

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İKİ SERBESTLİK DERECELİ UZAYSAL TERS SARKAÇ KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Fırat KARA
DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Atilla BAYRAM

VAN-2019

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İKİ SERBESTLİK DERECELİ UZAYSAL TERS SARKAÇ KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: FIRAT KARA

Bu çalışma VAN Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığının
FBM-2018-7393 No' lu projesi ile desteklenmiştir.

VAN-2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Dr. Öğr. Üyesi Atilla BAYRAM danışmanlığında, Fırat KARA tarafından sunulan “İki Serbestlik Dereceli Uzaysal Ters Sarkaç Kontrolü” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 23/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. M. Nuri ALMALI

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Faruk ORAL

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Atilla BAYRAM

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..01...../..02..../2019 tarih ve 2019/9-1.. sayılı kararı ile onaylanmıştır.

...../...../2019
Prof. Dr. Suat ŞENSOY
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Fırat KARA



ÖZET

İKİ SERBESTLİK DERECELİ UZAYSAL TERS SARKAÇ KONTROLÜ

KARA, Fırat
Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Atilla BAYRAM
Ocak 2019, 86 sayfa

Küçük bir çocukken işaret parmağımızda veya avucumuzun içinde bir sopa veya çubuğu dengelemeye çalıştığımızı hatırlayalım. Çubuğu dik konumda dengede tutmak için elimizi sürekli doğru konuma getirmeye çalışırdık. Ters sarkaç problemi de prensip olarak aynı temele dayanmaktadır. Tıpkı çubuk gibi; ters sarkaç sistemi de aynı doğal kararsız dinamiklere sahiptir. Sarkacın dik konumda dengelenmesi için üzerine yerleştirildiği mekanizmaya kuvvetler uygulanması ve bu kuvvetlerin hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Bu çalışmada iki serbestlik dereceli uzaysal bir ters sarkacın tasarımı, üretimi ve kontrolü üzerine çalışılmıştır. Üç adımda yürütülen çalışmada; ilk adım ters sarkacı dengede tutacak olan düzlemsel bir tahrik mekanizmasının tasarımını, ikinci adım bu sistemin üretimini, son adım ise uzaysal ters sarkaç sisteminin belli bir çalışma noktası etrafında dengede tutacak olan kontrolcünün tasarlanıp uygulanacak en iyi kontrol yönteminin belirlenmesini içermektedir.

Çalışma sonunda tasarlanan İDKKK ve LQG kontrolcüler MATLAB yazılımı yardımıyla benzetimlere tabi tutulmuş, benzetim sonuçları irdelenerek kontrolcülerin gürbüzlük ve çeviklik performansları değerlendirilmiş ve gerçek sistemde kullanılacak yöntem hakkında önerilerde bulunulmuştur. Çalışma sonunda ikinci dereceden kayan kipli kontrolcünün uzaysal ters sarkacın dengelenmesinde daha gürbüz ve daha çevik performansa sahip olduğu görülürken, sistemin denge halinde tutulması ve kontrolcü kararlığı açısından LQG kontrolcünün daha iyi olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: İki serbestlik dereceli ters sarkaç, Ters sarkaç sistemi tasarımı, Uzaysal ters sarkaç kontrolü.

ABSTRACT

CONTROL OF TWO DEGREE OF FREEDOM SPATIAL INVERTED PENDULUM

KARA, Firat

M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering Department

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Atilla BAYRAM

January 2019, 86 pages

Let's remember that when we were a little boy we tried to stabilize a stick or a rod within our catcher. In order to keep the bar stable in the upright position, we tried to keep it in the correct position. The problem of inverted pendulum is based on the same principle. Just like a rod, the inverted pendulum system has the same natural unstable dynamics. In order to stabilize the inverted pendulum in the upright position, forces must be applied to the mechanism which inverted pendulum is placed on and these forces must be precisely controlled. In this study, design, production and control of two degree of freedom spatial pendulum are studied. In the study which was carried out in three steps; The first step involves the design of a planar mechanism that will hold the inverted pendulum in balance, the second step is the production of this system, The last step involves the determination of the best control method to design and implement a controller that will balance the spatial inverted pendulum system around a certain point of operation.

At the end of the study, SOSMC and LQG controllers were simulated using MATLAB software. Simulation results of the controllers were evaluated and suggestions were made about the method to be used in the real system. At the end of the study, it was observed that the SOSMC had more robust and more agile performance in the equilibrium of the spatial inverted pendulum, while it was observed that the LQG controller was better in terms of stability of the system and stability of the controller.

Keywords: Two degree of freedom inverted pendulum, Design of inverted pendulum system, Control of spatial inverted pendulum.



ÖN SÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında her türlü ilgi ve yardımını esirgemeyen, beni her zaman çalışmaya teşvik eden danışmanım ve hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Atilla BAYRAM' a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın maddi desteğini veren Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı' na (BAP) (Proje No: FBM-2018-7393) teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında desteği ile her daim yanımda olan dostum Ramazan AKIN' a, eşim Sümeyya KARA' ya, hayatımın her evresinde benden maddi manevi desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili aileme ve bu süreçte yanımda olan tüm dostlarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

2019

Fırat KARA



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Ters Sarkaç Sistemleri	3
1.2. Tez Motivasyonu.....	6
1.3. Amaç ve Hedefler	6
1.4. Tezin Özgün Değeri	8
1.5. Tez Organizasyonu	9
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	11
2.1. Uzaysal Ters Sarkaç Sistemleri.....	11
2.2. Uzaysal Ters Sarkaçların Kontrolü	14
2.3. Kinematik Sentez ve Matemaksel Modelleme.....	15
2.4. Ters Sarkaç Donanımları	16
3. MATERYAL ve YÖNTEM	21
3.1. Uzaysal Ters Sarkaç Sistemi Tasarımı.....	21
3.1.1. Mekanizma sentezi	22
3.1.1.1. Tasarım konsept ve amacının tanımlanması	24
3.1.1.2. Konfigürasyon seçimi ve ön tasarım.....	25
3.1.1.3. Boyutsal sentez ve genetik algoritma ile boyut optimizasyonu.....	29
3.1.1.4. Tasarımın kinematik analizi ve değerlendirme.....	32
3.2. Uzaysal Ters Sarkaç Sistemi Üretimi	34
3.2.1. Mekanik üretim	34
3.2.1.1. Doğrusal hareket modülü.....	35
3.2.1.2. DC motor sehpası.....	37
3.2.1.3. Mekanizma uzuvları.....	37

	Sayfa
3.2.1.4. Ünersal mafsal ve ters sarkaç.....	39
3.2.2. Elektronik ve Elektro-mekanik Donanımlar.....	40
3.2.2.1. Bilgisayar	41
3.2.2.2. Veri toplama kartı	41
3.2.2.3. Doğru akım motorları	42
3.2.2.4. Motor sürücöleri.....	44
3.2.2.5. Enkoder	45
3.2.2.6. Güç kaynağı	47
3.2.2.7. Mekanik ve elektriksel donanımların montajı	47
3.3. Uzaysal Ters Sarkaç Sistemi İçin Kontrolcü Tasarımı	49
3.3.1. Dinamik analiz.....	49
3.3.1.1. Lagrange Yöntemi	49
3.3.1.2. Hareket denklemlerinin elde edilmesi	51
3.3.1.3. MATLAB/Simulink Simscape Multibody yazılımı ile modelleme.....	57
3.2.2. Kontrolcü tasarımı	59
3.3.1.4. Doğrusal kuadratik Gaussian (LQG) kontrolcü tasarımı.....	60
3.3.1.5. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcü (İDKKK) tasarımı	67
4. BULGULAR	71
4.1. Ters Sarkacın Impuls Bozucu Karşısında Dengelenmesi	71
4.2. Ters Sarkacın Kararasız Başlangıç Konumundan Dengelenmesi.....	73
4.3. Ters Sarkacın Dengelenmesi ve Denge Konumunda Tutulması	74
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	77
KAYNAKLAR.....	79
EKLER	83
ÖZ GEÇMİŞ.....	87

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Mekanizma değişkenleri ve sabit parametreler.....	28
Çizelge 3.2. Doğrusal kızak teknik özellikleri	35
Çizelge 3.3. DC motor özellikleri.....	43
Çizelge 3.4. DC motor karakteristikleri.....	44
Çizelge 3.5. Redüktörlerin özellikleri.....	44
Çizelge 3.6. ESCON 50/5 motor sürücü özellikleri	45
Çizelge 3.7. Motor üzerindeki enkoder özellikleri	47
Çizelge 3.8. Sistemin sabit parametreleri.	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. İnsan, hayvan ve robot duruşu.....	2
Şekil 1.2. Ters sarkaç dinamiklerinin kullanıldığı benzer sistemler.....	2
Şekil 1.3. Ters sarkaç problemi	3
Şekil 1.4. a. Döner ters sarkaç b. Arabalı ters sarkaç c. Pendubot d. Acrobot e. Tekerlekli ters sarkaç f. Çok yönlü ters sarkaç g. İkiz arabalı ters sarkaç h. Üçüz arabalı ters sarkaç.	4
Şekil 2.1. X-Y masası tipli uzaysal ters sarkaç (Sung ve ark., 2008).....	11
Şekil 2.2. Çok yönlü uzaysal ters sarkaç (Chiu ve Wang, 2018) (Viet ve ark., 2012)...	12
Şekil 2.3. Robotik kol ile dengelenen ters sarkaç sistemi (Solomon Wiznitzer MS18).....	13
Şekil 2.4. 5R mekanizması üzerine konulan uzaysal ters sarkaç sistemleri.....	13
Şekil 2.5. X-Y masası tipli uzaysal ters sarkaç deney düzeneği (Arda, M., 2008).	17
Şekil 2.6. Uzaysal ters sarkaç deney düzeneği (Soto, I. Ve Campa, R., 2014).	18
Şekil 2.7. Tekerlekli uzaysal ters sarkaç sistemi (Grănescu ve ark. 2015).	19
Şekil 2.8. PLC ile kurulan deney düzeneği (Ertuğrul, 2015).	19
Şekil 3.1. Mekanizma tasarım prosedürü.	22
Şekil 3.2. Uzaysal ters sarkacın a. kararsız, b. kararlı durumda gösterimi.....	24
Şekil 3.3. Düzlemsel seri ve düzlemsel paralel mekanizma örnekleri.	26
Şekil 3.4. RRRRP konfigürasyonlu sarkaç tahrik mekanizması.	27
Şekil 3.5. Genetik algoritma optimizasyonu akış şeması.	30
Şekil 3.6. a. Tahrik mekanizması becerikli çalışma alanı b. $s5 - \theta2$ mafsalsal uzay grafığı.	33
Şekil 3.7. Uzaysal ters sarkaç düzeneği katı modeli.....	34
Şekil 3.8. a. Doğrusal hareket modülü b. üzerindeki hareketli kızak.....	36

Şekil	Sayfa
Şekil 3.9. Doğrusal hareket modülü ölçüleri.	36
Şekil 3.10. Motor sehpaı.	37
Şekil 3.11. İki numaralı uzvun görünümü.	37
Şekil 3.12. Üç numaralı uzvun a. üstten b. yandan görünüşü.....	38
Şekil 3.13. Dört numaralı uzvun görünümü	38
Şekil 3.14. Üniversal mafsalın a. ön görünüşü b. üst görünüşü c. izometrik görünüşü.	39
Şekil 3.15. Ters sarkaç.....	40
Şekil 3.16. Humusoft MF634 veri toplama kartı.....	41
Şekil 3.17. a. DC Motor b. redüktör.	43
Şekil 3.18. ESCON 50/5 Motor sürücü	45
Şekil 3.19. a. Motor enkoderi ve b. sarkaç enkoderi.	46
Şekil 3.20. a. 12 V sabit ve b. ayarlı güç kaynağı.	47
Şekil 3.21. Uzaysal ters sarkaç sistemi.....	48
Şekil 3.22. PRRRR mekanizması ve uzaysal ters sarkaçtan oluşan sistemin şematik diyagramı.	50
Şekil 3.23. Sistemin simscape multibody yazılımındaki blok gösterimi.....	57
Şekil 3.24. α ve β açılarının açık döngü cevabı.....	58
Şekil 3.25. Mekanizma değişkenlerinin açık döngü cevabı	58
Şekil 3.26. Uzaysal ters sarkaç sistemi kontrol stratejisi.....	59
Şekil 3.27. Doğrusallaştırılmış sistemin sayısal durum uzay gösterimi.	63
Şekil 3.28. LQG kontrol akış diyagramı	64
Şekil 3.29. İkinci dereceden kayan kipli kontrol akış diyagramı	70
Şekil 4.1. α açısının impuls bozucu ile değişimi.....	72
Şekil 4.2. β açısının impuls bozucu ile değişimi.....	72

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.3. İDKKK ve LQG kontrolcülerin dengeleyebildikleri maksimum sarkaç başlangıç açıları.....	73
Şekil 4.4. İDKKK ve LQG kontrolcü benzetim sonuçları	75





SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

ω	Açısal hız
A	Amper
gcm^2	Atalet birimi
rpm	Devir/dakika
k Ω	Direnç
m	Metre
N	Newton
V	Volt
τ	Tork

Kısaltmalar

Açıklama

DAQ	Veri toplama kartı
DC	Doğru akım
DOF	Serbestlik derecesi
IDKKK	İkinci dereceden kayan kipli kontrol
LQG	Doğrusal kuadratik Gaussian
LQE	Doğrusal kuadratik tahminle
LQR	Doğrusal kuadratik düzenleyici
GA	Genetik algoritma
CDD	Cebirsel differansiyel denklem
KF	Kalman filtresi
KKK	Kayan kipli kontrol



1. GİRİŞ

Kontrol teorisi mühendislik süreçlerinde sürekli çalışan dinamik sistemlerin kontrolünü ele alan bir matematik alt dalıdır. Amacı bir sistemi en iyi şekilde denetleyen kontrolcünün tasarlanması ve bu kontrolcülerin gerçek mühendislik sistemlerine uygulanmasıdır. Buna karşın gerçek sistemler genellikle birden çok alt sistemden meydana gelen karmaşık ve yüksek maliyetli uygulamalar olduğundan, kontrolcü tasarım çalışmaları doğrudan gerçek sistemler üzerinden yapılamaz. Gerçek uygulama yerine o uygulamaya temel oluşturan düzenekler üzerinde çalışılır. Bu noktada önemli olan temel oluşturan sistemin, gerçek olanı temsil etme gücü ve temel sistemlerin çok farklı türden kontrolcüler kullanılarak kontrol edilebileceğidir. Yani bir sistemi temsil etmek için birden çok farklı düzenek geliştirilebilir ve bu düzenekler birçok farklı yöntem yardımıyla kontrol edilebilir.

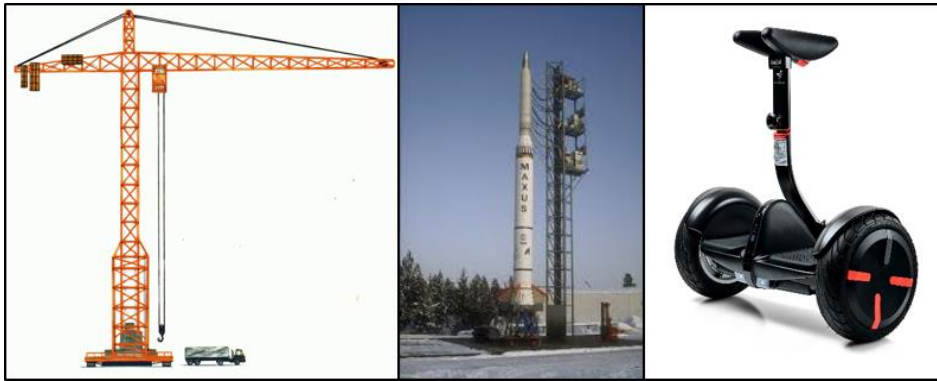
Doğrusal olmayan modelleri, eksik tahrikli ve kararsız yapıları ile sarkaç ve ters sarkaç temelli sistemler, kontrol alanında çalışan araştırmacılara zorluk seviyesi yüksek bir problem olarak uzun süredir hizmet etmektedir (Yazıcı ve Karamancıoğlu, 2009). Deneysel modelleri gerçekleştirmek, ortaya çıkan yeni kontrol tekniklerini doğrulamak ve var olan yöntemleri iyileştirmek için sıklıkla başvurulmuş ters sarkaç sistemleri, zaman içinde kontrol teorisinin klasik konularından biri haline gelmiştir. Kontrol alanında nitelikli ve sistematik çalışmalar yürütmek isteyen araştırmacıların, ters sarkaç sistemleri üzerine bugün dahi olan yakın ilgisi bahsedilen bu durumu kanıtlar niteliktedir.

Problemin bu denli popüler olmasının nedeni, gerçek mühendislik uygulamaları için oluşturduğu geniş yelpazedeki alt yapı ile ilgilidir. Örneğin, seç ve yerleştir amaçlı kullanılan robotik kollarda; basınç merkezinin, kol ağırlık merkezine göre aşağıda kalması durumunda; kolda meydana gelen dengesizlik ters sarkaç davranışı ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir (Mahmood, 2012; Wilson ve ark., 2016). Uyumlu dinamiklerden bir diğeri insan duruş ve yürüyüş modelidir. İki ayak üzerindeki duruş ve yürüyüş modeli ile ters sarkaç davranışı arasındaki benzerlik; insansı robot tasarımında ters sarkaç temelli sistemlere sıkça başvurulmasının sebebinin ortaya koymaktadır (Dalen, 2012; Liu ve ark., 2018). Bu tür uygulamalar ile ilgili bazı örnekler Şekil 1.1' de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. İnsan, hayvan ve robot duruşu.

Benzer olarak roket ve füze uçuş dinamikleri incelendiğinde; hareketin, uzun bir cismin (roketin) alt kısmından uygulanan itki kuvveti yardımı ile elde edildiği görülmektedir. Ters sarkaçlarda da benzer bir davranış ile karşılaşılır (Zakova, 2007). Özellikle kalkış aşamalarında ve füze ağırlık merkezinin, füze basınç merkezinin altında kaldığı durumlarda oluşan aerodinamik dengesizliklerin yok edilmesi için ters sarkaçlara sıklıkla başvurulmaktadır (Barton, 2009; Semenov ve ark., 2014). Ayrıca segway taşıma araçlarında (Castro, 2012), vinç kontrol sistemlerinde (Hoyer, 2003), gemi dengeleme uygulamalarında (Sasaki, 2014), nano uydulara ait işaretleme ve istasyon yakalama sistemlerinde (Tartler, 2010), uçak ve helikopter iniş modülleri ile birlikte hava araçlarının türbülans içerisinde dengelenmesi için yine ters sarkaç dinamiklerinden yararlanılmaktadır (Kizir, 2008; Wang ve ark., 2013) (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Ters sarkaç dinamiklerinin kullanıldığı benzer sistemler.

1.1. Ters Sarkaç Sistemleri

Küçük bir çocukken parmak ucumuzda veya avucumuzun içinde bir sopa veya çubuğu dengelemeye çalıştığımızı hatırlayalım. Çubuğu dik konumda dengede tutmak için elimizi sürekli doğru konuma getirmeye çalışırdık (Şekil 1.3). Ters sarkaç problemi de prensip olarak aynı temele dayanır.

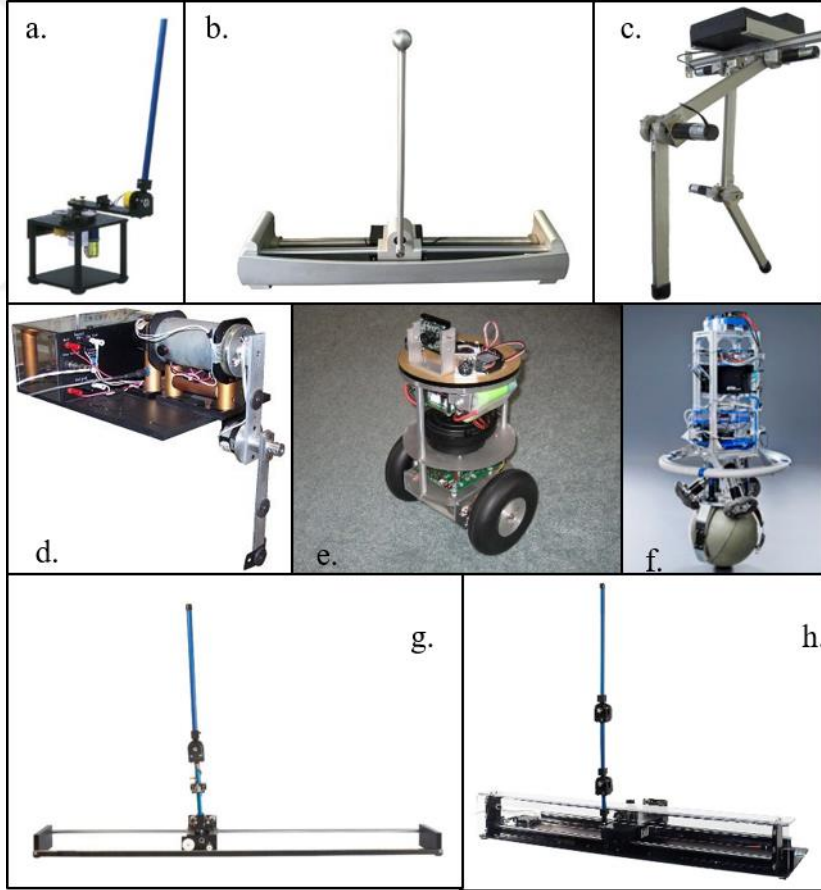


Şekil 1.3. Ters sarkaç problemi.

Ters sarkaç, en genel haliyle kütle merkezi konumu, dönme noktası konumundan (pivot noktası) yukarıda olan bir sarkaç olarak tanımlanabilir. Kararlı olan aşağıda ve kararsız olan üstte olmak üzere iki adet denge noktasına sahiptir. Oldukça kararsız olan sistemin hem kendi ataletinden hem de çevreden ve/veya sistemin kendisinden kaynaklanan bozucular sebebiyle denge konumundan kolayca saptığı bilinmektedir. Bu sebeple ters sarkaçlar üzerinde yapılan en anlamlı çalışmalar kararsız üst noktada yapılan dengeleme çalışmalarıdır. Sarkacı dengede tutmak veya tekrar dengelemek için değişken yön ve şiddetteki dinamik dengeleme kuvvetlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kuvvetler ters sarkacın dönme noktasının tekrardan konumlanmasını sağlar ve dengeleme işini gerçekleştirir.

Literatürde çok farklı yapıda ters sarkaç sistemleri bulunmaktadır. Tek boyutta doğrusal hareket edebilen bir araba veya kızak üzerine bağlanmış ters sarkaç (Roose ve ark., 2017), yere ve birbirine dönel mafsallar ile bağlı, aynı düzlem içerisinde dönme hareketi yapan iki uzvun tek bir eyleyici kullanılarak dengelendiği acrobat (Almeida ve

Nyondoro, 2017), ter sarkacın, sarkaç dönme eksenine dik bağlı başka bir uzvun dönme hareketi ile dengelendiği furuta sarkacı (döner ters sarkaç) (Saizaya ve ark., 2017), eyleyicinin acrobottan farklı olarak diğer uzva bağlı olduğu pendubot (Huynh ve ark., 2017), tekerlekli ters sarkaç sistemleri (Déda ve ark., 2018) ve farklı konfigürasyonlara sahip daha birçok sistem oldukça geniş olan ters sarkaç ailesinin üyeleridir. Bu bahsi geçen ters sarkaçların bir kısmı Şekil 1.4' te gösterilmiştir. Bu noktada belirtilmesi gereken bahsedilen tüm ters sarkaç tiplerinde eyleyici sayısının serbestlik derecesinden (DOF) az olduğu, başka bir deyişle eksiksiz (eksik tahrikli) yapıda olduklarıdır (Seifried, 2013). Yukarıda bahsedilenler de dâhil olmak üzere literatürde çalışılan ters sarkaçlar genellikle tek eksiksizlik derecesine sahiptir ve bu sistemlerde düzlemsel bir ters sarkacın kontrolü, tahrik sisteminin tek boyutlu hareketi ile sağlanmaya çalışılır.



Şekil 1.4. a. Döner ters sarkaç b. Arabalı ters sarkaç c. Pendubot d. Acrobot e. Tekerlekli ters sarkaç f. Çok yönlü ters sarkaç g. İkiz arabalı ters sarkaç h. Üçüz arabalı ters sarkaç.

Bu çalışmanın konusu olan ters sarkaç grubu iki serbestlik dereceli uzaysal ters sarkaçlardır. Eksiksillik derecesi iki olan bu sistemlerde sarkaç, dönme eksenlerinin birbirlerine paralel ve dönme hareketinin tek bir düzlem üzerinde yapıldığı birçok çalışmadan farklı olarak (Al-Janan ve ark., 2017; Chen ve ark., 2017; Mohan ve ark., 2017) dönme eksenleri birbirine dik ve belirli bir noktadan uzay içerisinde herhangi bir yöne kolayca devrilebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Uzaysal ters sarkaçlarla ilgili detaylı bilgiye literatür taraması bölümünden ulaşılabilir.

Bu çalışmada uzaysal bir ters sarkaç, daha önce üzerinde herhangi bir çalışmanın yapılmadığı dönel ve doğrusal hareket ile tahrik edilen iki serbestlik dereceli bir PRRRR (P: Prismatic joint, R: Revolute joint) mekanizması (kapalı zincir) yardımıyla dengelenmiştir. Tahrik mekanizmasının tercih edilmesinin sebebi, sahip olduğu doğrusal giriş hareketi yardımıyla uzaysal ters sarkacın mekanizma üzerine monte edileceği noktada yüksek ivme oluşturabilmesidir. Bu sayede uzaysal ters sarkaç sistemine hızlı tepki üretebilen bir karakter kazandırılmıştır. Çalışmada sunulan deney düzeneği ile kontrol metotlarının performans ölçümleri için ve aynı zamanda birçok mühendislik uygulama alanına sahip olan, doğrusallıktan olabildiğince uzak, modellenmesi ve aynı şekilde kontrolü oldukça zor bir sistem ortaya çıkarılmıştır

Üç aşamada yürütülen çalışmada ilk olarak uzaysal ters sarkacın dengelenmesi için gereken kuvvetleri üretecek düzlemsel bir kapalı zincir PRRRR mekanizmasının tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım düzlemsel tahrik mekanizmasının kinematik analizi ile genetik algoritma (GA) kullanılarak çalışma uzayını maksimum yapan mekanizma boyutlarının belirlenmesini içermektedir. İkinci aşamada ise deney düzeneğinin üretimine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Mekanik bölümde mekanizma uzuvlarının hassas şekilde üretimi yapılmış, seçilen elektronik ve elektromekanik donanımlar ile birlikte uzuvların montajı yapılarak düzene tamamlanmıştır. Üçüncü ve son aşamada ise ters sarkacın kontrolüne yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Bu aşamada öncelikle Lagrange yöntemi ile sisteme ait dinamik denklemler elde edilmiştir. Daha sonra MATLAB-Simulink yazılımının bir modülü olan Simscape Multibody yardımıyla elde edilen denklemler doğrulanmış ve bu sayede sistemin tam bir dinamik analiz yapılmıştır. Çalışmanın devamında uzaysal ters sarkaç sistemi, benzetimler yardımıyla doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinden ikinci dereceden kayan kipli kontrol (İDKKK) ve dinamik modelin doğrusallaştırılması yardımıyla tasarlanan doğrusal kuadratik Gaussian

(Linear Quadratic Gaussian-LQG) yöntemi kullanılarak kontrol edilmiştir. Çalışma sonunda uygulanan farklı kontrol yöntemleri hızlı cevap ve bozuculara karşı gürbüzlük gibi performans kriterlerine göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve başarılı olan yöntem deney düzeneği üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır.

1.2. Tez Motivasyonu

Gelişmiş ülkelere bakıldığında; kontrol teorisi alanına çok fazla yatırım yapıldığı görülmektedir. Ülkemizin dünya ve bölgedeki mevcut rolü düşünüldüğünde; kontrol ve otomasyon üzerine yapılacak çalışmaların önemi daha iyi anlaşılabilir. Bu bağlamda yürütülen tez çalışması, mekanik, elektronik ve yazılım başlıklarının hepsini aynı anda içermektedir. Tez çalışmamızda ters sarkaç kontrolü üzerine çalışmamızı sağlayan en önemli iki motivasyon:

- Ters sarkaç sistemlerinin kontrol teorisi alanında nitelikli ve sistematik çalışmaların yürütülebilmesi için sahip olduğu yüksek potansiyel,
- Başta insansı robot tasarımı (yürüyüş ve duruş modeli), füze kontrol sistemleri ve transport araçlarında denge (segway ve kule vinçler) gibi önemli konular üzerine yapılabilecek çalışmalar için temel bir test platformuna sahip olunmasıdır.

1.3. Amaç ve Hedefler

Bu tez çalışması ters sarkaç kontrolü için gerekli hareket ve kuvvetlerin üretimini yapan optimum çalışma alanına sahip iki serbestlik dereceli düzlemsel bir kontrol mekanizmasının tasarımını, üretimini ve kontrolünü içermektedir. Çalışma sonunda ulaşılmak istenen hedefler sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Ters sarkaca hareket verecek olan iki serbestlik dereceli düzlemsel tahrik mekanizmasının genel kinematik analizi yapılacaktır.
- Genetik algoritma yardımıyla düzlemsel mekanizmanın çalışma alanı ve mafsal uzayı optimizasyonu yapılacaktır. Bu optimizasyon sonucunda düzlemsel mekanizmayı oluşturan uzuvların optimum boyutları elde edilecektir. Böylelikle ters sarkacın mekanizma üzerine oturduğu kaide daha geniş bir çalışma alanında

hareket edebilecek ve aynı zamanda düzlemsel mekanizmayı tahrik eden motorlar üzerinde de herhangi bir kinematik kısıtlama olamayacaktır.

- Uygun CAD programları yardımıyla mekanik uzuvlara ait katı modeller çıkarılacak, bu uzuvların teknik resimleri çizilecektir. Uzuvların kütle ve atalet momentleri seçilecek malzeme türüne göre hesaplanacaktır. Tüm parçaların tasarımı tamamlandıktan sonra CAD programı üzerinde mekanik ve elektriksel tüm aksamaları içeren bir katı montaj çalışması yapılacaktır.
- Yukarıdaki tasarım kriterlerine göre mekanik parçaların CNC ya da hassas tezgâhlar üzerinde üretimleri gerçekleştirilecektir.
- Kullanılacak elektronik donanımlardan beklenen performans değerleri teknik hesaplamalar ile belirlendikten sonra bu elemanların temin işlemleri gerçekleştirilecektir.
- Yukarıda belirtilen tüm mekanik ve elektriksel elemanların temininden sonra montajları gerçekleştirilecektir. Uzaysal ters sarkacın gerçek zamanlı model tabanlı kontrolü için sistemin ayrıntılı dinamik analizi yapılacaktır. Bu analizin sonucu bize sistem performansı ve elde edilen modelin doğruluğu hakkında önemli teorik bilgiler verecektir.
- Matematik model bağımlı doğrusal olmayan kayan kipli kontrolcü ve doğrusallaştırılmış model kullanan LQG yöntemi yardımıyla ters sarkacı temsil eden dinamik denklemler kullanılarak bilgisayar benzetimleri teorik olarak test edileceklerdir.
- Yukarıdaki çalışma sonunda elde edilen parametreler, tasarlanacak bir bilgisayar ara yüzü ile gerçek zamanlı olarak uzaysal ters sarkaç sistemine uygulanacaklardır. Doğrusal ve doğrusal olmayan metotların performansları ortaya konacaktır. Teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilip yorumlanarak, böyle sistemler için en uygun kontrol yöntemi ve/veya yöntemleri kontrol parametreleri ile birlikte belirlenecektir.

