tersi olacak şekilde belirlemektedir. Limit çevrimin şekli ve yönü adım çevriminin şekli ve yönünü belirlediğinden adım yönü yani hareket yönü λ ile kontrol edilebilmektedir. Limit çevrimin şekli ise parantez içersindeki ifade $\mu - r^2$ ile belirlenmektedir ve limit çevrimin açısal hızı ise ω ile belirlenmektedir. Burada, $r^2 = x^2 + y^2$ seçilirse limit çevrimin şekli $\sqrt{\mu}$ yarıçaplı bir daire şeklinde olmaktadır, buna karşın limit çevrimin x ve y -eksenlerindeki genliği yani sırasıyla adım boyu ve adım yüksekliği birbirinden bağımsız kontrol edilmek istenirse, L_x adım boyu ve L_y adım yüksekliği olmak şartıyla $\mu = 1$ ve r^2 ifadesi ise $r^2 = \frac{4x^2}{L_x^2} + \frac{y^2}{L_y^2}$ şeklinde tanımlanmalıdır.



(a) Limit çevrim grafiği

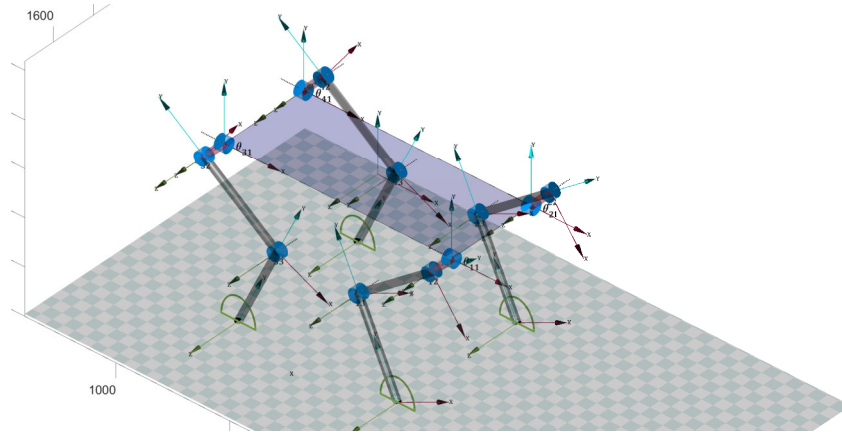


(b) Frekans değişim grafiği

Şekil 8.6. Denklem (8.43)'de tanımlanan osilatör ile elde edilmiş grafikler; (a) $L_x = 0.1$, $L_y = 0.2$, $\alpha = 2$, $\beta = 5$, $d = 1$, $\omega_x = \pi$, $\omega_y = \pi/2$ ve $\lambda = -1$, (b) Başlangıç (mavi alan) $L_x = 1$, $L_y = 1$, $\alpha = 5$, $\beta = 25$, $d = 5$, $\omega_x = \pi$, $\omega_y = \pi/2$ ve $\lambda = -1$, $t=10$ sn'de $\omega_x = 3\pi$ (yeşil alan) ve $t=20$ sn'de $\omega_x = \pi$ (kırmızı alan).

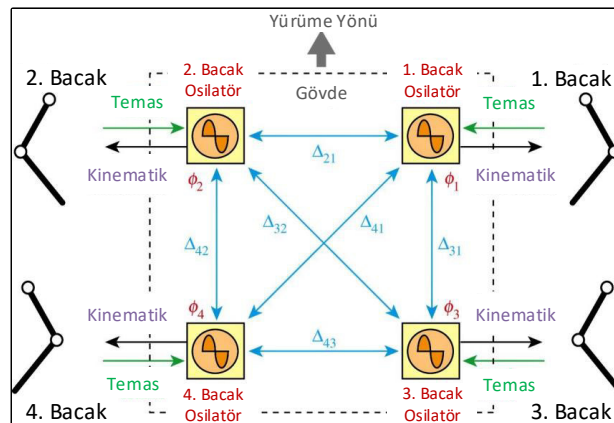
Ancak, bu tanımlamalar ile limit çevrimin şekli değiştiği için sistem kararsızlaşmaktadır ve yeniden kapalı yani kararlı bir limit çevrim elde edilebilmesi için Denklem (8.43)'deki açılmal hız ω , \dot{y} ve \dot{x} için sırasıyla $\frac{2L_y}{L_x}$ ve $\frac{L_x}{2L_y}$ ile çarpılması gerekmektedir. Bu sayede, merkezi orijinde ve asal eksenini L_x ve yedek eksenini $2L_y$ olan eliptik bir limit çevrim elde edilir. Bu tanımlamalar ile kararlı bir limit çevrime sahip ve adım şeklinin ayarlanabildiği bir osilatör elde edilir. Devamında adım hareketi sırasında destek fazı açılmal hızı ω_x ve uçuş fazı açılmal hızı ω_y birbirinden bağımsız kontrol edilmek istenirse limit çevrimin açılmal hızı $\omega = k_x\omega_x + k_y\omega_y$ şeklinde ayrıştırılabilir. Burada, k_x ve k_y katsayıları kullanılarak $y < 0$ için yani destek fazında $\omega = \omega_x$ ve $y > 0$ için yani uçuş fazında $\omega = \omega_y$ olacak şekilde açılmal hızlar ayarlanabilir. Sürekliliğin kaybedilmemesi için $k_x = \frac{1}{e^{-dy} + 1}$ ve $k_y = \frac{1}{e^{dy} + 1}$ şeklinde tanımlanırsa, $y=0$ noktasında yani fazlar arasında geçiş anında açılmal hız fazlar için tanımlanan açılmal hızlara göre değişecektir. Burada d katsayısı değişim hızını belirlemektedir. Böylelikle, limit çevrim kararlılığını bozmadan destek ve uçuş fazlarının açılmal hızları kontrol edilmiş olmaktadır. Bu tanımlamalar kullanılarak elde edilen limit çevrim grafiği Şekil 8.6a'da gösterilmektedir. Şekil 8.6b'de görüldüğü gibi kararlılığı bozmadan faz frekansları değiştirilebilmektedir ve bu sayede adım hızı senkronizasyonu bozmadan kontrol edilebilmektedir. Burada yapılan tanımlamalar ile birlikte osilatör modeli ilerleme yönü $+x$ olacak şekilde tekrar düzenlenirse Denklem (8.44) elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha \left(1 - \frac{4x^2}{L_x^2} + \frac{y^2}{L_y^2} \right) x + \omega y \\ \dot{y} &= \beta \left(1 - \frac{4x^2}{L_x^2} + \frac{y^2}{L_y^2} \right) y - \omega x \end{aligned} \quad (8.44)$$

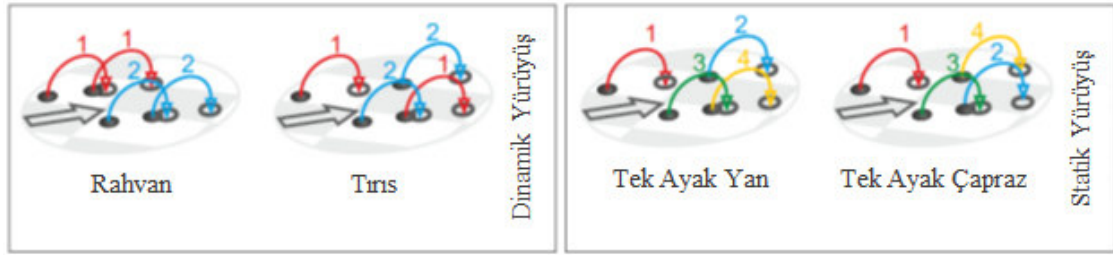


Şekil 8.7. Yeşil renk ile gösterilen eğriler bacakların izlemesi istenen adım yörüngelerini temsil etmektedir.

Şekil 8.6 ve Denklem (8.44)'de açıkça görüleceği üzere limit çevrim bu hali ile adım yörüngesi için kullanılamaz. Öncelikle, adım yörüngesi bacak uç noktasının izlemesi istenen yörünge olduğundan elde edilen osilatör çıktısı bacak ucu koordinatına dönüştürülmelidir. Bu bağlamda elde edilen elips şeklindeki limit çevrim merkez noktası destek fazında istenen gövde yüksekliğine bağlı olarak düşeyde robotun sagittal ve frontal düzlemlerinde bacakların KFE eklemlerine yerleştirilen eksen takımlarının merkezleri ile çakışık olacak şekilde her bir bacağın yörüngesini tanımlaması için çalışma uzayına gövde eksen takımında tanımlanarak yerleştirilmiştir. Şekil 8.7'de robot çalışma uzayı ve adım yörüngeleri gösterilmektedir. Ayrıca istenen farklı şekillerde yürüyüş tiplerini elde edebilmek için bacakların birbirlerine göre hareketleri ayarlanabilmelidir, yani bacaklar için kullanılan osilatörlerin birbirlerine göre fazları ayarlanabilmelidir. Bunun için, Denklem (8.44)'de, destek fazı $y > 0$ ve uçuş fazı $y < 0$ arasında geçişi belirleyen \dot{y} terimine diğer



Şekil 8.8. MÖÜ mimarisinin şematik gösterimi. Her bir bacak için tanımlanan osilatörler sarı renkle gösterilmiştir. Osilatörler arasındaki bağlantıyı sağlayan dönüşüm matrisi bileşenleri mavi renkle gösterilmiştir. ϕ_i faz kaymasını temsil etmektedir.



Şekil 8.9. Adım atma sırası ve senkronizasyonuna göre değişen dört ayaklı yürüyüş çeşitlerini gösteren çizim. (Remy (2011)'nin çalışmasından uyarlanmıştır.)

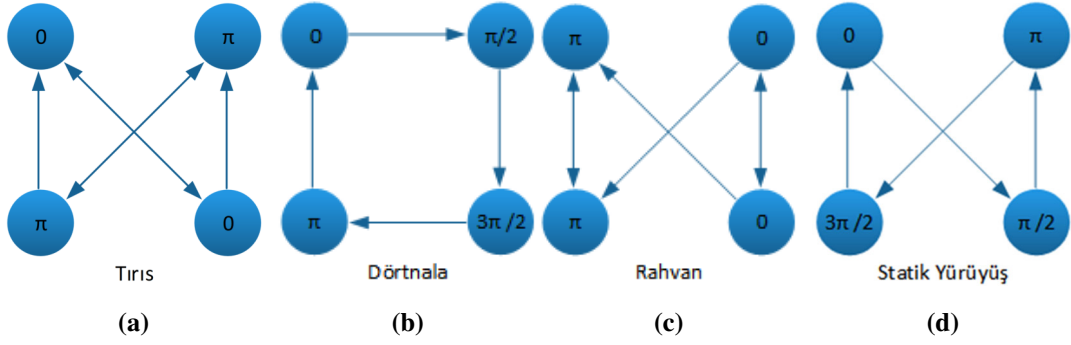
osilatörler ile bir bağlantı yapılmalı ve aralarındaki faz geçişleri ayarlanmalıdır. Denklem (8.45)'de gösterildiği gibi osilatör bağlantı matrisi ve diğer osilatörlerden gelen y_j konum bilgisi ile osilatörler arasında bir ağ kurularak fazlar ayarlanabilir ve böylelikle MÖÜ modeli tamamlanmış olur. Şekil 8.8'de MÖÜ mimarisi ve MÖÜ ağının bilgi akışı şematik olarak gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha \left(1 - \frac{4x^2}{L_x^2} + \frac{y^2}{L_y^2} \right) x + \omega y \\ \dot{y} &= \beta \left(1 - \frac{4x^2}{L_x^2} + \frac{y^2}{L_y^2} \right) y - \omega x + \sum \Delta_{ij} y_j \end{aligned} \quad (8.45)$$

Denklem (8.45)'de Δ_{ij} osilatör bağlantı matrisi bağıl faz kaymasını temsil eden bir dönüşüm matrisidir ve farklı yürüyüş tiplerini elde etmek için kullanılabilir. Şekil 8.9'de bacakların adım atma sırası ve senkronizasyonuna göre değişen farklı tipteki dört ayaklı yürüyüş şekilleri gösterilmektedir. Tablo 8.2'de farklı tipteki dört ayaklı yürüyüş şekillerini elde edebilmek için Δ_{ij} osilatör bağlantı matrisleri verilmiştir. Son olarak, ayaklar destek

Tablo 8.2. Adım atma sırası ve senkronizasyonuna göre değişen farklı dört ayaklı yürüyüş çeşitleri için Δ_{ij} osilatör bağlantı matrisleri.

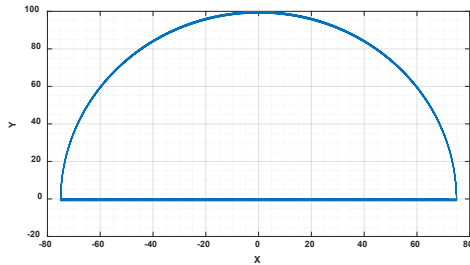
Tırs	Rahvan
$\begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$
Zıplama	Yürüme
$\begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$



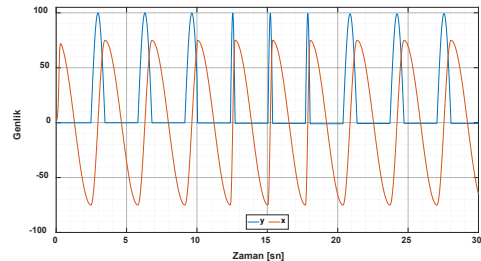
Şekil 8.10. Farklı yürüyüş tipleri için bacaklar arasında oluşturulan MÖÜ ağı ve bağlantılar arasındaki faz farkları.

fazında gövde yüksekliğinin sabit kalması için limit çevrim eğrisinin istenen bir gövde yüksekliğine yerleştirildiği varsayıldığında \dot{y} terimi yani bacakların y yönündeki hızı $y = 0$ olduğunda sıfır olması gerekmektedir. Yani limit çevrim eğrisi $-y$ yönüne ilerlememelidir. Yine faz değişim yaklaşımı kullanılarak, sürekliliği kaybetmemek için \dot{y} terimi $\frac{1}{e^{-cy} + 1}$ ile çarpıldığında koşullandırılan \dot{y}^* hızı $y \leq 0$ olduğunda sıfır olacak ve $y > 0$ olduğunda \dot{y} olacaktır. Yine burada c katsayısı yakınsama hızını belirlemektedir. Bu sayede genellik bozulmamış olmaktadır. Bu yaklaşım ile elde edilmiş koşullandırılmış limit çevrim grafiği ve osilatör çıktısı Şekil 8.11’de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere oldukça kararlı bir şekilde açısal hızlar arasında geçişler sağlanmış ve destek fazında istenen gövde yüksekliği korunmuştur. Devamında, farklı yürüyüş tipleri için bacaklar arasında oluşturulan MÖÜ ağı ve bağlantılar arasındaki faz farkları Şekil 8.10’de gösterilmektedir.

Buradan, çalışma uzayında oluşturulan MÖÜ ile elde edilen çıktılar Bölüm 8.2’de elde edilen eşitlikler kullanılarak eklem uzayına dönüştürülmelidir. Bir diğer husus, gövde hızının ne olacağı problemidir. Bu problem, V_G istenen hız olmak üzere MÖÜ’nin açısal



(a) Limit çevrim grafiği



(b) Frekans değişim ve genlik grafiği

Şekil 8.11. Bu bölümde tasarlanan MÖÜ ile değişen faz açısal hızları için elde edilen koşullandırılmış sonuçların grafikleri; (a) $L_x = 150$, $L_y = 100$, $\alpha = 20$, $\beta = 10$, $c = d = 5$, $\omega_x = \pi$, $\omega_y = \pi/2$ ve $\lambda = -1$, (b) Başlangıç, $\omega_x = \pi$, $\omega_y = \pi/2$ ve $\lambda = -1$, $t=10$ sn’de $\omega_x = 3\pi$ ve $t=20$ sn’de $\omega_x = \pi$.

