

**ALTI BACAĞLI BİR ROBOT İÇİN DİNAMİK
SİMÜLATÖR TASARIMI**

İzzet YAĞMAHAN

**Yüksek Lisans Tezi
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT**

HAZİRAN-2013

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALTI BACAĞLI BİR ROBOT İÇİN DİNAMİK
SİMÜLATÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İzzet YAĞMAHAN

102131103

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Haziran 2013
Tezin Savunulduğu Tarih: 18 Temmuz 2013**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Beşir DANDIL (F.Ü)
Yrd. Doç. Dr. Erkan DENİZ (F.Ü)**

HAZİRAN-2013

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca; çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen, akademik ortamda olduğu kadar beşeri ilişkilerde de engin fikirleriyle yol gösteren saygıdeğer hocam ve danışmanım sayın Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT' a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmam sırasında bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Oğuz YAKUT'a, sayın Yrd. Doç. Dr. Cafer BAL'a, sayın Arş. Gör. İsmail Hakkı ŞANLITÜRK'e, sayın Arş. Gör. Deniz KORKMAZ' a ve çalışmalarım süresince birçok fedakârlıklar göstererek beni destekleyen aileme en derin duygularla teşekkürü bir borç bilirim.

İzzet YAĞMAHAN

ELAZIĞ-2013

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLOLAR LİSTESİ.....	IX
SEMBOLLER LİSTESİ.....	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. ROBOT TEORİ BİLGİSİ.....	3
2.1. Robotiğe Giriş	3
2.2. Robotların Tercih Edilme Sebepleri.....	5
2.3. Robotlarda Eklem Yapıları ve Sınıflandırma	7
2.3.1. Robotlarda Eklem Yapıları	7
2.3.2. Robotlarda Sınıflandırma	8
2.3.2.1. Endüstriyel Robotlar.....	10
2.3.2.1.1. Kartezyen Robotlar.....	10
2.3.2.1.2. Silindirik Robotlar	11
2.3.2.1.3. Küresel(Revolüt) Koordinatlı Robotlar	12
2.3.2.1.4. Mafsallı(Eklemlı) Kol Konfigürasyonlu Robotlar	12
2.3.2.1.5. Scara Tipi Robotlar.....	13
2.3.2.2. Kontrol Yöntemlerine Göre Robotlar.....	14
2.3.2.2.1. Noktadan noktaya Hareket Eden Robotlar	14
2.3.2.2.2. Sürekli Yörüngede Hareket Eden Robotlar	14
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	15
3.1. Bacaklı Robotlar	15
3.2. Tezle İlgili Yapılan Çalışmalar	21
3.3. Bacaklı Sistemlerin Tekerlekli Sistemlere Göre Avantajları.....	26

4.	ROBOT KİNEMATİĞİ.....	27
4.1.	Koordinat Sistemi.....	27
4.2.	Konum ve Yön.....	28
4.3.	Dönme Matrisi	29
4.4.	Homojen Koordinat Dönüşümü	30
4.5.	İleri Kinematik Analiz.....	31
4.6.	Denavit-Hartenberg Yöntemi	32
4.7.	Ters Kinematik Analiz	33
4.8.	Altı Bacaklı Robot İçin Kinematik Analiz	35
4.8.1.	Altı Bacaklı Robot İçin İleri Kinematik Çözüm.....	37
4.8.1.1.	Sağ Ön Bacak için İleri Kinematik Çözüm	37
4.8.1.2.	Sağ Orta Bacak için İleri Kinematik Çözüm	40
4.8.1.3.	Sağ Arka Bacak için İleri Kinematik Çözüm	42
4.8.2.	Altı Bacaklı Robot İçin Ters Kinematik Çözüm.....	44
4.8.2.1.	Sağ Ön Bacak için Ters Kinematik Çözüm.....	45
4.8.2.2.	Sağ Orta Bacak için Ters Kinematik Çözüm.....	48
4.8.2.3.	Sağ Arka Bacak için Ters Kinematik Çözüm.....	51
5.	ROBOT DİNAMİĞİ	55
5.1.	Düz Dinamik.....	55
5.2.	Ters Dinamik	55
5.3.	Lagrange Methodu	56
6.	ALTI BACAKLI ROBOT MODELİ İÇİN KONTROL	57
6.1.	Kayma Kipli Kontrol Yöntemi	57
6.2.	Kayma Kipli Kontrolör Tasarımı	58
6.3.	Bulanık Mantık	61
7.	BACAKLI SİSTEMLERDE YÜRÜME ŞEKİLLERİ VE HAREKET	65
7.1.	Altı Bacaklı Robot Modelinin Boyutları	67
8.	MATLAB/SIMULINK-SIMMECHANICS	68
9.	ALTI BACAKLI ROBOTUN SIMMECHANICS MODELİ.....	70
10.	SONUÇ	82
	KAYNAKLAR.....	84

ÖZET

Bilgisayar teknolojisi alanındaki hızlı gelişmeler, robotik alanında da önemli çalışmaların yapılmasına imkan sağlamıştır. Doğadan esinlenerek tasarlanan birçok robot çalışmasının; endüstriyel, askeri, sağlık ve eğitim gibi alanlarda kullanımı mümkün olmaktadır. Robotik çalışmalarında genellikle tekerlekli, paletli ve raylı sistemlerin tasarımı her geçen gün artmakla beraber son yıllarda yapılan çalışmalar bacaklı sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. Bunun temel sebebi de, bacaklı sistemlerin tekerlekli sistemlerin aksine hareketin zor gerçekleştirilebildiği arazi koşullarında bile çok kıvrak ve esnek hareket kabiliyeti sağlamasıdır.

Bu tez çalışmasında, öncelikle bacaklı sistemlerle ilgili literatür taraması yapılmıştır. Daha sonra hareket benzetim platformu olarak tasarlanan altı bacaklı bir manipülatörün modellenmesi, kontrolü, kinematik analizi ve gerçek zamanlı sistem uygulaması ele alınmıştır. Tasarlanan sistem, dikdörtgen bir platforma bağlı eşit uzunluktaki altı baceden oluşmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmanın, gerçek uygulamaların donanımsal olarak benzetimi ve hızlı prototipleme uygulamaları için bir ön çalışma olması amaçlanmıştır. Sistemin modellenmesi MATLAB/Simulink-SimMechanics kullanılarak yapılmıştır. Modellenen sistemin denetimi de, bulanık mantıklı kayma kipli kontrolör tasarlanarak sağlanmıştır.

Tasarlanan sistemin ileri/ters kinematiğinin çözümlenmesinde yaygın olarak kullanılan Denavit-Hartenberg Yaklaşımı'ndan yararlanılmış, ayrıca robot dinamiğinin çözümünde kullanılan Lagrange-Euler denklemine de değinilmiştir. Lagrange-Euler denklemi arka planda ileri ve/veya ters dinamik çözümlemelerde kullanılmakta olsa da Simmechanics ile sunulan olanaklar geliştiriciyi detaylı ve fazlasıyla karmaşık dinamik denklemler oluşturma külfetinden kurtarmaktadır.

Anahtar Kelimeler: SimMechanics, Altı Bacaklı Robot, Kayma Kipli Kontrol, Bulanık Mantık, Kinematik

SUMMARY

Dynamic Simulator Design for A Robot With Six Legs

The fast developments in computer technology have also opened the way for more robotic studies in the future. Many nature inspired robot prototypes can be utilized to work in industrial, military, medical and educational fields. Most robots have been planned to move in directions with the help of wheels or tracks, but recent studies have focused on creating robots with legs. The reason for this is that legged versions of these robots can operate more comfortably in multiple environments found in nature.

For this thesis study; most research has been done in literature with robots that operate legs. The designing, controlling, kinematic analysis and real time system applications of a six-legged robot are later studied on this research. The designed system consists of a rectangular platform with 6 legs. This study is meant to be a preliminary work for future models in regards to creating fast prototypes and a simulation of hardware that are to be used in future models. The modeling of the system was executed with the help of MATLAB/Simulink-SimMechanics program. The supervision of the designed system will be through a controller designed with fuzzy logic and sliding wedges.

The Denavit-Hartenberg approach was used in the resolution of forward/backward kinematic equations, and the Lagrange-Euler equation was utilized in the robot Dynamics. Although the Lagrange-Euler equation is mostly used in the background for forward/backward or reverse kinematics, the possibilities of Simmechanics helps the designer to avoid highly sophisticated equations for the operating of the robot system.

Key Words: SimMechanics, Six Legged Robot, Sliding Mode Control, Fuzzy Logic, Kinematic

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Karel Capek'in oyunundaki robot	3
Şekil 2.2. Döner eklemlili bağlantı	8
Şekil 2.3. Kayar eklemlili bağlantı	8
Şekil 2.4. Seri manipülatör gösterimi	9
Şekil 2.5. Paralel manipülatör gösterimi	10
Şekil 2.6. Kartezyen robot ve çalışma alanı	11
Şekil 2.7. Silindirik robot ve çalışma alanı	12
Şekil 2.8. Küresel robot ve çalışma alanı	12
Şekil 2.9. Mafsallı kol konfigürasyonlu robotlar.....	13
Şekil 2.10. SCARA tipi robotlar	14
Şekil 3.1. Raibert tarafından yapılan tek ayaklı zıplayan robot	15
Şekil 3.2. Toyota monoped	16
Şekil 3.3. Honda ASIMO (Advanced Step in Innovative MObility) robot	17
Şekil 3.4. İlk dört bacaklı makine taslağı.....	18
Şekil 3.5. Boston Dynamics firması tarafından yapılan BigDog	19
Şekil 3.6. Rhex robotu.....	20
Şekil 3.7. Luran II (solda) ve Genghis (sağda) robotu.....	20
Şekil 3.8. Bacaklı sistemlerin tekerlekli sistemlere göre üstünlükleri.....	26
Şekil 4.1. Bir noktanın dünya koordinat sistemine göre nokta gösterimi	28
Şekil 4.2. Katı nesnenin konumu ve yönü.....	28
Şekil 4.3. $n+1$ uzva sahip kinematik zincir oluşturan bir manipülatör	31
Şekil 4.4. Denavit-Hartenberg çerçeve ataması	33
Şekil 4.5. Ters ve düz kinematik analiz arasındaki ilişki.....	34
Şekil 4.6. Eklem yerleşimi-I.....	36
Şekil 4.7. Eklem yerleşimi-II.....	36
Şekil 4.8. Altı bacaklı robotun sağ ön-sağ orta ve sağ arka bacaklarına eklem ve koordinat sistemi yerleşim gösterimi	37
Şekil 6.1. İkinci derece bir sistem için ulaşma ve kayma modları	59

Şekil 6.2. Bulanık kontrolörün genel yapısı.....	63
Şekil 7.1. Hayvanlarda Simetri.....	65
Şekil 7.2. Ağırlık merkezinin destek safhasındaki bacakların oluşturduğu alanın içinde kalması.....	66
Şekil 7.3. Bacakların 3'erli gruplar (tripod) şeklinde hareket etmesi.....	66
Şekil 8.1. Simmechanics blok kütüphaneleriyle oluşturulan örnek bir model.....	69
Şekil 9.1. Altı bacaklı robotun Simmechanics modeli.....	71
Şekil 9.2. Sürtünme bloğu(üstte) ve yapısı (altta)	72
Şekil 9.3. Sistemin platform bloğu	73
Şekil 9.4. Sağ ön bacak bloğunun yapısı.....	74
Şekil 9.5. Kontrol bloğunun yapısı	74
Şekil 9.6. Lookup bloğunun yapısı	75
Şekil 9.7. Bulanık mantıklı kayma kipli kontrol bloğunun yapısı	75
Şekil 9.8. Altı bacaklı robotun Simmechanics simülasyon görüntüleri.....	77
Şekil 9.9. Hareket sırasındaki sürtünmenin zamana göre değişimi	78
Şekil 9.10. Hareket sırasında bir eklemdeki açı değerinin zamana göre değişimi	79
Şekil 9.11. Açı değişimi için ekleme uygulanan torkun zamana göre değişimi	80
Şekil 9.12. Eklemdeki zamana göre ivme değişimi.....	81
Şekil 9.13. Eklemin hareket hızı.....	81

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Sağ ön bacak için D-H tablosu	37
Tablo 4.2. Sağ orta bacak için D-H tablosu	40
Tablo 4.3. Sağ arka bacak için D-H tablosu.....	42
Tablo 4.4. Eklemlerin aç ı değ erleri	54

SEMBOLLER LİSTESİ

o^1_x, o^1_y, o^1_z	: o^1 vektörünün komponentleri
x^1, y^1, z^1	: O^1 merkezli koordinat sisteminin birim vektörleri
p^0	: P noktasının, O_0 - $x_0y_0z_0$ koordinat sistemine göre tanımlı konum vektörü
O_1^0	: O_1 merkezli koordinat sistemini O_0 merkezli koordinat sistemine göre tanımlayan vektör
P	: Konum Vektörü
R	: Dönme Matrisi
R_1^0	: O_1 merkezli koordinat sisteminin O_0 merkezli koordinat sistemine göre tanımlanmış dönme matrisi
p^1	: P noktasının O_1 merkezli
O^T	: Perspektif (izdüşüm) matrisi
n	: Uzunluk sayısı
T_{i-1}^i	: Homojen dönüşüm matrisi
a_{i-1}	: İki eksen arasındaki bağ uzunluğu
α_{i-1}	: (i-1) ile i eksenleri arasındaki bağ açısı
d_i	: Çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı
θ_i	: İki bağ arasındaki eklem açısı
${}^{i-1}T_i$	: Genel dönüşüm matrisi
L	: Lagrange
T	: Kinetik enerji
V	: Potansiyel enerji
t	: Zaman
$\dot{q}$	: Zaman türevi
q	: Durum değişkeni
π (pi)	: Sistemin toplam girişi
$\underline{x}(t)$	: Durum vektörü
$u(t)$	: Kontrol sinyali
$f(t)$	: Bozucu giriş
$A, \underline{b}, \underline{d}$	: Sabit matrisler

$A_n, \underline{b}_n, \underline{d}_n$	: Nominal sistem parametrelerinden oluşan matris ve vektörleri
$\Delta A, \Delta \underline{b}, \Delta \underline{d}$	: Bilinmeyen sistem parametrelerinin belirsizliklerini gösteren matris ve vektörleri
$L(\underline{x}, t)$	: Belirsizliklerin toplamı
B_p	: $\underline{b}_n$ 'in sözde tersi
$\underline{x}^d$	: Ulaşılmak istenilen durum vektörü
$\underline{e}$	: İzleme hatası
S	: Anahtarlama fonksiyonu
λ	: Eğim
u	: Kontrol girişi
V	: Lyapunov fonksiyonu
η	: Pozitif bir sayı
$\dot{S}$	: S ' in dinamiği
$\mu_A(x)$	: Üyelik fonksiyonu
b	: Sürtünme katsayısı
V	: Hız
s	: Saniye
K	: Kinetik enerji
P	: Potansiyel enerji
N	: Newton

KISALTMALAR LİSTESİ

RUR	: Rossum'un Evrensel Robotları
DC	: Doğru Akım
GND CS	: Dünya Koordinat Sistemi
N-E	: Newton-Euler
R-L	: Rekürsif Lagrange
G-D	: Genelleştirilmiş D'Alembert
D-H	: Denavit-Hartenberg
SMC	: Kayma Kipli Kontrol
min	: Minimum
max	: Maximum
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
cm³	: Santimetre Küp
s	: Sinüs
c	: Cosinüs
deg	: Derece

1. GİRİŞ

Sanayi devriminden sonra makineleşmeye bağlı olarak gelişen robot teknolojisi ile birlikte robotların kullanılabileceği alan sayısı da her geçen gün artmıştır. İnsan sağlığı için tehlikeli ve çalışılması imkansız olan yerlerde üretim yapabilmek, standart ürünler üretmek, üretim hatlarındaki üretim süresini azaltmak ve en az insan bağımlı üretim ortamları bu teknoloji ile birlikte mümkün olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda robot teknolojisinin önemi gittikçe artmaktadır. Günümüzde bilgisayar teknolojilerinde yaşanan gelişmeler de bu teknolojinin daha fazla geliştirilmesine imkan sağlamıştır. Çeşitli işlerin yerine getirilmesi için doğal sistemleri taklit eden makinaların tasarlanması buna en güzel örnektir. Doğal sistemlerden esinlenerek tasarımı yapılan bu makinalar; örümceklerden, köpeklere, çekirgelerden balıklara kadar çok çeşitli hayvanların hareket ilkelerini örnek almaktadır [1].

Çok kıvrak ve esnek bir şekilde hareket edebilen doğal sistemlerin çoğu bacaklıdır. Bacaklı robotların yüksek hareketliliğe sahip olması, tekerlekli ve paletli robotlara göre performanslarının yüksek olması gibi unsurlar robotik alanında yapılan çalışmalarda belirleyici olmaktadır. Bir çok robotun gidemeyeceği engebelli arazi koşullarında bile bacaklı robotların gösterdiği performansı ne paletli ne de tekerli robotlar gösterememektedir. Bacaklı robotların yapabilecekleri davranışların çeşitliliği ve sayısı oldukça fazladır [2]. Örneğin, MKIII isimli robot, birçok farklı cinsten ve sayıda bacaklı hayvan yürüyüşlerinin dinamik ve denge unsurlarının incelenmesi sonucunda tasarlanmıştır [3].

Bacaklı robot sistemleri çalışmalarında karşılaşılan en önemli problem, denge ve bacak hareketlerinin kontrol edilmesidir. Bacaklı robot sistemlerinde dengenin iyi bir şekilde kontrol edilebilmesi için genellikle bacak sayısının artırılması yoluna gidilir. Ancak bacak sayısının artırılması her zaman sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Çünkü bacak sayısının artırılmasıyla birlikte her bacak için kullanılacak motor sayısı da artar ve buna bağlı olarak motorları kontrol etmek zorlaşır. Motor sayısının artmasıyla birlikte robotun ağırlığı da artacağından, kullanılacak motorların güçlü olması ve motorları beslemek için gerekli kaynağın da gücünün yüksek olması gerekir. Bacaklı sistemlerde karşılan bir diğer önemli problem ise, sistemin hareketi sırasında bacakların birbirleriyle çarpışmasını engellemektir. Hareket sırasında bacakların birbirleriyle çarpışmasını engellemek için bacak sayısı

genellikle 4 veya 6 olarak tercih edilir [4]. Bacakların çarpışmasını etkileyen diğer bir etken ise bacakların bağlandığı platform şeklidir. Yapılan çalışmalarda dairesel gövde etrafına yerleştirilen bacaklar ile dikdörtgen gövdenin sağına ve soluna 3'er bacak yerleştirilen sistemler en iyi sonuçları vermiştir [5]. Bu tür sistemler uygulamaya geçirilmeden önce, sistemin tasarımı ve kontrolünde karşılaşılabilecek sorunlara çözüm üretilmesi ve sistemin beklentilere verdiği cevapların değerlendirilmesi için genellikle bir simülasyon yöntemine başvurulur. *“Gerçek zamanda robot simülasyonu robot ileri dinamiğinin gerçek zamanda hesaplandığı bir simülasyon biçimidir”* [6].

Tasarlanacak olan herhangi bir altı bacaklı robotun, gerçek zamanlı olarak nasıl çalıştığı, çalışırken hangi sorunlarla karşılaştığı, kullanılan parçaların nasıl bir etkiye veya kuvvete maruz kalacağı ancak sistemin gerçek bir modeli oluşturularak öğrenilebilir. Gerçek bir modelin oluşturulması için de büyük zaman ve maddi kaynaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmanın amacı, fiziksel bir model oluşturmak yerine, robotun veya sistemin sayısal ortamda gerçekçi bir modeli oluşturularak, bütün ölçümleri ve çevresel durumlara göre vereceği cevapları zamandan bağımsız olarak görmek ve ileride fiziksel olarak gerçekleştirilecek robotlar için bir ön çalışma yapmaktır [7-9].

Bu çalışma kapsamında, robotlar ile ilgili genel bilgiler verilecektir. Ayrıca altı bacaklı robotlar ile ilgili konuların detaylı bir literatür taraması yapılacaktır. Tasarımı yapılacak olan altı bacaklı robotun kontrollü bir şekilde hareketi için gerekli kinematik çözümlere yer verilecek ve sistemin dengeli bir şekilde yürümesinin sağlanması için yürüme şekilleri üzerinde durulacaktır. Daha sonra Matlab/Simulink paket programı içerisinde özel simülasyon özelliklerine sahip blok kütüphanelerinden oluşan SimMechanics ile Altı Bacaklı Bir Robot İçin Dinamik Simülatör Tasarımı yapılacaktır. Tasarlanan sistemin kontrolü için de bulanık mantıklı kayma kipli kontrolör tasarlanarak gerçekleştirilecektir.

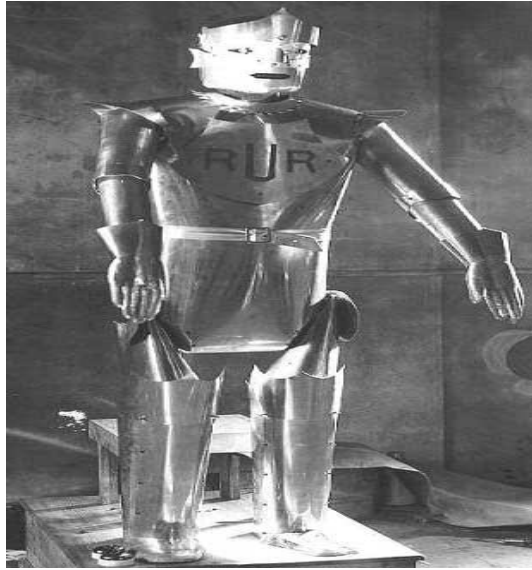
2. ROBOT TEORİ BİLGİSİ

Bu bölüm içeriğinde robot terimi ile ilgili genel bilgilere yer verilecektir. Ayrıca robotların kullanım alanları, tercih edilme sebepleri, farklı tipteki robotlar ve onların çalışma mantıklarından bahsedilecektir.

2.1. Robotiğe Giriş

“Robot” terimini ilk defa Çekoslovak yazar Karel Capek, 1921 yılında kaleme aldığı RUR (Rossum’s Universal Robots - Rossum’un Evrensel Robotları) adlı tiyatro oyununda kullanmıştır. Bu terim, Çekoslovakça’da “*robota*” sözcüğü yani “*zorla çalıştırılan işçi*” anlamına gelmektedir. Tarihte ilk robot fikri ise 3000 sene öncesine kadar uzanır ve Homeros “*İlyada*” adlı eserinde hareketli üç ayaklılardan bahsetmektedir. Bir hint efsanesinde de hareket eden mekanik fillerden bahsedilmektedir [10].

Karel Capek’in R.U.R. adlı eserinde mekanik ve otonom, ama arzulardan yoksun yaratıklar olarak kullanılan robot terimi, daha sonra birçok bilimkurgu romanına da konu olmuştur.



Şekil 2.1. Karel Capek’in oyunundaki robot [10].

Isaac Asimov ise, ünlü robot serisiyle teknolojik açıdan tutarlı bir robot kavramı oluşturur ve robotların amacının insana hizmet etmek olduğunu, bir robotun kendi amaçlarını insanların amaçlarına hiçbir zaman tercih edemeyeceğini koyduğu üç robot kanunu ile belirler:

1. Bir robot, insana zarar veremez.
2. Bir robot, kendisine insanlar tarafından verilen emirlere 1. Kanun ile çelişmediği sürece itaat etmek zorundadır.
3. Bir robot, 1. ve 2. Kanun ile çelişmediği sürece kendi varlığını korumak zorundadır [11].

Bu konuda çalışmalarıyla tanınan Maja Mataric'in robot ile ilgi yaptığı tanım ise: *“Ortamdan topladığı verileri dünyası hakkında sahip olduğu bilgiyle sentezleyerek, anlamlı ve amaçlarına yönelik bir şekilde hareket edebilen ve bunu güvenli bir biçimde yapabilen bir makinedir.”* şeklindedir. Bir robotun, Maja Mataric'in yaptığı bu tanıma girebilmesi ve amacına yönelik hareket edebilmesi için, gerçek bir ortamla iletişim halinde olmasının yanında fiziksel olarak bu makinenin bir varlığının olması gerekir [12].

Fiziksel olarak böyle bir makineyi(robot) tasarlamak, uygulamaya geçirmek ve kontrol etmek önemli bir problemdir. Çünkü bir robotu oluşturan dört ana sistemi birbirine uygun bir şekilde seçmek ve bu sistemleri uyumlu bir şekilde kontrol etmek zor ve karmaşık bir durumdur. Bir robotu oluşturan dört sistem:

1. Robotun bulunduğu ortamdan gerçek zamanlı bilgi edinebilmesi için kullanılacak alıcılar,
2. Robotun ortamdan aldığı bilgiler doğrultusunda amacına yönelik fonksiyonları gerçekleştirmesi için sistemde bulundurulacak efektörler,
3. Robotun hareket sistemi ve
4. Robotun kontrolünü sağlayan elektronik beyindir.