Tezin amaçları ise aşağıdaki gibidir;

- Optimum çalışma alanı ve mafsal uzayına sahip iki serbestlik dereceli düzlemsel bir kontrol mekanizması tasarımı yaparak mekanizma sentezi alanına katkı yapmak,

- Uzaysal ters sarkaç sisteminin dengelenmesi için amaca uygun yeni kontrol algoritmaları tasarlamak; tasarlanan algoritmaları deneysel sistem üzerinde uygulayarak; yeni metotları kendi aralarında performans, çeviklik, gürbüzlük vb. kriterlere göre değerlendirmek ve karmaşık sistemlerin kontrolünde kullanılacak iyi olan yöntemi ortaya koyarak kontrol teorisine katkıda bulunmak,
- Üniversitelerin araştırma laboratuvarlarında kullanılan ithal ters sarkaç deney düzeneklerine yerli alternatif olabilecek bir sistemin düşük maliyetlerle üretilmesi ve ticarileştirilmesiyle ülke ekonomisine katkıda bulunmak,
- Ters sarkaç sistemleri ile benzer dinamiklere sahip gerçek mühendislik uygulamalarının kontrolü için temel oluşturmak; mekanik, elektronik ve yazılım bilgi ve becerisi isteyen zorluk seviyesi yüksek bir sistem üzerinde tecrübe kazanmak; bu alanlarda nitelikli personellerin yetişmesine katkıda bulunmak,
- Tez çalışması tamamlandığında, bu konu ile ilgili literatürdeki bir boşluğu doldurmak, elde edilen çalışmaların yayımlanması ile üniversitemizin ve ülkemizin prestijine katkı sağlamak çalışmanın amaçları arasındadır.

1.4. Tezin Özgün Değeri

Bu kapsamda önerilen projenin en önemli özgün değeri iki serbestlik dereceli uzaysal bir ters sarkacın daha önce üzerinde çalışılmamış bir tahrik mekanizması kullanılarak kontrol edilmesidir. Doğrusal ve dönel girişlerin birlikte kullanılacağı RRRRP tipli bu mekanizma ile ilgili ulusal ve uluslararası literatürde her hangi bir çalışma bulunmamaktadır. Tasarımı yapılacak düzlemsel tahrik mekanizması, daha önce herhangi bir kinematik sentez (mekanizma tasarımı) ve/veya kontrol çalışmasına konu olmamıştır.

Uzaysal ters sarkaç sisteminin kontrolü, literatürde sıklıkla karşılaşılan tek düzlem hareketli ters sarkaçlara göre oldukça zordur. Bu sistemlerde kontrol, tahrik sisteminin tek boyutlu hareketi ile sağlanmaya çalışılmaktadır. Fakat projede çalışılacak iki serbestlik dereceli ters sarkaçta ise tahrik hareketi birbirinden bağımsız iki doğrultudadır. Bununla birlikte ters sarkacın üzerine oturduğu kaidenin de mekanizma çalışma uzayı içinde kalması gerekmektedir. Böyle bir durumda sadece sarkaç bilgileri değil mekanizma tahrik ünitesinin kinematik bilgileri de sisteme geri beslenmek zorundadır.

Bu şartlar kontrol edilmesi gereken sistemin ne kadar karmaşık olduğunu ve kontrolünün de bir o kadar zor olacağını ortaya koymaktadır. Literatürde böyle bir çalışmaya sık rastlanmamasının en önemli nedeni bahsedilen bu zorluk seviyesidir. Bu durum tez çalışmasının diğer bir özgün yönünü bize göstermektedir.

Kontrolcü tasarımı, kontrolcünün denetleyeceği sistemler ve bu sistemlerin kullanım amaçlarına göre özel olarak yapılır. Bunun sebebi her sistemin farklı yapısal parametrelere sahip olması ve sistemin kullanım amacına bağlı olarak farklı performans kriterlerine ihtiyaç duyulmasıdır. Bu tez çalışmasının diğer bir özgün değeri de önerilen uzaysal ters sarkaç konfigürasyonunun özgün yapısından dolayı daha önce böyle bir sistem için standart bir kontrol metodunun bulunmuyor olmasıdır. Önerilen sistemin kontrolü üzerine başarılı veya başarısız olarak nitelendirilebilecek herhangi bir kontrolcü tasarım çalışması yoktur. Önerilen kontrolcüler ile böyle bir sistemin denetimi için yüksek performanslı kontrolcüler önerilmektedir.

1.5. Tez Organizasyonu

- Bölüm 1: Uzaysal ters sarkaç sistemleri, çeşitleri ve kullanım alanları hakkında genel bir giriş, tezin konusunun belirlenmesindeki motivasyonu, tezin amacını ve hedeflerini içermektedir.
- Bölüm 2: Daha önce tez çalışması ile benzer olarak yapılan deney düzeneklerinin tasarımı üretimi ve kontrolü hakkında detaylı bilgi verilmiştir.
- Bölüm 3: Deney düzeneğinin tasarım sürecini, tasarım ve üretimde kullanılan tüm mekanik, elektronik ve elektromekanik donanım ve ekipmanları, düzeneğe ait kinematik ve dinamik denklemlerin türetilmesini, son olarak kontrolcü tipleri ve tasarımını içermektedir.
- Bölüm 4: Çalışma boyunca elde edilen sonuçları içermektedir.
- Bölüm 5: Elde edilen sonuçların özetini, sonuçların tartışılması ve yorumlanmasını ve ileride yapılacak çalışmalar için önerileri içermektedir.

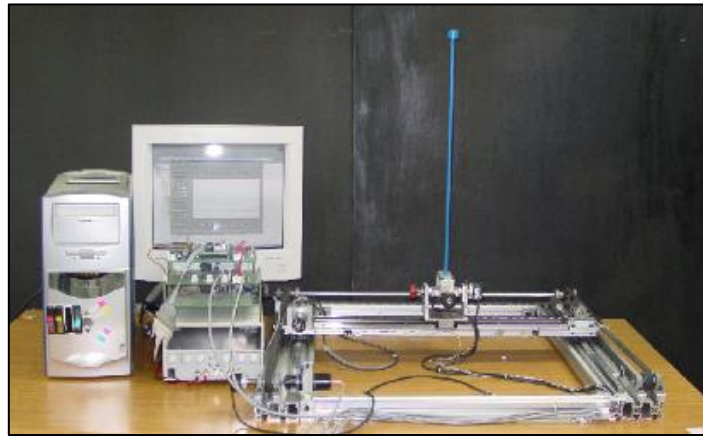


2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Bu kısımda literatürde bulunan ters sarkaç tanımlamaları, mevcut ters sarkaç çeşitleri, ters sarkaçların kullanım alanları, sistemin fiziksel ve matematik modeli, düzlemsel mekanizma tasarımı ve ters sarkaç kontrol yöntemleri üzerine yapılmış çalışmalar üzerinde durulacak, teze konu olan çalışmanın literatürdeki durumunun bir fotoğrafı çekilecektir.

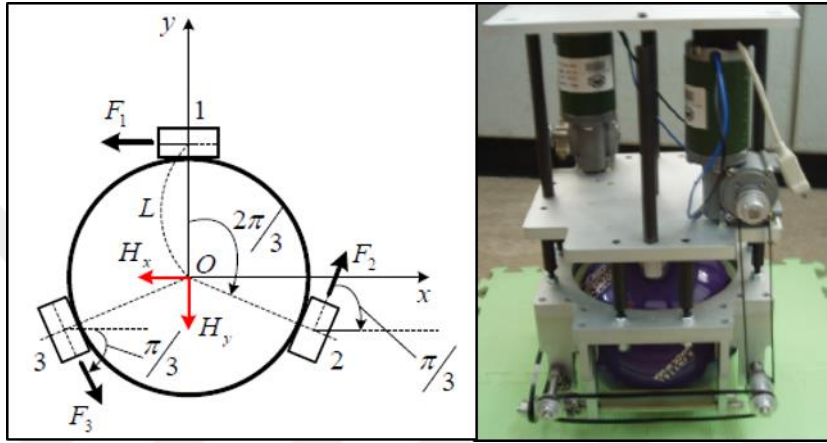
2.1. Uzaysal Ters Sarkaç Sistemleri

Uzaysal ters sarkaç sistemleri literatürde ters sarkacın dengelenmesinde kullanılan mekanizmaya bağlı olarak üç şekilde sınıflandırılmıştır (Ishii ve ark., 2009). Bu üç sınıflandırmaya Soto ve Campa (2014)'nın çalışmaları da dördüncü olarak eklenebilir. Sınıflandırmalar arasında ilk model, X-Y masası üzerine bağlanmış uzaysal bir ters sarkacın, yere paralel yatay düzlem içerisinde x ve y yönlerinde doğrusal hareket uygulanarak kontrol edildiği sistemlerdir (Şekil 2.1). Bu sistemlerde uzaysal ters sarkaç, x ve y yönlerinde birbirinden bağımsız doğrusal harekete sahiptir. Bu sistemlerin modellenmesi basit olup dengeleme işlemi de aynı şekilde kolaydır (Chopra ve ark., 2015; Hakim ve Sahoury, 2018).



Şekil 2.1. X-Y masası tipli uzaysal ters sarkaç (Sung ve ark., 2008).

İkinci tip olarak uzaysal ters sarkaçların çok yönlü araç üzerine konularak dengelendiği sistemlerden bahsedilebilir. Bu sistemlerde X-Y masasından farklı olarak aynı düzlemsel hareket, birden fazla yönde hareket edebilen tekerlekler kullanılarak elde edilmektedir (Şekil 2.2). X-Y tipli sistemlerden bir diğer farkı ise ters sarkacın kendi eksenini etrafında da hareket ettirilebiliyor olmasıdır. Bu sistemlerin matematiksel modeli kolay elde edilse de sahip olduğu doğrusal olmayan yapı kontrol işlemini göreceli olarak zorlaştırmaktadır (Viet ve ark., 2012; Chiu ve Wang, 2018).



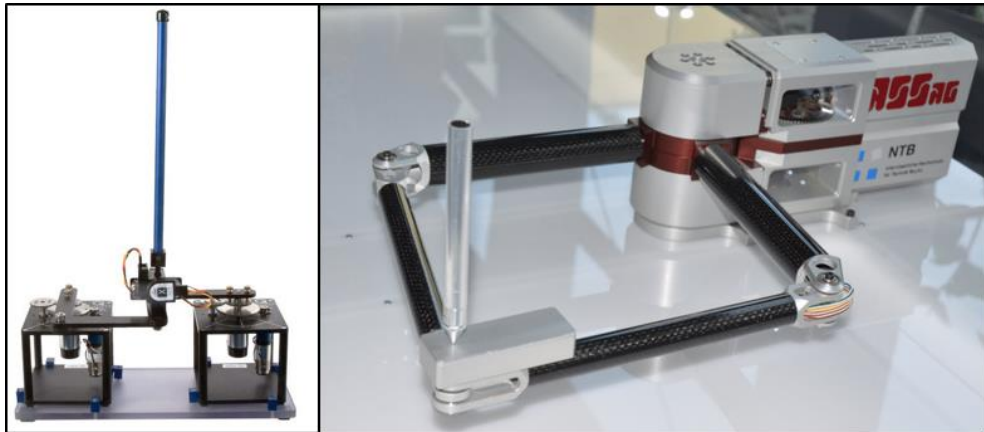
Şekil 2.2. Çok yönlü uzaysal ters sarkaç (Viet ve ark., 2012; Chiu ve Wang, 2018).

Üçüncü durumda uzaysal bir sarkacın dengelenmesi için seri konfigürasyona sahip robot kollar kullanılmaktadır (Şekil 2.3). Çalışmalarda sisteme ait doğrusal olmayan dinamik denklemler Euler veya Lagrange yöntemleri yardımıyla elde edilebilmektedir. Bu sistemlerde dinamik denklemler içerisinde çok fazla doğrusal olmayan terim bulunduğundan kontrol işlemi her ne kadar zor gibi görünse de, denklemlerin doğrusallaştırılması yardımıyla başarılı kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Bu tip çalışmalarda öncelikle, dinamik denklemler uzaysal ters sarkacın kararsız üst noktasında doğrusallaştırılarak nispeten daha kolay bir problem elde edilmekte ve daha sonra bu problem üzerinden kontrolcü tasarımı yapılmaktadır (Albouy ve Praly, 2000; Chung ve ark., 2000).



Şekil 2.3. Robotik kol ile dengelenen ters sarkaç sistemi.

Dördüncü ve son durumda uzaysal bir ters sarkaç, beş çubuk mekanizması olarak bilinen üzerinde çokça çalışılmış bir düzlemsel mekanizma üzerine konularak dengelenmektedir. Bu sistemlerde uzaysal ters sarkaç iki adet dönel hareket girişine sahip mekanizmanın ürettiği hareket ile kontrol edilir (Şekil 2.4). Beş çubuk mekanizması ve uzaysal ters sarkacın birleştirilmesi ile oldukça kompleks yapıya bürünen bu sistemler üçüncü tip uzaysal ters sarkaçlar ile benzer şekilde kontrol edilmiştir. Sistemin doğrusal olmayan dinamik modeli elde edilmekte ve model benzer şekilde doğrusallaştırılarak problem daha az karışık bir yapıya indirgendikten sonra kontrolcü tasarımı yapılmaktadır (Ishii ve ark, 2009; Soto ve Campa, 2014)



Şekil 2.4. 5R mekanizması üzerine konulan uzaysal ters sarkaç sistemleri.

Bu tez çalışmasında doğrusal ve d6nel girişlere sahip d6zlemsel bir mekanizmayı kullanan teorik ve gerçek zamanlı bir çalışma yapılmıştır. Literat6rde bu çalışmada kullanılacak olan RRRRP (R: d6nel mafsalsal, P: Prizmatik mafsalsal) konfig6rasyonuna sahip bir mekanizmanın yer aldığı herhangi bir tasarım veya çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durum tez çalışmasını yukarıda bahsi geçen benzer çalışmalardan ayırmaktadır.

2.2. Uzaysal Ters Sarkaçların Kontrol6

Bilindiği 6zere kontrol y6ntemleri genel olarak model bağımlı ve model bağımsız y6ntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Sistemi g6l6 şekilde temsil eden dinamik modelin elde edilebildiği durumlarda kayan kipli kontrol, model tahminleyici kontrol ve hesaplamalı tork metodu gibi y6ntemler kullanılırken, modelin elde edilemediği durumlarda ise yapay sinir ağları, bulanık mantık ve PID gibi y6ntemlere başvurulmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken daha 6nce bahsettiğimiz d6rt farklı tipteki d6zenek 6zerinde y6r6t6len çalışmalarda model bağımsız ya da doğrusallaştırılmış model 6zerinden tasarlanmış kontrolc6lerin daha sık kullanılmış olmasıdır. 6nceden bahsedilen X–Y tipindeki sistemlerde PID kontrol kullanılarak yapılan başarılı kontrolc6 tasarımları bulunmaktadır (Chopra ve ark., 2015; Hakim ve Sahoury, 2018). Ayrıca yine çok benzer bir sistem 6zerinde kayan kipli kontrol (Wai ve Chang, 2006a), yapay sinir ağları (Jung ve ark., 2007), bulanık sinir ağları (Wai ve Chang, 2006b) ve adaptif kayan kipli kontrol (Wai ve ark., 2003) kullanılarak yapılan çalışmalar da mevcuttur.

Çok y6nl6 uzaysal ters sarkaçların kontrol6ne bakıldığında her ne kadar bir 6nceki model 6zerinde yapılan kadar olmasa da literat6rde başarılı çalışmalar ile karşılaşmak m6mk6nd6r. Adaptif geri beslemeli kontrolc6n6n kullanıldığı bir çalışmada uzaysal ters sarkaç kararsız 6st noktada dengelenmiş ve tasarlanan kontrolc6n6n Lyapunov fonksiyonu yardımıyla kararlı yapıda olduğu g6sterilmiştir (Viet ve ark., 2012). Bununla birlikte benzer d6zeneklerin kullanıldığı diğer çalışmalar arasından bulanık mantık ve doğrusal karesel d6zenleyici (Lauwers ve ark., 2006; Peng ve ark., 2009) yardımıyla yapılan başarılı kontrolc6ler dikkat çekmektedir. İkinci tip sarkaçlara g6re çok daha az rastlanan 66nc6 tip sistemlere bakıldığında 6 serbestlik dereceli bir robot kol yardımıyla uzaysal bir ters sarkacın başarılı şekilde dengelendiği g6r6lmektedir. Araştırmacılar bu çalışmada uzaysal ters sarkacın ereksiyonu 6zerine çalışmışlar ve

kaldırma işlemini enerji ve kinetik momentum temelli iki adet doğrusal ve bir adet doğrusal olmayan kontrolcü yardımıyla gerçekleştirmişlerdir (Albouy ve Praly, 2000). Diğer bir çalışmada ise uzaysal bir ters sarkacın yine üç serbestlik dereceli fakat düzlemsel hareket yapan bir seri robot kol yardımıyla dengelendiği görülmektedir. Çalışmada dinamik denklemler doğrusallaştırılmış ve elde edilen doğrusal durum uzayı yardımıyla doğrusal kuadratik düzenleyici (LQR) tasarlanarak sistem kararlı hale getirilmiştir (Chung ve ark., 2000). Dördüncü ve en az karşılaşılan tip olan beş çubuk mekanizması ve uzaysal ters sarkacın birlikte kullanıldığı sistem üzerine literatürde sadece iki çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların ilkinde araştırmacılar doğrusallaştırılmış dinamik denklemler yardımıyla H_∞ gürbüz kontrol yöntemi temelli kontrolcü tasarlamış ve uzaysal bir ters sarkacı başarılı şekilde kararlı hale getirmişlerdir (Ishii ve ark., 2009). Düzenek olarak çok benzer fakat kullanılan kontrol yöntemiyle ayrılan ikinci çalışmada ise yine doğrusallaştırılmış model üzerinden doğrusal kuadratik düzenleyici yardımıyla uzaysal bir ters sarkaç kontrol edilmiştir (Soto ve Campa, 2014). Görüldüğü üzere uzaysal ters sarkaçlar üzerine yapılan çalışmaların sayısı dengelemede kullanılan mekanizmanın karmaşıklığı arttıkça azalmaktadır. Ayrıca özellikle üçüncü ve dördüncü tip sistemler üzerinde yapılan çalışmalarda genellikle tek bir kontrol yönteminin uygulandığı ve birden fazla yöntemin denenerek aralarında kıyasa gidildiği herhangi bir çalışmanın olmaması gözden kaçırılmamalıdır.

2.3. Kinematik Sentez ve Matmaksel Modelleme

Ters sarkaç kontrolünün temel elemanı sarkacı taşıyan ve sarkaca yön veren tahrik mekanizmasıdır. Bundan dolayı tahrik mekanizmasının tasarımı bu çalışmada ayrı bir önceliğe sahiptir. Mekanizma sentezi, istenilen hareketin elde edilmesi konusunda mekanizma türünün (sentez tipi) ve mekanizmayı oluşturan uzuv boyutlarının tanımlanması için takip edilmesi gereken bir prosedürdür (boyutsal sentez). Bu prosedür yardımıyla istenilen performans özelliklerinin maksimum veya minimum yapılması hedeflenerek belirli optimizasyon yöntemleri yardımıyla optimum tasarımlar yapılmaya çalışılır (Olson ve ark., 1985). Bu tez çalışmasında düzlemsel mekanizmanın ters sarkaç kontrolünü doğrudan etkileyen çalışma alanı ve mafsal uzayı özellikleri belirlenmiş ve optimize edilmiştir. Literatürde farklı türde mekanizmalar için yapılan çalışma alanı (Liu ve ark., 2008) ve tekillik analizleri (Jun ve ark., 2007; Chablat, 2010) bulunmaktadır.

Bunların dışında tez çalışmamız ile benzer olarak genetik algoritma kullanılarak yapılan optimizasyon tabanlı sentez çalışmaları da mevcuttur. Cabrera ve ark. (2002) yaptığı çalışmada genetik algoritma kullanarak yeni bir mekanizma sentez yöntemi önermiş ve yöntemi dört çubuk mekanizması üzerinde başarılı şekilde kullanmıştır. Çalışma sonunda önerdiği yöntemin düşük hata üreten ve çabuk yakınsayan yapıda olduğunu ortaya koymuş ve genetik algoritmanın diğer mekanizmalar için de başarılı şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu alanda bir diğer önemli çalışma önerilen tezde danışman konumunda olan Dr. Öğretim Üyesi Atilla Bayram tarafından yapılmıştır. Bayram ve Özgören (2012) yaptığı çalışmada genetik algoritmayı aşırı artıksal bir manipülatöre ait çalışma alanının oluşturulması için kullanmış ve başarılı olmuşlardır. Bu kapsamda tasarımı yapılan mekanizmanın uzuv boyutları da genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon çalışması ile elde edilmiştir. Pratik kullanıma, ayarlanabilir parametrelere ve global optimuma yakınsayan yapıya sahip genetik algoritma ile ters sarkaç kontrol mekanizmasının çalışma uzayı ve mafsalsal uzayı optimizasyonuna dayalı mekanizma sentezi gerçekleştirilmiştir.

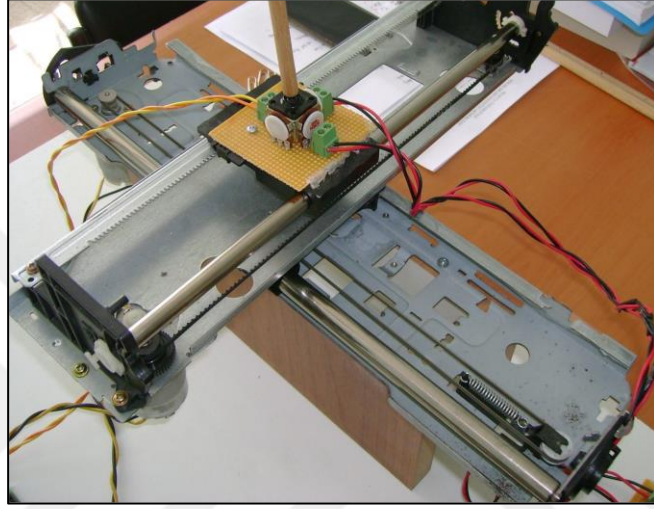
Bir sistemin başarılı şekilde kontrol edilebilmesi için sistemi yüksek doğrulukla temsil edebilen matematik modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Literatürde bu konuda kullanılabilecek farklı yöntemler mevcuttur. Bunlar arasında Newton yöntemi (serbest cisim diyagramları kullanılarak), Euler-Lagrange (veya sadece Lagrange) yöntemi (Zhong ve Röck, 2001) ve D'Alembert (sanal iş) yönteminin (Jadlovská ve Sarnovsky, 2013) kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Tez çalışmasında tepki kuvvetlerini kullanarak sistemi karmaşık hale getiren Newton yöntemi yerine, potansiyel ve kinetik enerjiler üzerinden giderek daha sade bir çalışma sunan Lagrange yöntemi kullanılmıştır.

2.4. Ters Sarkaç Donanımları

Hızlı ve çevik bir kontrol için düzgün mekanik parçalar ve sistem karakterine uygun elektronik donanımlara ihtiyaç vardır. Bu noktada motor sürücüleri, enkoderler, DC motorlar, veri toplayıcı kart ve güç kaynağı gibi elektronik donanımların seçimi yapılırken mevcut çalışmalarda kullanılan donanımların özelliklerinin bilinmesi faydalı olacaktır.

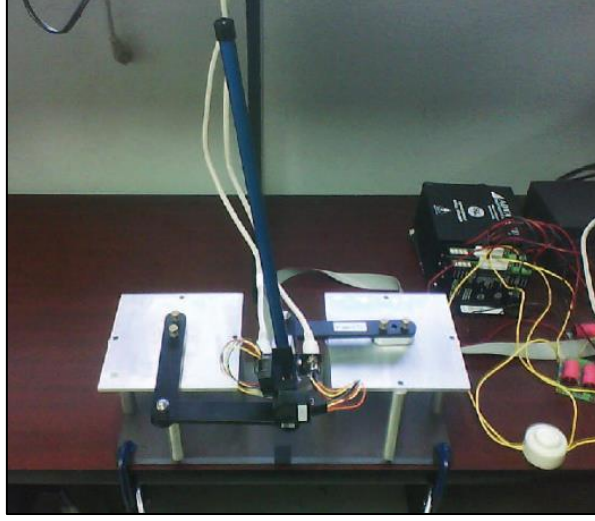
Arda (2008), tez çalışmasında Şekil 2.5' te de görüldüğü gibi iki serbestlik dereceli uzaysal bir ters sarkaç sistemini fiziki olarak oluşturmayı başarmış ve bu sistemi iki alt

sisteme ayırarak PID yöntemi yardımıyla kontrol etmiştir. Daha önce bahsedilen X-Y masalı tipteki ile büyük benzerlik gösteren bu çalışmada, haberleşme kartı olarak NI-USB 6211 veri toplama kartı (DAQ), sarkaç açılarının okunabilmesi için 1000 Ohmluk dirence sahip bir adet joystick potansiyometre, iki adet fırçalı DC motor, 55V ve 3A değerine kadar kullanılabilen LMD18200 entegreye sahip iki adet sürücü ve bir adet 300W 12V güç kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 2.5. X-Y masası tipli uzaysal ters sarkaç deney düzeneği (Arda, 2008).

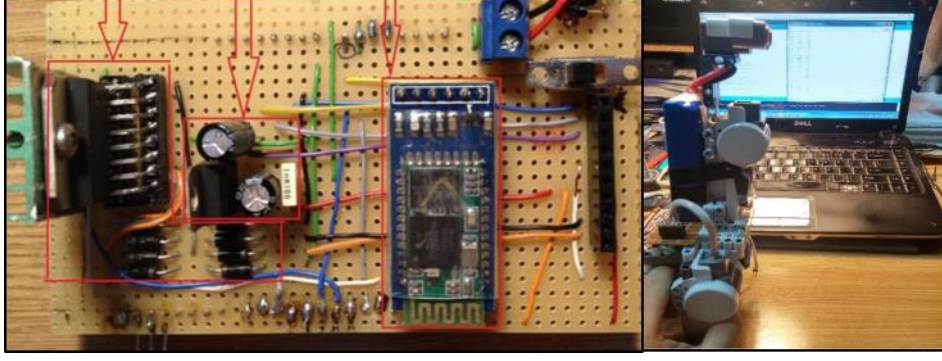
Daha önce de bahsedildiği üzere Soto ve Campa (2014) çalışmalarında beş çubuk mekanizması üzerine uzaysal bir ters sarkaç oturarak bir deney düzeneği oluşturmuşlardır. Bu noktada düzeneklerinde kullandıkları elektronik ekipmanların bilinmesi faydalı olacaktır. Çalışmada MATLAB/Simulink ile uyumlu çalışabilen Sensoray626 markalı bir veri alışveriş kartı, sarkaç açılarını ölçmek için iki adet USDigital marka 1024 pulse çözünürlüğe sahip enkoder, 2 adet AMC marka BE1518 motor sürücü ve iki adet üzerinde redüktör ve enkoder bulunan Faullhaber marka 2224U006 model motor kullanılmıştır. Ayrıca araştırmacılar tüm sistemi 24V bir güç kaynağı ile beslemişlerdir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Uzaysal ters sarkaç deney düzeneği (Soto ve Campa, 2014).

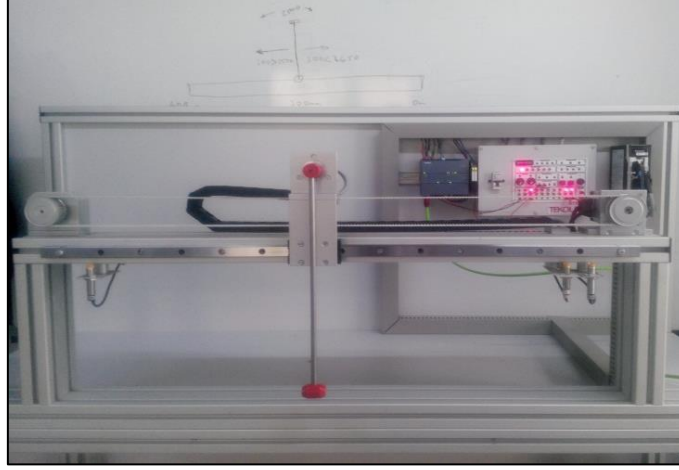
Kızır (2008) yaptığı çalışmada öncelikle tek ekseninde doğrusal hareket edebilen bir araba üzerine tekli bir ters sarkaç koyarak fiziksel bir deney düzeneği oluşturmuş daha sonra bu sistemi PID ve bulanık mantık yardımıyla kontrol etmiştir. Sinyal haberleşmesi için MATLAB/Simulink ile uyumlu çalışabilen dSPACE DS1103 kart kullanan araştırmacı sisteme gerekli hareketi verebilmek için ise 400W gücünde 3 fazlı Metronix marka bir servo motor ve yine aynı markaya ait bir motor sürücüsü kullanmıştır. Arabanın konumunu ölçmek için 1024 darbe/tur, sarkaç açılarını ölçmek için ise 1000 darbe/tur enkoder kullanan araştırmacı bu ölçümlerde sırasıyla araba konumu için 124 μm sarkaç açısı için ise 0.36° ölçüm çözünürlüğü ile çalışmıştır.

Yapılan farklı bir çalışmada Grănescu ve ark. (2015) tekerlekli bir uzaysal ters sarkaç tasarlayıp bu sisemi LQR ve PID yöntemiyle başarı ile kontrol etmişlerdir. Burada dikkat edilmesi gereken çalışmada kontrolcü durumunda olan bir bilgisayar ile haberleşmek için Arduino Mega 2560 mikrokontrolcü ve HC-05 bluetooth modülü kullanıldığıdır. Araştırmacılar hareket için iki adet 1/48 düşürme oranına sahip redüktörlü DC motor, bu motorların konumlarını okumak için iki adet 720 darbe/tur enkoder, sistemin açısal ivmesini ölçebilmek için de bir adet Arduino uyumlu MPU6050 elektronik jiroskop kullanmışlardır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Tekerlekli uzaysal ters sarkaç sistemi (Grănescu ve ark., 2015).

