



T.C.

KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**2R MANİPÜLATÖR KULLANARAK İNSAN ADIMI
YÖRÜNGE EĞRİLERİNİN ELDE EDİLMESİ**

MURAT ÇATALKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSAN ADIMI YÖRÜNGE EĞRİLERİNİN 2R
MANİPÜLATÖR KULLANARAK ELDE EDİLMESİ**

MURAT ÇATALKAYA

Bu tez,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
Derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2018

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi MURAT ÇATALKAYA tarafından hazırlanan “İNSAN ADIMI YÖRÜNGE EĞRİLERİNİN 2R MANİPÜLATÖR KULLANARAK ELDE EDİLMESİ” adlı bu tez, jürimiz tarafından 02 / 11 /2018 tarihinde oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi Orhan Erdal AKAY (DANIŞMAN)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. MUHARREM İMAL (ÜYE)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Dr.Öğr. Üyesi ONUR ÖZSOLAK (ÜYE)

Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa ŞEKKELİ

Fen Bilimleri Enstitüsü 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, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Murat ÇATALKAYA

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İNSAN ADIMI YÖRÜNGE EĞRİLERİNİN 2R MANİPÜLATÖR KULLANARAK ELDE EDİLMESİ.

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

MURAT ÇATALKAYA

ÖZET

Özellikle son zamanlarda mühendislik alanındaki gelişmelerle birlikte, sanayi, eğitim, tıp ve özellikle savunma sanayinde robotların uygulama alanları büyük ölçüde önem kazanmıştır. Bu çalışmalarla birlikte insansı ve hayvansı robotların hareketleri gerçeğe daha çok benzemeye başlamıştır.

İnsansı robotların tasarım sürecinde, klasik yöntemler ile yürüme hareket denklemlerinin çıkarılması ve bu denklemlerin neticesinde yürüme uzuvlarını tahrik edecek büyüklüğün elde edilmesi oldukça zahmetli ve zaman isteyen bir süreçtir. İnsanın yürüyebilmesi için ayak uzvunu oluşturan her bir parçanın bir kas grubunun tahrik edilmesi gerekmektedir. Bu kas grupları yerine robotlarda aktüatörler, servo motorlar, mekanizmalar gibi tahrik elemanı kullanılmakta ve bu tahrik elemanın seçimi ve şiddeti oldukça önem taşımaktadır.

Bu yüksek lisans tezinde 2R manipülatör mekanizması, insansı bir robotun bacak uzvu olarak kullanılmış ve yürüme yörüngesini veren denklemler oluşturularak insana en yakın yürüme modelini “Working Model 2D” adlı simülasyon programında elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Robot, Manipülatör, 2R manipülatör, Mekanizması, Working Model 2D, Yürüme Simülasyonu, Yürüme yörüngesi, İnsansı Robotlar

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kasım/2018

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Orhan Erdal AKAY

Sayfa sayısı: 77

OBTAINING HUMAN STEP TRAJECTORY CURVES USING 2R MANIPULATOR

(M.Sc. THESIS)

MURAT ÇATALKAYA

SUMMARY

Especially in recent years, along with improvements in the field of engineering, the fields of application of robots in industry, education, medicine and especially defense industry have gained a great importance. With these studies, the movements of humanoid and animal-like robots have begun to resemble reality more alike .

In the process of designing humanoid robots, it is a troublesome and time-consuming process to extract the walking motion equations with the classical methods and to obtain the magnitude to drive the walking limbs as the result of these equations. For a person to walk, each piece forming a foot should be driven by a muscle group. Instead of these muscle groups, robots use actuators such as actuators, servo motors, and mechanisms. The selection and the severity of this driving element are crucial.

In this thesis study, a humanoid robot has been used as a limb with 2R manipulator mechanism and it is aimed to obtain the closest walking model to the human being using the simulation program called "Working Model 2D" by creating the equations provide the which walking orbit.

Keywords: Robot, Manipulator, 2R manipulator, Mechanism, Working Model 2D, Walking Simulation, Walking trajectory, Humanoid Robots

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kasım/2018

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Orhan Erdal AKAY

Sayfa sayısı: 77

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐması sűresince bilgi ve tecrűbelerinden faydalandıĐım ve çalıŐmamın her aŐamasında saĐladıĐı bilimsel katkılardan dolayı danıŐman hocam Sayın Dr. ŐĐr. Őyesi Orhan Erdal AKAY'a teŐekkűr ederim. Bu gűnlere gelmemde her tűrlű maddi ve manevi desteklerini gűrdűĐűm aileme sonsuz teŐekkűrlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	ii
SUMMARY	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. GENEL BİLGİLER.....	7
3.1. Yürüme Problemi	7
3.2. İnsan Adımı ve Yürüme Döngüsü	7
3.3. Robotlarda Kullanılan Bacak Mekanizmaları	8
3.4. Mekanizmalarda Yörünge Sentezi.....	10
3.5. Robot Manipülatörleri	11
3.5.1. Manipülatörü oluşturan kısımlar	11
3.5.2. Manipülatörlerin sınıflandırılması.....	12
3.5.2.1. Seri manipülatörler	12
3.5.2.2. Paralel Manipülatörler	12
3.5.3. Manipülatörlerin Kullanım Alanları.....	16
3.5.3.1. Endüstriyel manipülatörler	16
3.5.3.2. Operasyonel manipülatörler	17
3.5.3.3. Tıp ve sağlık alanında kullanılan manipülatörler	17
3.5.4. Manipülatör Seçiminde Dikkat Edilecek Başlıklar	18
3.5.4.1. Çalışma uzayı	18
3.5.4.2. Tekrarlanabilirlik	18
3.5.4.3. Yük taşıma kapasitesi	18
3.5.5. Robot manipülatör kinematiği	19
3.5.5.1. Manipülatörlerde serbestlik derecesi (DOF)	19

3.5.5.2. Manipulatorlerde koordinat yerleşimi	20
3.5.5.3. Manipulatorlerin matris matematiği	22
3.5.5.4 Dönme matrisi	23
3.5.5.5. Öteleme vektörü	25
3.5.5.6. Homojen dönüşüm matrisi	25
3.5.5.7. İleri (düz) kinematik	27
3.5.5.8. Denavit-Hartenberg (DH) dönüşümü	27
3.5.5.9. Ters kinematik	29
3.6. Yörünge Planlama	30
3.7. Tracker Video Görüntü Çözümleme Programı	31
3.8. Working Model 2D Analiz ve Simülasyon Programı	32
3.8. Regresyon ile Eğri Uydurma (Curve Fitting)	32
3.8.1 En küçük kareler yöntemi	33
3.9. MS Excel Çözücü (Solver)	34
3.10. Brandon Yukio Tsuge'ın Çalışması	36
4. MATERYAL VE METOD	40
4.1. Materyal	40
4.2. Metod	40
4.2.1. Yürüme analizi ile adım verilerinin elde edilmesi	40
4.2.2. İnsan bacağına simülasyonunu	41
4.2.3. Parametrik denklem takımları	42
4.2.4. Brandon yukio tsuge'ın yürüme analizi	42
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
5.1. Eklem Açılarının Elde Edilmesi	44
5.2. Parametrik Denklemlerin Elde Edilmesi	45
5.3. Brandon Yukio tsuge'ın Yürüme Analizi Verileri	48
6. SONUÇLAR	52
KAYNAKLAR	54
EK-A	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. İnsan Yürüyüş Çevrimi	1
Şekil 1.2. Zhang State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control.....	2
Şekil 2.1. a - Aktif dış iskelet	3
b - İlk dış iskelet	3
Şekil 2.2. Master / Slave Tipi Yürüme Makinesi:	4
Şekil 2.3. Tad McGeer Pasif Yürüyen robot	4
Şekil 2.4. Sebastian Lohmeier, Heinz Ulbrich Lola	5
Şekil 2.5. Baston Dynamics Petmen ve Atlas	5
Şekil 2.6. Matthie Lapeyre , Poppy	6
Şekil 3.1. Yürüme döngüsü ve fazları	8
Şekil 3.2. Robotlarda kullanılacak bazı bacak mekanizmaları.....	9
Şekil 3.3. Stephenson III 6 çubuk mekanizması.....	9
Şekil 3.4. Hooke-Jeeves'in tercih edildiği bir mekanizma sentezi	11
Şekil 3.5. Robot manipülatörü ile insan kolu benzetimi	11
Şekil 3.6. Seri manipülatör	12
Şekil 3.7. Paralel manipülatör.....	13
Şekil 3.8. Kartezyen manipülatör	14
Şekil 3.9. Silindirik manipülatör.....	14
Şekil 3.10. Küresel manipülatör	15
Şekil 3.11. SCARA manipülatör	15
Şekil 3.12. İnsan koluna benzer manipülatör	16
Şekil 3.13. Endüstriyel manipülatörler	16
Şekil 3.14. Bomba imha robot manipülatörü.....	17
Şekil 3.15. Da Vinci robot manipülatörü.....	17
Şekil 3.16. Çeşitli serbestlik derecelerine sahip mekanizma modelleri	19
Şekil 3.17. P noktasının A noktasına göre tanımı	20
Şekil 3.18. A noktası ve uç noktasının koordinat sistemleri	21
Şekil 3.19. {B} Koordinat sisteminin {A} koordinat sistemine göre yönelimi	21
Şekil 3.20. Euler açıları	24
Şekil 3.21. Yalpa/Yunuslama/Sapma açıları gösterilimi.....	24
Şekil 3.22. Ötelenmiş çerçeve	25

Şekil 3.23. Homojen dönüşüm matrisinin şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.24. İleri (Düz) kinematik şematik gösterimi	27
Şekil 3.25. Denavit-Hartenberg çerçeve ataması.....	28
Şekil 3.26. Ters kinematik şematik gösterimi	29
Şekil 3.27. Ters kinematik konum çözümlemesi.....	29
Şekil 3.28. Robot manipülatörün çalışma hacmi.....	30
Şekil 3.29. Ters kinematikte birden fazla çözüm olma durumu.....	30
Şekil 3.30. Tracker video çözümleme programı	31
Şekil 3.31. WM2D analiz ve simülasyon programı.....	32
Şekil 3.32. MS Excel Çözücü (solver)	35
Şekil 3.33. MS Excel Çözücü (solver) Programı	35
Şekil 3.34. Yürüme verilerinin alındığı noktalar.....	36
Şekil 3.35. On çubuk mekanizması	38
Şekil 3.36. On çubuk mekanizması için elde edilen çözüm	38
Şekil 3.37. Altı çubuk mekanizması ile elde edilen çözüm.....	39
Şekil 4.1. Tracker video çözümleme programı	41
Şekil 4.2. WM2D Programında 2R bacak modeli.....	41
Şekil 4.3. 2R manipülatör kinematik gösterimi.....	42
Şekil 4.4. Ayak bileğinin çizdiği 23 yörünge	43
Şekil 4.5. Seçilen noktaların çizdiği yörünge eğrisi	43
Şekil 5.1. 2R bacak modelinin P (x_p, y_p) noktasının yörünge eğrisi	44
Şekil 5.2. 2R bacak modelinin uzunlarının zamana bağlı değişen açı eğrileri.....	44
Şekil 5.3. 2R manipülatör P (x_p, y_p) noktasının yörünge eğrisi	46
Şekil 5.4. Seçilen noktaların çizdiği yörünge	48
Şekil 5.5. Seçilen noktalara ait kaçla ve diz açıları	48
Şekil 5.6. $\theta_{10}(t)$ ve $\theta_{20}(t)$ zamana bağlı açı değişimleri.....	49
Şekil 5.7. 2R manipülatörün çizdiği yörünge eğrisi	51
Şekil 6.1. 2R Manipülatör ve 2R Bacak Modeli P (x_p, y_p) noktasının yörünge eğrisi.....	52
Şekil 6.2. 2R Manipülatör ve 2R Bacak Modeli P yörünge eğrileri.....	52
Şekil 6.3. Deneğe ait yürüme eğrisi ve 2R manipülatörün çizdiği yörünge eğrisi	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1. Seçilen 60 noktaya ait veriler (Brandon Y. Tsuge ,2015).....	36
Çizelge 2. 2R Bacak modelinin P noktasının yörünge verileri.....	45
Çizelge 3. Regresyon sonuçları	46
Çizelge 4. Regresyon fonksiyonları zamana bağlı aldığı değerler	47
Çizelge 5. Regresyon sonuçları	49
Çizelge 6. 2R manipülatörün ait yörünge verileri	49



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2R manipülatör	: Düzlemsel 2R manipülatör
WM2D	: Working Model 2D
DOF	: Serbestlik derecesi
θ	: Uzunluk açısı
R	: Dönme Matrisi
DH	: Denavit-Hartenberg
4R	: 4 döner mafsal
3R-1P	: Üç döner bir kayar mafsal
d_0^1	: Öteleme vektörü
$c\theta_i$: $\cos(\theta_i)$
$s\theta_i$: $\sin(\theta_i)$
${}^{i-1}_i T_i$: i eksenini ile i-1 eksenini arasındaki dönme matrisi
a^{i-1}	: İki eksen arasındaki uzunluk (mm)
α^{i-1}	: (i-1) ile i eksenleri arasındaki uzunluk açısı
θ_{i-1}	: İki uzunluk arasında oluşan mafsal açısı
d^{i-1}	: Üst üste çakışan uzunluklar arasındaki mafsal kaçıklığı (mm)
(+)	: Saat yönünün tersi
(-)	: Saat yönü
l	: Uzunluk boyu (mm)
ω	: Mafsal açısal hızı (rad/s)

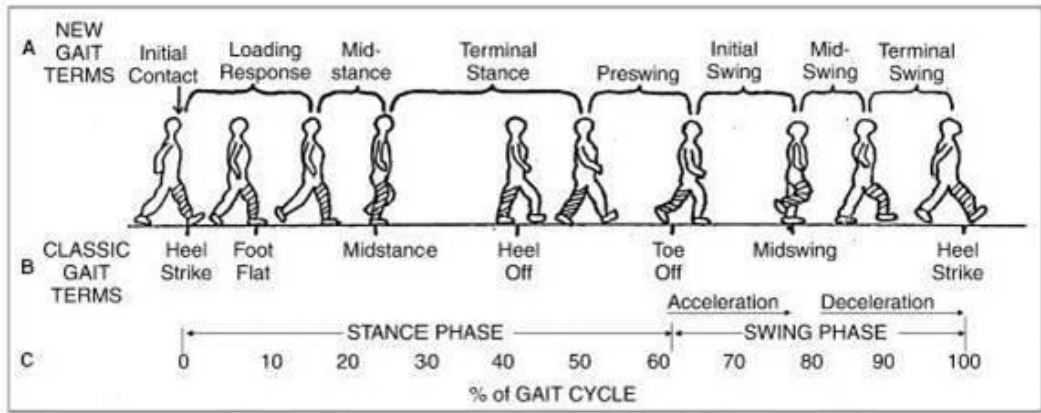
- P_x** : 2 no'lu uzvun uç noktasının x eksenindeki koordinatını (mm)
- P_y** : 2 no'lu uzvun uç noktasının y eksenindeki koordinatını (mm)
- IR** : İnsansı robotlar



1. GİRİŞ

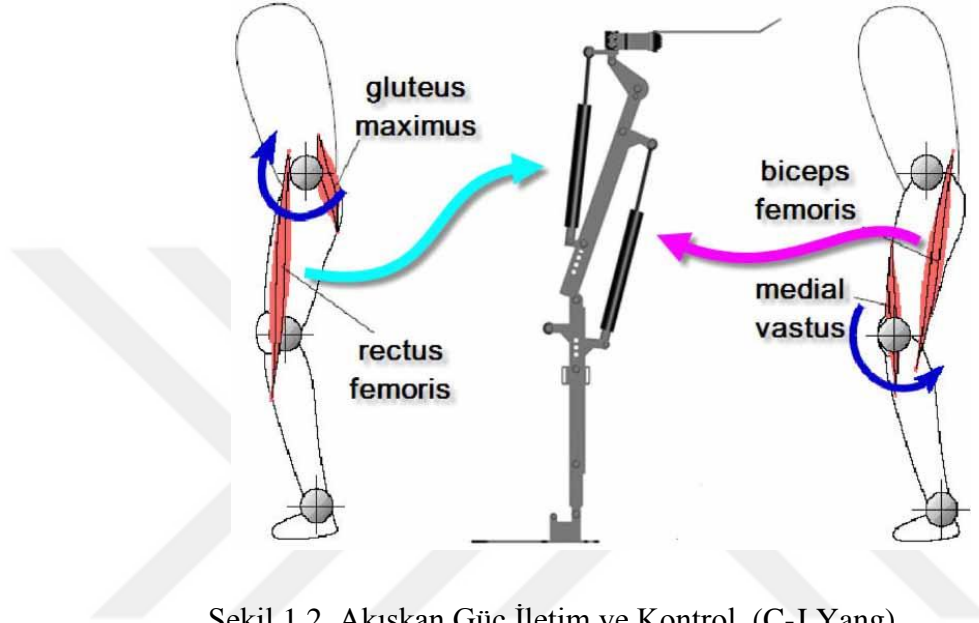
Robotlar, bu konuda çalışmalarıyla tanınan Maja Mataric'ye göre "ortamdan topladığı verileri dünyası hakkında sahip olduğu bilgiyle sentezleyerek, anlamlı ve amaçlarına yönelik bir şekilde hareket edebilen ve bunu güvenli bir biçimde yapabilen makinelerdir." olarak tanımlansa da, tasarlanmış mekanik sistemleri ve bunlarla ilişkili kontrol ve algılama sistemleri ile birlikte bilgisayar algoritmalarına bağlı olarak istenilen emirleri yerine getiren makinelerdir.

Son 20 yılda; elektrik, makine, bilgisayar, algılayıcılar ve otomatik kontrol alanlarındaki gelişmeler, robot ve robotik sistemlerin hızla gelişmesinin önünü açmıştır. Robotik konusundaki bu hızlı değişim, tarım, tıp, sanayi ve biyomekanik v.b. gibi farklı alanlarda, robotik sistemlerin kullanımını arttırmıştır. Robotik alanındaki diğer bir gelişme; önemli bir araştırma konusu haline gelmiş olan insansı robotlardır. İnsansı robotların temel avantajları; tekerlek, palet vb. hareket sistemlerine sahip robotlara göre, hareket yeteneklerinin sürekli olmayan ortamlarda daha yüksek olmasıdır (Sarıyıldız, 2016). İnsanın temel hareketlerinden olan yürüme ile ilgili pek çok çalışma yapılmış ve bu hareketin kinetik ve kinematik ayrıntıları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Nordin, 1999). İnsansı robotların ve insanların yürüyüş parametreleri birbirlerine oldukça benzerdir. Yürüyüş hareketi esnasında hem İnsansı robotların hem de insanların bir ayak uzvunun zemin ile temasta kalması zorunludur (Tez, 2017). Bundan dolayı, İnsansı robotun yürüyüş dengesi dinamiği oldukça karmaşık bir süreçtir (Şekil1.1). İnsansı robotların yürüyüş anında, bir ayak uzvunun zemin ile temasta kaldığı anda, dışarıdan etkiyen bozucu kuvvetler denge konumunu bozan önemli bir faktördür (Whittle, 2014).



Şekil 1.1. İnsan Yürüyüş Çevrimi (DR.ARUN PAL SINGH, Physio-pedia)

İnsansı robotların hareketini sağlayan bacak mekanizmaları, farklı zemin şekillerinde yürümesi için gerekli olan esnekliğe ve kontrolünü kolaylaştıran minimum sayıda tahrik elemanına sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır (Shieh, 1996). Ayrıca bu tahrik hareketini veren aktüatörlerin de birbirleriyle uyum içinde çalışması gerekmektedir. Bu uyumu yakalayabilmek için her kas grubu için kullanılan aktüatörlerin çalışma değerleri belirlenmelidir (Şekil 1.2).

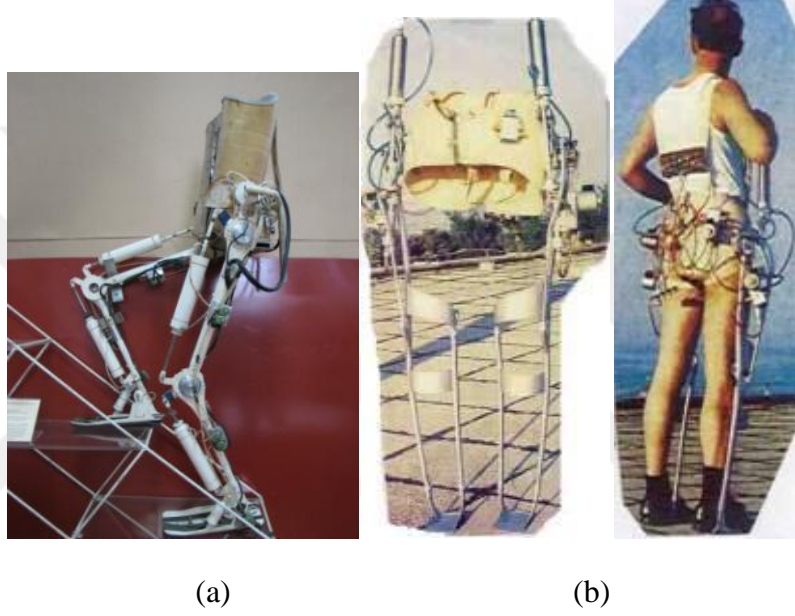


Şekil 1.2. Akışkan Güç İletim ve Kontrol, (C-J Yang)

İstenilen hareketi elde etmek için yürüme uzuvlarının matematiksel hareket modelinin elde edilmesi gerekmektedir (Çolak ve ark, 2002). Ancak bu denklemleri çözmek oldukça zor bir süreç olduğu için, bu süreçleri kolaylaştıran çeşitli analiz ve simülasyon yazılımları kullanılmaktadır. Son zamanlarda İnsansı robotlar üzerine yapılan çalışmalar içinde insan yürüyüşündeki doğal harmoniyi Honda firması yakalamıştır. Şirket Asimo isimli robotu ile doğal insan yürüyüşünü taklit etmeyi başarmıştır (Hirose ve ark, 2007). Doğadaki insan yürüyüşünü, bir mekanizma kullanarak elde etmek için yürüme analizi yapılır (Tez, 2017). Bu analizde kamera kullanılarak; kinematik yürüyüş verileri elde edilir (Özmanevra, 2015). Bütün bu bilimsel süreç ve gelişmeler dâhilinde insana ait kinematik yürüyüş verileri kullanılarak, 2R manipülatör olarak tasarlanmış insan bacağına matematiksel modeli çözümlenmiş ve robot bacakları için kullanılan mekanizmalar ile mukayesesi yüksek lisans tezinin konusu olacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

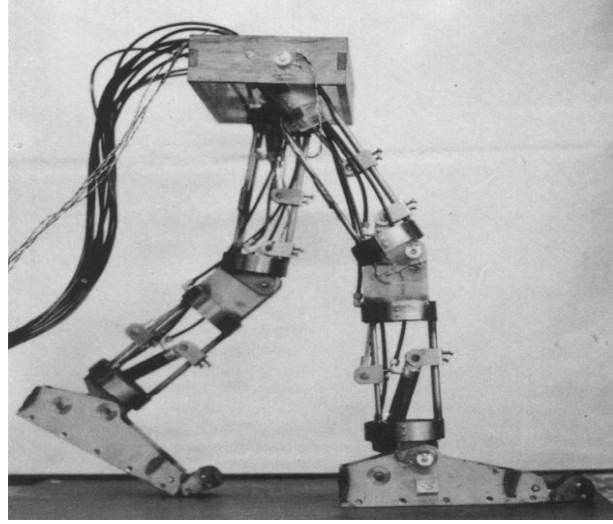
Miomir Vukobratovic (1969), İnsansı robotların yürümesi için en temel terimlerimlerinde biri olan ZMP (Zero Moment Point) yani sıfır moment noktası, ilk olarak Miomir Vukobratovic ve çalışma arkadaşları tarafından 1969 yılında Mihajlo Pupin Üniversitesinde literatüre geçti (Şekil 2.1). İnsansı robotun ayaklarının yere temas ettiği noktadaki tüm momentlerin toplamın sıfır olması gerektiği ilkesini ortaya atan Vukobratovic, bununla birlikte insansı robotların ilk matematiksel olarak modellenmesini yapmıştır (Vukobratovic,1969).