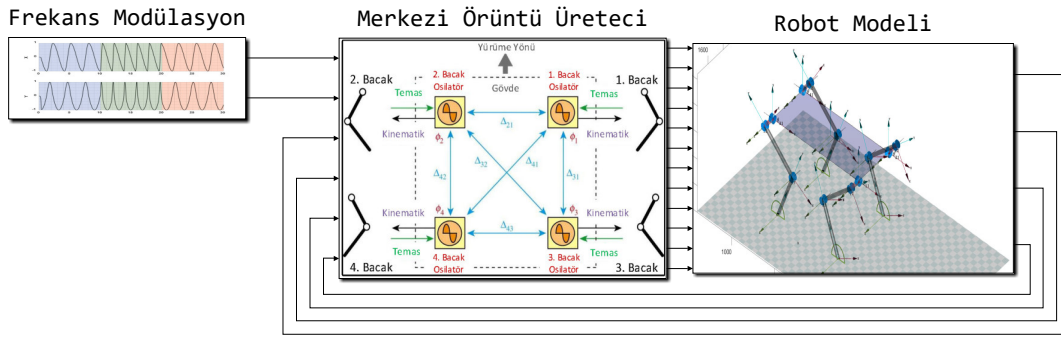
hızı $\omega = \pi \frac{V_G}{L_x}$ şeklinde tanımlanarak yanıtlanabilir. Ancak daha önce, yürüyüş sırasında ayakların yer ile teması konusu aydınlatılmalıdır. Yürüyüş sırasında Δ_{ij} osilatör bağlantı matrisi ile ayarlanan faz farklarından dolayı bacakların birbirlerine göre aynı anda yer ile temas ettiği süreler bellidir ve bunun yanında iki ayağın senkronize hareket ettiği tırıs gibi yürüyüşlerde ayakların yer ile teması hareket boyunca heran sağlanamayabilir. Farklı fazlarda hareket eden bacakların aynı anlarda yer ile teması yani destek fazında kaldıkları sürelerin kontrolü bu durumda mümkün değildir. Bu bağlamda, destek fazı ve uçuş fazı süreleri toplam adım döngüsü içerisinde görev katsayısı tanımı ile ayarlanarak farklı fazlarda hareket etseler dahi bacakların destek fazında birlikte bulunabilecekleri bir an yakalanabilir. Dengeleme açısından oldukça önemli olan bu yaklaşım ile, osilatör modeli oluşturulurken yapılan tanımlamalar geçerli olmak üzere MÖÜ'nin destek fazındaki açısal hızı $\omega_x = \pi k_x \frac{V_G}{L_x} \frac{\beta_D}{(1 - \beta_D)}$ ve uçuş fazındaki hızı $\omega_y = \pi k_y \frac{V_G}{L_y}$ olacak şekilde tanımlanabilir. Burada β_D terimi görev katsayısı¹ olarak tanımlanmıştır ve T_d duruş fazında geçen süre ve T toplam adım döngüsü süresi olmak üzere $\beta_D = \frac{T_d}{T}$ şeklinde hesaplanmaktadır.

Böylece robotun hareketi sırasında kendini dengeleme ve kararlılık bağlamında birbirleri ile etkileşim içerisinde olan bacakların izlemesi gereken referans yörüngeyi çalışma uzayında belirleyen bir MÖÜ elde edilmiştir. Bu yaklaşımın en büyük avantajı, kararlı yapısından dolayı bacaklarda oluşabilecek geçici bozulmalardan etkilenmeyerek kendini dengeleme becerisine katkı sunmasına ek olarak MÖÜ çıktılarının adım boyu, adım yüksekliği, adım hızı gibi dilsel ifadeler olması ve bu sayede hem programlama anlamında hem de kontrol anlamında daha anlamlı çıktılar elde edilmesidir.

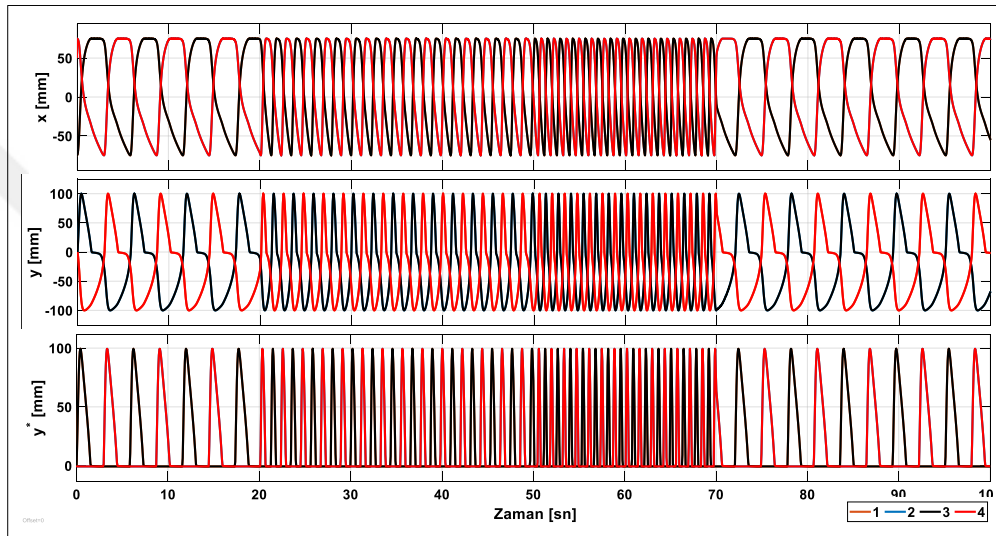
8.4. Merkezi Örüntü Üretici ile Gerçekleştirilen Yürüyüş Benzetimi

Bu bölümde, dört ayaklı bir robotun statik yürüyüşü ve tırıs yürüyüşü için gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sunulmuştur. Gerçekleştirilen yürüyüş benzetimlerinde Bölüm 8.3'de elde edilen MÖÜ kullanılmış ve başarımı değerlendirilmiştir. Öncelikle elde edilen MÖÜ modeli Simulink ortamında programlanmış ve bu tez çalışması kapsamında dört ayaklı bir robotun kinematik analizi için geliştirilen yazılım ile entegre edilmiştir. Şekil 8.12'de benzetim çalışmalarında kullanılan Simulink blok diyagramı gösterilmektedir. Şekil 8.12'de gösterilen "*Frekans Modülasyon*" bloğu ile osilatörlerin frekansları ve bu

¹Duty factor olan İngilizce karşılığından bu şekilde çeviri yapılmıştır.



Şekil 8.12. Dört ayaklı yürüyüş için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında kullanılan Simulink blok diyagramı

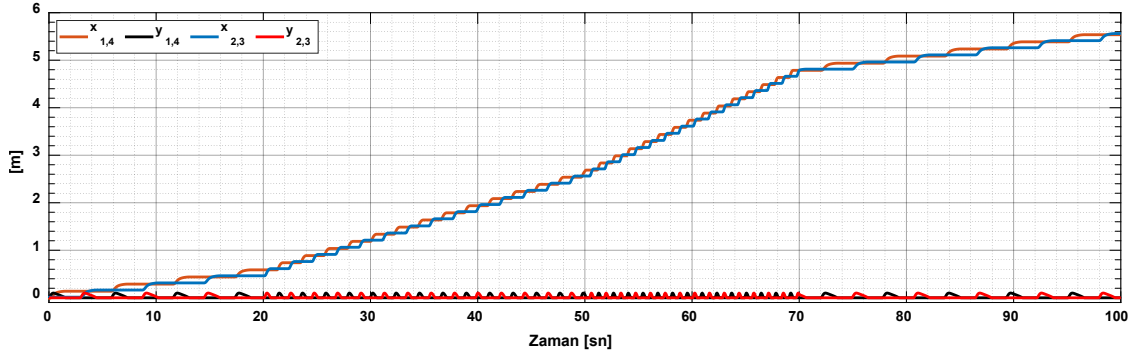


Şekil 8.13. Tırs yürüyüş için MÖÜ başarımının değerlendirildiği benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar.

sayede de yürüyüş sırasında bacak yörünge takip hızları değiştirilebilmektedir. Şekil 8.12’de gösterilen model ile ilk önce, geliştirilen MÖÜ modelinin başarımı değerlendirilmiş daha sonra yürüyüş benzetim çalışmalarına geçilmiştir. Bu bağlamda, benzetim çalışmalarında ilk olarak çapraz bacakların birlikte aynı faz farkı ile hareket ettiği tırs yürüyüş için ve daha sonra bütün bacakların farklı bir faz farkı ile hareket ettiği statik yürüyüş için MÖÜ modeli test edilmiştir. Tırs yürüyüş için gerekli referans yörüngeler elde edilirken kullanılan MÖÜ parametreleri Tablo 8.3’de özetlenmiştir. Burada grafiklerin okunabilirliği açısından istenen gövde hızı V_{G_0} başlangıçta $0.05 \frac{m}{s^2}$ seçilmiştir ve 100 saniye ile sınırlandırılan benzetim boyunca istenen gövde hızı $t = 20$ ’inci saniyede $0.1 \frac{m}{s^2}$, $t = 50$ ’inci saniyede $0.15 \frac{m}{s^2}$ ve son olarak $t = 70$ ’inci saniyede tekrar $0.05 \frac{m}{s^2}$ olacak şekilde değiştirilmiştir. Şekil 8.13’de tırs yürüyüş için elde edilen MÖÜ çıktısı ve koşullandırılmış y^* çıktıları gösterilmektedir. Grafiklerde çok net görüldüğü gibi MÖÜ farklı başlangıç noktalarına sahip olsalar bile bacak pozisyonlarını kararlı bir limit çevrime yakınsamıştır. Ayrıca,

Tablo 8.3. Tırıs yürüyüş için MÖÜ başarımının değerlendirildiği benzetim çalışmalarında gerekli referans yörüngeler elde edilirken kullanılan parametreler.

L_x [mm]	L_y [mm]	V_{G_0} [m/s ²]	β_D	α	β	c	d
150	100	0.05	0.60	1000	1000	1	1



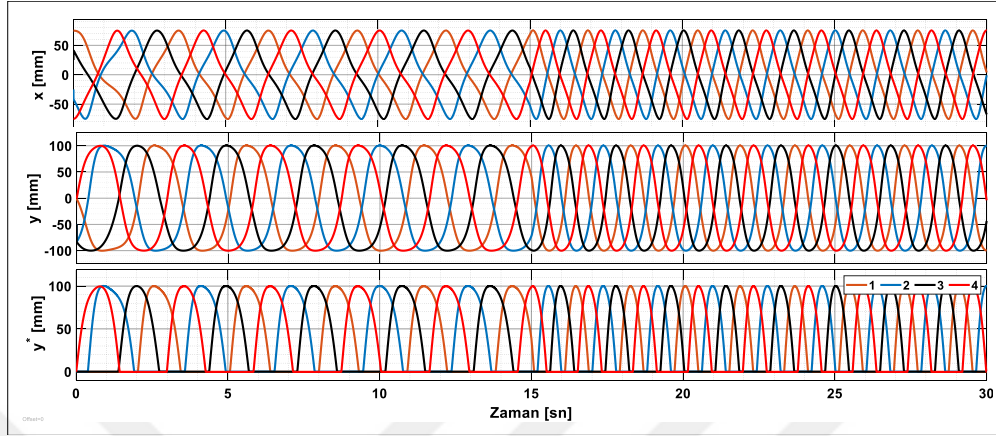
Şekil 8.14. Bacak ucu konumlarının eylemsiz eksen takımına göre değişimi. Şeklin okunabilirliği açısından konumlar (0,0) noktasına normalize edilmiştir.

benzetim çalışması sırasında bacak yörünge hızları da kararlılık bozulmadan başarılı bir şekilde değiştirilebilmiştir. Bu sayede yürüyüş sırasında robot gövde hızının istenilen bir değere göre ayarlanabilmesi mümkün olmuştur, bununla birlikte yürüyüş tipleri arasında geçişler de mümkündür ve yürüyüş esnasında bacakların yer ile temas ettiği süreler ayarlanabilmektedir. Robotun kendini dengeleme yeteneği açısından bu sonuçlar önemlidir. Son olarak grafikler incelendiğinde, koşullandırılmış y^* çıktısı ile yürüyüş boyunca bacakların destek fazında gövde yüksekliği için başarılı bir şekilde sabit bir referans yörünge sağlanabildiği görülmektedir. Yine bu sonuç değerlendirildiğinde robotun hareket esnasında kendini dengelemesi açısından kullanılan MÖÜ'nin önemli bir özellik sunduğu söylenebilir. Eylemsiz eksen takımına göre bacak ucu konumlarının değişimi okunabilirlik açısından (0,0) noktasına normalize edilerek Şekil 8.14'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde hareket boyunca bacak yörünge hızının ve dolayısı ile gövde hızının kararlı bir şekilde değiştirilebildiği açıkça görülmektedir.

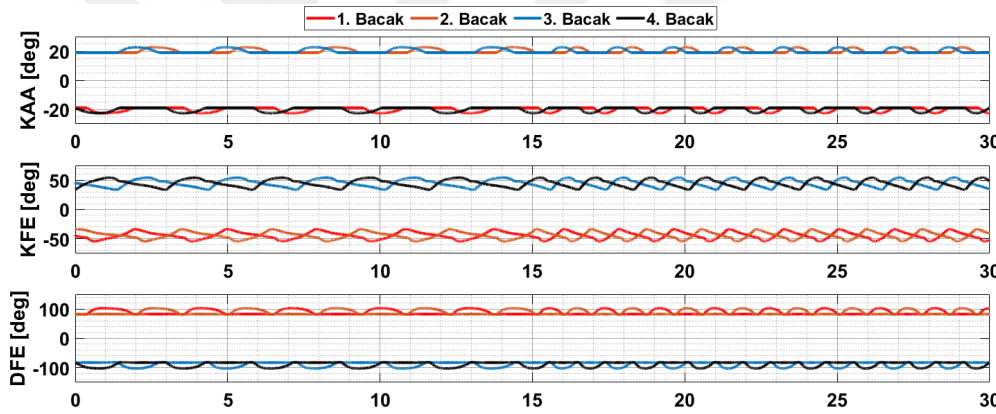
Tırıs yürüyüş için yapılan benzetimlerde başarılı sonuçlar elde edildikten sonra statik yürüyüş için MÖÜ testine geçilmiştir. MÖÜ ile statik yürüyüş için gerekli referans yörüngeler elde edilirken kullanılan parametreler Tablo 8.4'de özetlenmiştir. Burada yine grafiklerin okunabilirliği açısından istenen gövde hızı V_{G_0} başlangıçta $0.05 \frac{m}{s^2}$ seçilmiştir ve 30 saniye ile sınırlandırılan benzetim boyunca istenen gövde hızı $t = 15$ 'inci saniyede $0.1 \frac{m}{s^2}$ olacak şekilde değiştirilmiştir. Şekil 8.15'de statik yürüyüş için elde edilen MÖÜ çıktısı ve koşullandırılmış y^* çıktıları gösterilmektedir. Yine grafiklerde çok net görüldüğü

Tablo 8.4. Statik yürüyüş için MÖÜ başarımının değerlendirildiği benzetim çalışmalarında gerekli referans yörüngeler elde edilirken kullanılan parametreler.

L_x [mm]	L_y [mm]	V_{G_0} [m/s ²]	β_D	α	β	c	d
150	100	0.05	0.50	1000	1000	1	1

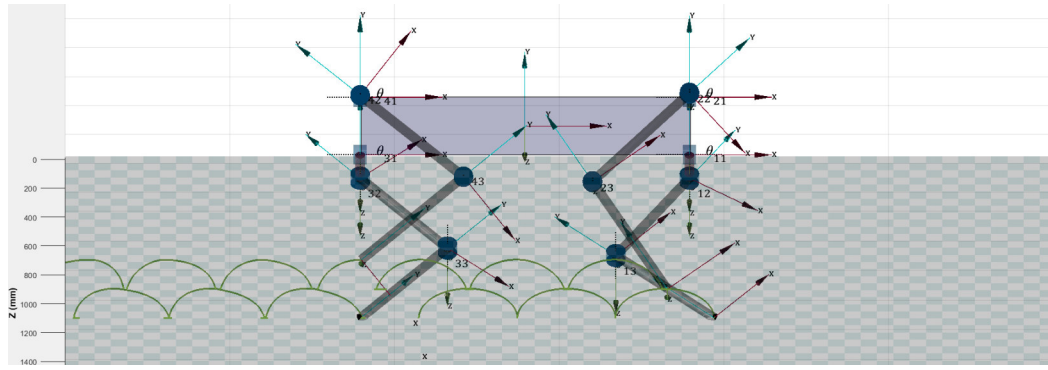


Şekil 8.15. Statik yürüyüş için MÖÜ başarımının değerlendirildiği benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar.