Ancak bu dört sistem uygun bir şekilde bir araya getirildiği zaman, otonom yani kendi başına hareket edebilen, ortamdan bilgi toplayan ve yapacağı işlerin niteliklerine göre donanmış bir robot ortaya çıkabilir.

Günümüzde gelişimi hızla artarak devam eden robot alanındaki tasarım çalışmaları, sadece endüstriyel alanlarda kullanımı hedefleyen sistemler üretmekle sınırlı kalmayıp

insansı, hayvansı veya başka amaçları gerçekleştirmek için çeşitli davranışları gerçekleştirilebilecek özelliklere sahip robotlar üzerine yoğunlaşmıştır.

Robotlar üzerine yapılan çalışmaların son yıllarda hızla artarak devam etmesinin sebebi bu alanda edinilmiş olan bilgi birikimine ilave olarak, daha güvenli ve maddi külfeti daha az olan robot tasarlayabilme imkanına sahip teknolojik gelişmelerdir. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar uygulamaya geçirildiğinde, çeşitli alanlarda veya endüstri gibi alanlarda hızlı ve görece hatasız çalışarak verimi artıran, insanlar için tehlikeli ve çalışmasını kısıtlayan olumsuz etkilerden etkilenmeyen bu robot teknolojisi, gün geçtikçe hayatımızın bir parçası haline gelecektir.

Örneğin bir robot kolu, elektronik devrelere pirinç tanesi büyüklüğündeki yüzlerce parçanın yerleştirmesini süratli ve hatasız bir biçimde gerçekleştirebilirken, bu işlem insanlar tarafından yapıldığında oldukça zahmetli, yorucu, sıkıcı ve hata oranı yüksek bir iş olabilir. Rutin işlerin yanı sıra insan sağlığı için tehlike arz eden radyoaktif maddelerin, hastalık yapıcı bakterilerin bulunduğu, yüksek basınç, yüksek sıcaklık gibi ortamlarda bile robotların kullanımı birçok açıdan yararlı olabilmektedir [13-15].

2.2. Robotların Tercih Edilme Sebepleri

Çevremize baktığımızda robotların farklı birçok alanda hizmet verdiğini görmekteyiz. Endüstriyel, askeri, sağlık, eğitim, şov ve hobi amaçlı kullanılan robotların yanı sıra özellikle insan sağlığı için tehlikeli sayılabilecek yerlerde robotların kullanımı her geçen gün artmaktadır. Örneğin, çoğu maden ocaklarında otomatik köstebekler bulunmakta böylelikle maden ocaklarında oluşacak tehlikelerden insanoğlu uzak tutulmaktadır.

Aşağıda verilenler, bazı görevler için insanın yerini tamamen alabilecek, bazı görevler için ise insanlara yardım edebilecek robotların, insan yerine tercih edilme sebeplerinden bazılarına gösterge olmaktadır [14, 16-18].

- Emek maliyetlerinin yüksek olduğu ülkelerde robot sayısının artmasındaki en önemli unsurlardan biri üretim maliyetlerinin robot kullanımıyla düşürülmesidir. Sosyal, sağlık ve emeklilik gibi yardımların da göz önüne alınmasıyla ortaya çıkan maliyet robot için harcanan paranın 3-4 katını bulabilmektedir. Ancak, emeğin ucuz olduğu ülkelerde tam tersi bir durum ortaya çıkmaktadır.

- İşçilerin görevde olduğu sürecin % 15-20'lik bir bölümü, ortaya çıkan yorgunluğun giderilmesi ve diğer ihtiyaçların karşılanması için geçer. Bu süre robotlarda % 2'yi geçmemektedir.

- Robotlarda yorgunluk ve dikkat kaybı söz konusu olmadığından hatalı imalat sayısı insanın neden olduğu hatalı imalat sayısına göre neredeyse sıfırdır. Böylece hatalı imalatın üretim maliyetindeki payı çok düşük kalır.

- Robotun insanlar gibi haftalık 40 saat çalışma süresi kısıtı yoktur. Tüm hafta gece gündüz çalışabilir. Dolayısıyla insanlar bir işte vardiyalar halinde çalışıp sürekli değişim olurken o işte aynı robot devamlı çalışmaktadır. Bu yönüyle de birim üretim maliyeti çok düşmektedir.

- Sıcak dövme preslerinde tezgâh yüklenmesi ve boşaltılması robotların ilk uygulama alanlarından biri olmuştur. Yüksek sıcaklıktaki dövme esnasında parça belirli bir konumda tutulmalıdır. Önceleri bu işi, iki kişi uzun maşalar vasıtasıyla yaparken robot uygulanmasıyla tutma işi tutucu yardımıyla robot tarafından yapılmaya başlanmıştır. Böylece daha büyük hızlara ulaşılırken çalışanlar da sıcak parça ve kıvılcım sıçrama tehlikesinden uzaklaştırılmış olurlar. Daha iyi bir konumlamayla da ürün kalitesi artırılmış olur.

- Bazı boyama işlerinde asit boyalar kullanılır ve bu boyalar da boyama görevlisinin sağlığı açısından çok tehlikelidir. Personelin sızdırmaz giysileri ve başlıklarla çalışmaları gerekir. Takılan başlıklara sürekli hava beslemesi gerekir. Bu koşullar altında çalışmak verimsiz ve yorucudur. Oysa aynı iş ortamında bulunan ve daha önceden programlanmış hareketleri yapan bir robot vasıtasıyla daha hızlı olarak daha yüksek kalitede gerçekleştirilebilir.

- Robotlar, tehlikeli olmayan ancak tekrarlı ve sıkıcı olduğu için uzun zaman çalıştığında her insanı monotonlaştıran işlerde de insanlara yardımcı olmaktadır. İnsanların zekasını körelten bu tür monoton işler robotlar tarafından yapıldığında yorulmadan, sıkılmadan, somurtmadan, daha güvenilir bir şekilde yapılabilir.

- Her idarecinin birbirleriyle sürekli rekabet eden ve her söyleneni yapan çalışanları tercih edeceği aşikardır. Aslında böyle bir durum her idarecinin hayalidir. Bazıları bir robot

sistemi oluşturarak ve diğer ekipmanları da bu sisteme uydurarak bu hayali gerçekleştirmeye başlamışlardır. Yapılacak işlemler çok hassas biçimde programlanabilir ve malzemeler robot iş hücrelerine bilgisayar kontrolü altında ulaştırılabilir.

- Robotlar, yeniden programlanma hatalarının düzeltilmesi işleminin basitliği dolayısıyla değişik işlere adaptasyonda önemli güçlük oluşturmazlar ve bu işlemler uzun süreli üretim durmasına neden olmaz. Oysa sabit otomasyonda değişiklik yapmak, uzun süreli üretim aksamalarına neden olmaktadır.

- Çeşitli uygulama durumlarında yeniden programlanabilme yeteneği, tutucunun değiştirilebilme özelliği, sistem ömrünü uzatır. Sabit otomasyon sistemlerinde değişiklik yapmak önemli bir harcamayı gerektirir ki bu harcama zaman zaman sistemin yeniden oluşturulma maliyetine yakın olabilir.

Robot işgücü ve insan arasında tercih yapılırken maliyetler de mutlak olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

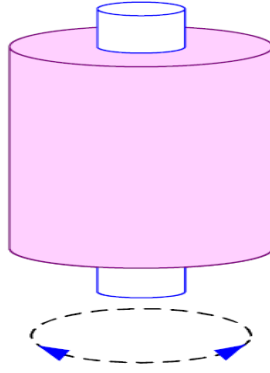
2.3. Robotlarda Eklem Yapıları ve Sınıflandırma

2.3.1. Robotlarda Eklem Yapıları

Eklemler, manipülatörlerde hareketi sağlayan mekanizmalardır. Yapılarına göre iki gruba ayrılırlar.

a) Döner (Revolute - R) Eklemler:

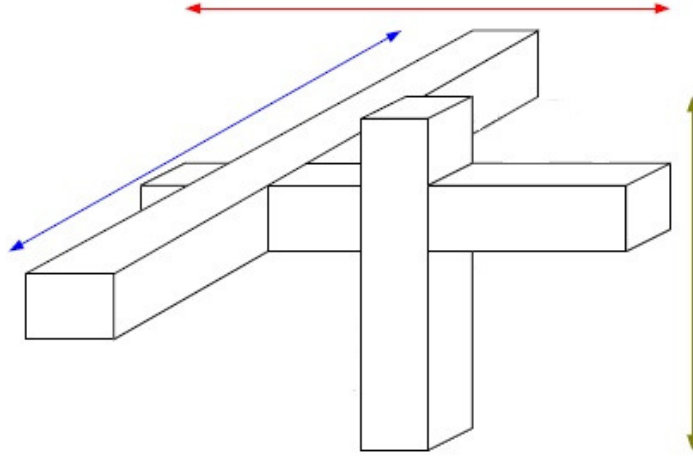
Menteşeye benzerler ve iki uzuv arasında dönme hareketine izin verirler [19].



Şekil 2.2. Döner eklemlerli bağlantı [19].

b) Prizmatik (Prismatic – P) Eklemler:

Kayar eklemler, iki uzuv arasında doğrusal harekete izin verirler [19].



Şekil 2.3. Kayar eklemlerli bağlantı [19].

2.3.2. Robotlarda Sınıflandırma

Robotlarda sınıflandırma, genel olarak seri ve paralel olmak üzere iki gruba ayrılır. Bir dizi eklem ve bu eklemleri birleştiren bağlardan oluşan seri robotlar, geniş çalışma uzayına sahiptirler. Seri robotlar, paralel robotların aksine basit mekanik parçalara sahip olduklarından basit kinematik denklem çözümlerine de imkan verirler. Fakat seri robot ağırlıklarının, taşıdıkları ağırlıklara kıyasla yüksek olması seri robotların önemli bir

dezavantajı olarak göze çarpar. Paralel robotlarda ise, iki eklem birbirine birden çok bağ ile bağlanır ve bu durum paralel robotların kendi ağırlığından daha fazla ağırlık taşımasına imkan sağlar. Paralel robotlarda mekanik yapı karmaşık olduğu için kinematik denklem çözümleri de oldukça karmaşıktır [20]. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte, endüstride insan gücünün yerini tutacak bu robotlar kullanılmaya başlanmıştır [21].

a) Seri Manipölatör:



Şekil 2.4. Seri manipölatör gösterimi [22].

b) Paralel Manipülatör:



Şekil 2.5. Paralel manipülatör gösterimi [23].

Robotlar kullanım alanlarına, özelliklerine ve kontrol yöntemlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılırlar:

2.3.2.1. Endüstriyel Robotlar

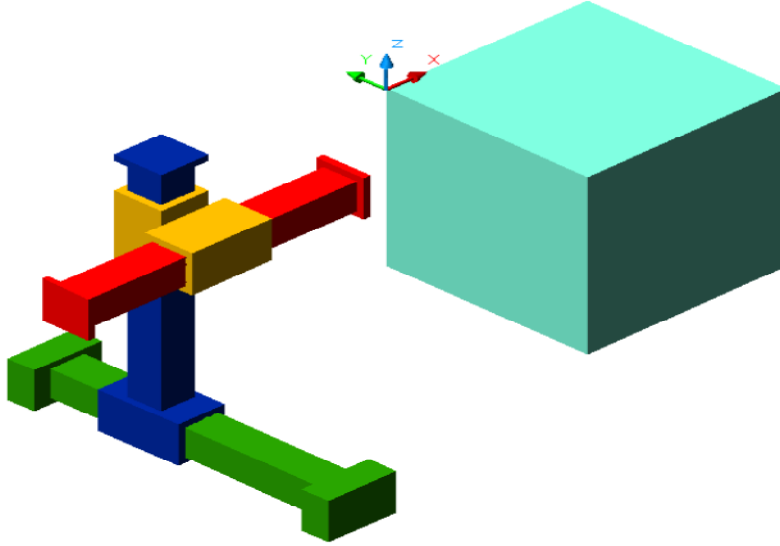
Endüstriyel robotlar, üç ya da daha fazla programlanabilir eksenli olan otomatik kontrollü robotlardır. Çok amaçlı olarak kullanılabilen bu robotlar, bir yerde sabit duran ya da tekerlekleri olan endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar [16].

Endüstride kullanılan bu robotlar, genellikle altı serbestlik derecesine sahiptir. Bu robotlarda ilk üç uzuv prizmatik ekleme sahip ise *Kartezyen Robot*, ilk uzuv döner ikinci ve üçüncü uzuv prizmatik ekleme sahip ise *Silindirik Robot*, ilk iki uzuv döner üçüncü uzuv prizmatik ekleme sahip ve bütün eklemleri birbirine paralel ise *Scara Robot*, ilk iki uzuv döner ve üçüncü uzuvu prizmatik ekleme sahip ise bu robot da *Küresel Robot* olarak isimlendirilir [23].

2.3.2.1.1. Kartezyen Robotlar

- Üç adet kayar eklemden oluşurlar ve dikdörtgen şeklinde çalışma alanları vardır.
- Mekanik yönden sağlam ve sade yapıdadırlar.

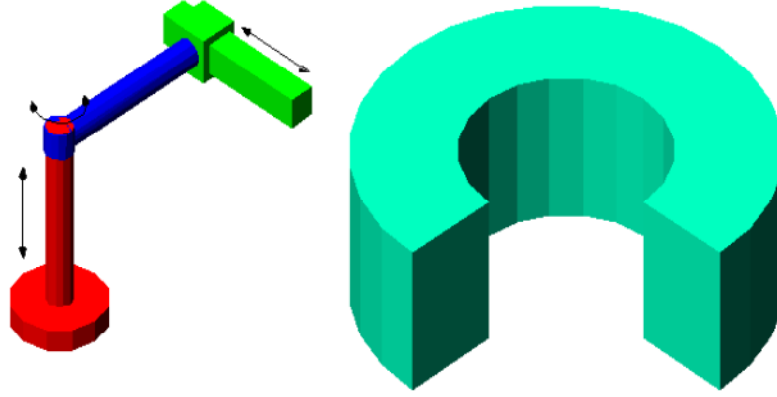
- Çalışma uzayındaki hareket edebilme kısıtlamasından dolayı zayıftırlar.
- Büyük boyutlarda ve ağırlıklardaki nesneleri hareket ettirmek için tasarlanırlar.
- Çoğunda elektrik motoru kullanılır bazen de pnömatik sistemler kullanılır [19,24].



Şekil 2.6. Kartezyen robot ve çalışma alanı [23].

2.3.2.1.2. Silindirik Robotlar

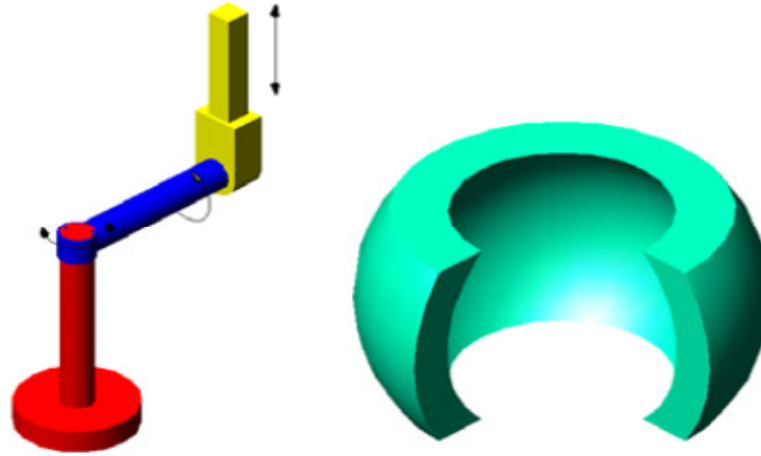
- 1 tane döner ve 2 tane kayar eklem tipinden meydana gelirler ve çalışma alanları silindirikdir.
- Kartezyen robotlar gibi mekanik yönden sağlam ve sade yapıdadırlar.
- Bilek hareketindeki konum doğruluğu yatay harekete bağlı olarak azalır.
- Büyük nesnelerin taşınmasında kullanılırlar [19,24].



Şekil 2.7. Silindirik robot ve çalışma alanı [23].

2.3.2.1.3. Küresel (Revolüt) Koordinatlı Robotlar

- 2 döner ve 1 kayar eklemden oluşurlar ve çalışma alanları küreye benzer.
- Mekanik yapıları oldukça karmaşıktır.
- Diğer iki tipten daha zayıf mekanik yönleri vardır.
- Genellikle makine montajlarında kullanılırlar [19,24].

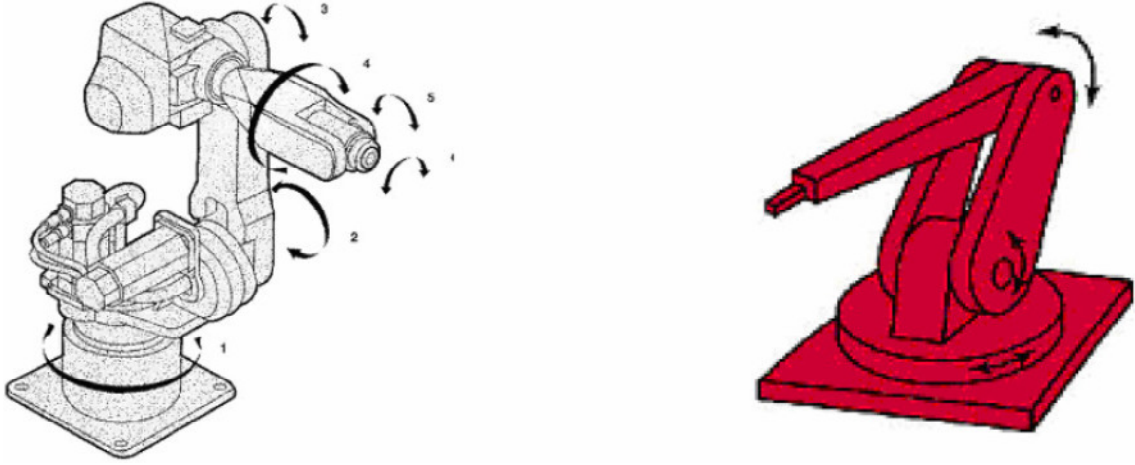


Şekil 2.8. Küresel robot ve çalışma alanı [23].

2.3.2.1.4. Mafsallı (Eklemlı) Kol Konfigürasyonlu Robotlar

- Bu robotlar, yapı ve görünüşleri itibariyle insan koluna benzer.

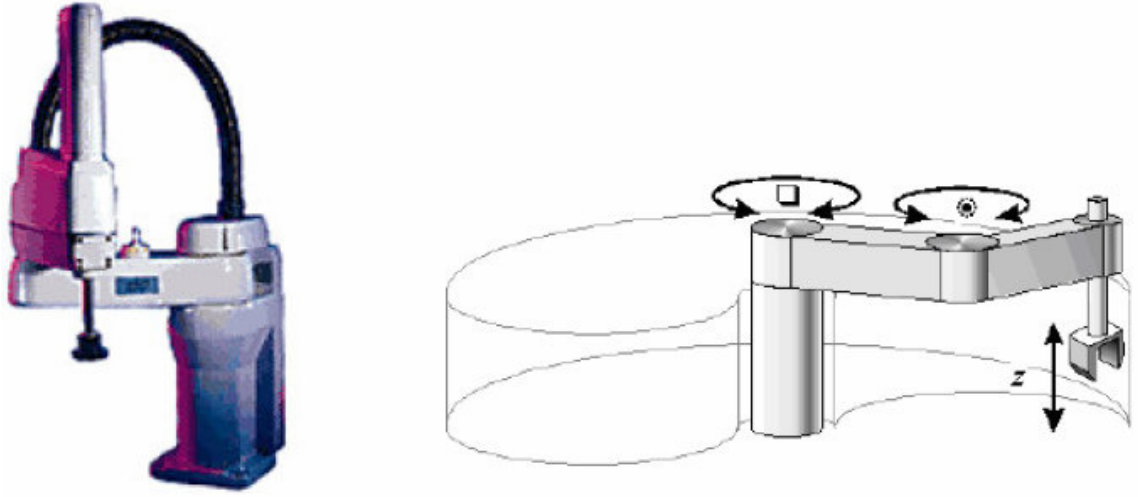
- Tüm eklemleri döneldir ve hareket uzayları küresel veya silindirikdir.
- Diğer robot türlerine göre hareket uzayları büyüktür ve daha esnektir.
- Bu robot kolunun uç kısmına, nesneleri tutabilmesi için robot eli de takılabilir.
- Otomobil sanayisinde, tıbbi araç-gereç yapımında, tıpta ve hassas çalışma gerektiren montaj çalışmalarında kullanılırlar [20].



Şekil 2.9. Mafsallı kol konfigürasyonlu robotlar [20].

2.3.2.1.5. Scara Tipi Robotlar

- Scara, Selective compliance assembly robot arm (Seçilenlere uyan montaj robotu kolu) kelimelerinin baş harflerinden oluşur.
- Scara geometrisi, iki tane döner ve bir tanede prizmatik eklem kullanılarak elde edilir. Bu şekilde bütün eklemler birbirine paralel olacak şekilde hareket edebilir.
- Bu robotlar, çok yüksek hıza ve en iyi tekrarlılama kabiliyetine sahip robotlardır.
- Hız ve konum performanslarının iyi olmasından dolayı bu robot kolu en çok elektronik sanayisinde, elektronik malzemelerin montajını gerçekleştirmek için kullanılır.
- Ayrıca tutma ve taşıma işlerinde maliyeti düşürdüklerinden ve programlanmasının da çok kolay olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar [25,14].



Şekil 2.10. SCARA tipi robotlar [20].

2.3.2.2. Kontrol Yöntemlerine Göre Robotlar

2.3.2.2.1. Noktadan Noktaya Hareket Eden Robotlar

- En fazla 6 serbestlik derecesine sahip robotlardır.
- Belirlenmiş bir noktadan başka bir noktaya hareket ederler ve yeni bir işlem için ayarlanmaları gerekmektedir.
- Bir nesneyi bir yerden başka bir yere yerleştirme işleminde kullanılan robotlardır.

2.3.2.2.2. Sürekli Yörüngede Hareket Eden Robotlar:

- Belirli bir yörüngeyi takip eden robotlardır.
- Genellikle küçük boyutlu robotlardır.
- Noktadan noktaya robotlara göre daha düzgün ve kesintisiz hareket ederler.

[20, 24, 26, 27]

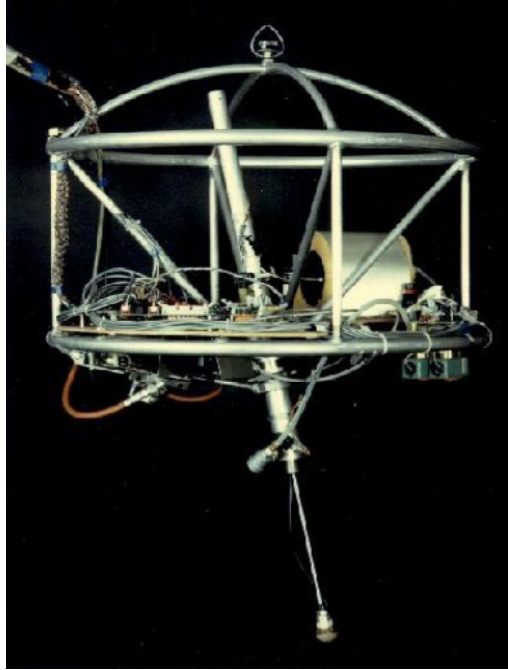
Bu robotların dışında; askeri, sağlık, eğitim, araştırma alanlarında, şov veya promosyon gibi kişisel ve hobi amaçlı olarak da kullanılan robotlar vardır [16].

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Bacaklı Robotlar

- Tek bacaklı robotlar “Hopper robots”

1983-1984 yılları arasında MIT Bacak Laboratuvarında tasarımı ve üretimi yapılan Üç boyutlu tek ayaklı sıçrayan robot(3D One Leg Hopper), bacaklı hareketin aktif denge ve dinamiğini incelemek amacıyla yapılmıştır. Robotun yan taraflarına hareketi sağlayan mafsallar yerleştirilmiş ve bu şekilde robot, hem yanlara hem de öne ve arkaya doğru hareket etmiştir. Robotun denetim sisteminde ise, hidrolik ve sıkıştırılmış hava gücünden faydalanılmıştır. Bu şekilde, robotun zıplarken kendi kendini dengeleyerek azami 2.2 m/s hızla yol alması sağlanmıştır [11,28].



Şekil 3.1. Raibert tarafından yapılan tek ayaklı zıplayan robot [11].

Toyota tarafından geliştirilen tek bacaklı zıplayan robot, 1 metre boyunda ve 4 cm yukarıya doğru zıplayıp tekrar kendi ayağı üzerine düşme özelliğine sahip bir robottur.