Şekil 2.1. a - Aktif dış iskelet (Polytechnical Museum 1972) ,
b - İlk dış iskelet (Mihajlo Pupin Enstitüsü 1969)

Lower Limb-1 (1967), İnsansı robotların bacaklarının araştırılması 1967 yılında Humonid adlı projeye Waseda Üniversitesi'nde Lower Limb -1 (WL-1) modelini tanıttı. Bu proje insansı robotun yürümesinden ziyade alt bacak hareketlerinin analizi için yapıldı (Limb, 1967).

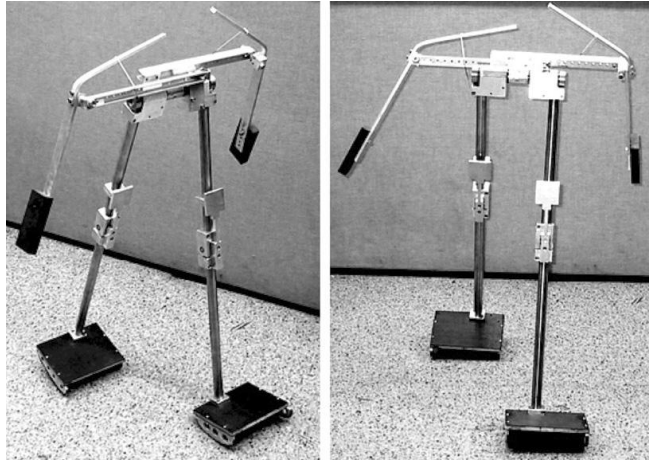
Master (1968), İlk iki ayaklı robot olma özelliğine sahip bu robot Waseda Üniversitesi tarafında 1969 yılında tasarlanmıştır (Şekil 2.2). Yürüme uzuvlarında electro-hydraulic servo-actuatorler kullanılmış ve kontrol sistemi olarak da master-slave yöntemi entegre edilmiştir (Takanishi, 2016).



Şekil 2.2. Master / Slave Tipi Yürüme Makinesi: WL-3 (1968 ~ 1969)

Asimo, Honda (1986), İki ayaklı robot çalışmalarına hız veren ünlü otomobil üreticisi Honda 90'lı yıllara yaklaşırken Asimo adında robotunu bilim dünyasında tanıttı. Bu robotun yürüyüş şekli olarak insan hareketlerine olan benzerliği, robotik dünyasında büyük yankı uyandırmıştır (Hirose ve ark, 2007).

Tad McGeer (1990), Pasif Yürüyüş; ilk olarak Pasif dinamik yürüyüş tanımı,90'lı yılların başında TAD McGeer tarafında ortaya atıldı (Şekil 2.3). McGeer'in iki ayaklı yürüten robotlar için ortaya koyduğu model, Tekerlek – sarkaç birleşimiyle formülize edilmiş suni tekerliğe benzetilmiştir (McGeer, 1990)

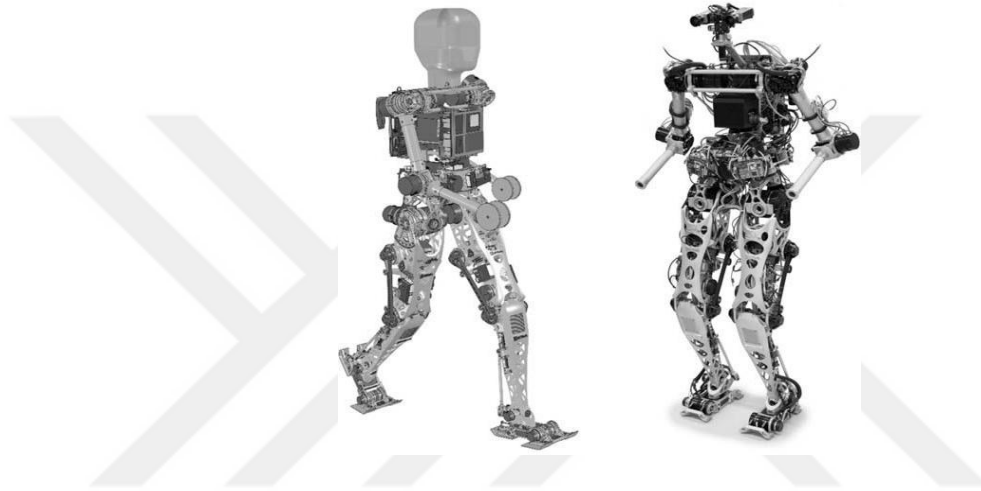


Şekil 2.3.Tad McGeer Pasif Yürüyen robot,Cornell üniversitesi (1990)

Tad McGeer, Pasif Yürüyüş (1990), Yine Tad McGeer, pasif dinamik yürüyüş özelliğine sahip bacaklara diz bölümlerini ekleyerek hafif eğimli yamaçta yürümenin teorisi geliştirmiştir (McGeer, 1990).

Huang, (2001), Huang ve arkadaşları, insansı robot için ileri beslemeli dinamik desen üretimiyle sensorlu geri beslemeli yürüyüş modellemesini geliştirmişlerdir (Huang, 2001).

Lola, Sebastian Lohmeier-Thomas Buschmann (2009), Münih Teknik Üniversitesi çalışmalarını sürdürmek de olan Sebastian Lohmeier,Thomas Buschmann ve arkadaşları tarafından 2009 yılında Lola'yı tanıttılar (Şekil 2.4). Lola insansı robotlar içinden hızlı yürümeyi gerçekleştirmek için bir bacağına 7 Dof'a sahip tek robot olma özelliğine sahiptir (Lohmeier, 2009).



Şekil 2.4. Sebastian Lohmeier, Heinz Ulbrich Lola (2009)

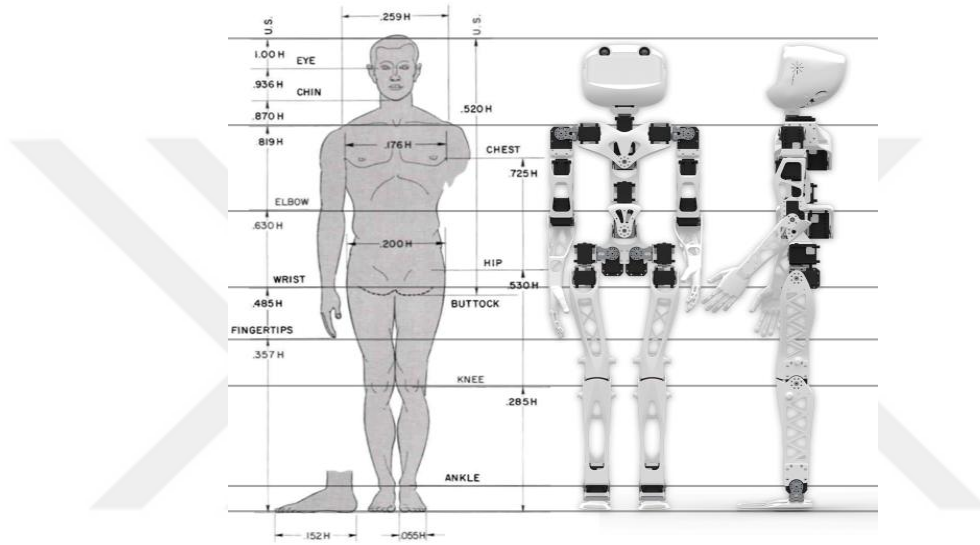
Boston Dynamics, Atlas-Petman (Şekil 2.5), İnsansı robot teknolojisine çağ atlatan Darpa & Boston Dynamics'in ürettiği Atlas Robotu, dünyanın en gerçekçi insansı robotu özelliğine sahiptir. Atlas'ın denge kontrolü bakımında oldukça sağlam bir sisteme mevcuttur. Petman ise özellikle tehlikeli ortamlarda kullanılmak üzere tasarlanmış ve terleme , vücut sıcaklığı gibi insanlara özgü özellikleri canlandırabilen PETMAN, kendisine uygulanan fiziksel şiddet oranında karşı tepki verebiliyor (Nelson, 2012).



Şekil 2.5. Boston Dynamics Petmen ve Atlas

Hernandez-Santoz (2012), Bu çalışmada ilk defa iki ayaklı insansı robotun ayak parmakları görevini üstlenmek üzere servo motor kullanılmıştır. Bu çalışma sayesinde robotun yürümesinde ayak parmaklarının ne gibi üstünlük sağladığı gözlemlenmiştir (Hernández-Santos, 2012).

Matthieu Lapeyre ve ark. (2013), Üç boyutlu yazıcı teknolojisini ile üretilen Poppy isimli robotu (Şekil 2.6) diğer robotlardan ayıran özelliği, insan bacağına kalça kemiğindeki açının anatomisinden esinlenerek tasarlanmıştır (Lapeyre, 2013).



Şekil 2.6. Matthieu Lapeyre, Poppy (2013)

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Yürüme Problemi

Mekanik, fiziğin bir alt dalı olup hareket ve harekete eğilim ile ilgilenir. Biyomekanik ise mekanik prensiplerinin ve mühendislik kurallarının biyolojik sistemlere uygulanmasıdır (Özhan, 2014). İnsan vücuduna ve hareketlerine olan ilginin giderek artması ve biyolojiye daha uygun yeni implantların geliştirilebilme hedefi, son dönemlerde giderek artan biyomekanik çalışmaların temel gerekçesini oluşturmaktadır. Bu amaçla insanın temel hareketlerinden olan yürüme ile ilgili pek çok çalışma yapılmış ve bu hareketin kinetik ve kinematik ayrıntıları birçok araştırmacı tarafından dikkatlice incelenmiştir (Özkaya, 1999).

Yürümenin amacı; vücudu istenilen hızda ve doğrultuda, farklı yönlerde hareket ettirmektir (Zajac ve ark, 2002). Bu işlem sırasında canlı; ilgili uzuvlarındaki eklemler, kaslar, tendon ve bağları belirgin bir şekilde kullanır. Bu nedenle yürümenin biyomekanikliğinin incelenmesi aslında insan vücudu için alt ekstremitelere ait bütün yapıların ve yürümenin evrelerinin tek tek incelenmesini gerektirir (Şeker ve ark, 2014).

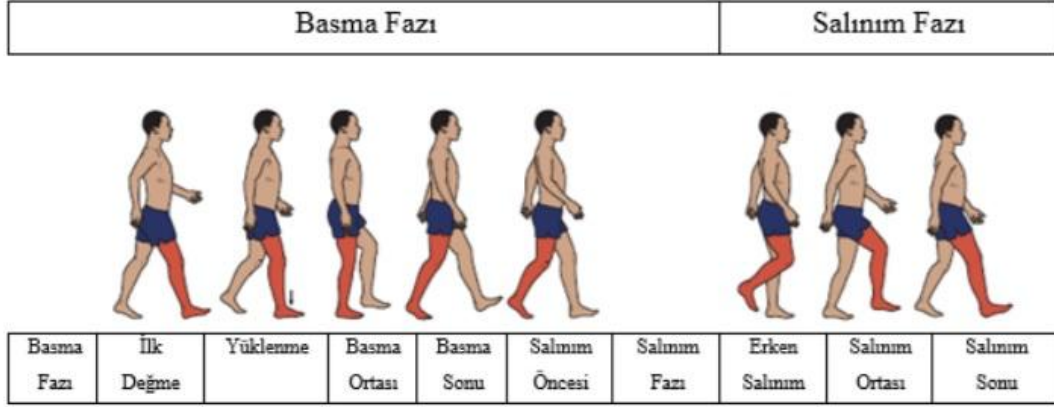
İnsansı robotların hareketlerini alt ve üst vücut hareketleri olmak üzere temel olarak iki bölümde inceleyebiliriz. Alt vücut hareket çalışmalarında insansı robotların dengeli bir şekilde yürüme ve koşma problemleri ele alınır (Sarıyıldız, 2016).

Yürüme problemi, insansı robotların gerçekleştirilmesinde mühendislik alanında karşılaşılan en önemli problemlerden bir tanesidir. İnsansı robotlarda yürüme problemi, literatürde iki bacaklı yürüme (bipedal locomotion) olarak adlandırılır. İki bacaklı yürüme probleminde, mühendislik alanında karşılaşılan temel başlıca problemler: robot mekanizmasının yüksek serbestlik derecesine sahip olması ve bu nedenle analiz ve kontrolör tasarımının zor olmasıdır (Sarıyıldız, 2016).

3.2. İnsan Adımı ve Yürüme Döngüsü

Yürüme döngüsü; insanın yürümesi esnasında, ayak topuğun yere ilk değdiği andan itibaren aynı ayaktaki topuğun tekrar yere değmesi anına kadar bacak eklemlerindeki ritmik hareketlerin oluşması için geçen zamana denir (T.C.Milli Eğitim Bakanlığı, 2011). Yürüme esnasında bu döngü, bir düzen içinde devamlı tekrarlanır. Şayet sağ bacağın yürüme döngüsünü dikkate alacaksak, ilk defa sağ bacağın topuğu yere değen ve döngü sağ bacağın topuğu tekrar yere değene kadar devam eder. Sol bacak ise her ne kadar sağ

bacağın hareketlerinin aynısını yapsa da, yarım döngü faz farkı ile geriden gelir (Whittle, 2014). Bir bacağın yürüme döngüsü basma ve salınım olarak iki faza ayrılır. Duruş ve salınım fazları, çeşitli yöntemlerle bir kez daha bölünmüştür. Ancak, bu alt bölünmelerin terminolojisi zamanla değiştirilmiştir. Bu nedenle farklı kaynaklarda önceki terminoloji ile karşılaştırılabilir. Ancak, bu çalışmada Jacquelin Perry tarafından geliştirilen Şekil 3.1'deki Rancho Los Amigos (RLA) terminolojisi kullanılmıştır (Houglum, 2011).



Şekil 3.1. Yürüme döngüsü ve fazları (Houglum, P.A. and D.B. Bertoti,2011).

İnsan yürüme döngüsünde zaman dağılımı ve her bir yürüme fazı sırasında gereken nispi süreler aşağıda gösterilmiştir.

Basma fazı, yürüme döngüsünün % 60'ını,

Salınma fazı, yürüme döngüsünün % 40'ını,

Çift destek fazı, yürüme döngüsünün % 11'ini oluşturur.

Yürüme hızının yüksek olması, salınım fazında geçen sürenin nispi artışını ifade eder. Bunun yanı sıra hızın az olması, basma fazında geçen sürenin nispi artışı anlamına gelir (Tez, 2017).

3.3. Robotlarda Kullanılan Bacak Mekanizmaları

Robotik alanda gelişmelerle birlik de insan bacak uzvunun yerini alacak bir çok mekanizmalar ortaya çıkmıştır (Şekil 3.2). Bacak mekanizmaları, engebeli arazide yürümek için gerekli olan esnekliğe sahip olduğu, hızlı hareket edebildiği, kontrol edilmesi kolay ve düz bir zeminde yürümeye yönelik minimum sayıda tahrik hareketi gerektirecek şekilde tasarlanmaktadır. Bir dizi fonksiyonel gereksinime dayanarak, bacak mekanizmasının konsept üretimi, sistematik bir metodoloji vasıtasıyla gerçekleştirilir.

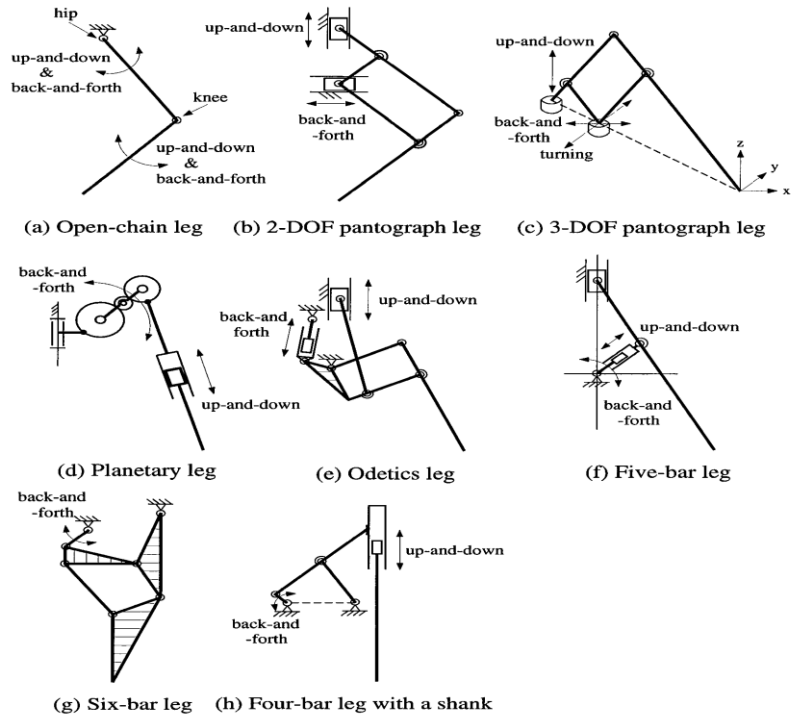
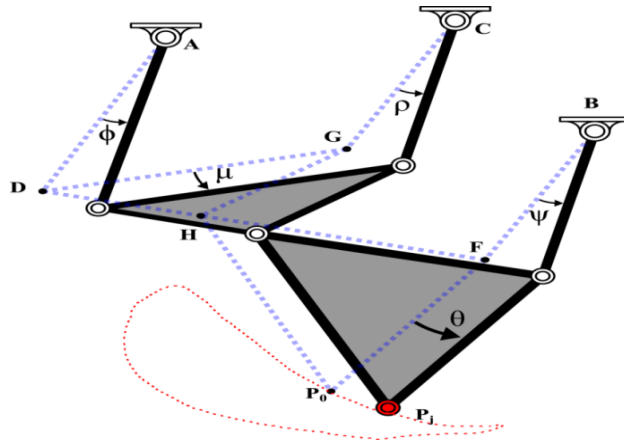


FIGURE 1.1: Some of the existing leg mechanisms

Şekil 3.2. Robotlarda kullanılacak bazı bacak mekanizmaları (Shieh, Win-Bin,1996)

(a) açık zincir ayak modeli, (b) 2 serbestlik dereceli ayak modeli, (c) 3 serbestlik dereceli ayak zincir modeli, (d) Planet ayak modeli, (e) odetik ayak modeli, (f) 5 çubuk mekanizmalı ayak modeli, (g) 6 çubuk mekanizmalı ayak modeli, (h) kayar mafsallı 4 çubuk mekanizmalı ayak modeli

Bacağın yukarı-aşağı hareketi ile ilişkili serbestlik derecesini (DOF) geçici olarak hariç tutarak ve bir değerlendirme kriterleri kümesine dayalı olarak, düzlemsel dört, altı (Şekil 3.3), ve sekiz çubuklu bacak mekanizmalarının bacak uzvu olarak kullanılması arzu edilen özelliklere sahip olduğu bulunmuştur (Shieh, 1996).



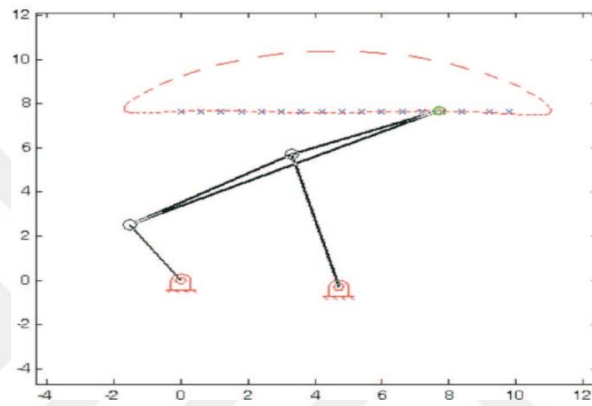
Şekil 3.3. Stephenson III 6 çubuk mekanizması (Tsuge, 2015)

İstenilen hareketleri gerçekleyen mekanizmanın tasarımı sanayileşme sürecinin başlangıcından itibaren ihtiyaç haline gelmiştir. Bu nedenle 1950 yıllarına kadar grafik metotlar kullanılmış, yüzyılın ikinci yarısından itibaren analitik ve sayısal yöntemler önem kazanmıştır (Çolak ve ark, 2002). Bir mekanizmanın belirli bir yörünge üzerinde hareket etmesini sağlamak ve bu yörüngeye göre mekanizmaların boyutlandırılması yapmak amacıyla kullanılan bu sayısal yöntem mekanizmalarda yörünge sentezi denilmektedir. Bu nedenle bacak olarak kullanılacak her bir mekanizmanın insan yürüme eğrisine göre yörünge sentezi yapılması gerekmektedir.