Son olarak Ertuğrul (2015) yaptığı çalışmada tek eksiksillik derecesine sahip bir arabalı ters sarkaç sistemi tasarımı yaparak bu sistemi kontrol etmiştir. Çalışma kullanılan donanımlar ile araştırmacılara yol gösterici olabilir. Düzenekte kontrol ve sinyal işleme görevinde Siemens marka bir PLC, arabanın tahrik edilmesi görevinde PANASONIC marka 400W gücünde bir servo motor ve MİNAS A5 model bir servo sürücü ve biri motor konumu diğeri ise sarkaç açısının ölçülmesi için 2500 darbe/tur özellikte iki adet optik artımsal enkoder kullanılmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. PLC ile kurulan deney düzeneği (Ertuğrul, 2015).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasının gerçekleştirilme aşamaları ayrıntılı olarak ele alınıp açıklanacaktır. Daha önce de bahsedildiği üzere çalışma iki serbestlik dereceli uzaysal ters sarkaç sisteminin tasarımı, üretimi ve kontrolünü içermektedir. Buna paralel olarak materyal ve metot üç aşamada anlatılabilir.

3.1. Uzaysal Ters Sarkaç Sistemi Tasarımı

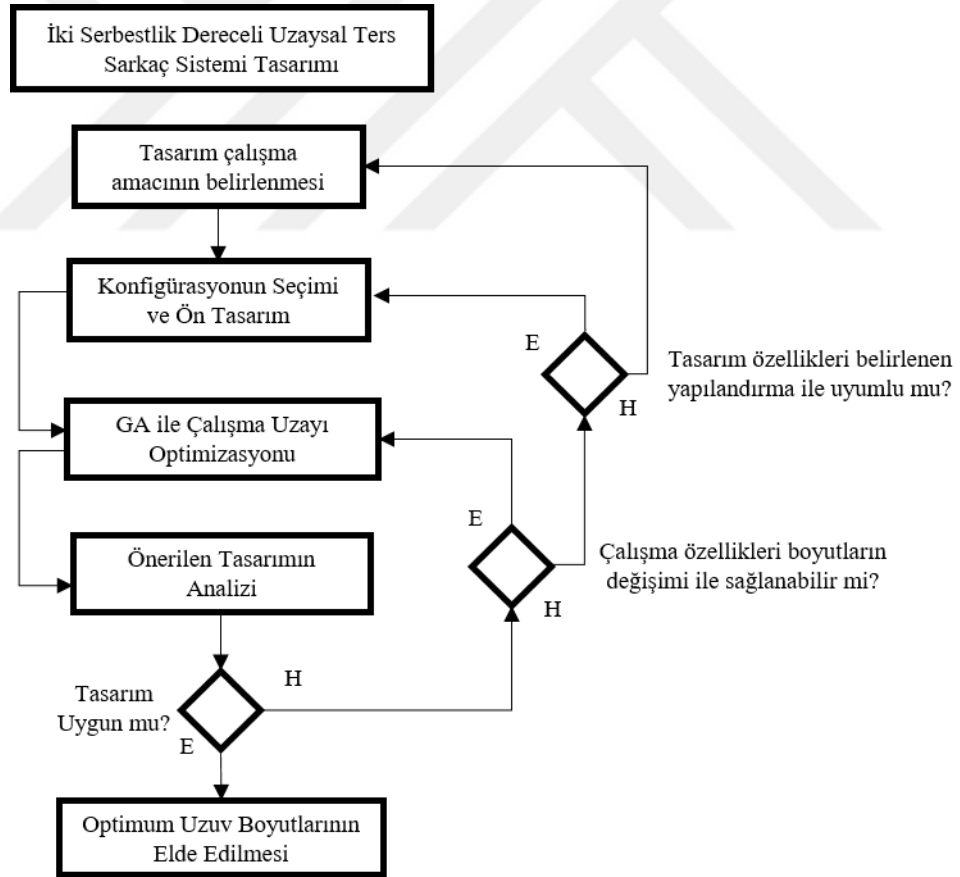
Daha önce de değinildiği üzere ters sarkacın dengede tutulmasını veya tekrar dengelenmesini sağlayacak değişken yön ve şiddetteki dinamik dengeleme kuvvetlerine ihtiyaç vardır. Dengeleyici dinamik kuvvetler ters sarkacın alt kaideyle olan bağlantı noktasının tekrardan konumlanmasını sağlayarak dengeleme işini gerçekleştirmektedir. Dolayısıyla dengeleme kuvvetlerinin düzgün şekilde üretilebilmesi ve iyi bir kontrol için, sarkacın tahrik mekanizmasına bağlandığı kuvvet uygulama noktasının olabildiğince geniş bir çalışma alanı içinde olması ve aynı zamanda tahrik elemanlarının bu bölge içinde sürekli hareket yeteneğine sahip olması gerekmektedir. Çalışma alanı bağıl olarak ne kadar geniş olursa kontrol yeteneği de aynı oranda artacaktır. Buna karşılık ters sarkaç bağlantı noktasının hareketi, belirli noktalarda süresiz ise; başka bir deyişle mekanizma bazı noktalarda kilitleniyor ve bu sebeple sarkaca olan hareket iletimi kesiliyorsa bu noktalarda sistem kontrol edilemez duruma gelecektir. Bu durum, hareketi sağlayan motor ve uzuvların yeterli dönme serbestisinde olmaması durumunu; yani, tahrik ünitesi üzerinde sınırlamaların olduğu sonucunu doğuracaktır.

Düzlemsel mekanizma çalışma alanının büyüklüğü (ters sarkaç bağlantı noktasının hareket edebileceği alanın genişliği) ve mekanizma mafsallarının hareket kabiliyeti (mafsal çalışma uzaylarının büyüklüğü) mekanizmayı oluşturan mekanik uzuvların boyutları ile doğrudan bağlantılıdır. Bu bağlamda hareket kısıtlarından kaynaklanan problemlerin önüne geçmek için çalışma alanı ve mafsal uzayı üzerinde bir optimizasyon çalışması yapmak gerekmektedir. Bu kapsamda en iyi sonuçları verecek uzuv boyutları optimizasyon çalışması ile elde edilecektir. Dikkat edilmesi gereken çalışma alanı iyileştirmelerinin uzuv boyutlarının arttırılması ile değil,

boyutsuzlaştırılmış uzuvların kendi aralarındaki oranlara göre yapılan bağıl değişimler ile yapılacak olmasıdır. Boyutların elde edilmesi ile iki serbestlik dereceli düzlemsel mekanizmaya ait mekanik tasarımın teorik kısmı tamamlanmış olacaktır.

3.1.1. Mekanizma sentezi

İstenilen tasarım kıstas ve performanslarına sahip bir mekanizmanın tasarımı ve tasarım sürecinde ortaya çıkan zahmetli süreçlerin (deneme-yanılma) önüne geçilmesi için literatürde bir mekanizma sentez prosedürü bulunmaktadır (Natesan, 1994). Bu çalışmada ise prosedür, uzaysal ters sarkaç sistemine ait tahrik mekanizmasının tasarımında kullanılmıştır. Şekil 3.1’ de bu prosedürde takip edilen adımlar gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Mekanizma tasarım prosedürü.

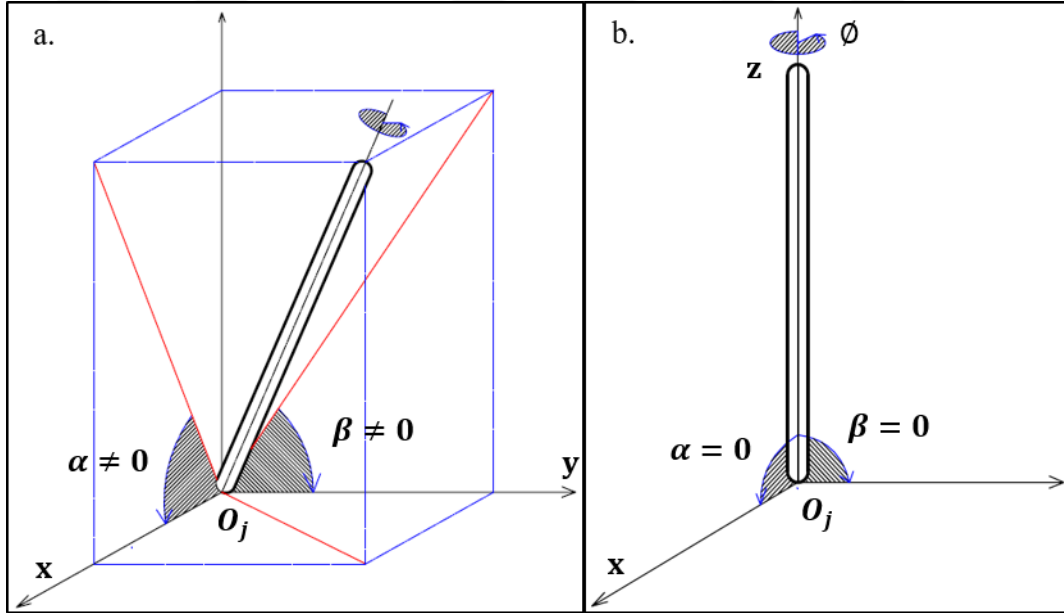
Tasarım prosedürü genel olarak mekanizma tipinin belirlenmesi ve boyutsal sentez olarak ikiye ayrılır. Boyutsal sentez sürecin zor ve uzun kısmını oluşturmaktadır. Yöntemin ilk basamağı tasarım konsept ve amacının belirlenmesidir. Ayrıca amaç kapsamında ihtiyaç duyulacak harekete ait özellikler de bu aşamada belirlenir. Sürecin ikinci adımı hareketi üretecek konfigürasyonun belirlenmesi üzerine olmaktadır. Bilindiği üzere belirli özelliklerdeki bir hareket, farklı yapıya sahip mekanizmalar kullanılarak üretilir. Bu kapsamda mekanizmanın türü daha çok araştırmacının ihtiyaç, tecrübe ve yaratıcılığına bağlı olarak değişir. Tip ve konfigürasyonun belirlenmesinden sonra boyutsal sentez gelir. Bu aşama sentezin en önemli ve yorucu kısmını oluşturmaktadır. Boyutsal sentezle, istenen hareketin dönüşüm ve iletimini yapacak bir mekanizmaya ait uzuv boyutlarının belirlenmesi amaçlanır. Farklı bir deyişle, kinematik analiz belirli boyutlara sahip bir mekanizmanın hareket özelliklerini bulmak için kullanılırken, boyutsal sentez bunun tam tersi olarak belirli özelliklerdeki hareketi üretecek bir mekanizmanın ortaya çıkarılması ile ilgilenmektedir.

Boyutsal sentez günümüzdeki yüksek hızlı bilgisayarlar sayesinde eskiye göre daha rahat şekilde yapılabilmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde geometrik yöntemlerin yerini eskiden karmaşık yapısı sebebiyle tercih edilmeyen matematiksel optimizasyon yöntemleri almıştır. Matematiksel programlama olarak bilinen ve matematiğin bir alt dalı olan optimizasyon sayesinde minimize veya maksimize edilecek hedef fonksiyonlar kullanılarak sonuca ulaşılmaktadır. Bu bağlamda optimizasyonun boyutsal sentezde kullanımı mekanizmanın belirli performans özelliklerine bağlı olarak tanımlanan bir hedef fonksiyon yardımıyla, bu performans özelliklerini maksimum yapan uzuv boyutlarının elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Boyut tayininden sonraki adım konfigürasyon ve boyutları belirlenen ön tasarımın analizidir. Analiz mekanizmaya ait kinematik denklemlerin elde edilmesi ile başlar ve sistemin ürettiği hareket özelliklerinin belirlenmesi ile tamamlanır. Bu aşamada sorulacak soru tasarlanan mekanizmanın hareket özellikleri ile yöntemin başında hedeflenen hareket özelliklerinin ne kadar uyumlu olduğudur. Eğer elde edilen ile amaçlanan yeterince uyumlu ise bu durumda tasarım tamamlanmış olacaktır. Fakat ikisi arasında uyumsuzluk var ise bu durumda yapılacak şey problemin boyutlar ile ilgili olup olmadığından emin olmaktır. Problem boyutsal ise boyutsal sentezde kullanılan optimizasyon yöntemi değiştirilebilir ve yeni optimal boyutlar yardımıyla sorun

çözölmeye çalışılır. Problem boyutlarda değil ise yapılacak şey boyutsal sentezden bir önceki adıma geri giderek konfigürasyon seçimini değiştirmek ve kalan adımları tekrarlamaktır. Aşağıdaki bölümde iki serbestlik dereceli ters sarkaç sistemi için bu prosedürün detaylı bir uygulaması üzerinde durulacaktır.

3.1.1.1. Tasarım konsept ve amacının tanımlanması

Daha öncede belirtildiği üzere tez çalışmasının konusu genel olarak ters sarkaç problemi olup aynı zamanda bu uzaysal bir ters sarkacın kontrolüdür. Tasarım amacının daha iyi anlaşılması adına control edilmek istenen uzaysal ters sarkaç Şekil 3.2' de gösterilen görseller yardımıyla açıklanacaktır.



Şekil 3.2. Uzaysal ters sarkacın a. kararsız, b. kararlı durumda gösterimi

Yukarıdaki şekilde L uzunluğuna sahip uzaysal bir ters sarkaç görölmektedir. Cismin ağırlık merkezi G , dönme merkezi (bağlantı noktası) ise O_j noktasındadır. Cismin konumlandırılmasında α , β ve \emptyset açılardan faydalanılmıştır. Bu açılardan α sarkacın $x - z$ düzlemi üzerindeki izdüşümünün x eksenini ile yaptığı açıyı, β sarkacın $y - z$ düzlemi üzerindeki izdüşümünün y eksenini ile yaptığı açıyı temsil etmektedir. Ayrıca \emptyset sembolü ile sarkacın kendi eksenindeki dönme açısı gösterilmektedir. Şekildeki ters sarkacın dengede olabilmesi için α ve β açılarının 90° ye getirilmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle noktasal ağırlık merkezi (G) ile dönme merkezi (O_j),

$x - y$ düzlemine dik doğrultuda konumlandırılmalıdır. Bunun yolu ise O_j noktasının $x - y$ düzlemi içerisinde hareket ettirilmesidir. Hareket sonunda ters sarkaç bağlantı noktası (O_j) ve noktasal ağırlık merkezi (G) aynı dik doğrultu üzerine getirilmiş ve denge sağlanmış olacaktır. Buradan çıkarılacak en önemli sonuç dengeleme için gereken hareketin düzlemsel özellikte olması gerektiğidir.

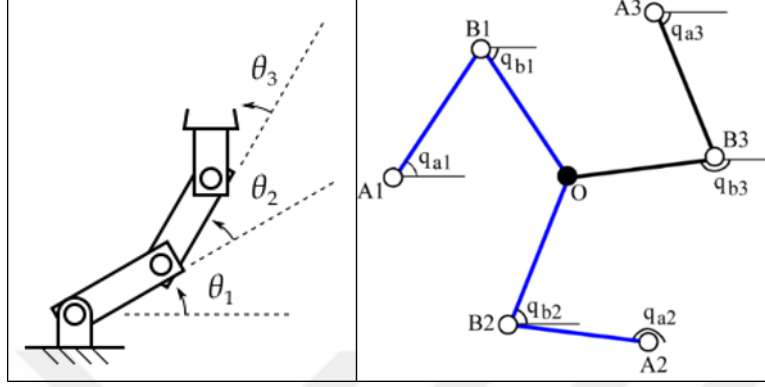
Üzerinde sınırlandırma bulunmayan bir cismin düzlem içerisindeki serbestlik derecesi üçtür. Bu ifadenin diğer bir anlamı bir cismin düzlem içerisinde tanımlanabilmesi için en az üç adet bağımsız parametre gerektiğidir.. Bu noktada dikkat edilmesi gereken ters sarkacın dengelenmesi için kendi eksenine etrafındaki dönme hareketine ihtiyaç duyulmadığıdır. Bunun sebebi dönme hareketinin (ω_ϕ), O_j noktasının düzlem içerisindeki konumu üzerinde etkisiz olmasıdır. Sonuç olarak O_j noktasının konumu $x - y$ düzlemindeki iki öteleme hareketi ile değiştiğinden dengeleme için gereken hareketin doğrusal özellikte olduğu açıkça görülmektedir.

Toparlamak gerekirse uzaysal bir ters sarkacın kararlı bir nokta etrafında dengelenebilmesi için sarkacın dönme merkezine düzlemsel öteleme hareketinin uygulanması, dolayısıyla tez çalışmasında bu özelliklerdeki hareketi üretecek bir tasarımın yapılması gerekmektedir. Bu bölümün sonunda uzaysal ters sarkaç probleminin kinematik tasarım konsepti ve çalışma amacı tanımlanmış, başarılı bir kontrol için üretilmesi gereken hareketin özellikleri belirlenerek mekanik sentez prosedürünün ilk basamağı tamamlanmış olacaktır.

3.1.1.2. Konfigürasyon seçimi ve ön tasarım

Bu bölümde düzlemsel öteleme hareketiyle dengelenmesi düşünülen uzaysal bir ters sarkaç sisteminin tahrik mekanizması için genel konfigürasyon tespiti ve devamında da bu mekanizma için bir ön tasarım çalışması yapılacaktır. Öncesinde bahsedildiği üzere belirli özelliklere sahip bir hareket farklı konfigürasyonlardaki mekanizmalar kullanılarak üretilir. Başka bir deyişle aynı özelliklere sahip hareketin üretilmesi için çok farklı mekanizma tasarımları yapılabilir. Tasarım yapıları genellikle mekanizmanın kullanım yeri ve amacına göre değişiklik göstermektedir. Mekanizmalar seri, paralel ve iki türün birlikte kullanıldığı hibrit mekanizmalar olarak üçe ayrılır. Düzlemsel bir hareket düzlemsel ve/veya uzaysal seri, paralel ya da hibrit konfigürasyondaki

mekanizmalar ile üretilebilmektedir. Bu aşamada doğru konfigürasyonun seçilebilmesi için bu türler üzerinde kısaca durmak gerekir. Aşağıda sırasıyla düzlemsel seri ve düzlemsel paralel mekanizmalar görülmektedir.



Şekil 3.3. Düzlemsel seri ve düzlemsel paralel mekanizma örnekleri.

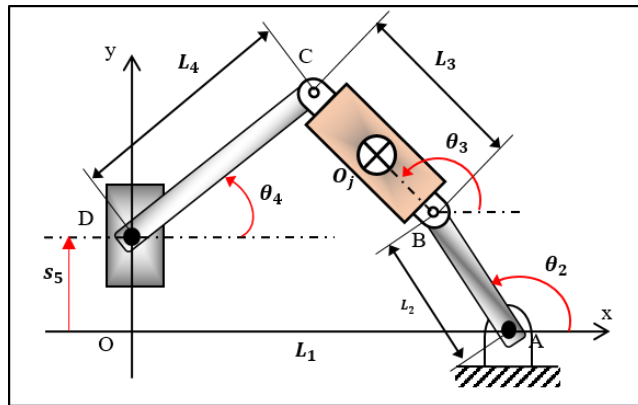
Şekil 3.3' de görüldüğü üzere seri manipülatörler tabandan bir uç işlemciye kadar birbirine motorlu eklemler yardımıyla seri olarak bağlanan bir dizi uzuvdan oluşmaktadır. Serbestlik derecesine göre uzaysal veya düzlemsel hareket üretebilen bu mekanizmaların en büyük avantajı geniş çalışma alanı/hacmine sahip olmalarıdır. Dezavantajları arasında ise açık kinematik yapılarından kaynaklanan düşük rijitlik ve uzuvdan uzva artan birikimli hata oluşumundan bahsedilebilir. Bu tür mekanizmalarda uzuv, kendisinden bir önceki elemana taşındığından motorun ve uzvun kendi kütlelerinden kaynaklanan ağırlık ve titreşim de bir önceki uzuv üzerinde yük ve dengesizlikler oluşturmaktadır. Ayrıca taban ekleminin mekanizmaya ait tüm uzuv ve eklemleri taşıyor olması seri mekanizmaların paralel mekanizmalara göre düşük yük taşıma kapasitesine sahip olmasına neden olur.

Paralel mekanizmalarda son işlemci tabana kapalı zincirler yardımıyla bağlanır. Başka bir deyişle paralel mekanizmalarda aynı noktaya bağlı en az iki kol bulunmaktadır. Serbestlik derecesine göre uzaysal veya düzlemsel olarak yapılandırılan bu mekanizmaların en büyük avantajı her biri belli bir avantaj ve dezavantaja sahip yüzlerce mimariye sahip olmalarıdır. Seri robotlara göre çok daha rijit olan paralel mekanizmalarda tabana bağlı birden çok uzuv bulunduğundan daha fazla yük altında daha yüksek doğrulukla çalışılabilmektedir.

Daha önce de bahsedildiği gibi uzaysal ters sarkaca kendi eksenini etrafındaki bir dönme hareketi uygulanması sarkaç kontrolü için gerekli değildir. Bu sebeple tez çalışmasında ters sarkaç kontrolü için iki kontrol girişi kullanılması yeterli olacaktır. Dolayısıyla üç serbestlik dereceli uzaysal bir mekanizma yerine iki serbestlik dereceli düzlemsel bir mekanizma kullanılması basitlik açısından çok önemlidir. Bu kapsamda yüksek rijitlik ve düşük hata avantajı ile öne çıkan paralel mekanizmaların uzaysal ters sarkaç sisteminin tahrik mekanizması olarak kullanılması uygun görülmüştür. Aşağıda tahrik mekanizmasında olması istenen özellikler maddeler halinde verilmiştir.

- Uzaysal bir ters sarkacın kontrolü için tahrik mekanizmasının basitlik açısından iki serbestlik derecesine sahip düzlemsel bir yapıda olması gerekmektedir.
- Tahrik mekanizmasının yüksek rijitlik ve düşük hataya sahip olması istendiğinden mekanizmanın paralel yapıda olması gerekmektedir.
- İki serbestlik derecesi ancak iki giriş ile kontrol edilebileceğinden mekanizma iki adet girişe sahip olmalıdır.

Uzaysal ters sarkacın düzenek üzerine monte edileceği noktada yüksek ivme elde edilebilmesi ve bu ivme yardımıyla hızlı bir tepki oluşturulması tasarlanacak mekanizmadan beklenen en önemli özelliktir. Bu tasarım, istenilen özellikleri karşıladığı kinematik hesaplamalarla da ispat edilecek olan Şekil 3.4' teki **RRRRP** tipindeki (**R**: dönel, **P**: prizmatik) mekanizma konfigürasyonudur. Bu yapılandırmada bir prizmatik ve bir de dönel mafsallı aktif olup mafsallar yardımıyla doğrusal ve dönel tahrik girişleri uygulanarak sarkaç bağlantı noktasında yüksek ivmeler oluşturulacaktır.



Şekil 3.4. RRRRP konfigürasyonlu sarkaç tahrik mekanizması.

Yukarıda belirtilen kıstaslara uygun, iki serbestlik dereceli, bir doğrusal ve bir dönele girişe sahip, düzlemsel ve paralel konfigürasyonda uzaysal ters sarkaç sisteminde tahrik görevini yerine getirecek olan **RRRRP** mekanizması gösterilmiştir. Bu mekanizmada yer (1), dönele giriş uzvu (2), ters sarkaç kaidesi (3), prizmatik hareket bağlantı uzvu (4) ve prizmatik kızak (5) uzuvları bulunmaktadır. Bağlantısı yapılacak ters sarkaç uzvu ise altıncı uzuv olup hareket üretiminden çok hareket uygulanacak uzuv olduğundan burada gösterilmemiştir. Şekil üzerindeki A noktası mekanizmanın yer ile olan bağlantısını ve aynı zamanda elektrik motorunun monte edileceği yeri, O noktası koordinat sistemi orijinini, O_j noktası ise uzaysal ters sarkacın tahrik mekanizması ile olan bağlantı noktasını (kaide noktası olarak ta kullanılmaktadır) göstermektedir. Bu sistemi tanımlayan bağımlı ve bağımsız değişkenler ile birlikte mekanizmayı oluşturan uzuvların boyut parametreleri Çizelge 3.1' de açıklanmış olarak verilmiştir.

Çizelge 3.1 Mekanizma değişkenleri ve sabit parametreler.

Değişkenler	Bağımsız Değişkenler	θ_2	Sisteme uygulanacak dönele giriş değişkeni
		s_5	Sisteme uygulanacak doğrusal giriş değişkeni
	Bağımlı Değişkenler	θ_3	3 numaralı uzvun konum açısı
		θ_4	4 numaralı uzvun konum açısı
Sabit Boyut Parametreleri	Parametre	$ \mathbf{OA} = L_1$	Orijin ve yer bağlantı arası ofset mesafesi
		$ \mathbf{AB} = L_2$	İki numaralı uzvun uzunluğu
		$ \mathbf{BC} = L_3$	Üç numaralı uzvun uzunluğu
		$ \mathbf{CD} = L_4$	Dört numaralı uzvun uzunluğu

Bu bölüm sonunda ters sarkaç sistemi tahrik mekanizması konfigürasyonu belirlenmiştir. Bundan sonraki adım boyutsal sentez olup, bu adımda tahrik mekanizmasının çalışma alanı ve mafsal uzayını maksimum yapan uzuv boyutlarının belirlenmesi üzerinde durulacaktır.

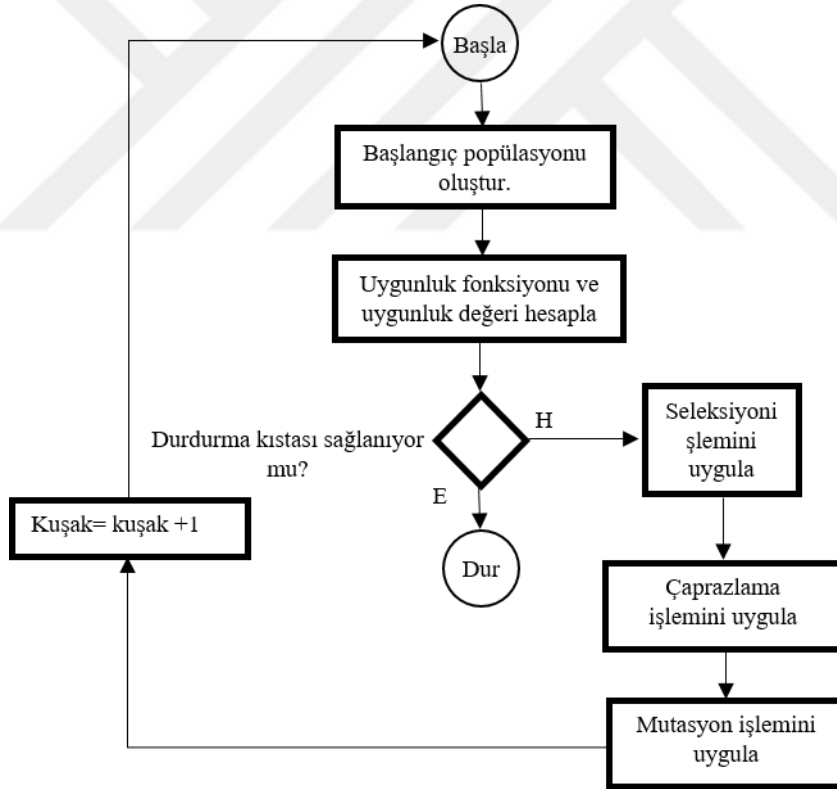
3.1.1.3. Boyutsal sentez ve genetik algoritma ile boyut optimizasyonu

Bu aşamada ön tasarımı yapılan tahrik mekanizmasının çalışma alanı ve mafsal uzayı özelliklerinin maksimizasyonu üzerinde durulacaktır. Bahsedildiği üzere uzaysal ters sarkacın kontrol edilmesi için O_j noktasının tekrarlı olarak konumlandırılması gerekmektedir. Buna bağlı olarak kontrol kabiliyetini etkileyen en önemli parametrelerden ikisi O_j noktasının içerisinde hareket edeceği alanın büyüklüğü ve hareketin sürekliliğidir. Bu iki özellik tahrik mekanizmasını oluşturan uzuvların boyutlarına direkt bağlıdır. Bu yüzden maksimize edilmeleri gerekmektedir. Tez çalışmasında Şekil 3.4' te görülen L_1 , L_2 , L_3 ve L_4 boyutsal parametreleri genetik algoritma tabanlı optimizasyon yardımıyla belirleneceğinden genetik algoritmanın çalışma prensibi, avantajları ve dezavantajlarından bahsetmek yerinde olacaktır.

Bilgisayar biliminde GA, evrim mekanizmasının büyük sınıflarında karşılaşılan doğal seçim sürecinden esinlenerek bulunmuştur. Genetik algoritmalar, mutasyon, çaprazlama ve seçme gibi biyolojik ilham aldıkları operatörlere güvenerek optimizasyon ve arama problemlerine yüksek kaliteli çözümler üretmek için sıklıkla kullanılmaktadır.

Genetik algoritmada optimizasyon problemine aday çözümler içerisinden seçilen (bireyler veya fenotipler) bir popülasyon daha iyi çözümler üretmek için geliştirilmektedir. Her aday çözüm, mutasyona uğratılabilen ve değiştirilebilen bir dizi özelliğe (kromozomlar veya genotip) sahiptir. Çözümler genelde ikili kod sisteminde olup 0 ve 1' lik dizeler halinde gösterilir. Fakat farklı türde kodlamalar da mümkündür (Whitley, 1994). Genetik algoritma evrimi, genellikle rastgele üretilen bir popülasyon ile başlatılır. Popülasyon her yinelenen (iteratif) adımda değişir ve her değişim bir nesil olarak adlandırılır. Her nesilde popülasyondaki tüm bireylerin uygunluğu tekrar değerlendirilir. Burada önemli olan popülasyon bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak değerlendirilmesidir. Diğer bir deyişle uygunluk fonksiyonu, çözülmek istenen optimizasyon problemindeki hedef fonksiyonun değeridir. Her yinelemede bir öncekinden daha uygun bireyler mevcut popülasyondan rastgele olarak seçilir ve her bireyin genomu yeni bir nesil oluşturmak için değiştirilir. Yeni nesil aday çözümler daha sonra algoritmanın bir sonraki tekrarında kullanılır ve genellikle, azami nesil üretildiğinde veya popülasyon için tatmin edici bir uygunluk seviyesine ulaşıldığında algoritma son bulur.

Tipik bir genetik algoritma iki şey gerektirir. Bunlardan ilki, çözüme ait genetik bir temsil; ikincisi ise çözüm kümesini değerlendirmek için bir uygunluk fonksiyonudur. Genetik algoritma genetik gösterim ve uygunluk fonksiyonu tanımlandıktan sonra, bir çözüm popülasyonunun yardımı ile başlatılır. Daha sonra mutasyon, çaprazlama, ters çevirme ve seçme operatörlerinin tekrar tekrar uygulanmasıyla çözümler iyileştirilmeye devam eder. Sonuç olarak genetik operatörlerin amacı ilk nesilden farklı; yeni nesil kromozomlara sahip popülasyon üretmektir. Genel olarak bu prosedür (Şekil 3.5) yardımıyla popülasyonun ortalama uygunluk değerinin artırılabilceği söylenebilir. Ayrıca, ilk nesilden sadece en iyi organizmalar damızlık için seçilirken, daha az uygun çözümler de onlarla birlikte seçilir. Daha az uyum sağlayan bu çözümler anne ve babanın genetik havuzunda genetik çeşitliliği garanti eder ve dolayısıyla sonraki nesil çocukların genetik çeşitliliğini sağlar.



Şekil 3.5. Genetik algoritma optimizasyonu akış şeması.