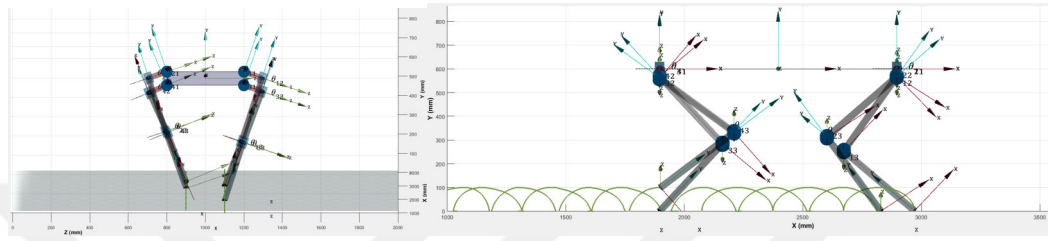


Şekil 8.16. Statik yürüyüş için MÖÜ başarımının değerlendirildiği benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçların herbir bacak için eklem uzayı izdüşüm grafiği.

gibi MÖÜ farklı başlangıç noktalarına sahip olsalar bile bacak pozisyonlarını kararlı bir limit çevrime yakınsamıştır. Ayrıca, benzetim çalışması sırasında bacak yörünge hızları da kararlılık bozulmadan başarılı bir şekilde değiştirilebilmiştir. MÖÜ çıktıları kullanılarak eklem açılarının ne olması gerektiği ters kinematik analiz ile belirlenebilir. Bu bağlamda, Şekil 8.16'da statik yürüyüş için elde edilen MÖÜ çıktıları kullanılarak yapılan ters kinematik hesaplamalar sonucunda elde edilen eklem uzayında izlenmesi gereken yörüngeler verilmiştir. Yürüyüş planlaması yapılırken yürüyüş sırasında ayak ucu konumlarının gövde izdüşümünden 10 cm içerde olacak şekilde olması istenmiştir. Geliştirilen yazılım ve bu bölümde elde edilen sonuçlar ile gerçekleştirilen yürüyüş benzetimi sırasında elde edilmiş ekran çıktıları Şekil 8.17'de gösterilmektedir. Şekil 8.16 ve



(a) Üç boyutlu görünüş



(b) XZ düzlemi görünüşü

(c) XY düzlemi görünüşü

Şekil 8.17. Bu tez çalışmasının konusu olan dört ayaklı bir robotun MÖÜ ile statik yürüyüşünün incelendiği benzetim çalışmasından elde edilen ekran çıktısı görüntüleri. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılım ile elde edilmiştir.

Şekil 8.17 birlikte değerlendirildiğinde tasarlanan MÖÜ ile başarılı bir şekilde yürüyüşün gerçekleştirildiği söylenebilir. Bunun yanında kararlılık ve kendini dengeleme açısından önemli olan bacak hareketlerinin birbirlerine göre hareketi tasarlanan MÖÜ ile sağlanmıştır. Bu sonuçlar ile dört bacaklı bir robotun farklı yürüyüş tipleri ve farklı gövde hızları için gerekli referans bacak yörünge planlamasını başarılı bir şekilde gerçekleştiren bir MÖÜ elde edilmiş ve başarımı değerlendirilmiştir. Dört bacaklı bir robotun yürüyüşü sırasında kendini dengeleme kabiliyeti ve kararlı bir yürüyüş becerisi bağlamında oldukça önemli olan bacakların birbirlerine göre hareketi MÖÜ ile kontrol edilmiştir. Ayrıca, frekans değişimi veya farklı başlangıç şartları gibi durumlarda oldukça kararlı bir davranış sergileyen ve durum çıktılarını limit çevrime kısa sürede yakınsayabilen MÖÜ ile hareket esnasında oluşabilecek geçici etkiler çabuk telafi edilebilecektir.

8.5. Bölüm Özeti

Bu bölümde dört ayaklı bir robotun yürüyüşü ve bacak yörünge planlaması tartışılmıştır. Bu bağlamda ilk önce, dört ayaklı robotların üç boyutlu uzayda serbest hareket eden ve bu hareketi doğrudan gövde ekseninden bir tahrik ile değil, aksine kısıt kuvvetleri ile gerçekleştiren sistemler olmasından dolayı serbest hareketli ana eksen kinematiği konusu açıklanmıştır.

Devamında, bu tez kapsamının konusu olan dört ayaklı bir robotun ileri ve ters kinematik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, istenen bir gövde konumu ve yönelimine göre gerekli hesaplamaları yapan ve bu sonuçları grafiksel olarak görselleştirebilen bir yazılım geliştirilmiştir. Devamında, dört ayaklı yürüyüş tipleri ve bu yürüyüş tipleri sırasında bacak hareketlerinin nasıl olması gerektiği konusu açıklanmıştır. Ayrıca, açıklandığı gibi dört ayaklı robotlarda hareket bacakların yer ile temas ettiği noktalarda oluşan kısıt kuvvetleri ile sağlandığından, robotun kendini dengelemesi ve kararlı bir yürüyüş gerçekleştirebilmesi için, bacakların birbirlerine göre hareketi senkronize bir şekilde olması ve bu senkronizasyonun geçici bozulmalardan etkilenmemesi gerekmektedir. Aynı zamanda, adım hareketinin kendini tekrar eden periyodik bir durum olmasından dolayı da yürüyüş sırasında referans bacak yörüngeleri oluşturulurken sürekli kendini tekrar eden ve birbirleri ile senkron ayrıca geçici bozulmalardan etkilenmeyerek bir limit çevrime yakınsayan bir model kullanılmalıdır. Bu doğrultuda, doğadan esinlenerek elde edilmiş, canlılarda ritmik hareketleri düzenleyen biyolojik nöral ağları taklit eden MÖÜ yaklaşımı ile yürüyüş sırasında bacak yörünge planlaması yapılmıştır. MÖÜ yaklaşımı ile yürüyüş sırasında ritmik adım hareketi için gerekli çıktılarda adım yüksekliği, adım boyu ve gövde hızı gibi parametrelere bağlı olarak çalışma uzayında elde edilebildiği bir model oluşturulmuştur. MÖÜ modeli ile yürüyüş için gerekli çıktılarda eklem uzayından ziyade çalışma uzayında elde edilmesinin en büyük avantajı adım parametrelerinin doğrudan kontrol edilebilmesidir.

Tasarımı yapılan MÖÜ ve kinematik analiz için geliştirilen yazılım kullanılarak yürüyüş benzetimleri gerçekleştirilmiş ve MÖÜ başarımının değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu bağlamda, çapraz ayakların birlikte hareket ettiği tırs yürüyüş olarak adlandırılan iki temaslı yürüyüş ve her ayağın farklı hareket ettiği dört temaslı yürüyüş olan statik yürüyüş tipleri açısından tasarlanan MÖÜ başarımı değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde MÖÜ modelinin başarılı bir şekilde bacak referans yörüngelerini sentezleyebildiği ve MÖÜ çıktısı olan yörüngelerin senkron hareket ettiği görülmüştür. Ayrıca, farklı başlangıç şartlarında dahi MÖÜ çıktılarının bir limit çevrime yakınsadığı görülmüştür. Buna ek olarak, yürüyüş sırasında hızın kontrol edilebilmesi için gerekli adım yörünge frekanslarının kararlı bir şekilde değiştirilebildiği görülmüştür.

Son olarak, bacak yörüngelerinin birbirileri ile senkronize bir şekilde hareket etmesini sağlayan MÖÜ modeli, kendini dengeleme ve kararlı bir yürüyüş bağlamında

önemli bir katkı sunmaktadır. Ancak gövde yörünge planlaması noktasında elde edilen MÖÜ modelinin geliştirilmesi mümkündür. Bu açıdan robot ağırlık merkezinin kontrol edildiği sıfır moment noktası yaklaşımı ile birlikte değerlendirilmesi düşünülebilir. Ayrıca, robotun çevreye etkidiği veya çevreden robota etkiyen kuvvetlerin kontrolü noktasında da empedans kontrolü ile birlikte değerlendirilmesi mümkündür.



9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yüksek hareket kabiliyetine sahip dört ayaklı hidrolik tahrikli bir robot modellenmesi ve uygulamasına yönelik yapılan tasarım çalışmalarına yer verilmiştir. Tez metninde bir çok yerde geçen *yüksek hareket kabiliyeti* kavramı önceki bölümlerde açıklanmadığı için bu bölümde açıklama ihtiyacı hissedilmiştir. Ayaklı robotlar tanımı gereği, hareketin bir anında tüm ayakların yerden kesildiği koşma, zıplama, atlama gibi yüksek hareket becerilerine sahip dinamik olarak kararlı robotların hepsini kapsamaktadır. Ancak bunun yanında, genelde iki ayaklı yürüyüş çalışmalarında kullanılan geniş tabanlı sürekli bir destek ile çok düşük hızlarda gerçekleştirilen yürüyüş biçimi olan yarı–statik yürüyüş yapan robotlar ve buna ek olarak, dinamik olarak kararlı olmayıp ancak statik olarak kararlı yürüyüş gerçekleştirebilen Bölüm 2.2.1’de anlatılan Frank, McGhee, Hirose, Waldron gibi araştırmacıların geliştirdikleri robotlar ile aktif olarak dengelenen robot çalışmalarına geçiş döneminde geliştirilen ve birçok kaynakta “yarı–dinamik” yürüyüşe referans olarak gösterilen Kato’ya ait iki ayaklı robot da ayaklı robot tanımı içerisinde yer almaktadır. Bu yüzden, koşma, zıplama, atlama gibi hareketleri dinamik olarak kararlı bir şekilde yapabilen ayaklı robotlara literatürde yüksek hareket kabiliyetine¹ sahip denmektedir.

Ayaklı bir robotun performansını etkileyen en önemli bileşenin bacak mekanizması olduğu ve tasarımı gerçekleştirilen dört ayaklı robotta özdeş bacak modellerinin kullanılabilir olması gerçeğinden hareketle çalışmanın odak noktası bacak mekanizmasının enerji verimliliği bağlamında iyileştirilmesi üzerine yoğunlaştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında modellenmesi ve uygulaması yapılan dört ayaklı robot için performans ölçütleri ve tasarım kriterleri belirlenerek modele ait tasarım çerçevesi tanımlanmıştır. Belirlenen tasarım çerçevesi temel alınarak bacakların kinematik yapılandırması, eyleyici seçimi ve bacak sayısı gibi tasarlanan ayaklı robota ait yapılandırmaya karar verilmiştir. Devamında, yine tasarım çerçevesi temel alınarak, bu çalışmanın en önemli katkısı olan enerji verimliliği bağlamında hem optimal kuvvet iletimini sağlayan boyutlandırmaya sahip hem de optimal sağlamlık–ağırlık oranına sahip bir bacak modeli elde edilmiştir. Dahası, sadece dört ayaklı bir robotla sınırlı kalmayıp, aksine ayaklı robotların genelinde, sıfırdan evrimsel bir yaklaşımla bacak mekanizması tasarımında izlenebilecek bir strateji geliştirilmiştir, ayrıca ayaklı robotlar literatüründe daha önce uygulanmamış topoloji optimizasyonu yaklaşımı ilk

¹İngilizcesi "Highly Dynamic" olan bu kavram Türkçeye bu şekilde çevrilmiştir.

defa kullanılmıştır. Bu bağlamda bu tez çalışması ile, literatürde halihazırda bulunan ayaklı robotların bacak mekanizmalarının iyileştirilmesinde ve aynı zamanda bundan sonra geliştirilecek ayaklı robotların bacak mekanizmalarının tasarımında izlenebilecek bir metodoloji ortaya konmuştur. Önerilen bu metodolojinin uygulanabilmesi ve geliştirilebilmesi için, çalışma kapsamında geliştirilen robot bacağıın tasarım aşamaları detaylı olarak raporlanmış ve temel alınan yaklaşımlar ve yöntemler detaylı olarak sunulmuştur.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen robot bacağıın hareket ve yapısal analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar amaçlanan performans ölçütleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Analizler, tasarlanan robot için öngörülen hareketler arasında bacağıa etki eden kuvvetler anlamında en uç durumların oluştuğu sıçrama–zıplama hareketi için bilgisayar destekli mühendislik programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tasarımı yapılan bacak modelinin belirlenen performans ölçütlerini karşıladığı görülmüştür ve tasarım çalışmaları ile eşzamanlı ilerleyen kontrol probleminin çözümü için yapılan araştırmalarda gerçekleştirilen benzetimlerde kullanılmak üzere elde edilen bacak modelinin matematiksel modeli elde edilmiştir. Aynı zamanda, bacak modeli için kullanılan hidrolik eyleyici modellemesi ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, dört bacaklı bir robotun kinematik ve yürüyüş analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, dört ayaklı bir robotun farklı tiplerde yürüyüşü sırasında bacağıın izlemesi gereken referans yörüngenin belirlenmesi için bir MÖÜ tasarlandı.

Bunlara ek olarak, tez çalışması kapsamında tasarımı gerçekleştirilen robot bacağıın kontrolü üzerine araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, robot bacağıın kontrolü için PID kontrolcü, BM kontrolcü, ANFIS kontrolcü yaklaşımları incelenmiştir. Bunun için ilk önce PID kontrolcü tasarımı yapılarak kazançların belirlenen metriklere göre iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen kontrolcü performansları karşılaştırıldığında, oldukça yüksek doğrusal olmayan davranışa sahip hidrolik tahrikli robot bacağıın konum kontrolü için PID kontrolcülerin tek başına yetersiz olduğu ve daha sofistike bir yaklaşıma ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu bağlamda doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde literatürde sıklıkla başvurulan BM kontrolcü tasarımına yönelik çalışmalar yapılmış ve konum kontrolü kendinden ayarlamalı kontrolcü ile iyileştirilmeye çalışılmıştır. Sonrasında öğrenme algoritmaları kullanılarak kontrolcü eğitimine yönelik çalışmalar yapılarak kontrolcü tasarımı üzerine yapılan araştırmalar ilerletilmiştir.

Son olarak, yapılan tasarım çalışmaları neticesinde elde edilen bacak modelinin

geçerliliğini değerlendirebilmek için modele ait ilk örnek imalatı yapılmıştır. İlk örnek modeli ile elde edilen deney düzeneğinde, mevcut kaynakların daha verimli kullanılabilmesi için yapılan tasarım çalışmalarına uygun halihazırda mevcut olan donanımlar kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile imalatı gerçekleştirilen deney düzeneğinden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiştir.

9.1. Tez Çalışması Sonucunda Elde Edilen Çıktılar

Bu tez çalışması ile geniş uygulanma alanlarında konvansiyonel mobil robotların yerine kullanılacak, ve özellikle bilimsel amaçlı kontrol teorisi, dört ayaklı dinamik ve statik yürüyüş tipleri ve şablonları, ayaklı robotların adım atma çevrimleri ve adım evreleri arası geçişleri, ayaklı robotlarda denge gibi konuların araştırılmasında ve geliştirilmesinde kullanılacak yetenekte ve beceride hidrolik tahrikli dört ayaklı bir robot geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, yukarıda da bahsedilen, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ile elde edilen çıktılar ve Bölüm 1.3’de belirtilen tez çalışmasının nihai hedefleri karşılaştırmalı bir şekilde Tablo 9.1’de listelenmiştir.

Bunun yanında, yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki listede özetlenmiştir;

- Topoloji optimizasyonu ve tasarım çalışmaları neticesinde, bacak modelinin ağırlığı yaklaşık 2,4 kg azaltılmıştır. Yani, ilk bacak modelinin kütlesi gözönüne alındığında yaklaşık %28’lik bir azalma söz konusudur.
- Yapılan mekanizma optimizasyonu çalışmaları sonucunda, önceden tanımlı bir yörüngeyi sıfır hata ile takip edebilen mekanizma ölçüleri evrimsel bir yaklaşımla elde edilmiştir, ayrıca kuvvet iletim optimizasyonu yapıldığında kuvvet iletim açısının ortalama %1,2 daha iyi olduğu görülmüştür.
- Bu bağlamda yapılan optimizasyon çalışmalarının enerji verimliliğine etkisini ise $F_{cyl} = m \sin(\mu_c) \frac{\Delta v_{cp}}{\Delta t}$ bağıntısı ile hesapladığımızda, ilk bacak versiyonuna göre toplam verimlilik topoloji optimizasyonu ile yaklaşık %28, kuvvet iletim optimizasyonu ile yaklaşık %1,2, toplamda ise yaklaşık %30 artırmıştır.
- 250 bar çalışma basıncında yaklaşık 3500 N genliğinde bir kuvvet üretebilecek hidrolik eyleyici tasarımı yapılmıştır.
- Elektrohidrolik yön valfi tanınması optimizasyon temelli gri kutu yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Toplamda 26 iterasyon ve 249 fonksiyon değerlendirmesi gibi oldukça kısa bir sürede, veri sayfasındaki bilgilere göre yaklaşık %0.006 olan kabul

Tablo 9.1. Tez çalışmasının nihai hedefleri ve elde edilen çıktılarının karşılaştırılması.