3.4. Mekanizmalarda Yörünge Sentezi

Yörünge sentezi probleminde giriş uzvunun verilen konumlarına karşılık mekanizmanın seçilen hareketli uzvu üzerindeki noktanın verilen yörüngeyi takip etmesi istenir. Problem, bu hareketi gerçekleştirecek mekanizmanın boyutlarını belirlemektir. Mekanizma mecburi hareketli olduğu için her hareketli noktanın belirli bir yörüngesi olacaktır. Mekanizma sentezi üç konu başlığından oluşmaktadır: Bunlar grafik, analitik ve nümerik metotlardır (Hartenberg ve Denavit, 1964, Alhaji, 2011). Eğer mekanizmanın, az sayıdaki noktalardan geçmesi isteniyorsa grafik metodu hızlı çözüm bulmaktadır. Analitik metotta ise cebrik ifadelerle mekanizmanın matematiksel modeli çözümlenerek hassas noktalardan geçecek şekilde sonuca varılmaktadır, fakat bu hassas noktalar birbirleri ile uyumlu değilse veya sayıca fazla ise analitik metot sonucunda karmaşık sayılar elde edilebilmektedir (Vujić ve Radojković, 2000). Bu da sonucun fiziksel olarak mümkün olmadığı ve üretilmeyeceği anlamına gelmektedir. Nümerik teknikler genellikle çeşitli optimizasyon metotları ile beraber kullanılmaktadırlar (Erdemir, 2015). Yörünge üzerinde seçilen yeterli sayıdaki noktalardan geçen mekanizmanın tam olarak belirlenmesi mümkündür. Eğer nokta sayısı daha az alınırsa çözümde bilinmeyen bazı büyüklükler serbest olarak seçilebilir (Çolak ve ark, 2002). Yörünge üzerinde sağlanması gereken nokta sayısı çoğaltılırsa istenen bu noktaların hepsinden geçen mekanizmayı belirlemek mümkün olmaz. Bu durumda noktaların mümkün olduğu kadar yakınından geçen mekanizma belirlenmeye çalışılır (Çolak ve ark, 2002). Bu problemin çözümü matematik olarak, verilen ve çözüm sonunda ortaya çıkan yörüngelerin belirlenen noktalarındaki toplam hata fonksiyonun minimum olması şeklinde formüle edilir. Bir fonksiyonun minimum veya maksimum değerini bulmak için geliştirilmiş birçok optimizasyon algoritması bulunmaktadır. Bu algoritmalarından bazıları başlangıç dizisinin komşuluklarında araştırma yapmaktadır (Hooke ve Jeeves, 1961). Toplam hata fonksiyonunda kullanılan değişken ve

sabit büyüklükler arasında mekanizmanın bağlarına uygun olan ve hareketin her anında geçerli olan bağ şartları vardır (Çolak ve ark, 2002). Örnek olarak; uzuv boyutunun negatif olmaması veya bir uzvun boyu, bir sayıdan büyük veya küçük olması durumu verilebilir (Erdemir, 2015). Dört çubuk mekanizması basit ve klasik bir mekanizma olup, dört ana çubuktan oluşur ve uç kısımları birbirlerine bağlıdır. Optimizasyon esnasında bir değişken dizisinin denenmeden önce mekanizmanın geçerli olup olmadığı test edilmelidir. Örneğin dört çubuk mekanizmasının geçerli olup olmadığı Grashof şartı ile kontrol edilir (Alhajj, 2011, Portilla-Flores ve ark. 2013). Şekil 3.4 mekanizmanın belirtilen noktalardan geçmesi için Hooke-Jeeves algoritması kullanılmışlardır (Bulatović ve Đorđević, 2004).

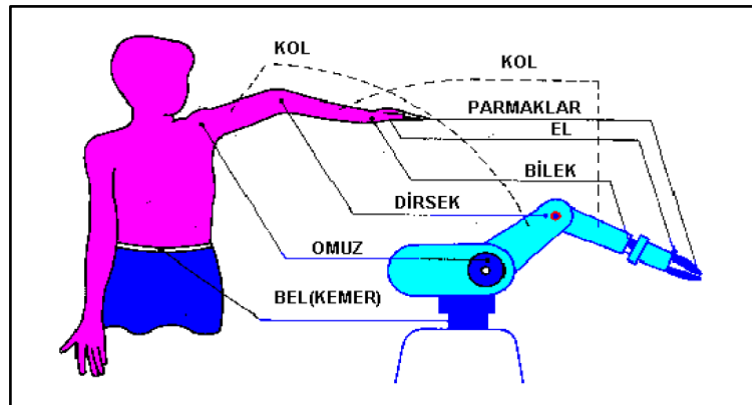


Şekil 3.4. Hooke-Jeeves'in tercih edildiği bir mekanizma sentezi

3.5. Robot Manipülörleri

3.5.1. Manipülörü oluşturan kısımlar

Manipülörler dört ana kısımdan meydana gelir. Bunlar; serbestliği sağlayan iki koldan, el becerisi sağlayan bir bilekten ve robotun yapması gereken görevi tamamlayan bir sonlandırıcıdan oluşur (Paul, 1981). Şekil 3.5.'de insan kolu ile manipülörün benzeşimi gösterilmiştir.



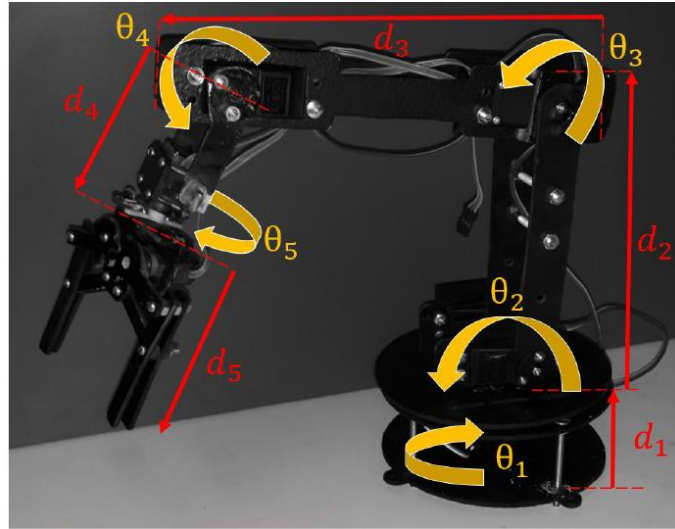
Şekil 3.5. Robot manipülörü ile insan kolu benzetimi (Megep, 2012)

3.5.2. Manipülatorlerin sınıflandırılması

Robotik manipülatorleri topolojik yapıları itibariyle temel olarak seri topoloji, ağaç topolojisi ve kapalı topoloji olarak üç'e ayırabiliriz (Yeşiloğlu, 2007). Ayrıca temel topolojileri bir arada kullanarak karmaşık topolojiler elde etmekte mümkündür. Seri topolojilere örnek olarak seri manipülatorler, kapalı topolojilere de örnek olarak paralel manipülatorler verilebilir (Yiğit, 2013).

3.5.2.1. Seri manipülatorler

Seri manipülatorler bir dizi mafsallardan ve bu mafsalları birbirine birleştiren uzuvlardan oluşur (Şekil 3.6). Paralel manipülatorlere göre daha geniş çalışma uzayına ve daha basit kinematik denklemlere sahip olmasına rağmen kaldıracakları kütlenin kendi mekanik yapılarının kütlesine oranı daha küçüktür (Bingül ve Küçük, 2005).



Şekil 3.6. Seri manipülator (Angeles, 1997)

3.5.2.2. Paralel Manipülatorler

Paralel manipülatorler, ana çerçeve ile yük arasında birbirine paralel pek çok uzun bir araya gelmesiyle oluşur (Şekil 3.7). Seri manipülatorlere göre daha sağlam bir mekanik yapıya sahiptirler. Kinematik denklemlerinin çok karmaşık olmasına karşın, kaldıracakları kütlenin mekanik yapılarının kütlesine oranı daha büyüktür (Bingül ve Küçük, 2005).

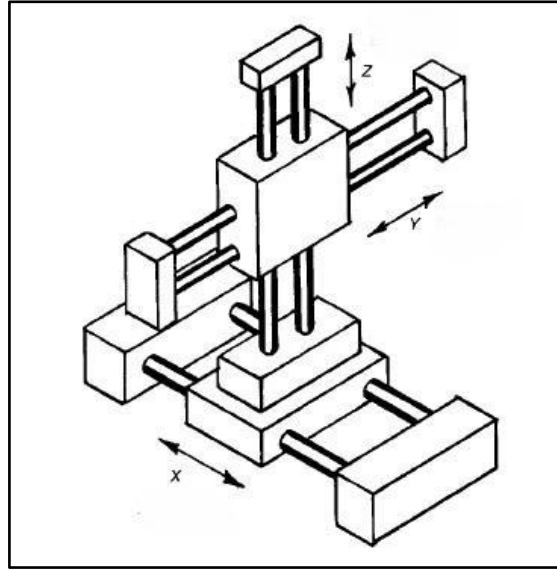


Şekil 3.7. Paralel manipulatör (Angeles, 1997)

Manipulatörler ayrıca çalışma uzaylarına göre de sınıflandırılırlar. Çalışma hacimleri uzuvlarının uzunluğuna ve hareket elemanlarına bağlıdır. Çalışma hacmi içerisinde manipulatörün belirli bir noktaya ulaşabilmesi için üç serbestlik derecesi gerekmektedir. Bunun için de üç mafsal kullanmak zorunludur. Bu durumda karşımıza çeşitli manipulatör geometrileri ve bunların kinematik özellikleri çıkmaktadır. Bugüne kadar robot imalatçıları aşağıdaki manipulatör geometrilerini kullanmışlardır (Asada ve Slotine, 1986).

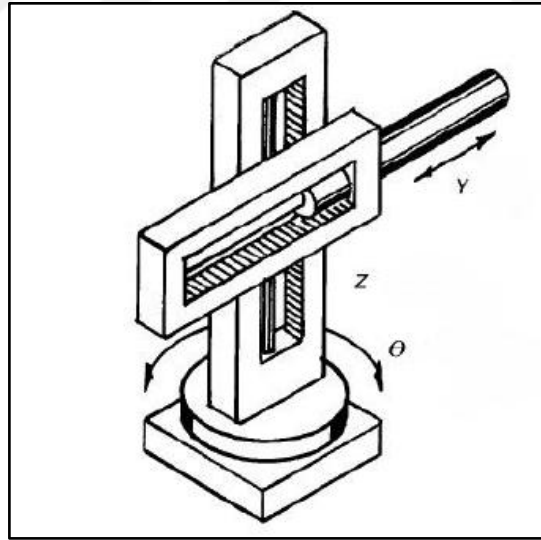
1. Kartezyen Manipulatörler
2. Silindirik Manipulatörler
3. Küresel Manipulatörler
4. SCARA Manipulatörler
5. İnsan Koluna Benzer Manipulatörler

1.Kartezyen manipulatör: Bu tip bir manipulatör üç tane kayar tip eklem ile elde edilir. Konstrüksiyon itibari ile sağlam bir mekaniğe sahiptirler. Çalışma hacimleri boyutlarından daha küçüktür. Yapmış oldukları hareketleri elektrik motorundan, pnömomatik etkileyiciden veya hidrolik etkileyiciden alabilirler. Yapıları dayanıklı olmasından ötürü büyük kuvvetler altında çalışabilirler. Kontrol edilebilmeleri kolaydır. Ağır yükleri kolaylıkla kaldırabilirler. Fakat çalışma uzayları nispeten dar bir hacme sahiptirler (Şekil 3.8) (Craig, 2005).



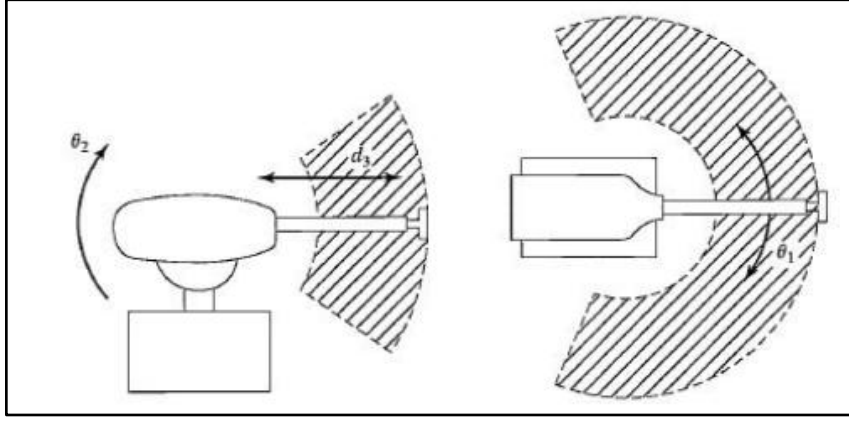
Şekil 3.8. Kartezyen manipülatör (Sandin, 2003)

2.Silindirik manipülatör: Bu tip bir manipülatör bir tane döner ve iki tane kayar tip eklem ile elde edilir. Silindirik manipülatörler silindirik koordinat sistemini kullandıklarından dolayı bu ismi almışlardır. İki adet kayar mafsala ve bir adet döner mafsala sahiptir. Kartezyen robot manipülatörlerde olduğu gibi ağır yükleri kaldırabilme kabiliyetleri vardır. Bu tip manipülatörler hidrolik motorları tercih edilir (Şekil 3.9) (Craig, 2005).



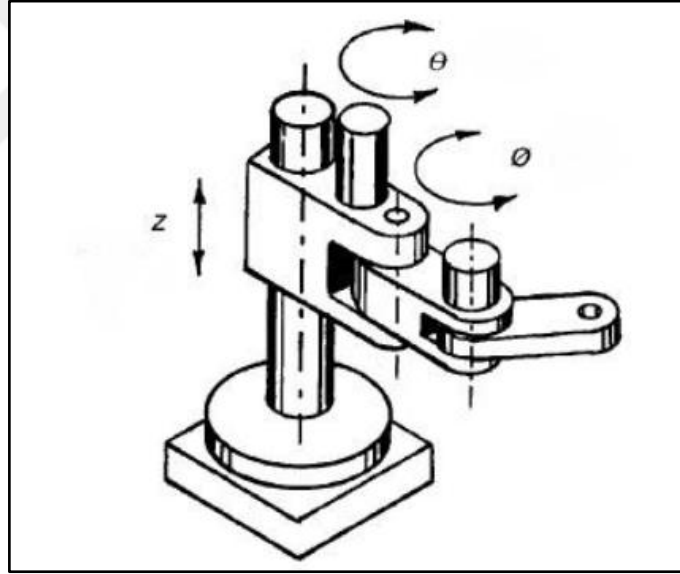
Şekil 3.9 Silindirik manipülatör (Sandin, 2003)

3.Küresel manipülatör: Küresel manipülatörler küresel koordinat sisteminin parametrelerini kullandığı için bu isimle anılırlar. Küresel manipülatör iki adet döner ve bir adet kayar mafsala sahiptir. Döner mafsallarda genellikle elektrik motorları kullanılır (Şekil 3.10) (Craig, 2005).



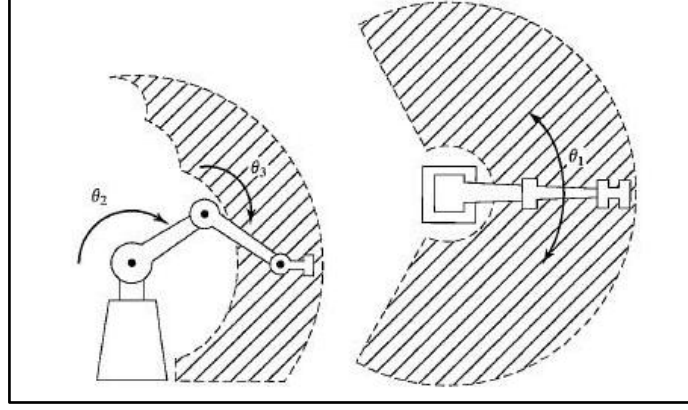
Şekil 3.10. Küresel manipülatör (Craig, 2005)

4. *SCARA manipülatörler*: SCARA türü manipülatörler birbirine paralel üç eksen den meydana gelmektedirler. İki adet döner mafsala ve bir adet kayar mafsala sahiptirler. Hassasiyetleri oldukça iyi olan manipülatörlerdir. Bundan dolayı elektronik endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir (Şekil 3.11) (Craig, 2005).



Şekil 3.11. SCARA manipülatör (Sandin, 2003)

5. *İnsan koluna benzer manipülatörler*: Bu manipülatörler insan kol hareketlerini taklit ettiği için bu isimle anılmaktadırlar. Çalışma hacimlerinde hareket kabiliyetleri oldukça yüksektir. Bu manipülatörlerde genellikle kullanılan tahrik elemanları elektrik motorlarıdır (Şekil 3.12) (Craig, 2005). Bu çalışmadaki manipülatör mekanizmaları bu gruba girmektedir.



Şekil 3.12. İnsan koluna benzer manipülatör (Craig, 2005)

3.5.3. Manipülatörlerin Kullanım Alanları

Manipülatörlerin kullanım alanları, endüstriyel, operasyonel, tıp ve sağlık vb. manipülatörler olarak sınıflandırılabilir.

3.5.3.1. Endüstriyel manipülatörler

Manipülatörler endüstrinin farklı sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Şekil 3.13). Sektöre göre kullanılan manipülatörlerin türleri de değişmektedir. Mesela, otomotiv sektöründe araçların saç kısımlarının kaynağı için robot manipülatörler kullanılmaktadır. Robot kullanılmasının nedenleri arasında seri imalat olması ve kaynak kalitesinin iyi olmasıdır. Bir başka örnek olarak kesim yapan robot manipülatörler verilebilir. Bu tür manipülatörler genellikle Kartezyen manipülatörlerdir. Kontrollerinin kolay olması ve hassas konumlama yapılabildiğinden dolayı tercih edilirler (Kurfess, 2005).



Şekil 3.13. Endüstriyel manipülatörler (Kurfess, 2005)

3.5.3.2. Operasyonel manipulatörler

Bu tip manipulatörler genelde uzaktan kontrollü veya özel bir amaca yönelik tasarlanmışlardır. Uçakların dış temizliğinde, bomba imha çalışmalarında, madencilik, uzay araştırmaları, denizin altında yapılan çalışmalarda, depremler sonrası kurtarma çalışmalarda, askeri amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır (Şekil 3.14) (Havusoğlu, 2014).



Şekil 3.14. Bomba imha robot manipulatörü (Kurfess, 2005)

3.5.3.3. Tıp ve sağlık alanında kullanılan manipulatörler

Ortopedik amaçlı insan uzuvları ve protezleri beyinden gelen sinyali sensörler ile algılayarak uzuvlardaki manipulatörleri hareket ettirirler (Şekil 3.15). Ayrıca günümüzde tıbbi operasyonlar için kıtalar arası iletişim kurabilen cerrahların ameliyat yapmasını sağlayan haptik sistemlerin kullanıldığı robotlar vardır. Türkiye’de de bu şekilde başarılı ameliyatlarda yapılmaktadır (Kurfess, 2005).



Şekil 3.15. Da Vinci robot manipulatörü (Kurfess, 2005)

3.5.4. Manipülâtör Seçiminde Dikkat Edilecek Başlıklar

Manipülâtör seçiminde robotun çalışma uzayı, tekrarlanabilirlik, yük taşıma kapasitesi gibi özellikleri değerlendirilmelidir.

3.5.4.1. Çalışma uzayı

Manipülâtörlerin uç işlevcilerinin robotun yapısal sistemine bağılı olarak ulaşabileceğı noktalardan oluşan hacmidir. Bu hacimde manipülâtör istenilen noktaya sorunsuz bir şekilde ulaşabilmektedir. Çalışma uzayı kullanım alanlarına göre farklılık gösterir (Havusoğlu, 2014). Robot manipülâtörlerinin mümkün olduğunca büyük bir çalışma alanına sahip olması istenir. Ancak yapılacak işleme göre en uygun robot manipülâtörün seçilmesi gerekir. Çünkü bir robotun çalışma alanının büyümesi uzuv boyutlarını arttırır (Saygılı, 2006).

3.5.4.2. Tekrarlanabilirlik

Robot manipülâtörlerin daha önce gitmiş olduğu bir noktaya tekrar tekrar gidebilme yeteneğini belirtir. Kullanılan uygulamaya göre farklılık gösterebilir. Örneğin bir kaynak robotu kaynak yaparken tekrarlanabilirlik yeteneğinin kaynak telinin yarıçapından fazla olmaması gerekir. Aksi takdirde geri dönüşü olmayan hasarlara neden olabilir (Havusoğlu, 2014) Tekrarlanabilirlik hassasiyetten farklıdır. Tekrarlanabilirlik hataları rastgele bir değer alır ve genellikle tekrarlanabilirlik, hassasiyetten daha azdır. Robot manipülâtörü ve bileğindeki elemanların hassasiyet bozukluğu tekrarlanabilirlik hatalarının başlıca nedenlerini teşkil etmektedir (Saygılı, 2006).

3.5.4.3. Yük taşıma kapasitesi

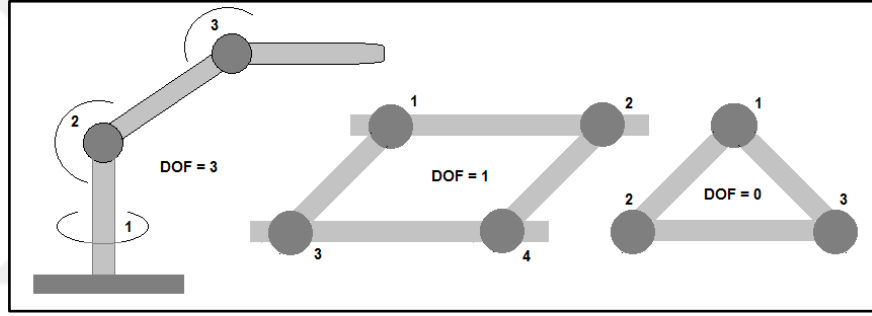
Yük taşıma kapasitesi özellikle taşıma yapmak için kullanılacak robotlarda dikkat edilmesi gereken bir özelliktir. Robot kolunun hassas konumlama yapabilecek şekilde taşıyabileceğı maksimum yük değerine dikkat edilmesi gerekmektedir (Havusoğlu, 2014). Maksimum yük taşıma kapasitesi, robotun minimum hızında tekrarlanabilirlik değerini koruyarak taşıyabileceğı maksimum yük değeridir. Nominal yük taşıma kapasitesi de robotun maksimum hızda tekrarlanabilirlik değerini koruyarak taşıyabileceğı maksimum yük miktarıdır. Bu yük taşıma kapasitesi değerleri taşınan malzemenin boyutu ve şekline bağılıdır (Saygılı, 2006).

3.5.5. Robot manipülator kinematiği

Kinematik cisimlerin hareketini kuvvetlerin etkisini göz ardı ederek inceler. Manipülator kinematiğinde her bir uzvun hareketi uzvun kendi ağırlığı dikkate alınmaksızın hesaplanır.

3.5.5.1. Manipülatorlerde serbestlik derecesi (DOF)

Bir nesnenin yapabileceği bağımsız hareketlerin sayısı serbestlik derecesi sayısıdır. Serbest bir cisim uzayda serbest olarak hareket ettiği zaman altı serbestlik derecesine sahiptir. Altıdan daha fazla serbestlik derecesine sahip robot manipülatorler “artıksal”, altıdan daha az serbestlik derecesine sahip robot manipülatorler “eksiksel” olarak adlandırılmaktadır. Çeşitli serbestlik derecelerine (DOF) sahip mekanizmalar Şekil 3.16’de gösterilmektedir (Esin, 2008).