Robotun bu hareketi düzgün bir şekilde yapabilmesi için, kalça ve diz eklemlerine ek olarak topuk eklemi de eklenmiştir. Ayağını bükebilme özelliğiyle düzgün olmayan zeminlerde de yürümesi sağlanmıştır [29,30].



Şekil 3.2. Toyota monoped [30].

- İki bacaklı robotlar “Bi-ped”

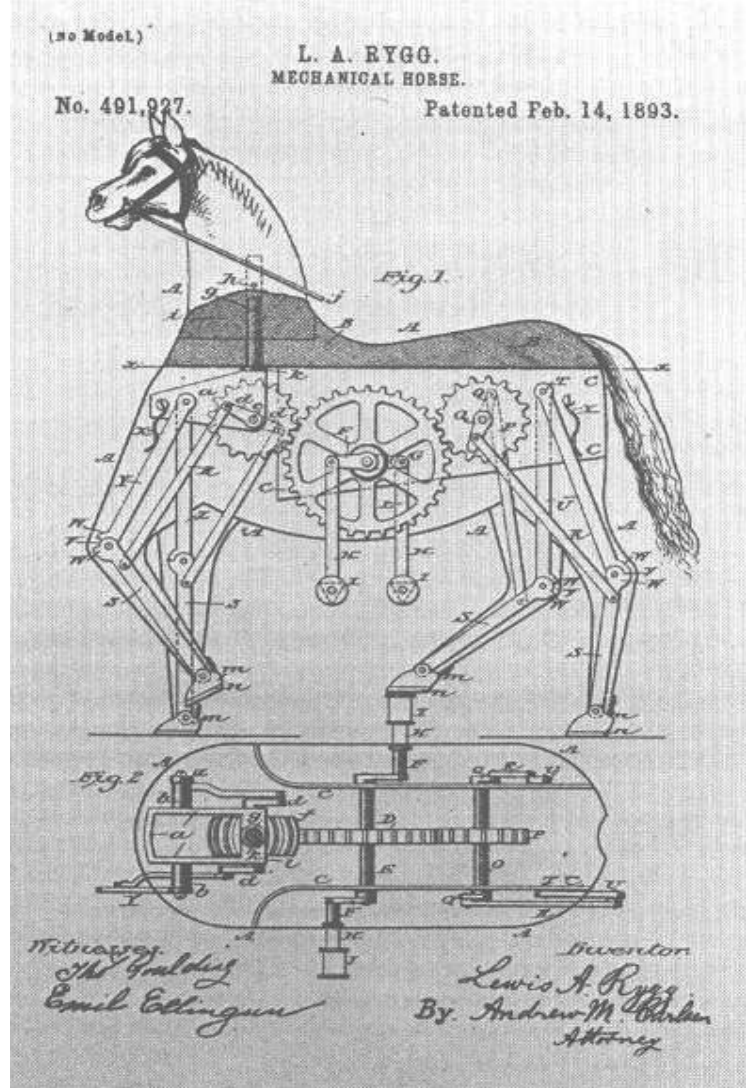
Honda firmasının iki bacaklı robotlarla ilgili yaptığı ve 20 yıllık çalışmanın ürünü olan Asimo, dünyada en çok bilinen insansı robot örneğidir. Asimo insanlar gibi yolda yürüyebilen, merdiven çıkabilen ve bir eşyayı bir yerden başka bir yere rahatlıkla taşıyabilen bir robottur [11,31].



Şekil 3.3. Honda ASIMO (Advanced Step in Innovative MObility) robot [31].

- Dört bacaklı robotlar

Lewis A. Rygg tarafından patenti 1893 yılında alınan mekanik at, dört bacaklı robotlar alanında önemli bir çalışma olarak gösterilir. Bu sistemde sürücünün pedalları çevirmesi ile güç sağlanan mekanik atta, krankların ve mekanizma uzuvlarının hareketinin bacaklar vasıtasıyla hareke dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Bu sistemin uygulamaya geçirilip geçirilmediğinden emin olunmamasına rağmen, bu patentin yürüyen bacaklı sistemler alanında, alınan ilk patent olduğu düşünülmektedir [28,31-32].



Şekil 3.4. İlk dört bacaklı makine taslağı [31].

2008 yılında Boston Dynamics firması tarafından geliştirilen BigDog, zorlu arazi şartlarında ağır malzemeleri taşıyarak, piyade ve komando birliklerinin mühimmat ve teçhizat yükünü hafifletmek için tasarlanmıştır [30,32,33].



Şekil 3.5. Boston Dynamics firması tarafından yapılan BigDog [30].

- Altı bacaklı robotlar

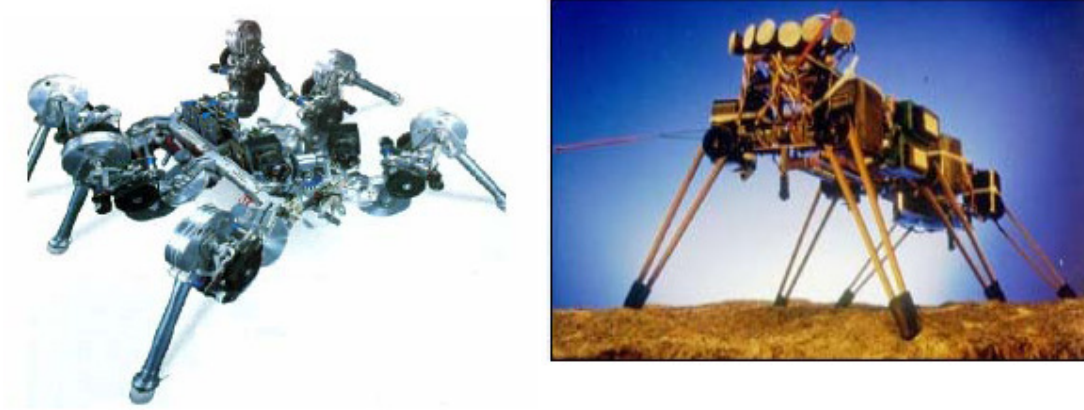
Altı bacaklı robotların tasarımı da çoğu robot sistemi gibi doğadaki canlılardan ilham alınarak uygulamaya geçirilir. Böceklerden esinlenerek tasarımı yapılan bu sistemler; arama, kurtarma, çevre keşfi gibi gerçek hayatta pek çok uygulama için kullanılabilir. Bu robot sistemlerinin iki ayaklı robot sistemleri gibi denge ile ilgili problemleri yoktur [30].

Şekil 3.6.' da yarım daire şeklindeki bacaklarıyla en tanınmış altı bacaklı robot örneği olan Rhex robotu, basit bir mekanizmaya sahiptir. Ancak basit bir mekanizmaya sahip olmasına rağmen çok amaçlı hareket edebilen ve performansı oldukça yüksek olan bir robottur [34].



Şekil 3.6. Rhex robotu [34].

Altı bacaklı robotlarla ilgili bir diğer çalışma da FZI (Forschungszentrum Informatik) grubunun gerçekleştirdiği Laron II robotudur. Laron II robotunun her bir bacağı iki serbestlik derecesine sahip bir mekanizmadan oluşur ve toplamda 12 adet tahrik elemanı ile denetlenmiştir. MIT(Massachusetts Institute of Technology) Üniversitesi tarafından yapılan altı bacaklı Genghis robotunun ise, her bir bacağı sadece bir serbestlik dereceli bir mekanizmadan oluşur ve toplamda 6 adet motor ile denetimi sağlanmıştır [34].



Şekil 3.7. Laron II (solda) ve Genghis (sağda) robotu [34].

3.2. Tezle ilgili Yapılan Çalışmalar

Arazi koşullarının tam olarak bilinmediği ve tekerlekli, paletli gibi robotların hareket etmelerinin mümkün olmadığı durumlarda bacaklı robotlar tercih edilmektedir. Bu sebeple yürüyen robotlar alanında son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır.

Bülent Kaplan, “Altı Bacaklı Mini Robotlarda Konum Tespiti ve Haritalama” isimli yüksek lisans tezi çalışmasında, mini robotlardaki küçük geometrik boyutlar ve düşük ağırlık taşıma kapasitesi gibi kısıtlamalardan dolayı uygulanması zor olan haritalama sistemini farklı bir bakış açısıyla ele almıştır. Konum tespiti ve haritalama için mini robotlarda kullanılan algılayıcılardan elde edilecek bilgilerin işlenmesi için karmaşık algoritma ve donanımlara gerek duyulduğunu, ancak bu donanımların mini robotların ağırlığını artırdığı gibi boyutlarını da büyütmesi nedeniyle tercih edilmediğini belirtmiştir. Çalışmasında, algılayıcıları mümkün olduğunca basitleştirerek, bilgi depolama ve bilgi işleme donanımlarını mini robot üzerine yerleştirmek yerine seyir halinde olmayan yerel bir birime yerleştirmiştir [22].

Mustafa Suphi Erden, "Altı Bacaklı Yürüyen Makina: ROBOT-EA308" adlı doktora tezi çalışmasında, üç eklemlili bir robot çalışması üzerinde durmuştur. Çalışmasını beş bölümde gerçekleştiren Erden, birinci bölümde dalgalı yürüyüşleri de içeren standart yürüyüş biçimlerini tanımlamış ve analitik düzeyde, durağan kararlı yürüyüş olmaları anlamında, kararlılık analizleri gerçekleştirmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, pekiştirmeli öğrenme içeren bir serbest yürüme algoritması geliştirmiştir. Bu algoritma sayesinde arka bacaklardan birinin arızalanması durumunda beş bacaklı yürümeyi öğrenerek uyum sağlayabilme durumlarını gözlemlemiştir. Üçüncü bölümde, üç eklemlili bir robot bacağının hareketi için yörünge en iyilemesi ve kontrolcü tasarımı gerçekleştirmiştir. Dördüncü bölümde, altı bacaklı robotun kinematik ve dinamik formülasyonu üzerinde durmuştur. Beşinci ve son bölümde ise dalgalı yürüyüşler için enerji verimliliği analizi gerçekleştirmiştir [35].

Gökhan Oral, “Yarım Daire Şeklindeki Esnek Altı Bacaklı Rhex Robotunun Esnek Çok Gövdeli Dinamik Modellenmesi ve Simülasyonu” isimli yüksek lisans tezi çalışmasında Rhex robotunun dinamik modelinin oluşturulmasında MSC ADAMS programından

yararlanmıştır. Bacaklar için sonlu eleman analizi programı olan MSC NASTRAN ile çözümler yapıp ana modele eklemiştir. Son aşamada ise oluşturulan dinamik modelin MATLAB kontrol programı ile entegrasyonunu sağlamış ve otonom davranış sergileyebilen Rhex robotunun sanal bir modelini çıkarmıştır [31].

Cengiz Mete Uzundere, “Sekiz Bacaklı Mobil Robotun Mekanik Tasarımı, Modellenmesi ve Lokomasyonu” isimli yüksek lisans tezi çalışmasında, dış iskeletli canlılardan akrebi model olarak seçmiş ve çalışmasında robotun bacak yapısı, hareket düzeni gibi konulara yer vermiştir. Çalışmasını biyomimetrik bir yaklaşımla şekillendiren Uzundere, sekiz bacaklı robotun tasarımını gerçekleştirirken robotun çok bozuk zeminlerde kullanılacağını göz önünde bulundurarak sistemde kullandığı parçaların mekanik dayanıklılıklarını belirlemek için tüm parçalara sonlu elemanlar analizi yöntemiyle gerilme analizleri yapmıştır. Sistemin modellenmesi kısmında tasarımı kinematik açıdan ele alıp, tek bir bacak için lineer transformasyon matrisini çıkarmıştır. Ayrıca robotun kontrol sistemini oluşturmak için sensörler, data iletişimi ekipmanları ve motor gibi elamanlar arasında hiyerarşik bir düzen kurmuştur [36].

Osman DARICI,” Dört Bacaklı Mobil Robotlarda Yürüme Analizi ve Yol İzleme” isimli yüksek lisans tez çalışmasında, dört bacaklı robotlarda görülen yürüme tekniklerinin analizi üzerinde durmuş ve çalışmasında dört bacaklı robotta yürüme teknikleri için gerekli olan parametreleri MATLAB programı ile hesaplamıştır. Robotun dinamik modeli içinde ADAMS dinamik simülasyon programını kullanmıştır. Yaptığı simülasyonlarda dört bacaklı yürüme tekniklerinde eklem pozisyonları, robotun kütle merkezinin aldığı yol, pozisyon hataları zamanla değişen dalga şekilleri ile göstermiş ve simülasyonlar sonucunda robotun kütle merkezinin pozisyonunun zamanla değişen dalga şekli gösterilerek robotun verilen yolu ne kadar yakınlıkta izlediği gösterilmiştir [37].

Servet Soygüder, “ Zıplayarak Yürüyen Çok Bacaklı Robotların Dinamik Modeli ve Yapay Zeka Algoritmaları İle Denetimi” isimli doktora tezi çalışmasında, dört bacaklı quadrupedal robot ve altı bacaklı hexapod robot modellerinin zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirebilmeleri için, yay-ters sarkaç (SLIP) benzetimi ile çözümü basitleştirerek modellenen sistemin hareket denklemlerini çıkarmıştır. Zıplayarak yürüme işlevi için hareket denklemleri çıkartılan quadrupedal (dört bacaklı) ve hexapod (altı bacaklı) bir

robotun zıplayarak yürütmesine ait dinamik modellerini oluşturarak, sırası ile PD denetim algoritması, bulanık mantık denetim algoritması ve ağ tabanlı bulanık mantık (ANFIS) denetim algoritması ile kontrolünü gerçekleştirmiştir [28].

S. Soygüder ve H. Alli, “ROBOTÜRK SA-2 Sekiz Bacaklı Örümcek Robotun Tasarımı ve Denetimi ” adını verdikleri başka bir çalışmada savunma sanayisinde ve doğal afetlerde kullanmak amacıyla yeni bir tasarım olan ROBOTÜRK-SA2 örümcek robotunu gerçekleştirmeye çalışmışlardır. Yeni tasarımda; robotu tahrik eden motor sayısı, örümceğin sırt kısmına yerleştirilen kam mekanizması, bacak eklemlerine kas görevi yapan yay elemanlarının yerleştirilmesi ve bacakların adım atma karakterlerinin doğadaki örümceklere benzer olacak şekilde yeni mekanizmalar geliştirmişlerdir. Böylece robotun enerji maliyetini minimuma düşürecek ve tahrik eleman sayısını azaltacak şekilde bir örümcek robot tasarlamışlardır. Örümcek robotun tüm ayaklarını ve eklemlerini de sadece bir adet tahrik elemanı ile kontrol etmişlerdir [34].

Erdem Arslan, ” Altı Bacaklı Yürüyen Robotun Tasarımı ve Dinamik Analizi” isimli yüksek lisans tezi çalışmasında, altı bacaklı bir robotun verimli bir şekilde hareketi için bir mekanizma tasarımını gerçekleştirmiştir. Çalışmasında bacaklı robotların dinamik hesaplamalarında kullanılan 4 adet dinamik metot üzerinde ayrıntılı bir şekilde durmuş ve bu metotlardan kılavuzlu çalışma algoritmasına uygunluğundan dolayı N-E(Newton-Euler) algoritmasını tercih etmiştir. Robot için gerekli olan ters kinematik analiz, hız ve ivme dağılımlarının işlem yükü getirmesinden dolayı bu hesaplamalar için, dinamik simülasyon programından faydalanmıştır. Bu dinamik parametreleri robotun hareketini gerçekleştirecek olan tahrik bileşenlerinin hesaplanmasında kullanmıştır [32].

Cüneyt Karaca, ”Altı Bacaklı Robotik Platformun Modellenmesi, Kontrolü ve Gerçek Zamanlı Sistem Uygulaması” isimli yüksek lisans tezi çalışmasında, altı bacaklı paralel bir manipülatörün modellenmesi, kontrolü ve gerçek zamanlı sistem uygulamasını ele almıştır. Hareketli bir üst platform, sabit bir alt platform ve bu iki platformu birbirine bağlayan, dönel hareketi ile uzunluğu değişen altı bacaktan oluşan bir sistem tasarlamıştır. Hareket benzetim platformuna hareket profili olarak tank hareket profilini uygulamış ve yine tanklarda sıklıkla kullanılan stabilize alın aynasının test kriterleri oluşturulmuştur. Ayrıca,

alın aynasının stabilizasyon performansını ölçmek için otokolimatör ve sayısal kontrolöre sahip bir sistem tasarımı yapmıştır [38].

Saranli ve arkadaşları tarafından yapılan altı bacaklı Rhex robotu, bacaklarını 3'erli gruplar halinde atabilen, yürüyebilen, zıplayabilen, takla atabilen ve zıplayarak koşabilen bir robottur. Rhex robotunun sadece kalça kısmına yerleştirilen bir eyleyici ile hareket etmesi sağlanan robot için toplamda 6 adet DC motor kullanılmıştır. Altı serbestlik derecesine sahip robotun bacakları düzlemsel olarak serbestçe dönebilmektedir. Ayrıca robota yokuş çıkabilme, suda yüzebilme, merdiven çıkabilme ve zıplayarak koşabilme gibi özellikler kazandırılmıştır. Bunun içinde robotun bacakları farklı ortamlara adapte olabilecek şekilde tasarlanmıştır [28].

Ing. R. Woering, bir hexapod robot yürümesinin ilk adımlarının simülasyonunu Matlab/SimMechanics programını kullanarak gerçekleştirmiştir. Yeni alanlardaki zorluklardan dolayı orta büyüklükteki RoboCup sistemlerinin tasarımında bu simülatörlerin gerekliliğine vurgu yapmıştır. Şuan ki robotlar düz bir zemin üzerinde tekerlek yardımıyla her yöne hareket edebiliyor, ancak yakın gelecekte çim benzeri zeminlerde bu sistemlerin hareket etmesi zorlaşacak ve bu gibi zeminlerde hareket edebilecek yeni platformlara ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Kendi çalışmasında da bu yeni platformu hexapod olarak adlandırılan 6 bacaklı bir sistem olarak tercih etmiştir. Hexapod robotun simülatörünü iki bölümde gerçekleştirmiştir. Çalışmanın ilk bölümünü kinematik simülatör oluşturur. Kinematik simülatörde, parçaların istenilen yönlerde hareket ettirilmesi istendiğinde bacak yörüngelerinin genel hareketini test etmek için gerekli yörüngeleri kinematik ortam içinde tanımlamıştır. 3 eklemden oluşan her bacağın alacağı açı değerlerini de ters kinematik ile bulmuştur. Dalgalı uygun bir yürüyüş şekli için de görev faktörü oluşturmuştur. Görev faktörü, transfer evresinde ve destek evresinde bacak döngü zamanının bölünmesiyle normal bir değerdir. Çalışmanın ikinci bölümünde bir dinamik simülatörü, hexapod bir modelin üzerindeki kütle ve yerçekiminin etkisini test etmek için kullanmıştır. Bu dinamik modeli kinematik modelden türetmiş ve Matlab/SimMechanics toolbox'ı kullanarak tasarlamıştır. Her iki simülatörde tüm boyut ve kütlelerin tekrardan tanımlanabilir olması robot tasarımında kolaylıklar sağladığını ifade etmiştir [39].

Almanya Jordanian Üniversitesi mekatronik bölümü öğrencileri tarafından hexapod bir robotun tasarımı ve kontrolü ile ilgili yapılan çalışma, küçük bir örümcek ilham alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu robotun, enkaz veya moloz gibi zorlu arazi koşullarında bile rahatlıkla hareket edebilmesi için kuvvet sensörleri kullanılmıştır. Ayrıca robotun bozuk zeminlerde kendi yörüngesini bulabileceği özel bir yürüyüş şekli oluşturulmuştur. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında robotun ileri ve ters kinematik modeli çıkarılmıştır. Bu model tam olarak %100 olmamakla beraber yeterli olduğu düşünülerek doğrulanmıştır. Kinematik analizin ardından robotun kontrolü için bir sistem tasarlanmıştır. Sistemde seçkin yürüme şekli, robotun bulunabileceği yüzey alanlarına uygun olarak geliştirilmiştir. Çalışmanın hareket ve sunumlarında excell kullanılmıştır. Ayrıca robotun tasarımı ve hareket canlandırması için de 3D Max programından yararlanılmıştır. Bacakların üçerli gruplar halinde düz zemin koşullarında dalgalanmasıyla birlikte başarılı bir sonuç vermiştir. Ancak dalgalı yürüyüş şekli, kinematik kısıtlamalardan dolayı ve yetersiz kuvvet sensörlerinden dolayı başarılı sonuçlar verememiştir [30].

M. Buehler ve arkadaşları, her bir bacağı sadece bir serbestlik derecesine sahip olan SCOUT adını verdikleri dört bacaklı robot çalışmasında edindikleri tecrübelerle ilk prototipleri olan SCOUT-I' i geliştirmişlerdir. Bu robotta, oldukça basit bir mekanik sistem kullanmışlardır. Her bir bacak sadece bir serbestlik derecesine sahip olmasına rağmen robotun bir adım üzerinde zıplaması, dönmesi, yürümesi, basamak çıkması ve koşması sırasında başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [40].

Carnegie Mellon Robotik Enstitüsü tarafından keşif görevleri için geliştirilen sekiz bacaklı Dante-II isimli robot, 5 gün boyunca 120 km uzaktaki insan operatörleri tarafından kontrol edilerek Alaska volkanındaki kraterde incelemelerde bulunmuştur. Robotun inceleme sırasında karla kaplı, yokuşlu, kaya parçaları ve hendekler gibi çok zorlu arazi koşullarında bile başarılı bir performans göstererek incelemesini tamamladığı görülmüştür [41].

Bacaklı robotlar alanında yapılan diğer bir önemli çalışmada Odetics şirketinin altı bacaklı deneysel robotudur. “Fuctionoid” ismini verdikleri bu robot, bazı böceklerin ve insanların bacak yapıları incelenerek tasarlanmıştır [10].

3.3. Bacaklı Sistemlerin Tekerlekli Sistemlere Göre Avantajları

Tekerlekli ve paletli sistemlerin, çoğu arazi koşulunda bacaklı sistemlere göre iyi bir performans sergileyememesi çalışmaların bacaklı sistemler üzerine yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Çünkü tekerlekli, paletli veya raylı sistemler sınırlı hareket kapasitelerine sahiptir. Örneğin bir engel ile karşılaşıldığında tekerlekli sistemlerin geri dönüp manevra alması gerekirken, bacaklı sistemlerde bu işlem yana adım atarak daha kısa sürede gerçekleşebilmektedir. Ayrıca harekete karşı gösterilen zeminden kaynaklı yüksek direnç bacaklı sistemlerde daha düşük olabilmektedir [28,32].

Mobilité	
Engel aşma	
Aktif süspansiyon	
Doğal arazi (sürekli arazi)	
Sıkışma ve Kayma	
Çevresel zarar	
Ortalama hız	

Şekil 3.8. Bacaklı sistemlerin tekerlekli sistemlere göre üstünlükleri [32].

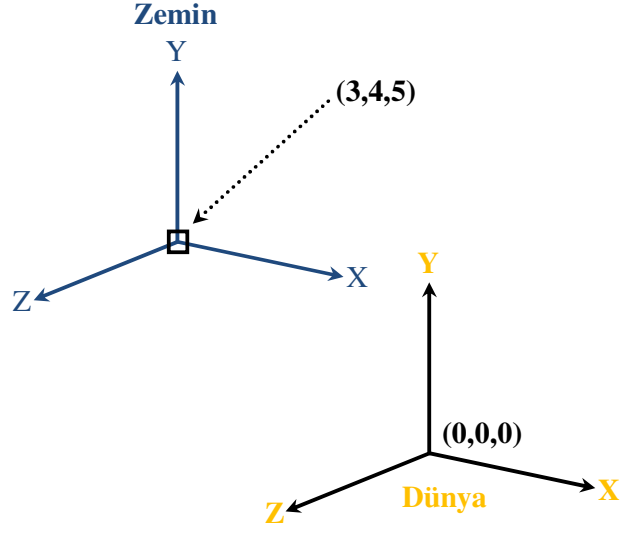
4. ROBOT KİNEMATİĞİ

“Kinematik, hareketi oluşturan kuvvetler veya cisimlerde oluşan gerilimler düşünülmeden mekanizmalarda sadece hareketin incelenmesi uğraşına verilen isimdir” [42].