Amaçlanan Hedefler	Elde Edilen Çıktılar
<ul style="list-style-type: none"> ■ Dört ayaklı bir robotta kullanılmak üzere iki serbestlik dereceli hidrolik tahrikli bir robot bacağı tasarımının yapılması. 	<p>↔</p> <p>★ Yapılan tasarım çalışmaları neticesinde, 50 kg yük taşıma kapasitesi ile toplamda 200 kg ağırlığa kadar ve gövde yüksekliği yaklaşık 0,6 m olan dört ayaklı bir robotta kullanılacak hidrolik tahrikli, eyleyiciler ile birlikte yaklaşık 8 kg ağırlığında, yüksek hareket kabiliyetine imkan veren çalışma uzayına sahip ve iyileştirilmiş sağlıklı-ağırlık oranına sahip iki serbestlik dereceli bir robot bacak modeli elde edilmiş ve ilk örnek imalatı gerçekleştirilmiştir.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ■ Tasarımı yapılan robot bacağın konum kontrolü için farklı yapılarda ve farklı algoritmalarda çeşitli kontrolcüler tasarlanarak performanslarının karşılaştırılması. 	<p>↔</p> <p>★ Yapılan kontrolcü tasarımı çalışmaları neticesinde, yüksek derecede doğrusal olmayan davranış sergileyen bir sistem olan hidrolik tahrikli iki serbestlik dereceli bacak modelinin konum kontrolü için sistemin doğrusal olmayan davranışları ile başa çıkabilecek BM tabanlı kendinden kazanç ayarlamalı kontrolcüler elde edilmiştir. Aynı zamanda PID kontrolcülerin böyle bir sistemin konum kontrolünde tek başına yetersiz olduğu gösterilmiştir.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ■ Tasarımı yapılan robot bacak için özel olarak hidrolik eyleyici tasarımı ve hidrolik güç ünitesi bileşenlerinin sistem tanılmasının yapılması. 	<p>↔</p> <p>★ Yapılan hidrolik eyleyici tasarımı çalışmaları neticesinde, yüksek hareket kabiliyetine sahip toplamda 200 kg ağırlığa sahip dört ayaklı bir robotun yer düzleminden yaklaşık 0,15 m yüksekliğe (gövde yüksekliği olarak yaklaşık 0,85 m) sıçrayabilmesi için gerekli ivmelenmeyi sağlayabilecek yaklaşık 3500 N genliğinde bir kuvvet altında çalışabilecek hidrolik eyleyici tasarımı ve modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, hidrolik güç ünitesinde akışı kontrol etmek için kullanılan elektrohidrolik yön valfinin dinamik özelliklerinin optimizasyon temelli bir yaklaşımla elde edilebileceği gösterilmiştir.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ■ Robot bacağın gerçek zamanlı konum kontrolü ve yine gerçek zamanlı veri okuma için bir yazılım geliştirilmesi. 	<p>↔</p> <p>★ Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, hidrolik sistem basıncının ve elektrohidrolik yön valfinin gerçek zamanlı kontrolünü sağlayan ve aynı zamanda gerçek zamanlı açısal konumların ve hidrolik eyleyici basınçlarının ölçülebilmesi için Labview tabanlı bir yazılım geliştirilmiştir.</p>

edilebilir bir frekans cevabı hata payı ve yine yaklaşık %2 olan kabul edilebilir bir akış cevabı hata payı ile benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere valfin doğrusal bir modeli elde edilmiştir.

- 50 kg yük taşıyan 6,12 kg ağırlığındaki bacak modelinin yapısal analizi gerçekleştirilmiş ve maksimum von Misses gerilmesinin alt uzuv silindir bağlantı parçasında $103,5 \text{ N/mm}^2$ (MPa) olarak meydana geldiği hesaplanmıştır. Bu değer, kullanılan malzemenin 505 MPa olan akma mukavemetinden oldukça düşüktür.

- Yine, 50 kg yük taşıyan 6,12 kg ağırlığındaki bacak modelinin 0,05 sn'lik bir süre ile yerle temasının kesildiği ve 0,03 m'lik bir dikey yüksekliğe ulaştığı sıçrama hareketi sırasında yapısal analizi gerçekleştirilmiş ve maksimum von Misses gerilmesinin sabit uzuv silindir ana bağlantı parçasında meydana geldiği görülmüş ve maksimum eşdeğer gerinim 0,067 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, yapısal analizin en uç durum olan yük ile sıçrama hareketi için yapıldığı gözönüne alındığında kabul edilebilir bir değer olduğu söylenebilir.
- Gövde yüksekliğinin yaklaşık 0.1 m üzerine çıkmasına izin veren ve yatayda yaklaşık 0,8 m hareket alanı bulunan çalışma uzayına sahip bir bacak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı 0,15 m yüksekliğe sıçramasına müsade edecek şekilde yapılan bacak modelinin dört ayaklı bir robotta kullanılması durumunda, bu çalışma uzayı ve kinematik yapılandırması ile yüksek hareket kabiliyeti olarak değerlendirilen koşma, zıplama-sıçrama, engelleri aşma, kendi kendini dengeleme gibi hareketlerin yapılabilmesine imkan verecektir.
- Kontrolcü tasarımı kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları neticesinde, PID kontrolcü kazançları iyileştirilerek, %12,97 ve %0,516 olan maksimum aşma oranı her iki uzuv için tamamen giderilmiş, oturma zamanı ise 1. uzuv için yaklaşık %50, 2. uzuv için ise %30 azaltılmıştır.
- PID kontrolcü tabanlı kendinden uyarlamalı Bulanık PD+I kontrolcü tasarımı yapılarak, hatanın büyük olduğu durumlarda PID kontrolcü ile eşdeğer ancak hatanın küçüldüğü durumlarda daha agresif davranan bir kontrolcü elde edilmiştir. Bu sayede, farklı referans girişlere karşı PID kontrolcüye göre daha iyi performans gösteren bir kontrolcü elde edilmiş ve 1. uzuv için kalıcı durum hatası tamamen giderilmiş, 2. uzuv için maksimum aşma yaklaşık %30 azaltılmıştır.
- Kontrolcü tasarım çalışmasının son aşaması olarak, Bulanık PD+I kontrolcü verileri kullanılarak ANFIS eğitimi gerçekleştirilmiş ve yine farklı referans girişler için 2. uzuv için maksimum aşma tamamen, her iki uzuv için kalıcı durum hatası tamamen giderilmiştir.
- İlk örnek imalatı gerçekleştirilmiş ve deney düzeneği oluşturulmuştur. Kullanılan bileşenler tanıtılmış ve ilk örnek başarımı hem tasarım anlamında hem de kontrolcü performansı anlamında değerlendirilerek, bileşen performansları tartışılmıştır.
- İlk örnek deney düzeneği ile eklemlerin açılma konum kontrolü, ayak ucunun konum

ve yörünge takibi kontrolü çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda optimize edilmiş PID kontrolcüler kullanılmıştır ve yaklaşık 0,2 saniyelik bir gecikme ile referans yörünge takibini gerçekleştirebilmiştir. Ancak hidrolik bileşenlerin performansı kontrolcü performansını olumsuz etkilediği tespit edilmiş, bunun yanında tek başına konum kontrolünün yetersiz olduğu gözlemlenmiştir.

- Son olarak, ilk örnek modelinin, giriş yön valfi voltajı çıkış açısal konumlar olacak şekilde yön valfi de dahil olmak üzere tam bir dinamik modeli elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasının çıktıları ayaklı robot geliştirme çalışmalarına; mekanik tasarım, kontrolcü tasarımı, kontrol metodolojisi, kullanılacak eyleyici ve ölçme elemanlarının tasarımı yönünden önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca elde edilen bilgi birikimi ve tecrübe yaygın robot tasarımı ve kontrolü ile ilgili çalışmalara da önemli katkılar yapacaktır. Bu yüzden, gerçekleştirilen araştırmalar ve elde edilen sonuçlar ile bu tez çalışmasının, ileride *–özellikle ayaklı robotlar alanında–* yapılacak birçok bilimsel çalışmada yararlanılan ve başvurulacak bir kaynak olması beklenmektedir.

9.2. Öneriler ve Gelecekteki Çalışmalar

Bu tez çalışması kapsamında dört ayaklı hidrolik tahrikli bir robot modellenmesi ve uygulamasına yönelik yapılan araştırmalar ve elde edilen sonuçlar, gelecekte imalatı ve kontrolü gerçekleştirilecek olan hidrolik tahrikli dört ayaklı bir robotun temelini ve ön çalışmasını oluşturmaktadır. Bu konuda ülkemizde henüz göze çarpan bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, ayaklı robot teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar, özgün savunma sanayi ürünlerine sahip olma çabası içindeki ülkemiz için stratejik öneme sahip bir konudur. Ülkemizde yeni olan bu konuda, Bölüm 9.1’de belirtilen literatüre sağlanan katkılarının yanı sıra bu tez çalışması ile atılacak temeller ve elde edilecek bilgi birikimi farklı ürünler ve teknolojiler üretilmesine öncülük edebilecektir. Bu ürünlerin ticarileşmesi ise ülkemize çok yüksek katma değer ve ihracat potansiyeli sağlayabilecektir.

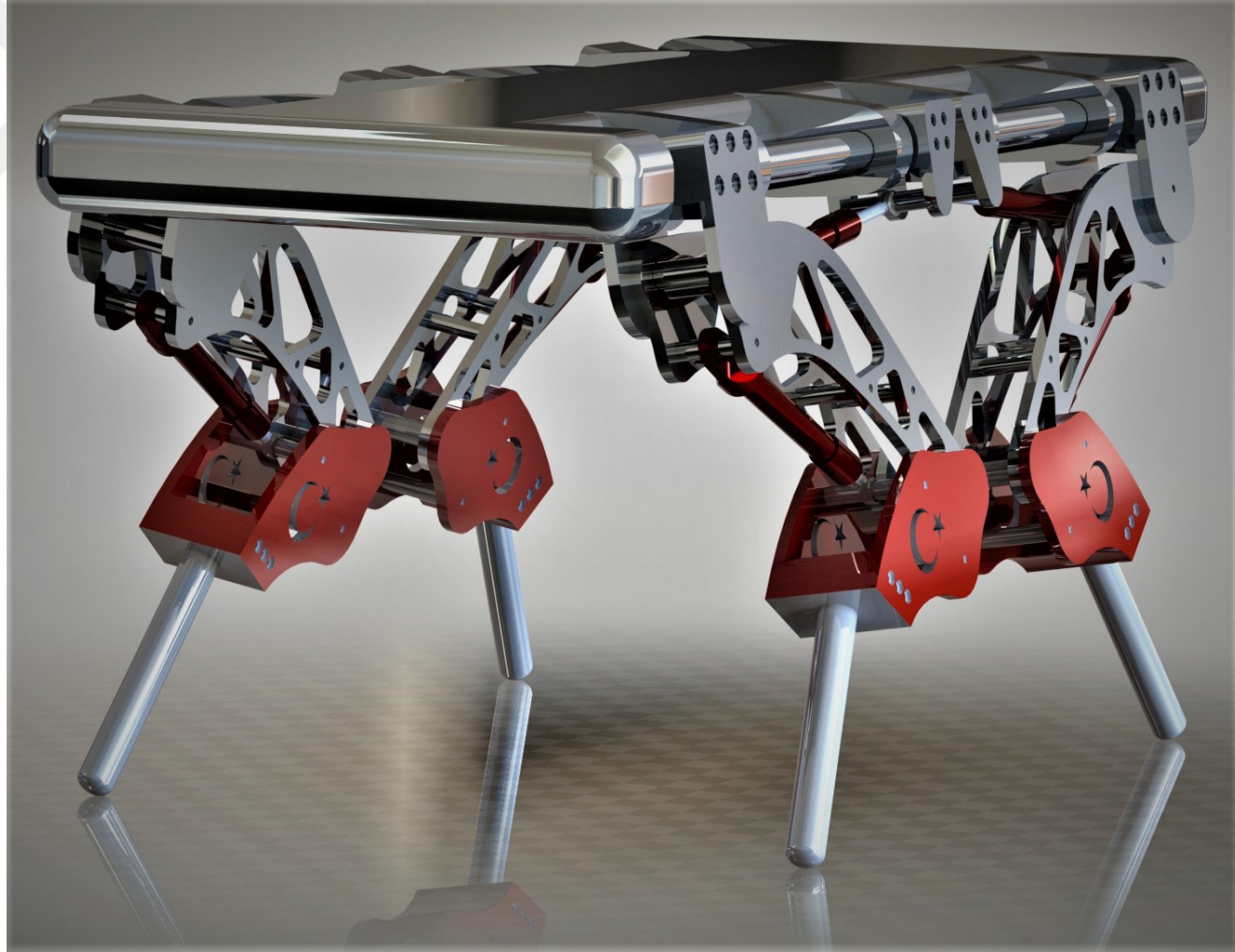
Şekil 9.1’de robot bacak modelinin kullanıldığı dört ayaklı bir robot konsepti gösterilmektedir. Bu çalışma, bu konseptte bir robot geliştirmeye yönelik yapılacak araştırma–geliştirme çalışmalarının ilk basamağıdır. Herhangi bir robotik sistem geliştirilmesi için farklı tasarım alanlarının (mekanik, elektrik–elektronik ve yazılım vd.) başarılı bir şekilde çok karmaşık bir sistemde toplanması gerektiği ve bu bağlamda robotik alanının disiplinler arası bir alanı temsil ettiği düşünüldüğünde, dinamik yürüyüşü dengeli ve kararlı bir şekilde gerçekleştirebilme becerisine sahip hidrolik tahrikli dört ayaklı bir robot geliştirilmesi ile

çalışmanın çok yönlülüğü sayesinde birçok disiplin alanına katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda, dört ayaklı bir robotun imalatının sadece ilk basamağı olan bu tez çalışmasının çıktılarında biri olan enerji verimliliği bağlamında iyileştirilmiş bacak modeli ile dört ayaklı bir robotun en önemli bileşeni tamamlanmıştır ve gelecekteki araştırmalar için çok çeşitli araştırma alanları açılmıştır. Bu araştırma alanlarından gelecekte dört ayaklı bir robotun imalatına yönelik gerçekleştirilecek çalışmalar aşağıda listelenmiştir;

- ▶ Bu tez çalışması kapsamında elde edilen robot bacağına ait deney düzeneği ile kuvvet kontrolü problemine çözüm aramak.
 - Tez çalışması sonucunda halihazırda elde edilen konum kontrolünün çözümünün tek başına yetersiz olmasından hareketle kuvvet kontrolüne yönelik empedans kontrol, hesaplamalı tork kontrol, model tabanlı tahmine dayalı kontrol gibi yaklaşımların incelenmesi.
- ▶ Bu tez çalışması kapsamında elde edilen robot bacağına ait deney düzeneği ile bütünleşik hidrolik güç kaynağı tasarımına odaklanılarak testler gerçekleştirmek ve güç kaynağı boyutunu ve ağırlığını azaltmaya yönelik çalışmalar yapmak.
 - Mevcut hidrolik güç kaynağının tasarımı yapılan dört ayaklı bir robotta bütünleşik olarak kullanılamayacak olması gerçeğinden hareketle, robotun gövde tasarımı ile eşzamanlı bütünleşik hidrolik güç kaynağı tasarımı çalışmalarının yapılması.
- ▶ Bu tez çalışması kapsamında önerilen dört ayaklı hidrolik tahrikli robot konseptinin imalatına yönelik çalışmalar yaparak ilk örnek üretimini ve geçerli kılma testlerini yapmak.
 - Tez çalışması sonucunda halihazırda elde edilen bacak modelinin geliştirilmeye devam edilmesi ve bu bacak modelinin kullanılacağı bir robot tasarımı için robot gövde tasarım çalışmalarının yapılması.
- ▶ Dört ayaklı dinamik ve statik yürüyüş tipleri ve şablonları, ayaklı robotların adım atma çevrimleri ve adım evreleri arası geçişleri, ayaklı robotlarda denge gibi konuların araştırılması ve geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapmak.
 - Tez çalışması sonucunda halihazırda elde edilen benzetim modeli kullanılarak dört ayaklı bir robotun benzetim modelinin oluşturulması ve bilgisayar destekli mühendislik programları kullanılarak yukarıda bahsedilen ayaklı hareket konularının araştırılması.