Şekil 3.16. Çeşitli serbestlik derecelerine sahip mekanizma modelleri(Esin M. 2008)

Serbest halde altı serbestlik derecesinin üçü “konum” diğer üçü de “yönelim” içindir. Bu iki tür bağımsız hareket;

- x, y, z , eksenleri boyunca doğrusal hareketler taşımaları (ötelemeleri),
- x, y, z , eksenleri etrafında açısal hareketler dönmeleri temsil eder.

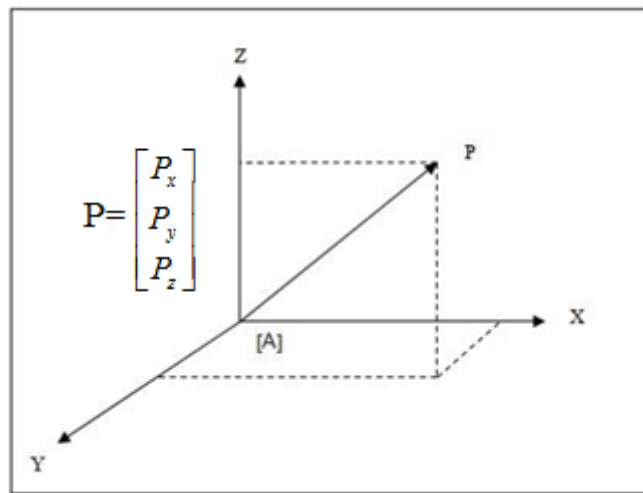
Üç ortogonal (dikey) taşımayı ve ortogonal eksenler etrafında üç dönmeyi kullanarak, bir cismin durumu, bir başka deyişle robotun çalışma hacmindeki yeri ve yönelimi tam olarak tarif edilebilir. Manipülatordeki mafsallık sayısı azaldıkça kolün çalışma uzayı, bağlantı parçalarının fiziksel boyutları aynı kalsa bile yine de hacim olarak küçülür. Bu kolün bu uzaydaki herhangi bir noktaya erişebilmesindeki esneklik de azalır. Bazı işlemler bu esnekliğin yüksek olmasını gerektirdiğinde kolün serbestlik derecesinin de yüksek seçilmesi zorunluluğu doğar. Böyle durumlarda altıdan da fazla, dokuz ya da on mafsallık kol yapıları kullanılmaktadır (Megep, 2009). Serbestlik derecesini artırmak robot kol maliyetini artıracaktır. Yine de olağan yapıda insanın bel, omuz, dirsek, bilek ve

parmaklarındaki hareketlerin benzerlerini robot manipülatörlerin mafsallardaki hareketlerde bulmak olanaklıdır. Ayrıca altından fazla mafsala sahip olan robotlarda randıman artsa bile koordinat dönüşümlerinin hesaplanmasında programlama zorluklarına yol açmaktadır (Esin, 2008).

3.5.5.2. Manipülatörlerde koordinat yerleşimi

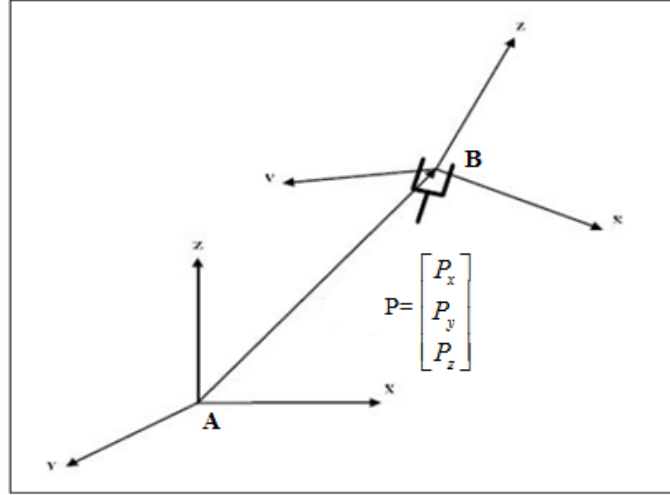
Robot manipülatörü ve çevresindeki nesnelerin konumlarını ve birbirlerine göre yönelimlerini belirlemek için robotun ve çevresindeki nesnelerin merkezlerine birer koordinat sistemi yerleştirilir. Tanımlanacak bütün konum ve yönelimler evrensel çerçeveye veya evrensel çerçeve içindeki diğer kartezyen koordinat sistemlerine göre gerçekleştirilir. Robot sistemlerinin çalışma uzaylarında belirlenen noktalara gitmesini sağlamak için koordinat sistemleri ile ilişkilendirilmişlerdir. XYZ koordinat sistemi genelde kullanılan koordinat sistemidir, bu çalışmada XY koordinat sistemi tercih edilmiştir. Robot manipülatörleri her bir serbestlik derecesi için bir küresel bir yerel koordinat sistemine sahiptirler.

Konum; Bir nokta, koordinat sistemi tanımlamak suretiyle evrensel çerçeve içerisinde herhangi bir yere konumlandırılabilir. Üç boyutlu uzayda, bir nokta bu koordinat sistemlerinin merkezine göre tanımlanmış 3x1 boyutlu bir vektörle gösterilebilir. Evrensel koordinat çerçevesi içerisinde bir $\{A\}$ koordinat sistemi ve P noktası olduğu düşünüldüğünde, P noktasının $\{A\}$ koordinat sistemine göre tanımı Şekil 3.17'de verilmiştir (Katipoğlu, 2013).



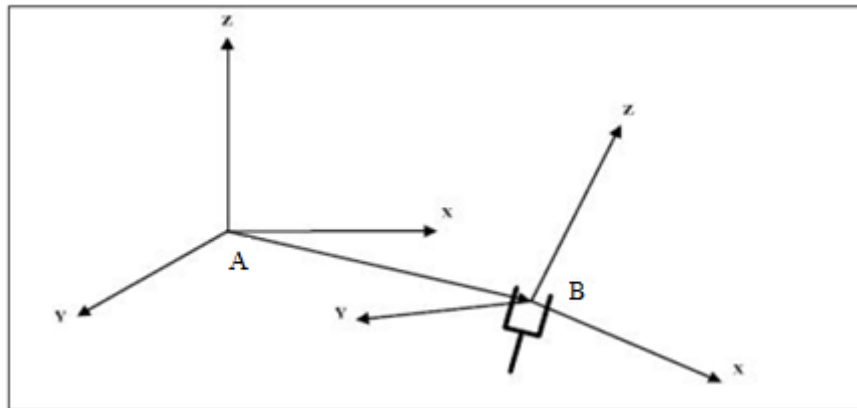
Şekil 3.17. P noktasının A noktasına göre tanımı (Bingül ve Küçük, 2005)

Robot manipulatörüne ve çevresindeki nesnelere koordinat sistemi yerleştirilir. Şekil 3.18’de bir robotun uç noktasının A noktasına uzaklığını tanımlamak için, A noktasına ve robotun uç noktasına koordinat sistemleri yerleştirilmiştir. Aşağıdaki şekilde A noktasına ve uç noktaya yerleştirilen koordinat sistemlerinin merkezleri arasındaki uzaklık görülmektedir.



Şekil 3.18. A noktası ve uç noktasının koordinat sistemleri (Bingül ve Küçük, 2005)

Yönelim: Üç boyutlu uzayda, bir noktanın herhangi bir koordinat sistemine göre konumunun yanında yönelimi de tanımlanır. Yönelim, bir koordinat sisteminin başka bir koordinat sistemine göre dönme miktarıdır ve 3×3 boyutlu matris olarak ifade edilir. Şekil 3.19’de uç işlevcisine, $\{B\}$ koordinat sistemi yerleştirilerek $\{A\}$ referans koordinat sistemine göre yönelimi tanımlanır (Katipoğlu, 2013).



Şekil 3.19. $\{B\}$ Koordinat sisteminin $\{A\}$ koordinat sistemine göre yönelimi (Bingül ve Küçük, 2005)

3.5.5.3. Manipülörlerin matris matematiği

Matrisler noktaları, vektörleri, çerçevelerin öteleme, dönme ve aktarma işlemlerini sunmak için kullanılırlar. Robot manipülör parçalarının çalışma uzayında küresel koordinat sistemleri ile ilişkisini belirlemek için matris işlemleri yapılır. Yönelme işlemi parametrik hale getirilip homojen dönüşümler kullanılır. Robot sistemlerinde her bir mafsalsın pozisyonu ve yönelmesi matris gösteriminde sunulur. $P = [i,j,k]$ vektörü o anki koordinat sisteminin bir önceki koordinat sistemine göre yerini; $X=[x_1,x_2,x_3]$, $Y=[y_1,y_2,y_3]$, $Z=[z_1,z_2,z_3]$ ise bir önceki koordinat sistemine göre yönelmesini temsil eder. X , Y ve Z vektörleri birim vektörleridir. Denklem 3.1'de A Matrisi, yönelme ve pozisyon alma işlemlerini temsil eden matrisi göstermektedir (Güzel, 2008).

$$A = \begin{bmatrix} x & y & z & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & i \\ x_2 & y_2 & z_2 & j \\ x_3 & y_3 & z_3 & k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Her bir mafsalsın koordinat sisteminin bir önceki koordinat sistemi ile ilişkisi incelenerek; homojen aktarım matrisleri elde edilir. Robotun uç işlevcisinin küresel koordinat sistemi ile ilişkisini anlamak için bütün matrisler çarpılır. Denklem 3.2'de son mafsalsın başlangıç durumuna göre konumunu ve yönelimini bulmak için yapılan matris çarpma işlemleri verilmiştir (Mikkelsen, 1998).

$$M(AC) = A * B * C = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & i \\ x_2 & y_2 & z_2 & j \\ x_3 & y_3 & z_3 & k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Burada; $M(AC)$, üçüncü mafsalsın küresel koordinat sistemi ile ilişkisini gösteren matrisi, A , küresel koordinat sistemi ile ilişkili birinci mafsalsın matris gösterimini, B , birinci mafsalsın koordinat sistemi ile ilişkili ikinci mafsalsın matris gösterimini, C , ikinci mafsalsın koordinat sistemi ile ilişkili üçüncü mafsalsın matrisini göstermektedir. Ayrıca x , üçüncü mafsalsın x koordinatının küresel koordinat ile ilişkisini, y , üçüncü mafsalsın y koordinatının küresel koordinat ile olan ilişkisini, z ise üçüncü mafsalsın z koordinatının küresel koordinat ile ilişkisini ifade etmektedir. i, j, k , üçüncü mafsalsın küresel koordinat sistemine göre pozisyonu belirtmektedir (Mikkelsen, 1998).

3.5.5.4 Dönme matrisi

$\{i_0, j_0, k_0\}$, $o_0x_0y_0z_0$ koordinat çerçevesi için, $\{i_1, j_1, k_1\}$, $o_1x_1y_1z_1$ koordinat çerçevesi için birim vektörleri ifade etmektedir. I . koordinat çerçevesi O . koordinat çerçevesinde z_0 eksenini etrafında döndürülerek elde edilmiştir. Bu iki koordinat çerçevesi arasındaki dönüşüm Denklem 3.3 ile bulunur. Buradaki R_0^1 matrisi I . koordinat çerçevesinden O . koordinat çerçevesine dönme matrisini göstermektedir. I . koordinat çerçevesi O . koordinat çerçevesinden belli bir dönme ile elde edildiğinden bu matris dönme matrisi adını alır (Fu ve ark, 1987).

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Buradan;

$$i_0 \cdot i_1 = \cos \theta, \quad j_0 \cdot i_1 = -\sin \theta, \quad j_0 \cdot j_1 = \cos \theta, \quad i_0 \cdot j_1 = \sin \theta, \quad k_0 \cdot k_1 = 1 \quad (3.4)$$

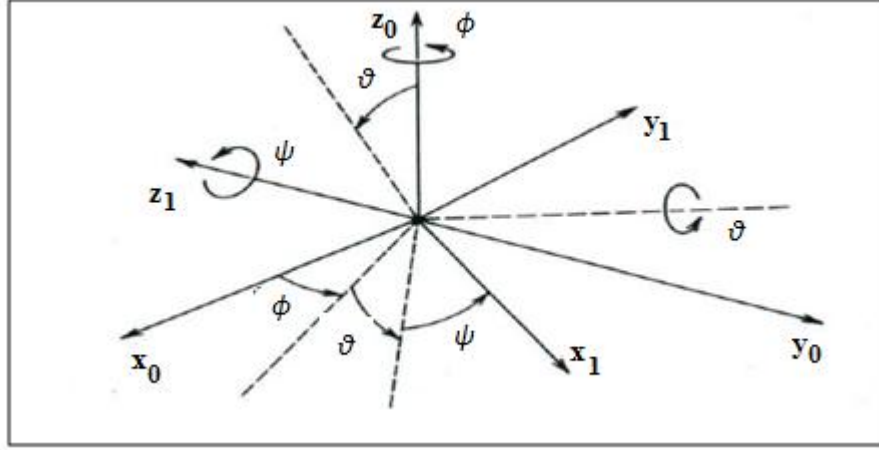
$$R_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Dönme matrisi Denklem 3.5'de görülmektedir, R_0^1 gösterimi yerine dönme eksenini ve açısını belirten $R_{z,\theta}$ gösterimi de kullanılabilir. Koordinat çerçeveleri etrafında dönme tek olmayabilir, böylece devam eden şekilde $o_2x_2y_2z_2$, $o_3x_3y_3z_3$, $o_4x_4y_4z_4 \dots$ Koordinat çerçeveleri elde edilebilir. Aslında sonuçta elde edilen koordinat çerçevesi sadece üç eksen etrafında (x,y,z) belirli açılarla dönmüştür. Bu nedenle elimizde bulunan rastgele bir koordinat çerçevesinin temel koordinat çerçevesine göre dönme matrisini elde etmek için üç tane açı değeri yeterlidir. Bu açıların tanımlanması için iki tane gösterim mevcuttur (Sciavicco ve Sciliano, 1996).

1. Euler açıları gösterimi

2. Yalpa /Yunuslama /Sapma açıları gösterimi

1. Euler açıları ve gösterilimi: Euler açıları sırasıyla z eksenini etrafında ϕ açısı kadar, y eksenini etrafında θ açısı kadar, tekrar z eksenini etrafında ψ açısı kadar dönmelere karşılık gelmektedir. Euler açıları gösterilimi Şekil 3.20'da gösterilmiştir (Sciavicco ve Sciliano, 1996).



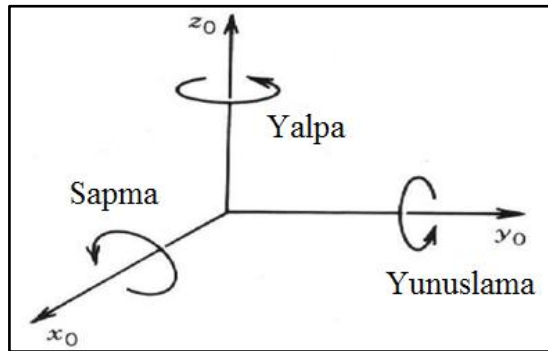
Şekil 3.20. Euler açıları (Sciavicco ve Sciliano, 1996)

Burada $\cos = c$, $\sin = s$ olmak üzere dönme matrisi şu şekilde elde edilir. Toplam, Euler matrisi aşağıdaki Denklem 3.6'de görülmektedir.

$$R_0^1 = R_{z,\phi} \cdot R_{y,\theta} \cdot R_{x,\psi} \quad (3.6)$$

$$= \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 \\ s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & -s_\psi \\ 0 & s_\psi & c_\psi \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

2. *Yalpa/Yunuslama/Sapma açıları ve gösterilimi*: Bu açılar sırasıyla z eksenini etrafında ϕ açısı kadar, y eksenini etrafında θ açısı kadar ve x eksenini etrafında ψ açısı kadar dönmelere karşılık gelmektedir. Yalpa/Yunuslama/Sapma açıları gösterilimi Şekil 3.21'de verilmiştir (Sciavicco ve Sciliano, 1996).



Şekil 3.21. Yalpa/Yunuslama/Sapma açıları gösterilimi (Sciavicco ve Sciliano, 1996)

Burada toplam öteleme matrisinin oluşumu ve değeri Denklem 3.8'de gösterilmektedir.

$$R_0^1 = R_{z,\phi} \cdot R_{y,\theta} \cdot R_{x,\psi} \quad (3.8)$$

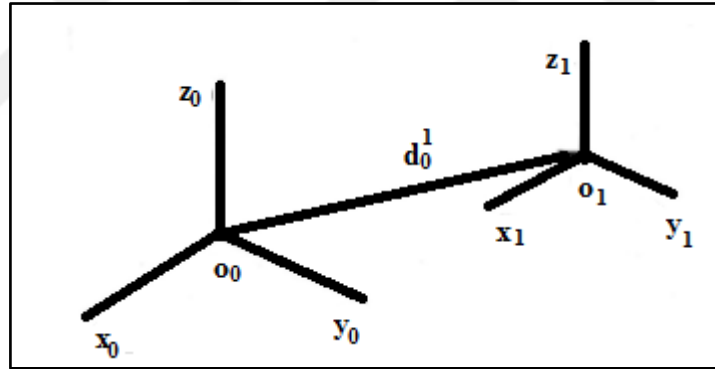
$$= \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 \\ s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & -s_\psi \\ 0 & s_\psi & c_\psi \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$= \begin{bmatrix} c_\phi \cdot c_\theta & -s_\phi \cdot c_\theta + c_\phi \cdot s_\theta \cdot s_\psi & s_\phi \cdot s_\theta + c_\phi \cdot s_\theta \cdot c_\psi \\ s_\phi \cdot c_\theta & c_\phi \cdot c_\psi + s_\phi \cdot s_\theta \cdot s_\psi & -c_\phi \cdot s_\psi + s_\phi \cdot s_\theta \cdot c_\psi \\ -s_\theta & c_\theta \cdot s_\psi & c_\theta \cdot c_\psi \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.5.5.5. Öteleme vektörü

Şekil 3.22'de gösterildiği üzere $o_0x_0y_0z_0$ 'den d kadar bir öteleme ile elde edilmiş $o_1x_1y_1z_1$ koordinat çerçevesi görülmektedir. Bu iki koordinat çerçevesi arasındaki dönüşüm öteleme vektörü d_0^1 ile tanımlanır ve gösterildiği gibi öteleme vektörü ifadesi ile temsil edilir (Sciavicco ve Sciliano, 1996).

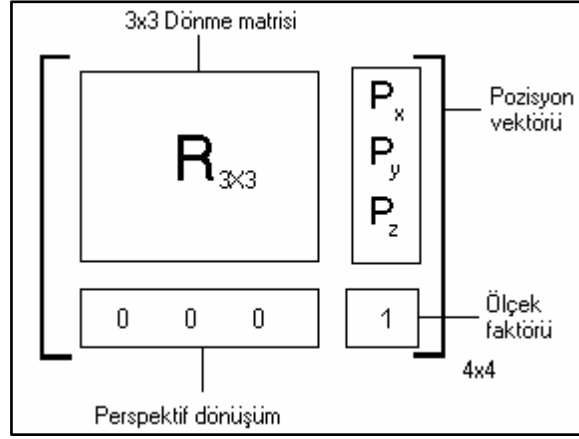
$$d_0^1 = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (3.11)$$



Şekil 3.22. Ötelenmiş çerçeve (Sciavicco ve Sciliano, 1996)

3.5.5.6. Homojen dönüşüm matrisi

Üç boyutlu uzayda koordinat çerçeveleri arasındaki dönüşüm dönme matrisleri ve öteleme vektörleri yardımıyla yapılır. Her ikisinin birlikte gösterilimi için yani koordinat çerçeveleri arasında hem dönmenin, hem de ötelemenin var olduğu durumda homojen dönüşüm matrisleri kullanılır. Homojen dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir (Şekil 3.23). Aşağıda şematik gösterimi verilen T_0^1 matrisi homojen dönüşüm matrisini ifade etmektedir.



Şekil 3.23. Homojen dönüşüm matrisinin şematik gösterimi (Saygılı, 2006)

Burada elde edilen T_0^1 matrisi 1. koordinat çerçevesinden 0. koordinat çerçevesine homojen dönüşüm matrisini göstermektedir. T_0^1 matrisini 4×4 boyutundan kare matris olduğuna dikkat edilmelidir. Bu homojen matris oluşturulurken matrisin tersinin alınabilmesi için yapılmıştır. T_0^1 matrisindeki $T_{4,4}$ elemanı olan 1 tüm elemanların bire bir ölçeklendiğini göstermektedir. Bu elde ettiğimiz genel kalıba bağlı olarak temel homojen dönüşüm matrisleri Denklem 3.12 ve 3.13'de gösterilmektedir (Mikkelsen,1998).

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} c\phi & 0 & s\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\phi & 0 & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$d_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} d_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} d_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

T_{i-1}^i 'in çerçeve i 'den çerçeve $i-1$ 'e homojen dönüşüm matrisi olduğu düşünüldüğünde, T_{i-1}^i matrisinin sabit olmadığına, manipülatörün hareketiyle değiştiğine dikkat edilmelidir. Bu ifadelere bağlı olarak sonlandırıcının konumunu ve yönelimini temel koordinat çerçevesinde elde etmek için homojen dönüşüm matrisi Denklem 3.14'deki gibi ifade edilir.

$$T_0^n = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot \dots \cdot T_{n-1}^n \quad (3.14)$$

3.5.5.7. İleri (düz) kinematik

Manipülâtörün uç işlevcisinin zemine göre konum ve yönelimini mafsal değişkenleri cinsinden belirleyen "ileri (düz) kinematik" ilişkileridir (Şekil 3.24) (Özgören, 2002). Robot manipülâtörlerin ileri yön kinematığında mafsal dönüşüm matrislerinin ardı ardına çarpılmasıyla ana çerçeve ile araç çerçevesi arasında ilişki tanımlanır. Bu ilişki araç çerçevesinin yönelim ve konumunu ana çerçeveye göre verir. (Yılmaz, 2010).