Bu kısımda yöntemin boyutsal senteze paralel şekilde adım adım anlatılması durumu daha anlaşılır kılacaktır. Başlangıç olarak iki keyfi boyutsal parametre setinin

kullanıldığı düşünülürse uygunluk fonksiyonunda değerlendirilen bu popülasyonlardan uygunluk değeri en yüksek olanlar seçilmelidir. Bu seçimler akış şemasında da görülen genetik çeşitliliği arttırmaya yarayan mutasyon ve çaprazlama işlemlerine tabi tutulmalı ve bu sayede seçilen ebeveyn çözümlerden yeni nesil çocuk çözümler üretilerek işlem gerekli durdurma kriterini tatmin edinceye kadar devam edilmelidir. Bu aşamada yeni popülasyonu yapılandırma sürecinin, pratikte; “mevcut nesil içerisinde bulunan en iyi bireyin bir sonraki değiştirilmemiş olana taşınması” prensibine dayandığı bilinmelidir. Elitist strateji olarak da bilinen bu seçim yöntemi genetik algoritma tarafından elde edilen çözüm kalitesinin bir nesilden diğerine azaltılmamasını garanti etmektedir.

Optimizasyon için öncelikle boyutsal parametrelerin temsili ile başlanabilir. Mekanizma çalışma alanı ve mafsal uzayları L_1 , L , L_3 ve L_4 olmak üzere toplam dört adet boyutsal parametre yardımıyla optimize edilmelidir. Bu kapsamda boyutsal parametrelerin çözüm temsili ikili kod sistemi kullanılarak elde edilecektir. Çözüm temsilinde her bir uzuv için 8'er bitlik bireylerin kullanılması yeterlidir. 8 bitlik gösterim yetersiz geldiğinde bit sayısı artırılabilir. Dört parametrenin 8'er bitlik gösterimi göz önüne alındığında popülasyon boyutunun 1×32 olması gerekir. Kullanılacak temsili popülasyon vektörü ve içerdiği bireyler (bir adet çözüm seti) aşağıda verilmiştir. Bu popülasyonda a_1 parametresinin gösterildiği 8 bitlik vektöre *kromozom* her bir bite ise *gen* adı verilmektedir.

$$P = \left[\begin{array}{c} \boxed{\begin{array}{cccccccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} \end{array}} \\ \text{KROMOZOM} \\ a_1 \end{array} \quad \boxed{\begin{array}{cccccccc} a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} \end{array}} \quad \boxed{\begin{array}{cccccccc} a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} \end{array}} \quad \boxed{\begin{array}{cccccccc} a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & a_{48} \end{array}} \right] \quad (3.1)$$

Dört uzva ait uzunluk değerini içeren popülasyonların probleme bağlı olarak belirlenen bir uygunluk fonksiyonunda değerlendirilmesi gerekir. Uygunluk fonksiyonu genetik temsil üzerinden tanımlanan ve temsil edilen çözümün kalitesini ölçen fonksiyondur. Tez çalışmasında bu fonksiyon çalışma alanı ve mafsal uzayı büyüklüğünü tanımlayan bir ifadedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken böyle bir fonksiyonun her zaman probleme bağımlı olması gerektiğidir. En büyük çalışma alanı ve mafsal uzayı alanının elde edilmesi temel amacımızdır. Tabi ki burada en büyük alanın elde edilmesi mafsal boyutlarının büyük tutulması ile değil giriş parametreleri θ_2 ve s_5 'e göre yapılmıştır. Mekanizma hareketinin sürekli olması için özellikle θ_2

üzerinde herhangi bir sınırlama olmamalıdır. Yani θ_2 , 0° ila 360° arasında dönebilme kabiliyetine sahip olmalıdır. Doğrusal giriş olan s_5 'in değeri seçilen doğrusal tahrik elemanına göre belli bir aralıktadır. Bu durumda diğer uzuv boyutları s_5 'e bağlı olarak elde edilmiştir. Yani uzuv boyutları bir bakıma boyutsuz olarak doğrusal girişe bağlı şekilde hesaplanmış olacaklardır. Sonuç olarak kaide (bağlantı) noktasının oluşturduğu çalışma uzayını nominal uzuv boyutlarından ziyade kendi aralarındaki oranlar etkilemektedir.

Optimizasyona öncelikle boyutsal parametrelerin temsili ile başlanmıştır. L_1, L_2, L_3 ve L_4 olmak üzere toplam dört adet boyutsal parametre 8 bitlik (ikili kod) kromozomlardan oluşan 1x32 boyutundaki bir popülasyon ile temsil edilmiştir. Sonuçlar genetik algoritmanın yapısı gereği $L_{1min} \leq L_1 \leq L_{1max}, L_{2min} \leq L_2 \leq L_{2max}, L_{3min} \leq L_3 \leq L_{3max}, L_{4min} \leq L_4 \leq L_{4max}$ gibi belirli sınır değerler arasında aranmıştır. Optimum sonuçların seçilmesi için değişken çaptaki bir dairenin alanı içerisindeki maksimum O_j noktası sayısını veren uygunluk fonksiyonu belirlenmiştir. Bu sayede en iyi çözümler her jenerasyon sonunda seçilerek optimizasyon döngüsü sonunda en yüksek uygunluk fonksiyonuna sahip elit popülasyonlara ulaşılmıştır. Prizmatik girişin $-325mm \leq s_5 \leq 325mm$ değer aralığı için optimizasyon sonucunda $L_1 = 300mm, L_2 = 100mm, L_3 = 350mm, L_4 = 200mm$ değerleri elde edilmiştir.

3.1.1.4. Tasarımın kinematik analizi ve değerlendirme

Optimum boyutların elde edilmesinden sonra bu parametreler yerlerine yazılarak mekanizmanın kinematik analizinin yapılması gerekir. Kinematik analiz mevcut mekanizmanın konum, hız ve ivme parametrelerinin elde edilerek harekete ait özelliklerin öğrenilmesini içermektedir.

Tahrik mekanizması tek bir kapalı döngüye sahiptir ve

$$|\overrightarrow{OA}| + |\overrightarrow{AB}| + |\overrightarrow{BC}| + |\overrightarrow{CD}| = |\overrightarrow{OD}|$$

vektörel denklemi skaler olarak aşağıdaki gibi yazılabilir (Şekil 3.4).

$$L_1 + L_2 C(\theta_2) + L_3 C(\theta_3) = L_4 C(\theta_4) \quad (3.2)$$

$$L_2 S(\theta_2) + L_3 S(\theta_3) = s_5 + L_4 S(\theta_4) \quad (3.3)$$

Gösterimde kolaylık olması açısından $\sin(\cdot)$ ve $\cos(\cdot)$ yerine $S(\cdot)$ ve $C(\cdot)$ sembolleri kullanılmıştır. Eş. 3.2 ve Eş. 3.3 denklemleri yardımıyla pasif mafsal değişkenleri olan θ_3 ve θ_4 değerleri aktif mafsal değişkenleri olan s_5 ve θ_2 cinsinden elde edilir.

$$\theta_3 = f(\theta_2, s_5) \quad (3.4)$$

$$\theta_4 = f(\theta_2, s_5) \quad (3.5)$$

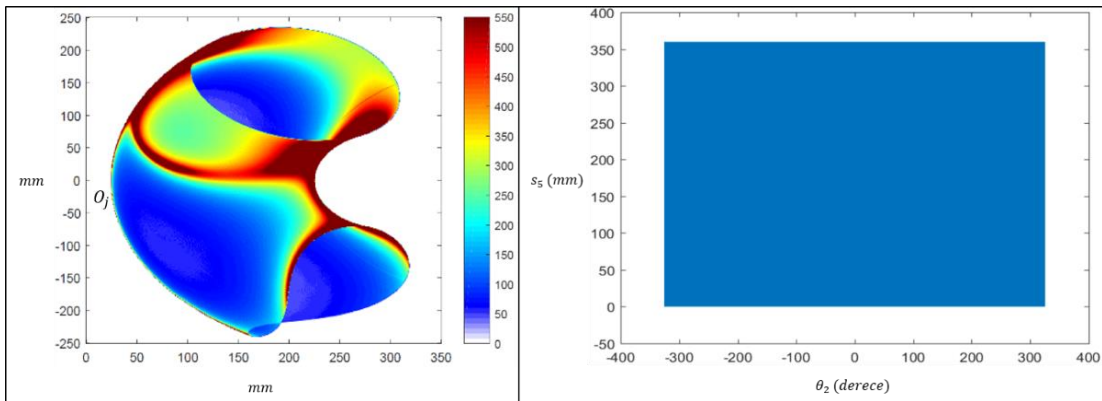
Bu ifadeler için detaylı hesaplamalar Ek 1.'de verilmiştir.

Bu durumda uzaysal ters sarkacın bağlandığı O_j noktasının x ve y koordinatları ise aşağıdaki gibi olacaktır.

$$x_{O_j} = L_1 + L_2 C(\theta_2) + L_3 / 2 (C(\theta_3)) \quad (3.6)$$

$$y_{O_j} = L_2 S(\theta_2) + L_3 / 2 (S(\theta_3)) \quad (3.7)$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda yukarıdaki ilk grafikte boyutsal parametrelerin optimum seti için tahrik mekanizması çalışma alanı birim alana düşen nokta yoğunluğuna göre, ikinci grafikte ise yine bu değerler için s_5 ile θ_2 değerleri arasındaki ilişki çizdirilmiştir. İlk grafik, optimum değerler kullanılarak mekanizmadaki O_j noktasına (Şekil 3.6) karşılık gelen noktaların teker teker çizdirilmesiyle, ikinci grafik ise s_5 ' in $-325\text{mm} \leq s_5 \leq 325\text{mm}$ aralığındaki değerlerine karşılık gelen θ_2 değerlerinin çizdirilmesiyle elde edilmiştir. Şekil 3.6 a.' da kırmızı hareket kabiliyetinin en iyi olduğu yerleri göstermektedir.



Şekil 3.6. a. Tahrik mekanizması becerikli çalışma alanı b. $s_5 - \theta_2$ mafsal uzayı grafiği.

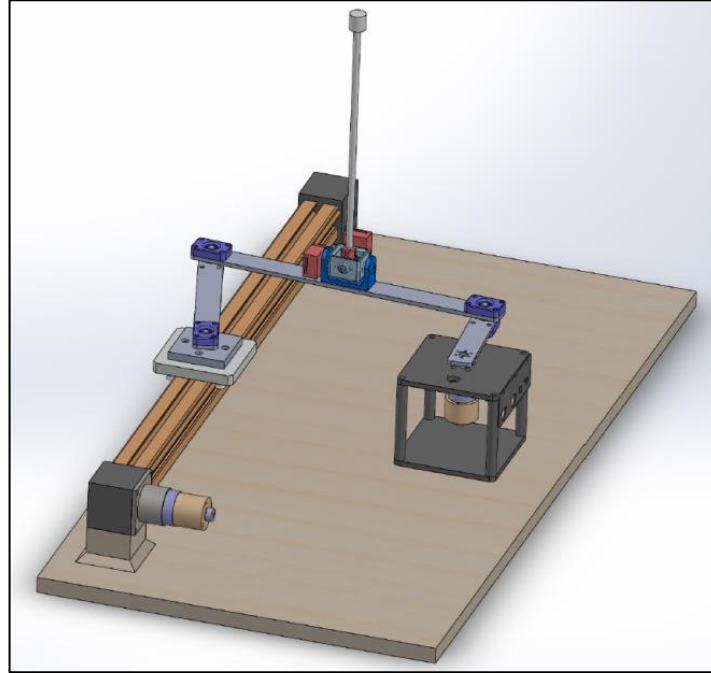
Bu adımın sonunda optimum boyutsal parametreler elde edilerek mekanizma boyutsal sentezi tamamlanmıştır. Kinematik analiz kinematik denklemler yardımıyla yapılmış ve analiz sonunda analitik çözümler elde edilmiştir. Daha sonra bu çözümler yardımıyla mekanizma çalışma alanı ve mafsalsal uzayı değerlendirilmiş, mekanizmanın hareket özellikleri incelenmiş ve kontrol için uygun bulunan ise iki serbestlik dereceli uzaysal ters sarkaç sisteminin tasarımı tamamlanmıştır.

3.2. Uzaysal Ters Sarkaç Sistemi Üretimi

Bu bölümde yapılan çalışmalar arasında

- Uzaysal ters sarkaç tahrik mekanizmasına ait tam bir katı model oluşturulması ve uzuvların bu modellere göre üretimi
- Elektronik ve elektromekanik ekipmanların seçimi ve tanıtılması
- Mekanik ve elektronik parçaların montajlarının ve kablolamalarının yapılması bulunmaktadır.

3.2.1. Mekanik üretim



Şekil 3.7. Uzaysal ters sarkaç düzeneği katı modeli.

Yukarıda CAD modeli verilen uzaysal ters sarkaç sistemi mekanik olarak:

- Doğrusal hareket modülü
- Döner girişin verilebilmesi için DC motorun bağlandığı bir sehpa
- Tahrik mekanizmasını oluşturan üç adet uzuv
- Üçüncü uzva takılabilen bir üniversal mafsal ve bir ters sarkaçtan meydana gelmektedir.

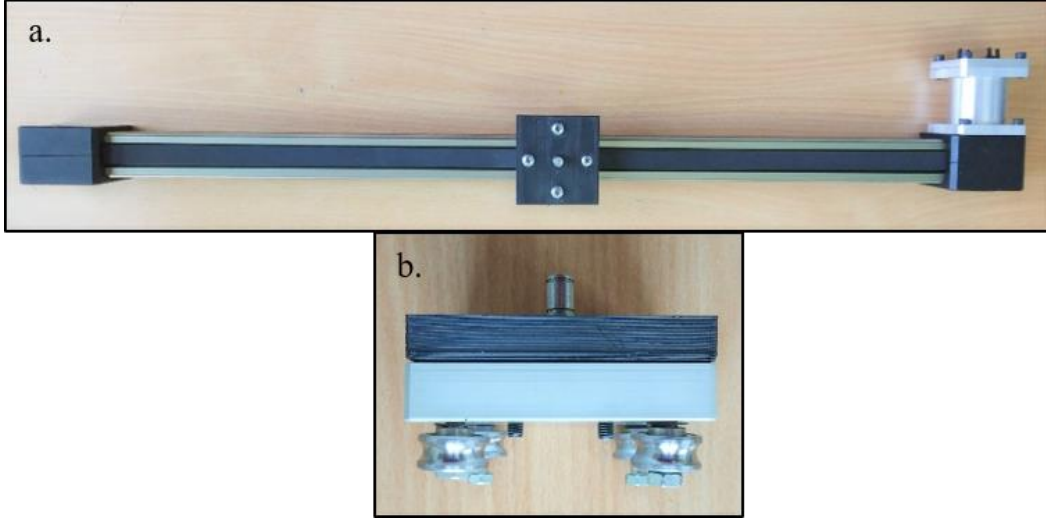
Üretime başlanmadan önce ilk olarak SolidWORKS yazılımı yardımıyla sistemi oluşturan mekanik parçaların optimizasyon yardımıyla elde edilen optimum boyutlardaki katı modelleri oluşturulmuştur. Modelin doğruluğu çalışmanın ileri aşamaları için önem arz ettiğinden sistemdeki elektronik donanımların da modellenmesi tam bir katı model oluşturulması açısından gerekli görülmüştür. Katı modelin başarısı, bu model kullanılarak çizdiğimiz teknik resimler ve dolayısıyla bu resimlere göre yapılacak üretimi de başarılı kılmıştır. Çalışmanın devamında üretilen mekanik parçalar detaylı olarak verilmiştir.

3.2.1.1. Doğrusal hareket modülü

Doğrusal hareket modülü sisteme doğrusal hareket girişinin verilmesi görevinde kullanılacak olan mekanik donanımdır. Bu donanım sayesinde motordan alınan dönel hareket doğrusal harekete dönüştürülerek Şekil 3.4' te görülen S_5 doğrusal değişkeni üretilmektedir. Modül basit olarak hareket dönüşümünü yapan kayışlı ve makaralı bir yapıdan oluşmaktadır. Hazır olarak tedarik edilen modülün kompakt ve hafif olması istendiğinden raylı sistemlere göre maliyet olarak da daha uygun olan kayışlı ve makaralı tip tercih edilmiştir.

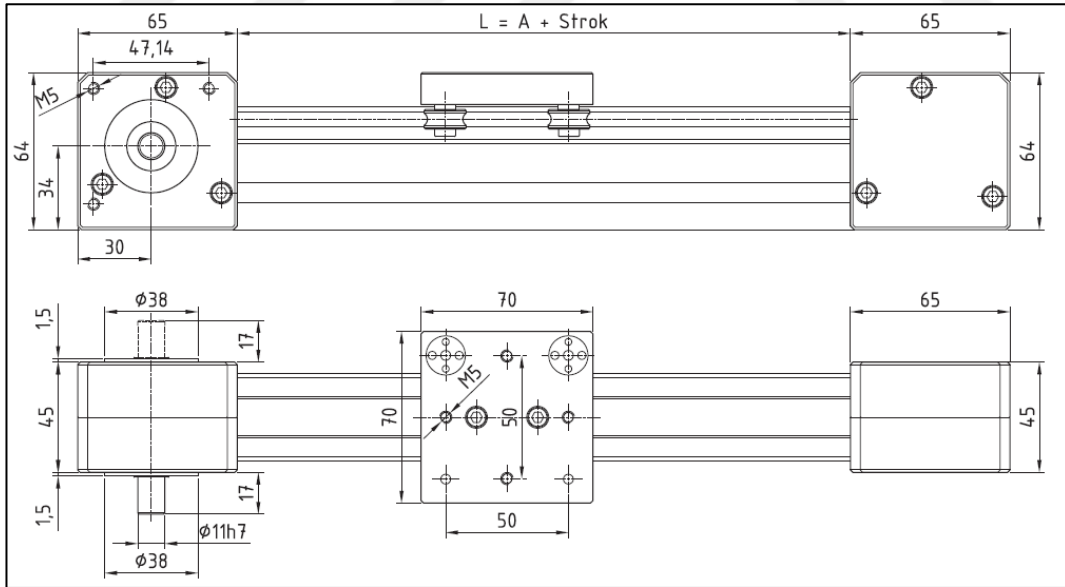
Çizelge 3.2 Doğrusal kızak teknik özellikleri

Özellik	Değer
Diş Sayısı	20
Kayış Tipi	HTD5M
Kayış Genişliği	15 mm
1 Turda Aldığı Yol	102 mm
Tekrarlama Hassasiyeti	0.1/300 mm
Strok Uzunluğu	650



Şekil 3.8. a. Doğrusal hareket modülü b. üzerindeki hareketli kızak.

Yukarıdaki şekilde düzenekte kullanılan doğrusal hareket modülü ve modül üzerine kayış yardımıyla bağlanan makaralı kızak görülmektedir. Kızığın uzuv-4 ile bağlanabilmesi için üzerine 3 boyutlu yazıcı yardımıyla üretilen bir parça monte edilmiştir. Şekil 3.9’ da kızığın ölçüleri ve Çizelge 3.2’ de ise özellikleri görülmektedir.



Şekil 3.9. Doğrusal hareket modülü ölçüleri.

3.2.1.2. DC motor sehpaası

Sisteme verilecek dönel hareket girişinin sağlanması için ikinci uzuva DC motor montajı yapılması gerekmektedir. Bu da ancak motor monte edileceği bir sehpa yardımıyla olabilir. Şekil 3.10’ da görülebilen sehpanın üretiminde 20x20x100 mm ölçülerinde dört tane sigma profil üzerine 5mm kalınlığında ve 90x90 mm ölçülerinde bir alüminyum levha kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Motor sehpaası.

3.2.1.3. Mekanizma uzuvları

Mekanizmayı oluşturan uzuvlar genel olarak rulman, 3D yazıcı yardımıyla üretilen rulman tutucu, alüminyum plaka, cıvata ve somunlardan meydana gelmektedir. Optimum boyda üretilen ikinci uzuv Şekil 3.11’ de, üçüncü uzuv Şekil 3.12’ de ve dördüncü uzuv Şekil 3.13’ teki gibidir.



Şekil 3.11. İki numaralı uzvun görünümü.

Daha önce bahsedildiği üzere mekanizmanın döner hareket girişi ikinci uzuv yardımıyla yapıldığından bu uzva DC motor milinin bağlanabilmesi için alüminyum

malzemeden 6 mm deliğe sahip bir mil montaj habı bağlanmıştır. 5mm kanlınlığa ve 30 mm genişliğe sahip alüminyum lamadan CNC freze yardımıyla üretilen parçaya MR626 kodlu 24 mm dış çap, 12 mm kalınlık ve 8mm iç çap ölçülerinde bir rulman 3 boyutlu yazıcıda üretilen bir tutucu yardımıyla M3x10 4 adet cıvata ve M3 somun kullanılarak sabitlenmiştir. Ayrıca bu uzuvda bulunan montaj habı ve rulman delik eksenleri arası mesafe uzvun optimum boyu olarak belirlenen 100 mm' dir.



Şekil 3.12. Üç numaralı uzvun a. üstten b. yandan görünüşü.

Üç numaralı uzuv uzaysal ters sarkaç bağlantısının üzerine yapıldığı kaidedir. Uzvun tam ortasına universal mafsal montajının yapılacağı yer işlenmiştir. İkinci uzvudan farklı olarak üzerinde uzuv-2 ve uzuv-4 bağlanabilmesi için iki adet MR126 rulman ve iki adet rulman tutucu bulunmaktadır. İki rulmanın eksenleri arası mesafe uzuv için optimum boyutu olarak belirlenen 350 mm'dir. Şekil 3.12' den de görüleceği üzere diğer iki uzuvla yapılacak montaj 8mm' lik fatura ve segmanlı miller yardımıyla yapılmaktadır. Bu uzvun iki rulman arasındaki mesafesi ise 350 mm olarak belirlenmiştir.



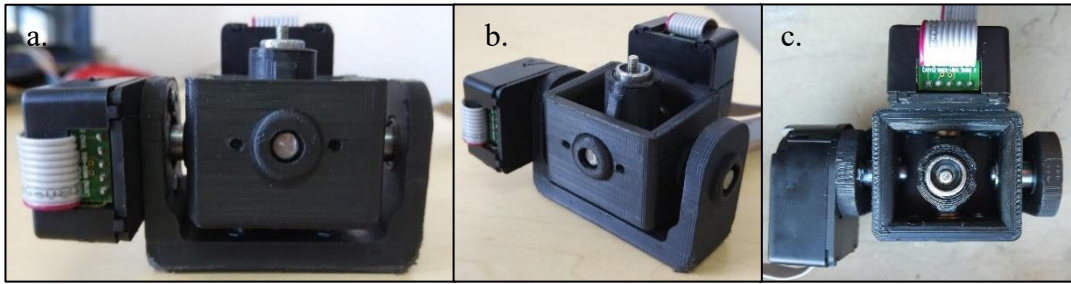
Şekil 3.13. Dört numaralı uzvun görünümü.

Dört numaralı uzuvda bir tarafın doğrusal hareket modülüne diğer tarafın ise üçüncü uzva bağlanıp serbestçe dönme hareketi yapabilmeleri için iki adet MR628

rulman bulunmaktadır. Diğer uzuvlarla aynı malzemeden yapılan bu uzuvda rulmanlardan biri mekanizmanın çalışması sırasında herhangi bir yere vurmaması için diğer rulmana simetrik olarak takılmıştır. Bu uzvun rulman delik eksenleri arasındaki mesafe ise 200 mm' dir.

3.2.1.4. Üniversal mafsal ve ters sarkaç

Tahrik mekanizması ve ters sarkaç arasındaki bağlantı üniversal tip mafsal yardımıyla yapılmıştır. Bu bağlantının anlaşılması için öncelikle üniversal mafsaldan (eklem) bahsedilmelidir. İki serbestlik derecesine sahip üniversal mafsallar genellikle farklı eksenlerde çalışan iki parçanın birbirine bağlanması ve bu parçalar üzerinden hareket iletiminin sağlanması için kullanılmaktadır. Bizim çalışmamızda ise ters sarkaca uzaysal hareket kabiliyetinin kazandırılması görevinde kullanılmıştır. Bu noktada bahsedilmesi gereken iki yönlü devrilme hareketinin iki serbestlik dereceli üniversal mafsal kullanımı yerine, üç serbestlik dereceli küresel mafsal ile de elde edilebileceğidir. Fakat küresel mafsal kullanılması durumunda bu mafsaldaki bulunan fazladan serbestlik derecesi sarkacın kendi eksenine etrafındaki dönme serbestisi olacaktır. Fakat bu hareketin kontrol üzerinde herhangi bir etkisi olmayacağından basitlik adına bağlantı elemanı olarak küresel mafsal yerine üniversal mafsal tercih edilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Üniversal mafsaldan a. ön görünüşü b. üst görünüşü c. izometrik görünüşü.

Şekilde görülen üniversal mafsal üç boyutlu yazıcı yardımıyla üretilmiş üç adet parça, üç adet mil, MR126 kodlu 8mm dış çap, 6mm iç çap ve 4 mm kalınlık ölçülerine sahip 4 adet rulmandan oluşmaktadır. Bunun yanında bağlantı elemanı olarak dört adet

burç, 8 adet segman, M3x5 4 adet civata, M3 4 adet somun ve ters sarkacın içine vidalı şekilde sıkılabileceği çelik bir kovandan yapılmıştır.



Şekil 3.15. Ters sarkaç.

Şekil 3.15' te üniversal mafsala üzerindeki kovana sıkılacak ters sarkaç görülmektedir. 8mm çaptaki sarkacın boyu 400 mm olup bir tarafına üniversal mafsala sıkılabilmesi için M3x20' lik iç vida açılmıştır.

Bu bölümde detaylı anlatılan tüm uzuvların kütleleri hassas terazi yardımıyla ölçülmüş ve SolidWORKS yazılımında bu kütle değerleri girilerek uzuv atalet momentleri hesaplanmış ve ilerleyen bölümlerde dinamik denklemlerde sabit parametreler olarak yerlerine yazılmıştır.

3.2.2. Elektronik ve Elektro-mekanik Donanımlar

Bir kontrolcünün hızı genel olarak kullanılan tahrik elemanı, kurulan kontrol devresi ve kontrol algoritması ile ilgilidir. Dolayısıyla karışık yapıya sahip bir algoritma ve bu algoritmayı işleyen basit bir kontrol devresinden hızlı bir kontrol kabiliyeti sergilemesi beklenemez. Bu çalışmada ihtiyaç duyulan elektriksel donanımlar:

- Bir adet masaüstü bilgisayar
- Bir adet veri toplama kartı (DAQ)
- İki adet redüktörlü fırçasız DC motor
- İki adet motor sürücü
- Dört adet enkoder
- Güç kaynağından meydana gelecektir.

3.2.2.1. Bilgisayar

Çalışmadaki en önemli elemanlardan olan bilgisayarın (işlemcinin) görevi, sistem ile ilgili bütün giriş/çıkış bilgilerini işlemek ve yorumlamaktır. Bilgisayarın en önemli özelliği hızıdır ve işlemci çalışma frekansı ne kadar yüksek ise, hızlı işlem yapabilmesi ve yüksek performans göstermesi o derece mümkündür. Bu bağlamda hızlı ve iyi bir kontrol için yüksek çalışma frekansına sahip işlemci içeren hızlı bir bilgisayar kullanılacaktır. Başka bir deyişle önerilen projede kullanılacak bilgisayar, ters sarkaç davranışına uygun olarak yüksek frekanslarda (MHz) çalışabilecek kapasiteye sahip olmalıdır. Tez çalışmasında kullanılan bilgisayar 12 GB RAM, i7 Xeon işlemci ve 3 adet PCI Express kart slotuna sahiptir.

3.2.2.2. Veri toplama kartı

Bir diğer önemli donanım veri toplama kartıdır. Veri toplama kartı, bilgisayar ve sistem arasındaki bilgi alışverişini yapacak olan ekipman olup haberleşmenin tam olarak yapılabilmesi için yeterli sayıda giriş ve çıkışa (analog I/O, dijital I/O ve counter-PWM I/O) sahip olmalıdır. Ayrıca kartın bilgisayar ve sistem ile uyumlu bir örnekleme hızına sahip olması kart seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli noktadır. Yavaş bir kartın seçilmesi durumunda sistem üzerinden yeterli hızda ölçüm yapılamayacağından başarılı bir kontrolden bahsetmek imkânsız duruma gelir.



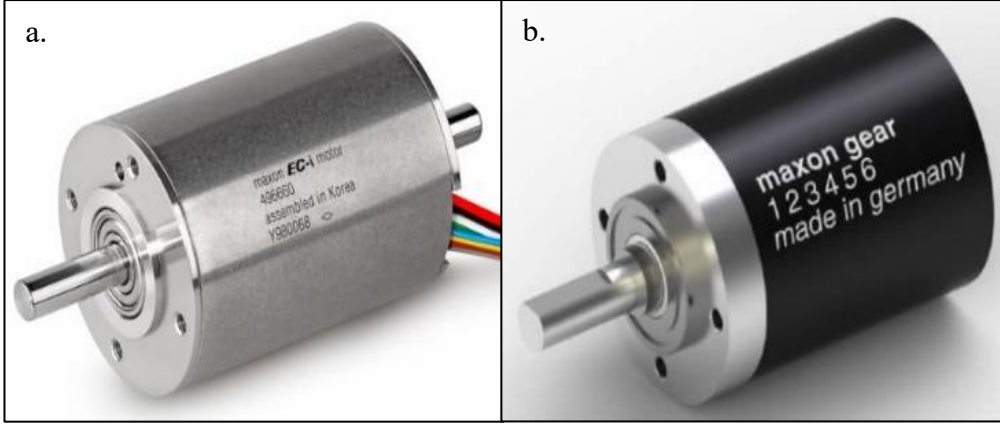
Şekil 3.16. Humusoft MF634 veri toplama kartı.

Bu çalışmada Şekil 3.16' te görülen Humusoft marka ve MF634 modelli veri toplama kartı kullanılmıştır. Kart ile bilgisayar arasında hızlı bir haberleşme kurulması için kart PCI- Express bağlantılı seçilmiştir. Kart aynı zamanda MATLAB/Simulink yazılımı ile de uyumlu olup;

- $\pm 10V$ 5mA 8 adet 14 bit analog girişe
- $\pm 10V$ 5mA 8 adet 14 bit analog çıkışa
- 8 dijital TTL uyumlu girişe, 8 dijital TTL uyumlu çıkışa
- 4 adet 32 bit 2.5 MHz kuadratur enkoder okuma girişine
- 4 adet PWM üretici veya pulse sayıcı olarak kullanılabilen sayıcı/zamanlayıcılara sahiptir.