Bu çalışmanın, kendini dengeleme kabiliyeti, yüksek hareketlilik ve yüksek enerji verimliliği gibi çok yönlülük bağlamında dört ayaklı bir robotun temel bileşeni olan bacak mekanizmasını sıfırdan tasarlamak ve optimize etmek için gerekli olan temel yöntem ve stratejilerin belirlenmesine katkıda bulunması beklenmektedir. Buna ek olarak, bu çalışmanın, robotik alanında kontrolcü tasarımı, mekanizma tasarımı ve optimizasyonu, dört ayaklı yürüyüş gibi konuların daha iyi anlaşılmasını sağlayacağı ve aynı zamanda dört bacaklı robotlarla ilgili gelecekteki çalışmaları aydınlatacağı öngörülmektedir.





Şekil 9.1. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen, ilk örnek imalatı yapılan ve son olarak deneysel çalışmalar ile başarımı doğrulanan robot bacak modelinin kullanıldığı dört ayaklı bir robot konsepti.

KAYNAKLAR

- Adolf, E., 1926, Vehicle propelled by steppers., US Patent US1691233A. (Atıf Yapılan Sayfa 11)
- Al-Baali, M., Spedicato, E., ve Maggioni, F., 2014, Broyden's quasi-Newton methods for a nonlinear system of equations and unconstrained optimization: a review and open problems, *Optimization Methods and Software*, 29 (5), 937–954. (Atıf Yapılan Sayfa 139)
- ANSYS® Mechanical, Release 19.1, 2019, *Help System, Topology Optimization Analysis, Mechanical User's Guide*, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 113)
- ANSYS® Workbench, Release 19.1, 2019, *Help System, DesignXplorer Theory, DesignXplorer User's Guide*, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 113)
- Arikawa, K. ve Hirose, S., 1996, Development of quadruped walking robot TITAN–VIII, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, s. 208–214. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Åström, K. ve Hägglund, T., 1995, Pid controllers: theory, design, and tuning, *ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society*, Research Triangle Park, NC, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 155)
- Åström, K. ve Hägglund, T., 2004, Revisiting the ziegler–nichols step response method for pid control, *Journal of Process Control*, 14 (6), 635 – 650. (Atıf Yapılan Sayfa 155)
- Åström, K. ve Hägglund, T., 2006a, Advanced pid control, *ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society*, Research Triangle Park, NC, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 155)
- Åström, K. ve Hägglund, T., 2006b, Replacing the Ziegler-Nichols Tuning Rules., *Advanced PID Control, ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society*, Research Triangle Park, NC, USA, s. 233–270. (Atıf Yapılan Sayfa 155)
- Åström, K. ve Hägglund, T., 2006c, Ziegler-Nichols' and Related Methods., *Advanced PID Control, ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society*, Research Triangle Park, NC, USA, s. 167–176. (Atıf Yapılan Sayfa 155)
- Bäck, T., Fogel, D. B., ve Michalewicz, Z., 1997, *Handbook of Evolutionary Computation*, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 94)
- Bae, H. ve Oh, J.-H., 2018, Biped robot state estimation using compliant inverted pendulum model, *Robotics and Autonomous Systems*, 108, 38–50. (Atıf Yapılan Sayfa 26)
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2016a, Adaptive neural-network based

- fuzzy logic (ANFIS) based trajectory controller design for one leg of a quadruped robot, *Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering*, s. 82–85, Venice, Italy. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2016b, Optimization of PID controller based on The Bees Algorithm for one leg of a quadruped robot, *MATEC Web of Conferences*, 42, 03004. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2017, Obtaining dynamic characteristics of electrohydraulic servo systems case study of Parker D1FP proportional valve, *Proceedings of the International Conference on Engineering Technologies*, s. 662–668, Konya, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2018, Motion Analysis of the Robotic Leg Mass Centre during Reference Trajectory Tracking, *Proceedings of the 2nd International Vocational Science Symposium*, Antalya, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Barasuol, V., Buchli, J., Semini, C., Frigerio, M., De Pieri, E. R., ve Caldwell, D. G., 2013, A reactive controller framework for quadrupedal locomotion on challenging terrain, *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, s. 2554–2561. (Atıf Yapılan Sayfa 38)
- Barbosa, B. H., Aguirre, L. A., Martinez, C. B., ve Braga, A. P., 2011, Black and gray-box identification of a hydraulic pumping system, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19 (2), 398–406. (Atıf Yapılan Sayfa 134)
- Battaglia, R. F., 1999, Design of the SCOUT II Quadruped with Preliminary Stair-Climbing, Master of engineering, *McGill University*. (Atıf Yapılan Sayfa 33)
- Bazeille, S., Barasuol, V., Focchi, M., Havoutis, I., Frigerio, M., Buchli, J., Caldwell, D. G., ve Semini, C., 2014, Quadruped robot trotting over irregular terrain assisted by stereo-vision, *Intelligent Service Robotics*, 7 (2), 67–77. (Atıf Yapılan Sayfa 38)
- Bekey, G. A., 2005, Autonomous robots: From biological inspiration to implementation and control, Intelligent Robotics and Autonomous Agents. *MIT Press*. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Bekker, M. G., 1962a, Land locomotion on the surface of planets, *ARS journal*, 32 (11), 1651–1659. (Atıf Yapılan Sayfa 13)
- Bekker, M. G., 1962b, Mechanics of off-the-road locomotion, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division*, 16 (1), 25–44. (Atıf Yapılan Sayfa 13)
- Bekker, M. G., 1964, Mechanics of locomotion and lunar surface vehicle concepts, *SAE Technical Paper 640049*. (Atıf Yapılan Sayfa 13)
- Bekker, M. G., 1966, Off-road locomotion on the moon and on earth, *Journal of*

Terramechanics, 3 (3), 83–91. (Atıf Yapılan Sayfa 13)

- Bellicoso, C. D., Bjelonic, M., Wellhausen, L., Holtmann, K., Günther, F., Tranzatto, M., Fankhauser, P., ve Hutter, M., 2018a, Advances in real-world applications for legged robots, *Journal of Field Robotics*, 35 (8), 1311–1326. (Atıf Yapılan Sayfa 39, 42)
- Bellicoso, C. D., Jenelten, F., Gehring, C., ve Hutter, M., 2018b, Dynamic Locomotion Through Online Nonlinear Motion Optimization for Quadrupedal Robots, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3 (3), 2261–2268. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Belo, F. A. W., Birk, A., Brunskill, C., Kirchner, F., Lappas, V., Remy, C. D., Roccella, S., Rossi, C., Tikanmäki, A., ve Visentin, G., 2012, The esa lunar robotics challenge: Simulating operations at the lunar south pole, *Journal of Field Robotics*, 29 (4), 601–626. (Atıf Yapılan Sayfa 40)
- Bendsøe, M. P. ve Sigmund, O., 2004, Topology optimization by distribution of isotropic material, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s. 1–69. (Atıf Yapılan Sayfa 111)
- Bezerra, C. A. D. ve Zampieri, D. E., 2004, Biped robots: The state of art, *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*, s. 371–389, Dordrecht. Springer Netherlands. (Atıf Yapılan Sayfa 27)
- Boaventura, T., Buchli, J., Semini, C., ve Caldwell, D. G., 2015, Model-Based Hydraulic Impedance Control for Dynamic Robots, *IEEE Transactions on Robotics*, 31 (6), 1324–1336. (Atıf Yapılan Sayfa 38)
- Boaventura, T., Focchi, M., Frigerio, M., Buchli, J., Semini, C., Medrano-Cerda, G. A., ve Caldwell, D. G., 2012, On the role of load motion compensation in high-performance force control, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 4066–4071. (Atıf Yapılan Sayfa 38, 161)
- Boole, G., 1854, An investigation of the laws of thought: On which are founded the mathematical theories of logic and probabilities, Cambridge Library Collection - Mathematics. *Cambridge University Press*, Shaftesbury Road, Cambridge, United Kingdom. (Atıf Yapılan Sayfa 162)
- Buchli, J., Righetti, L., ve Ijspeert, A. J., 2006, Engineering entrainment and adaptation in limit cycle systems, *Biological Cybernetics*, 95 (6), 645. (Atıf Yapılan Sayfa 228)
- Buehler, M., Battaglia, R., Cocosco, A., Hawker, G., Sarkis, J., ve Yamazaki, K., 1998, SCOUT: a simple quadruped that walks, climbs, and runs, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, s. 1707–1712. (Atıf Yapılan Sayfa 33, 34)
- Buehler, M., Cocosco, A., Yamazaki, K., ve Battaglia, R., 1999, Stable open loop walking in quadruped robots with stick legs, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s. 2348–2353. (Atıf Yapılan Sayfa 33)

- Buttner, T., Roennau, A., Heppner, G., Pfozter, L., ve Dillmann, R., 2016, Bio-inspired optimization of kinematic models for multi-legged walking robots, *International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, s. 430–435. (Atıf Yapılan Sayfa 56)
- Byrd, R. H., Gilbert, J. C., ve Nocedal, J., 2000, A trust region method based on interior point techniques for nonlinear programming, *Mathematical Programming*, 89 (1), 149–185. (Atıf Yapılan Sayfa 139)
- Cavallo, A., De Maria, G., Natale, C., ve Pirozzi, S., 2007, Gray-box identification of continuous-time models of flexible structures, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15 (5 SPEC. ISS.), 967–981. (Atıf Yapılan Sayfa 134)
- Cayless, R., 1990, Alloy and temper designation systems for aluminum and aluminum alloys, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, Noveltı, OH, USA, s. 15–28. (Atıf Yapılan Sayfa 110)
- Chestnutt, J., Lau, M., Cheung, G., Kuffner, J., Hodgins, J., ve Kanade, T., 2005, Footstep planning for the honda asimo humanoid, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s. 629–634. (Atıf Yapılan Sayfa 3)
- Chien, K. L., Hrones, J. A., ve Reswick, J. B., 1972, On the automatic control of generalized passive systems, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 74, 175–185. (Atıf Yapılan Sayfa 155)
- Christian, D. A., 1993, The Mt. Erebus explorer control system, Technical Report CMU-RI-TR-93-19, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Conn, A. R., Gould, N. I. M., ve Toint, P. L., 1991, A Globally Convergent Augmented Lagrangian Algorithm for Optimization with General Constraints and Simple Bounds, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 28 (2), 545–572. (Atıf Yapılan Sayfa 98)
- de Santos, P. G., Garcia, E., ve Estremera, J., 2006a, Quadrupedal locomotion: An introduction to the control of four-legged robots, *Springer London*, London. (Atıf Yapılan Sayfa 43)
- de Santos, P. G., Garcia, E., ve Estremera, J., 2006b, Walking robots, Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots, *Springer London*, London, s. 3–32. (Atıf Yapılan Sayfa 12, 22, 42)
- Deb, K., 2000, An efficient constraint handling method for genetic algorithms, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 186 (2-4), 311–338. (Atıf Yapılan Sayfa 96)
- Deticek, E., 2000, A Fuzzy Self-Learning Position Control Of Hydraulic Drive, *Cybernetics and Systems*, 31 (8), 821–836. (Atıf Yapılan Sayfa 161)

- Devjanin, E. A., Gurfinkel, V. S., Gurfinkel, E. V., Kartashev, V. A., Lensky, A. V., Shneider, A. Y., ve Shtilman, L. G., 1983, The six-legged walking robot capable of terrain adaptation, *Mechanism and Machine Theory*, 18 (4), 257–260. (Atıf Yapılan Sayfa 21)
- Drederick, Z. P. ve Grass, I., 1868, Improvement in steam-carriage., US Patent US75874A. (Atıf Yapılan Sayfa 11)
- Dubois, D. ve Prade, H., 1980, Chapter 3 - fuzzy relations, *Fuzzy Sets and Systems*, volume 144 of *Mathematics in Science and Engineering*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, s. 68 – 94. (Atıf Yapılan Sayfa 163)
- Eckert, J. P. ve Mauchly, J. W., 1947, Electronic numerical integrator and computer., US Patent US3120606A. (Atıf Yapılan Sayfa 12)
- Edward, S., 1944, Reciprocating load carrier., US Patent US2430537A. (Atıf Yapılan Sayfa 11)
- Fahmy, A. A., Kalyoncu, M., ve Castellani, M., 2012, Automatic design of control systems for robot manipulators using the bees algorithm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 226 (4), 497–508. (Atıf Yapılan Sayfa 157)
- Fankhauser, P., 2018, Perceptive locomotion for legged robots in rough terrain, Doktora Tezi, *ETH Zurich*. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Fankhauser, P. ve Hutter, M., 2018, ANYmal: A Unique Quadruped Robot Conquering Harsh Environments, *Research Features*, 126, 54–57. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Feng, S., Xinjilefu, X., Atkeson, C. G., ve Kim, J., 2015, Optimization based controller design and implementation for the atlas robot in the darpa robotics challenge finals, *IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, s. 1028–1035. (Atıf Yapılan Sayfa 29)
- Fisler, J., 2008, Maximum high jump with a robotic leg, Msc thesis, *ETH Zurich*. (Atıf Yapılan Sayfa 39)
- Focchi, M., Boaventura, T., Semini, C., Frigerio, M., Buchli, J., ve Caldwell, D. G., 2012, Torque-control based compliant actuation of a quadruped robot, *International Workshop on Advanced Motion Control*, s. 1–6, Sarajevo, Bosnia-Herzegovina. (Atıf Yapılan Sayfa 37)
- Frank, A. A., 1968, Automatic control systems for legged locomotion machines, Doktora Tezi, *University of Southern California*. (Atıf Yapılan Sayfa 18)
- Frank, A. A., 1970, An approach to the dynamic analysis and synthesis of biped locomotion machines, *Medical & Biological Engineering*, 8 (5), 465–476. (Atıf Yapılan Sayfa 26)

- Frank, A. A. ve Mcghee, R. B., 1969, Some considerations relating to the design of autopilots for legged vehicles, *Journal of Terramechanics*, 6 (1), 23–35. (Atıf Yapılan Sayfa 18)
- Frank, A. A. ve Vukobratović, M., 1969, On the synthesis of biped locomotion machines, *Proceedings of 8th International Conference on Medical and Biological Engineering, Evanston, IL*, s. 64. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Frank, A. A. ve Vukobratović, M., 1970, On the gait stability of biped machines, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 15 (6), 678–679. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Fukui, T., Fujisawa, H., Otaka, K., ve Fukuoka, Y., 2019, Autonomous gait transition and galloping over unperceived obstacles of a quadruped robot with cpg modulated by vestibular feedback, *Robotics and Autonomous Systems*, 111, 1 – 19. (Atıf Yapılan Sayfa 229)
- Fukuoka, Y., Katabuchi, H., , ve Kimura, H., 2010, Dynamic locomotion of quadrupeds tekken3&4 using simple navigation, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 22 (1), 36–42. (Atıf Yapılan Sayfa 35)
- Gehring, C., Bellicoso, C. D., Coros, S., Bloesch, M., Fankhauser, P., Hutter, M., ve Siegwart, R., 2015, Dynamic trotting on slopes for quadrupedal robots, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, s. 5129–5135. (Atıf Yapılan Sayfa 41)
- Gehring, C., Coros, S., Hutter, M., Bloesch, M., Fankhauser, P., Hoepflinger, M. A., ve Siegwart, R., 2014, Towards automatic discovery of agile gaits for quadrupedal robots, *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, s. 4243–4248. (Atıf Yapılan Sayfa 40)
- Gehring, C., Coros, S., Hutter, M., Dario Bellicoso, C., Heijnen, H., Diethelm, R., Bloesch, M., Fankhauser, P., Hwangbo, J., Hoepflinger, M., ve Siegwart, R., 2016, Practice Makes Perfect: An Optimization-Based Approach to Controlling Agile Motions for a Quadruped Robot, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 23 (1), 34–43. (Atıf Yapılan Sayfa 41)
- Gubina, F., Hemaml, H., ve Mcghee, R. B., 1974, On the dynamic stability of biped locomotion, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-21 (2), 102–108. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Gurfinkel, V. S., Gurfinkel, E. V., Shneider, A. Y., Devjanin, E. A., Lensky, A. V., ve Shtilman, L. G., 1981, Walking robot with supervisory control, *Mechanism and Machine Theory*, 16 (1), 31–36. (Atıf Yapılan Sayfa 21)
- Hashimoto, K., Takezaki, Y., Motohashi, H., Otani, T., Kishi, T., Lim, H. O., ve Takanishi, A., 2012, Biped walking stabilization based on gait analysis, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s. 154–159. (Atıf Yapılan Sayfa 27)