Şekil 3.24. İleri (Düz) kinematik şematik gösterimi (Havusoğlu, 2014)

3.5.5.8. Denavit-Hartenberg (DH) dönüşümü

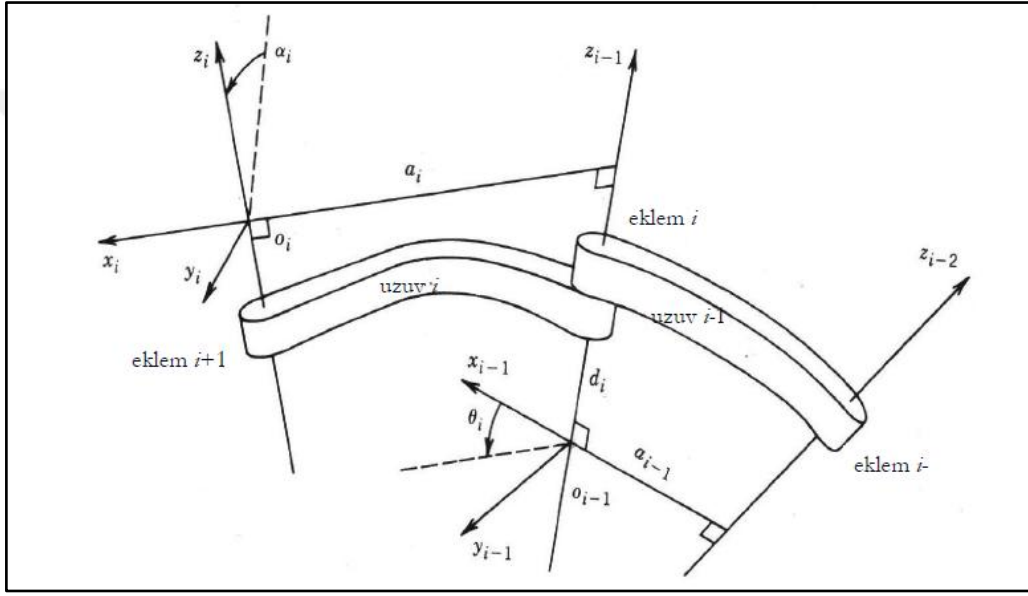
Manipülâtörlerde dönüşüm matrisini elde etmek kolay gibi görünse de her bir mafsal için koordinat çerçevelerinin yerleştirilmesi ve birbirlerine göre yorumlanması anlam karmaşasına yol açmaktadır. Bu anlam karmaşasını ortadan kaldırmak için Denavit ve Hartenberg 1955 yılında sistematik bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde aşağıdaki kurallara göre önce koordinat çerçeveleri atanır, daha sonra dönüşüm için gerekli uzuv ve mafsal parametreleri bulunur. Yöntem dokuz adımdan oluşmaktadır ve bu adımlar aşağıda verilmiştir (Sciavicco ve Sciliano, 1996).

1. Eklem eksenleri $z_0 \dots z_{n-1}$ 'i konumlandırılır.
2. Temel çerçeve sağ el kuralına göre düzenlenir. $i = 1, \dots, n-1$ için adım 3-5 tekrarlanır.
3. Merkez o_i yerleştirilir. Eğer z_i ile z_{i-1} kesişiyorsa o_i bu noktaya yerleştirilir. Eğer z_i ile z_{i-1} paralelse o_i mafsalı üzerine yerleştirilir.
4. x_i yerleştirilir. Eğer z_i ile z_{i-1} kesişiyorsa ikisinin oluşturduğu düzleme dik olarak x_i yerleştirilir. Eğer z_i ile z_{i-1} paralelse, bunların ortak normaleri boyunca o_i 'ye doğru x_i yerleştirilir.
5. Sağ el çerçevesini tamamlayacak şekilde y_i yerleştirilir.

6. Sonlandırıcı çerçevesi $o_n x_n y_n z_n$ yerleştirilir.

Bu ilk altı adım koordinat çerçevelerinin yerleştirilmesi için kullanılır. Daha sonraki üç adım mafsalsal ve uzuv parametrelerini verir.

7. Daha sonra mafsalsal ve uzuv parametreleri belirlenir. Bu parametreler (Şekil 3.25) şekil üzerinde verilen uzuv uzunluğu a_i : x_i boyunca o_i 'den x_i ve z_{i-1} 'nin kesişimlerine olan uzaklığı, uzuv ofseti: d_i : z_{i-1} boyunca o_{i-1} 'den x_i ve z_{i-1} 'in kesişimlerine olan uzaklığı, uzuv bükümü: α_i : x_i etrafında z_{i-1} ile z_i arasındaki açıyı, mafsalsal açısı: θ_i : z_{i-1} etrafında x_{i-1} ile x_i arasındaki açıyı göstermektedir.



Şekil 3.25. Denavit-Hartenberg çerçeve ataması (Sciavicco ve Sciliano, 1996)

8. Aşağıdaki matrise bağlı olarak iki çerçeve arasındaki homojen dönüşüm matrisi hesaplanır.

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i \theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

9. Daha sonra sonlandırıcı koordinat çerçevesinden temel çerçevesine dönüşüm matrisi hesaplanır.

$$T_0^n = T_0^1 \dots T_{n-1}^n \quad (3.16)$$

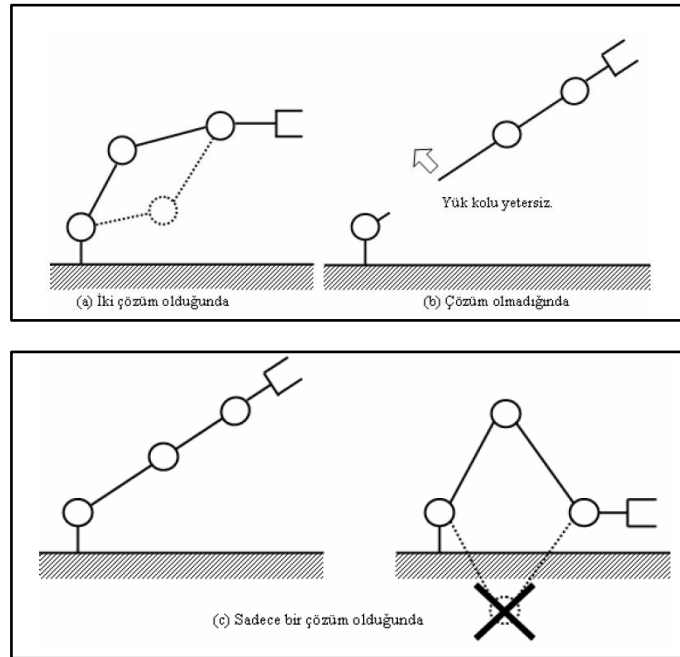
3.5.5.9. Ters kinematik

Manipülâtörün zemine göre verilen konum ve yönelimini sağlayacak olan mafsâl değişkenlerini belirleyen "ters kinematik" ilişkileridir. Ters kinematik ilişkilerin çözümü, robot manipülâtörün serbestlik derecesine ve topolojik yapısına (döner ve kayar mafsalların sayısına ve sıralanışına) bağlı olan ve genelde lineer olmayan bağlaşık denklemlerin çözümünü kapsar (Özgören, 2002). Şekil 3.26'de ters kinematığın şematik olarak açıklaması verilmiştir



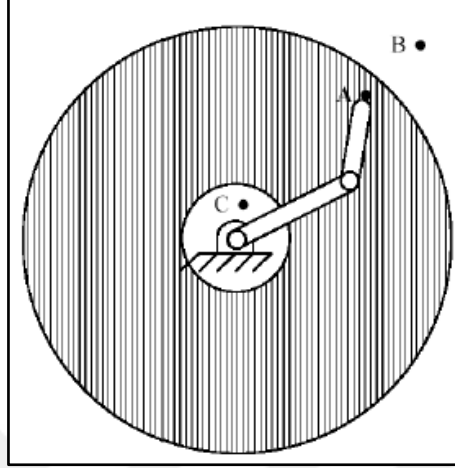
Şekil 3.26. Ters kinematik şematik gösterimi (Havusoğlu, 2014)

Ters kinematik genel olarak ileri kinematiğe göre daha zordur. Bazı durumlarda analitik bir çözüm bulunamamaktadır. Bu tip durumlarda iteratif çözümler gerekmektedir. Analitik çözümler içinde birden fazla çözüm ortaya çıkabilir. Böyle bir durumda en uygun çözüm seçilmelidir. Çünkü bazı çözümlerde ortaya çıkabilecek sonuçlar çalışma uzayının dışında kalabilir (Ayta, 2007).



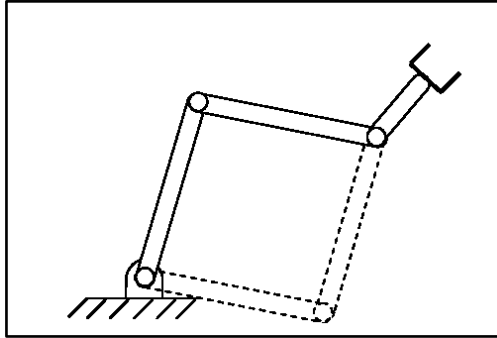
Şekil 3.27. Ters kinematik konum çözümlemesi (Megep, 2009)

Çözümün var olabilmesi için istenen robot manipülatörü konumunun, robotun çalışma hacmi içinde olması gerekmektedir. Aksi takdirde çözüm yoktur (Şekil 3.27). Şekil 3.28’de B ve C noktaları robotun çalışma hacminin dışındadır. Dolayısı ile bu noktalar için ters kinematik çözüm yoktur. A noktası ise robotun çalışma hacminin içindedir ve ters kinematik çözüm vardır (Yılmaz, 2010).



Şekil 3.28. Robot manipülatörün çalışma hacmi (Yılmaz, 2010)

Şekil 3.29’de görülen üç dönel mafsala sahip düzlemsel manipülatörün aynı konum ve yönelimi iki farklı şekilde elde edilebilmektedir. Elde edilen çözümlerden hangisi istenen konuma ulaşmak için daha az hareket veya enerji gerektiriyorsa o tercih edilebilir. Ya da çözümlerden birisi mafsallardaki fiziksel engellerden veya ortamda bulunan bir fiziksel engel yüzünden uygulanamıyorsa, diğer çözüm tercih edilir.



Şekil 3.29. Ters kinematikte birden fazla çözüm olma durumu (Craig, 2005)

3.6. Yörünge Planlama

Bir robot manipülatörünün uç işlevcisinin, başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar olan hareketi esnasında yer değiştirme ve dönme yollarını belirleyen noktalar kümesine “yörünge” denir. Robot manipülatörlerde yörünge planlaması genelde, noktadan noktaya hareket türünde yapılmaktadır. Noktadan noktaya hareketi kontrol etmek için üç

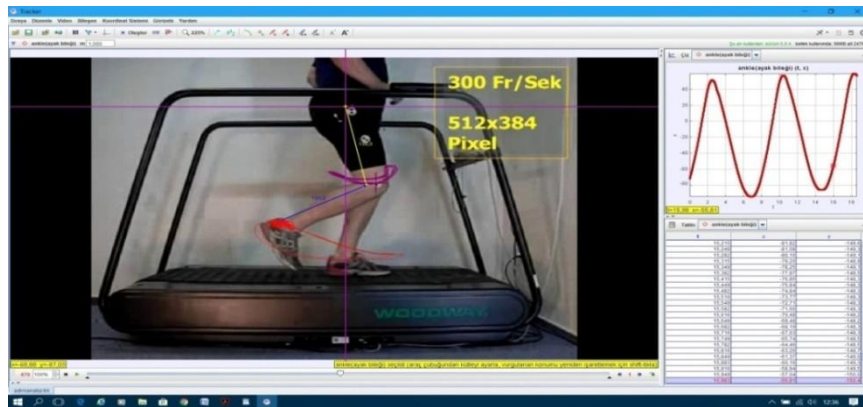
yöntem mevcuttur. Bunlar; sıralı mafsalsal hareketi, koordine edilmemiş mafsalsal hareketi ve koordine edilmiş mafsalsal hareketidir. Sıralı mafsalsal hareketi; bir anda diğer bütün mafsalların sabitlenip sadece bir mafsalsal hareket ettirilmesi şeklindedir. Bu hareket türü, bir endüstriyel robotun kontrolünde hızlı basitleştirmeler sağlayabilmektedir ancak, hareketin süresini uzatmaktadır. Koordine edilmemiş mafsalsal hareketinde, robotun uç işlevcisinin belirtilen noktaya hareketi esnasında yörüngeyi izleyip izlemediği önem arz etmemektedir. Koordine edilmiş mafsalsal hareketi ise, noktadan noktaya hareketin en kullanışlı türüdür. Burada, bütün mafsallar sonuç pozisyonuna eş zamanlı şekilde koordine edilmektedir (Tonbul ve Sarıtaş, 2003).

Robot manipülatörlerinin uç noktalarının çalışma uzayı içinde kendisine verilen görevi yerine getirebilmesi için önceden belirlenen bir noktaya hareket etmesi gerekir. Verimliliğin artması için en önemli etken ise, bu noktaya mümkün olan en kısa sürede gitmesidir (Tatar ve ark., 2015).

Mekanizmaların kendi aralarında birçok sınıflandırılmaları mevcuttur. Bunlardan bir tanesi de yaklaşık düz yörünge üreten mekanizmalar ve tam düz yörünge üreten mekanizmalar olarak iki şekilde sınıflandırma yapılabilmektedir.

3.7. Tracker Video Görüntü Çözümleme Programı

Tracker video çözümleme programı kaydedilen görüntüler üzerinden veri alınabilen ücretsiz ve açık kaynak kodlu bir programdır (Tracker, 2016). Tracker Programı kullanılarak kaydedilen görüntü üzerine referans eksen eklenebilir ve görüntü üzerine istenilen bir noktanın referans eksen takımına göre verileri alınabilmektedir (Şekil 3.30). Bu çalışmada, katılımcıların video kaydedicisiyle elde edilen görüntüleri, eklem açıları ve ayak bilekleri yörünge eğrileri elde etmek için Tracker (sürüm 4.11) video çözümleyicisi programı kullanılmıştır.



Şekil 3.30. Tracker video çözümleme programı.

3.8. Working Model 2D Analiz ve Simülasyon Programı

Dinamik sistemini çalıştıran Working Model 2D (Ernest ve ark, 2000), Design Simulation Technologies firması tarafından yapılan, simülasyon ve analiz programıdır. WM2D simülasyon programında analizini yapmak istediğiniz çalışmaya sürtünme ve sıcaklık gibi çeşitli senaryolar eklenebilmektedir (Şekil 3.31). Bu Tez çalışmasındaki Tracker programından elde edilen verilere dayanarak oluşturulacak olan 2R bacak modeli ve 2R manipülör mekanizması tamamen Working Model 2D analiz ve simülasyon programında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.31. WM2D analiz ve simülasyon programı.

3.8. Regresyon ile Eğri Uydurma (Curve Fitting)

Regresyon analizinde, bu modellerde yer alan değişkenler arasındaki ilişkileri incelemekte ve buna bağlı tahminler yapılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem; ekonomi, mühendislik, biyoloji ve sosyal bilimler gibi birçok alanda geniş uygulama alanı bulmaktadır (Gök, 2010). Doğrusal regresyon Y olarak isimlendirilen sayısal bir bağımlı değişkenle X olarak belirtilen bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modelleme yaklaşımıdır (Khalau, 2017). Doğrusal regresyon denkleminin katsayılarını belirlemek, her doğru üzerindeki noktanın gerçek ölçüm değerlerinden olan farklarının karesini minimum yapmak gerekecektir. Bu yöntem en küçük kareler yöntemi olarak da bilinmektedir. Bu yöntemin çok yaygın biçimde kullanılmasının nedeni, hesaplama ve anlaşılma kolaylığıdır (Khalau, 2017). Ölçüm sonuçlarının analizinde çok kere lineer regresyon yetersiz kalabilir. Dolayısıyla daha uygun sonuçlar verebilecek olan doğrusal olmayan eğriler ile temsil yolu tercih edilmektedir. Matematiksel olarak bir modelin parametrelerine göre doğrusal olmaması, o modelin parametrelerine göre birinci türevleri (kısmi türevleri) alındığında elde edilen sonuçların model parametrelerine bağlı olması

durumu olarak tanımlanabilir(Akgün, 2018). Non-linear regresyon denklemlerini çıkarmak için yine aynı lineer denklemlerde olduğu gibi en küçük kareler yöntemin kullanılır.

3.8.1 En küçük kareler yöntemi

Elimizde $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ şeklinde $n+1$ adet ölçüm sonucu olduğunu varsayalım. Amacımız bu sonuçları temsil edecek en küçük kareler polinomunun bilinmeyen a_i katsayılarını bulmak olacaktır.

$$y_m(x_i) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (3.17)$$

Eğer polinomun derecesi (m) verilen ölçüm noktası sayısı ile eşit alınırsa, ($m = n$) en küçük kareler polinomu interpolasyon polinomlarına eşdeğer olacak ve bulunan polinom tüm ölçüm noktalarından geçecektir. Biz ölçüm sonuçlarının hepsinden geçecek bir eğri uydurmak istemediğimiz için (m) değerini (n) değerinden küçük seçmemiz gereklidir. Bu durumda ($m < n$) olduğunda, polinom ölçüm noktalarından geçmeyecek fakat en yakın geçen polinom bulunacaktır. Bu da en küçük kareler yöntemi ile sağlanır

Bir problemde verilen her x noktasındaki y ölçüm değeri ile en küçük kareler polinomu $y_m(x)$ ile hesaplanan y değeri arasındaki farkların karesinin toplamı minimum yapılmaya çalışılmaktadır. Verilen ölçüm noktaları ve yaklaşık fonksiyon arasındaki farklar (δ) ile tanımlanırsa:

$$\delta = y(x) - y \quad (3.18)$$

En küçük kareler yönteminin esası, toplam hata miktarını minimuma indirmek olduğundan hata değerinin ifadesi yazılırsa;

$$E = \sum_{i=0}^n |\delta_i|^2 = \sum_{i=0}^n [y_m(x_i) - y_i]^2 \quad (3.19)$$

Bu hata değeri minimum yapılmaya çalışılır. Burada y_i verilen ölçüm değeri ve $y_m(x_i)$ en küçük kareler polinomu ile bulunan değerdir.

Polinomun ifadesi denklemde yerine konursa;

$$E = \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m - y_i)^2 = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=0}^m a_j x_i^j - y_i \right)^2 \quad (3.20)$$

Bu ifade eğri uydurmada yapılan hata miktarını göstermektedir. Hatanın minimum olma koşulu uydurulan polinomun katsayılarına göre türevlerinin sıfır olmasıdır.

$$\frac{\partial E}{\partial a_m} = 0 \rightarrow \frac{\partial E}{\partial a_0} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial a_1} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial a_2} = 0, \dots, \quad \frac{\partial E}{\partial a_m} = 0 \quad (3.21)$$

Yukarıdaki ifade açık şekilde yazılır ve tekrar düzenlenirse aşağıdaki lineer denklem takımı elde edilir.

$$\sum_{i=0}^n a_0 + \sum_{i=0}^n a_1 x_i + \sum_{i=0}^n a_2 x_i^2 + \dots + \sum_{i=0}^n a_m x_i^m = \sum_{i=0}^n y_i \quad (3.22)$$

$$\sum_{i=0}^n a_0 x_i + \sum_{i=0}^n a_1 x_i^2 + \sum_{i=0}^n a_2 x_i^3 + \dots + \sum_{i=0}^n a_m x_i^{m+1} = \sum_{i=0}^n y_i x_i \quad (3.23)$$

$$\sum_{i=0}^n a_0 x_i^2 + \sum_{i=0}^n a_1 x_i^3 + \sum_{i=0}^n a_2 x_i^4 + \dots + \sum_{i=0}^n a_m x_i^{m+2} = \sum_{i=0}^n y_i x_i^2 \quad (3.24)$$

$$\sum_{i=0}^n a_0 x_i^m + \sum_{i=0}^n a_1 x_i^{m+1} + \sum_{i=0}^n a_2 x_i^{m+2} + \dots + \sum_{i=0}^n a_m x_i^{m+m} = \sum_{i=0}^n y_i x_i^m \quad (3.25)$$

Yukarıdaki denklem takımının da bulunan her bir katsayı katsayılar matrisi şekline getirilerek “Gauss eliminasyon ve Gauss-Jordan” gibi Lineer denklem takımlarının çözüm yöntemlerinden biriyle çözülebilir. Bu tez çalışmasında bu katsayıları bulunulmasını MS EXCEL programındaki ÇÖZÜCÜ (solver) araç menüsü kullanılmıştır.

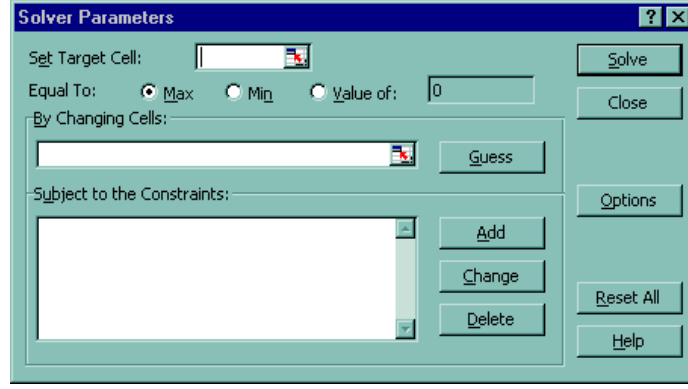
3.9 MS Excel Çözücü (Solver)

Hesap tablosu programlarının (Microsoft Excel, Lotus, Borland's Quattro Pro) son yıllardaki sürümleri doğrusal (bazı doğrusal olmayan) programlama ile modellenmiş sorunları çözebilirler (Topcu, 2002). Doğrusal Programlama (DP) modellerini herhangi bir hesap tablosu programında çözmek için yapılması gereken en temel işlem ilgilenilen sorun ile ilgili tüm verileri program tarafından işlenebilecek bir tablo biçiminde hazırlamaktır (Topcu, 2002). Daha sonra en iyi sonucunu aradığımız karar değişkenlerini tanımlamak gerekir. Son olarak ise kullanılan programa özgü bir takım işlemler gerçekleştirilerek DP modeli çözdürülür (Topcu, 2002).

MS Excel Çözücü aracı kullanmak için;

1- DP Modelinin Excel'e Aktarılması

2- Solver Parametrelerinin Girilmesi



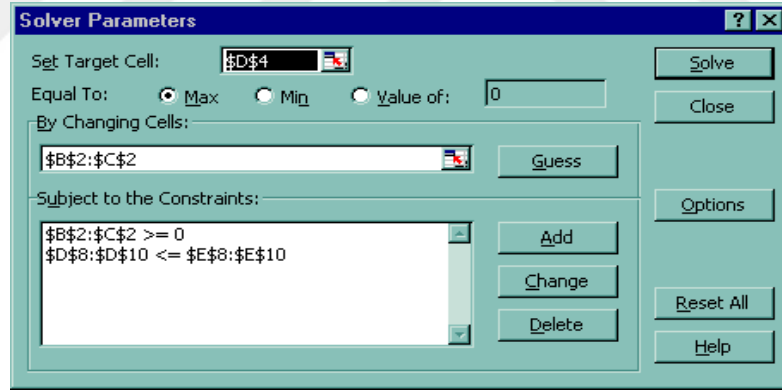
Şekil 3.32. MS Excel Çözücü (solver) (Dr. Y. İlker Topcu,2002)

Şekil 3.32'de görülen bir pencere ekrana gelir. Solver'ı kullanabilmek için öncelikle istenilen parametreleri tanımlamak gerekir:

- Hedef hücre olarak amaç fonksiyonun tanımlandığı hücre girilir [set target cell]
- Problemin enbüyükleme mi, enküçükleme mi olduğu belirtilir [equal to: max / min]
- Karar değişkenlerinin tanımlandığı hücreler girilir [by changing cells]

3- Çözüm ve İlgili Raporların Hazırlanması

Modeli çözümelemek için "Çöz" (Solve) seçeneğine basmak yeterlidir.