3.2.2.3. Doğru akım motorları

Doğru akım (DC) motorları bobin üzerinden geçirilen akımın oluşturduğu manyetik alan yardımıyla; oluşan kutuplaşmanın ileri ve geri yönlü kullanılıp; zıt kutupların birbirini çekmesi ya da aynı kutupların birbirini itmesi prensibinden dairesel hareket elde edilmesini temel alan yapılardır. Çalışmamızda DC motor kullanmak istememizin sebebi, bu motorların geniş hız değerleri arasında kararlı şekilde çalışabilmeleri, küçük boyutlarına rağmen yüksek tork üretebilmeleri ve yüksek doğrulukla basit şekilde kontrol edilebilmeleridir. Doğru akım motorları genel olarak fırçalı ve fırçasız olmak üzere ikiye ayrılır. İki tür de kullanıldıkları yer ve amaca göre avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu çalışmada hassas ve hızlı bir kontrole ihtiyaç duyulduğundan fırçalı DC motorlara göre nispeten daha hassas kontrol kabiliyeti ve daha düşük tepki süresine sahip fırçasız DC motorlar kullanılmıştır. Bu noktada bilinmesi gereken fırçalı DC motorların sürülebilmesi için herhangi bir elektronik devre gerekmezken bu durumun fırçasız DC motorlar için geçerli olmadığıdır. Fırçasız DC motorların sürülebilmesi için ek bir elektronik devre kullanmak gerekir. Çalışmada bu devrenin görevini motor sürücüler üstelenecektir.



Şekil 3.17. a. DC Motor b. redüktör.

Mekanik uygulamaların her birinde ihtiyaç duyulan hız ve tork değerleri farklıdır. DC motorlar ise yapıları gereği belli bir hızın altında istenilen torku üretemezler. Yüksek tork ve nispeten düşük hız istendiğinde aktarma organlarına ihtiyaç duyarlar. Redüktörler de bu görevi yerine getiren bir dişli sistemidir. Çalışmada ihtiyaç duyulan devir hızı standart DC motor hızlarından düşük, ihtiyaç duyulan tork değerleri ise çıplak DC motor çıkış değerinden yüksektir. Bu sebeple seçilecek fırçasız DC motorlar ile birlikte bu motorlara monte edilmiş planet redüktörlere de ihtiyaç duyulmuştur.

Bu çalışmada Maxon firmasının ECi-40 modelli fırçasız DC motorları kullanılmıştır. (Şekil 3.17 a.) Doğrusal hareketi üretecek olan motor 70W gücünde, dönele hareket üretecek motor ise 50W gücünde seçilmiştir. Çizelge 3.3’ de kullanılan DC motorların özellik ve karakteristiklerini görülmektedir.

Çizelge 3.3 DC motor özellikleri

Özellik	EN-C i40 70W	EN-C i40 50W
Nominal voltaj	18 V	12 V
Yüksüz hız	7840 rpm	12400 rpm
Yüksüz akım	448 mA	522mA
Nominal hız	6890 rpm	9660 rpm
Nominal tork	105 mNm	43.3 mNm
Nominal akım	4.87 A	4.53 A
Kilit torku	1960 mNm	473 mNm
Kilit akımı	90.4 A	52.9 A

Çizelge 3.4 DC motor karakteristikleri

Karakteristikler	EN-C i40 70W	EN-C i40 50W
Rotor ataleti	23 gcm ²	8.95 gcm ²
Tork sabiti	21.7 mNm/A	1070 mNm/A
Hız sabiti	441 rpm/v	10.5 rpm/v

Tek başlarına yüksek devir sayısı ve düşük tork değerlerine sahip bu modellerin üzerine yine Maxon tarafından üretilen redüktörler takılmıştır. Dönel hareket tarafındaki redüktör GP32C doğrusal hareketin kullanıldığı motordaki redüktörün modeli ise GP42C' dir (Şekil 3.17 b). Redüktörlere ait bilgiler aşağıdaki tabloda görülmektedir.

Çizelge 3.5 Redüktörlerin özellikleri

Özellik	GP42C Redüktör	GP32C Redüktör
Düşürme oranı	4.3/1	23:/1
Kütle ataleti	9.1 gcm ²	0.8 gcm ²
Kademe	1	2
Maks. devamlı tork	3 Nm	3 Nm
Maksimum verim	% 90	% 75
Ağırlık	260 g	162 g

3.2.2.4. Motor sürücüleri

Çalışmada kullanılan bir diğer elektronik donanım motor sürücülerdir. Sürücülerinin görevi, işlemciden aldıkları değiştirilmiş giriş sinyallerini yükseltmek ve iletmektir. Başka bir deyişle bilgisayar, güç kaynağı ve motorlar arasında bir köprü kurmaktır. Her motor ürettiği hareketin tork ve hızına bağlı olarak belli bir akım çeker. Bu akımın doğrudan bilgisayar üzerinden geçirilerek (sürücü kullanılmadan) motorlara aktarılması mümkün değildir. Geçirildiği durumlarda önemli ve pahalı olan bilgisayar ve veri alışveriş kartı tekrar kullanılamaz duruma gelebilmektedir. Bu kapsamda, yürütülen çalışmada ters sarkaç dinamikleri ile uyumlu olarak yüksek frekans ve akımlarda çalışabilen motor sürücülerin kullanılması gerekir.



Şekil 3.18. ESCON 50/5 Motor sürücü

Bilindiği üzere DC motor ve motor sürücülerinin farklı firmalardan alınarak kullanılması donanımsal uyumsuzluklara yol açabilmektedir. Uyum problemi gerçek zamanlı uygulamalarda içerisinden çıkılması zor durumlara yol açabilir. Bu sebeple seçtiğimiz DC motorlar ile birlikte yine Maxon marka ESCON 50/5 modelli iki adet motor sürücü kullanılmıştır. Analog – dijital girişlere sahip bu sürücüler ile fırçalı veya fırçasız motorlar yüksek doğrulukla sürülebilmektedir. Çizelge 3.6’ da motor sürücüyeye ait özellikler verilmiştir.

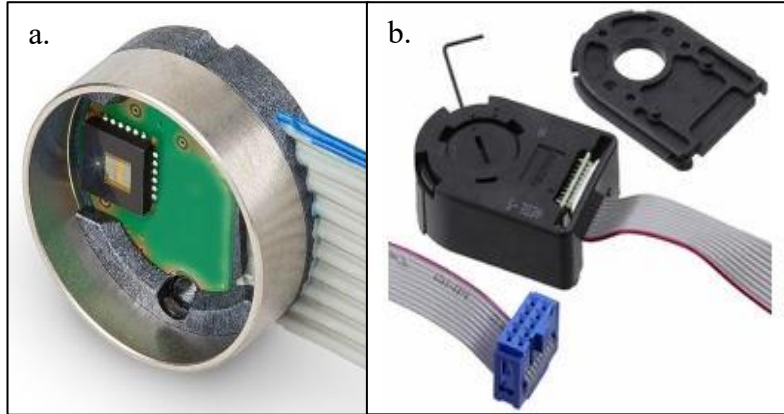
Çizelge 3.6 ESCON 50/5 motor sürücü özellikleri

Özellik	ENC RIO 16 Enkoder
Nominal çalışma gerilimi	10 – 50 V DC
Çalışma akımı	5A – 15A (I maks. 20s)
Maksimum verim	% 95
2 x analog giriş	12 bit, ± 10 V dif.
2 x analog çıkış	12 bit, ± 4 V
4 x dijital giriş	2.4V – 36V $R_i = 38.5$ k Ω
4 x dijital çıkış	2.4V – 36V $R_i = 38.5$ k Ω
Hall sensör sinyali	H1, H2, H3
Enkoder sinyali	A, A\, B, B\ (1 Mhz)

3.2.2.5. Enkoder

Enkoder, bağlı olduğu milin hareketine karşılık, sayısal (dijital) bir elektrik (pulse) sinyali üreten elektromekanik bir cihazdır. Bağlanan milin pozisyonunu izlemek ve geri bildirim sağlamak amacıyla kullanılır. Konum, sayı, hız ve/veya yönü belirlemek için bir geri-bildirim sinyali göndererek bilgiyi iletmektedir. Enkoderlerin çalışmadaki görevi uzaysal ters sarkaç açılarının (Şekil 3.2 deki α ve β açıları) ve DC motorlara ait şaft konumlarının anlık ölçümlerini yapmak ve bu bilgileri kontrolcüye iletmeğdir. Genellikle robotlar, hareketli kameralar, CNC tezgâhları ve otomasyon gibi birçok kullanım alanı bulunan enkoderler çalışma yerine göre doğrusal ve dönel olmak üzere ikiye ayrılır. Bu çalışmada yüksek hız ve doğrulukta okuma yapabilen ikisi sarkaç açılarını ikisi motor mili konumunu ölçmek üzere toplam dört adet optik artımsal enkoder kullanılacaktır.

Sarkaç açılarının ölçülmesi için kullanılan enkoderler ile motor millerinin konum bilgisini veren enkoderler farklı tipte seçilmiştir. Bunun sebebi sarkaç enkoderlerinin ağırlığı ile ilgilidir. Bu enkoderler dengeleme esnasında hareketli halde olacağından ağırlıkları ne kadar az olursa, dengeleme esnasında oluşturacakları atalet de o kadar az olacaktır. Bu durum motor enkoderleri için geçerli değildir. Motor enkoderleri motor millerine akuple olup sabittir.



Şekil 3.19. a. Motor enkoderi ve b. sarkaç enkoderi.

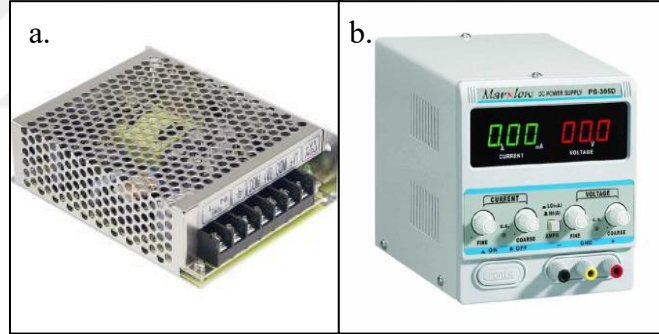
İki motora da yine Maxon marka ve ENC RIO 16 modelli optik artımsal enkoderler takılmıştır (Şekil 3.19 a). Sarkaç enkoderleri ise AVAGO marka AEDL 5810 model plastik gövdeli hafif bir tasarıma sahiptir. Enkoderlerine ait özellikler Çizelge 3.7' de görülmektedir.

Çizelge 3.7 Motor üzerindeki enkoder özellikleri

Özellik	ENC RIO 16 Enkoder	AEDL 5810
Çözünürlük	4096 sayım/tur (CPR)	5000 sayım/tur (CPR)
Kanal sayısı	3	3
Maksimum hız	40.000 rpm	30.000 rpm
Maks. çalışma frekansı	3.125 kHz	1 Mhz
Besleme gerilimi	5 V	5 V
Ağırlık	80 g	35 g

3.2.2.6. Güç kaynağı

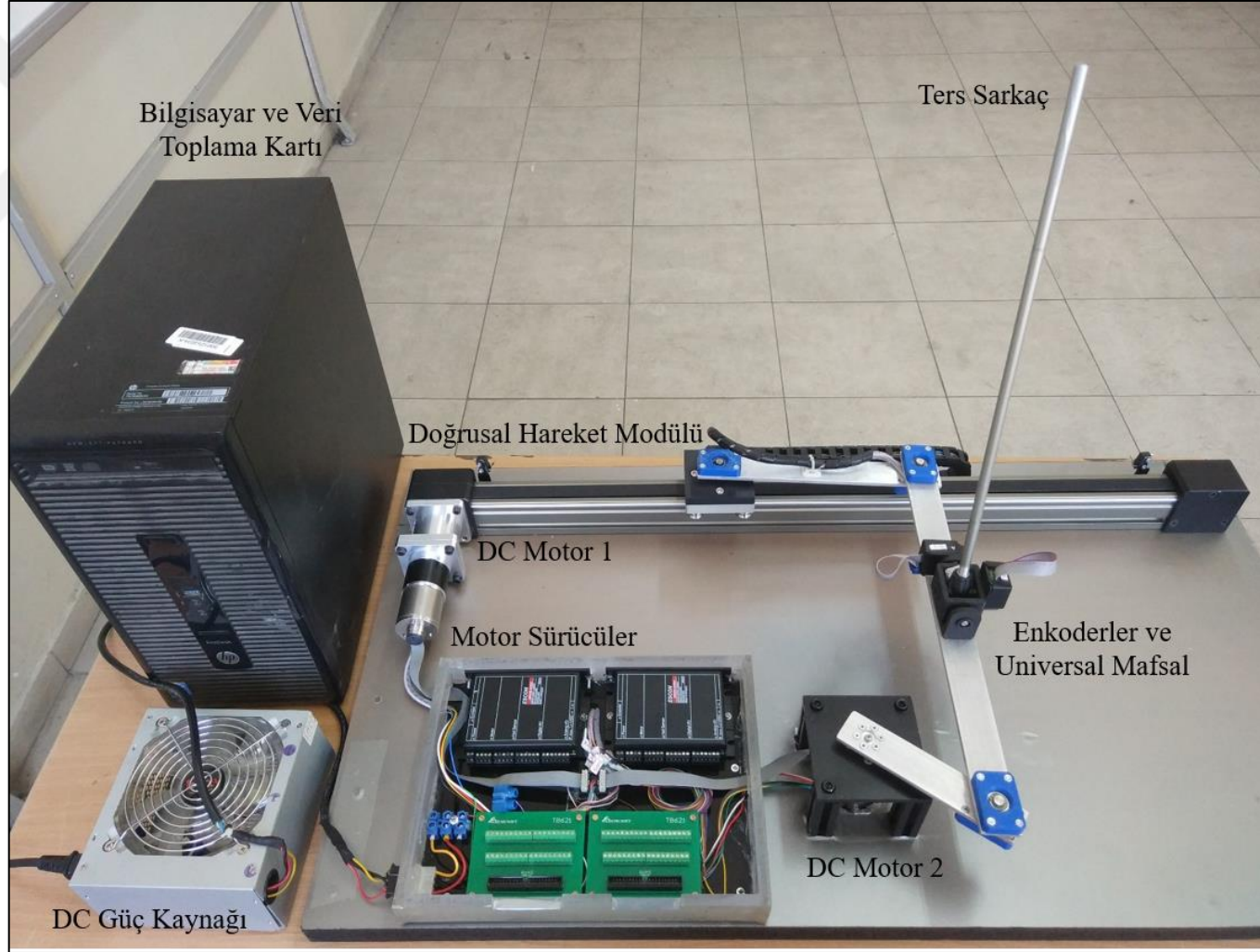
Uzaysal ters sarkaç sisteminde bulunan iki adet motorun çalışma voltajları 12 V ve 18 V olduğundan bu motorların harici bir güç kaynağı ile beslenmesi gerekmektedir. Çalışmada bir adet ayarlı ve bir adet 12 V güç kaynağı motor beslemesinde kullanılacaktır.



Şekil 3.20. a. 12 V sabit ve b. ayarlı güç kaynağı.

3.2.2.7. Mekanik ve elektriksel donanımların montajı

Bu aşamada uzaysal ters sarkaç sisteminin mekanik ve elektriksel tüm donanımlarının üretimi ve temini yapılmış olduğundan parçaların montaj işlemine geçilmiştir. Montajda miller, segmanlar ve burçlardan yararlanılmış, tüm elektronik ve elektromekanik donanımların montajları titiz bir çalışma yürütülmüştür. Şekil 3.21' de uzaysal ters sarkaç sisteminin tam montajlı görünümü verilmiştir.



Şekil 3.21. Uzaysal ters sarkaç sistemi.

3.3. Uzaysal Ters Sarkaç Sistemi İçin Kontrolcü Tasarımı

Ters sarkaç sistemi kararlı ve kararsız denge noktalarına sahip doğrusal olmayan bir sistemdir. Kararlı olarak belirtilen nokta ters sarkacın alt konumunu; kararsız nokta ise üst konumunu ifade eder. Tez çalışmasında üzerinde durulan problem ters sarkacın kararsız olan üst nokta etrafında dengelenmesidir. Dengeleme işleminin yapılması için sistemin doğal davranışlarının bilinmesi ve kontrol algoritmasının ters sarkaç davranışı ile paralel şekilde hızlı, çevik ve gürbüz özelliklerde tasarlanması gerekir.

Bu bölümde yapılacak çalışmalar arasında:

- Üretim ve tam montajı tamamlanan sistemin dinamik analizinin yapılarak sisteme ait matematiksel model ve hareket denklemlerinin elde edilmesi ve bu denklemlerin doğrulanması
- Uzaysal ters sarkaç kontrolü kapsamında matematiksel modele bağımlı doğrusal ve doğrusal olmayan kontrolcü tasarımlarının yapılması bulunmaktadır.

3.3.1. Dinamik analiz

İki serbestlik dereceli ters sarkaç sisteminin kontrol edilebilmesi için sistemin dinamik davranışlarının iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bunun için de tam bir dinamik analiz gerekir. Çalışmanın ilerleyen kısmında dinamik denklemlerin Lagrange yöntemi yardımıyla türetilmesi üzerinde durulacaktır.

3.3.1.1. Lagrange Yöntemi

Şekil 3.22' de sistemin genel bir diyagramı verilmiştir. Dört serbestlik dereceli sistem ikisi bağımlı dördü bağımsız olmak üzere toplam altı adet değişken yardımıyla modellenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan notasyonlar aşağıdaki gibidir.

$k = 1, 2, 3 \dots n$ İçin

q_k : Genelleştirilmiş koordinatlardır. m_i : Uzun kütleleridir.

τ_k : Genelleştirilmiş torklardır. \bar{R}_{C_i} : Uzun ağırlık merkezi vektörleridir.

p : Uzun sayısıdır. \bar{V}_{C_j} : Ağırlık merkezlerinin hız vektörüdür.

I_i : Uzun atalet momentleridir. $\bar{\omega}_{C_j}$: Ağırlık merkezlerinin dönel hızlarıdır

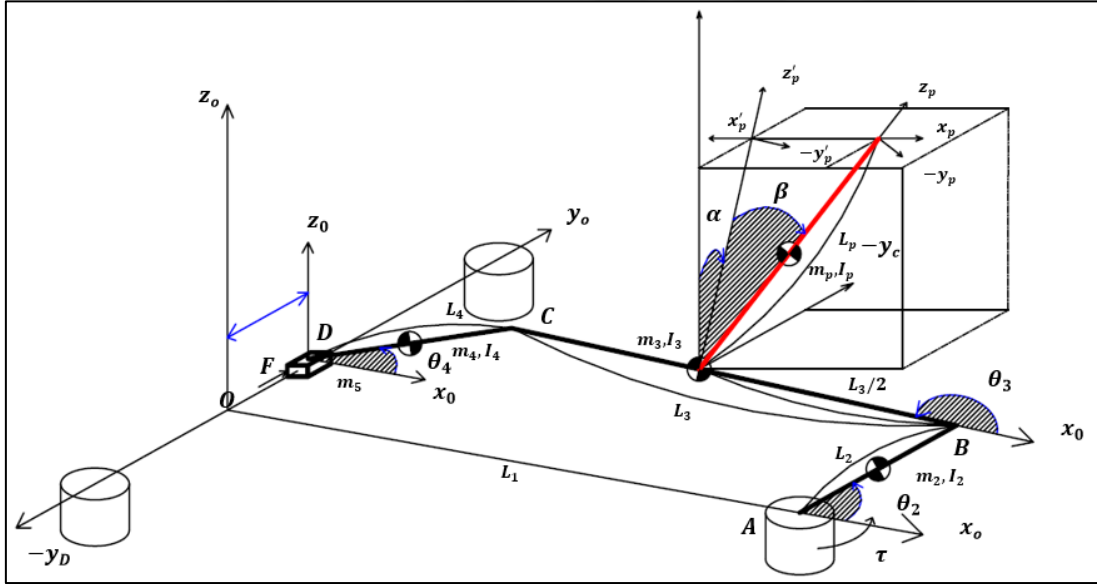
Ters sarkaç sistemi için genelleştirilmiş koordinatlar;

$$q_k = [\theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad s_5 \quad \alpha \quad \beta]^T$$

Ters sarkaç sistemi için genelleştirilmiş torqlar;

$$\tau_k = [\tau_2 \quad 0 \quad 0 \quad F_5 \quad 0 \quad 0]^T$$

Lagrange yönteminde enerji ifadeleri kullanıldığından öncelikle sisteme ait tüm uzuvların kinetik ve potansiyel enerjilerinin bulunması gerekmektedir. Yöntemin uygulanabilmesi için öncelikle Lagrangian fonksiyonunu yazılmalıdır. Burada T sistemin toplam kinetik enerjisini, V toplam potansiyel enerjisini, λ_1 ve λ_2 Lagrange çarpanlarını, f_1 ve f_2 ise sistemin kapalı kinematik döngülerinden elde edilen sınırlayıcı denklemleri temsil etmektedir.



Şekil 3.22. PRRRR mekanizması ve uzaysal ters sarkaçtan oluşan sistemin şematik diyagramı.

Lagrangian fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılırsa,

$$L_k = T_k - V_k \quad (3.8)$$

Bu durumda sistemin toplam kinetik enerjisi (T_k) ve potansiyel enerjisi (V_k) aşağıdaki gibi olacaktır.

$$V_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p m_i \bar{g}^T \bar{r}_{C_i} \quad (3.9)$$

$$T_k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p m_j V_{C_j}^T V_{C_j} + \omega_j^T I_j \omega_j \quad (3.10)$$

Lagrange yöntemine göre hareket denklemlerini veren Lagrange ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_k}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L_k}{\partial q_k} = \tau_k + \sum_j^p \lambda_j \frac{\partial f_j}{\partial q_k} \quad (3.11)$$

Burada λ_j , ($j = 1,2$) Lagrange çarpanları olup f_j , ($j = 1,2$) ise sistemin kinematik denklemlerinden elde edilen sınırlayıcı denklemleri temsil etmektedir. Hareket denklemleri matrisler kullanılarak aşağıdaki formda yazılabilir;

$$M(q_k)\ddot{q}_k + A(q_k)\dot{q}_k = C(q_k, \dot{q}_k, \tau_k) \quad (3.12)$$

$$A^T(q_k)\dot{q}_k = -\dot{A}^T(q_k)\dot{q}_k = H(q_k, \dot{q}_k) \quad (3.13)$$

3.3.1.2. Hareket denklemlerinin elde edilmesi

Lagrange yöntemi ile iki serbestlik dereceli uzaysal ters sarkaç sistemine ait q_k için 6 ve λ için de 2 adet olmak üzere toplam 8 adet hareket denklemi elde edilecektir. İş öncelikle sınırlayıcı denklemler ve uzunların ağırlık merkezi vektörlerinin yazılması ile başlanabilir. Notasyonda kolaylık sağlanması açısından $\text{Cos}(\cdot)$ ve $\text{Sin}(\cdot)$ yerine $C(\cdot)$ ve $S(\cdot)$ kullanılacaktır. Devre kapalılık denklemleri kullanılarak yazılan sınırlayıcı denklemler aşağıdaki gibidir;

$$f_1(q_k) = L_1 + L_2C(\theta_2) + L_3C(\theta_3) - L_4C(\theta_4) \quad (3.14)$$

$$f_2(q_k) = L_2S(\theta_2) + L_3S(\theta_3) - s_5 - L_4C(\theta_4) \quad (3.15)$$

Sınırlayıcılar yardımıyla Jacobian matrisi yazılabilir.

$$\varphi(q_k)_c = \begin{bmatrix} f_1(q_k) \\ f_2(q_k) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.16)$$

Bu durumda Jacobian matrisi;

$$\frac{\partial(\varphi(q_k)_c)}{\partial(q_k)} = 0, A(q_k)q_k = 0$$

Aşağıda $A(q_k)$ matrisi açık formda görülmektedir.

$$A(q_k) = \begin{bmatrix} -L_2 S(\theta_2) & L_2 C(\theta_2) \\ -L_3 S(\theta_3) & L_3 C(\theta_3) \\ L_4 S(\theta_4) & L_4 C(\theta_4) \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Jakobiyen matrisinden sonra uzuvlara ait ağırlık merkezi vektörleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\vec{R}_1 = [L_1 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\vec{R}_2 = \left[L_1 + \frac{L_2}{2} C(\theta_2) \quad \frac{L_2}{2} S(\theta_2) \quad 0 \right]^T$$

$$\vec{R}_3 = \left[L_1 + L_2 C(\theta_2) + \frac{L_3}{2} C(\theta_3) \quad L_2 S(\theta_2) + \frac{L_3}{2} S(\theta_3) \quad 0 \right]^T$$

$$\vec{R}_4 = \left[\frac{L_4}{2} C(\theta_4) \quad s_5 + \frac{L_4}{2} S(\theta_4) \quad 0 \right]^T$$

$$\vec{R}_5 = [0 \quad s_5 \quad 0]^T$$

Sarkaç ağırlık merkezi vektörünün yazılmasında bir parantez açmak gerekir. Bunun sebebi ters sarkaç ağırlık merkezinin farklı bir eksen takımı üzerinde bulunmasıdır. Ters sarkaç ağırlık merkezi vektörünün yere göre yazılması gerekir. Bu aşamada ise dönme matrislerinden faydalanılacaktır. Dönme matrislerinin sarkaç atalet momenti ve sarkaç açısal hızları türetilirken de kullanılacağı düşünüldüğünde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$${}^o_c C = \begin{bmatrix} C(\theta_3) & -S(\theta_3) & 0 \\ S(\theta_3) & C(\theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{p'}_c C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C(\alpha) & -S(\alpha) \\ 0 & S(\alpha) & C(\alpha) \end{bmatrix}$$

$${}^{p'}_p C = \begin{bmatrix} C(\beta) & 0 & S(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -S(\beta) & 0 & C(\beta) \end{bmatrix}$$

Sarkaç ağırlık merkezi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$R_{Sar} = R_{oc} + {}^p_o C R_{cp} \quad (3.18)$$

$${}^p_0C = {}^c_0C {}^{p'}_cC {}^p_0C \quad (3.19)$$

Eş. 3.19 matris olarak yazılır,

$${}^p_0C = \begin{bmatrix} C(\beta)C(\theta_3) - S(\alpha)S(\beta)S(\theta_3) & -C(\alpha)S(\theta_3) & C(\alpha)S(\beta) + C(\beta)S(\alpha)S(\theta_3) \\ C(\theta_3)S(\alpha)S(\beta) + C(\beta)S(\theta_3) & C(\alpha)C(\theta_3) & -C(\beta)C(\theta_3)S(\alpha) + S(\beta)S(\theta_3) \\ -C(\alpha)S(\beta) & S(\alpha) & C(\beta)C(\alpha) \end{bmatrix}$$

ve gerekli işlemler yapılırsa yer koordinat sistemine göre yazılan ters sarkaç ağırlık merkezi vektörü aşağıdaki gibi olacaktır.

$$R_{Sar} = \begin{bmatrix} L_1 + \frac{L_2}{2}C(\theta_2) + \frac{L_3}{2}C(\theta_3) + \frac{L_{Sar}}{2}C(\theta_3)S(\beta) - \frac{L_{Sar}}{2}C(\beta)S(\alpha)S(\theta_3) \\ \frac{L_{Sar}}{2}C(\beta)C(\theta_3)S(\alpha) + L_2S(\theta_2) + \frac{L_3}{2}S(\theta_3) + \frac{L_{Sar}}{2}S(\beta)S(\theta_3) \\ \frac{L_{Sar}}{2}C(\beta)C(\alpha) \end{bmatrix}$$

Ağırlık merkezi vektörlerinin zamana göre türevleri alındığında uzuvlara ait çizgisel hızlara ulaşılabilir.

$$\vec{V}_1 = \frac{d\vec{R}_1(q_k)}{dt}, \quad \vec{V}_2 = \frac{d\vec{R}_2(q_k)}{dt}, \quad \vec{V}_3 = \frac{d\vec{R}_3(q_k)}{dt}, \quad \vec{V}_4 = \frac{d\vec{R}_5(q_k)}{dt}, \quad \vec{V}_{Sar} = \frac{d\vec{R}_{Sar}(q_k)}{dt}$$

Çizgisel hızlardan sonra uzuvlara ait açısal hızlar yazılmalıdır.

$$\omega_2 = [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_2]^T$$

$$\omega_3 = [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_3]^T$$

$$\omega_4 = [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_4]^T$$

$$\omega_5 = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

Sarkaç açısal hızının yazılması için ağırlık merkezi vektöründe olduğu gibi yine dönme matrislerinin kullanılması gerekir. Sarkaç açısal hızları yere göre yazılmak istenirse;

$$\omega_{Sar} = \dot{\alpha} {}^c_0C u_1 + \dot{\beta} {}^c_0C {}^{p'}_cC u_2 + \dot{\theta}_3 u_3 \quad (3.20)$$

$$\omega_{Sar} = {}^p_0C \begin{bmatrix} C(\theta_3)\dot{\alpha} - C(\alpha)S(\theta_3)\dot{\beta} \\ S(\theta_3)\dot{\alpha} + C(\alpha)C(\theta_3)\dot{\beta} \\ S(\alpha)\dot{\beta} + \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} {}^p_0C^T \text{ elde edilir.}$$

Atalet momentleri elde edilmek istenirse sarkaç dışındaki diğer uzuvların ataleti yere göre direkt olarak yazılabilirken sarkaç ataletinin bulunabilmesi için tekrardan dönme matrislerine ihtiyaç duyulur. Burada u_1 , u_2 ve u_3 ortogonal birim vektörlerdir.

$$I_2 = [0 \quad 0 \quad I_{23}]^T$$

$$I_3 = [0 \quad 0 \quad I_{33}]^T$$

$$I_4 = [0 \quad 0 \quad I_{43}]^T$$

$$I_{Sar_O}^p = {}^p_o C [I_{px} \quad I_{py} \quad I_{pz}]_o C^T$$

Açısal hızlar, çizgisel hızlar ve atalet momentlerinin yazılmasından sonra toplam kinetik ve potansiyel enerjiler türetilebilir;

$$T = \frac{1}{2} \left(\omega_2^T I_2 \omega_2 + \omega_3^T I_3 \omega_3 + m_3 V_3^T V_3 + \omega_4^T I_4 \omega_4 + m_4 V_4^T V_4 + m_5 V_5^T V_5 + \omega_{Sar}^T I_{Sar_O}^p \omega_{Sar} + m_{Sar} V_{Sar}^T V_{Sar} \right) \quad (3.21)$$

$$K = \frac{1}{2} m_{Sar} l_{Sar} C(\beta) C(\alpha) \quad (3.22)$$

Enerji terimleri Lagrangianda Eş. 3.8 yerine yazılır ise kütle atalet matrisi, coriolis ve merkezkaç kuvvetleri matrisi ve sınırlayıcılar üzerinde oluşan kuvvetlerin görülebildiği Jacobiyen matrisinin ikinci türevi aşağıdaki gibi bulunur.

$$M(q_k) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 & m_{15} & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 & m_{25} & m_{26} \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{43} & m_{44} & 0 & 0 \\ m_{51} & m_{52} & 0 & 0 & m_{55} & 0 \\ m_{61} & m_{62} & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix}, C(q_k, \dot{q}_k) = \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{21} \\ 0 \\ c_{41} \\ c_{51} \\ c_{61} \end{bmatrix}, H(q_k, \dot{q}_k) = \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{bmatrix}$$

Matrislere ait terimlerin açık hali EK- 1' de verilmiştir.

İndeks düşürme:

Görüldüğü üzere hareket denklemleri 6 bağımsız değişken (q_k) cinsinden yazılmıştır. Fakat kontrolcü tasarımı yapılabilmesi için denklemlerin sadece bağımsız değişkenler cinsinden yazılarak durum uzayında ifade edilmesi gerekir. Bunu yapılabilmesi için Lagrange yöntemi yardımıyla elde edilen cebirsel diferansiyel denklemlerin (CDD indeks-3) minimum sayıda genelleştirilmiş koordinat kullanarak

adi diferansiyel takımı olarak yazılması gerekir. Bu sayı sistemin serbestlik derecesine eşit olup sistemimizde dördür.