- Havoutis, I., Ortiz, J., Bazeille, S., Barasuol, V., Semini, C., ve Caldwell, D. G., 2013a, Onboard perception-based trotting and crawling with the Hydraulic Quadruped Robot (HyQ), *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 6052–6057. (Atıf Yapılan Sayfa 38)
- Havoutis, I., Semini, C., Buchli, J., ve Caldwell, D. G., 2013b, Quadrupedal trotting with active compliance, *Proceedings of the International Conference on Mechatronics*, s. 610–616. (Atıf Yapılan Sayfa 38)
- Hemami, H. ve Golliday, C. L., 1977, The inverted pendulum and biped stability, *Mathematical Biosciences*, 34 (1-2), 95–110. (Atıf Yapılan Sayfa 26)
- Higdon, D. T. ve Cannon, R. H., 1963, On the control of unstable multiple-output mechanical systems, *ASME Winter Annual Meeting*. (Atıf Yapılan Sayfa 26)
- Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., ve Takenaka, T., 1998, The development of honda humanoid robot, *Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, s. 1321–1326. (Atıf Yapılan Sayfa 3)
- Hirose, S., 1984, A study of design and control of a quadruped walking vehicle, *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2), 113–133. (Atıf Yapılan Sayfa 22)
- Hirose, S., 1985, TITAN–III: A quadruped walking vehicle – its structure and basic characteristics, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Robotics Research*, s. 325–331. The MIT Press. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Hirose, S., 2001, Super mechano-system: New perspective for versatile robotic system, *Experimental Robotics VII, Springer Berlin Heidelberg*, Berlin, Heidelberg, s. 249–258. (Atıf Yapılan Sayfa 22)
- Hirose, S. ve Arikawa, K., 1999, Development of quadruped walking robot TITAN–VIII for commercially available research platform, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 17, 1191–1197. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Hirose, S. ve Arikawa, K., 2001, Coupled and decoupled actuation of robotic mechanisms, *Advanced Robotics*, 15 (2), 125–138. (Atıf Yapılan Sayfa 22, 23)
- Hirose, S. ve Kato, K., 2000, Study on quadruped walking robot in tokyo institute of technology–past, present and future, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, s. 414–419. (Atıf Yapılan Sayfa 22)
- Hirose, S. ve Kunieda, O., 1991, Generalized standard foot trajectory for a quadruped walking vehicle, *The International Journal of Robotics Research*, 10 (1), 3–12. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Hirose, S. ve Umetani, Y., 1978, Some considerations on a feasible walking mechanism as a terrain vehicle, *3rd CISM-IFTOMM International Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, s. 357–375. (Atıf Yapılan Sayfa 22)

- Hirose, S. ve Umetani, Y., 1981, A cartesian coordinates manipulator with articulated structure, *Proceedings of 11th International Symposium Industrial Robots*, s. 603–609. (Atıf Yapılan Sayfa 22)
- Hirose, S., Yoneda, K., Arai, K., ve Ibe, T., 1991, Design of prismatic quadruped walking vehicle TITAN–VI, *Proceedings of Fifth International Conference on Advanced Robotics, 'Robots in Unstructured Environments'*, volume 1, s. 723–728. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Hirose, S., Yoneda, K., ve Tsukagoshi, H., 1997, TITAN–VII: quadruped walking and manipulating robot on a steep slope, *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, s. 494–500. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Hodgins, J. ve Raibert, M. H., 1991, Adjusting step length for rough terrain locomotion, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7 (3), 289–298. (Atıf Yapılan Sayfa 31)
- Hodoshima, R., Doi, T., Fukuda, Y., Hirose, S., Okamoto, T., ve Mori, J., 2004, Development of TITAN–XI: a quadruped walking robot to work on slopes, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, s. 792–797. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Hodoshima, R., Fukumura, Y., Amano, H., ve Hirose, S., 2010, Development of track-changeable quadruped walking robot TITAN–X, design of leg driving mechanism and basic experiment, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 3340–3345. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Hoepflinger, M. A., Remy, C. D., Hutter, M., ve Siegwart, R., 2010, The quadruped alof and a step towards real world haptic terrain classification, *Proceedings of the 12th Mechatronics Forum Biennial International Conference*, s. 1–8. Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zurich Switzerland. (Atıf Yapılan Sayfa 40)
- Holland, J. M., 1983, Basic robotic concepts, The Blacksburg Continuing Education Series. *Indianapolis : Howard W. Sams & Company*. (Atıf Yapılan Sayfa 21)
- Huang, Q. ve Nonami, K., 2003, Humanitarian mine detecting six-legged walking robot and hybrid neuro walking control with position/force control, *Mechatronics*, 13 (8), 773–790. (Atıf Yapılan Sayfa 24)
- Hutchinson, A. C., 1967, Machines can walk, *The Chartered Mechanical Engineer*, 11, 480–484. (Atıf Yapılan Sayfa 12, 15)
- Hutter, M., 2013, Starleth & co.–design and control of legged robots with compliant actuation, Doktora Tezi, *ETH Zurich*. (Atıf Yapılan Sayfa 40, 48, 55, 56)
- Hutter, M., Gehring, C., Hopflinger, M. A., Blosch, M., ve Siegwart, R., 2014a, Toward Combining Speed, Efficiency, Versatility, and Robustness in an Autonomous Quadruped, *IEEE Transactions on Robotics*, 30 (6), 1427–1440. (Atıf Yapılan

Sayfa 40)

- Hutter, M., Gehring, C., Jud, D., Lauber, A., Bellicoso, C. D., Tsounis, V., Hwangbo, J., Bodie, K., Fankhauser, P., Bloesch, M., Diethelm, R., Bachmann, S., Melzer, A., ve Hoepflinger, M., 2016, ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 38–44. (Atif Yapılan Sayfa 41)
- Hutter, M., Gehring, C., Lauber, A., Gunther, F., Bellicoso, C. D., Tsounis, V., Fankhauser, P., Diethelm, R., Bachmann, S., Bloesch, M., Kolvenbach, H., Bjelonic, M., Isler, L., ve Meyer, K., 2017, ANYmal - toward legged robots for harsh environments, *Advanced Robotics*, 31 (17), 918–931. (Atif Yapılan Sayfa 41)
- Hutter, M., Remy, C. D., Hoepflinger, M. A., ve Siegwart, R., 2011, ScarLETH: Design and control of a planar running robot, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 562–567. (Atif Yapılan Sayfa 39)
- Hutter, M., Remy, C. D., Hoepflinger, M. A., ve Siegwart, R., 2013, Efficient and versatile locomotion with highly compliant legs, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18 (2), 449–458. (Atif Yapılan Sayfa 40)
- Hutter, M., Remy, C. D., ve Siegwart, R., 2009, Design of an articulated robotic leg with nonlinear series elastic actuation, *Mobile Robotics: Solutions and Challenges, Proceedings of the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, World Scientific*, s. 645–652. (Atif Yapılan Sayfa 39)
- Hutter, M., Sommer, H., Gehring, C., Hoepflinger, M., Bloesch, M., ve Siegwart, R., 2014b, Quadrupedal locomotion using hierarchical operational space control, *The International Journal of Robotics Research*, 33 (8), 1047–1062. (Atif Yapılan Sayfa 41)
- Ijspeert, A. J., 2008, Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review, *Neural Networks*, 21 (4), 642 – 653, *Robotics and Neuroscience*. (Atif Yapılan Sayfa 229)
- Irawan, A., Nonami, K., ve Daud, M. R., 2013, Optimal impedance control with tsk-type flc for hard shaking reduction on hydraulically driven hexapod robot, *Autonomous Control Systems and Vehicles: Intelligent Unmanned Systems, Springer Japan, Tokyo*, s. 223–236. (Atif Yapılan Sayfa 24)
- James, I., 2009, Claude Elwood Shannon 30 April 1916 — 24 February 2001, *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 55, 257–265. (Atif Yapılan Sayfa 26)
- Jang, J. . R., 1993, Anfis: adaptive-network-based fuzzy inference system, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23 (3), 665–685. (Atif Yapılan Sayfa 172, 174, 176)

- Jantzen, J., 1998, Technical report: Tuning of fuzzy pid controllers, *Technical University of Denmark, Department of Automation*, 871 (98-H), 1–22. (Atıf Yapılan Sayfa 166, 170)
- Jones, E., Dobson, A., ve Roskilly, A. P., 2000, Design of a reduced-rule self-organizing fuzzy logic controller for water hydraulic applications, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 214 (5), 371–382. (Atıf Yapılan Sayfa 161)
- Kalyoncu, M. ve Haydim, M., 2009, Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage, *Mechatronics*, 19 (6), 847–858. (Atıf Yapılan Sayfa 133, 161)
- Kaneko, M., Abe, M., Tachi, S., Nishizawa, S., Tanie, K., ve Komoriya, K., 1985a, Legged locomotion machine based on the consideration of degrees of freedom, *Theory and Practice of Robots and Manipulators: Proceedings of RoManSy '84: The Fifth CISM — IFToMM Symposium*, Springer US, Boston, MA, s. 403–410. (Atıf Yapılan Sayfa 11)
- Kaneko, M., Abe, M., ve Tanie, K., 1985b, A hexapod walking machine with decoupled freedoms, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1 (4), 183–190. (Atıf Yapılan Sayfa 11)
- Karaboga, D. ve Kaya, E., 2019, Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey, *Artificial Intelligence Review*, 52 (4), 2263–2293. (Atıf Yapılan Sayfa 172, 174)
- Kato, K. ve Hirose, S., 2000, Development of the quadruped walking robot, TITAN-IX, *Proceedings of 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, volume 1, s. 40–45. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Kilic, E., Dolen, M., Koku, A. B., Caliskan, H., ve Balkan, T., 2012, Accurate pressure prediction of a servo-valve controlled hydraulic system, *Mechatronics*, 22 (7), 997–1014. (Atıf Yapılan Sayfa 134)
- Kimura, H. ve Fukuoka, Y., 2000, Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain by Using Neural System Model, *IFAC Proceedings Volumes*, 33 (26), 585–590. (Atıf Yapılan Sayfa 34)
- Kimura, H., Fukuoka, Y., ve Cohen, A. H., 2007, Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts, *International Journal of Robotics Research*, 26 (5), 475–490. (Atıf Yapılan Sayfa 35, 229)
- Kimura, H., Fukuoka, Y., ve Katabuti, H., 2005, Mechanical design of a quadruped “tekken3&4” and navigation system using laser range sensor, *International Symposium on Robotics*, volume 36, s. 10. (Atıf Yapılan Sayfa 35, 228)
- Kimura, H., Fukuoka, Y., ve Konaga, K., 2001, Adaptive dynamic walking of a quadruped

- robot using a neural system model, *Advanced Robotics*, 15 (8), 859–878. (Atıf Yapılan Sayfa 35)
- Kimura, H., Shimoyama, I., ve Miura, H., 1989, Dynamics in the dynamic walk of a quadruped robot, *Advanced Robotics*, 4 (3), 283–301. (Atıf Yapılan Sayfa 27)
- Kitano, S., Hirose, S., Endo, G., ve Fukushima, E. F., 2013, Development of lightweight sprawling-type quadruped robot TITAN–XIII and its dynamic walking, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 6025–6030. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Kitano, S., Hirose, S., Horigome, A., ve Endo, G., 2016, TITAN–XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking, *ROBOMECH Journal*, 3 (1), 8. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Kryczka, P., Hashimoto, K., Takanishi, A., Lim, H., Kormushev, P., Tsagarakis, N., ve Caldwell, D., 2013, Walking despite the passive compliance: Techniques for using conventional pattern generators to control intrinsically compliant humanoid robots, Nature–Inspired Mobile Robotics, *World Scientific Publishing Co.*, s. 487–494. (Atıf Yapılan Sayfa 27)
- Leekwijck, W. V. ve Kerre, E. E., 1999, Defuzzification: criteria and classification, *Fuzzy Sets and Systems*, 108 (2), 159 – 178. (Atıf Yapılan Sayfa 165)
- Leger, C., 2000, Darwin2K - An Evolutionary Approach to Automated Design for Robotics, The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. *Kluwer Academic Publishers*, New York. (Atıf Yapılan Sayfa 56)
- Li, F., Liu, W., Fu, X., Bonsignori, G., Scarfogliero, U., Stefanini, C., ve Dario, P., 2012, Jumping like an insect: Design and dynamic optimization of a jumping mini robot based on bio-mimetic inspiration, *Mechatronics*, 22 (2), 167–176. (Atıf Yapılan Sayfa 45)
- Lim, H. O., Ishii, A., ve Takanishi, A., 2004, Emotion–based biped walking, *Robotica*, 22 (5), 577–586. (Atıf Yapılan Sayfa 27)
- Lim, H. O. ve Takanishi, A., 2005, Compensatory motion control for a biped walking robot, *Robotica*, 23 (1), 1–11. (Atıf Yapılan Sayfa 27)
- Lim, H. O. ve Takanishi, A., 2007, Biped walking robots created at Waseda University: WL and WABIAN family, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365 (1850), 49–64. (Atıf Yapılan Sayfa 27)
- Liston, R. A., 1963, Requirements for increased ground mobility, Technical report, Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale, PA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 13)
- Liston, R. A., 1964, Walking machines, *Journal of Terramechanics*, 1 (3), 18–31. (Atıf

Yapılan Sayfa 13)

- Liston, R. A., 1967, Correlation between predicted and actual off-road vehicle performance, Technical report, Army Tank-Automotive Center, Warren, MI, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 13)
- Liston, R. A., 1969, Walking Machine Studies and Force-Feedback Controls, Biomechanics, *Springer US*, Boston, MA, s. 51–64. (Atıf Yapılan Sayfa 14)
- Liston, R. A., 1970, Increasing vehicle agility by legs: The quadruped transporter, *Proceedings of 38th National Meeting of the Operations Research Society of America*. (Atıf Yapılan Sayfa 13)
- Liston, R. A. ve Mosher, R. S., 1968, A versatile walking truck, *Proceedings of Transportation Engineering Conference*. (Atıf Yapılan Sayfa 15)
- Liu, C., Chen, Q., ve Wang, D., 2011, Cpg-inspired workspace trajectory generation and adaptive locomotion control for quadruped robots, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 41 (3), 867–880. (Atıf Yapılan Sayfa 229)
- Lucas, E., 1891, Huitieme Recreation - La Machine a Marcher, *Recreations Mathematiques*, 4, 198–204. (Atıf Yapılan Sayfa 11)
- Ma, M. ve Wang, J., 2011, Hydraulic-actuated quadruped robot mechanism design optimization based on particle swarm optimization algorithm, *International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce*, s. 4026–4029. (Atıf Yapılan Sayfa 56)
- Mamdani, E. ve Assilian, S., 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, 7 (1), 1 – 13. (Atıf Yapılan Sayfa 165)
- Mann, M., 1960, Tanks that Walk and Jump, *Popular Science*, 177 (1), 51–54. (Atıf Yapılan Sayfa 13)
- MATLAB Optimization Toolbox™, 2019, *Optimization Toolbox™ User's Guide*, The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 99, 138)
- Matsuoka, K., 1979, A model of repetitive hopping movements in man, *Proceedings of 5th World Congress of Theory of Machines and Mechanisms*, volume 2, s. 1168–1171. (Atıf Yapılan Sayfa 28)
- Matsuoka, K., 1980, A mechanical model of repetitive hopping movements, *Biomechanisms*, 5, 251–258. (Atıf Yapılan Sayfa 28)
- Mcghee, R. B., 1967, Finite state control of quadruped locomotion, *Simulation*, 9 (3), 135–140. (Atıf Yapılan Sayfa 18)