Bir robot, mekaniksel bir bakış açısıyla şematik olarak katı uzuvların döner ya da prizmatik eklemlerle birbirine sıralı bir şekilde bağlanmış hali olarak gösterilebilir. Mekanik yapının bir ucuna robotun uç elemanı bağlanırken diğer ucu ise bir temele sabitlenir. Bu mekanik yapının sonuç hareketi, her bir uzvun kendinden önceki uzuva göre tanımlanmış hareketlerinin bileşiminden elde edilir. Bu nedenle bir nesneyi uzayda manipüle etmek için, bu robotun uç elemanın konum ve yön bilgisinin tanımlanması gerekir [25]. Bu konum ve yönelimlere bağlı olarak eklemlerde gerçekleşen açı değişimlerini belirlemek için de ileri ve ters kinematik dönüşümlerin analizi gereklidir. Bu bölümde; konum, yönelim, koordinat sistemi, dönme matrisi, homojen koordinat dönüşümü, ileri ve ters kinematik dönüşüm konuları ele alınacaktır.

4.1. Koordinat Sistemi

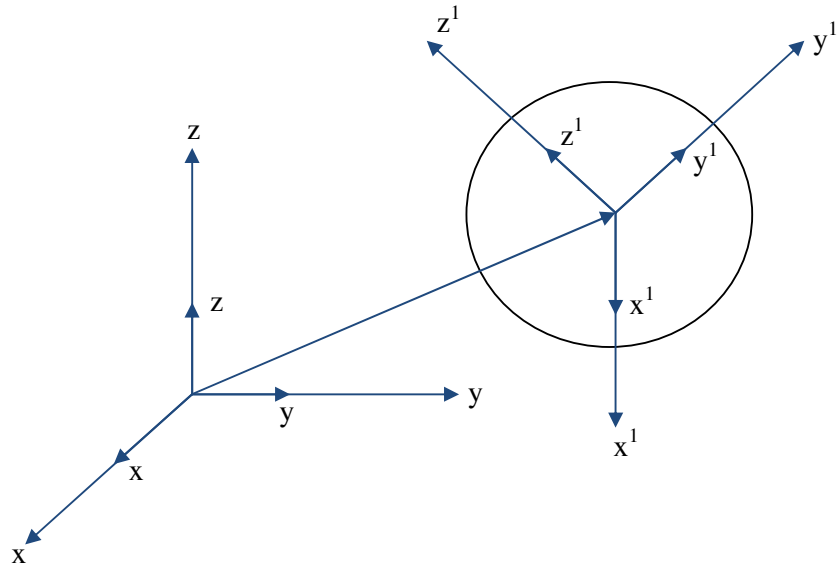
Robotlar, kendilerinin veya çevrelerindeki nesnelerin bulunduğu 3 boyutlu uzayda hareket eden sistemlerdir. Bu sistemlerin istenilen noktalara hareketini sağlamak için koordinat sistemleri ile ilişkilendirilmeleri gerekir. Çünkü tanımlanacak bütün konum ve yönelimler, evrensel çerçeveye veya evrensel çerçeve içerisindeki diğer kartezyen koordinat sistemlerine göre yapılır. Bu nedenle robotun ve çevresindeki nesnelerin konumlarını ve birbirlerine göre yönelimlerini belirlemek için merkezlerine birer koordinat sistemi yerleştirilir. Bu işlem için genellikle XYZ koordinat sistemi tercih edildiği için bu çalışmada da XYZ koordinat sistemi kullanılacaktır. Ayrıca robotlar her bir özgürlük derecesi için bir küresel(global) bir yerel (local) koordinat sistemine sahiptirler. Bu global koordinat sistemi, robot üzerinde sabit noktaya bağlı olabileceği gibi çalışma uzayında uygun bir noktada da olabilir [43,44].



Şekil 4.1. Bir noktanın dünya koordinat sistemine göre nokta gösterimi [44].

4.2. Konum ve Yön

Katı bir nesnenin uzaydaki konum ve yön tanımı, referans olarak seçilen bir koordinat sistemine göre yapılır. Şekil 4.2.' de verilen O-xyz referans koordinat sistemini ve x, y, z sistemin birim vektörlerini gösterir [25].



Şekil 4.2. Katı nesnenin konumu ve yönü [25].

Şekil 4.2.' de verilen katı nesnenin üzerindeki O^1 noktasının O-xyz referans koordinat sistemine göre pozisyonu (4.1)' deki gibi ifade edilir. o^1 vektörünün komponentleri ise o^1_x , o^1_y , o^1_z şeklinde gösterilir. O^1 noktasının pozisyonunu, (4.2)' deki gibi vektör formatında göstermek için (3x1)' lik matris kullanılır.

$$o^1 = o^1_x x + o^1_y y + o^1_z z \quad (4.1)$$

$$o^1 = \begin{bmatrix} o^1_x \\ o^1_y \\ o^1_z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Bu katı nesnenin yönünü tanımlamak için katı nesnenin üzerine bir koordinat sistemi yerleştirilir ve bu koordinat sisteminin referans koordinat sisteminin birim vektörleri cinsinden ifadesinin yazılması gerekir. Katı nesne üzerine yerleştirilen O^1 merkezli koordinat sisteminin birim vektörleri olan x^1 , y^1 , z^1 'in O-xyz referans koordinat sistemine göre ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x^1 = x^1_x x + x^1_y y + x^1_z z \quad (4.3)$$

$$y^1 = y^1_x x + y^1_y y + y^1_z z \quad (4.4)$$

$$z^1 = z^1_x x + z^1_y y + z^1_z z \quad (4.5)$$

4.3. Dönme Matrisi

Eşitlik (4.3), (4.4) ve (4.5)' deki üç birim vektörünü sade bir gösterim için (3x3)' lük bir matris formunda birleştirerek katı nesnenin referans koordinat sistemine göre yönü tanımlanabilir. Bu matrise dönme matrisi adı verilir.

$$R = \begin{bmatrix} x^1 & y^1 & z^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^1_x & y^1_x & z^1_x \\ x^1_y & y^1_y & z^1_y \\ x^1_z & y^1_z & z^1_z \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

4.4. Homojen Koordinat Dönüşümü

Koordinat sistemi dönüşümlerinin amacı, bir koordinat sistemine göre koordinatları bilinen bir noktayı başka bir koordinat sistemine göre de tanımlı hale getirmektir. Bu nedenle koordinat sistemi dönüşümlerinin yapılabilmesi için koordinat sistemlerinin birbirlerine göre konumlarının ve yönlerinin bilinmesi gerekir. Şekil 4.2.' deki uzayda olduğu varsayılan bir P noktasının, O_0 - $x_0y_0z_0$ koordinat sistemine göre tanımlı konum vektörü p^0 , O_1 merkezli koordinat sistemini O_0 merkezli koordinat sistemine göre tanımlayan vektör O_1^0 , O_1 merkezli koordinat sisteminin O_0 merkezli koordinat sistemine göre tanımlanmış dönme matrisi R_1^0 ve P noktasının O_1 merkezli koordinat sistemine göre tanımlı vektörü olan p^1 arasındaki ilişki, eşitlik (4.7)' deki gibi ifade edilebilir. Bu ifade koordinat dönüşümlerini (kaydırma+dönme) ifade eder ve bu koordinat dönüşümleri eşitlik (4.9)' da görüldüğü gibi (4x4) matris formatında yazılabilir. Bu matris, homojen transformasyon matrisi olarak adlandırılır.

$$p^0 = O_1^0 + R_1^0 p^1 \quad (4.7)$$

$$p^1 = \begin{bmatrix} p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} R_1^0 & O_1^0 \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Böylece eşitlik (4.9)' daki matris, O_1 merkezli koordinat sisteminden O_0 merkezli koordinat sistemine tanımlı olan dönme matrisini ve kaydırma vektörünü içermiş olur [25].

Yukarıda ifade edilen homojen dönüşüm matrisindeki P,R, O^T matrisleri;

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \text{ konum vektörü} \quad (4.10)$$

$$R = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \text{ dönme matrisi} \quad (4.11)$$

$$O^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ perspektif (izdüşüm) matrisi} \quad (4.12)$$

olarak ifade edilir.

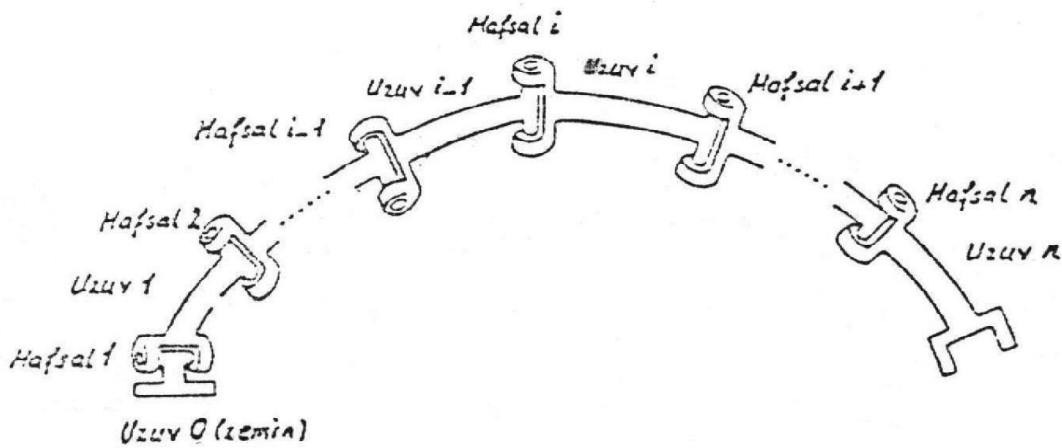
Robotik sistemlerde, O^T matrisindeki değerler izdüşüm matrisini oluşturur ve uygulamalarda 0 (sıfır) alınır. Homojen dönüşüm matrisindeki 1(bir) ise ölçek faktörü olarak ifade edilir ve uygulamalarda değer olarak 1 alınır [45].

4.5. İleri Kinematik Analiz

İleri kinematik analiz, robotikte manipülatörün eklem değişken değerleri için sonlandırıcının konumunu ve yönelimini bulmakta kullanılır. Eklem değişkenleri, eklemin döner olması durumunda uzuvlar arasındaki açı, eklemin kayar olması durumunda ise uzuv uzanma miktarıdır. Bu eklem değişkenleri için gösterimler, aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$q_i = \begin{cases} \theta_i & \text{döner eklem için} \\ d_i & \text{kayar eklem için} \end{cases}$$

Eklemlerle birleştirilmiş bir dizi uzuvdan oluşan manipülatörlerden, $n+1$ uzuva sahip bir manipülatör Şekil 4.3.' deki gibi gösterilebilir ve her bir uzva da bir koordinat sistemi tanımlandığını düşünelim.



Şekil 4.3. $n+1$ uzva sahip kinematik zincir oluşturan bir manipülatör

Bu manipülatör için T_{i-1}^i matrisi de, çerçeve i 'den çerçeve $i - 1$ ' e kadar olan homojen dönüşüm matrisini ifade eder ve bu matris sabit olmayıp manipülatörün hareketi ile değişir. Bu nedenle sonlandırıcının konumunu ve yönelimini temel koordinat sisteminde elde etmek için homojen dönüşüm matrisi T_0^n , eşitlik (4.13)' deki gibi yazılabilir [46].

$$T_0^n = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_{n-1}^n \quad (4.13)$$

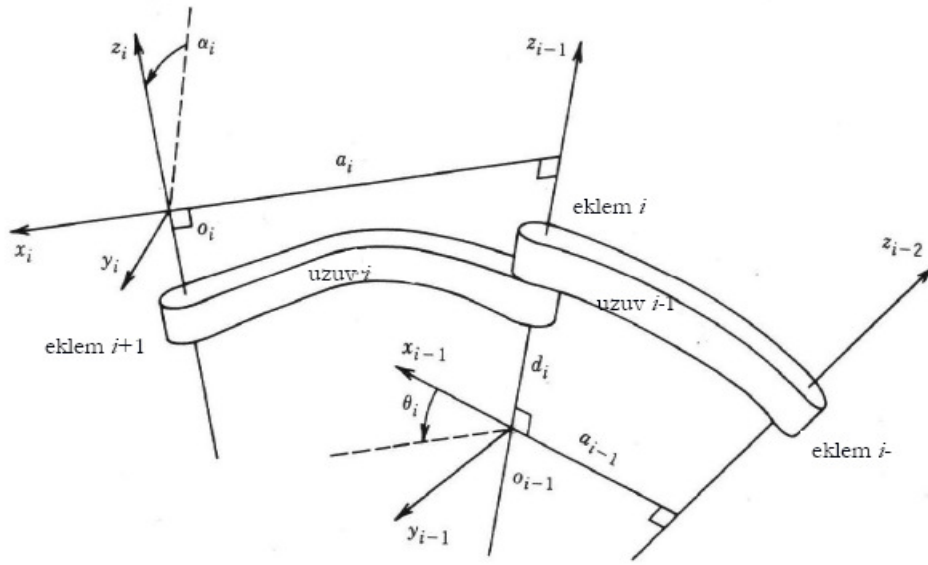
4.6. Denavit-Hartenberg Yöntemi

Robot ileri kinematiğinin bulunması için Denavit-Hartenberg yönteminde dört değişken kullanılmaktadır. Bu değişkenler sırasıyla;

- a_{i-1} : İki eksen arasındaki bağ uzunluğu
- α_{i-1} : (i-1) ile i eksenleri arasındaki bağ açısı
- d_i : Çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı
- θ_i : İki bağ arasındaki eklem açısı

şeklinde ifade edilir. Denavit-Hartenberg değişkenleri (D-H değişkenleri) olarak bilinen bu değişkenler aşağıda sıralanan yöntemlere göre bulunur:

1. Bu D-H değişkenlerini bulmak için ilk önce robotun dönme eksenleri belirlenir.
2. Dönme eksenleri bağlardan bir fazla olacak şekilde numaralandırılır.
3. Eksenlerin tümüne birer koordinat sistemi yerleştirilir.
4. Yerleştirilen koordinat sistemlerinde z eksenini döner eklemler için bağın dönme eksenini, prizmatik eklemler için ise kayma yönü olarak kabul edilir.
5. Z eksenini belirlendikten sonra, z eksenine dik ve kol boyunca olan bağ uzunluğu x eksenini kabul edilir ve sağ el kuralına göre y eksenleri de belirlenir [46,47].



Şekil 4.4. Denavit-Hartenberg çerçeve ataması [46].

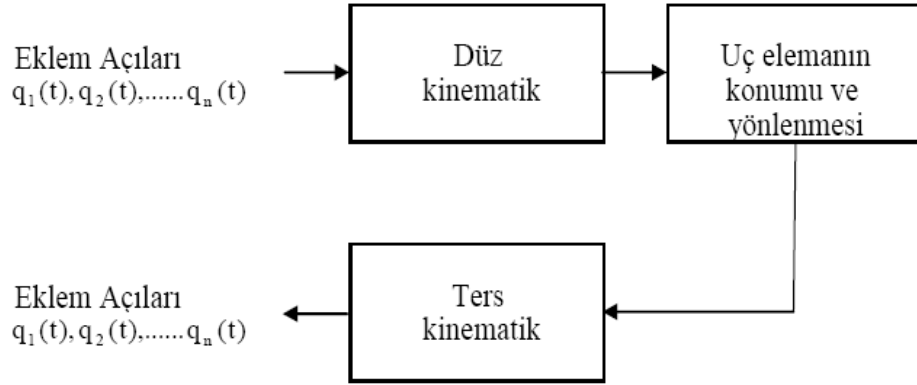
Eklemelere ait dönüşüm matrisleri bulunurken eşitlik (4.14)' deki genel dönüşüm matrisi formatı kullanılır [47,48].

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

4.7. Ters Kinematik Analiz

“Kartezyen koordinatlarda verilen bir uç noktası pozisyonu ve oryantasyonu için, mafsal değişkenlerinin alması gereken değerleri bulma işlemine ters kinematik denir [49].”

Ters kinematikte amaç, düz kinematiklerin tersi biçimde homojen dönüşüm matrisleriyle oluşturulan doğrusal olmayan denklemlerin çözülmesidir [43,50].



Şekil 4.5. Ters ve düz kinematik analiz arasındaki ilişki [50].

Üç serbestlik dereceli bir manipülatöre ait homojen dönüşüm matrisi, eşitlik (4.15)'deki gibi ileri kinematik matrislerinin ard arda çarpılmasıyla bulunur.

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \quad (4.15)$$

Bulunan bu homojen dönüşüm matrisi, matris formunda eşitlik (4.16)'daki gibi gösterilir.

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Manipülatöre ait ileri dönüşüm matrisi bulunduğundan sonra ters kinematik çözüme geçilir. $[{}^0T_1]^{-1} \cdot {}^0T_3 = I$ ifadesine göre eşitlik (4.15)'deki denklemin her iki tarafı $[{}^0T_1]^{-1}$ ile çarpılarak eşitlik (4.17)'deki gibi bir denklem elde edilir.

$$[{}^0T_1]^{-1} \cdot {}^0T_3 = {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \quad (4.17)$$

Elde edilen bu denklem, matris formunda yazılır ve her iki tarafın eşitliğinin çözümü ile istenilen açılar bulunur. Diğer açılarının çözümü için de benzer şekilde denklemler eşitlik (4.18) ve (4.19)'daki gibi yazılır ve matris eşitliklerinden faydalanılarak bütün açılar bulunur.

$$[{}^0_1T]^{-1} \cdot {}^0_3T = {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (4.18)$$

$$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1} \cdot {}^0_3T = {}^2_3T \quad (4.19)$$

Ters kinematik çözüm yapılırken kullanılan bazı trigonometrik eşitlikler [23]:

$$\cos\theta = a \text{ ise } \theta = \arctan2(\pm\sqrt{1-a^2}, a) \quad (4.20)$$

$$\sin\theta = a \text{ ise } \theta = \arctan2(a, \pm\sqrt{1-a^2}) \quad (4.21)$$

$$\cos\theta = a \text{ ve } \sin\theta = b \text{ ise } \theta = \arctan2(b, a) \quad (4.22)$$

$$a \cdot \sin\theta + b \cdot \cos\theta = 0 \text{ ise} \quad (4.23)$$

$$\theta = \arctan2(-b, a) \text{ veya } \theta = \arctan2(b, -a) \quad (4.24)$$

$$a \cdot \sin\theta + b \cdot \cos\theta = c \text{ ise} \quad (4.25)$$

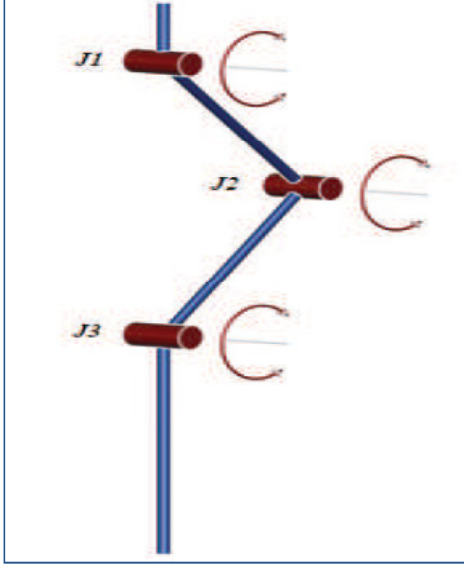
$$\theta = \arctan2(b, a) + \theta = \arctan2(\pm\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \quad (4.26)$$

4.8. Altı Bacaklı Robot İçin Kinematik Analiz

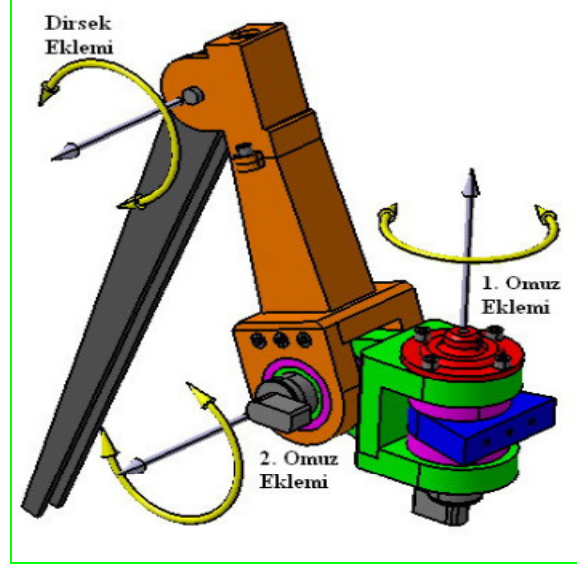
Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde bacaklı robotlarda yürüme işleminin gerçekleşebilmesi için her bir bacakta en az iki serbestlik derecesinin olması gerektiği görülür. Birinci serbestlik derecesi, bacağın havaya kalkmasını sağlarken, ikinci serbestlik derecesi de havada olan bacağı ileri itmeyi sağlar. Veya ikinci serbestlik derecesi, bacağın yerde olması durumunda gövdeyi ileri itmek için kullanılır. Altı bacaklı robotlar üzerinde yapılan çalışmalarda genellikle serbestlik derecesi 2 veya 3 olarak seçilir. Serbestlik derecesinin 3 'ten fazla olması durumunda robotun yürüyüşü ve kontrolü ve buna bağlı olarak ileri/ters kinematik çözüm güçleşir [51].

Üç serbestlik dereceli bacakların oluşturulmasında her serbestlik derecesi Şekil 4.6.'daki (omuz, dirsek, ayak) gibi birer ekleme yerleştirilerek yapılabildiği gibi, Şekil

4.7.'deki gibi eksen yerleşimi eklemlerde çakışık (1.omuz ve 2. omuz) olarak da tasarlanabilir [51-53].

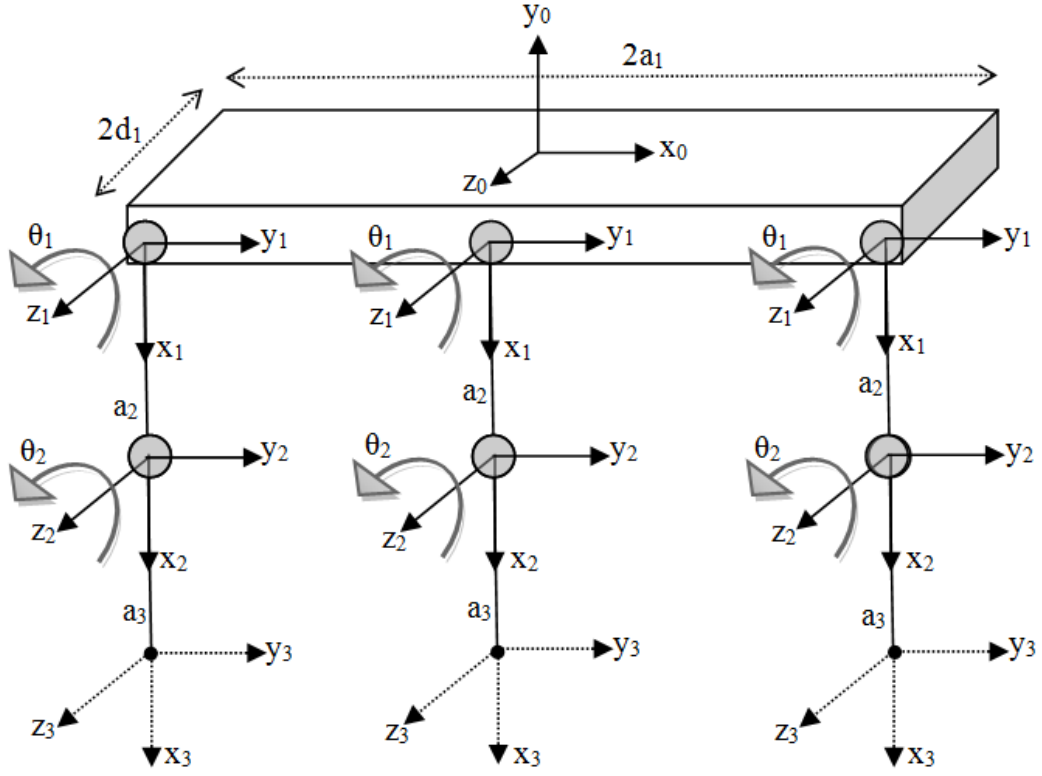


Şekil 4.6. Eklem yerleşimi-I [52].



Şekil 4.7. Eklem yerleşimi-II [51].

Bu tez çalışmasında maliyeti ve işlem karmaşıklığını azaltmak için Şekil 4.8.'deki 2 serbestlik dereceli altı bacaklı bir robot modellemesi üzerinde durulmuştur. Bu bölümün ilerleyen kısımlarında da bu modelin ileri ve ters kinematik çözümü yapılacaktır. Altı bacaklı modeldeki bacakların bağlı olduğu platformun sağ ve sol tarafında ön, orta ve arka bacaklar bulunmaktadır. Her iki tarafta bulunan bu ön, orta ve arka bacaklar birbirinin benzeri hareket ve yönelim gösterdiği için bunların kinematik çözümleri de benzer olmaktadır. Bu nedenle platformun sağ-ön, sağ-orta ve sağ-arka bacaklarının kinematik çözümü yapılacaktır.



Şekil 4.8. Altı bacaklı robotun sağ ön-sağ orta ve sağ arka bacaklarına eklem ve koordinat sistemi yerleşim gösterimi.