CDD'lerin minimum sayıdaki değişkenler (q_z) cinsinden yazılabilmesi için literatürde birden fazla yöntem bulunmaktadır. Bunlardan önemli olanların bazıları (Khan ve ark, 2005) sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- Doğrudan yoketme, yani bağımlı olan fazladan değişkenlerin kinematik sınırlayıcı denklemler kullanılarak sisteme ait denklemlerin açık denklemlere dönüştürülmesi ile yapılabilir (Kecskeméthy ve ark., 1996).
- Açık formda Lagrange çarpanlarının hesaplanması kullanılabilir. Bu yöntemde sınırlandırılmış ivmeler orijinal sınırlayıcı denklemlerin iki kez türevlenmesi ile edilir ve çarpanlar hesaplanarak işlem tamamlanır (Jalon ve Bayo, 1994)
- İz düşümü yöntemi ise uzuv hareketlerinin sınırlayıcı boş uzayına düşürülmesi yardımıyla uygulanan basit ve etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. (Unda ve ark., 1987; Jalon ve Bayo, 1994). Tez çalışmasında bu yöntem kullanılmıştır.

Daha önce sınırlayıcı denklemlerden elde edilen $A(q_k)\dot{q}_k = 0$ ifadesindeki Jakobiyen matrisi $A(q_k)$ ' nin boş uzaydaki çözümlerinden biri $S(q_k)$ olsun. Bu durumda;

$$S(q_k) A(q_k) \dot{q}_k = 0 \quad (3.23)$$

olacaktır. Eş. 3.17 kullanılarak yeni bir $SA(q_k)$ matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$SA(q_k) = \begin{bmatrix} S(q_k) \\ A(q_k) \end{bmatrix}$$

$SA(q_k)$ matrisi Eş. 3.23' te yerine yazılırsa; Bu durumda;

$$S(q_k)\dot{q}_k = \dot{q}_z \text{ ve } A(q_k) \dot{q}_k = 0 \quad \text{ifadeleri birleştirilirse,}$$

$$\begin{bmatrix} S(q_k) \\ A(q_k) \end{bmatrix} \dot{q}_k = \begin{bmatrix} \dot{q}_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

ifadesi elde edilir. Burada

$\dot{q}_z = [\dot{q}_{z1} \quad \dot{q}_{z2} \quad \dot{q}_{z3} \quad \dot{q}_{z4}]^T$ olarak tanımlanabilir. Eş. 3.24' te \dot{q}_z sistemin ifade edilebileceği minimum bağımsız değişken sayısı olarak karşımıza çıkar. Eş. 3.24 düzenlenir ve tekrar yazılırsa bu durumda;

$$\dot{q}_k = \begin{bmatrix} S(q_k) \\ A(q_k) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{q}_z \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{q}_k = T(q_k)\dot{q}_z \quad (3.25)$$

olur.

Burada dikkat edilmesi gereken $T(q_k)_{6 \times 6}$ matrisi rankının 4 olmasıdır. Bu durum $T(q_k)$ matrisi satırlarından ikisinin doğrusal olarak bağımlı olduğu anlamına gelir. $T(q_k)_{6 \times 6}$ matrisinin satırlarından bağımlı olan ikisi silinerek matris tekrar düzenlenir ve böylece $T(q_k)_{6 \times 4}$ matrisi elde edilmiş olur.

Eş. 3.25 zamana göre türevlenir ise;

$$\ddot{q}_k = \dot{T}(q_k)\dot{q}_z + T(q_k)\ddot{q}_z \quad (3.26)$$

Bu ifade Eş. 3.12' de \ddot{q}_k yerine yazılır ve ifade düzenlenir ise;

$$M(q_k)T(q_k)\ddot{q}_z + A(q_k)\lambda = C(q_k, T(q_k)\dot{q}_z) - M(q_k)(\dot{T}(q_k)\dot{q}_z) \quad (3.27)$$

elde edilir. Eş. 3.27 sol taraftan $T(q_k)^T$ ile çarpıldığında

$$T(q_k)^T M(q_k) T(q_k) \ddot{q}_z = T(q_k)^T C(q_k, T(q_k) \dot{q}_z) - T(q_k)^T M(q_k) \dot{T}(q_k) \dot{q}_z \quad (3.28)$$

$$\dot{q}_k = T(q_k)\dot{q}_z$$

Eş. 3.28 düzenlenir ve tekrar yazılır ise;

$$M_r(q_k)_{4 \times 4} \ddot{q}_{z4 \times 1} - C_r(q_k, T(q_k)\dot{q}_z, u)_{4 \times 1} = 0 \quad (3.29)$$

$$\dot{q}_{k6 \times 1} = T(q_k)_{6 \times 4} \dot{q}_{z4 \times 1}$$

Açık matris formundaki yazımı,

$$M_r(q_k) = \begin{bmatrix} M_{r11} & M_{r12} & M_{r13} & M_{r14} \\ M_{r21} & M_{r22} & M_{r23} & M_{r24} \\ M_{r31} & M_{r32} & M_{r33} & M_{r34} \\ M_{r41} & M_{r42} & M_{r43} & M_{r44} \end{bmatrix}, C_p(q_k, T(q_k)\dot{q}_z, u) = \begin{bmatrix} C_{r11} \\ C_{r21} \\ C_{r31} \\ C_{r41} \end{bmatrix}$$

Ayrıca $C_p(q_k, T(q_k)\dot{q}_z, u)$ ifadesinin içerisinde τ_r giriş matrisi ve $G_r(q_k)$ yer çekimi matrisinin de olduğu unutulmamalıdır.

Eş. 3.29 düzenlenir ise bu durumda ivmeler;

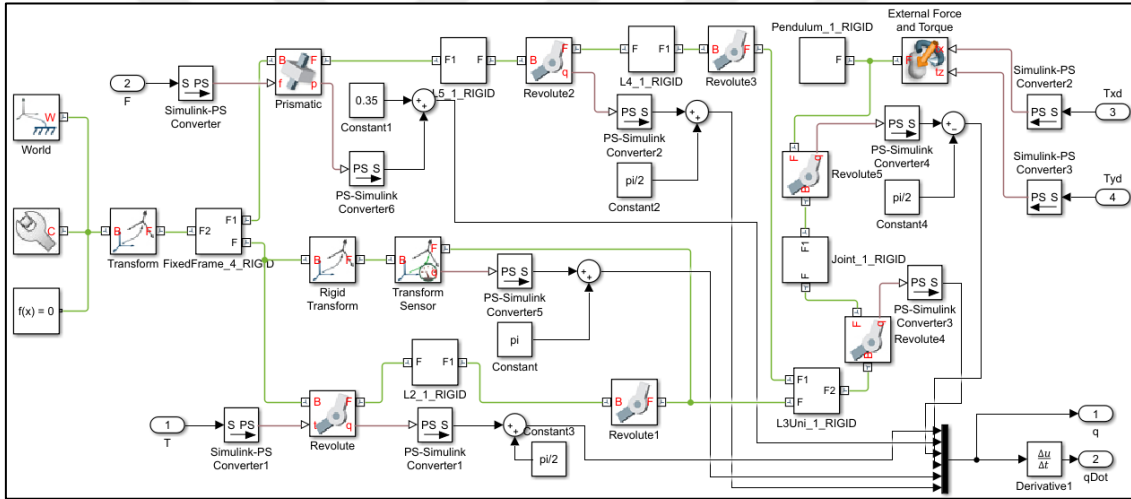
$$\ddot{q}_z = M_r(q_k)^{-1} C_r(q_k, T(q_k)\dot{q}_z, u) \quad (3.30)$$

$$\dot{q}_k = T(q_k)\dot{q}_z$$

Eş. 3.30' da sistem bağımsız değişkenler cinsinden ifade edilmiştir.

3.3.1.3. MATLAB/Simulink Simscape Multibody yazılımı ile modelleme

Ters sarkaç sisteminin iyi bir şekilde kavranması ve denklemlerin doğruluğunun test edilebilmesi için sistemin açık cevabının incelenmesi gerekmektedir. Açık cevap aynı zamanda kontrolcü tasarımı için de önemlidir. Bu bölümde uzaysal ters sarkaç sisteminin MATLAB yazılımı içerisinde bulunan SimMechanics Multibody yazılımı ile modellenmesi üzerinde durulmuştur. Bu yazılım CAD ortamında oluşturulan modeli MATLAB/SIMULINK blok diyagramına çevirmekte ve kontrol için oldukça elverişli bir ortam hazırlamaktadır.

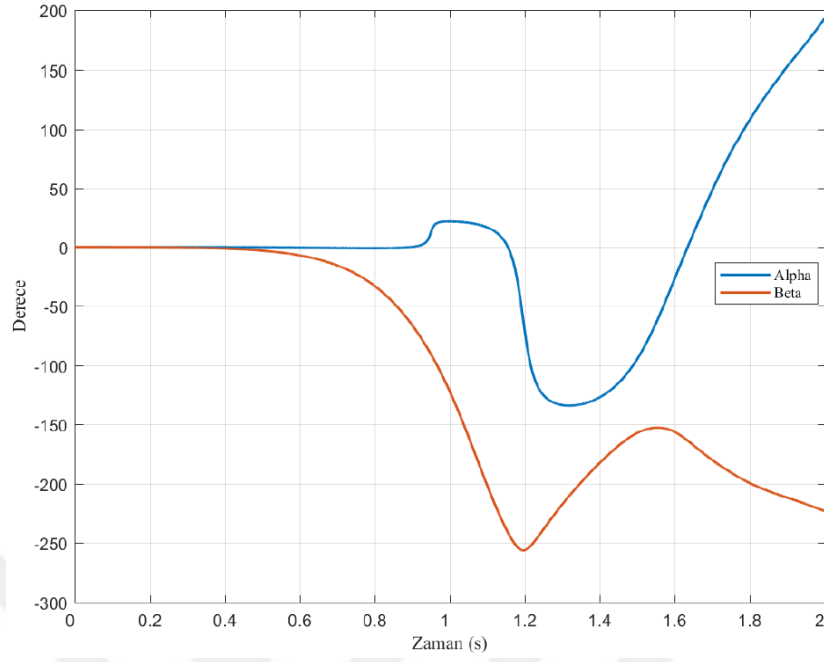


Şekil 3.23. Sistemin Simscape Multibody yazılımındaki blok gösterimi.

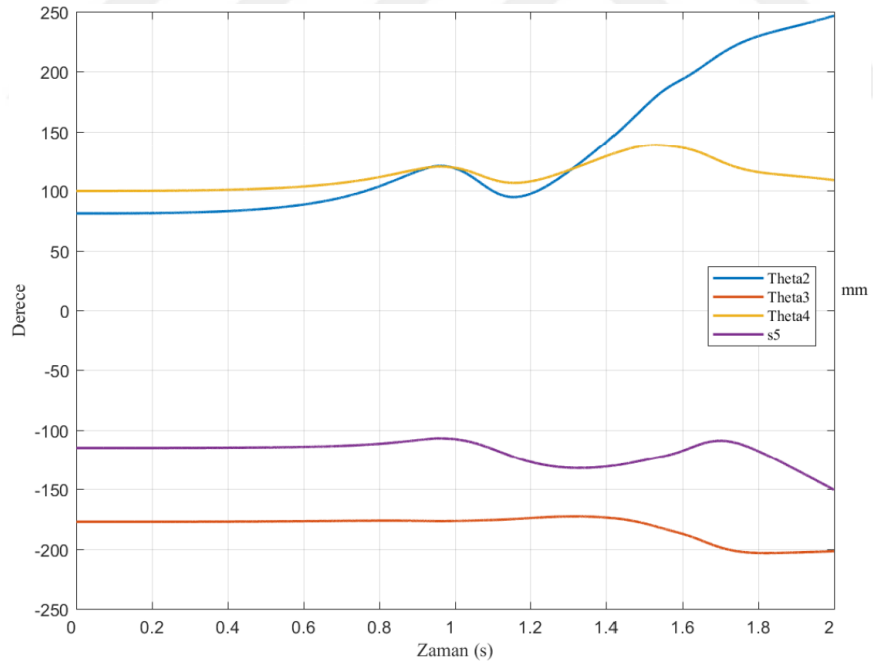
Yazılımda sistemin modellenmesi için 1 adet prizmatik ve 6 adet dönele mafsallı kullanılmıştır. 4 adet dönele mafsallı mekanizma değişkenlerini 2 adet dönele mafsallı sarkaç açılarını ifade etmektedir. Modele dışarıdan gelecek bozucular ve sürtünmeler eklenmiştir. Böylelikle Şekil 3.21'deki uzaysal ters sarkaç modeli Şekil 3.23' de gösterilen SIMULINK kontrol bloğuna dönüşmüştür. Aşağıdaki grafiklerde $T_2 = 0.01\sin(h.t)$ ve $F_5 = 0.01\sin(h.t)$ girişleri için

$$q_b = [0.45 * \pi \quad -0.98 * \pi \quad 0.55 * \pi \quad -0.115 \quad 0 * \pi/180 \quad 0 * \pi/180]^T$$

başlangıç şartlarında başlatılan sistemin α ve β açıları ve mekanizma değişkenlerinin değişimini gösteren açık döngü cevapları Şekil 3.24 ve Şekil 3.25' te görülmektedir.



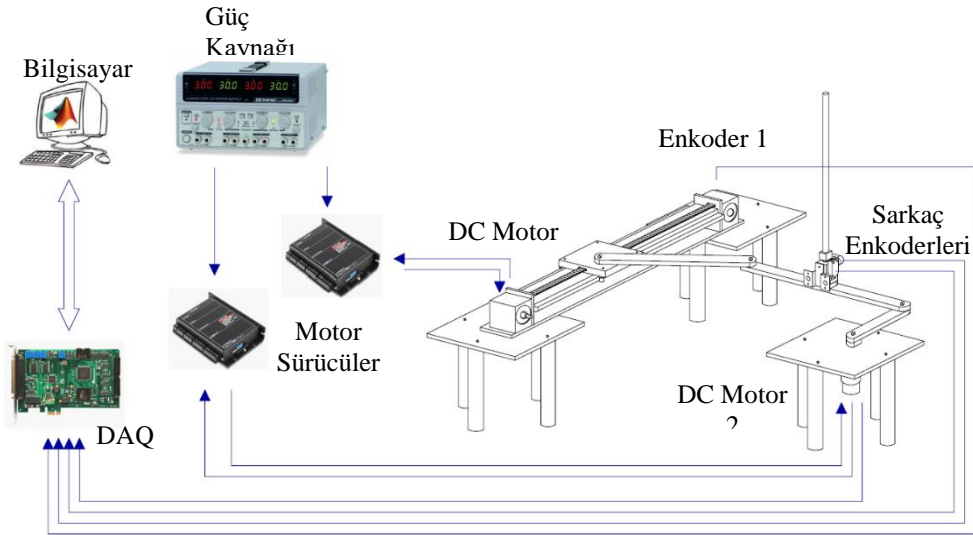
Şekil 3.24. α ve β açılarının açık döngü cevabı



Şekil 3.25. Mekanizma değişkenlerinin açık döngü cevabı

3.2.2 Kontrolcü tasarımı

Aşağıda Şekil 3.26’ da görülen diyagramda iki serbestlik dereceli uzaysal ters sarkaç sistemi sistemde bulunacak elektronik kontrol donanımları ile birlikte gösterilmiştir. Mavi renkli oklar elektronik donanımlar arasındaki haberleşme sinyallerini göstermekte olup kontrol stratejisi hakkında bilgi vermektedir. Stratejide ilk olarak iki adet motor milinin ve dış bozuculara maruz kalacak olan uzaysal ters sarkacın konum açıları (α ve β) enkoderler yardımıyla ölçülecektir. Dört adet dijital ölçüm sinyali veri toplama kartına (DAQ) ulaşacak ve kart üzerinden işlemciye (bilgisayar) aktarılacaktır. İşlemci sarkaç açılarının istenen değerleri (kararlı nokta referans değerleri α_{ref} ve β_{ref}) ile ölçüm değerini karşılaştıracak ve iki değer farkını alarak hata sinyalini ($e_\alpha = \alpha_{ref} - \alpha$) ($e_\beta = \beta_{ref} - \beta$) elde edecektir. Sarkacın denge konumuna getirilebilmesi için bu hataların telafi edilmesi gerekmektedir. Bu aşamada işlemci hata sinyalini kontrol algoritması yardımıyla yorumlayacak ve hatayı en aza indirecek olan değiştirilmiş giriş sinyalini üretecektir. Bu sinyal hatanın telafi edilmesi için gereken DC motor hareket bilgisini içerecektir. Üretilen giriş sinyali işlemciden veri toplama kartına, karttan da motor sürücülere iletilecektir. Sürücüler giriş sinyalini alacak ve DC güç kaynağı tarafından beslenen motorlara gerekli akımı göndererek kontrol için ihtiyaç duyulan hareket üretilmiştir olacaktır.



Şekil 3.26. Uzaysal ters sarkaç sistemi kontrol stratejisi.

Çalışmanın devamında yukarıda bahsedilen kontrol stratejisinin uygulanması ve iki serbestlik dereceli uzaysal ters sarkacın kararsız üst denge noktası etrafında kontrol edilebilmesi için doğrusal olmayan ve doğrusallaştırılmış modeller üzerinden kontrolcü tasarımı yapılacaktır. Doğrusallaştırılmış kontrolcü için Lineer Quadratik Gaussian (LQG) kontrol, doğrusal olmayan kontrolcü için ise ikinci dereceden kayan kipli kontrol metodu kullanılmıştır.

3.3.1.4. Doğrusal kuadratik Gaussian (LQG) kontrolcü tasarımı

Doğrusal karesel düzenleyici (LQR) kontrol, kontrol teorisinin en temel optimal kontrol problemlerinden biridir. Problem, beyaz Gauss gürültüsü ile ilave bozucu girişi yapılan ve eksik durum bilgisine sahip belirsiz doğrusal sistemlerin ikinci dereceden bir maliyet fonksiyonuna tabi tutularak kontrol edilmesi ile ilgilidir. Problemin çözümü sonunda kolayca hesaplanıp uygulabilen benzersiz (tek) bir dinamik geribildirim kontrol yasası elde edilmektedir.

LQG kontrolcü, LQR ile Kalman filtresinin (KF) başka bir deyişle doğrusal kuadratik bir tahmin edicinin (LQE) birleşimidir. Yöntem zamanla değişmeyen doğrusal sistemlerin yanı sıra zamanla değişen doğrusal sistemler için de geçerlidir. İsminden de belli olduğu üzere bu kontrolcünün tasarımı için önce sistemin belirli bir denge noktası etrafında doğrusallaştırılması gerekmektedir.

Sistemin doğrusallaştırılması

Sistemin doğrusallaştırılması için üst kararsız denge noktasının ifade edilmesi gerekir. Doğrusallaştırmanın mekanizmanın dengeleme işlemini yapacağı uygun bir yapılandırma göz önüne alınarak yapılması kontrolcü performansını da artıracaktır. Bu durumda

$$q_k = [\pi \quad \pi/2 \quad \pi \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\dot{q}_z = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\ddot{q}_z = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\tau_2 = f_5 = 0$$

İçin doğrusallaştırma yapılabilir. Bu halde sistem durumları aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$X = \begin{bmatrix} \dot{q}_{z1} \\ \dot{q}_{z2} \\ \dot{q}_{z3} \\ \dot{q}_{z4} \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ s_5 \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} \tau_2 \\ F_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Eş. 3.30 doğrusallaştırılır ve kısmi diferansiyeller alınır ise;

$$\partial \dot{q}_z = A_{11_{4 \times 4}} \partial \dot{q}_z + A_{12_{4 \times 6}} \partial q_k + B_{11_{4 \times 2}} \partial u \quad (3.32)$$

$$\partial \dot{q}_k = A_{21_{6 \times 4}} \partial \dot{q}_z + A_{22_{6 \times 4}} \partial q_k + B_{21_{6 \times 2}} \partial u \quad (3.33)$$

Burada

$$A_{1n_{4 \times 10}} = M_p(q_k)^{-1} \frac{\partial G(q_k, T(q_k) \dot{q}_z, u)}{\partial X}, B_{1n_{4 \times 2}} = M_p(q_k)^{-1} \frac{\partial G(q_k, T(q_k) \dot{q}_z, u)}{\partial U}$$

$$A_{2n_{6 \times 10}} = \frac{\partial T(q_k) \dot{q}_z}{\partial X}, B_{2n_{6 \times 2}} = \frac{\partial T(q_k) \dot{q}_z}{\partial U}$$

olacaktır.

Eş. 3.30 denge noktasında çözülür ise sisteme ait durum uzay modeli elde edilir. Görüldüğü üzere bu değişkenler ile yazılan durum uzayı farklı boyutlara sahip matrisler ile yazılmaktadır. Bu farklılığı gidermek için değişken değişimi kullanılabilir. Eş. 3.10' da görülebileceği üzere $A(q_k)^T \partial q_k = 0$ 'dır Eşitlikten $\partial q_k = \bar{S}(q_k)_{6 \times 4} \partial \rho_k$ ve $\partial \dot{q}_k = \bar{T}(q_k)^T_{4 \times 6} \bar{S}(q_k)_{6 \times 4} \partial \rho_k$ değişken değişimi yapılabilir. Değiştirilmiş değişkenler Eş. 3.32' de yerine yazılır ve Eş. 3.33 sol taraftan $\bar{T}(q_k)^T$ ifadesi ile çarpılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir. $\bar{S}(q_k)$ ve $\bar{T}(q_k)^T$ ifadeleri ile $S(q_k)$ ve $T(q_k)^T$ matrislerinin kararsız üst denge noktasında doğrusallaştırılmış hali ifade edilmektedir.

$$\partial \dot{q}_z = A_{11_{4 \times 4}} \partial \dot{q}_z + A_{12_{4 \times 6}} \bar{S}_{6 \times 4} \partial \rho_k + B_{11_{4 \times 2}} \partial u \quad (3.33)$$

$$\partial \dot{\rho}_k = \bar{T}(q_k)^T_{4 \times 6} A_{21_{6 \times 4}} \partial \dot{q}_z + \bar{T}(q_k)^T_{4 \times 6} A_{22_{6 \times 4}} \bar{S}_{6 \times 4} \partial \rho_k + \bar{T}(q_k)^T_{4 \times 6} B_{21_{6 \times 2}} \partial u \quad (3.34)$$

Dikkat edilirse $\bar{T}(q_k)^T_{4 \times 6} \cdot \bar{S}(q_k)_{6 \times 4} = I_{4 \times 4}$ olduğundan Eş. 3.34' te eşitliğin sol tarafındaki $\partial \rho_k$ ifadesi yalnız başına kalmaktadır.

A ve B matrisleri elde edildiğine göre sıra C ve D matrislerinin yazılmasındadır. Bu matrisler yazılmadan önce çıkış matrisinin tanımlanması gerekir. Sistemin iki adet giriş ve iki adet çıkışı gözlenmek istendiğinden bu duruma $\text{çıkışlar} = [\theta_2 \ s_5 \ \alpha \ \beta]$ olarak tanımlanabilir. Bu durumda;

$$C = \frac{\partial(\text{çıkışlar})}{\partial \dot{q}_z} + \frac{\partial(\text{çıkışlar})}{q_k}, \quad D = \frac{\partial(\text{çıkışlar})}{\partial U}$$

$$C = C_{11} \partial \dot{q}_z + C_{12} \partial q_k, \quad D = D_{11} \partial U$$

olarak yazılabilir. Değişken değişimine gidildiğinde

$$C = C_{11} \partial \dot{q}_z + C_{12} \bar{S}_{6 \times 4} \partial \rho_k, \quad D = D_{11} \partial U \text{ elde edilir.}$$

Tam doğrusal sistem yazılmak istenirse;

$$A = \begin{bmatrix} A_{11}{}_{4 \times 4} & A_{12}{}_{4 \times 6} \bar{S}_{6 \times 4} \\ \bar{T}(q_k)^T_{4 \times 6} A_{21}{}_{6 \times 4} & \bar{T}(q_k)^T_{4 \times 6} A_{22}{}_{6 \times 4} \bar{S}_{6 \times 4} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_{11}{}_{4 \times 2} \\ \bar{T}(q_k)^T_{4 \times 6} B_{21}{}_{6 \times 2} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$C = [C_{11} \quad C_{12} \bar{S}_{6 \times 4}] \quad D = [D_{11}]$$

A , B , C ve D matrisleri elde edildiğine göre daha önce ölçülerek hesaplanmış kütle, atalet ve boyutsal değerler yerlerine yazılarak sistemin sayısal durum uzay modeli gibi yazılabilir. Aşağıdaki tabloda sabit sistem parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.8 Sistemin sabit parametreleri.

Boyutlar (m)	L_1	0.3 m
	L_2	0.1 m
	L_3	0.35 m
	L_4	0.2 m
	L_{Sar}	0.4 m
Kütle (kg)	m_2	0.08783 kg
	m_3	0.22421 kg
	m_4	0.14778 kg
	m_5	0.29133 kg
	m_{Sar}	0.057kg
Ataletler (kgm ²)	I_{2z}	$32013.27 * 10^{-9} \text{ kgm}^2$
	I_{3z}	$2875910.82 * 10^{-9} \text{ kgm}^2$
	I_{4z}	$183814.49 * 10^{-9} \text{ kgm}^2$
	I_{Sarx}	$1293944.16 * 10^{-9} \text{ kgm}^2$
	I_{Sary}	$1310147.04 * 10^{-9} \text{ kgm}^2$
	I_{Sarz}	$23001.97 * 10^{-9} \text{ kgm}^2$

0	0	0	0	94.1719	0	0	0	-37.5	0
0	0	0	0	0	77.1864	0	0	0	4.01238
0	0	0	0	0	3.71368	0	0	0	4.04211
0	0	0	0	-18.375	0	0	0	33.3333	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.264706	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1.	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Şekil 3.27. Doğrusallaştırılmış sistemin sayısal durum uzay gösterimi.

Elimizde durum uzay modeli bulunduğundan sisteme ait transfer fonksiyonu da kolaylıkla yazılabilir. Sistemin açık çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

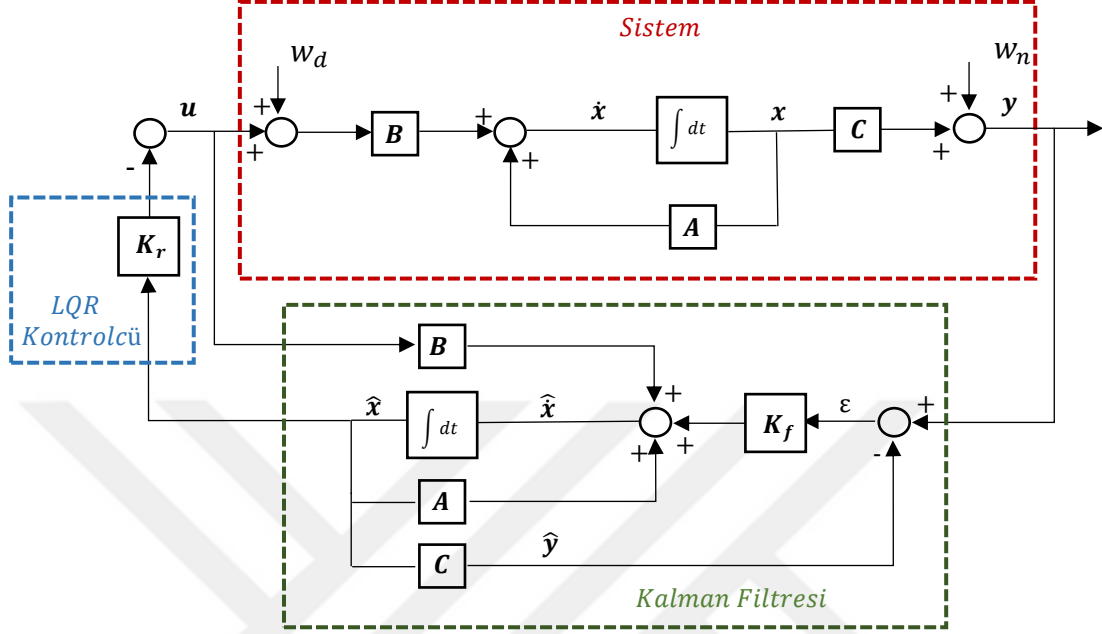
$$T_f = \begin{bmatrix} \frac{-1225+16.667s^2}{-94.1719s^2+s^4} & 0 \\ 0 & \frac{-78.6427+1.06997s^2}{-77.1864s^2+s^4} \\ 0 & \frac{4.01238}{-77.1864+s^2} \\ -\frac{37.5}{-94.1719+s^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

A matrisinin öz değerlerini veya transfer fonksiyonunun kutuplarını incelemek sistemin kararlılığı hakkında fikir verici olacaktır.

$$\text{Özdeğer} = [-9.704 \quad 9.704 \quad -8.7855 \quad 8.7855 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (3.39)$$

Eş. 3.39' da görüldüğü üzere sistem matrisinin özdeğerlerinden ikisi pozitiftir. Pozitif özdeğerler kararsızlık anlamına geldiğinden sistemin kontrol edilebilmesi için bu özdeğerlerin negatif değerlere döndürülmesi gerekir.

LQR kontrolcü tasarımı



Şekil 3.28. LQG kontrol akış diyagramı

Şekil 3.28’ de de görüldüğü üzere genel olarak bir doğrusal sistem aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{x} = Ax + Bu + w_d \quad (3.40)$$

$$y = Cx + w_n$$

Kontrolcü tasarımına öncelikle doğrusal kuadratik düzenleyici (LQR) tasarımı ile başlandığından ilk olarak Eş. 3.40 ile verilen doğrusal sistem Eş. 3.41’ de verilen kuadratik bir maliyet fonksiyonuna tabi tutulmuş ve sonrasında Riccati diferansiyel denkleminin çözümü ile bu maliyet fonksiyonunu optimize eden durumlar elde edilmiştir.

$$J_{LQR} = \int_0^{\infty} x^T Q x + u^T R u dt \quad (3.41)$$

Yukarıdaki maliyet fonksiyonunda x durumları, u girişleri Q ve R ise ağırlık matrislerini temsil etmektedir. Ağırlık matrisleri sistemin istenen davranışına bağlı olarak Q pozitif yarı tanımlı ve R ise pozitif tanımlı keyfi şekilde yazılabilmektedir.

$$A^T L + LA - LBR^{-1}B^T L + Q = 0 \quad (3.42)$$

$$K_r = R^{-1}B^T L \quad (3.43)$$

$$u = -K_r x \quad (3.44)$$

Eş. 3.42' nin çözümü (L) olup bu çözüm uzaysal ters sarkaç sistemini stabilize etmektedir. Eş. 3.41 statik kazanç sabiti K_r 'yi, Eş. 3.42 ise durumları optimize edecek girişleri verir. Eş. 3.42' nin çözülebilmesi için Q ve R matrislerinin tanımlanması gerekmektedir.