Şekil 3.33. MS Excel Çözücü (solver) Programı (Dr. Y. İlker Topcu,2002)

Bu araç menüsünde Solver programının çözüme ulaştığı, kısıtlamalar varsa kısıtlamaların ve en iyileştirme şartlarının sağlandığı bildirmekte ve elde edilen sonuçlarının mı yoksa çözüm öncesi ilk verilerin mi bırakılmak istendiği ile hangi raporlara ulaşmak istenildiği sorulmakta ve son olarak üretilen raporlar (yanıt,duyarlılık ve sınırlar) kullanıcıya sunulmaktadır (Topcu, 2002).

3.10 Brandon Yukio Tsuge'in Çalışması

Brandon Yukio Tsuge çalışmasında, Profesör Nina Robson'ın Robotik Laboratuvarında, gönüllü bir katılımcı koşu bandı üzerine yürütülmüştür. Vicon MX üç boyutlu hareket yakalama programında katılımcıların yürüme sırasında yürüme verileri kaydedilmiştir (Şekil 3.34). Deney boyunca referans eksen takımına göre ayak bileğinin geçtiği 205 nokta ile ayak bileğinin çizdiği 23 adet farklı yörünge eğrileri elde edilmiştir. Deneğe ait elde edilen 23 yörüngeye ait kartezyen koordinatları, kalça, diz açıları. Ek-A da verilmiştir.



Şekil 3.34. Yürüme verilerinin alındığı noktalar (Brandon Yukio Tsuge ,2015)

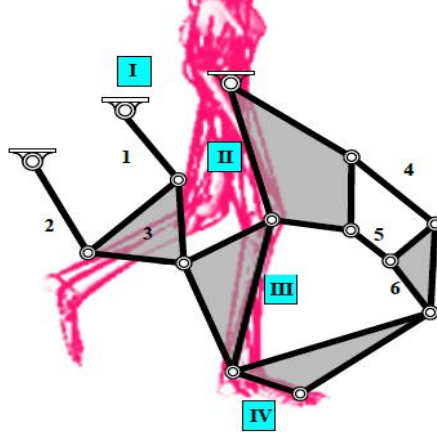
Deney sonucunda elde edilen ayak bileğine ait 205 noktadan ve 23 yörüngeden alt ve on çubuk mekanizmaları sentezleyebilmek için 1 yörünge ve bu yörüngeye ait 60 nokta seçilmiştir (Brandon, 2015). Seçilen bu noktaların koordinat değerleri (X_p, Y_p) ve kalça açısı θ_{10} , diz eklem açıları θ_{20} Çizelge-1 verilmiştir.

Çizelge 1. Seçilen 60 noktaya ait veriler (Brandon Y. Tsuge ,2015)

Nokta	X_p	Y_p	θ_{10}	θ_{20}
1	-12,301	-896,019	-1,474	-0,199
2	-28,502	-895,762	-1,493	-0,196
3	-43,491	-894,790	-1,505	-0,204
4	-57,875	-893,271	-1,513	-0,219
5	-72,230	-891,319	-1,519	-0,237
6	-85,868	-889,402	-1,527	-0,250
7	-98,601	-887,739	-1,538	-0,256
8	-111,580	-885,925	-1,550	-0,261
9	-125,994	-883,837	-1,565	-0,264
10	-141,499	-881,686	-1,585	-0,260
11	-157,736	-879,401	-1,608	-0,252
12	-174,374	-877,111	-1,635	-0,236

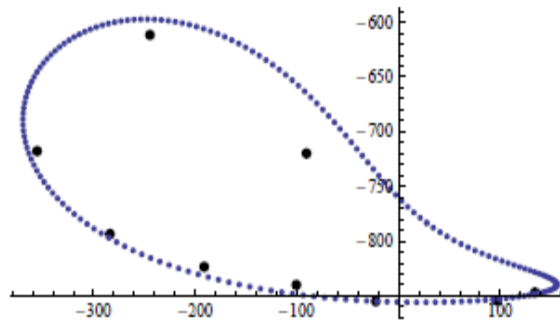
13	-191,139	-874,800	-1,667	-0,213
14	-207,465	-872,119	-1,698	-0,190
15	-223,279	-869,328	-1,731	-0,163
16	-238,762	-866,040	-1,763	-0,138
17	-254,421	-862,136	-1,791	-0,119
18	-270,165	-857,609	-1,815	-0,109
19	-286,202	-852,950	-1,848	-0,084
20	-303,278	-847,622	-1,889	-0,046
21	-321,419	-841,008	-1,916	-0,035
22	-340,361	-832,977	-1,916	-0,076
23	-359,460	-823,865	-1,915	-0,120
24	-378,044	-813,112	-1,903	-0,185
25	-395,699	-800,707	-1,886	-0,257
26	-411,249	-786,708	-1,863	-0,339
27	-423,170	-770,139	-1,825	-0,443
28	-430,681	-751,253	-1,778	-0,560
29	-432,729	-731,726	-1,726	-0,677
30	-427,766	-711,349	-1,662	-0,802
31	-415,486	-691,147	-1,589	-0,929
32	-396,802	-672,793	-1,512	-1,050
33	-374,806	-658,035	-1,437	-1,152
34	-353,679	-650,984	-1,378	-1,219
35	-332,749	-653,380	-1,334	-1,248
36	-311,995	-664,185	-1,304	-1,246
37	-286,041	-682,357	-1,275	-1,222
38	-252,920	-706,259	-1,246	-1,181
39	-213,557	-734,600	-1,221	-1,120
40	-169,259	-765,635	-1,204	-1,036
41	-120,308	-795,439	-1,193	-0,939
42	-67,642	-822,553	-1,187	-0,829
43	-13,143	-845,034	-1,188	-0,710
44	40,663	-862,223	-1,198	-0,582
45	90,537	-873,455	-1,216	-0,450
46	133,662	-879,072	-1,242	-0,319
47	167,855	-878,980	-1,257	-0,225
48	191,465	-875,240	-1,243	-0,202
49	203,915	-874,392	-1,256	-0,154
50	201,845	-876,813	-1,299	-0,081
51	184,236	-881,676	-1,365	-0,075
52	157,407	-886,006	-1,354	-0,073
53	136,079	-886,649	-1,320	-0,176
54	116,143	-884,797	-1,289	-0,270
55	95,341	-884,501	-1,289	-0,313
56	74,597	-886,229	-1,310	-0,317
57	53,853	-888,645	-1,341	-0,303
58	32,767	-890,073	-1,368	-0,297
59	11,109	-890,172	-1,389	-0,304
60	-12,301	-896,019	-1,474	-0,199

Şekil 3.35’de görüldüğü gibi deneğe ait yürüme eğrilerini elde etmek için on çubuk mekanizması kullanılmıştır. On çubuk mekanizması; iki adet dört çubuk mekanizması ve bir adet üç uzuvlu açık zincir mekanizması birleştirilmiştir (Tsuge , 2015).



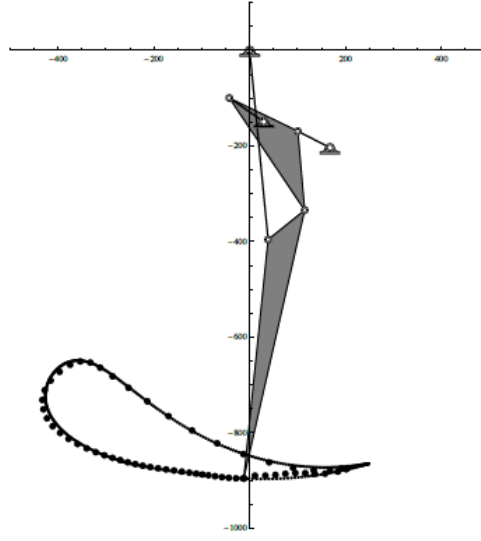
Şekil 3.35. On çubuk mekanizması (Brandon Y. Tsuge ,2015)

On çubuk mekanizması için yapılan mekanizma sentezi sonucunda her dört çubuk mekanizması için 12 denklem ve 12 bilinmeyen elde edilmiştir. Bilgisayar yardımıyla çözülen denklem takımları neticesinde deneğe ait yörüngeye en yakın eğri için, ilk dört çubuk mekanizması için 240 ikinci dört çubuk mekanizması için 228 olası çözüm bulunmuştur (Tsuge, 2015). Elde edilen çözümler içinde optimize edilmiş deneğin yürüyüşüne en yakın çözüm Şekil 3.36’de verilmiştir.



Şekil 3.36. On çubuk mekanizması için elde edilen çözüm (Brandon Y. Tsuge ,2015)

İkinci adım olarak deneğe ait seçilen yürüme verileri altı çubuk mekanizmasını sentezlemek için kullanılmıştır. Deneğe ait yürüme eğrisine yakın 2003 adet çözüm elde edilmiştir (Şekil 3.37)(Tsuge , 2015).



Şekil 3.37. Altı çubuk mekanizması ile elde edilen çözüm (Brandon Y. Tsuge ,2015)

4. MATERYAL VE METOD

4.1. Materyal

IR'ların insana en yakın benzerlik de adım atabilmesi için insana ait adım verilerini elde edilmesi gerekmektedir. Çünkü insan adımının iyi bir şekilde çözümlenmesiyle insansı robotun yürüme kinematığı ortaya çıkarılmış olur. Bu bağlamda 2R manipülatörün hareketini tanımlayan gerekli matematiksel ve fiziksel yöntemler için insan adımının yürüme verileri kullanılmalıdır.

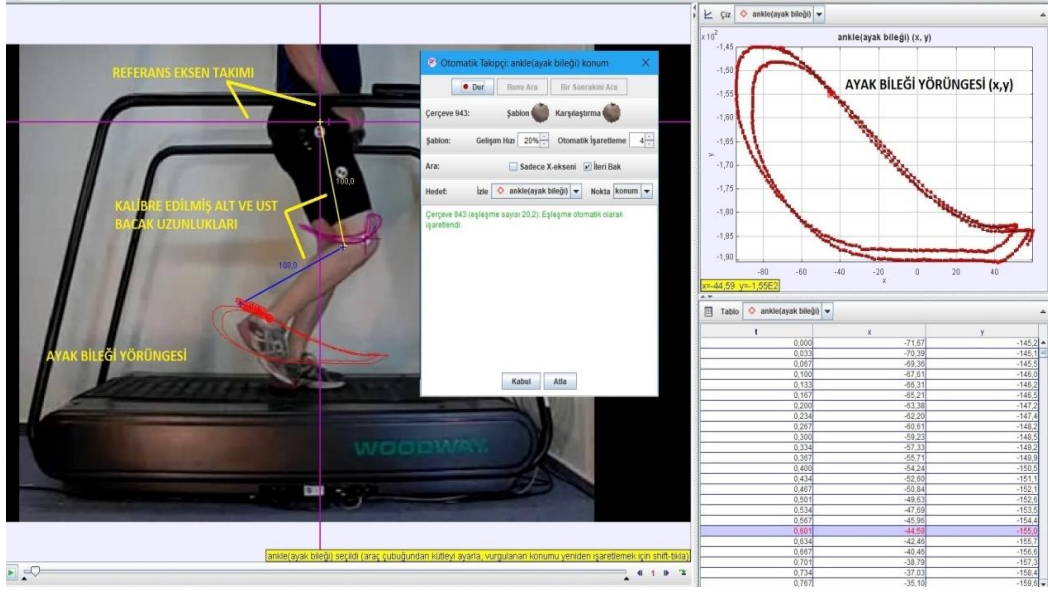
Bu çalışmanın materyali olarak kinematik yürüme verilerinin elde edildiği insan bir deneğe ait yürüme analizi sonuçları kullanılmıştır. Yapılan yürüme analizinde; deneğin yürüyüş görüntüleri bir kamera yardımıyla kaydedilmiştir. Görüntünün analizi için, Tracker video çözümleyici programı kullanılmıştır. İnsan bacağı modelinin oluşturulması ve hareket simülasyonları Working Model 2D (WM2D) programında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 2R manipülatör ile on ve altı çubuk mekanizmalarını kıyaslamak için Brandon Yukio Tsuge tarafından yazılan “Alt Ekstremitte Destekleyen Mekanizmaların Kinematik Sentezi” başlıklı doktor tezinden elde edilen bir deneğe ait yürüme verileri kullanılmıştır.

4.2. Metod

4.2.1. Yürüme analizi ile adım verilerinin elde edilmesi

Adım verilerini elde etmek için bir deneğe yürüme analizi uygulanmıştır. Yürüme analizi için, yürüme platformu üzerinde 0,89 m/s hız ve 3.2 sn süresi boyunca yürüyen bir deneğin yürüyüş görüntüsü kullanılmıştır (Şekil 4.2). Deneğin yürüyüş görüntüsü, bir kamera tarafından avi formatında kaydedilmiştir. Bu görüntü Tracker Programına aktararak, yürüme modeline bir referans eksen takımı eklenmiş ve deneğin ayak bileğine ait yürüme eğrisinin verileri kartezyen koordinat olarak elde edilmiştir. Ayrıca deneğe ait alt ve üst bacak uzunluğu Tracker programında 1 birim olarak alınmıştır.

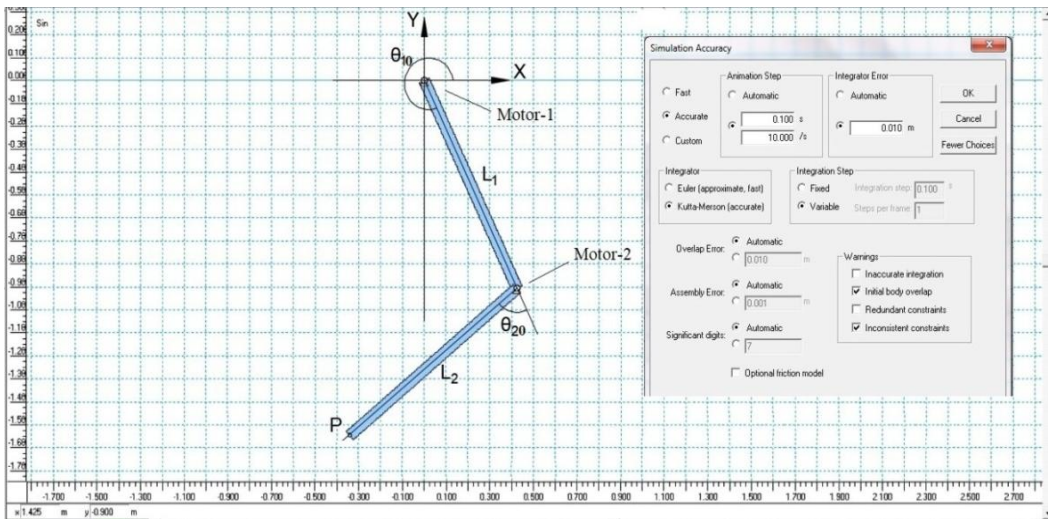
Şekil 4.1'de gösterilen resimde, Tracker programında deneğe ait ayak bileğinin çizdiği yörünge ve görüntü üzerine yerleştirilen referans eksen takımına göre ayak bileğine ait yürüme eğrisinin verileri kartezyen koordinat (x,y) olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tracker video çözümüleme programı

4.2.2. İnsan bacağına simülasyonu

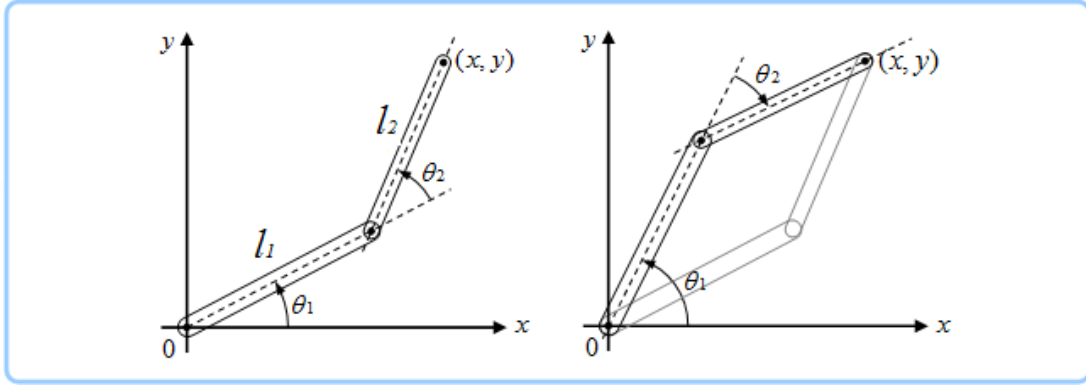
WM2D programında insan bacağı 2R manipülör olarak tasarlanmıştır. Bu modelin hareketi için, kalça ve diz mafsallarına motor yerleştirilmiştir. Şekil 4.3'de görüldüğü üzere; 2R manipülörün uzun uzunlukları $l_1=l_2=1$ birim olarak alınmıştır. Yürüme analizi sırasında deneğin yürüme analizindeki ilk başlama konumuna göre alt ve üst bacak pozisyonuna göre $\theta_{10} = 4.712$ ve $\theta_{20} = 0$ radyan olmak üzere, 2R manipülöre ait uzuvların başlangıç açılarıdır. Bu model ile Tracker programından aktarılan konum verileri kullanılarak mafsal açıları ölçülmüştür (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. WM2D Programında 2R bacak modeli

4.2.3. Parametrik denklem takımları

WM2D'de yapılan insan bacağı modelinde; manipülatör uç efektörü olarak kabul edilen P noktasının kartezyen koordinatlarını veren denklem (4.1-4.2) kullanılmıştır. Bu eşitliklerden, modelin parametrik denklemlerini elde etmek için yararlanılmıştır. Bu parametrik denklemlerde bilinmeyen, zamana bağlı açı değişimlerini veren matematiksel ifadelerin çözümü için eğri uydurma yöntemi uygulanmıştır. Bunun için Excel çözümleyici (Solver) aracı ile regresyon analizi yapılmıştır.



Şekil 4.3 2R manipülatör kinematik gösterimi

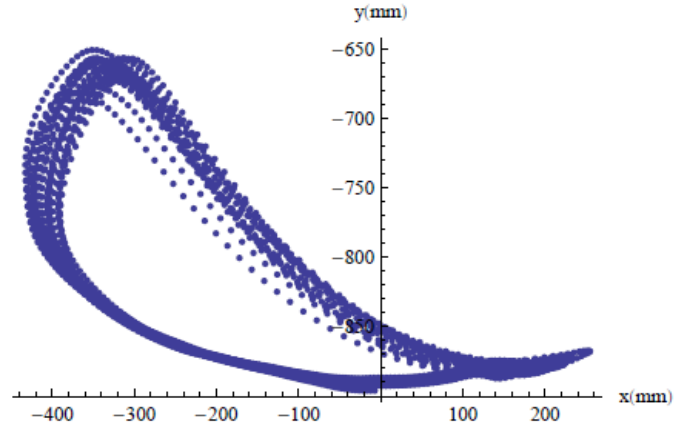
$$x_p = l_1 \cos \theta_{10} + l_2 \cos [\theta_{10} + \theta_{20}] \quad (4.1)$$

$$y_p = l_1 \sin \theta_{10} + l_2 \sin [\theta_{10} + \theta_{20}] \quad (4.2)$$

Bu denklem takımında; x_p : 2 nolu uzvun x eksenindeki koordinatını, y_p : 2 nolu uzvun uç noktasının y eksenindeki koordinatını, θ_{10} ve θ_{20} : uzuv mafsallarının başlangıç açılarını, l_1 ve l_2 uzuvların boyu göstermektedir.

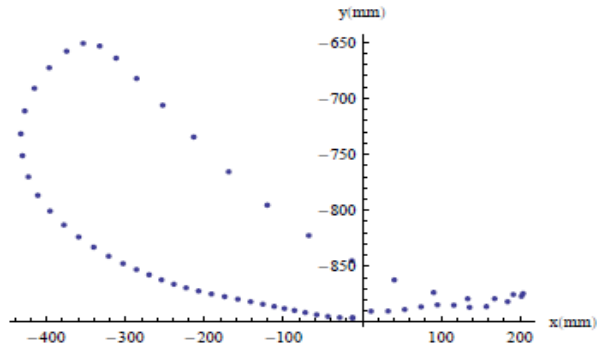
4.2.4. Brandon yukio tsuge'ın yürüme analizi

2R manipülatör ile insan bacağı yerine kullanılan alt ve on çubuk mekanizmalarıyla elde edilen yürüme eğrilerinin mukayesesi için, Brandon Yukio Tsuge tarafından yazılan “Alt Ekstremitte Destekleyen Mekanizmaların Kinematik Sentezi” başlıklı doktora tezi için yapılan deney verileri kullanılmıştır. Profesör Nina Robson’ın Robotik Laboratuvarında gönüllü bir katılımcı koşu bandı üzerine yürütülmüştür. Hareket yakalama programı yardımı ile katılımcının ayak bileğine ait 23 yörünge ve 205 nokta kaydedilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.4. Ayak bileğinin çizdiği 23 yörünge (Brandon Yukio Tsuge ,2015)

Deney sonucunda elde edilen ayak bileğine ait 205 noktadan ve 23 yörüngeden alt ve on çubuk mekanizmaları sentezleyebilmek için 1 yörünge ve bu yörüngeye ait 60 nokta seçilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.5. Seçilen noktaların çizdiği yörünge eğrisi (Brandon Y. Tsuge ,2015)

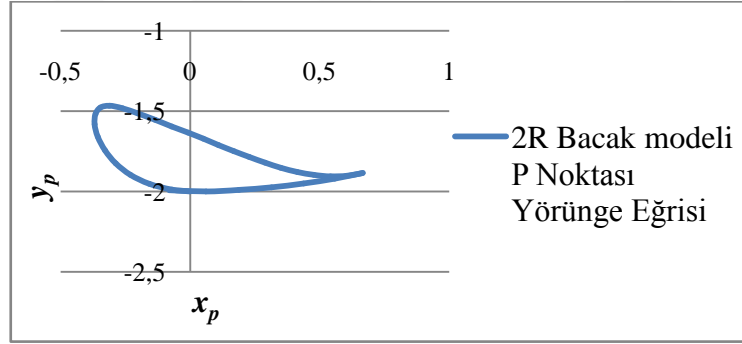
Altı ve on çubuk mekanizmalarını sentezlemek için seçilen bu deney verileri, hem 2R manipülatör ile seçilen yörüngeyi yakalamak hem de diğer mekanizmaların sentez sonuçlarını kıyaslamak için kullanılmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

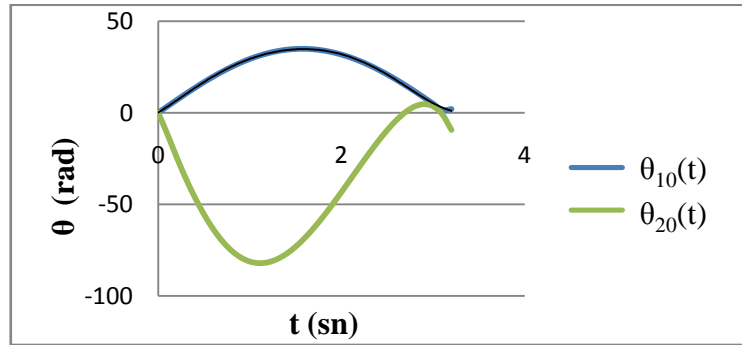
Bu bölüm İlk olarak deneğin yürüme analizi sırasında ayak bileğinin çizdiği yörünge verileri elde etmek için, yürüme analizi görüntüsü Tracker video çözümlene programına aktarılmıştır. Tracker Programından elde edilen veriler, WM2D'de oluşturulan, deneğin bacağına ait simülasyon modeline uygulanarak deneğe ait eklem açıları elde edilmiştir. İkinci adımda bulunan eklem açıları 2R manipülörün uç efektör koordinatlarını veren eşitliklerde kullanılmak üzere parametrik fonksiyon olarak bulunmuş ve bu eşitlik ile deneğe ait yürüme adım eğrileri elde edilmiştir. Son olarak ise Brandon Yukio Tsuge'nin insan bacağı olarak altı ve on çubuk mekanizmalarını kullanmak için yaptığı deneydeki yürüme eğrileri 2R manipülör kullanılarak elde edilmesi ele alınmıştır.