4.8.1. Altı Bacaklı Robot İçin İleri Kinematik Çözüm

4.8.1.1. Sağ Ön Bacak İçin İleri Kinematik Çözüm

Sağ ön bacağın ileri kinematik çözümü için D-H tablosu Tablo 4.1.' deki gibi yazılır. D-H tablosuna göre dönüşüm matrisleri (4.27)' deki genel dönüşüm matrisi kullanılarak elde edilir.

Tablo 4.1. Sağ ön bacak için D-H tablosu

θ_i	d_i	a_i	α_i
-90	d_1	a_1	0
θ_1	0	a_2	0
θ_2	0	a_3	0

Genel dönüşüm matrisi:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Platformun koordinat sistemini temsil eden 0. koordinat sistemi ile sağ ön bacağın 1. eklemine yerleştirilen 1. koordinat sistemi arasındaki 0_1T dönüşüm matrisi:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos(-90) & -\sin(-90) \cdot \cos(0) & \sin(-90) \cdot \sin(0) & a_1 \cdot \cos(-90) \\ \sin(-90) & \cos(-90) \cdot \cos(0) & -\cos(-90) \cdot \sin(0) & a_1 \cdot \sin(-90) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Sağ ön bacağın, birinci eklemine yerleştirilen 1. koordinat sistemi ile ikinci eklemine yerleştirilen 2. koordinat sistemi arasındaki 1_2T dönüşüm matrisi:

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \cdot \cos(0) & \sin(\theta_1) \cdot \sin(0) & a_2 \cdot \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \cdot \cos(0) & -\cos(\theta_1) \cdot \sin(0) & a_2 \cdot \sin(\theta_1) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & a_2 \cdot \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & a_2 \cdot \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Sağ ön bacağın ikinci eklemine yerleştirilen 2. koordinat sistemi ile bacağın ucuna yerleştirilen 3. koordinat sistemi arasındaki 2_3T dönüşüm matrisi:

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2).\cos(0) & \sin(\theta_2).\sin(0) & a_3.\cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2).\cos(0) & -\cos(\theta_2).\sin(0) & a_3.\sin(\theta_2) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_3.\cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_3.\sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Elde edilen dönüşüm matrisleri birbirleriyle çarpılarak manipülatöre ait dönüşüm matrisi eşitlik (4.35)' deki gibi bulunur.

$${}^0_3T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (4.35)$$

Eşitlik (4.36)' daki s=sin ve c=cos 'u ifade etmektedir.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} * & * & 0 & a_2.s(\theta_1) + a_3.c(\theta_1).s(\theta_2) + a_3.c(\theta_2).s(\theta_1) \\ * & * & 0 & a_3.s(\theta_1).s(\theta_2) - a_2.c(\theta_1) - a_3.c(\theta_1).c(\theta_2) - a_1 \\ * & * & 1 & d_1 \\ * & * & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3.\sin(\theta_1 + \theta_2) + a_2.\sin(\theta_1) \\ -\cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & -a_1 - a_3.\cos(\theta_1 + \theta_2) - a_2.\cos(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Sonuç olarak, sağ ön bacak için konum vektörleri:

$$P_x = a_3.\sin(\theta_1 + \theta_2) + a_2.\sin(\theta_1) \quad (4.38)$$

$$P_y = -a_1 - a_3.\cos(\theta_1 + \theta_2) - a_2.\cos(\theta_1) \quad (4.39)$$

$$P_z = d_1 \quad (4.40)$$

olarak bulunur.

4.8.1.2. Sağ Orta Bacak İçin İleri Kinematik Çözüm

Robotun hareket etmesiyle birlikte sağ orta bacak için değişmeyen parametreler, a_i uzuv uzunlukları ve eksen α_i eksen açılarıdır. Değişen parametreler ise eklem döner ise θ_i eklem açısı eğer eklem prizmatik ise d_i eklem kaçıklığıdır. Sağ orta bacak için D-H tablosu Tablo 4.2. 'deki gibi yazılır.

Tablo 4.2. Sağ orta bacak için D-H tablosu

θ_i	d_i	a_i	α_i
-90	d_1	0	0
θ_1	0	a_2	0
θ_2	0	a_3	0

Sağ orta bacak için dönüşüm matrisleri bulunurken, sağ ön bacak için yapılan işlemlerin benzeri bir yol izlenir. Platformun koordinat sistemini temsil eden 0. koordinat sistemi ile sağ orta bacağın 1. eklemine yerleştirilen 1. koordinat sistemi arasındaki 0_1T dönüşüm matrisi:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos(-90) & -\sin(-90) \cdot \cos(0) & \sin(-90) \cdot \sin(0) & a_1 \cdot \cos(-90) \\ \sin(-90) & \cos(-90) \cdot \cos(0) & -\cos(-90) \cdot \sin(0) & a_1 \cdot \sin(-90) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Sağ orta bacağın, birinci eklemine yerleştirilen 1. koordinat sistemi ile ikinci eklemine yerleştirilen 2. koordinat sistemi arasındaki 1_2T dönüşüm matrisi:

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \cdot \cos(\alpha_2) & \sin(\theta_1) \cdot \sin(\alpha_2) & a_2 \cdot \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \cdot \cos(\alpha_2) & -\cos(\theta_1) \cdot \sin(\alpha_2) & a_2 \cdot \sin(\theta_1) \\ 0 & \sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & a_2 \cdot \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & a_2 \cdot \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

Sağ orta bacağın, ikinci eklemine yerleştirilen 2. koordinat sistemi ile bacağın ucuna yerleştirilen 3. koordinat sistemi arasındaki 2_3T dönüşüm matrisi:

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) \cdot \cos(\alpha_3) & \sin(\theta_2) \cdot \sin(\alpha_3) & a_3 \cdot \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) \cdot \cos(\alpha_3) & -\cos(\theta_2) \cdot \sin(\alpha_3) & a_3 \cdot \sin(\theta_2) \\ 0 & \sin(\alpha_3) & \cos(\alpha_3) & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_3 \cdot \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_3 \cdot \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Elde edilen dönüşüm matrisleri birbirleriyle çarpılarak manipülatöre ait dönüşüm matrisi (4.49)'daki gibi bulunur.

$${}^0_3T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (4.47)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} * & * & 0 & a_2 \cdot s(\theta_1) + a_3 \cdot c(\theta_1) \cdot s(\theta_2) + a_3 \cdot c(\theta_2) \cdot s(\theta_1) \\ * & * & 0 & a_3 \cdot s(\theta_1) \cdot s(\theta_2) - a_3 \cdot c(\theta_1) \cdot c(\theta_2) - a_2 \cdot c(\theta_1) \\ * & * & 1 & d_1 \\ * & * & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot \sin(\theta_1) \\ -\cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & -a_3 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) - a_2 \cdot \cos(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Sağ orta bacak için konum vektörleri:

$$P_x = a_3 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot \sin(\theta_1) \quad (4.50)$$

$$P_y = -a_3 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) - a_2 \cdot \cos(\theta_1) \quad (4.51)$$

$$P_z = d_1 \quad (4.52)$$

şeklinde bulunur.

4.8.1.3. Sağ Arta Bacak İçin İleri Kinematik Çözüm

Robotun hareket etmesiyle birlikte sağ orta bacakta olduğu gibi sağ arka bacak için de değişmeyen parametreler, a_i uzuv uzunlukları ve eksen α_i eksen açılarıdır. Değişen parametreler ise eklem döner ise θ_i eklem açısı eğer eklem prizmatik ise d_i eklem kaçıklığıdır. Sağ arka bacak için D-H tablosu Tablo 4.3. 'deki gibi yazılır.

Tablo 4.3. Sağ arka bacak için D-H tablosu

θ_i	d_i	a_i	α_i
-90	d_1	- a_1	0
θ_1	0	a_2	0
θ_2	0	a_3	0

Platformun koordinat sistemini temsil eden 0. koordinat sistemi ile sağ arka bacağın 1. eklemine yerleştirilen 1. koordinat sistemi arasındaki 0_1T dönüşüm matrisi:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos(-90) & -\sin(-90) \cdot \cos(0) & \sin(-90) \cdot \sin(0) & a_1 \cdot \cos(-90) \\ \sin(-90) & \cos(-90) \cdot \cos(0) & -\cos(-90) \cdot \sin(0) & a_1 \cdot \sin(-90) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Sağ arka bacağın, birinci eklemine yerleştirilen 1. koordinat sistemi ile ikinci eklemine yerleştirilen 2. koordinat sistemi arasındaki 1_2T dönüşüm matrisi:

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1). \cos(\alpha_2) & \sin(\theta_1). \sin(\alpha_2) & a_2. \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1). \cos(\alpha_2) & -\cos(\theta_1). \sin(\alpha_2) & a_2. \sin(\theta_1) \\ 0 & \sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & a_2. \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & a_2. \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Sağ arka bacağın, ikinci eklemine yerleştirilen 2. koordinat sistemi ile bacağın ucuna yerleştirilen 3. koordinat sistemi arasındaki 2_3T dönüşüm matrisi:

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2). \cos(\alpha_3) & \sin(\theta_2). \sin(\alpha_3) & a_3. \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2). \cos(\alpha_3) & -\cos(\theta_2). \sin(\alpha_3) & a_3. \sin(\theta_2) \\ 0 & \sin(\alpha_3) & \cos(\alpha_3) & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_3. \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_3. \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

Elde edilen dönüşüm matrisleri birbirleriyle çarpılarak manipülatöre ait dönüşüm matrisi eşitlik (4.61)' deki gibi bulunur.

$${}^0_3T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (4.59)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} * & * & 0 & a_2.s(\theta_1) + a_3.c(\theta_1).s(\theta_2) + a_3.c(\theta_2).s(\theta_1) \\ * & * & 0 & a_1 - a_2.c(\theta_1) - a_3.c(\theta_1).c(\theta_2) + a_3.s(\theta_1).s(\theta_2) \\ * & * & 1 & d_1 \\ * & * & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3.\sin(\theta_1 + \theta_2) + a_2.\sin(\theta_1) \\ -\cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_1 - a_3.\cos(\theta_1 + \theta_2) - a_2.\cos(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

Sağ arka bacak için konum vektörleri:

$$P_x = a_3.\sin(\theta_1 + \theta_2) + a_2.\sin(\theta_1) \quad (4.62)$$

$$P_y = a_1 - a_3.\cos(\theta_1 + \theta_2) - a_2.\cos(\theta_1) \quad (4.63)$$

$$P_z = d_1 \quad (4.64)$$

şeklinde bulunur.

Platformun solundaki üç bacak içinde benzer şekilde ileri kinematik çözüm yapılır. Çözüm yapılırken dikkat edilmesi gereken tek nokta, üç bacak için oluşturulacak D-H tablosunda “ d_i ” parametresinin değerleri sağ bacaklar için alınan değerlerin (-)’ lisi olarak alınır.

4.8.2. Altı Bacaklı Robot İçin Ters Kinematik Çözüm

Ters kinematik çözümde, ileri kinematik çözümlerde elde edilen konumlara göre her bir eklemin açısal değeri bulunur. Her bacak için manipülatöre ait dönüşüm matrisi (0_3T) eşitlik (4.65)’ deki forma dönüştürülerek ters kinematik denklem çözümü yapılır.

$${}^0_3T = A = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

4.8.2.1. Sağ Ön Bacak İçin Ters Kinematik Çözüm

${}^0_3T = A$ ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir. (0_3T matrisi, sağ ön bacak için manipülatöre ait dönüşüm matrisi)

$$\begin{bmatrix} s(\theta_1 + \theta_2) & * & 0 & a_3 \cdot s(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot s(\theta_1) \\ -c(\theta_1 + \theta_2) & * & 0 & -a_1 - a_3 \cdot c(\theta_1 + \theta_2) - a_2 \cdot c(\theta_1) \\ 0 & * & 1 & d_1 \\ 0 & * & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

θ_1 açısının bulunması:

$$A = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad \text{ifadesinde eşitliğin her iki tarafı } [{}^0_1T]^{-1} \text{ ile çarpıldığında,} \quad (4.67)$$

$$[{}^0_1T]^{-1} \cdot A = {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad \text{gibi yazılabilir. } ([{}^0_1T]^{-1} \cdot {}^0_1T = I) \quad (4.68)$$

$$[{}^0_1T]^{-1} \cdot A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -a_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_y & -o_y & -a_y & -a_1 - p_y \\ n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_z & o_z & a_z & p_z - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

$${}^1_2T \cdot {}^2_3T = \begin{bmatrix} c(\theta_1 + \theta_2) & -s(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3 \cdot c(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot c(\theta_1) \\ s(\theta_1 + \theta_2) & c(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3 \cdot s(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot s(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

Eşitlik (4.69) ve eşitlik (4.70)' deki matrisler birbirine eşit olduğundan aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$-a_1 - p_y = a_3 \cdot c(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot c(\theta_1) \quad (4.71)$$

$$p_x = a_3 \cdot s(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot s(\theta_1) \quad (4.72)$$

Eşitlik (4.71) ve (4.72)'deki denklemler aşağıdaki gibi düzenlenip, iki tarafında karesi alınır.

$$(-a_1 - p_y - a_2 \cdot c(\theta_1))^2 = (a_3 \cdot c(\theta_1 + \theta_2))^2 \quad (4.73)$$

$$(p_x - a_2 \cdot s(\theta_1))^2 = (a_3 \cdot s(\theta_1 + \theta_2))^2 \quad (4.74)$$

Eşitlik (4.73) ve eşitlik (4.74)' deki denklemler aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$a_1^2 + p_y^2 + a_2^2 \cdot s(\theta_1)^2 + 2 \cdot (a_1 \cdot p_y + a_1 \cdot a_2 \cdot c(\theta_1) + p_y \cdot a_2 \cdot c(\theta_1)) = a_3^2 \cdot c(\theta_1 + \theta_2)^2 \quad (4.75)$$

$$p_x^2 + a_2^2 \cdot s(\theta_1)^2 - 2 \cdot p_x \cdot a_2 \cdot s(\theta_1) = a_3^2 \cdot s(\theta_1 + \theta_2)^2 \quad (4.76)$$

Eşitlik (4.75) ve eşitlik (4.76)'daki denklemler taraf tarafa toplanıp düzenlenirse,

$$(-2 \cdot p_x \cdot a_2) \cdot s(\theta_1) + (2 \cdot a_1 \cdot a_2 + 2 \cdot p_y \cdot a_2) \cdot c(\theta_1) = a_3^2 - a_1^2 - a_2^2 - p_y^2 - p_x^2 - 2 \cdot p_y \cdot a_1 \quad (4.77)$$

bulunur. Bu denklem,

$$a \cdot \sin \theta + b \cdot \cos \theta = c \text{ ise} \quad (4.25)$$

$$\theta = \arctan 2(b, a) + \theta = \arctan 2(\pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, -c) \quad (4.26)$$

eşitliğinden faydalanılarak çözüldüğünde,

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \arctan 2((2 \cdot a_1 \cdot a_2 + 2 \cdot p_y \cdot a_2), (-2 \cdot p_x \cdot a_2)) \\ + \theta_1 &= \\ \arctan 2 \left(\pm \sqrt{(-2 \cdot p_x \cdot a_2)^2 + (2 \cdot a_1 \cdot a_2 + 2 \cdot p_y \cdot a_2)^2 - (a_3^2 - a_1^2 - a_2^2 - p_y^2 - p_x^2 - 2 \cdot p_y \cdot a_1)^2}, (a_3^2 - a_1^2 - a_2^2 - p_y^2 - p_x^2 - 2 \cdot p_y \cdot a_1) \right) \end{aligned}$$

olarak bulunur.

θ_2 açısının bulunması:

$A = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T$ ifadesinde eşitliğin her iki tarafı $[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1}$ ile çarpıldığında,

$$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1} \cdot A = {}^2_3T \text{ gibi yazılabilir.} \quad (4.78)$$

$$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1} \cdot A = \begin{bmatrix} * & * & a_x \cdot s(\theta_1) - a_y \cdot c(\theta_1) & p_x \cdot s(\theta_1) - a_1 \cdot c(\theta_1) - p_y \cdot c\theta_1 - a_2 \\ * & * & a_x \cdot c(\theta_1) + a_y \cdot s(\theta_1) & p_x \cdot c(\theta_1) + a_1 \cdot s(\theta_1) + p_y \cdot s(\theta_1) \\ * & * & a_z & p_z - d_1 \\ * & * & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

$${}_3^2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_3 \cdot \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_3 \cdot \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.80)$$

Eşitlik (4.79) ve eşitlik (4.80)' deki matrisler birbirine eşit olduğundan aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$p_x \cdot s(\theta_1) - a_1 \cdot c(\theta_1) - p_y \cdot c\theta_1 - a_2 = a_3 \cdot \cos(\theta_2) \quad (4.81)$$

$$p_x \cdot c(\theta_1) + a_1 \cdot s(\theta_1) + p_y \cdot s(\theta_1) = a_3 \cdot \sin(\theta_2) \quad (4.82)$$

Eşitlik (4.81) ve eşitlik (4.82)' deki denklemlerin kareleri alınıp gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$(p_x \cdot s(\theta_1) - a_1 \cdot c(\theta_1) - p_y \cdot c\theta_1 - a_2)^2 = (a_3 \cdot \cos(\theta_2))^2 \quad (4.83)$$

$$(p_x \cdot c(\theta_1) + a_1 \cdot s(\theta_1) + p_y \cdot s(\theta_1))^2 = (a_3 \cdot \sin(\theta_2))^2 \quad (4.84)$$

$$a_2^2 + a_3^2 + 2 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \cos(\theta_2) = p_x^2 + a_1^2 + p_y^2 + 2 \cdot p_y \cdot a_1 \quad (4.85)$$

$$\cos(\theta_2) = \frac{p_x^2 + a_1^2 + p_y^2 + 2 \cdot p_y \cdot a_1 - (a_2^2 + a_3^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3} \quad (4.86)$$

olarak bulunur ve eşitlik (4.86)' deki ifade eşitlik (4.20)' den faydalanılarak

$$\cos \theta = a \text{ ise } \theta = \arctan 2(\pm \sqrt{1 - a^2}, a) \quad (4.20)$$

$$\theta_2 = \arctan 2 \left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{p_x^2 + a_1^2 + p_y^2 + 2.p_y.a_1 - (a_2^2 + a_3^2)}{2.a_2.a_3} \right)^2}, \left(\frac{p_x^2 + a_1^2 + p_y^2 + 2.p_y.a_1 - (a_2^2 + a_3^2)}{2.a_2.a_3} \right) \right) \quad (4.87)$$

şeklinde bulunur.

4.8.2.2. Sağ Orta Bacak İçin Ters Kinematik Çözüm

${}^0_3T = A$ ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir. (0_3T matrisi, sağ arka bacak için manipülatöre ait dönüşüm matrisi)

$$\begin{bmatrix} s(\theta_1 + \theta_2) & c(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3.s(\theta_1 + \theta_2) + a_2.s(\theta_1) \\ -c(\theta_1 + \theta_2) & s(\theta_1 + \theta_2) & 0 & -a_3.c(\theta_1 + \theta_2) - a_2.c(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.88)$$

θ_1 açısının bulunması:

$A = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T$ ifadesinde eşitliğin her iki tarafı $[{}^0_1T]^{-1}$ ile çarpıldığında,

$[{}^0_1T]^{-1} \cdot A = {}^1_2T \cdot {}^2_3T$ gibi yazılabilir. ($[{}^0_1T]^{-1} \cdot {}^0_1T = I$)

$$[{}^0_1T]^{-1} \cdot A = \begin{bmatrix} -n_y & -o_y & -a_y & -p_y \\ n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_z & o_z & a_z & p_z - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.89)$$

$${}^1_2T \cdot {}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3.\cos(\theta_1 + \theta_2) + a_2.\cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3.\sin(\theta_1 + \theta_2) + a_2.\sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.90)$$

Eşitlik (4.89) ve eşitlik (4.90)' deki matrisler birbirine eşit olduğundan aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$-p_y = a_3 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot \cos(\theta_1) \quad (4.91)$$

$$p_x = a_3 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot \sin(\theta_1) \quad (4.92)$$

Eşitlik (4.91) ve (4.92)' deki denklemler aşağıdaki gibi düzenlenip, iki tarafında karesi alınır.

$$(-p_y - a_2 \cdot \cos(\theta_1))^2 = (a_3 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2))^2 \quad (4.93)$$

$$(p_x - a_2 \cdot \sin(\theta_1))^2 = (a_3 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2))^2 \quad (4.94)$$

Eşitlik (4.93) ve eşitlik (4.94)' deki denklemler taraf tarafa toplanıp gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$(-2 \cdot p_x \cdot a_2) \cdot \sin(\theta_1) + (-2 \cdot p_y \cdot a_2) \cdot \cos(\theta_1) = a_3^2 - a_2^2 - p_y^2 - p_x^2 \quad (4.95)$$

elde edilir. Elde edilen bu denklem,

$$a \cdot \sin \theta + b \cdot \cos \theta = c \text{ ise} \quad (4.25)$$

$$\theta = \arctan 2(b, a) + \theta = \arctan 2(\pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \quad (4.26)$$

eşitliğinden faydalanılarak,

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \arctan 2((-2 \cdot p_y \cdot a_2), (-2 \cdot p_x \cdot a_2)) + \\ \theta_1 &= \\ \arctan 2 \left(\pm \sqrt{(-2 \cdot p_x \cdot a_2)^2 + (-2 \cdot p_y \cdot a_2)^2 - (a_3^2 - a_2^2 - p_y^2 - p_x^2)^2}, (a_3^2 - a_2^2 - p_y^2 - p_x^2) \right) \end{aligned} \quad (4.96)$$

olarak bulunur.

θ_2 açısının bulunması:

$A = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T$ ifadesinde eşitliğin her iki tarafı $[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1}$ ile çarpıldığında,

$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1} \cdot A = {}^2_3T$ gibi yazılabilir.

$$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1} \cdot A = \begin{bmatrix} * & * & a_x \cdot s(\theta_1) - a_y \cdot c(\theta_1) & p_x \cdot s(\theta_1) - p_y \cdot c(\theta_1) - a_2 \\ * & * & a_x \cdot c(\theta_1) + a_y \cdot s(\theta_1) & p_x \cdot c(\theta_1) + p_y \cdot s(\theta_1) \\ * & * & a_z & p_z - d_1 \\ * & * & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.97)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_3 \cdot \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_3 \cdot \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.98)$$

Eşitlik (4.97) ve eşitlik (4.98)' deki matrisler birbirine eşit olduğundan aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$p_x \cdot s(\theta_1) - p_y \cdot c(\theta_1) - a_2 = a_3 \cdot \cos(\theta_2) \quad (4.99)$$

$$p_x \cdot c(\theta_1) + p_y \cdot s(\theta_1) = a_3 \cdot \sin(\theta_2) \quad (4.100)$$

Eşitlik (4.99) ve (4.100)' deki denklemler aşağıdaki gibi düzenlenip, iki tarafında karesi alınır.

$$(p_x \cdot s(\theta_1) - p_y \cdot c(\theta_1))^2 = (a_3 \cdot \cos(\theta_2) + a_2)^2 \quad (4.101)$$

$$(p_x \cdot c(\theta_1) + p_y \cdot s(\theta_1))^2 = (a_3 \cdot \sin(\theta_2))^2 \quad (4.102)$$

İki denklem beraber çözülüp gerekli düzeltmeler yapıldığında,

$$p_x^2 + p_y^2 = a_3^2 + a_2^2 + 2 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \cos(\theta_2) \quad (4.103)$$

$$\cos(\theta_2) = \frac{p_x^2 + p_y^2 - (a_3^2 + a_2^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3} \quad (4.104)$$

elde edilir. Elde edilen bu ifade,

$$\cos\theta = a \text{ ise } \theta = \arctan2(\pm\sqrt{1-a^2}, a) \quad (4.20)$$

denkleminde faydalanılarak,

$$\theta_2 = \arctan2\left(\pm\sqrt{1 - \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - (a_3^2 + a_2^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3}\right)^2}, \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - (a_3^2 + a_2^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3}\right)\right) \quad (4.105)$$

şeklinde bulunur.