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho \end{bmatrix} \quad \rho = 0.75$$

$$R = \begin{bmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \gamma \end{bmatrix} \quad \gamma = 0.015$$

Ağırlık matrisleri de tanımlandığına göre Riccati diferansiyeli çözümlü K_r sabitine ulaşılabilir. Eş. 3.43 ve Eş. 3.44 hesaplanarak Eş. 3.41' de yerine yazılırsa statik kazanç sabiti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$K_r = \begin{bmatrix} 2.276 & 0 & 0 & 1.441 & 21.717 & 0 & 0 & 7.071 \\ 0 & -6.833 & 1.436 & 0 & 0 & -60.073 & 7.071 & 0 \end{bmatrix}$$

LQR kontrolcü tasarımı aşamada tamamlanmış olup Kalman filtresinin tasarımı yapılmalıdır.

Durum tahminleyici tasarımı

Ölçülen durumlar yardımıyla diğer durumları tahminleyen Kalman filtresine ait denklemler aşağıda verilmiştir. Burada \hat{x} tahminlenen durumları, \hat{y} tahminlenen çıkışları, ε gerçek çıkışlar ile tahminlenen çıkışlar arasındaki farkları belirtmektedir. $K_f \varepsilon$ terimi ise gerçek çıkışlar ile tahminlenen çıkışlar arasında bir güncelleyici olarak düşünülebilir.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_f \varepsilon \quad (3.45)$$

$$\hat{y} = C\hat{x}$$

$$\varepsilon = y - \hat{y}$$

Kalman filtresi ile LQR kontrolcü tasarımındaki ile benzer olarak gerçek çıkışlar ile tahminlenen çıkışlar arasındaki fark (ε) Eş. 3.46' da tanımlanan bir skaler maliyet

fonksiyonuna tabi tutularak optimize edilir. Bunun yapılabilmesi için ise yine bir Riccati diferansiyel denklemi çözülmesi gereklidir. Maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$J_{KF} = \lim_{n \rightarrow \infty} E([y - \hat{y}]^T [y - \hat{y}]) \quad (3.46)$$

Yukarıdaki maliyet fonksiyonunda y gerçek çıkış değerlerini, \hat{y} ise tahminlenen çıkış değerlerini temsil etmektedir. Riccati denkleminin çözümü için tekrardan ağırlık matrislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemimizde bu matrisler Q_{se} ve R_{se} olarak LQR ağırlık matrislerinin aynıları olarak tanımlanmıştır. Aşağıdaki denklemlerden P çekilerek (K_f) Kalman filtre kazancı elde edilebilir.

$$AP + PA^T - PC^T R_{se}^{-1} CP + Q_{se} = 0 \quad (3.47)$$

$$K_f = PB^T R_{se}^{-1} \quad (3.48)$$

LQR ve LQE' nin birleştirilmesi

Eş. 3.40 ve Eş. 3.45 birleştirilip yazılırsa LQR ve LQE (Kalman filtresi) birleşimi LQG kontrolcü elde edilmiş olacaktır.

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + w_d \\ y &= Cx + w_n \\ u &= -K_r \hat{x} \end{aligned} \right\} \text{Doğrusallaştırılmış sistem} \quad (3.49)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + K_f \varepsilon \\ \hat{y} &= C\hat{x} \\ \varepsilon &= y - \hat{y} = Cx + w_n - C\hat{x} \end{aligned} \right\} \text{Tahminleyici temelli kontrol denklemleri} \quad (3.50)$$

Eş. 3.45 tekrar düzenlenip yazılır ise;

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax - BK_r \hat{x} + w_d \\ \dot{\hat{x}} &= (A - BK_r - K_f C)\hat{x} + K_f y \end{aligned} \quad (3.51)$$

Burada Eş. 3.51 sistemin kontrolçüsüdür. Kontrolcü için kendi başına bir dinamik sistemi ifade ettiği söylenebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BK_r \\ K_f C & A - BK_r - K_f C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_d \\ y \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Eş. 3.52 ise birleşik kapalı çevrimi ifade etmektedir.

3.3.1.5. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcü (İDKKK) tasarımı

Kayan kipli kontrol (KKK), doğrusal olmayan bir sistemi süreksiz bir kontrol sinyali yardımıyla tanımlanmış bir hata düzlemi üzerinde "kaymaya" zorlayan doğrusal olmayan bir kontrol yöntemidir. Kontrolcüde geri bildirimli kontrol yasası zamanın sürekli bir fonksiyonu değildir. Bunun yerine, durum uzayındaki mevcut konuma bağlı olarak bir sürekli yapıdan diğerine geçilmektedir. Bu bölümde uzaysal ters sarkaç sisteminin denetimi için ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü önerilmiştir.

Kontrolcünün tasarlanabilmesi için dinamik denklemlerin istenilen formda yazılması gerekir. Eş. 3.30 öncelikle yarı açık formda aktif ve pasif bağımsız değişkenlere ayrılarak yazılmalı ve daha sonra sadece geri besleme çıkışı kısmi olarak doğrusallaştırılmalıdır. Doğrusallaştırma işlemi kontrol edilmek istenen bağımsız değişkene göre, denklemlerin farklı şekilde düzenlenmesiyle yapılır. Kontrolü istenen çıkışlar aynı zamanda aktif bağımsız değişkenler (Tahrik edilen bağımsız mafsal değişkenleri) olarak kullanılıyorsa bu durumda denklemler sıralı, kontrol edilmek istenen çıkışlar pasif bağımsız değişkenler (Sarkaç açıları) ise bu durumda denklemler sırasız formda yazılmalıdır (Spong, 1994). Bu çalışmada aktif ve pasif değişkenlerin kontrolü değişimli olarak yapılacağından denklemlerin her iki türde de düzenlenmesi gerekmektedir.

Eş. 3.29 aktif ve pasif olarak tekrar düzenlenir ise bu durumda;

$$q_z = [q_{za} \ q_{zp}]^T, q_{za} = [\theta_2 \ s_5]^T, q_{zp} = [\alpha \ \beta]^T, \tau_a = [T_2 \ F_5]$$

$$M_{aa} = \begin{bmatrix} m_{r11} & m_{r12} \\ m_{r21} & m_{r22} \end{bmatrix}, M_{ap} = \begin{bmatrix} m_{r13} & m_{r14} \\ m_{r23} & m_{r24} \end{bmatrix}, C_a = \begin{bmatrix} C_{r1} \\ C_{r2} \end{bmatrix}$$

$$M_{pa} = \begin{bmatrix} m_{r31} & m_{r32} \\ m_{r41} & m_{r42} \end{bmatrix}, M_{pp} = \begin{bmatrix} m_{r33} & m_{r34} \\ m_{r43} & m_{r44} \end{bmatrix}, C_p = \begin{bmatrix} C_{r3} \\ C_{r4} \end{bmatrix}$$

olacaktır. İfadeler matris formunda yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ap} \\ M_{pa} & M_{pp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_a \\ C_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Buradan;

$$M_{aa}\ddot{q}_{za} + M_{ap}\ddot{q}_{zp} + C_a = \tau_a \quad (3.54)$$

$$M_{pa}\ddot{q}_{za} + M_{pp}\ddot{q}_{zp} + C_p = 0 \quad (3.55)$$

Sıralı formda yazım:

Eş. 3.55' te \ddot{q}_{zp} terimi çekilir ise bu durumda,

$$\ddot{q}_{zp} = -M_{pp}^{-1}M_{pa}\ddot{q}_{za} - M_{pp}^{-1}C_p \quad (3.56)$$

Eş. 3.56, Eş. 3.54' te yerine yazılırsa buradan

$$(M_{aa} - M_{ap}M_{aa}^{-1}M_{pa})\ddot{q}_{za} - (C_a - M_{ap}M_{pp}C_p) = \tau_a \quad (3.57)$$

Aşağıdaki ifadeler yazılabilir:

$$\overline{M}_a = M_{aa} - M_{ap}M_{aa}^{-1}M_{pa}$$

$$\overline{C}_a = C_a - M_{ap}M_{pp}C_p$$

Burada $M_r(q_k)$ matrisi pozitif tanımlı olduğundan \overline{M}_a matrisi de pozitif tanımlıdır ve tersi alınabilir. Eş. 3.57 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir

$$\overline{M}_a\ddot{q}_{za} + \overline{C}_a = \tau_a \quad (3.58)$$

Burada yeni kontrol girişi v olarak seçilirse

$$\tau_a = \overline{M}_a\ddot{q}_{za} + \overline{C}_a \quad (3.59)$$

Eş. 3.59' da $\ddot{q}_{za} = v$ kısmi olarak doğrusallaştırılıp Eş. 3.55 ile yazılır ise tüm sistemi veren ifade aşağıdaki gibi olacaktır,

$$M_{pp}\ddot{q}_{zp} + C_p = -M_{pa}v \quad (3.60)$$

$$\ddot{q}_{za} = v$$

Sıralı olmayan formda yazım:

Benzer olarak Eş. 3.55' ten bu sefer \ddot{q}_{za} terimi çekilir ise bu durumda,

$$\ddot{q}_{za} = -M_{ap}^{-1}M_{pp}\ddot{q}_{zp} - M_{pa}^{-1}C_p \quad (3.61)$$

Eş. 3.62, Eş. 3.54' te yerine yazılırsa buradan

$$(M_{ap} - M_{aa}M_{pa}^{-1}M_{pp})\ddot{q}_{zp} - (C_a - M_{aa}M_{ap}C_p) = \tau_a \quad (3.62)$$

Aşağıdaki ifadeler yazılabilir:

$$\overline{M}_p = M_{ap} - M_{aa}M_{pa}^{-1}M_{pp}$$

$$\overline{C_p} = C_a - M_{aa}M_{ap}C_p$$

Burada $M_r(q_k)$ matrisi pozitif tanımlı olduğundan $\overline{M_p}$ matrisi de pozitif tanımlıdır ve tersi alınabilir. Böylece Eş. 3.63 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir

$$\overline{M_u}\ddot{q}_{zp} + \overline{C_u} = \tau_a \quad (3.64)$$

Eş. 3.64' te $\ddot{q}_{za} = u$ kısmi olarak doğrusallaştırılıp Eş. 3.55 ile birlikte yazılır ise tüm sistemi veren ifade bu sefer de aşağıdaki gibi olacaktır,

$$M_{pa}\ddot{q}_{za} + C_u = -M_{aa}u \quad (3.65)$$

$$\ddot{q}_{za} = u \quad (3.66)$$

Burulmalı kayan kipli kontrolcü tasarımı:

Kontrolcü tasarımına kayma yüzeyleri tanımlanarak başlanmalıdır. Sarkaç açıları kontrol edilmek istendiğinden bu yüzeyleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$q_{refp} = [\alpha \beta]^T \text{ referans sarkaç açıları}$$

$$q_{zpp} = [\alpha \beta]^T \text{ anlık ölçülen sarkaç açıları olması durumunda kayma yüzeyleri:}$$

$$s = (q_{refp} - q_{zpp})$$

$$\dot{s} = (\dot{q}_{refp} - \dot{q}_{zpp})$$

Burulmalı kayan kipli kontrol algoritması (Mahjoub ve ark., 2014) yardımıyla sarkacın kararsız üst noktada dengelenmesi istendiğinden referans değerler olarak $q_{refp} = 0$ ve $\dot{q}_{refp} = 0$ yazılır ve işaret fonksiyonu olarak signum fonksiyonu kullanılırsa; bu durumda,

$$u = Q_1s + Q_2\text{sign}(s) + Q_3\dot{s} + Q_4\text{sign}(\dot{s})$$

$$u = -Q_1q_{zpp} - Q_2\text{sign}(q_{zpp}) - Q_3\dot{q}_{zpp} + Q_4\text{sign}(\dot{q}_{zpp}) \quad (3.67)$$

Sistemin aktif bağımsız değişkenleri kontrol edilmek istenirse bu durumda

$$q_{refa} = [\theta_2 s_5]^T \text{ referans girişleri}$$

$$q_{za} = [\theta_2 s_5]^T \text{ anlık ölçülen giriş değerleri olması durumunda kayma yüzeyleri:}$$

$$s = (q_{refa} - q_{za})$$

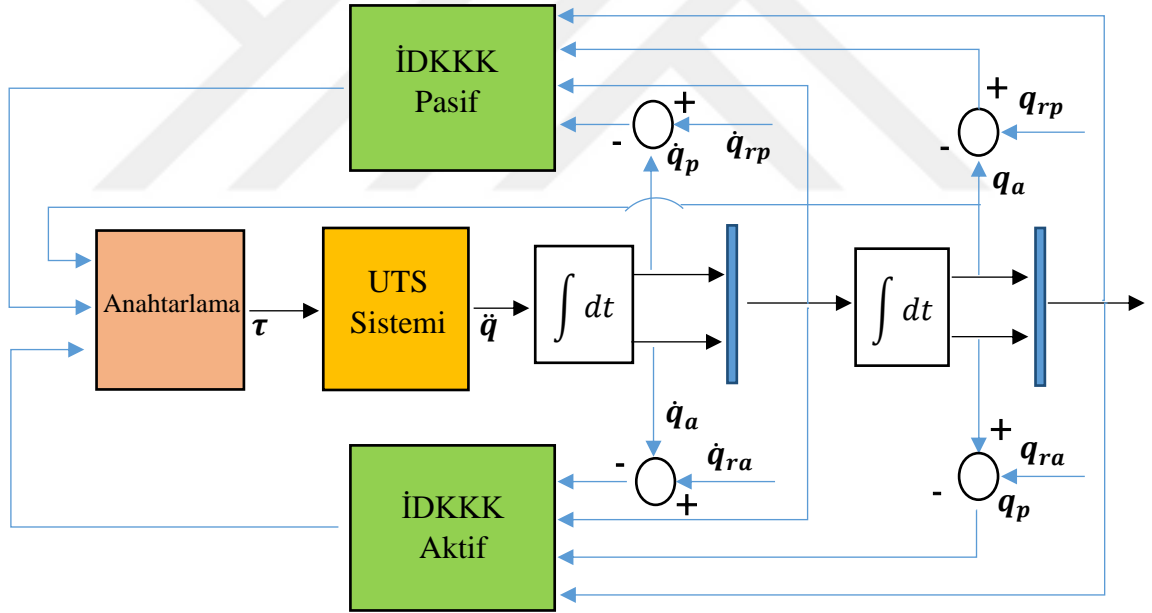
$$\dot{s} = (\dot{q}_{refa} - \dot{q}_{za})$$

olarak tanımlanır. Mekanizma girişlerinin (aktif bağımsız değişkenlerin) kontrol edilmesi için referans değerler olarak q_{refa} ve \dot{q}_{refa} olarak verilir ve işaret fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant kullanılırsa bu durumda;

$$u = P_1 s + P_2 \tanh(s) + P_3 \dot{s} + P_4 \tanh(\dot{s})$$

$$u = -Q_1(q_{refa} - q_{za}) - Q_2 Q_2 \tanh(q_{refa} - q_{za}) - Q_3(\dot{q}_{refa} - \dot{q}_{za}) - Q_4 \tanh(\dot{q}_{refa} - \dot{q}_{za}) \quad (3.68)$$

Aşağıda ikinci dereceden burulmalı kayan kipli kontrolcü uygulaması için tasarlanan kontrol algoritmasına ait akış diyagramı görülmektedir. Algoritmada pasif ve aktif kontrolcüler sarkaç açılarındaki hata değerine göre sırayla çalıştırılmaktadır. Pasif kontrolcü sarkaç açılarını kontrol ederken aktif kontrolcü ise mekanizma çalışma alanı içerisindeki en becerikli noktaya götürmektedir.



Şekil 3.29. İkinci dereceden kayan kipli kontrol akış diyagramı

4. BULGULAR

Bu bölümde daha önce tasarımı yapılan İDKKK ve LQG kontrolcülerin dinamik model üzerinden MATLAB yazılımı yardımıyla benzetimleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar kontrolcü performansları bakımından karşılıklı olarak değerlendirilmiştir. İlk olarak verilen impuls bozuculara karşı ters sarkacın dengelenmesi; ikinci olarak başlangıç şartları konumundan dengeye getirilmesi ve daha sonra uzaysal ters sarkacın dengelenmesi ve dengede tutulması kontrolcü performansları bakımından değerlendirilmiştir.

4.1. Ters Sarkacın Impuls Bozucu Karşısında Dengelenmesi

Dengedeki bir uzaysal ters sarkaca uygulanan impuls tip bozucu, denge halindeki ters sarkaca elde tutulan bir çubuk ile vurulması ile benzer bir fiziki durumu ifade etmektedir. Tasarlanan kontrolcülerinin değerlendirilebilmesi için gereken en önemli sonuçlardan ilki, sistemin ters sarkaca uygulanan bu impuls bozuculara karşı sergilediği davranışlar yardımıyla elde edilebilir. Kontrolcülerin birbirlerinden ne derece gürbüz, çevik veya kararlı olduğu bu sonuçlar yorumlanarak belirlenebilir. Aşağıda uzaysal ters sarkaca impuls bozucuların uygulandığı benzetim ile ilgili bilgiler verilmiştir.

- Denge konumundan başlayan ve 1 saniye süren benzetimlere aşağıdaki başlangıç konumlarından başlanmıştır.

$$q_b = [0.45 * \pi \quad -0.98 * \pi \quad 0.55 * \pi \quad -0.115 \quad 0 * \pi/180 \quad 0 * \pi/180]^T$$

- İmpuls bozucu girişi benzetimin 0.25 inci saniyesinde 0.001 saniye boyunca yapılmaktadır. İmpuls değeri kontrolcüler başarısız oluncaya kadar kademeli olarak arttırılmıştır.

- İDKKK' de kullanılan ve keyfi belirlenen sabitler:

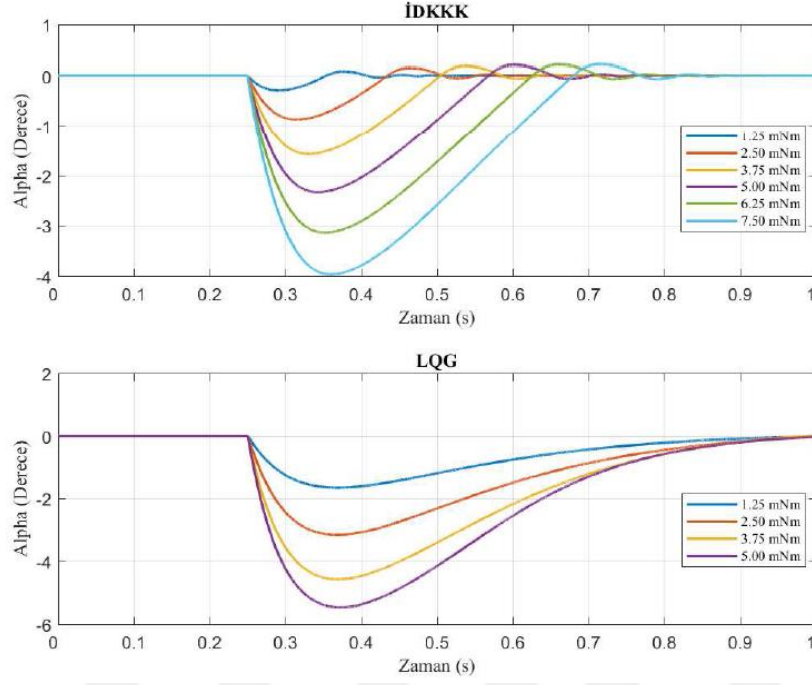
$$P_1 = \text{diag}[17.5 \ 17.5], P_2 = \text{diag}[15 \ 15], P_3 = \text{diag}[4.2 \ 4.2], P_4 = \text{diag}[0.9 \ 0.9],$$

- LQG kontrolcü de kullanılan ve keyfi olarak belirlenen ağırlık matrisleri:

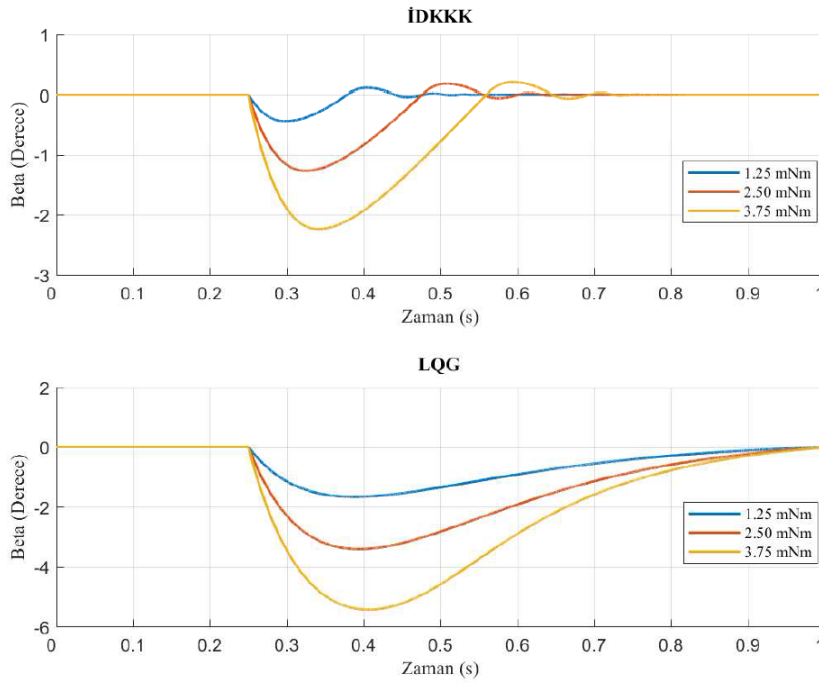
$$Q = \text{diag}[200 \ 150 \ 10 \ 100 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.001 \ 0.001], R = \text{diag}[0.0001 \ 0.0001]$$

$$Q_{SE} = \text{diag}[1200 \ 150 \ 10 \ 100 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.001 \ 0.001], R_{SE} = \text{diag}[0.0001 \ 0.0001]$$

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 değişik imluse girişleri için LQG ve İDKKK kontrolcülerinin performanslarını göstermektedir.



Şekil 4.1. α açısının impuls bozucu ile değişimi



Şekil 4.2. β açısının impuls bozucu ile değişimi

4.2. Ters Sarkacın Kararlı Başlangıç Konumundan Dengelenmesi

Tasarlanan kontrolcülerinin değerlerdirilebilmesi için gereken ikinci önemli sonuç sistemin farklı sarkaç başlangıç açılarına karşı gösterdiği davranıştır. Kontrolcülerin gürbüzlük, çeviklik ve kararlılık kıstasları açısından değerlendirilebileceği ikinci kıstas budur. Aşağıda uzaysal ters sarkacın maksimum sarkaç başlangıç açıları için elde edilen benzetimi ile ilgili bilgiler verilmiştir.

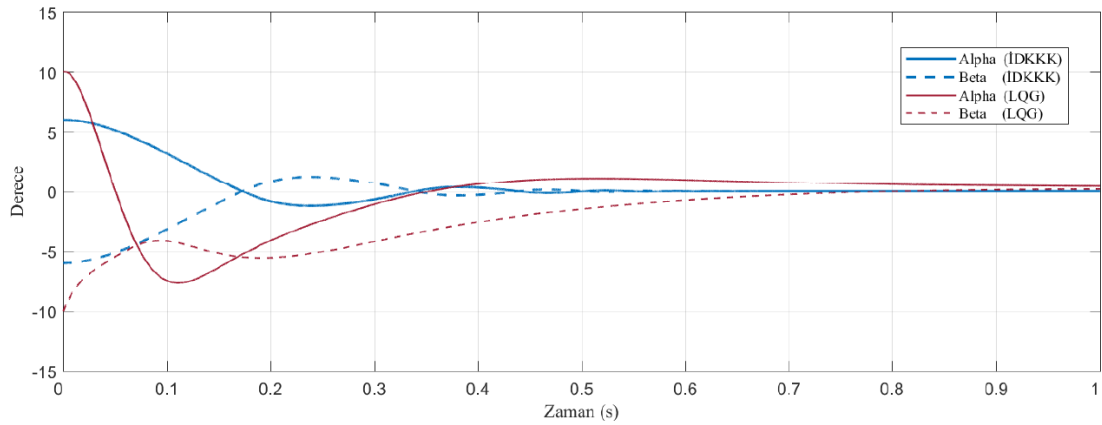
- Benzetimler ilk 1 saniye için yapılmıştır.
- Sarkaç açılarının başlangıç değerleri kontrolcülerin başarısız olduğu değerlere kadar arttırılmıştır.

İDKKK' de kullanılan ve keyfi belirlenen sabitler:

- $P_1 = \text{diag}[100 \ 100]$, $P_2 = \text{diag}[10 \ 10]$, $P_3 = \text{diag}[5 \ 5]$, $P_4 = \text{diag}[1 \ 1]$
- LQG kontrolcü de kullanılan ve keyfi olarak belirlenen ağırlık matrisleri:

$$Q = \text{diag}[20 \ 20 \ 1 \ 1 \ 0.7 \ 0.7 \ 0.01 \ 0.01], R = \text{diag}[0.0015 \ 0.0015]$$

$$Q_{SE} = \text{diag}[20 \ 20 \ 1 \ 1 \ 0.7 \ 0.7 \ 0.01 \ 0.01], R_{SE} = \text{diag}[0.0015 \ 0.0015]$$



Şekil 4.3. İDKKK ve LQG kontrolcülerin dengeleyebildikleri maksimum sarkaç başlangıç açıları.

Hem LQG hem de İDKKK kontrolcülerini kullanarak değişik sarkaç açıları için yapılan benzetim sonuçları Şekil 4.3' te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

4.1. Ters Sarkacın Dengelenmesi ve Denge Konumunda Tutulması

Gerçek bir ters sarkaç kontrol uygulamasında ters sarkacın dengelenmesi ve denge halinde tutulması gerekir. Dengeleme ne kadar önemli ise dengede tutma da bir o kadar önemlidir. Öyle ki; ters sarkaca uygulanan bozucu, kontrolcü tarafından başarı ile savuşturulsa dahi, ters sarkaç bağlantı noktası (O_j) mekanizma çalışma alanı sınırlarına yaklaşmış olacaktır. Mekanizma hareketinin bu sınır bölgelerde yetersiz olduğu bilinmektedir. Başka bir deyişle dengelendikten sonra, dengelemenin sağlandığı noktada bekleyen ters sarkaca tekrardan bir bozucu girişi olursa, sistem mekanizma sınırlarına gideceğinden kontrolcü başarısız olacaktır. Bu durumun önüne geçmek için bozucu girişinin olmadığı durumlarda O_j noktasının dengelemenin sağlandığı son konumdan tekrar becerikli çalışma alanı içerisine taşınması gerekmektedir. Dolayısıyla benzetim çalışmalarımız da bu durumun paralelinde yapılmıştır. Benzetimler uzaysal ters sarkaç sisteminin becerikli çalışma alanı içerisinde fakat ters sarkacın kararsız olduğu başlangıç koşullarından başlatılmıştır. Bozucu olarak girişlere beyaz gürültü, ters sarkaca ise benzetimin belirli anlarında impuls bozucular uygulanmıştır. Impuls bozucuların değeri kontrolcülerin başarısız olduğu durumlara kadar kademeli olarak arttırılmıştır. Benzetimle ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

- 45 saniye süren benzetimlere aşağıdaki başlangıç konumlarından başlanmıştır.
 $q_b = [0.45 * \pi \quad -0.98 * \pi \quad 0.55 * \pi \quad -0.115 \quad 2 * \pi/180 \quad 2 * \pi/180]^T$
- Beyaz gürültü tüm benzetim süresince dönel hareket girişine $-1Nm$ ve $1Nm$ ve doğrusal hareket girişine $-1N$ ve $1N$ uygulanmaktadır.
- İmpuls bozucu girişi benzetimin 15. ve 30. saniyelerinde 0.001 saniye boyunca yapılmaktadır. İmpuls değeri kontrolcüler başarısız oluncaya kadar kademeleli olarak arttırılmıştır.
- İDKKK de kullanılan ve keyfi belirlenen sabitler:

$$P_1 = \text{diag}[250 \ 250], P_2 = \text{diag}[8 \ 8], P_3 = \text{diag}[100 \ 100], P_4 = \text{diag}[4 \ 4],$$

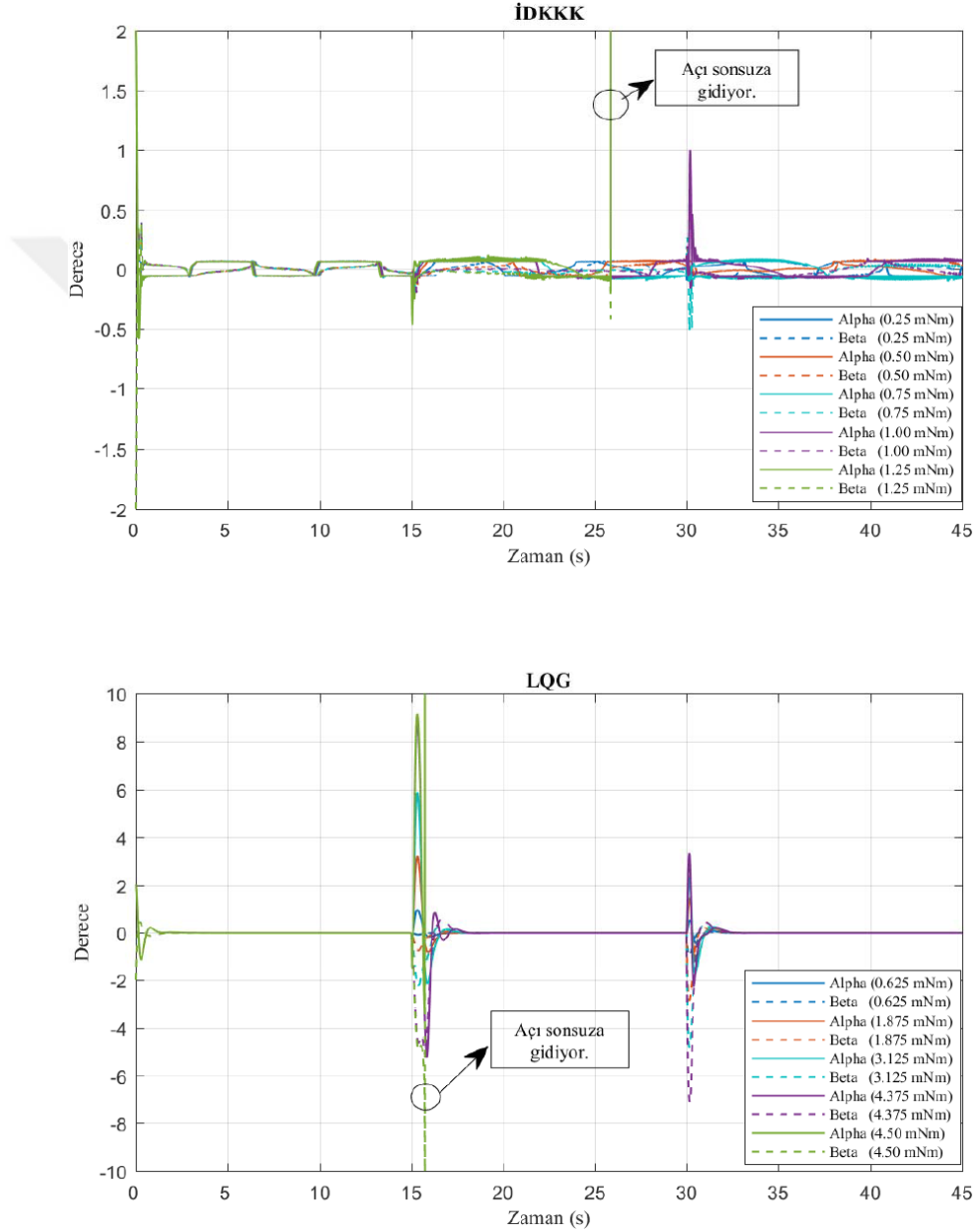
$$Q_1 = \text{diag}[100 \ 100], Q_2 = \text{diag}[6 \ 6], Q_3 = \text{diag}[50 \ 50], Q_4 = \text{diag}[0.4 \ 0.2]$$

- LQG kontrolcü de kullanılan ve keyfi olarak belirlenen ağırlık matrisleri:

$$Q = \text{diag}[1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 12.5 \ 12.5], R = \text{diag}[0.0015 \ 0.0015]$$

$$Q_{SE} = \text{diag}[1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 12.5 \ 12.5], R_{SE} = \text{diag}[0.0015 \ 0.0015]$$

Değişik impulse değeri girişleri için LQG ve İDKKK kontrolcülerinin performansları Şekil 4.4' te karşılaştırmalı olarak verilmişlerdir. Bu grafiklerde dikkat edilecek olursa İDKKK kontrolcü 1.25×10^{-3} Nm 'lik değerindeki bozucu impuls girişinden sonra sarkacı dengeye getirememekte ve devrilmektedir. Aynı şartlarda LQG'deki bozulma ise 4.5×10^{-3} Nm 'lik bozucu impuls girişten sonra gerçekleşiyor.