5.1. Eklem Açılarının Elde Edilmesi

Deneğin bileğini temsil eden P (x_p, y_p) noktasının kartezyen koordinatlarını elde etmek için, deneğin yürüyüşü avi formatında kameraya çekilerek Tracker programına aktarılmıştır. Bu veriler WM2D üzerinde oluşturulan 2R bacak modeline aktarılarak, 2R bacak modelinin P (x_p, y_p) noktasının yörünge eğrisi (Şekil 5.1) ve uzuvların zamana bağlı değişen açı eğrileri $\theta_{10}(t)$, $\theta_{20}(t)$ elde edilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.1. 2R bacak modelinin P (x_p, y_p) noktasının yörünge eğrisi



Şekil 5.2. 2R bacak modelinin uzuvlarının zamana bağlı değişen açı eğrileri

2R bacak modelinin P (x_p , y_p) noktasının yörünge değerleri ve uzunlukların zamana bağlı değişen $\theta_{10}(t)$, $\theta_{20}(t)$ 'ye ait açı değerler ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. 2R Bacak modelinin P noktasının yörünge verileri

t	x_p	y_p	$\theta_{10}(t)$	$\theta_{20}(t)$
0	0	-2	0	0
0,1	-0,071	-1,989	3,494	-11,688
0,2	-0,158	-1,953	6,953	-24,161
0,3	-0,231	-1,896	10,343	-35,717
0,4	-0,288	-1,824	13,630	-46,210
0,5	-0,329	-1,744	16,780	-55,510
0,6	-0,357	-1,66	19,762	-63,504
0,7	-0,369	-1,582	22,548	-70,111
0,8	-0,366	-1,518	25,107	-75,276
0,9	-0,347	-1,477	27,416	-78,981
1	-0,312	-1,466	29,451	-81,235
1,1	-0,262	-1,481	31,192	-82,081
1,2	-0,202	-1,514	32,621	-81,585
1,3	-0,136	-1,554	33,725	-79,841
1,4	-0,071	-1,595	34,491	-76,957
1,5	-0,009	-1,634	34,912	-73,059
1,6	0,051	-1,672	34,985	-68,282
1,7	0,109	-1,71	34,708	-62,766
1,8	0,168	-1,748	34,085	-56,654
1,9	0,228	-1,785	33,121	-50,090
2	0,289	-1,821	31,825	-43,217
2,1	0,35	-1,852	30,212	-36,177
2,2	0,413	-1,879	28,297	-29,115
2,3	0,477	-1,897	26,100	-22,183
2,4	0,541	-1,906	23,641	-15,549
2,5	0,604	-1,903	20,947	-9,404
2,6	0,666	-1,885	18,043	-3,979
2,7	0,557	-1,92	14,958	0,440
2,8	0,438	-1,951	11,725	3,494
2,9	0,314	-1,975	8,374	4,718
3	0,188	-1,991	4,939	3,522
3,1	0,061	-1,999	1,455	-0,851
3,2	-0,081	-1,993	2,043	-9,359

5.2. Parametrik Denklemlerin Elde Edilmesi

Manipülator uç efektörü olarak kabul edilen P noktasının kartezyen koordinatlarını veren denklem 4.1 ve 4.2 aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$x_p(t) = l_1 \cos(\theta_{10} + \theta_{10}(t)) + l_2 \cos[\theta_{10} + \theta_{20} + \theta_{10}(t) + \theta_{20}(t)] \quad (5.1)$$

$$y_p(t) = l_1 \sin(\theta_{10} + \theta_1(t)) + l_2 \sin[\theta_{10} + \theta_{20} + \theta_{10}(t) + \theta_{20}(t)] \quad (5.2)$$

Bu denklemlerde, 2R modelinin uzuv açıları $\theta_{10}(t)$ ve $\theta_{20}(t)$ zamana bağlı değişmektedir. Bu açılar zaman bağlı değişimine göre trigonometrik ve polinom formunda denklem 5.3 - 5.4'deki gibi yazılabilir.

$$\theta_{10}(t) = \frac{A}{\sin(Bt + \emptyset)} \quad (5.3)$$

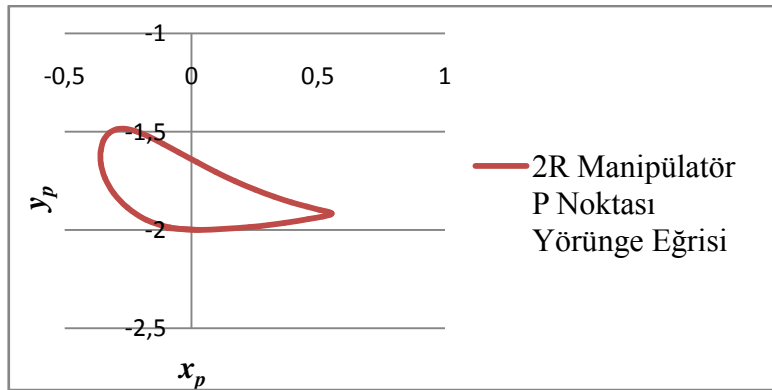
$$\theta_{20}(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 + a_6t^6 + a_7t^7 + a_8t^8 \quad (5.4)$$

Bu eşitliklerdeki bilinmeyen sabit katsayıları belirlemek için Çizelge 1'i oluşturan veriler kullanılmış ve eğri uydurma (Curve Fitting) yöntemi uygulanmıştır. Regresyon analizinde, yineleme adım sayısı olarak 100, duyarlık 0,000001, yakınsama 0,0001 seçilmiş ve analiz sonucu her iki analizin sonucu olarak $R^2=0.999$ bulunmuştur. Regresyon sonuçları Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3.Regresyon sonuçları

a_0	1.556
a_1	-135.84
a_2	31.821
a_3	20.241
a_4	13.089
a_5	-16.937
a_6	5.447
a_7	-0.612
A	35
B	1
\emptyset	0

(5.3) ve (5.4) numaralı denklemler, regresyon sonuçlarına göre düzenlenmiş ve bu denklemler kullanılarak 2R manipülatöre ait yörünge eğrileri çizilmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. 2R manipülatör P (x_p, y_p) noktasının yörünge eğrisi

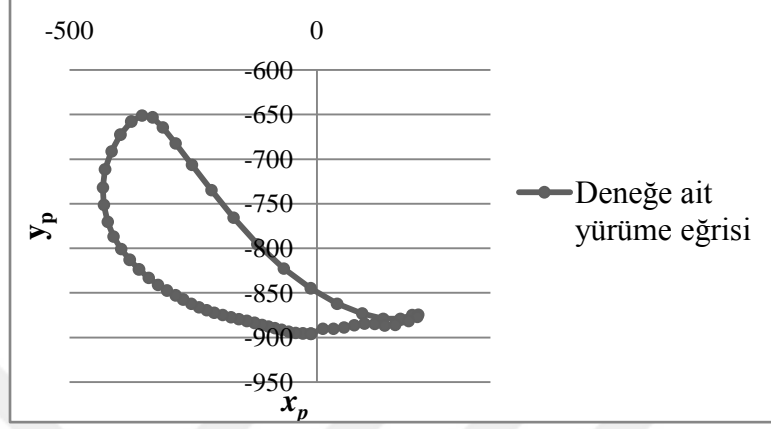
$\theta_{10}(t)$ ve $\theta_{20}(t)$ denklemleri zamana bağılı değişimi ve bu denklemlerin (5.1) ve (5.2) deki denklemlere uygulanması sonucunda elde edilen değerler izelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 4. Regresyon fonksiyonları zamana bağılı aldığı değerler

t	x_p	y_p
0	0,022	-2,000
0,1	-0,086	-1,988
0,2	-0,179	-1,948
0,3	-0,254	-1,887
0,4	-0,307	-1,814
0,5	-0,341	-1,737
0,6	-0,358	-1,663
0,7	-0,358	-1,598
0,8	-0,347	-1,545
0,9	-0,327	-1,509
1	-0,298	-1,489
1,1	-0,262	-1,486
1,2	-0,219	-1,498
1,3	-0,169	-1,525
1,4	-0,113	-1,562
1,5	-0,049	-1,606
1,6	0,020	-1,655
1,7	0,095	-1,705
1,8	0,172	-1,752
1,9	0,250	-1,795
2	0,325	-1,831
2,1	0,395	-1,860
2,2	0,455	-1,882
2,3	0,504	-1,897
2,4	0,537	-1,907
2,5	0,553	-1,915
2,6	0,548	-1,922
2,7	0,519	-1,932
2,8	0,461	-1,945
2,9	0,368	-1,964
3	0,229	-1,986
3,1	0,031	-2,000
3,2	-0,096	-1,991

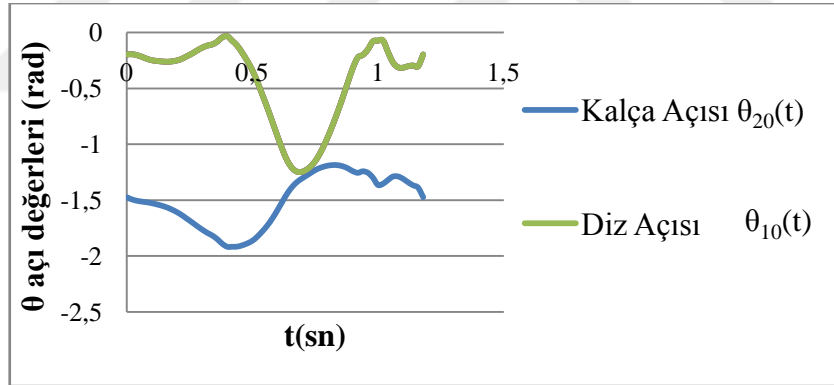
5.3 Brandon Yukio tsuge'ın Yürüme Analizi Verileri

Brandon Yukio Tsuge yaptığı çalışmada, yürüme analizi sonucunda elde edilen ayak bileğine ait 205 nokta ve 23 yörüngeden alt ve on çubuk mekanizmaları sentezleyebilmek için 1 yörünge ve bu yörüngeye ait 60 nokta seçilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Seçilen noktaların çizdiği yörünge (Brandon Y. Tsuge ,2015)

Ayrıca seçilen yörüngeye ait $\theta_{10}(t)$ ve $\theta_{20}(t)$ zamana bağlı açı değişimleri ise, seçilen yörüngeyi oluşturan noktalardaki deneğe ait kalça ve diz açılarıdır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Seçilen noktalara ait kalça ve diz açıları (Brandon Y. Tsuge ,2015)

Seçilen yörüngeyi 2R manipülör ile elde etmek için denklem (5.1) ve (5.2) kullanılmıştır. Bu denklemler için gerek olan manipülörün uzuv uzunlukları, deneğin alt ve üst bacak uzunluklarına eşit $l_1=397,9 \text{ mm}$ ve $l_2 =502,6 \text{ mm}$ olarak alınmıştır. Şekil 5.5'de verilen deneğe ait zaman bağlı değişen eklem açıları (5.1) ve (5.2) denklemlerinde kullanılmak üzere polinom formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\theta_{10}(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 + a_6t^6 + a_7t^7 + a_8t^8 + a_9t^9 \quad (5.5)$$

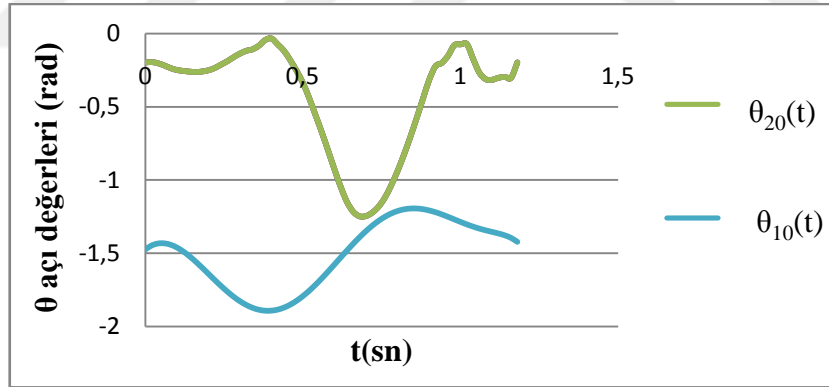
$$\theta_{20}(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5 + b_6t^6 + b_7t^7 + b_8t^8 + b_9t^9 \quad (5.6)$$

Bu eşitliklerdeki bilinmeyen sabit katsayıları belirlemek için Şekil 5.5'deki veriler kullanılmış ve eğri uydurma (Curve Fitting) yöntemi uygulanmıştır. Regresyon analizinde, yineleme adım sayısı olarak 100, duyarlılık 0,000001, yakınsama 0,0001 seçilmiş ve analiz sonucu $R^2_{\theta_{10}(t)} = 0,999$ ve $R^2_{\theta_{20}(t)} = 0,962$ bulunmuştur. Regresyon sonuçları Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. Regresyon sonuçları

a_0	-1,4737	b_0	-0,001
a_1	1,702	b_1	0,995
a_2	-18,462	b_2	-0,025
a_3	23,329	b_3	-0,047
a_4	45,064	b_4	-0,018
a_5	-91,243	b_5	0,024
a_6	30,464	b_6	-0,002
a_7	10,192	b_7	-0,032
a_8	6,066	b_8	-0,015
a_9	-6,925	b_9	0

Regresyon sonuçlarına göre düzenlenmiş $\theta_{10}(t)$ ve $\theta_{20}(t)$ zamana bağlı açı değişimleri Şekil 5.6'daki gibi verilmiştir.



Şekil 5.6. $\theta_{10}(t)$ ve $\theta_{20}(t)$ zamana bağlı açı değişimleri

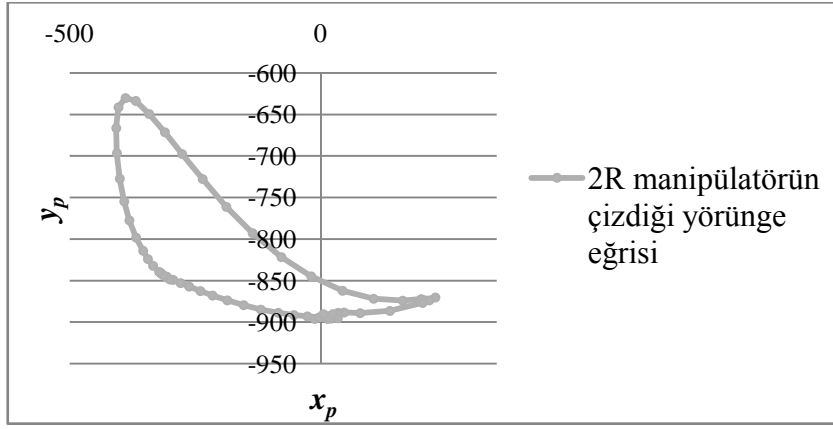
$\theta_{10}(t)$ ve $\theta_{20}(t)$ zamana bağlı açı değişimleri (5.1) ve (5.2) deki denklemlere uygulanması sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6'de verilmiştir.

Çizelge 6 2R manipülatörün çizdiği yörünge verileri

Nokta Sayısı	x_n	y_n
1	-12,2907	-896,045
2	13,06707	-896,148
3	20,80583	-895,634
4	14,23641	-895,058
5	-3,41576	-894,259
6	-26,8615	-893,16

7	-53,6954	-891,606
8	-85,2592	-888,867
9	-119,647	-884,742
10	-153,598	-879,684
11	-186,333	-873,818
12	-215,547	-867,938
13	-239,879	-862,736
14	-262,241	-857,27
15	-279,169	-853,052
16	-293,91	-848,941
17	-306,561	-845,032
18	-318,18	-841,007
19	-317,834	-841,704
20	-305,291	-846,925
21	-300,156	-848,856
22	-313,159	-843,608
23	-321,803	-839,32
24	-334,018	-832,194
25	-344,464	-824,074
26	-353,999	-814,102
27	-367,737	-798,124
28	-381,589	-777,373
29	-391,49	-754,631
30	-400,248	-727,226
31	-406,293	-696,594
32	-407,616	-666,295
33	-402,774	-641,328
34	-389,299	-630,369
35	-368,612	-633,848
36	-341,761	-649,394
37	-310,737	-671,514
38	-275,974	-697,618
39	-235,757	-727,796
40	-188,167	-761,221
41	-135,969	-792,932
42	-79,0219	-821,569
43	-19,176	-844,959
44	43,14219	-862,128
45	104,9996	-871,859
46	162,8347	-874,165
47	199,5047	-872,368
48	197,8633	-873,844
49	207,4831	-873,581
50	227,9897	-870,408
51	215,6677	-873,649
52	201,9886	-876,945
53	137,2792	-886,494
54	78,05918	-888,991
55	46,12814	-888,452
56	34,84091	-888,702
57	32,09966	-889,718
58	23,94561	-890,38
59	4,945169	-890,25
60	33,67262	-895,497

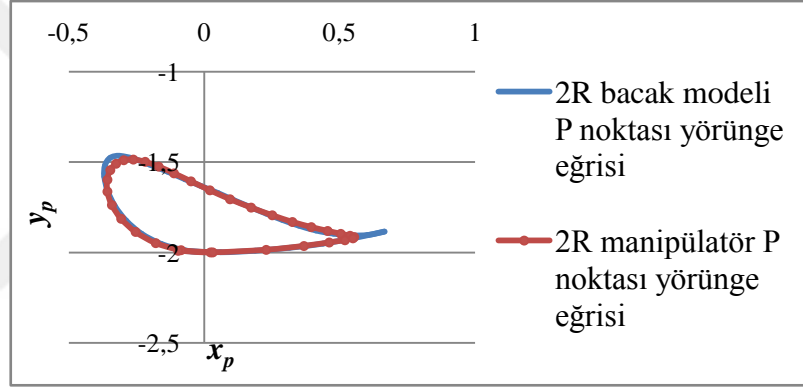
(5.5) ve (5.6) numaralı denklemler, regresyon sonuçlarına göre düzenlenmiş ve bu denklemler kullanılarak 2R manipulatöre ait yörünge eğrileri çizilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. 2R manipulatörün çizdiği yörünge eğrisi

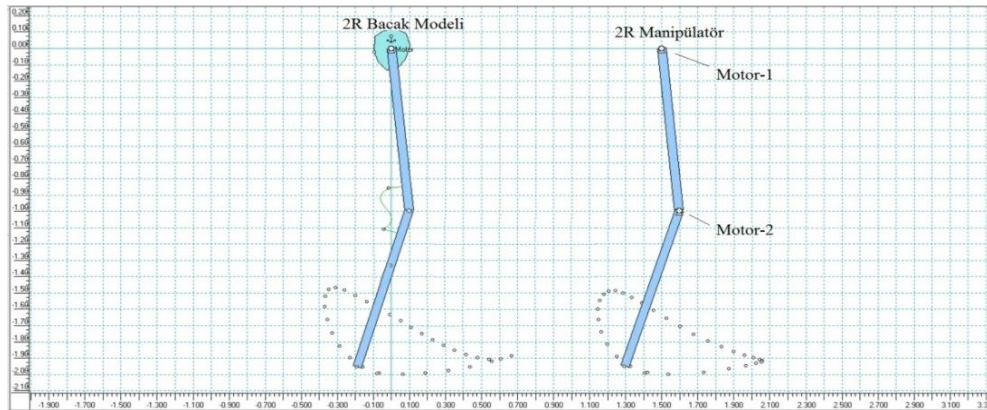
6. SONUÇLAR

Bu çalışma dört temel aşama ile oluşturulmuştur. Bir deneğe ait yürüme videosu kullanılarak yürüme eğrisi elde edilmiş, bu veriler WM2D hareket simülasyon programında oluşturulan 2R bacak modeline aktararak, deneysel verilerden elde edilemeyen zamana bağlı açı değişimleri elde edilmiştir. Açı değişim verileri, deneğin yürüyüş hareketini 2R manipülator kullanarak tanımlamak amacıyla oluşturulmuş parametrik denklem takımındaki bilinmeyen sabit katsayıların çözümü için kullanılmış ve modelin başarısını gösteren R^2 değeri 0.999 bulunmuştur. Deneğin bileğini temsil eden P (x_p, y_p) noktasının kartezyen koordinatlarının oluşturduğu eğri ile 2R manipülator uç efektörü olan P noktasının kartezyen koordinatlarını veren eşitlik (5.1) ve (5.2) ile elde edilmiştir. Deneysel ve hesap yoluyla elde edilen yürüme yörüngeleri Şekil 6.1'de verilmiştir.