4.8.2.3. Sağ Arka Bacak İçin Ters Kinematik Çözüm

${}^0_3T = A$ ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir. (0_3T matrisi, sağ arka bacak için manipülatöre ait dönüşüm matrisi)

$$\begin{bmatrix} s(\theta_1 + \theta_2) & * & 0 & a_3 \cdot s(\theta_1 + \theta_2) + a_2 \cdot s(\theta_1) \\ -c(\theta_1 + \theta_2) & * & 0 & a_1 - a_3 \cdot c(\theta_1 + \theta_2) - a_2 \cdot c(\theta_1) \\ 0 & * & 1 & d_1 \\ 0 & * & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.106)$$

θ_1 açısının bulunması:

$A = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T$ ifadesinde eşitliğin her iki tarafı $[{}^0_1T]^{-1}$ ile çarpıldığında,

$[{}^0_1T]^{-1} \cdot A = {}^1_2T \cdot {}^2_3T$ gibi yazılabilir. ($[{}^0_1T]^{-1} \cdot {}^0_1T = I$)

$$[{}^0_1T]^{-1} \cdot A = \begin{bmatrix} -n_y & -o_y & -a_y & a_1 - p_y \\ n_x & 0_x & a_x & p_x \\ n_z & 0_z & a_z & p_z - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.107)$$

$${}^1_2T \cdot {}^2_3T = \begin{bmatrix} c(\theta_1 + \theta_2) & -s(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3 * c(\theta_1 + \theta_2) + a_2 * c(\theta_1) \\ s(\theta_1 + \theta_2) & c(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_3 * s(\theta_1 + \theta_2) + a_2 * s(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.108)$$

Eşitlik (4.107) ve eşitlik (4.108)' deki matrisler birbirine eşit olduğundan aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$a_1 - p_y = a_3 * c(\theta_1 + \theta_2) + a_2 * c(\theta_1) \quad (4.109)$$

$$p_x = a_3 * s(\theta_1 + \theta_2) + a_2 * s(\theta_1) \quad (4.110)$$

Bu denklemler aşağıdaki gibi düzenlenip kareleri alınır.

$$(a_1 - p_y - a_2 * c(\theta_1))^2 = (a_3 * c(\theta_1 + \theta_2))^2 \quad (4.111)$$

$$(p_x - a_2 * s(\theta_1))^2 = (a_3 * s(\theta_1 + \theta_2))^2 \quad (4.112)$$

İki denklem beraber çözülüp gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$p_x^2 + p_y^2 + a_1^2 + a_2^2 - 2.p_x.a_2.s(\theta_1) + c(\theta_1).(2.a_2.p_y - a_1.a_2) - a_1.p_y = a_3^2 \quad (4.113)$$

$$(-2.p_x.a_2).s(\theta_1) + (2.a_2.p_y - a_1.a_2).c(\theta_1) = a_3^2 + a_1.p_y - (p_x^2 + p_y^2 + a_1^2 + a_2^2) \quad (4.114)$$

bulunur. Bulunan bu denklem,

$$a.\sin\theta + b.\cos\theta = c \text{ ise} \quad (4.25)$$

$$\theta = \arctan2(b, a) + \theta = \arctan2(\pm\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \quad (4.26)$$

eşitliğinden faydalanılarak,

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \text{artan2}((2 \cdot a_2 \cdot p_y - a_1 \cdot a_2), (-2 \cdot p_x \cdot a_2)) + \theta_1 \\ &= \text{artan2}\left(\pm \sqrt{(-2 \cdot p_x \cdot a_2)^2 + (2 \cdot a_2 \cdot p_y - a_1 \cdot a_2)^2 - (a_3^2 + a_1 \cdot p_y - (p_x^2 + p_y^2 + a_1^2 + a_2^2))^2}, (a_3^2 + a_1 \cdot p_y - (p_x^2 + p_y^2 + a_1^2 + a_2^2))\right)\end{aligned}\quad (4.115)$$

bulunur.

θ_2 açısının bulunması:

$A = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T$ ifadesinde eşitliğin her iki tarafı $[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1}$ ile çarpıldığında,

$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1} \cdot A = {}^2_3T$ gibi yazılabilir.

$$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1} \cdot A = \begin{bmatrix} * & * & a_x \cdot s(\theta_1) - a_y \cdot c(\theta_1) & a_1 \cdot c(\theta_1) - a_2 - p_y \cdot c(\theta_1) + p_x \cdot s(\theta_1) \\ * & * & a_x \cdot c(\theta_1) + a_y \cdot s(\theta_1) & p_x \cdot c(\theta_1) - a_1 \cdot s(\theta_1) + p_y \cdot s(\theta_1) \\ * & * & a_z & p_z - d_1 \\ * & * & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.116)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_3 \cdot \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_3 \cdot \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.117)$$

Eşitlik (4.116) ve eşitlik (4.117)' deki matrisler birbirine eşit olduğundan aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$a_1 \cdot c(\theta_1) - a_2 - p_y \cdot c(\theta_1) + p_x \cdot s(\theta_1) = a_3 \cdot \cos(\theta_2) \quad (4.118)$$

$$p_x \cdot c(\theta_1) - a_1 \cdot s(\theta_1) + p_y \cdot s(\theta_1) = a_3 \cdot \sin(\theta_2) \quad (4.119)$$

Bu denklemler aşağıdaki gibi düzenlenip kareleri alınır.

$$(a_1 \cdot c(\theta_1) - p_y \cdot c(\theta_1) + p_x \cdot s(\theta_1))^2 = (a_3 \cdot c(\theta_2) + a_2)^2 \quad (4.120)$$

$$(p_x \cdot c(\theta_1) - a_1 \cdot s(\theta_1) + p_y \cdot s(\theta_1))^2 = (a_3 \cdot s(\theta_2))^2 \quad (4.121)$$

İki denklem beraber çözülüp gerekli sadeleştirmeler yapıldığında,

$$a_1^2 + p_x^2 + p_y^2 - 2 \cdot a_1 \cdot p_y = a_2^2 + a_3^2 + 2 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot c(\theta_2) \quad (4.122)$$

$$c(\theta_2) = \frac{a_1^2 + p_x^2 + p_y^2 - 2 \cdot a_1 \cdot p_y - (a_2^2 + a_3^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3} \quad (4.123)$$

bulunur.

$$\cos \theta = a \text{ ise } \theta = \arccos(\pm \sqrt{1 - a^2}, a) \quad (4.20)$$

denklemden faydalanılarak,

$$\theta_2 = \arccos\left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{a_1^2 + p_x^2 + p_y^2 - 2 \cdot a_1 \cdot p_y - (a_2^2 + a_3^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3}\right)^2}, \left(\frac{a_1^2 + p_x^2 + p_y^2 - 2 \cdot a_1 \cdot p_y - (a_2^2 + a_3^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3}\right)\right) \quad (4.121)$$

olarak bulunur.

Altı bacaklı robotun dengeli ve uygun bir yürüme şekli için bacak eklemlerinin alacağı maximum ve minimum değer aralığı sistemin yapısı da göz önüne alınarak Tablo 4.4.'deki değer aralığında seçilmiştir. Aksi halde yürüme sırasında ayakların çarpışması ve dengede duramaması gibi durumlar oluşabilir.

Tablo 4.4. Eklemlerin açı değerleri

	min.	max.
θ_1	-90	+90
θ_2	-180	+180

5. ROBOT DİNAMİĞİ

Bir robot kolunun dinamik modeli, robot kolunun dinamik davranışını belirleyen hareket denklemlerinden oluşur. Robot kolunun dinamik analizi, eklemlere, tahrik elemanları tarafından uygulanan moment veya kuvvet büyüklükleri ile robot kolunun zamana göre konumu, hızı ve ivmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesidir. Böyle bir analizin yapılabilmesi için, robot kolunun dinamik davranışını tanımlayan, doğrusal olmayan diferansiyel denklem takımlarının elde edilmesi ve çözülmesi gerekir. Robotun doğası gereğince robot dinamiği problemi ikiye ayrılmaktadır.

5.1. Düz Dinamik

Herhangi bir t anında istenen moment ve kuvvetler verildiğinde robot kolunun alacağı konum için gerekli olan genelleştirilmiş koordinatları, eklem hız ve ivmelerini bulma problemidir.

5.2. Ters Dinamik

Ters dinamik, robot kolunun istenen bir konuma gelmesi için genelleştirilmiş koordinatları, hızı ve ivmesi verildiğinde, bu noktaya gelebilmesi için tahrik elemanlarının üreteceği moment ve kuvvetlerin bulunması işlemidir. Robot kollarının dinamik denklemlerini elde etmek için literatürde bilinen birçok yöntemden bazıları şunlardır:

- Lagrange-Euler (L-E) yöntemi
- Rekürsif Lagrange (R-L) yöntemi
- Newton-Euler (N-E) yöntemi
- Genelleştirilmiş D'Alembert (G-D) yöntemi

Bu yöntemlerden, robot kollarının modellenmesi ile ilgili literatürde en çok kullanılanları (L-E) ve (N-E) formülasyonları olmuştur. Lagrange-Euler (L-E) formülasyonun da sistem dinamik davranışı, genelleştirilmiş koordinatları kullanan iş ve enerji ifadelerinden elde edilir. (L-E) denklemlerinin üretilmesi basit ve sistematiktir. Bu

yönü ile MATLAB Simulink Simülasyon paket programı için de oldukça uygun bir yapıya sahiptir. Ancak (L-E) denklemleri kullanılarak yapılacak düz ve ters dinamik probleminin çözümü aşırı miktarda aritmetik işlem gerektirmesi, karmaşık, nonlineer ve sonuç olarak verimsiz olması nedeni ile gerçek-zaman uygulaması için her zaman uygun değildir. Ancak buna rağmen bilgisayar teknolojisindeki çok hızlı gelişmeler nedeni ile kullanılabileceğini söylemek mümkündür [24,45].

Genel dinamik denklem aşağıdaki gibidir [53]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial K}{\partial q} + \frac{\partial P}{\partial q} = \underline{Q}_{nc}^T \quad (5.1)$$

5.3. Lagrange Methodu

Dinamik modellemede genellikle kullanılan metot, lagrange-euler metodudur. Genel lagrange formülasyonu,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right\} - \frac{\partial L}{\partial q} = \frac{\partial \pi}{\partial \dot{q}} \quad (5.2)$$

şeklinde gösterilir [54].

$$\text{Ayrıca } L = T - V \text{ ile de ifade edilir.} \quad (5.3)$$

L: Lagrange

T:kinetik enerji

V:potansiyel enerji

t: zaman

$\dot{q}$: zaman türevi

q: durum değişkeni

π (pi): sistemin toplam girişi

olarak ifade edilir.

6. ALTI BACAĞLI ROBOT MODELİ İÇİN KONTROL

6.1. Kayma Kipli Kontrol Yöntemi

Kayma kipli kontrol (Sliding Mode Control, SMC), yetmişli yıllardan itibaren kontrol mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [55]. Özellikle kontrol tasarımlarında sıklıkla kullanılan PID gibi klasik kontrol yöntemlerinin tatmin edici sonuçlar vermemesi bu yöntemin cazip hale gelmesine neden olmuştur [56].

Kayma kipli kontrol, bir robust kontrol metodudur ve belirsizliklerin, parametre değişimlerinin ve dış bozucuların bulunduğu sürücü kontrol sistemlerinde uygulanabilir [57].

Bu kontrol yönteminin amacı, doğrusal olmayan(nonlinear) sistemlerin durum yörüngesini, durum uzayında tanımlanan bir yüzeye, diğer bir deyişle kayma yüzeyine yaklaştırmaktır. Bu sayede sistemin durum yörüngesinin sonraki zamanlarda bu yüzeyin üstünde kalması sağlanmış olur. Böylece sistemin durumu, tanımlanmış olan yüzeye yönlendirilecek ve sonraki zamanlarda yüzeyin üstünde kalmasını sağlayacak bir giriş sinyalinin belirlenmesine imkan verecektir. Ayrıca bu yöntemde amaçlanan diğer bir durum, sistem kaçınıcı dereceden olursa olsun sistemin davranışını birinci dereceye indirgeyecek kontrol girişini belirlemek ve sistemi birinci derece gibi davranmaya zorlamaktır. Modellenmemiş parametreler ve bozucu girişlerin etkisinin görüldüğü durumlarda bile kararlı ve dayanıklı bir kontrol sağlanmış olur.

Bu yöntemin diğer kontrol yöntemlerine göre önemli üstünlükleri, sistem ile ilgili parametre belirsizliklerine ve bozucu büyüklüklere karşı duyarsız olmasıdır. Bu duyarsızlık, sistemin kontrol edilmesinde sınırlayıcı etkileri olan; sistemin non-lineeritesi, parametre belirsizlikleri ve bozucu büyüklükleri gibi durumların modellenbilmesine imkan sağlar. Kayma kipli kontrol yöntemini üstün kılan diğer özellikler; kontrolör derecesinin sistem derecesinden küçük olması ve gürültü bastırabilmedir [55,58-60].

Kayma kipli kontrol yönteminin en büyük dezavantajı, kontrol sinyalinin bir değerden başka bir değere sonsuz hızda anahtarlanması durumudur. Bu yöntemin pratikteki uygulamalarında kalıcı durumda ulaşılmak istenilen nokta etrafında çatırdama(chattering) olarak bilinen yüksek frekans salınımları oluşur. Bu çatırdamayı yok etmeye veya azaltmaya yönelik son yıllarda birtakım çalışmalar mevcuttur [58,61].

6.2. Kayma Kipli Kontrolör Tasarımı

Kanonik formda ikinci dereceden tek girişli bir sistemi ele alalım [58,62]:

$$\dot{\underline{x}}(t) = A\underline{x}(t) + \underline{b}u(t) + \underline{d}f(t) \quad (6.1)$$

Burada $\underline{x}(t)$ durum vektörü, $\dot{\underline{x}}(t)$ durum vektörünün türevi, $u(t)$ kontrol sinyali, $f(t)$ bozucu girişi ve A , $\underline{b}$, $\underline{d}$ sabit matrislerdir. Parametre belirsizlikleri dikkate alınacak olursa (denklem 6.1);

$$\dot{\underline{x}}(t) = (A_n + \Delta A)\underline{x}(t) + (\underline{b}_n + \Delta \underline{b})u(t) + (\underline{d}_n + \Delta \underline{d})f(t) \quad (6.2)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada A_n , $\underline{b}_n$ ve $\underline{d}_n$ nominal sistem parametrelerinden oluşan matris ve vektörleri, ΔA , $\Delta \underline{b}$ ve $\Delta \underline{d}$ bilinmeyen sistem parametrelerinin belirsizliklerini gösteren matris ve vektörleri ifade etmektedir. Belirsizliklerin toplamını $L(\underline{x}, t)$ ile ifade edilirse;

$$L(\underline{x}, t) = B_p (\Delta A \underline{x}(t) + \Delta \underline{b} u(t) + \Delta \underline{d} f(t)). \quad (6.3)$$

olur. Burada B_p , $\underline{b}_n$ 'in sözde tersidir. Aslında $\underline{b}_n$ kare matris değildir ve gerçek anlamda tersi yoktur. Ancak tersi $B_p = (\underline{b}_n^T \underline{b}_n)^{-1} \underline{b}_n^T$ şeklinde hesaplanabilir. Ayrıca $|L(\underline{x}, t)| \leq L_{\max}$ şeklinde sınırlı olarak kabul edilmiştir. Denklem (6.3)'ü kullanarak denklem (6.2) yeniden yazılırsa;

$$\dot{\underline{x}}(t) = A_n \underline{x}(t) + \underline{b}_n (u(t) + L(\underline{x}, t)). \quad (6.4)$$

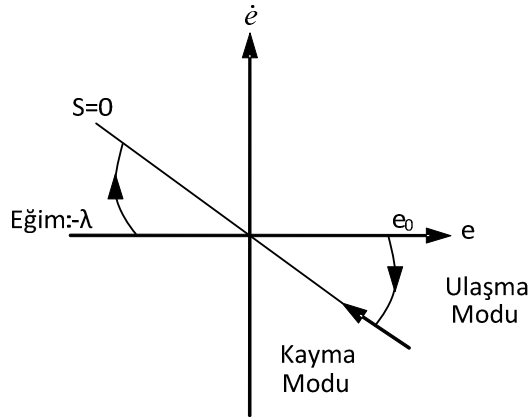
olarak ifade edilir. Böylece ikinci derece denklem parametre belirsizlikleri ile birlikte en genel haliyle tanımlanmış olur. Burada kontrolün amacı, model belirsizlikleri ve harici bozucular olsa bile $\underline{x}$ durum vektörünün ulaşmak istenilen durum vektörü $\underline{x}^d$ 'i izlemesinin sağlanmasıdır. İzleme hatasını,

$$\underline{e} = \underline{x} - \underline{x}_d = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = [e \quad \dot{e}]^T \quad (6.5)$$

ve anahtarlama fonksiyonunu ise;

$$S = \lambda e + \dot{e} = C \underline{e} \quad (6.6)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Burada $S = 0$ 'ın sağlanması durumunda, $\underline{x}$ 'in $\underline{x}_d$ 'yi izlemesi ve hatanın $1/\lambda$ zaman sabiti ile azalması sağlanmaktadır. İkinci derece bir sistem için kayma ve ulaşma modları Şekil 6.1.'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, ulaşma modu $S = 0$ doğrusuna ulaşma olarak tanımlanır. Kayma modu ise $\underline{e}$ 'nin $S = 0$ doğrusuna ulaştıktan sonra bozucu girişler ve parametre değişiklikleri altında bile, bu doğru üzerinden orijine kaymasıdır.



Şekil 6.1. İkinci derece bir sistem için ulaşma ve kayma modları

Orijine doğru kaymayı sağlayacak kontrol girişi u 'yu belirlemek için bir Lyapunov fonksiyonu kullanılır. Bir Lyapunov fonksiyonu;

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (6.7)$$

olarak tanımlanabilir. Lyapunov fonksiyonunun sürekli azalan olması ve kontrolün gerçekleşmesi için gerekli şart;

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt}(S^2) \leq -\eta|S| \quad (6.8)$$

olarak ifade edilir . η pozitif bir sayı olmak üzere ulaşma şartı ise;

$$\dot{S} \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta \quad (6.9)$$

olarak elde edilir. Burada,

$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} +1 & S > 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases}$$

olarak belirlenir. $S = 0$ ve $\dot{S} = 0$ olursa bu $S = 0$ doğrusu üzerinde hareket edildiğini gösterir. Sonsuz hızda anahtarlama için ortalama değer $S = 0$ doğrusu üzerinde olur.

Eğer bozucu girişlerin ve parametre değişikliklerinin olmadığı düşünülürse denklem (6.1);

$$\dot{\underline{x}}(t) = A_n \underline{x}(t) + \underline{b}_n u(t) \quad (6.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (6.6)'da eşitliğin her iki tarafının türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\dot{S} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} = 0 \quad (6.11)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemde, denklem (6.5) ve (6.10) yerine yazılırsa;

$$u_{eq} = (C \underline{b}_n)^{-1} C(\dot{\underline{x}}^d - A_n \underline{x}) \quad (6.12)$$

olarak bulunur. Buna eşdeğer kontrol kuralı denir. Bu yaklaşıma göre kontrol kuralı;

$$u = u_{eq} - u_{\max} \operatorname{sgn}(S) \quad (6.13)$$

olarak ifade edilir. Denklem (6.5) ve (6.6) kullanılarak, denklem (6.13), (6.4)'de yerine yazılırsa;

$$\dot{S} = C\underline{b}_n (-u_{\max} \operatorname{sgn}(S) + L) \quad (6.14)$$

elde edilir. Bu eşitlik S 'in dinamiğini belirler. Denklem (6.9), (6.14)'de yerine yazılırsa;

$$C\underline{b}_n u_{\max} \geq C\underline{b}_n L \operatorname{sgn}(S) + \eta \quad (6.15)$$

olur. Dayanıklı bir kontrolün sağlanması için,

$$\begin{aligned} C\underline{b}_n > 0 \quad \text{için} \quad u_{\max} &\geq L_{\max} + (C\underline{b}_n)^{-1} \eta \\ C\underline{b}_n < 0 \quad \text{için} \quad u_{\max} &\leq -L_{\max} + (C\underline{b}_n)^{-1} \eta \end{aligned} \quad (6.16)$$

olması gerekmektedir. Böylece denklem (6.2) ile ifade edilen sistem için dayanıklı bir kontrolör tasarlanmış olur.

6.3. Bulanık Mantık

Bulanık mantık kavramı ve bulanık küme teorisi, ilk kez 1965 yılında Prof. Dr. Lotfi A.Zadeh tarafından ortaya atılmıştır [63].

Bulanık kümelerle dayalı olan bulanık mantık kavramının ortaya çıkmasıyla beraber belirsizlik kavramının değerlendirilmesi yeni bir boyut kazanmıştır. Çünkü klasik mantıkta bir değişkenin doğruluğu 0 ya da 1 iken, Zadeh kesin olmayan sınırlara sahip nesnelerin bulunduğu bulanık küme teorisini ortaya koymuştur [64-66]. Böylece bulanık kümelerle dayalı olan bulanık mantık teorisinde, evrendeki bütün nesnelere $[0-1]$ kapalı aralığında bir üyelik derecesi atanarak onların matematiksel olarak tanımlanması sağlanmıştır [67].

Geleneksel var-yok mantığında kümeye kesinlikle ait ya da kesinlikle ait değil şeklindeki tanımlamaların aksine bulanık kümelerde üye olandan üye olmayana geçiş kesin biçimde olmaz ve her değere bir üyelik derecesi tanımlanarak insan düşüncesine özdeş işlemlerin gerçekleşmesi sağlanır. Bu durum belirsiz ve kesin olmayan verilerin modellenmesine de imkan sağlar [58,68]. Örneğin, günlük hayatta kullandığımız çok

soğuk, soğuk, ılık, çok sıcak gibi kavramlar kullanılmaktadır. Bu kavramlar arasındaki geçiş klasik mantıktaki kadar keskin değildir. Ancak bu doğal olayları bulanık kümelerle daha doğru karakterize etmek mümkündür [68].

Bu üyelik dereceleri de çeşitli üyelik fonksiyonları ile belirlenmektedir. Üyelik fonksiyonları çeşitlilik göstermekle beraber problemlere göre yeniden düzenlenebilmektedir. Bulanık mantıkta, bir elamanın kümeye üye olup olmadığının eğer üye ise hangi oranda üyesi olduğunun saptanması için üyelik fonksiyonları tanımlanır [69].

Bir bulanık A kümesi U uzayında tanımlanan ve $[0, 1]$ aralığında değerler alabilen $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonu ile gösterilsin. Bu küme,

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) / x \in U \} \text{ şeklinde gösterilir.}$$

Üyelik fonksiyonunun aldığı değerlere ise üyelik değerleri olarak tanımlanır ve $\mu_A(x)$, x'in bu uzaya ne kadar üye olduğunun ölçüsünü gösterir [68].

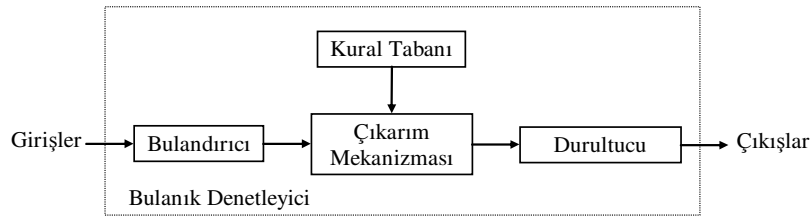
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{ise, } x \text{ tamamen } A \text{ kümesinin üyesidir.} \\ (0, 1) & \text{ise, kısmen } A \text{ kümesinin üyesidir.} \\ 0 & \text{ise, } A \text{ kümesinin üyesi değildir.} \end{cases}$$

Bulanık mantığın klasik mantık kurallarından farklı olarak üstünlükler içermesi, değişik alanlara uygulanabilir olması ve bulanık önermelere olanak sağlaması nedeniyle pek çok uygulamada kullanımı yaygınlık göstermiştir. İlk kez 1973 yılında H. Mamdani tarafından bir buhar makinesinde uygulanmış ve ticari olarak da ilk defa 1980 yılında Danimarka'daki bir çimento fabrikasının fırınıni kontrol etmek için kullanılmıştır [70].

Günümüzde de gerçekleştirilen birçok sistemde bulanık mantıklı kontrolcü kullanılmaktadır. Çünkü bir kontrol sistemi tasarımı yapılırken sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulur. Karışık olmayan ve lineer özellikte olan sistemleri modellemek zor değildir. Ancak gerçekleştirilen çoğu sistemin karmaşık ve doğrusal olmayan yapıda olması klasik yöntemlerle modellemeyi güçleştirmektedir. Bu sorunun çözümünü basitleştirmek için bulanık mantıkta matematik denklemleri yerine uzman bilgisi sistemi tanımlanır. Uzmanlığına başvuruolan operatör, "dilsel değişkenler" kullanarak esnek bir kontrol mekanizması oluşturur. Bu değişkenler günlük hayatta sıkça kullandığımız "sıcak,

çok sıcak, ılık, soğuk, çok soğuk” gibi temeli bulanık mantığa dayanan ifadelerdir. Bu şekilde bulanık mantık kontrolörün kuralları, insan düşünce tarzına uygun olarak oluşturulmuş olur. Daha sonra kontrol edilecek sürecin yönetimi için giriş ve çıkış ilişkisini belirleyen ve “IF-THEN” kurallarıyla oluşturulmuş bir algoritma hazırlanır. Algoritmanın hazırlanmasından sonra bulanık kontrolör, söz konusu kuralların o anki şartlara uygun olanların çalışmasıyla görev yapar [71].