- McGhee, R. B., 1968, Some finite state aspects of legged locomotion, *Mathematical Biosciences*, 2 (1-2), 67–84. (Atıf Yapılan Sayfa 18)
- McGhee, R. B., 1977, Control of legged locomotion systems, *Proceedings of the 18th Automatic Control Conference, San Francisco, CA, USA*, volume 38, s. 205–215. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- McGhee, R. B., 1979, Mathematical models for dynamics and control of posture and gait, *Proceedings of the VII International Congress of Biomechanics, Warsaw, Poland*, s. 18–22. (Atıf Yapılan Sayfa 20)
- McGhee, R. B. ve Frank, A. A., 1968, On the stability properties of quadruped creeping gaits, *Mathematical Biosciences*, 3 (1-2), 331–351. (Atıf Yapılan Sayfa 18)
- McGhee, R. B. ve Iswandhi, G. I., 1979, Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9 (4), 176–182. (Atıf Yapılan Sayfa 20)
- McGhee, R. B. ve Jain, A. K., 1972, Some properties of regularly realizable gait matrices, *Mathematical Biosciences*, 13 (1-2), 179–193. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- McGhee, R. B., Koozekanani, S., Weimer, F., ve Rahmani, S., 1979, Dynamic modelling of human locomotion, *Proceedings of the Joint Automatic Control Conference*, 16, 405–413. (Atıf Yapılan Sayfa 20)
- McGhee, R. B., Olson, K., ve Briggs, R., 1980, Electronic coordination of joint motions for terrain - adaptive robot vehicles, *SAE Technical Papers*. (Atıf Yapılan Sayfa 20)
- McGhee, R. B. ve Pai, A. L., 1974, An approach to computer control for legged vehicles, *Journal of Terramechanics*, 11 (1), 9–27. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Mercere, G., Prot, O., ve Ramos, J. A., 2014, Identification of parameterized gray-box state-space systems: From a black-box linear time-invariant representation to a structured one, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59 (11), 2873–2885. (Atıf Yapılan Sayfa 134)
- Mitchell, M., 1998, An introduction to genetic algorithms, *MIT Press*, Cambridge, MA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 93, 94)
- Miura, H. ve Shimoyama, I., 1984, Dynamic Walk of a Biped, *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2), 60–74. (Atıf Yapılan Sayfa 26, 27)
- Morrison, R. A., 1968, Iron mule train, *Proceedings of Off Road Mobility Research Symposium*, s. 381–400. (Atıf Yapılan Sayfa 16)
- Mosher, R. S., 1968a, Handyman to hardiman, *SAE Transactions*, 76, 588–597. (Atıf Yapılan Sayfa 14, 15)

- Mosher, R. S., 1968b, Test and evaluation of a versatile walking truck, *Proceedings of off-road mobility research symposium*, s. 359–379. (Atıf Yapılan Sayfa 15)
- Mosher, R. S., 1969, Exploring the potential of a quadruped, Technical report, SAE Technical Paper 690191. (Atıf Yapılan Sayfa 15)
- Muybridge, E., 1883, The attitudes of animals in motion, *Journal of the Franklin Institute*, 115 (4), 260–274. (Atıf Yapılan Sayfa 10)
- Muybridge, E., 1887, The human figure in motion, *Dover Publications, Inc.*, New York, NY, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 10)
- Muybridge, E., 1957, Animals in motion, *Dover Publications, Inc.*, New York, NY, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 10)
- Nasrinpour, H. R., Bavani, A. M., ve Teshnehlab, M., 2017, Grouped bees algorithm: A grouped version of the bees algorithm, *Computers*, 6 (1). (Atıf Yapılan Sayfa 157)
- Nelson, G., Saunders, A., Neville, N., Swilling, B., Bondaryk, J., Billings, D., Lee, C., Playter, R., ve Raibert, M., 2012, PETMAN: A Humanoid Robot for Testing Chemical Protective Clothing, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 30 (4), 372–377. (Atıf Yapılan Sayfa 29)
- Nof, S. Y., 1999, Handbook of industrial robotics, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, NY, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 1)
- Nonami, K., 2002, Development of mine detection robot COMET–II and COMET–III, *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, volume 1, s. 346–351. (Atıf Yapılan Sayfa 24)
- Nonami, K., Barai, R. K., Irawan, A., ve Daud, M. R., 2014, Hydraulically actuated hexapod robots, *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering. Springer Japan*, Tokyo. (Atıf Yapılan Sayfa 1, 25, 43)
- Nonami, K., Huang, Q., Komizo, D., Fukao, Y., Asai, Y., Shiraishi, Y., Fujimoto, M., ve Ikedo, Y., 2003, Development and control of mine detection robot COMET–II and COMET–III, *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46 (3), 881–890. (Atıf Yapılan Sayfa 24)
- Ogata, K., 2010, Modern Control Engineering, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, NJ, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 154, 155)
- Oku, M., Yang, H., Piao, G., Harada, Y., Adachi, K., Barai, R., Sakai, S., ve Nonami, K., 2007, Development of hydraulically actuated hexapod robot COMET–IV : The 1st report : System design and configuration, *The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics*, 2007, G01–1–3. (Atıf Yapılan Sayfa 25)
- Orin, D. E. ve Mcghee, R. B., 1981, Dynamic computer simulation of robotic mechanisms,

- Theory and Practice of Robots and Manipulators*, s. 286–296. (Atıf Yapılan Sayfa 20)
- Pham, D., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., ve Zaidi, M., 2006, - the bees algorithm — a novel tool for complex optimisation problems, *Intelligent Production Machines and Systems*, *Elsevier Science Ltd*, Oxford, s. 454 – 459. (Atıf Yapılan Sayfa 157)
- Pham, D. T. ve Castellani, M., 2009, The bees algorithm: Modelling foraging behaviour to solve continuous optimization problems, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223 (12), 2919–2938. (Atıf Yapılan Sayfa 157)
- Pham, D. T. ve Castellani, M., 2014, Benchmarking and comparison of nature-inspired population-based continuous optimisation algorithms, *Soft Computing*, 18 (5), 871–903. (Atıf Yapılan Sayfa 157)
- Pham, D. T. ve Castellani, M., 2015, A comparative study of the bees algorithm as a tool for function optimisation, *Cogent Engineering*, 2 (1), 1091540. (Atıf Yapılan Sayfa 157)
- Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., ve Zaidi, M., 2005, The bees algorithm, *Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK*. (Atıf Yapılan Sayfa 156)
- Piovan, G. ve Byl, K., 2012, Enforced symmetry of the stance phase for the Spring-Loaded Inverted Pendulum, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s. 1908–1914. IEEE. (Atıf Yapılan Sayfa 26)
- Playter, R., Buehler, M., ve Raibert, M. H., 2006, Bigdog, *Proceedings of the Unmanned Systems Technology VIII, Defense and Security Symposium*, volume 6230, s. 623020. (Atıf Yapılan Sayfa 35)
- Popović, M. B., 2013, *Biomechanics and Robotics*, *Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.*, New York. (Atıf Yapılan Sayfa 29, 43)
- Poulakakis, I., 2010, Spring Loaded Inverted Pendulum embedding: Extensions toward the control of compliant running robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s. 5219–5224. (Atıf Yapılan Sayfa 31)
- Poulakakis, I. ve Grizzle, J. W., 2009, The spring loaded inverted pendulum as the hybrid zero dynamics of an asymmetric hopper, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54 (8), 1779–1793. (Atıf Yapılan Sayfa 26)
- Poulakakis, I., Smith, J. A., ve Buehler, M., 2005, Modeling and Experiments of Untethered Quadrupedal Running with a Bounding Gait: The Scout II Robot, *The International Journal of Robotics Research*, 24 (4), 239–256. (Atıf Yapılan Sayfa 34, 56)
- Raibert, M., Chepponis, M., ve Brown, H., 1986, Running on four legs as though they were one, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2 (2), 70–82. (Atıf Yapılan

Sayfa 31, 33)

- Raibert, M. H., 1986, Legged robots, *Communications of the ACM*, 29 (6), 499–514. (Atıf Yapılan Sayfa 16, 26, 28, 29, 30, 32, 43)
- Raibert, M. H., Blankespoor, K., Nelson, G., ve Playter, R., 2008, BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot, *IFAC Proceedings Volumes*, 41 (2), 10822–10825. (Atıf Yapılan Sayfa 3, 29, 35, 115)
- Raibert, M. H. ve Brown, H. B., 1984, Experiments in Balance with a 2D One-Legged Hopping Machine, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 106 (1), 75–81. (Atıf Yapılan Sayfa 30)
- Raibert, M. H., Brown, H. B., ve Chepponis, M., 1984, Experiments in Balance with a 3D One-Legged Hopping Machine, *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2), 75–92. (Atıf Yapılan Sayfa 30, 31)
- Raibert, M. H., Brown, H. B., Chepponis, M., Hastings, E., Koechling, J., Murphy, K. N., Murthy, S. S., ve Stentz, A. J., 1983, Dynamically stable legged locomotion progress report: October 1982–October 1983, Technical Report CMU-RI-TR-83-20, The Robotics Institute and Department of Computer Science Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 30)
- Raibert, M. H., Brown, H. B., Chepponis, M., Koechling, J., Hodgins, J. K., Dustman, D., Brennan, W. K., Barrett, D. S., Thompson, C. M., Hebert, J. D., Lee, W., ve Borvansky, L., 1989, Dynamically stable legged locomotion, Technical Report AI-TR-1179, Advanced Research Projects Agency, Arlington, VA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 30)
- Rao, S. S., 2009, Nonlinear Programming III: Constrained Optimization Techniques, Engineering Optimization: Theory and Practice, *John Wiley & Sons, Inc.*, 4th edition, s. 380–491. (Atıf Yapılan Sayfa 96, 98)
- Remy, C. D., 2011, Optimal exploitation of natural dynamics in legged locomotion, Doktora Tezi, *ETH Zurich*. (Atıf Yapılan Sayfa 3, 29, 40, 232)
- Remy, C. D., Baur, O., Latta, M., Lauber, A., Hutter, M., Hoepflinger, M. A., Pradalier, C., ve Siegwart, R., 2011, Walking and crawling with ALoF: a robot for autonomous locomotion on four legs, *Industrial Robot: An International Journal*, 38 (3), 264–268. (Atıf Yapılan Sayfa 40)
- Remy, C. D., Hutter, M., Hoepflinger, M., Bloesch, M., Gehring, C., ve Siegwart, R., 2012, Quadrupedal Robots with Stiff and Compliant Actuation, *at - Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, 60 (11), 682–691. (Atıf Yapılan Sayfa 40)
- Righetti, L. ve Ijspeert, A. J., 2006, Design methodologies for central pattern generators: an application to crawling humanoids, *Proceedings of Robotics: Science and Systems*,

- s. 191–198. (Atıf Yapılan Sayfa 229)
- Righetti, L. ve Ijspeert, A. J., 2008, Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion, *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s. 819–824. (Atıf Yapılan Sayfa 228)
- Roosting, W., Li, Z., Caldwell, D. G., ve Tsagarakis, N. G., 2016, Design Optimisation and Control of Compliant Actuation Arrangements in Articulated Robots for Improved Energy Efficiency, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1 (2), 1110–1117. (Atıf Yapılan Sayfa 56)
- Rygg, L. A., 1893, Mechanical horse., US Patent US491927A. (Atıf Yapılan Sayfa 11)
- Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N., ve Fujimura, K., 2002, The intelligent asimo: system overview and integration, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, s. 2478–2483. (Atıf Yapılan Sayfa 3, 45)
- Saranli, U., Buehler, M., ve Koditschek, D. E., 2001, RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot, *The International Journal of Robotics Research*, 20 (7), 616–631. (Atıf Yapılan Sayfa 29)
- Sayyad, A., Seth, B., ve Seshu, P., 2007, Single-legged hopping robotics research – A review, *Robotica*, 25 (5), 587–613. (Atıf Yapılan Sayfa 28, 29)
- Schaffer, J. ve Cannon, R. H., 1966, On the control of unstable mechanical systems, *Automatic and Remote Control III: Proceedings of the Third Congress of the International Federation of Automatic Control*. (Atıf Yapılan Sayfa 26)
- Schwind, W. J. ve Koditschek, D., 2000, Approximating the Stance Map of a 2-DOF Monoped Runner, *Journal of Nonlinear Science*, 10 (5), 533–568. (Atıf Yapılan Sayfa 31)
- Semini, C., 2010, HyQ - Design and Development of a Hydraulically Actuated Quadruped Robot, Doktora Tezi, *Istituto Italiano di Tecnologia and University of Genoa*. (Atıf Yapılan Sayfa 29, 37, 45, 53, 56)
- Semini, C., Barasuol, V., Boaventura, T., Frigerio, M., ve Buchli, J., 2016, Is active impedance the key to a breakthrough for legged robots?, *Robotics Research*, Springer International Publishing, s. 3–19. (Atıf Yapılan Sayfa 37, 48)
- Semini, C., Barasuol, V., Boaventura, T., Frigerio, M., Focchi, M., Caldwell, D. G., ve Buchli, J., 2015, Towards versatile legged robots through active impedance control, *The International Journal of Robotics Research*, 34 (7), 1003–1020. (Atıf Yapılan Sayfa 38, 161)
- Semini, C., Barasuol, V., Goldsmith, J., Frigerio, M., Focchi, M., Gao, Y., ve Caldwell, D. G., 2017, Design of the Hydraulically Actuated, Torque-Controlled Quadruped

- Robot HyQ2Max, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22 (2), 635–646. (Atıf Yapılan Sayfa 8, 38, 39, 56, 115)
- Semini, C., Tsagarakis, N. G., Guglielmino, E., ve Caldwell, D. G., 2010, Design and experimental evaluation of the hydraulically actuated prototype leg of the HyQ robot, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 3640–3645. (Atıf Yapılan Sayfa 37)
- Semini, C., Tsagarakis, N. G., Guglielmino, E., Focchi, M., Cannella, F., ve Caldwell, D. G., 2011, Design of HyQ – a hydraulically and electrically actuated quadruped robot, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 225 (6), 831–849. (Atıf Yapılan Sayfa 37)
- Semini, C., Tsagarakis, N. G., Vanderborght, B., Yang, Y., ve Caldwell, D. G., 2008, HyQ - Hydraulically actuated quadruped robot: Hopping leg prototype, *2nd IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, s. 593–599. (Atıf Yapılan Sayfa 37, 89)
- Seok, S., Wang, A., Michael Chuah, M. Y., Hyun, D. J., Lee, J., Otten, D. M., Lang, J. H., ve Kim, S., 2015, Design Principles for Energy-Efficient Legged Locomotion and Implementation on the MIT Cheetah Robot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20 (3), 1117–1129. (Atıf Yapılan Sayfa 56, 89)
- Shigley, J. E., 1960, The mechanics of walking vehicles, Technical report, Army Tank-Automotive Center, Warren, MI, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 13)
- Shurkin, J. N., 1996, Engines of the mind: The evolution of the computer from mainframes to microprocessors, *W. W. Norton & Company, Inc.*, New York, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 12)
- Silva, M. F. ve Machado, J. T., 2012, A literature review on the optimization of legged robots, *Journal of Vibration and Control*, 18 (12), 1753–1767. (Atıf Yapılan Sayfa 2)
- Simscape™, 2019, *Simscape™ User's Guide*, The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 150)
- Simulink®, 2019, *Simulink® User's Guide*, The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 150)
- Skogestad, S., 2003, Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning, *Journal of Process Control*, 13 (4), 291 – 309. (Atıf Yapılan Sayfa 155)
- SolidWorks Simulation® Design Studies, 2019, *Properties for the Optimization Design Study, SolidWorks Simulation Help*, Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Waltham, MA, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 113)
- SolidWorks Simulation® Topology Study, 2019, *SIMP Method for Topology Optimization, SolidWorks Simulation Help*, Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Waltham, MA,