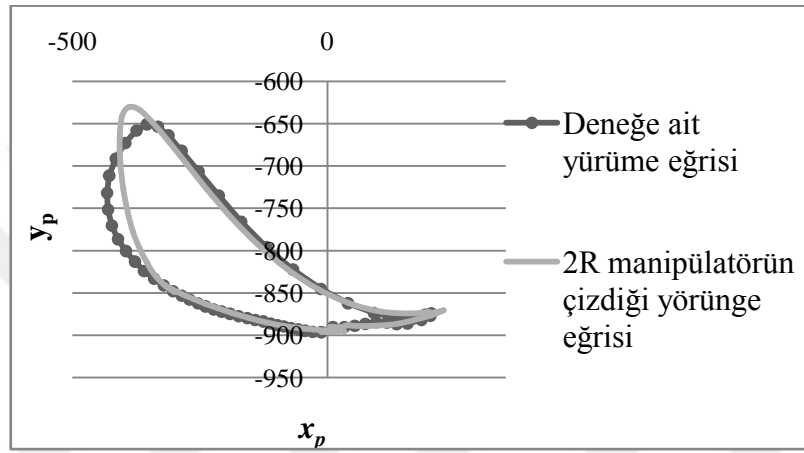
Şekil 6.1. 2R Manipülator ve 2R Bacak Modeli P (x_p, y_p) Noktasının Yörünge Eğrisi

Kullanılan deneysel adım verileri ve manipülatorü ait matematiksel eşitlikler kullanılarak WM2D programında iki özdeş 2R modeli ile hareket simülasyonları gerçekleştirilmiş ve özdeş iki yörünge eğrisi elde edilmiştir. Bunun için eşitlik (5) ve (6) 2R manipülatorü ait 1 ve 2 numaralı motorlara uygulanmıştır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. 2R Manipülator ve 2R Bacak Modeli WM2D'deki P Yörünge Eğrileri

Brandon Yukio Tsuge'nın çalışmasındaki yapılan yürüme deneyi sonucunda elde edilen deneğin bileğini temsil eden P (x_p , y_p) kartezyen koordinatlarının oluşturduğu eğri ile 2R manipülatör uç efektörü olan P noktasının kartezyen koordinatlarını veren eşitlik (5.1) ve (5.2) ile elde edilmiştir. Deneysel ve hesap yoluyla elde edilen yürüme yörüngeleri Şekil 6.3'de verilmiştir. Brandon Yukio Tsuge yaptığı çalışmada; yürüme analizi ile elde ettiği deney sonuçlarını altı ve on çubuk mekanizmalarına uygulamış elde ettiği en iyi sonuçlar Şekil 3.36 ve Şekil 3.37de verilmiştir. Şekil 6.3'de görüldüğü üzere 2R manipülatörün kullanarak deneğe ait en yakın yürüme eğrisinin elde edilmiştir.



Şekil 6.3. Deneğe ait yürüme eğrisi ve 2R manipülatörün çizdiği yörünge eğrisi

KAYNAKLAR

- Akgün, F., 2018. Doğrusal Olmayan Regresyon Model Parametrelerinin Nokta ve Aralık Tahmini için Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İstatistik Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi.
- Alhajj, A. S. M., 2011., Portilla-Flores ve ark. 2013. Path Synthesis of Four-Bar Mechanism Using Harmony Search Optimization, Yüksek lisans tezi, National Institute of Technology Rourkela, Rourkela-India.
- Asada, H. And SLOTINE, J-J E., 1986. Robot Analysis and Control, Wiley, New York.
- Aytan E., 2007. İki Eksenli Robot Kolunun Genetik Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, sf 157.
- Bingül Z., Küçük, S., 2005. Robot Tekniği-I, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Bulatović, R. R., and Đorđević, S. R., 2004. Optimal Synthesis of a Four-Bar Linkage by Method of Controlled Deviation, Theoretical and Applied Mechanics, 31(3-4), 265- 280.
- Craig, J., 2005. Introduction to Robotics Mechanics and Control, pp 1-7, Prentice Hall.
- Çolak, M, Mermertaş, V., 2003. Mekanizmalarda Yörünge Sentezi, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Erdemir, A., 2015. Ağır Bir Vasıtanın Çok Akslı Direksiyon Mekanizmasının Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Ernest J. C., Ian E. B., 2000. Virtual muscle a Computational Approach to Understanding the Effects of Muscle Properties on Motor Control, Department of Biomedical Engineering, University of Southern California.
- Esin M. 2008. Bilgisayar Bütünleşik Üretim Ders Notları, Endüstri Mühendisliği, Okan Üniversitesi.
- Fu K, Gonzalez R and Lee C.S.G., 1987. Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill.
- GÖK, A.C.,2010. İşletmelerin Tahminleme Sürecinde Bulanık Doğrusal Regresyon Analizi ve Lojistik Regresyon Analizinin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, İşletme Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Güzel, M. S. 2008. Altı Eksenli Robot Kolun Hareketsel Karakteristiğinin Görsel Programlanması ve Gerçek Zamanlı Uygulamalar. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi.
- Hartenberg, R. S. and Denavit, J., 1964. Kinematic Synthesis of Linkages, McGraw-Hill, Department of Mechanical Engineering and Astronautical Sciences Northwestern University, Evanston-Illinois-USA, 148-368.

- Havusoğlu H., 2014. Robot Kol Tasarımı, Kinematik Analizi ve Etkileşimli Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Anabilim Dalı, İzmir, 63 sf.
- Hernández-Santos, C., et al., 2012. Kinematics and Dynamics of a New 16 DOF Humanoid Biped Robot with Active Toe Joint. *International Journal of Advanced Robotic Systems*.
- Hirose, M., Ogawa K., 2007. Honda humanoid robots development. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 365(1850): p. 11-19.
- Hooke, R., and Jeeves, T. A., 1961. "Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems, *Journal of the ACM (JACM)*, 8(2), 212-229.
- Houglum, P.A. and Bertoti, D.B., 2011. *Brunnstrom's Clinical Kinesiology*. 2011: FA Davis.
- Huang, Q., Nakamura, Y. and Inamura. T., 2001. Humanoids walk with feedforward dynamic pattern and feedback sensory reflection. in *Robotics and Automation, Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*. 2001. IEEE.
- Katipoğlu G. 2013. Üç Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Pozisyon Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, sf. 41.
- Khálau, Joaquim Jorge Da C., 2017. Doğrusal Regresyonda Bozulma Noktasına Sahip Tahminler, Yüksek Lisans, İstatistik Bölümü, Hacettepe Üniversitesi.
- Kurfess, T. R. (Ed). 2005. *Robotics and automation handbook*. USA: CRC Press.
- Lapeyre, M., Rouanet, P., Oudeyer ,Y.,2013. The Poppy Humanoid Robot: Leg Design for Biped Locomotion. in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE.
- Lim, H., 2007. Biped walking robots created at Waseda University,WL and WABIAN family. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.
- Lohmeier, S., 2009. Humanoid Robot LOLA—Research Platform for High-SpeedWalking, in *Motion and Vibration Control*, Springer. p. 221-230.
- McGeer, T., 1990. Passive walking with knees. in *Robotics and Automation, Proceedings*., 1990 IEEE International Conference on. 1990. IEEE.
- Megep.,2009. Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri, Kapalı Çevrim Kontrolü.
- Mikkelsen, J. 1998. A Machine Vision System Controlling a Lynxarm Robot along a Path , University of Cape Town, South Africa.
- Nelson, G., 2012. Petman: A Humanoid Robot for Testing Chemical Protective Clothing. *日本ロボット学会誌*, 30(4): p. 372-377.

- Nordin, M., Ozkaya N, 1999., Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion, and Deformation, *Springer-Verlag*, New York.
- Ozkaya N, 1999., Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion, and Deformation, *Springer-Verlag*, New York.
- Özgören, M. K. 2002. Topological analysis of 6-joint serial manipulators and their IK solutions, *Mechanism and Machine Theory*, 7 p.511-547.
- Özhan , B., 2014. Kas Mekaniği Dersi Notları, Biyomekanik Bölümü, Celal Bayar Üniversitesi <https://slideplayer.biz.tr/slide/1958545/>
- Özmanevra, R., 2015. Farklı Materyal Kullanılarak Yapılan Tabanlıkların Yürümenin Kinetik ve Kinematik Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Uzmanlık Tezi, Tıp Fakültesi, Ortopedi ve Travmatoloji Anabilim Dalı, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Paul R. P. , 1981. Robot Manipulators, Mathematics , Programming and Control, MIT Press.
- Sarıyıldız, E., 2016. İnsansı Robotların Tüm Vücut Kinematik ve Dinamik Modellenmesi ve Kontrolü, Doktor Tezi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Saygılı Ç., 2006., Scara Tipi Bir robotun Tasarımı ve Animasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Anabilim Dalı, Konya, 150 sf.
- Sciavicco L., Siciliano B., 1996. Modeling and Control of Robot Manipulators, McGraw-Hill International Publications.
- Shieh, W.B., 1996. Design and Optimization of Planar Leg Mechanisms Featuring Symmetrical Foot-Point Paths, Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, Maryland.
- Şeker, A., Talmaç, M.A., Sarıkaya İ., 2014. Yürüme biyomekaniği , Biomechanics of the Gait, Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği, TOTBİD Dergisi, 2014; 13:314–324
- Takanishi, A., 2007. Biped walking robots created at Waseda University,WL and WABIAN family. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences
- Tatar A.B., 2015. Dört Ayaklı Bir Robotun Dinamik Analizi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, 73 sf.
- Tez, T., 2017. İki Ayaklı Yürüyen Robot Dinamiğinin Deneysel ve Teorik Araştırılması, Doktor Tezi, Makine Mühendisliği, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Tonbul, T.S, Sarıtaş S., 2003. Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar ve Yörünge Planlaması.

- Topcu, Y.İ., 2002 Microsoft Excel Solver Programı Ders Notları, Erişim tarihi: 17 Şub 2002, URL;<http://web.itu.edu.tr/topcuil/ya/Solver.doc>
- Tracker, 2016. Tracker Video Analysis and Modeling Tool. 2016 [cited 2016 10.10.2016]; Erişim yeri: <http://physlets.org/tracker/>.
- Tsuge Y.B., 2015. Kinematics Synthesis of Lower Limb Supporting Linkages, Doctor OF Philosophy, Mechanical and Aerospace Engineering, University of California.
- Vujić, D., and Radojković, S., 2000. Synthesis Procedure of Planar Bar Linkages in Infinitesimally Close Position, Facta Univeritatis Series: Mechanical Engineering, 1(7), 835-848.
- Vukobratovic, M. and Juricic, D., 1969. Contribution to the synthesis of biped gait. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, p. 1-6
- Whittle, M.W., 2014. Gait analysis: an Introduction, *Butterworth-Heinemann*, Oxford, UK.
- Yeşiloğlu, S. M. 2007. High Performance Dynamical Modeling of Complex Topology Systems, PhD Thesis, Mechanical Engineering, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Yılmaz D., 2010. Bir Robot Kolunun Bilgisayar Destekli Kinematik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 72 sf.
- Yiğit, S. 2013. Paralel Manipülatörlerin Uzaysal Vektör Cebri Yöntemiyle Kinematik Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi
- Zajac FE, Neptune RR, Kautz SA., 2002. Biomechanics and Muscle Coordination of Human Walking. Part I: Introduction to Concepts, Power Transfer, Dynamics and Simulations. *Gait Posture* 2002;16(3):215–32

EK-A

Nokta	X_n	Y_n	θ_{10}	θ_{20}
1	-7,431	-896,047	171,885	-883,947
2	-12,321	-896,014	167,107	-884,926
3	-17,093	-896,008	162,477	-885,852
4	-21,771	-895,973	157,926	-886,638
5	-26,368	-895,858	153,443	-887,325
6	-30,873	-895,662	149,016	-887,902
7	-35,266	-895,417	144,720	-888,393
8	-39,538	-895,123	140,583	-888,854
9	-43,708	-894,777	136,557	-889,320
10	-47,840	-894,403	132,534	-889,641
11	-51,985	-893,989	128,399	-889,672
12	-56,129	-893,507	124,190	-889,550
13	-60,251	-892,957	120,067	-889,571
14	-64,380	-892,371	116,043	-889,763
15	-68,529	-891,802	112,038	-889,937
16	-72,659	-891,267	108,006	-889,953
17	-76,718	-890,712	103,952	-889,819
18	-80,658	-890,122	99,964	-889,651
19	-84,478	-889,571	96,127	-889,554
20	-88,215	-889,108	92,403	-889,472
21	-91,900	-888,677	88,701	-889,297
22	-95,538	-888,199	84,998	-889,049
23	-99,151	-887,657	81,322	-888,831
24	-102,777	-887,113	77,640	-888,654
25	-106,470	-886,610	73,896	-888,490
26	-110,294	-886,104	70,045	-888,301
27	-114,261	-885,555	66,033	-888,022
28	-118,349	-884,970	61,870	-887,632
29	-122,555	-884,347	57,629	-887,226
30	-126,863	-883,704	53,348	-886,884
31	-131,249	-883,083	48,984	-886,567
32	-135,716	-882,476	44,484	-886,167
33	-140,252	-881,862	39,875	-885,681
34	-144,839	-881,222	35,245	-885,222
35	-149,483	-880,558	30,625	-884,832
36	-154,188	-879,895	25,934	-884,431
37	-158,944	-879,233	21,144	-884,010
38	-163,717	-878,570	16,313	-883,622
39	-168,499	-877,906	11,458	-883,242
40	-173,306	-877,251	6,578	-882,814
41	-178,141	-876,612	1,691	-882,326
42	-182,988	-875,963	-3,179	-881,819
43	-187,814	-875,292	-8,008	-881,379
44	-192,602	-874,588	-12,788	-881,012
45	-197,346	-873,840	-17,571	-880,613
46	-202,045	-873,044	-22,394	-880,129
47	-206,690	-872,250	-27,196	-879,649
48	-211,290	-871,469	-31,909	-879,270
49	-215,854	-870,691	-36,541	-878,995

50	-220,392	-869,886	-41,148	-878,756
51	-224,878	-869,025	-45,762	-878,485
52	-229,318	-868,095	-50,361	-878,217
53	-233,758	-867,136	-54,928	-878,024
54	-238,228	-866,167	-59,513	-877,883
55	-242,713	-865,145	-64,174	-877,735
56	-247,206	-864,051	-68,931	-877,568
57	-251,730	-862,876	-73,757	-877,398
58	-256,267	-861,632	-78,587	-877,258
59	-260,791	-860,344	-83,383	-877,172
60	-265,318	-859,027	-88,176	-877,142
61	-269,854	-857,703	-93,010	-877,163
62	-274,409	-856,358	-97,928	-877,223
63	-279,005	-854,997	-102,937	-877,339
64	-283,649	-853,671	-108,007	-877,542
65	-288,350	-852,347	-113,148	-877,813
66	-293,155	-850,920	-118,432	-878,078
67	-298,111	-849,351	-123,900	-878,269
68	-303,182	-847,662	-129,515	-878,390
69	-308,309	-845,905	-135,228	-878,525
70	-313,491	-844,060	-141,066	-878,661
71	-318,775	-842,077	-147,074	-878,746
72	-324,147	-839,916	-153,247	-878,807
73	-329,572	-837,624	-159,566	-878,891
74	-335,043	-835,294	-166,044	-878,987
75	-340,546	-832,912	-172,657	-879,103
76	-346,063	-830,424	-179,348	-879,293
77	-351,578	-827,811	-186,103	-879,527
78	-357,064	-825,104	-192,922	-879,714
79	-362,506	-822,304	-199,748	-879,811
80	-367,898	-819,355	-206,551	-879,826
81	-373,228	-816,187	-213,378	-879,778
82	-378,499	-812,841	-220,288	-879,711
83	-383,708	-809,397	-227,271	-879,650
84	-388,832	-805,843	-234,261	-879,568
85	-393,825	-802,182	-241,198	-879,454
86	-398,653	-798,413	-248,099	-879,301
87	-403,294	-794,511	-254,942	-879,096
88	-407,720	-790,433	-261,647	-878,767
89	-411,844	-786,151	-268,129	-878,333
90	-415,635	-781,648	-274,433	-877,752
91	-419,110	-776,914	-280,640	-876,914
92	-422,250	-771,926	-286,711	-875,838
93	-425,022	-766,693	-292,553	-874,589
94	-427,417	-761,275	-298,135	-873,196
95	-429,426	-755,762	-303,511	-871,698
96	-431,020	-750,220	-308,744	-870,133
97	-432,153	-744,680	-313,822	-868,556
98	-432,791	-739,092	-318,663	-866,972
99	-432,902	-733,399	-323,166	-865,267
100	-432,433	-727,614	-327,228	-863,391
101	-431,343	-721,770	-330,822	-861,401
102	-429,609	-715,879	-334,014	-859,278
103	-427,251	-709,939	-336,827	-857,049

104	-424,310	-704,014	-339,221	-854,701
105	-420,787	-698,183	-341,141	-852,239
106	-416,652	-692,464	-342,523	-849,681
107	-411,928	-686,871	-343,327	-847,070
108	-406,702	-681,440	-343,632	-844,488
109	-401,071	-676,254	-343,557	-841,992
110	-395,099	-671,367	-343,132	-839,613
111	-388,853	-666,759	-342,401	-837,373
112	-382,430	-662,451	-341,372	-835,189
113	-375,971	-658,579	-339,739	-832,873
114	-369,654	-655,348	-336,823	-830,512
115	-363,552	-652,925	-332,084	-828,452
116	-357,604	-651,392	-325,286	-826,895
117	-351,674	-650,712	-316,546	-825,880
118	-345,651	-650,788	-306,300	-825,286
119	-339,565	-651,558	-295,051	-824,953
120	-333,535	-653,011	-283,114	-824,842
121	-327,636	-655,170	-270,589	-824,911
122	-321,810	-658,052	-257,521	-825,064
123	-315,870	-661,613	-243,954	-825,339
124	-309,562	-665,783	-229,979	-825,758
125	-302,672	-670,534	-215,740	-826,453
126	-295,100	-675,865	-201,394	-827,704
127	-286,862	-681,752	-187,024	-829,654
128	-278,045	-688,138	-172,538	-832,170
129	-268,701	-694,928	-157,744	-834,998
130	-258,804	-702,058	-142,477	-837,956
131	-248,327	-709,541	-126,629	-840,933
132	-237,311	-717,400	-110,229	-843,838
133	-225,851	-725,642	-93,384	-846,608
134	-214,027	-734,253	-76,275	-849,263
135	-201,830	-743,162	-59,080	-851,943
136	-189,207	-752,202	-41,881	-854,785
137	-176,133	-761,168	-24,699	-857,760
138	-162,646	-769,966	-7,508	-860,643
139	-148,794	-778,627	9,801	-863,152
140	-134,615	-787,196	27,030	-865,138
141	-120,115	-795,619	45,023	-866,710
142	-105,280	-803,807	62,850	-868,050
143	-90,128	-811,704	80,551	-869,282
144	-74,750	-819,276	98,040	-870,442
145	-59,231	-826,472	115,344	-871,477
146	-43,587	-833,264	132,554	-872,360
147	-27,841	-839,610	149,728	-873,093
148	-12,065	-845,494	166,747	-873,479
149	3,649	-850,923	183,444	-873,338
150	19,221	-855,942	199,780	-872,762
151	34,560	-860,565	215,716	-871,854
152	49,600	-864,699	231,095	-870,533
153	64,272	-868,242	245,877	-868,826
154	78,495	-871,234	260,074	-866,902
155	92,227	-873,802	273,631	-864,847
156	105,427	-875,999	286,455	-862,813
157	117,961	-877,691	298,534	-860,967

158	129,762	-878,852	309,834	-859,420
159	140,828	-879,539	320,342	-858,230
160	151,157	-879,788	330,158	-857,354
161	160,712	-879,576	339,350	-856,771
162	169,420	-878,904	347,885	-856,421
163	177,207	-877,838	355,611	-855,851
164	184,050	-876,588	362,296	-854,271
165	189,976	-875,453	367,774	-851,298
166	195,029	-874,681	372,061	-847,148
167	199,210	-874,341	375,253	-842,342
168	202,411	-874,298	377,350	-837,616
169	204,472	-874,401	378,286	-833,706
170	205,258	-874,674	378,079	-831,015
171	204,693	-875,315	376,758	-829,657
172	202,774	-876,432	374,283	-829,644
173	199,502	-877,850	370,695	-830,817
174	194,929	-879,326	366,111	-832,848
175	189,191	-880,717	360,627	-835,254
176	182,469	-882,034	354,296	-837,583
177	174,926	-883,345	347,208	-839,733
178	166,857	-884,649	339,614	-841,847
179	158,836	-885,839	332,133	-843,833
180	151,514	-886,771	325,410	-845,307
181	145,213	-887,271	319,586	-846,149
182	139,696	-887,137	314,406	-846,825
183	134,377	-886,432	309,497	-848,031
184	128,835	-885,596	304,565	-849,997
185	123,018	-885,042	299,357	-852,238
186	117,062	-884,807	293,748	-854,125
187	111,065	-884,674	287,877	-855,688
188	105,070	-884,517	282,097	-857,501
189	99,087	-884,416	276,487	-859,636
190	93,113	-884,531	270,858	-861,759
191	87,137	-884,915	265,115	-863,740
192	81,156	-885,484	259,334	-865,730
193	75,199	-886,149	253,632	-867,852
194	69,259	-886,870	247,975	-869,976
195	63,290	-887,589	242,274	-871,899
196	57,295	-888,272	236,527	-873,666
197	51,323	-888,925	230,728	-875,323
198	45,333	-889,475	224,858	-876,811
199	39,264	-889,860	218,891	-878,086
200	33,094	-890,083	212,830	-879,196
201	26,854	-890,193	206,692	-880,178
202	20,593	-890,228	200,553	-881,111
203	14,356	-890,206	194,479	-882,055
204	8,172	-890,143	188,478	-882,966
205	2,043	-890,055	182,535	-883,783

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Murat ÇATALKAYA
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 21.09.1984 Kahramanmaraş
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (0530) 033 09 21
e-posta : muradcatalkaya@gmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Viyana Teknik Üniversitesi / Makine Müh.	2015
Lisans	Fırat Üniversitesi / Makine Müh.	2007
Lise	Fatih Lisesi	2003

İş Denevimi

Yıl	Yer	Görev
2007-2009	Erkoç Mühendislik	Proje Mühendisliği
2014-2015	Viyana Teknik Üni.-Sanayi Prj.	Tasarım Mühendisi
2016-2018	Aritek Madencilik	Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

Almanca (University Preparation Programme of the Vienna Universities) B-2/2

İngilizce (Yök Dil 71,125)

Yayınlar

1. İnsan Adım Yörünge Eğrilerinin 2R Manipölatör Kullanarak Elde Edilmesi,

KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi

Hobiler

Profesyonel Fotoğrafçılık (Avusturya)

Viyana Üniversitesi Spor Derneği;Yüzme ve Tırmanış Üyeliği (Avusturya)

Viyana Sahne Tiyatro Grubunda Ses ve Işık Teknikerliği (Avusturya)

Üyelikler

Makine Teorisi Derneği(MAKTED)