Bulanık kontrol sistemlerinde kontrolör yapısı üç ana kısımdan oluşur ve Şekil 6.2’ deki gibi gösterilir [58,69].



Şekil 6.2. Bulanık kontrolörün genel yapısı [69].

• **Bulandırıcı:** Giriş değerlerinin çıkarım mekanizmasında kullanılabilmesi için, bulandırıcı bölümünde üyelik derecelerine dönüştürme işlemi yapılır.

• **Kural Tabanı ve çıkarım mekanizması:** Kural tabanı, uzman kişilerin sistem hakkındaki sözel ifadelerinden elde edilen “IF-THEN” yapılarından oluşur. Çıkarım mekanizmasında ise üç işlem gerçekleşir. İlk işlem, giriş değişkenlerinin üyelik dereceleri arasında AND, OR veya NOT işlemlerinden birinin kullanılması sonucunda her kural için bir kuralın “kesinlik derecesi” elde edilir. İkinci işlemde, kuralın kesinlik derecesi ile ilgili kuralın bulanık çıkış kümesi arasındaki “İma işlemi” gerçekleşir. İma işleminden sonra kural tabanındaki her kural bir “İma edilen bulanık çıkış kümesi” oluşturur. Son işlemde ise İma edilen bulanık çıkış kümelerini “TOPARLAMA” işlemidir. Toparlama işlemi sonrasında “sonuç bulanık çıkış kümesi” elde edilir.

TOPARLAMA işlemi için genellikle kullanılan operatörler:

AND	: <i>min</i> veya <i>cebirsel çarpma</i>
OR	: <i>max</i> veya <i>olasılık VEYA'sı</i>

İMA : *min veya cebirsel çarpma*
TOPARLAMA : *max veya cebirsel toplam*

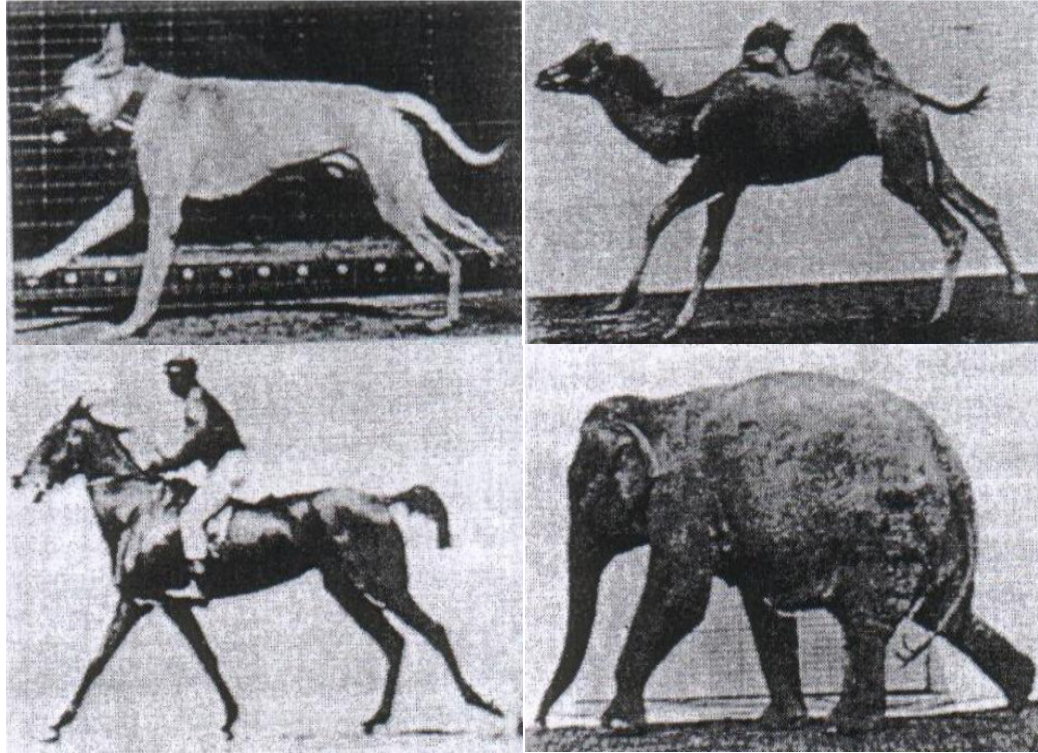
• **Durultma:** çıkarım mekanizmasının oluşturduğu sonuç bulanık çıkış kümesini kullanarak denetleyicinin çıkışını sayısal olarak hesaplar.

Bu tez çalışmasında altı bacaklı robotun denetimi, bulanık mantıklı kayma kipli kontrolör yardımıyla sağlanmıştır. Gerçekleştirilen sistemin nonlinear yapıda olması bu yöntemin seçilmesinde belirleyici olmuştur. Çünkü klasik kontrolörlerin (PI, PID) nonlinear sistemlere uygulanabilmesi için oldukça karmaşık olan matematiksel modellerinin çözülmesi gerekir. Ayrıca klasik kontrolör yöntemlerinin uygulandığı birçok nonlinear yapıdaki sistemler çoğu zaman iyi bir denetim performans göstermez. Kayma kipli kontrol yönteminde amaç, sistemi etkileyen parametre belirsizlikleri, dış bozucular ve parametre değişiklikleri engellenerek sistemin daha hassas, kararlı ve dayanıklı olmasını sağlamaktır. Bunu da hatayı “kayma yüzeyi”nde tutarak gerçekleştirir. Böylece sistem, “kayma kipinde”dir ve modelleme, hatalardan veya dış bozuculardan etkilenmez olur. Bu yöntemin uygulandığı bir çok sistemde sağlamlık özelliğiyle de başarılı sonuçlar elde edilmiştir [45,63,72]. Altı bacaklı Simmechanics modelin kontrolünde kullanılan bulanık mantıklı kayma kipli kontrolör ile ilgili ayrıntılı bilgi bölüm 9’da verilmiştir.

7. BACAKLI SİSTEMLERDE YÜRÜME ŞEKİLLERİ VE HAREKET

Bacaklı sistemlerde yürüme hareketi, destek safhası ve adım atma safhası olmak üzere iki adımda gerçekleşir. Destek safhasında olan bacaklar, gövdenin mümkün olduğu kadar zemine paralel kalmasını ve gövdenin zemine olan yüksekliğini korumaya çalışırken bir yandan da gövdenin ileriye taşınmasını sağlarlar. Adım atma safhasındaki bacaklar ise, havaya kalkıp yürüyüş yönünde hareket ederler ve gövdenin ilerlemesine yönelik hiçbir katkıları yoktur. Adım atma safhasındaki bacaklar yere temas ettiklerinde destek safhasına geçmiş olurlar ve destek safhasındaki bacaklarda adım atma safhasına geçerek sistemin ilerlemesini sağlarlar [51].

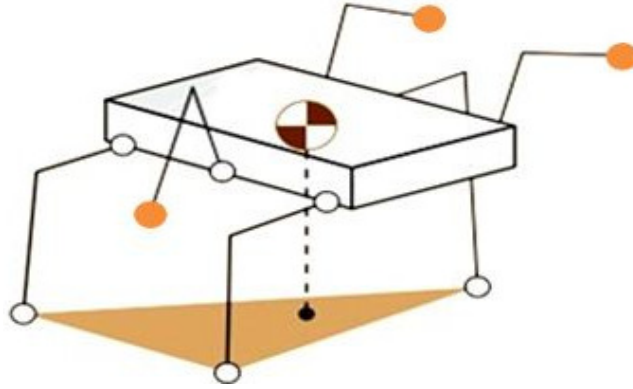
Robot sistemlerinde yürüme şekilleri oluşturulurken, canlılardaki hareket prensipleri göz önünde bulundurulur. Bu hareketler genellikle simetrik olarak gerçekleşir. Hareketin simetrik olması, tüm bacaklı hayvanlarda bacakların birbirleriyle uyumlu bir şekilde hareket etmesini sağlar. Hayvanlardaki bu simetri durumu robotik uygulamalarında da tercih edilir [28].



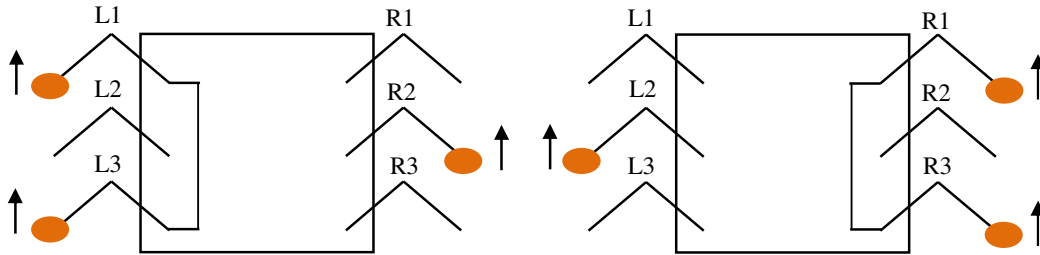
Şekil 7.1. Hayvanlarda Simetri [28].

Bacaklı sistemlerin hareketi esnasında karşılaşılan önemli bir problem dengedir. Bu nedenle doğadaki canlılardan esinlenerek oluşturulan robot sistemlerinde de denge problemi göz önünde bulundurulur. Dengenin sağlanmasına yönelik yapılan çalışmalarda ağırlık merkezinin, sistemin dengesini korumak için yere temas eden destek safhasındaki bacakların oluşturmuş olduğu alanın içinde kalması (Şekil 7.2) durumunda sistemin dengesinin bozulma ihtimalini ortadan kaldırdığı görülmüştür [32,39]. Örneğin, altı bacaklı hayvanlar (böcekler) tripod şeklinde yürürler. Tripod, bacakların Şekil 7.3.' deki gibi 3'erli gruplar halinde adım atması doğada en sık görülen altı bacaklı yürüyüş şekli olarak bilinir. Böceklerin de neredeyse tamamı altı bacaklıdır ve bacakların bu şekilde 3' erli gruplar halinde simetrik hareket etmesi, denge ile ilgili sorunları da ortadan kaldırmaktadır [32,51].

Bu çalışmada da denge ile ilgili sorunları ortadan kaldırmak ve hareketi basitleştirmek için bacaklar 3'erli gruplar halinde hareket ettirilecektir [34].



Şekil 7.2 Ağırlık merkezinin destek safhasındaki bacakların oluşturduğu alanın içinde kalması [39].



Şekil 7.3. Bacakların 3'erli gruplar (tripod) şeklinde hareket etmesi [34].

7.1. Altı Bacaklı Robot Modelinin Boyutları

Bu tez çalışmasında altı bacaklı bir sistemin dengeli ve kontrollü bir yürüme gerçekleştirmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle daha gerçekçi ve gerçekleştirilebilir tasarımlara katkısı olması hedeflenerek sistemin boyutları ve ağırlıkları herhangi bir model baz alınmadan belirlenmiştir. Sistemin her bir bacağı 20 cm uzunluğunda, platform boyutları ise $40 \times 20 \times 3 \text{ cm}^3$ olarak belirlenmiştir.

8. MATLAB/SIMULINK-SIMMECHANICS

Matlab/Simulink kütüphanesi altında çalışan SimMechanics, mekanik sistemlerin dinamik modellerinin oluşturulmasına imkan sağlayan blok topluluğudur. Bu blokların temelinde modeli oluşturulacak sisteme ait kuvvet, momentlerin Newton dinamikleri, üç boyutlu uzaydaki hareket ve davranışlarını belirleyen alt fonksiyonlara bağlı programcıklar bulunur [73].

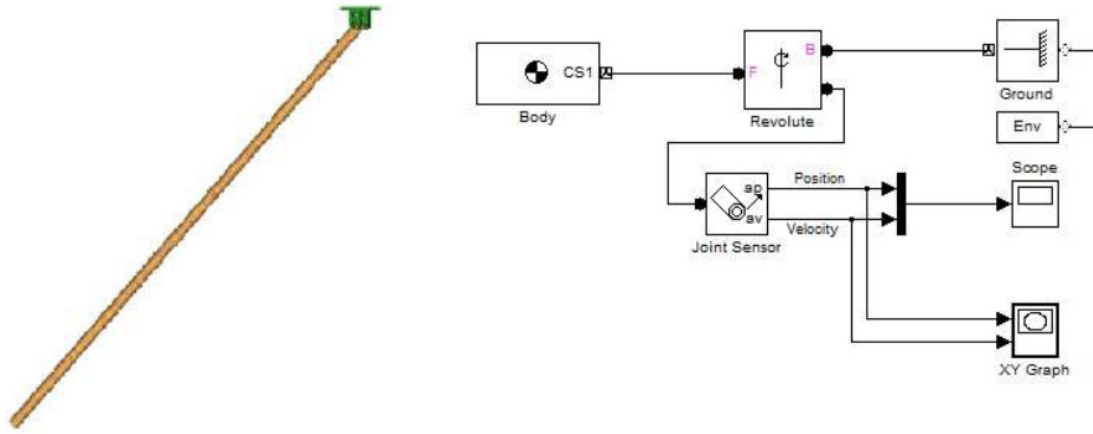
SimMechanics, simulink ortamı için geliştirilen ve fiziksel sistemlerin modellenmesinde kullanılan diğer programlar gibi Simscape üst grubuna bağlıdır. Simscape, Matlab ve Simulink ile bütünlük halinde çalışır. Fakat Simscape ortamında, matematiksel işlemleri sinyal akışları halinde düzenleyen blokların yerini fiziksel bileşenler ve ilintileri doğrudan temsil eden Simscape blokları almıştır. SimMechanics programının sunduğu araçlar ile makine uzuvlarına ait kütle özellikleri, hareketler, kinematik kısıtlamalar ve sahip oldukları koordinat takımlarının tanımlanması mümkündür. Ayrıca Simmechanics programı, mekanik sistemlere ait girişlerin (moment, kuvvet) bloklara iletilmesine ve sisteme ait çıkışların (ivme, konum, hız) da değerlendirilmesine imkan verir [74].

SimMechanics blokları yardımıyla oluşturulan modelin simülasyonu sayesinde model daha tasarım aşamasındayken, modelin dinamik ve kinematik karakteristikleri ile model için uygun olan kontrolün belirlenmesi mümkün olmaktadır [75]. SimMechanics programı yardımıyla oluşturulan simülasyon, görsel olarak mekanizmanın modelinin iyi bir şekilde anlaşılmasını sağlamakla beraber, sanal gerçeklikte, modelin motorlar, eklemler ve sensörler kullanarak yeniden oluşturulmasını sağlar. Ayrıca modelin gerçek sisteme uyumu açısından da önemli bir avantaj sağlar. Fakat SimMechanics modelde, blok içeriklerinin tam anlamıyla hangi dinamik öğeleri içerdiği görülmez ve modelin matematiği blokların içerisine gömülüdür denilebilir [73]. SimMechanics'te blokların bu özelliğe sahip olması, tasarımcıların oldukça karmaşık olan matematiksel hesaplamalara gerek duymadan hareketin analizini ve diğer parametrelerin sonuçlarını görmesini sağlar [76]. Ayrıca sistemin hareketlerini bir animasyon penceresinden izlemesine ve ilave bloklar yardımıyla da sistemin istenilen herhangi bir noktasından hız, ivme, kuvvet gibi değerleri okuyup grafiğe dökmesine imkan tanır [73].

Özetlemek gerekirse, blok diyagramları yardımıyla sistemin modelini kolay anlaşılır bir şekilde ifade etmesi, simülasyon esnasında modeli görsel olarak izlemenin mümkün olması ve modellerin hızlı bir şekilde oluşturulması simMechanics ile modellemenin bir avantajı gibi gözükse de, simülasyonun matematiksel fonksiyonlarının blokların ardında kalması bir dezavantajdır.

Bu tez çalışmasında da altı bacaklı robot modelinin dinamiklerini de içine alan gerçek zamanlı modelin simülasyonu Matlab/Simulink-SimMechanics blokları yardımıyla oluşturulmuştur.

SimMechanics blok kütüphaneleriyle oluşturulan örnek bir model ve kullanılan blokların işlevleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.1. SimMechanics blok kütüphaneleriyle oluşturulan örnek bir model

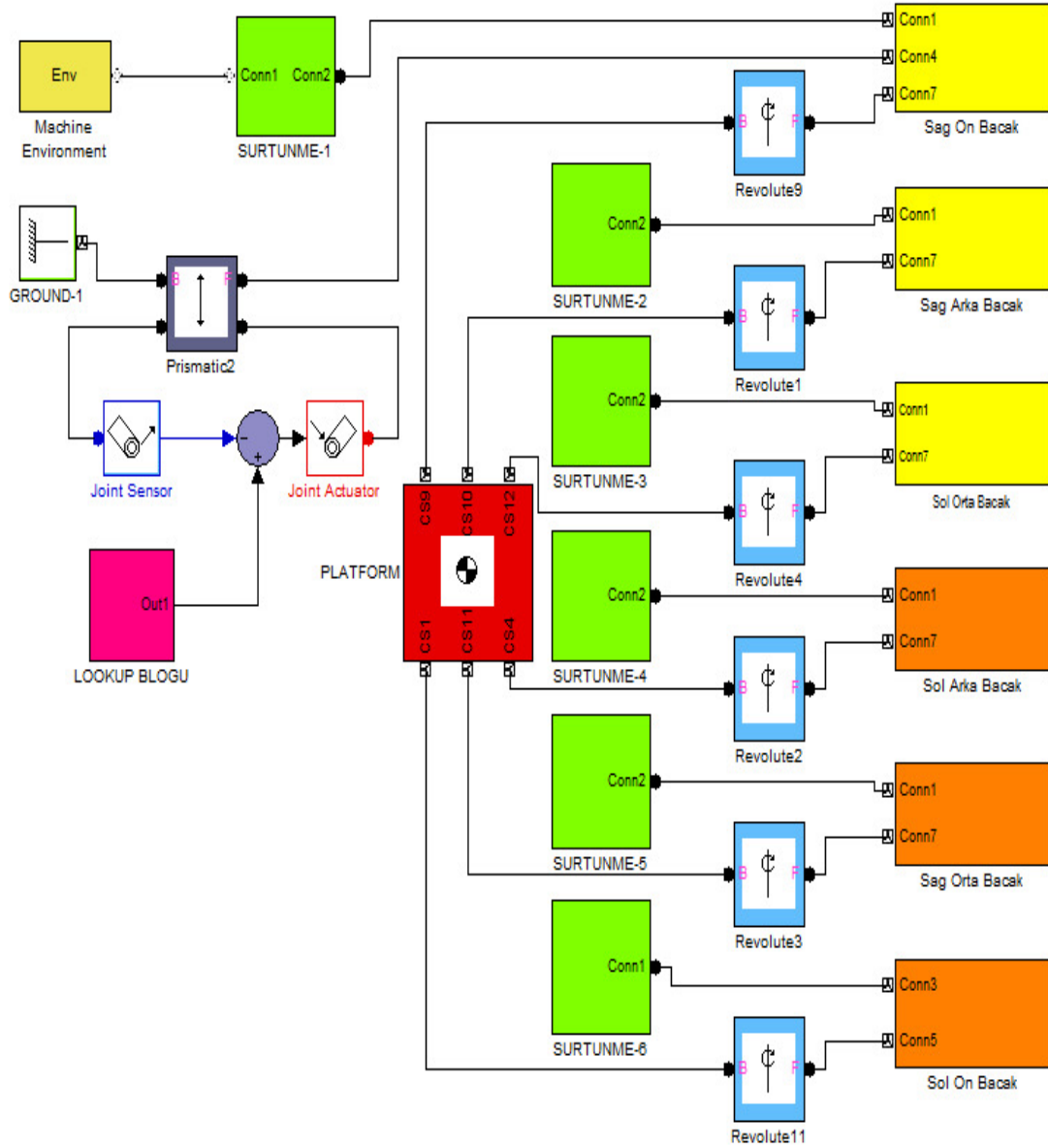
Şekil 8.1’de verilen sarkaç mekanizmasında “body” bloğu sarkaç gövdesini temsil etmektedir. Bu blokta kullanıcının; kütleyi, referans eksen takımına göre atalet matrisini ve ağırlık merkezinin koordinatlarını girmesi gerekmektedir. Girilen koordinatlar başlangıç konumu olacaktır. Modelin en kritik elemanlarından birisi olan ve “Revolute” olarak gösterilen blok sistemin başka bir sisteme veya sabit bir düzleme bağlandığı mafsalı veya eklemi temsil etmektedir. Bu blokta kullanıcı, eklemin hangi ekseninde serbestliği olduğunu girmelidir. “Ground” bloğu ise mekanizmanın bağlandığı sabit bir noktayı ifade etmektedir. Kullanıcı diğer bloklarda olduğu gibi burada da bu noktanın koordinatlarını girmelidir. “Env” bloğu ise başta yerçekimi vektörünün tanımlanması olmak üzere, mekanizmanın kaç boyutlu bir ortamda tanımlandığı, analiz metodu, doğrusallık ve görsellik bakımından mekanizmanın bulunduğu sanal ortamı temsil eder [73].

9. ALTI BACAKLI ROBOTUN SIMMECHANICS MODELİ

Robotik sistemlerin SimMechanics ortamında modellenmesi, özellikle gövde ve eklemlerin hazır bloklar yardımıyla tanımlanması sistem dinamik yapısının temsilinde büyük kolaylık ve hız sağlamaktadır.

Gerçekleştirilen bu çalışmanın da, gerçek uygulamaların donanımsal olarak benzetimi ve hızlı prototipleme uygulamaları için örnek olması amaçlanmıştır. Sistemin modellenmesi MATLAB/Simulink-SimMechanics blokları kullanılarak yapılmıştır. Bu blokların temelinde modellenen sisteme ait kuvvet, momentlerin Newton dinamikleri ve üç boyutlu uzaydaki hareket davranışlarını belirleyen fonksiyonlara bağlı programcıklar bulunur. Ayrıca SimMechanics programı, mekanik sistemlere ait girişlerin (moment, kuvvet) bu bloklara iletilmesine ve sisteme ait çıkışların (ivme, konum, hız) da değerlendirilmesine imkan verir. SimMechanics programı yardımıyla oluşturulan simülasyon, görsel olarak mekanizmanın modelinin iyi bir şekilde anlaşılmasını sağlamakla beraber, sanal gerçeklikte, modelin motorlar, eklemler ve sensörler kullanarak yeniden oluşturulmasını sağlar.

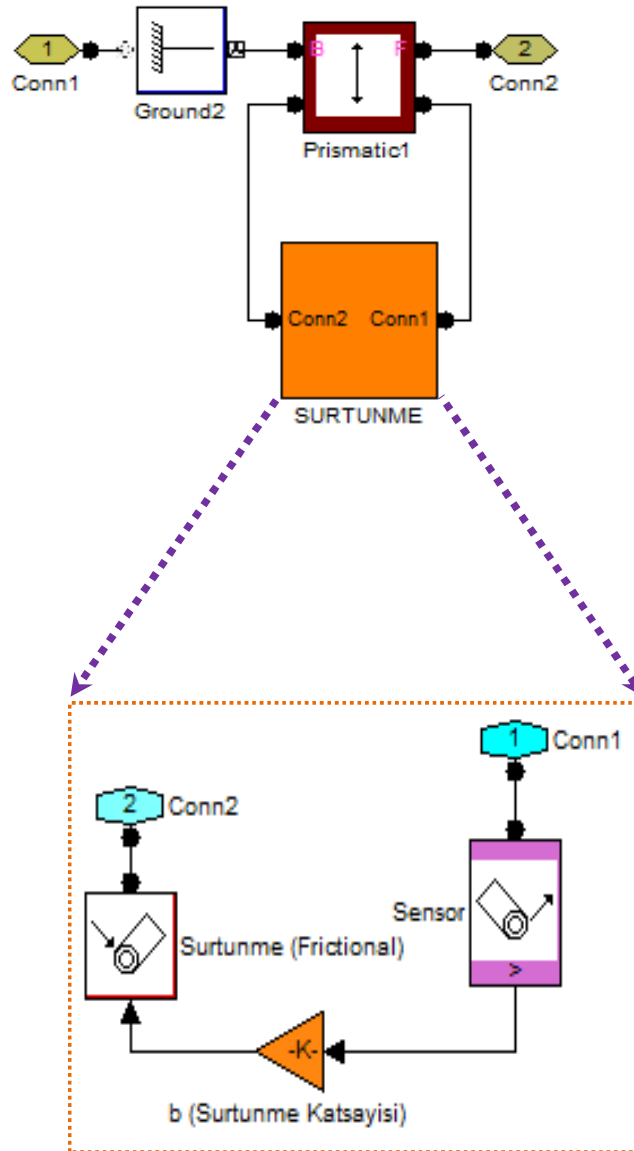
Bu çalışmada da altı bacaklı robotun tasarımı ve denetimi SimMechanics blokları kullanılarak aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 9.1. Altı bacaklı robotun SimMechanics modeli

Şekil 9.1. 'de altı bacaklı robotun SimMechanics modelindeki; “Env” bloğu, başta yerçekimi vektörünün tanımlanması olmak üzere, mekanizmanın kaç boyutlu bir ortamda tanımlandığı, analiz metodu, doğrusallık ve görsellik bakımından mekanizmanın bulunduğu sanal ortamı temsil eder. “Ground” bloğu da mekanizmanın bağlandığı sabit bir noktayı ifade etmektedir. Kullanıcı diğer bloklarda olduğu gibi burada da bu noktanın koordinatlarını girmelidir. Body blokları ise sistemin uzuvlarının kütle, ağırlık ve merkezi koordinat sistemine göre durumunun temsilini

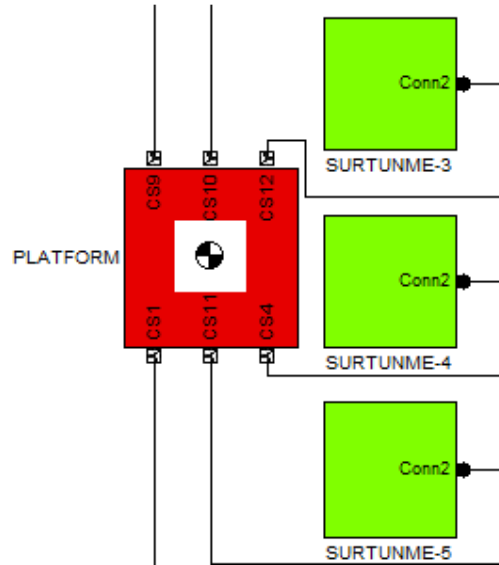
yapar. Joint blokları (prizmatik ve döner) ise, uzuvları birbirine bağlayan ve hareketi sağlayan eklemleri temsil eder. Ayrıca gerçek sistemdeki eklemlerin “z” eksenindeki serbestliğini de ifade etmektedir. Sistemin hareketi için gerekli tork değerleri “LOOKUP BLOĞU” içerisinde belirli bir zaman döngüsüyle sisteme uygulanacak şekilde tanımlanmıştır. Sistemin çıkış değerleri ile ilgili sonuçlar grafikler yardımıyla bu bölümün ilerleyen kısımlarında verilmiştir.