- USA. (Atıf Yapılan Sayfa 113)
- Song, S. ve Waldron, K. J., 1989, Machines that walk: the adaptive suspension vehicle, *MIT press*. (Atıf Yapılan Sayfa 21)
- Spong, M. W., Hutchinson, S., ve Vidyasagar, M., 2005, Robot Modeling and Control, *Wiley*. (Atıf Yapılan Sayfa 1)
- Sprowitz, A., Tuleu, A., Vespignani, M., Ajallooeian, M., Badri, E., ve Ijspeert, A. J., 2013, Towards dynamic trot gait locomotion: Design, control, and experiments with Cheetah-cub, a compliant quadruped robot, *The International Journal of Robotics Research*, 32 (8), 932–950. (Atıf Yapılan Sayfa 45, 56, 229)
- Sugeno, M., 1985, Industrial applications of fuzzy control, *Elsevier Science Inc.*, New York, NY, USA. (Atıf Yapılan Sayfa 165)
- Sugeno, M., 1993, Fuzzy measures and fuzzy integrals—a survey, Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems, *Morgan Kaufmann Publishers, Inc.*, San Mateo, California, US, s. 251 – 257. (Atıf Yapılan Sayfa 163)
- Sutherland, I. E. ve Ullner, M. K., 1984, Footprints in the asphalt, *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2), 29–36. (Atıf Yapılan Sayfa 32)
- Şen, M. A., Bakırcıoğlu, V., ve Kalyoncu, M., 2017, Inverse kinematic analysis of a quadruped robot, *International Journal of Scientific and Technology Research*, 6, 285–289. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Şen, M. A., Bakırcıoğlu, V., ve Kalyoncu, M., 2018, Automatic LQR Controller Tuning Based on Grey Wolf Optimizer Algorithm for a Quadruped Robot, *Proceedings of the 2nd International Vocational Science Symposium*, Antalya, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Şen, M. A. ve Kalyoncu, M., 2019, Grey Wolf Optimizer Based Tuning of a Hybrid LQR-PID Controller for Foot Trajectory Control of a Quadruped Robot, *Gazi University Journal of Science*, 32 (2), 674–684. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Tabakow, I., 2006, An introduction to fuzzy propositional calculus using proofs from assumptions, Gabrys, B., Howlett, R. J., ve Jain, L. C., editorler, *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, s. 187–194, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg. (Atıf Yapılan Sayfa 163)
- Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y., ve Kato, I., 1985, The realization of dynamic walking by the biped walking robot wl-10 rd, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 3 (4), 325–336. (Atıf Yapılan Sayfa 27)
- Tedeschi, F. ve Carbone, G., 2015, Design of hexapod walking robots: Background and challenges, Handbook of Research on Advancements in Robotics and Mechatronics, *Hershey, PA: IGI Global*, chapter 18, s. 527–566. (Atıf Yapılan Sayfa 24)

- Todd, D. J., 1985a, A brief history of walking machines, *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*, Chapman and Hall Advanced Industrial Technology Series, *Springer US*, Boston, MA, s. 11–33. (Atıf Yapılan Sayfa 12, 13, 15, 29)
- Todd, D. J., 1985b, Current developments, *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*, Chapman and Hall Advanced Industrial Technology Series, *Springer US*, Boston, MA, s. 151–168. (Atıf Yapılan Sayfa 21, 29)
- Todd, D. J., 1985c, *Walking machines: An introduction to legged robots*, Chapman and Hall Advanced Industrial Technology Series. *Springer US*, Boston, MA. (Atıf Yapılan Sayfa 43)
- Todd, D. J., 1991, An evaluation of mechanically co-ordinated legged locomotion (The Iron Mule Train revisited), *Robotica*, 9 (04), 417. (Atıf Yapılan Sayfa 16)
- Tomovic, R. ve Mcghee, R. B., 1966, A finite state approach to the synthesis of bioengineering control systems, *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, HFE-7 (2), 65–69. (Atıf Yapılan Sayfa 18)
- Tran, D. T., Koo, I. M., Lee, Y. H., Moon, H., Park, S., Koo, J. C., ve Choi, H. R., 2014, Central pattern generator based reflexive control of quadruped walking robots using a recurrent neural network, *Robotics and Autonomous Systems*, 62 (10), 1497 – 1516. (Atıf Yapılan Sayfa 229)
- Ugurlu, B., Havoutis, I., Semini, C., ve Caldwell, D. G., 2013, Dynamic trot-walking with the hydraulic quadruped robot — HyQ: Analytical trajectory generation and active compliance control, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 6044–6051. (Atıf Yapılan Sayfa 38)
- Urschel, J. R., 1945, *Walking tractor.*, US Patent US2491064A. (Atıf Yapılan Sayfa 11)
- Vukobratović, M., 1973, *Locomotion robots: Kinematics, dynamics and control algorithms*, *5th IFAC Symposium on Automatic Control in Space*. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Vukobratović, M., Borovac, B., ve Šurdilović, D., 2001, Zero moment point - proper interpretation and new applications, *Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, s. 237–244. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Vukobratović, M., Frank, A. A., ve Juricic, D., 1970a, On the stability of biped locomotion, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-17 (1), 25–36. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Vukobratović, M. ve Juricic, D., 1969, Contribution to the synthesis of biped gait, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-16 (1), 1–6. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Vukobratović, M., Juricic, D., ve Frank, A. A., 1970b, On the control and stability of one class of biped locomotion systems, *Journal of Basic Engineering*, 92 (2), 328–332. (Atıf Yapılan Sayfa 19)

- Vukobratović, M. ve Stepanenko, J., 1972, On the stability of anthropomorphic systems, *Mathematical Biosciences*, 15 (1-2), 1–37. (Atıf Yapılan Sayfa 19, 26)
- Vukobratović, M. ve Stepanenko, J., 1973, Mathematical models of general anthropomorphic systems, *Mathematical Biosciences*, 17 (3-4), 191–242. (Atıf Yapılan Sayfa 19)
- Waldron, K. J. ve Mcghee, R. B., 1986a, The adaptive suspension vehicle, *IEEE Control Systems Magazine*, 6 (6), 7–12. (Atıf Yapılan Sayfa 21)
- Waldron, K. J. ve Mcghee, R. B., 1986b, The mechanics of mobile robots, *Robotics*, 2 (2), 113–121. (Atıf Yapılan Sayfa 21)
- Waldron, K. J., Vohnout, V. J., Pery, A., ve Mcghee, R. B., 1984, Configuration design of the adaptive suspension vehicle, *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2), 37–48. (Atıf Yapılan Sayfa 21)
- Waltz, R., Morales, J., Nocedal, J., ve Orban, D., 2006, An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps, *Mathematical Programming*, 107 (3), 391–408. (Atıf Yapılan Sayfa 139)
- Wettergreen, D., 1995, Robotic walking on natural terrain: Gait planning and behavior-based control for statically-stable walking robots, Doktora Tezi, *Carnegie Mellon University*. (Atıf Yapılan Sayfa 23)
- Wettergreen, D., Thorpe, C., ve Whittaker, R., 1993, Exploring Mount Erebus by walking robot, *Robotics and Autonomous Systems*, 11 (3-4), 171–185. (Atıf Yapılan Sayfa 11, 23)
- Winkler, A., Havoutis, I., Bazeille, S., Ortiz, J., Focchi, M., Dillmann, R., Caldwell, D., ve Semini, C., 2014, Path planning with force-based foothold adaptation and virtual model control for torque controlled quadruped robots, *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, s. 6476–6482. (Atıf Yapılan Sayfa 38)
- Winkler, A. W., 2018, Optimization-based motion planning for legged robots, Doktora Tezi, *ETH Zurich*. (Atıf Yapılan Sayfa 42)
- Winkler, A. W., Mastalli, C., Havoutis, I., Focchi, M., Caldwell, D. G., ve Semini, C., 2015, Planning and execution of dynamic whole-body locomotion for a hydraulic quadruped on challenging terrain, *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, s. 5148–5154. (Atıf Yapılan Sayfa 38)
- Yager, R. R., 1980, On a general class of fuzzy connectives, *Fuzzy Sets and Systems*, 4 (3), 235 – 242. (Atıf Yapılan Sayfa 163)
- Yamaguchi, J., Kinoshita, N., Takanishi, A., ve Kato, I., 1996, Development of a Dynamic Biped Walking System for Humanoid - Development of a Biped Walking Robot

- Adapting to the Humans' Living Floor, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1 (April), 232–239. (Atıf Yapılan Sayfa 27)
- Yamaguchi, J., Takanishi, A., ve Kato, I., 1993, Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by trunk motion, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1 (C), 561–566. (Atıf Yapılan Sayfa 27)
- Yang, Y., Semini, C., Tsagarakis, N. G., Guglielmino, E., ve Caldwell, D. G., 2009, Leg mechanisms for hydraulically actuated robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 4669–4675. (Atıf Yapılan Sayfa 37, 89)
- Zadeh, L., 1965, Fuzzy sets, *Information and Control*, 8 (3), 338 – 353. (Atıf Yapılan Sayfa 161)
- Zadeh, L. A., 1956, On the identification problem, *IRE Transactions on Circuit Theory*, 3 (4), 277–281. (Atıf Yapılan Sayfa 134)
- Zadeh, L. A., 1973, Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3 (1), 28–44. (Atıf Yapılan Sayfa 165)
- Zhang, J., Gao, F., Han, X., Chen, X., ve Han, X., 2014, Trot gait design and cpg method for a quadruped robot, *Journal of Bionic Engineering*, 11 (1), 18 – 25. (Atıf Yapılan Sayfa 228)
- Ziegler, J. G. ve Nichols, N. B., 1942, Optimum settings for automatic controllers, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 64, 759–768. (Atıf Yapılan Sayfa 155)
- Ziegler, J. G. ve Nichols, N. B., 1993, Optimum Settings for Automatic Controllers, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 115 (2B), 220–222. (Atıf Yapılan Sayfa 155)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Veli Bakırcıoğlu

Doğum Yeri ve Tarihi : Uşak - 1981

Telefon : +90555.641.94.96

e-mail : vbakircioglu@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Yılı
Lisans	İnönü Üniversitesi, Malatya	1999–2004
Yüksek Lisans	İnönü Üniversitesi, Malatya	2004–2007
Doktora	Konya Teknik Üniversitesi, Konya	2012–2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2010 - ...	Aksaray Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Robotik, Mobil Robotlar, Sistem Dinamiği, Kontrol Teorisi, Optimizasyon.

PROJE DENEYİMİ

2015 Aspir Yağından Üretilen Biyodizelin Dizel Motorlarda Kullanımı ve Egzoz Emisyon Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi

Aksaray Üniversitesi

Toplam Süre 12 Ay. Tamamlandı. 31.03.2016

2016 Dört Ayaklı Robotlar için Hidrolik Tahrikli Bir Bacak Geliştirilmesi

Selçuk Üniversitesi

Toplam Süre 14 Ay. Tamamlandı. 28.12.2017

2017 Motor Sayısı Değiştirilebilir Çok Rotorlu Drone Tasarımı ve Uygulaması

Erciyes Üniversitesi

Ön görülen tamamlanma süresi 24 Ay. Devam Ediyor. Başlangıç Tarihi 17.07.2017

BELGE ve SERTİFİKALAR

2017	LabVIEW Real-Time I (v2012) Online Course	National Instruments - Online
2017	LabVIEW Core I (v2015) Online Course	National Instruments - Online
2017	LabVIEW Core II (v2015) Online Course	National Instruments - Online
2017	LabVIEW Discovery Certificate	National Instruments - Online
2017	Sensors and Signals Certificate	National Instruments - Online
2017	NI-DAQmx Programming Certificate	National Instruments - Online
2017	Measurements System Design Certificate	National Instruments - Online
2017	Measurement Fundamentals Certificate	National Instruments - Online
2014	Erasmus+ Teaching Mobility Certificate	Trakia University - Stara Zagora/Bulgaria
2012	Project Management Certificate	TÜBİTAK - Aksaray/Türkiye
2009	5S Methodology Certificate	Makine Mühendisleri Odası - İzmir/Türkiye

YABANCI DİLLER

2018 NİSAN YDS (82.5)

BELİRTMEK İSTEDİĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

İleri Düzey ANSYS Workbench, SolidWorks, Visual Basic, C, LabVIEW programming, MATLAB, Simulink, SimScape Bilgisi.

YAYINLAR

- Bakırcıoğlu, V.** ve Kalyoncu, M., 2020, Bacaklı robotların yürüme stratejileri üzerine bir literatür taraması, *Politeknik Dergisi*, s. 0 – 0. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Bakırcıoğlu, V.**, Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2015, Dört bacaklı robotun bir bacağı için arı algoritması kullanarak pid kontrolcü tasarımı, *Proceedings of Trc-IFTToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms (TRISToMM 2015)*, s. 661–666, İzmir, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Bakırcıoğlu, V.**, Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2016a, Adaptive neural-network based fuzzy logic (ANFIS) based trajectory controller design for one leg of a quadruped robot, *Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering (ICMCE 2016)*, s. 82–85, Venice, Italy. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Bakırcıoğlu, V.**, Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2016b, Optimization of PID controller based on The Bees Algorithm for one leg of a quadruped robot, *MATEC Web of Conferences*, 42, 03004. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Bakırcıoğlu, V.**, Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2017, Obtaining dynamic characteristics of electrohydraulic servo systems case study of Parker D1FP proportional valve, *Proceedings of the International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2017)*, s. 662–668, Konya, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Bakırcıoğlu, V.**, Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2018a, Fuzzy Logic Controller Design Based on PID Controller for a Quadruped Robot, *Proceedings of the 2nd International Vocational Science Symposium (Ivss 2018)*, Antalya, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Bakırcıoğlu, V.**, Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2018b, Motion Analysis of the Robotic Leg Mass Centre during Reference Trajectory Tracking, *Proceedings of the 2nd International Vocational Science Symposium (Ivss 2018)*, Antalya, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Bakırcıoğlu, V.**, Şen, M. A., ve Kalyoncu, M., 2019, Yörünge takibi İçin kendinden kazanç ayarlamalı bir pid kontrolcü tasarımı ve uygulaması, *19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Umts 2019 Bildiriler Kitabı*, s. 38–46, İskenderun, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Yıldırım, Ő., Çabuk, N., ve **Bakırcıoğlu, V.**, 2019a, Design and control of a proposed multi-propeller system, *Proceedings of International Conference on Advanced Technologies ICAT 2019*, s. 35–39, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Yıldırım, Ő., Çabuk, N., ve **Bakırcıoğlu, V.**, 2019b, Design and trajectory control of universal drone system, *Measurement*, 147, 106834. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Çabuk, N. ve **Bakırcıoğlu, V.**, 2018, Artificial neural networks based inverse kinematics solution and simulation of a six degree of freedom lighting manipulator, *Gazi*

Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6, 117 – 125. (Atıf Yapılan Sayfa)

- Çabuk, N., **Bakırcıoğlu, V.**, ve Şen, F., 2016, Neural network approach for inverse kinematic of a 4-dof lighting manipulator, *Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2016)*, s. 2811–2817, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Örs, İ. ve **Bakırcıoğlu, V.**, 2016, An experimental and anns study of the effects of safflower oil biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a ci engine, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 5, 125 – 135. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Şen, M. A., **Bakırcıoğlu, V.**, ve Kalyoncu, M., 2016, Performances comparison of the bees algorithm and genetic algorithm for pid controller tuning, *Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering (ICMCE 2016)*, s. 126–130, Venice, Italy. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Şen, M. A., **Bakırcıoğlu, V.**, ve Kalyoncu, M., 2017a, Design and simulation impedance controller for trajectory control with obstacle of quadruped robot's leg, *Proceedings of the International Adavanced Researches and Enegineering Congress (IAREC 2017)*, s. 558–563, Osmaniye, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Şen, M. A., **Bakırcıoğlu, V.**, ve Kalyoncu, M., 2017b, Inverse kinematic analysis of a quadruped robot, *International Journal of Scientific and Technology Research (IJSTR)*, 6, 285–289. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Şen, M. A., **Bakırcıoğlu, V.**, ve Kalyoncu, M., 2017c, Modelling and pid control of scara robot, *Proceedings of the International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2017)*, s. 658–662, Konya, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Şen, M. A., **Bakırcıoğlu, V.**, ve Kalyoncu, M., 2018, Automatic LQR Controller Tuning Based on Grey Wolf Optimizer Algorithm for a Quadruped Robot, *Proceedings of the 2nd International Vocational Science Symposium (Ivss 2018)*, Antalya, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa)
- Şen, M. A., **Bakırcıoğlu, V.**, ve Kalyoncu, M., 2019, Üç serbestlik dereceli robot bacağı tasarımı ve kesir dereceli pid ($PI^\lambda D^\mu$) tabanlı kontrolü, *19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Umts 2019 Bildiriler Kitabı*, s. 66–72, İskenderun, Türkiye. (Atıf Yapılan Sayfa)