Şekil 4.4. İDKKK ve LQG kontrolcü benzetim sonuçları



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada lineer olmayan ve kontrolü için oldukça hızlı bir tepki gerektiren uzaysal bir ters sarkaç sisteminin kinematik ve dinamik modellemesi yapılmıştır. Aynı zamanda bu model mekanik ve elektronik olarak tasarlanıp üretilerek gerçek zamanlı kontrol uygulamalar için oldukça başarılı bir test ortamı oluşturulmuştur. Bu ters sarkaç sisteminde kullanılan tahrik mekanizması ise literatürde ilk defa kullanılmıştır. RRRRP yapısındaki bu mekanizma başka uygulamalarda da kullanılmamıştır. Bu yönü ile bu tahrik mekanizması bu tez çalışmasının özgünlük yönlerinden birini oluşturmaktadır. Mekanizmanın boyutsal tasarımı genetik algoritma ile optimizasyona dayalı olarak başarılı bir şekilde yapılmıştır. Bu tasarım parametrelerine göre de mekanizmanın dengeleme platformu orta noktasının belirlediği etkin veya yetenekli çalışma uzayı (dexterity workspace) tez çalışmasında sunulmuştur.

Mekanik parçaların tasarım kriterlerine göre üretim ve montajından sonra uzaysal ters sarkacın kontrol işleminde etkin görev alacak olan elektronik parçaların montajı gerçekleştirilmiştir. Bu elektronik parçalar ölçme elemanları, tahrik elemanları, veri işleme elemanları ve sinyal dönüştürücülerinden oluşmaktadır. Bu elemanların seçimi itina ile yapılmış ve sistem üzerine montajları gerçekleştirilmiştir. Bu elemanların seçimi aralarındaki senkronizasyona dikkate dikkat edilmiştir. Sonuç olarak hem mekanik hem de elektronik olarak performansı yüksek hızlı cevap yeteneğine sahip her tür kontrolcünün denenebileceği bir test ortamı elde edilmiştir.

Daha önceki bölümde de belirtildiği üzere uzaysal ters sarkaç sistemi için tasarlanan İDKKK ve LQG kontrolcülerin gürbüzlük, çeviklik ve kararlılık kıstasları bakımından değerlendirilebilmesi için öncelikle impuls bozuculara karşı gösterdikleri davranışlar incelenmiştir. Şekil 4.1' de görüldüğü üzere İDDDK kontrolcüye 7.5 mNm, LQG kontrolcüye ise 5 mNm değerine kadar impuls bozucu uygulanabilmiştir. Ayrıca İDKKK kullanılırken 7.5 mNm değerindeki bozucu α açısında yaklaşık 4° lik bir sapmaya sebep olurken, aynı bozucu LQG kontrolcüde yaklaşık 5.5° lik bir sapmaya sebep olmuştur. Bununla ilgili benzer bir durum β açısında da görülmektedir (Şekil 4.2). İDKKK kullanılırken 3.5 mNm değerindeki bozucu β açısında 2.1° lik bir sapmaya neden olurken, aynı bozucu LQG kontrolcüde 5.5° lik bir sapmaya sebep olmuştur.

Buradan çıkarılacak ilk bulgu dengeleme işleminde İDKKK kontrolcünün LQG kontrolcüye göre daha gürbüz olduğudur. Bununla birlikte dengeleme süreleri incelendiğinde İDKKK kontrolcünün dengeleme işlemini 0.8' inci saniyede, LQG kontrolcünün ise 1. saniyenin sonlarında tamamladığı görülmektedir. Bu durum bize İDKKK' ün LQG kontrolcünden daha çevik olduğu izlenimini vermektedir.

Şekil 4.3' e bakıldığında İDKKK ve LQG kontrolcülerin farklı α ve β başlangıç açıları için verdikleri kontrol tepkileri görülmektedir. Grafik incelendiğinde İDKKK' ün α başlangıç açısının maksimum 6° , β başlangıç açısının ise maksimum 6° ye kadar dengelenebildiği görülmektedir. LQG kontrolcü de ise α başlangıç açısı maksimum 10° ve β başlangıç açısının da maksimum 10° ye kadar dengelenebildiği görülmektedir. Buradan çıkarılacak bulgu ise başlangıç şartları için LQG kontrolcünün daha gürbüz olduğudur.

Şekil 4.4' e bakıldığında α ve β nin 2° lik başlangıç açıları ile benzetime başlandığı görülmektedir. İki kontrolcü de bu başlangıç açılarını başarı ile dengelemiştir. Farklılık bu noktadan sonra başlamaktadır. İDKKK 15. ve 30. saniyelerde uygulanan en fazla 1.25 mNm'lik impuls bozucuları dengeleyebilirken, LQG kontrolcü de bu değer 4.375 mNm'yi bulabilmektedir. Durum sarkaç açıları için de benzerdir. İDKKK en fazla α açısının 1° ve β açısının ise 0.5° değerine kadar dengeleme yapabilirken, LQG kontrolcü de ise bu değerler α açısında 9° β açısında ise 7° ye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca İDKKK yardımıyla tasarlanan kontrolcünün tolere edebildiği beyaz gürültü değerinin tork girişinde $-0.05 Nm$ ve $0.05Nm$, kuvvet girişinde ise $-0.05 N$ ve $0.05N$ aralığında olduğu görülürken, LQG kontrolcünün tolere edebildiği değerlerin ise tork girişinde $-1Nm$ ve $1Nm$, kuvvet girişinde ise $-1N$ ve $1N$ aralığında olduğuna dikkat edilmelidir. Buradan çıkan bulgu LQG kontrolcünün İDKKK' e göre uzaysal ters sarkacın dengede tutulması konusunda daha başarılı olduğu yönündedir.

Elde edilen sonuçlar toparlanırsa;

- Uzaysal ters sarkacın dengelenmesinde İDKKK, LQG kontrolcünden daha gürbüz ve çevik bir performans göstermektedir.
- Uzaysal ters sarkacın başlangıç konumundan dengelenmesinde LQG Kontrolcü daha gürbüz bir performans göstermektedir.
- Uzaysal ters sarkacın dengelenmesi ve dengede tutulmasında LQG Kontrolcü İDKKK' den daha gürbüz bir performans göstermektedir ve daha kararlıdır.

KAYNAKLAR

- Albouy, X., Praly, L., 2000. On the use of dynamic invariants and forwarding for swinging up a spherical inverted pendulum. *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. Aralık, Sydney. 1667–1672.
- Al-Janani, D. H., Chang, H.-C., Chen, Y.-P., Liu, T.-K., 2017. Optimizing the double inverted pendulum's performance via the uniform neuro multiobjective genetic algorithm. *International Journal of Automation and Computing*, **14** (6): 686–695.
- Arda, M., 2012. *Çift Eksenli Ters Sarkaç Tasarım ve Kontrolü Üzerine Bir Araştırma* (yüksek lisans tezi, basılmamış). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Bayram, A., Özgören, M. K., 2013. The position control of a spatial binary hyper redundant manipulator through its inverse kinematics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **227** (2): 359–372.
- Belhaq, M., 2015. *Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis*. Editor: M. Belhaq. C. 168. Springer International Publishing.
- Cabrera, J. A., Simon, A., Prado, M., 2002. Optimal synthesis of mechanisms with genetic algorithms. *Mechanism and Machine Theory*, **37** (10): 1165–1177.
- Castro, A., 2012. *Modelling and Dynamic Analysis of a Two Wheeled Inverted Pendulum* (yüksek lisans tezi, basılmamış). Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Chablat, D., 2010. Joint space and workspace analysis of a two-DOF closed-chain manipulator. *Communications*, **524**: 81–90.
- Chen, X., Yu, R., Huang, K., Zhen, S., Sun, H., Shao, K., 2018. Linear motor driven double inverted pendulum: A novel mechanical design as a testbed for control algorithms. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **81**: 31–50.
- Chiu, C. H., Wang, W.J., 2018. Implementation of a ball inverted pendulum with omnidirectional moving ability using a robust fuzzy control strategy. *ISA Transactions*. Basım aşamasında (Article in press).
- Chopra, V., Singla, S. K., Dewan, L., 2015. Stabilization of an X- Y inverted pendulum using adaptive gain scheduling PID controllers. *Journal of Engineering Research*, **3** (2): 59–78.
- Chung, C. Y., 2002. Balancing of an inverted pendulum with a kinematically redundant robot. *International Journal of General Systems*, **31** (1): 1–15.
- Dalen, S.J.V., 2012. *A Linear Inverted Pendulum Walk Implemented on Tulip* (yüksek lisans tezi, basılmamış). Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Hollanda.
- De Almeida, R., Nyandoro, O., 2017. Gain selection criterion for the swing-up control of the Acrobot using collocated partial feedback linearisation. *2017 IEEE AFRICON: Science, Technology and Innovation for Africa, AFRICON 2017*, 434–439, 29 Kasım - 1 Aralık, Bloemfontein, South Africa,
- Déda, T., Fujiwara, E., Carneiro, E., 2018. Modular approach for control design of an autonomous two-wheeled inverted pendulum. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **40** (11): 1–18.

- Ertuğrul, İ., 2015. *Bir Ters Sarkaç Sisteminde Kullanılan Genel Kontrol Algoritmalarının Karşılaştırılması*, (yüksek lisans tezi, basılmamış). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- García de Jalón, J., Bayo, E., 1994. *Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems*. Springer –Verlag. Spain. 434.
- Grămescu, B., Nițu, C., Su, N., Phuc, P., Borzea, C. I., 2015. PID control for two-wheeled inverted pendulum (WIP) system. *The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics*, **2015** (48): 246–252.
- Hakim, A.A.M., Sanhoury, I.M.H., 2018. Stabilizing x - y inverted pendulum via frictional order PID controller. *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, 1–6.
- Hoyer, H., Gerke, M., Masar, I., Ivanov, I., Roehrig, C., Bischoff, A., 2004. Virtual laboratory for real-time control of inverted pendulum/gantry crane. *1st IFAC Symposium on Telematics Applications in Automation and Robotics*. 21 – 23 Haziran, Finlandiya, 1–6.
- Huynh, X.D., Khanh, D., Huynh, L., Dat, V.D., 2017. Application of fuzzy algorithm in optimizing hierarchical sliding mode control for pendubot System. *Robotica & Management*, **22** (2): 8–12.
- Ishii, C. ., Nishitani, Y., Hashimoto, H., 2009. Modelling and robust stabilisation of a closed-link 2-dof inverted pendulum with gain scheduled control. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, **6** (4): 320–332.
- Jadlovský, S., Sarnovský, J., 2013. Modelling of classical and rotary inverted pendulum systems – a generalized approach. *Journal of Electrical Engineering*, **64** (1): 12–19.
- Jung, S., Cho, H. T., Hsia, T. C., 2007. Neural network control for position tracking of a two-axis Inverted pendulum system: Experimental studies. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **18** (4): 1042–1048.
- Khan, W. A., Krovi, V. N., Saha, S. K., Angeles, J., 2003. Recursive kinematics and inverse dynamics for parallel manipulators. *Dynamic Systems and Control, Volumes 1 and 2*, 691–702.
- Kim, S. S., Lee, G. H., Jung, S., 2008. Implementation of a neural network controller on a DSP for controlling an inverted pendulum system on an X-Y plane. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, 6-11 Temmuz, Seoul, Korea.5439–5443.
- Kizir, S., 2008. *Doğrusal Olmayan Ters Sarkaç Sisteminin Tasarımı ve Kontrolü* (yüksek lisans tezi, basılmamış). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit, Kocaeli.
- Lauwers, T. B., Kantor, G. A., Hollis, R.L., 2006. A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **2006** May: 2884–2889.
- Liu, C., Ning, J., Chen, Q., 2018. Dynamic walking control of humanoid robots combining linear inverted pendulum mode with parameter optimization. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **15** (1): 1–15.
- Liu, X., Wang, J., Wabner, M., Neugebauer, R., 2008. Analysis and kinematic optimization of planar 2-DOF 5R parallel mechanisms considering the force transmissibility. Chap. 2. *Parallel Robotics: Recent Advances in Research and Application*. (Editor: J. Wang). 123–161.

- Lundberg, K. H., Barton, T. W., 2010. History of inverted-pendulum systems. *IFAC Proceedings Volumes*, **42** (24): 131–135.
- Mahjoub, S., Mnif, F., Derbel, N., 2013. Second-order sliding mode control applied to inverted pendulum. *Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits*, 269–273.
- Mohan, V., Rani, A., Singh, V., 2017. Robust adaptive fuzzy controller applied to double inverted pendulum. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, **32** (5): 3669–3687.
- Natesan, A.K., 1994. *Kinematic Analysis and Synthesis of Mechanisms* (yüksek lisans tezi, basılmamış). Rochester Institute of Technology, Çolçistır, İngiltere.
- Olson, D. G., Erdman, A. G., Riley, D. R., 1985. A systematic procedure for type synthesis of mechanisms with literature review literaturbe-sprechung. *Mechanism and Machine Theory*, **20** (4): 285–295.
- Peng, Y., Chiu, C., Tsai, W., Chou, M., 2009. Design of an omni-directional spherical robot: Using fuzzy control. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 18-20 Mart, Hong-Kong, 0–5.
- Roose, A. I., Yahya, S., Al-Rizzo, H., 2017. Fuzzy-logic control of an inverted pendulum on a cart. *Computers and Electrical Engineering*, **61**: 1339–1351.
- Sainzaya, G., Yu, F.N., Hsieh, T. L., Yang, C.Y., 2018. LQR control with refined PID to balance rotary inverted pendulum with time-varying uncertainty. *2017 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications, iFUZZY 2017, 2017–November*, 1–6.
- Sasaki, K., Science, M., Okazaki, T., Science, M., 2014. Predicting ship' s rolling motion for wheeled inverted. *THE 57TH Japan Joint Automatic Control Conference*, 2-5 Mart 2016, Japonya. 751–756.
- Seifried, R., 2014. *Dynamics of Underactuated Multibody Systems*. Londra. İngiltere. 249.
- Soto, I., Campa, R., 2015. Modelling and control of a spherical inverted pendulum on a five-bar mechanism. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **12**(7): 95.
- Spong, M.W., 1994. Partial feedback linearization of underactuated mechanical systems. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*, **1**, 314–321.
- Stevens, K.A., Parrish, J.M., 2000. Neck posture of sauropod dinosaurs (Technical comment). *I. Science*, **287**: 5453-5472.
- Tartler, B., 2010. *Construction and Performance of an Inverted Pendulum Thrust Balance* (yüksek lisans tezi, basılmamış). Massachusetts Institute of Technology, Kaliforniya.
- Unda, J., Garcia De Jalon, J., Losantos, F., Enparantza, R., 1987. A comparative study on some different formulations of the dynamic equations of constrained mechanical systems. *Journal of Mechanism, Transmissions, and Automation in Design*, **109** (86): 466–474.
- Viet, T.D., Doan, P.T., Giang, H., Kim, H.K., Kim, S.B., 2012. Control of a 2-DOF omnidirectional mobile inverted pendulum. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **26** (9): 2921–2928.
- Wai, R.J., Chang, L.J., 2006a. Adaptive stabilizing and tracking control for a nonlinear inverted-pendulum system via sliding-mode technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **53** (2): 674–692.

- Wai, R.J., Chang, L.J., 2006b. Adaptive stabilizing and tracking control for a nonlinear inverted-pendulum system via sliding-mode technique. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **14** (1): 145–168.
- Wai, R.J., Lee, J.D., Chang, L.J., 2003. Development of adaptive sliding-mode control for nonlinear dual-axis inverted-pendulum system. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, **2** (Aim): 815–820.
- Wang, J.J., Liu, D.L., Wang, B.J., 2014. Research on one type of saturated nonlinear stabilization control method of X-Z inverted pendulum. *Acta Automatica Sinica*, **39** (1): 92–96.
- Wei Z, Rock, H., 2001. Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA'01)*, Cat. No.01CH37204. 896–901.
- Whitley, D., 1994. A genetic algorithm tutorial. *Statistics and Computing*, **4** (2): 1-37.
- Wilson, J., Charest, M., Dubay, R., 2016. Non-linear model predictive control schemes with application on a 2 link vertical robot manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **41**, 23–30.
- Wu, J., Li, T., Liu, X., Wang, L., 2007. Optimal kinematic design of a 2-DOF planar parallel manipulator. *Tsinghua Science and Technology*, **12** (3): 269–275.
- Yazıcı, A., Karamancıoğlu, A., 2009. Ters sarkaç sisteminin kontrol eğitiminde test aracı olarak kullanılması. *Elektrik Elektronik Bilgisayar Biyomedikal Mühendislikleri Eğitimi IV. Ulusal Sempozyumu*, 22-24 Ekim 2009, Eskişehir. 2–7.
- Žáková, K., 2007. Experiments with inverted pendulum : From simulations to remote control. *International Journal of Education and Information Technologies*, **1** (3): 142–147.
- Zuhair S.M., 2012. *Nicemli Kontrol Girişi ile Ters Sarkaç Yukarı Kaldırma Benzetimi* (yüksek lisans tezi, basılmamış). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

EKLER

EK I.

$m = L_1 + L_2C(\theta_2)$ ve $n = L_1 + L_2C(\theta_2)$ için

m ve n ' in kareleri alınarak toplanıp düzenlenirse;

$$L_4^2 + m^2 + n^2 - L_3^2 = 2L_4mC(\theta_4) + 2L_4nS(\theta_4) \text{ elde edilir.}$$

Burada

$$K_1 = 2L_4m, K_2 = 2L_4n \text{ ve}$$

$$K_3 = m^2 + n^2 + L_4^2 - L_3^2 \text{ için ifade tekrar düzenlenir ve}$$

$C(\theta_4) = \frac{1-t^2}{1+t^2}$ ve $S(\theta_4) = \frac{2t}{1+t^2}$ yazılıp elde edilen denklemden çözüme gidilir ise,

$$t_{1,2} = \frac{-K_2 + \sigma\sqrt{K_1^2 + K_2^2 - K_3^2}}{K_1 + K_3}$$

$\sigma = +1$ için

$$\theta_4 = \text{atan2}(2t, 1 - t^2)$$

Bulunur θ_4 çözümü m ve n ' de yerine konulur ise;

$$\zeta_1 = C(\theta_3) = \frac{1}{L_3}(L_4C(\theta_4) - L_2C(\theta_2) - L_1)$$

$$\zeta_2 = S(\theta_3) = \frac{1}{L_3}(L_4S(\theta_4) - L_2S(\theta_2))$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(\zeta_2, \zeta_1)$$

olarak bulunur.

Ters Kinematik Hız Katsayıları

$$a_3 = \frac{-Csc(\theta_3 - \theta_4)S(\theta_4)}{L_3}$$

$$b_3 = \frac{-L_2Csc(\theta_3 - \theta_4)S(\theta_2 - \theta_4)}{L_3}$$

$$a_4 = \frac{-Csc(\theta_3 - \theta_4)S(\theta_3)}{L_4}$$

$$b_4 = \frac{-L_2Csc(\theta_3 - \theta_4)S(\theta_2 - \theta_3)}{L_4}$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{11} = l_{23} + l_2^2(m_3 + m_{Sar})$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{12} = l_2/2 (l_3 m_3 C(\theta_2 - \theta_3) + m_{Sar}(C(\theta_2)C(\theta_3)(l_3 + l_{Sar}S(\beta)) - l_{Sar}C(\beta)S(\alpha)S(\theta_3) + S(\theta_2)(l_{Sar}C(\beta)C(\theta_3)S(\alpha) + (l_3 + l_{Sar}S(\beta))S(\theta_3))))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{15} = l_2/2 l_{Sar} m_{Sar} C(\beta)C(\alpha)C(\theta_2 - \theta_3)$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{16} = -l_2/2 C(\theta_2)(C(\theta_3)S(\alpha)S(\beta) - C(\beta)S(\theta_3)) + S(\theta_2)(C(\beta)C(\theta_3) + S(\alpha)S(\beta)S(\theta_3))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{21} = l_2/2 (l_3 m_3 C(\theta_2 - \theta_3) + m_{Sar}(C(\theta_2)(C(\theta_3)(l_3 + l_{Sar}S(\beta)) - l_{Sar}C(\beta)S(\alpha)S(\theta_3)) + S(\theta_2)l_{Sar}C(\beta)C(\theta_3)S(\alpha) + (l_3 + l_{Sar}S(\beta))S(\theta_3))))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{22} = 1/32 (32 l_{33} + 8l_{px} + 16l_{py} + 8l_{pz} + 8l_3^2 m_3 + 8l_3^2 m_{Sar} + 6l_{Sar}^2 m_{Sar} + 2(4l_{px} - 8l_{py} + 4l_{pz} - l_{Sar}^2 m_{Sar})C(2\alpha) - (4l_{px} - 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar})C(2(\alpha - \beta)) - 8l_{px}C(2\beta) + 8l_{pz}C(2\beta) - 2l_{Sar}^2 m_{Sar}C(2\beta) - 4l_{px}C(2(\alpha + \beta)) + 4l_{pz}C(2(\alpha + \beta)) - l_{Sar}^2 m_{Sar}C(2(\alpha + \beta)) + 16l_3 l_{Sar} m_{Sar} S(\beta))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{25} = 1/4 C(\alpha)C(\beta)(l_3 l_{Sar} m_{Sar} + (-4l_{px} + 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar})S(\beta))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{26} = 1/4 S(\alpha) (4l_{py} - l_{Sar}^2 m_{Sar} - l_3 l_{Sar} m_{Sar} S(\beta))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{33} = l_{43} + (l_4^2 m_4/4)$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{34} = 1/2 (l_4 m_4) C(\theta_4)$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{43} = 1/2 (l_4 m_4) C(\theta_4)$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{44} = m_4 + m_5$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{51} = 1/2 l_2 l_{Sar} m_{Sar} C(\beta)C(\alpha)C(\theta_2 - \theta_3)$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{52} = 1/4 C(\beta)C(\alpha)(l_3 l_{Sar} m_{Sar} + (-4l_{px} + 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar})S(\beta))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{55} = 1/8 (4l_{px} + 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar} + (4l_{px} - 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar})C(2\beta))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{61} = -1/2 l_2 l_{Sar} m_{Sar} (C(\theta_2)(C(\theta_3)S(\alpha)S(\beta) - C(\beta)S(\theta_3)) + S(\theta_2)(C(\beta)C(\theta_3) + S(\alpha)S(\beta)S(\theta_3)))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{62} = 1/4 S(\alpha)(4l_{py} - l_{Sar}^2 m_{Sar} - l_3 l_{Sar} m_{Sar} \text{Sin}S(\beta))$$

$$\underline{\mathbf{m}}_{66} = l_{py} + (l_{Sar}^2 m_{Sar}/4)$$

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{c}}_{11} = & 1/2 (2 \tau_2 + l_2(l_{Sar} m_{Sar} C(\beta) C(\theta_2 - \theta_3) S(\alpha) \dot{\alpha}^2 + l_{Sar} m_{Sar} (C(\beta) C(\theta_2 - \\ & \theta_3) S(\alpha - \beta) S(\theta_2 - \theta_3)) \dot{\beta}^2 + 2l_{Sar} m_{Sar} (-C(\beta) C(\theta_2 - \theta_3) + S(\alpha) S(\beta) S(\theta_2 - \\ & \theta_3) \dot{\beta} \dot{\theta}_3 + (l_{Sar} m_{Sar} C(\beta) C(\theta_2 - \theta_3) S(\alpha) - (l_3(m_3 + m_{Sar}) + l_{Sar} m_{Sar} S(\beta))) S(\theta_2 - \\ & \theta_3)) \dot{\theta}_3^2 + 2l_{Sar} m_{Sar} C(\alpha) \dot{\alpha} (C(\theta_2 - \theta_3) S(\beta) \dot{\beta} - C(\beta) S(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_3)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{c}}_{21} = & 1/2 (C(\beta) S(\alpha) (l_3 l_{Sar} m_{Sar} + (-4l_{px} + 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar}) S(\beta)) \dot{\alpha}^2 + \\ & l_3 l_{Sar} m_{Sar} C(\beta) S(\alpha) \dot{\beta}^2 - 2l_2(l_{Sar} m_{Sar} C(\beta) C(\theta_2 - \theta_3) S(\alpha) - (l_3(m_3 + m_{Sar}) + \\ & l_{Sar} m_{Sar} S(\beta)) S(\theta_2 - \theta_3)) \dot{\theta}_2^2 - C(\beta) (2l_3 l_{Sar} m_{Sar} + 2(4l_{px} - 4l_{pz} + \\ & l_{Sar}^2 m_{Sar}) C(\alpha)^2 S(\beta)) \dot{\beta} \dot{\theta}_3 - 1/2 C(\alpha) \dot{\alpha} (2(4l_{py} - l_{Sar}^2 m_{Sar} + (-l_{px} + 4l_{pz} + \\ & l_{Sar}^2 m_{Sar}) C(2\beta) - 2l_3 l_{Sar} m_{Sar} S(\beta)) \dot{\beta} + 2(-4l_{px} + 8l_{py} - 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar} + \\ & (4l_{px} - 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar}) C(2\beta)) S(\alpha) \dot{\theta}_3) \end{aligned}$$

$$\underline{\mathbf{c}}_{41} = F_2 + 1/2 (l_4 m_4) S(\theta_4) \dot{\theta}_4^2$$

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{c}}_{51} = & 1/8 (4gl_{Sar} m_{Sar} C(\beta) S(\alpha) + 2(4l_{px} - 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar})) S(2\beta) \dot{\alpha} \dot{\beta} + \\ & 4l_2 l_{Sar} m_{Sar} C(\alpha) C(\beta) S(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_2^2 + 8l_{py} C(\alpha) \dot{\beta} \dot{\theta}_3 - 2l_{Sar}^2 m_{Sar} C(\alpha) \dot{\beta} \dot{\theta}_3 + \\ & 8l_{px} C(\alpha) C(\beta)^2 \dot{\beta} \dot{\theta}_3 - 8l_{pz} C(\alpha) C(\beta)^2 \dot{\beta} \dot{\theta}_3 - 2l_{Sar}^2 m_{Sar} C(\alpha) C(\beta)^2 \dot{\beta} \dot{\theta}_3 - \\ & 8l_{px} C(\alpha) S(\beta)^2 \dot{\beta} \dot{\theta}_3 + 8l_{pz} C(\alpha) S(\beta)^2 \dot{\beta} \dot{\theta}_3 + 2l_{Sar}^2 m_{Sar} C(\alpha) S(\beta)^2 \dot{\beta} \dot{\theta}_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{c}}_{61} = & 1/8 (4gl_{Sar} m_{Sar} C(\alpha) S(\beta) - (4l_{px} - 4l_{pz} + l_{Sar}^2 m_{Sar}) S(2\beta)) \dot{\alpha}^2 + \\ & 4l_2 l_{Sar} m_{Sar} (C(\beta) C(\theta_2 - \theta_3) - S(\alpha) S(\beta) C(\beta) S(\theta_2 - \theta_3)) \dot{\theta}_2^2 - 2C(\alpha) (4l_{py} - \\ & l_{Sar}^2 m_{Sar} + (4l_{px} - 4l_{pz} - l_{Sar}^2 m_{Sar}) C(2\beta)) \dot{\alpha} \dot{\theta}_3 + 2l_3 l_{Sar} m_{Sar} C(\beta) \dot{\theta}_3^2 + \\ & l_{Sar}^2 m_{Sar} C(\beta) S(\beta) \dot{\theta}_3^2 + l_{Sar}^2 m_{Sar} C(\alpha)^2 C(\beta) S(\beta) \dot{\theta}_3^2 - \\ & l_{Sar}^2 m_{Sar} C(\beta) S(\alpha)^2 S(\beta) \dot{\theta}_3^2 + 2l_{px} S(2\beta) \dot{\theta}_3^2 - 2l_{pz} S(2\beta) \dot{\theta}_3^2 + \end{aligned}$$

$$2l_{px}C(\alpha)^2S(2\beta)\dot{\theta}_3^2 - 2l_{pz}C(\alpha)^2S(2\beta)\dot{\theta}_3^2 - 2l_{px}S(\alpha)^2S(2\beta)\dot{\theta}_3^2 + 2l_{pz}S(\alpha)^2S(2\beta)\dot{\theta}_3^2)$$

$$\underline{h_{11}} = l_2 C(\theta_2)]\dot{\theta}_2^2 + l_3 C(\theta_3)\dot{\theta}_3^2 - l_4 C(\theta_4)\dot{\theta}_4^2$$

$$\underline{h_{21}} = l_2 S(\theta_2)]\dot{\theta}_2^2 + l_3 S(\theta_3)\dot{\theta}_3^2 - l_4 S(\theta_4)\dot{\theta}_4^2$$



ÖZ GEÇMİŞ

1986 yılında Bergama' da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmir'de lise öğrenimini Denizli'de tamamladı. 2013 yılında Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü' nden mezun oldu. 2016 yılında VAN Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü' nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2016 yılından itibaren Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü' nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.



T.C
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 16/01/2019

Tez Başlığı / Konusu: İki Serbestlik Dereceli Uzaysal Ters Sarkaç Kontrolü


Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümlerinden oluşan toplam 111 sayfalık kısmına ilişkin, 16/01/2019 tarihinde şahsım tarafından Turnitin intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezim benzerlik oranı % 0 (Sıfır) dir.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit inatch size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.


16/01/2019

Adı Soyadı: Fırat KARA

Öğrenci No: 159101198

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı:

Statüsü: Y. Lisans Doktora

DANIŞMAN ONAYI
UYGUNDUR

ENSTİTÜ ONAYI
UYGUNDUR

Dr. Öğr. Üyesi Atilla BAYRAM




Fırat KARA
Enstitü Müdürü