Şekil 9.2. Sürtünme bloğu (üstte) ve yapısı (altta)

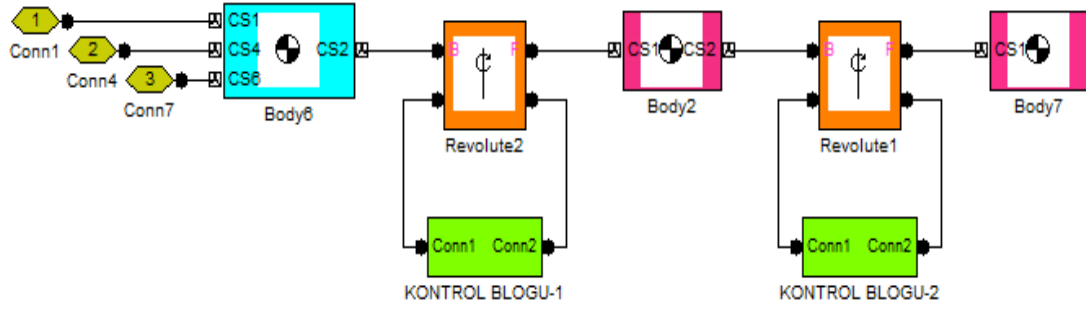
SimMechanics blokları yardımıyla oluşturulan modelin amacı, gerçek zamanlı uygulamaların hız, konum, ivme, açı değerlerini ve model uygulamaya geçirildiğinde karşılaşılabileceği sorunları önceden görmeyi sağlamaktır. Bu yüzden model üzerinden doğru sonuçların alınabilmesi için model benzetiminin yapıldığı ortam şartlarının, modelin uygulama sahaları ile benzer olması gerekmektedir. Bu sebeple Şekil 9.2.' de verilen "SURTUNME" bloğu SimMechanics ortamını gerçek uygulama sahalarına benzetmek amacıyla modele eklenmiştir. Çünkü sürtünmesiz ortamda hareket, doğru bir şekilde gerçekleşmediği gibi istenmeyen ileri-geri yön hareketlerinin kontrolü de mümkün olmamaktadır.

"SURTUNME" bloğunun yapısı Şekil 9.2.' de oklar yardımıyla gösterilmiştir. Bu yapı sistemin hız parametresini "Sensor" bloğu yardımıyla alıp "b" sürtünme katsayısı ile çarparak actuator bloğuna iletir ve actuator bloğu da sistemin prizmatik eklemine sürtünmenin uygulanmasını sağlar. Bu çalışmada, sürtünme kuvvetinin hareketin tersi yönde etki etmesi için "b" sürtünme katsayısı değeri -0,5 olarak alınmıştır.



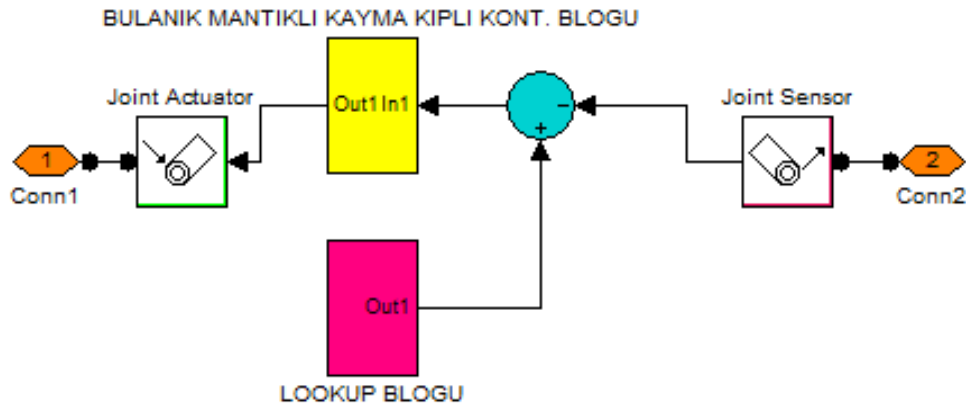
Şekil 9.3. Sistemin platform bloğu

Şekil 9.3.' teki "PLATFORM" adlı blok, altı bacağın bağlandığı üst platforma ait dinamikleri ifade eden bloğu oluşturur. Bu bloğa girilen parametreler yardımı ile modellenen nesneye ait kütle ve pozisyon gibi dinamik parametreler simülasyon içerisinde tanımlanmış olur.



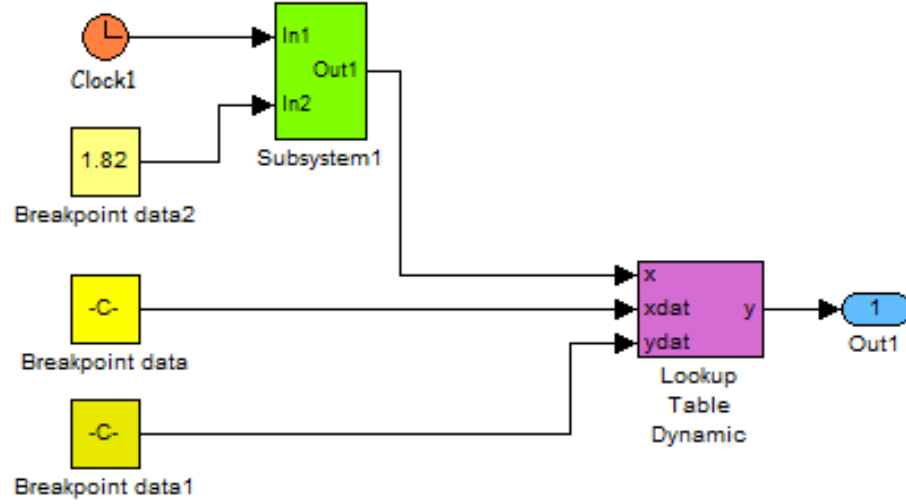
Şekil 9.4. Sağ ön bacak bloğunun yapısı

Altı bacaklı robotun bütün bacaklarının SimMechanics blok yapıları aynı olduğu için Şekil 9.4’ te sadece sağ ön bacağın blok yapısı verilmiştir. Bacak modelinde görüldüğü üzere uzuvlar arasındaki bütün eklemlerde açı “KONTROL BLOGU” kullanılmıştır. Açılarının kontrolü, belirlenen yürüme şekline uygun olarak yapılmış ve bacakların 3’erli gruplar halinde hareket etmesi sağlanmıştır. Belirlenen yürüme şekli için eklemlerin alması gereken açı değerleri, Şekil 9.5’ teki lookup bloğu kullanılarak verilmiştir. Sistemin verilen açı değerlerine uygun olarak hareket etmesi, bu hareket esnasında sistemin parametre belirsizliklerinden, parametre değişimlerinden ve dış bozuculardan etkilenmemesi için kontrol bloğunun içinde bulanık kayma kipli kontrolör kullanılmıştır. Bu kontrolörün çıkışı, eklemlere tork şeklinde uygulanarak eklemlerin alması gereken açı değerinde kalması sağlanmıştır. Bulanık mantıklı kayma kipli kontrol bloğunun yapısı Şekil 9.5.’ de gösterilmiştir.



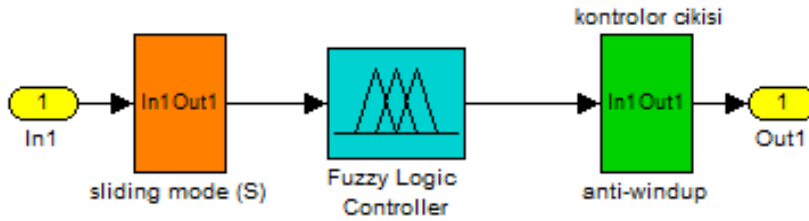
Şekil 9.5. Kontrol bloğunun yapısı

Şekil 9.5.' te gösterilen Lookup bloğu, kinematik analizde eklemler için belirlenmiş olan aç ı değ erlerinin, eklemlere belirli bir zaman d օngüsü ile uygulanmasını sağ lar.



Şekil 9.6. Lookup bloğunun yapısı

Şekil 9.6.' gösterilen lookup bloğunun yapısını oluşturan bloklar, eklemin hangi zaman aralığında hangi aç ı değ erine ulaşması gerektiğ inin belirtilmesini sağ lar.



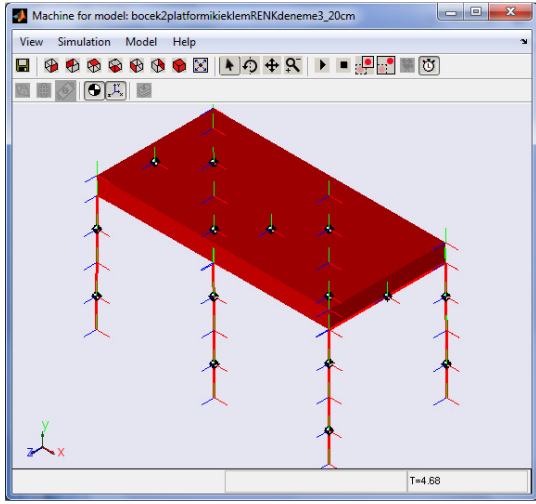
Şekil 9.7. Bulanık mantıklı kayma kipli kontrol bloğunun yapısı

Şekil 9.7'de Bulanık mantıklı kayma kipli kontrol bloğunun yapısı gösterilmiştir. Bu yapının içeriğ ini oluşturan SimMechanics blokları sliding mode, fuzzy logic controller ve anti-windup' dır.

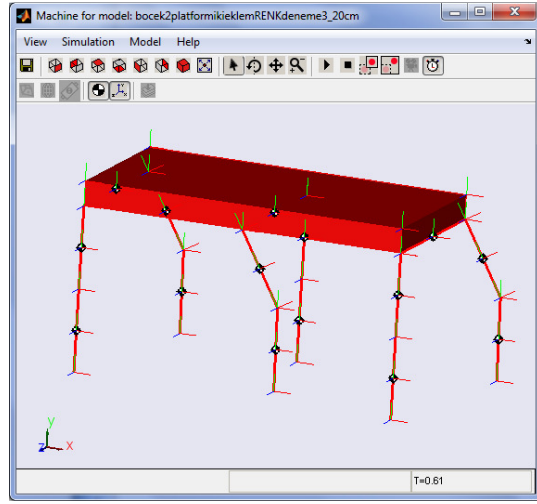
Bulanık mantıklı kayma kipli kontrolör, parametrik belirsizliklere ve dışarıdan gelen bozucu etkenlere karşı kararlılık sağ layarak, kontrolör tasarımında sistematik bir yaklaş ım sunduğ u için bu çalışmada tercih edilmiştir. Ayrıca bu kontrolör, özellikle doğ rusal

olmayan veya değişen parametrelere sahip sistemlerin kontrolü için kullanılan en etkili dayanıklı kontrol yöntemlerinden biridir. Bu alışma da bu bloğun parametre seçimleri deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir. Çünkü bu çalışmanın gerçek uygulamaların donanımsal olarak benzetimi ve hızlı prototipleme uygulamaları için bir n çalışma olması amaçlanmıştır. Bulanık mantık için 3'er adet (küçük, orta, bk) giriş-çıkış üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır. Nonlinear yapıdaki sistemler sınırlı bir çalışma aralığında iyi bir performans verdiği için bu çalışmanın kontrolör tasarımında sonsuz değerde olan bulanık mantık çıkışını sınırlandırmak için anti-windup bloğu kullanılmıştır. anti-windup bloğunda sınır aralığı bu çalışma için değer olarak (± 15) seçilmiştir [62].

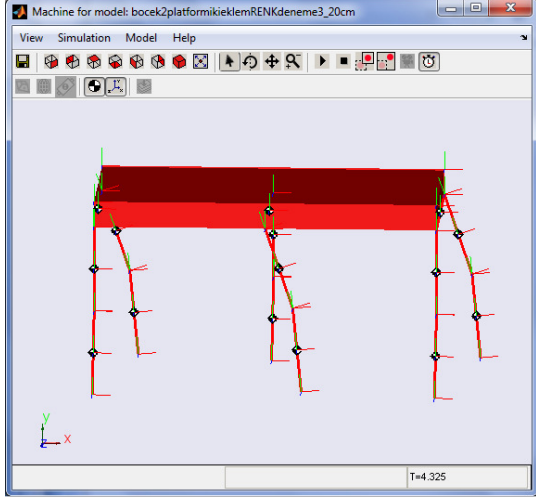
Altı bacaklı robotun bacaklarını 3'erli gruplar şeklinde atması ile gerçekleşen yürümenin görüntüleri şekil 9.8' de verilmiştir.



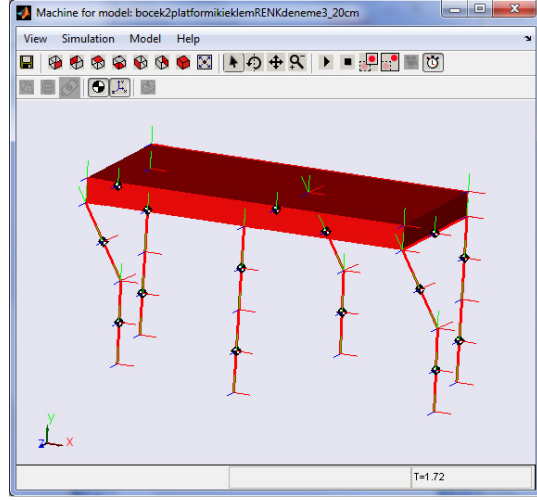
(a)



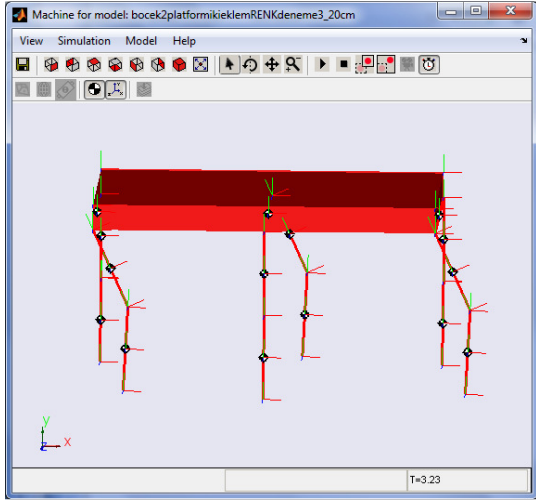
(b)



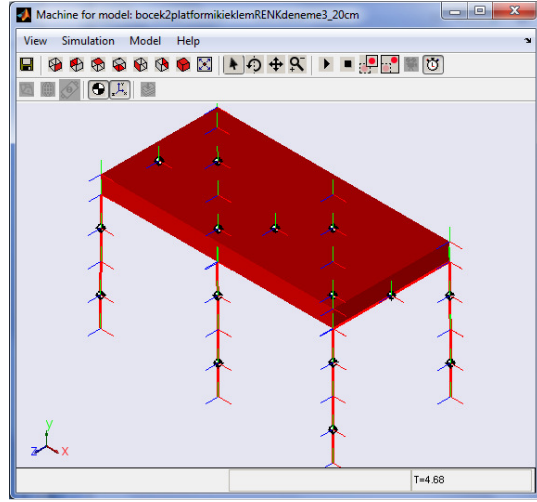
(c)



(d)



(e)



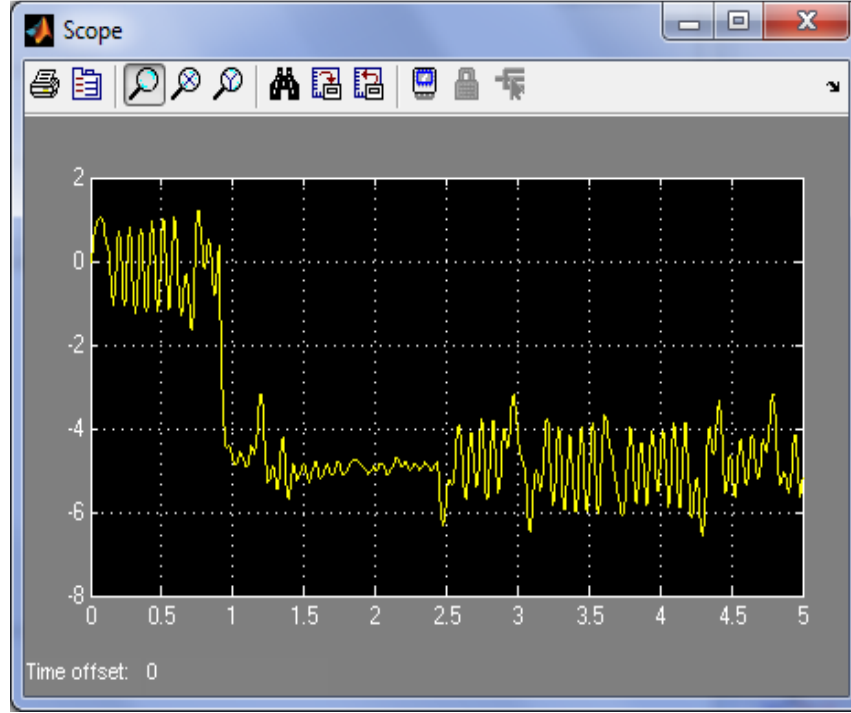
(f)

Şekil 9.8. Altı bacaklı robotun SimMechanics simülasyon görüntüleri.

Şekil 9.8’ de Simmechanics blokları yardımıyla oluşturulan sistemin seçilen uygun yürüme şekline bağlı olarak hareket görüntüleri verilmiştir. Görüntü (a)’ da sistemin ilk duruş anı, (b) ve (c) görüntülerinde ise sistemin hareketlenmesi ile birlikte bacakların 3’erli gruplar halinde eklemlere verilen açı değerlerine göre bacakların havaya kaldırılmasını ve havaya kaldırılan bacakların ileriye doğru atılmasını göstermektedir. (d) ve (e) görüntülerinde de ileriye atılan bacakların destek safhasına geçişini ve diğer 3 bacağın verilen açı değerlerine göre havaya kaldırılmasını ve bacakların ileriye doğru atılarak hareketin gerçekleştiğini

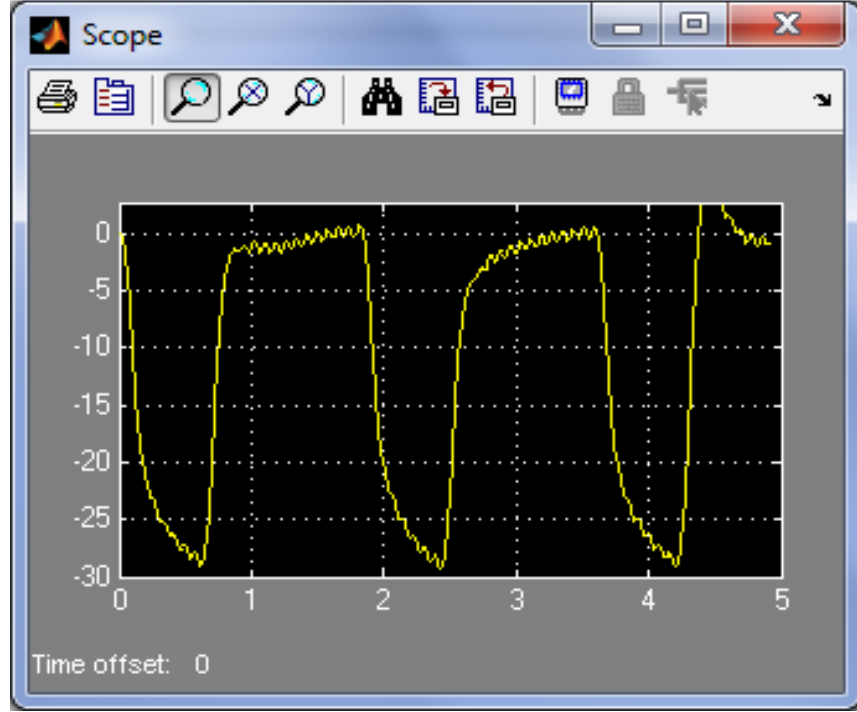
göstermektedir. Görüntü (f)' de de bir periyotta gerçekleşen hareket sonrası sistemin duruşunu gösterir.

Bir bacak için diz eklemindeki parametre grafikleri:



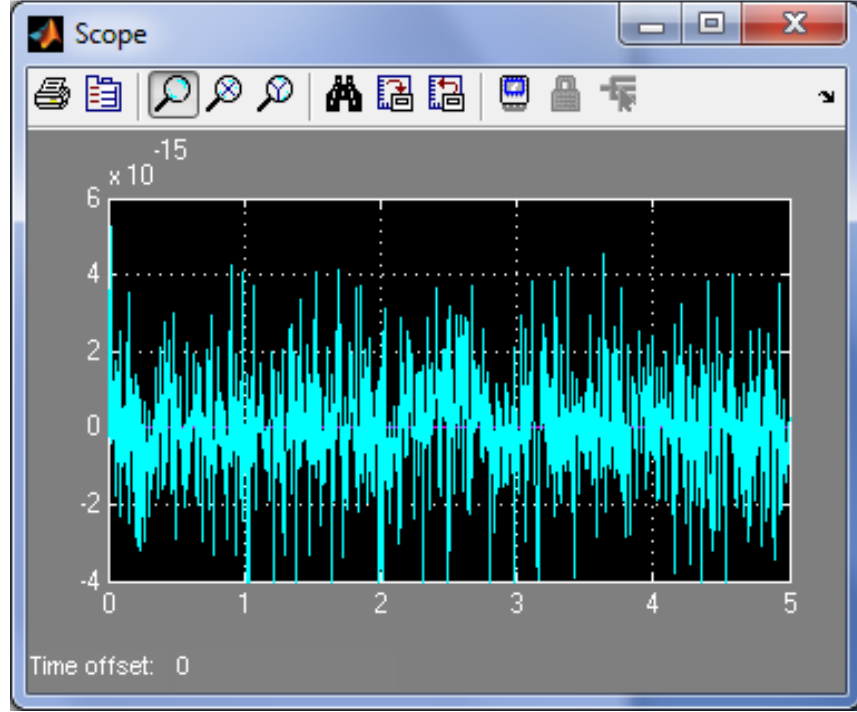
Şekil 9.9. Hareket sırasındaki sürtünmenin zamana göre değişimi (N)

Şekil 9.9' da Simmechanics ortamında oluşturulan altı bacaklı robot modelinin, gerçek ortam koşullarına ve seçilen uygun yürüme şekline bağlı olarak düzgün bir hareketi gerçekleştirmesi için sisteme eklenen sürtünme kuvvetinin hareket sırasındaki zamana göre değişimini göstermektedir.



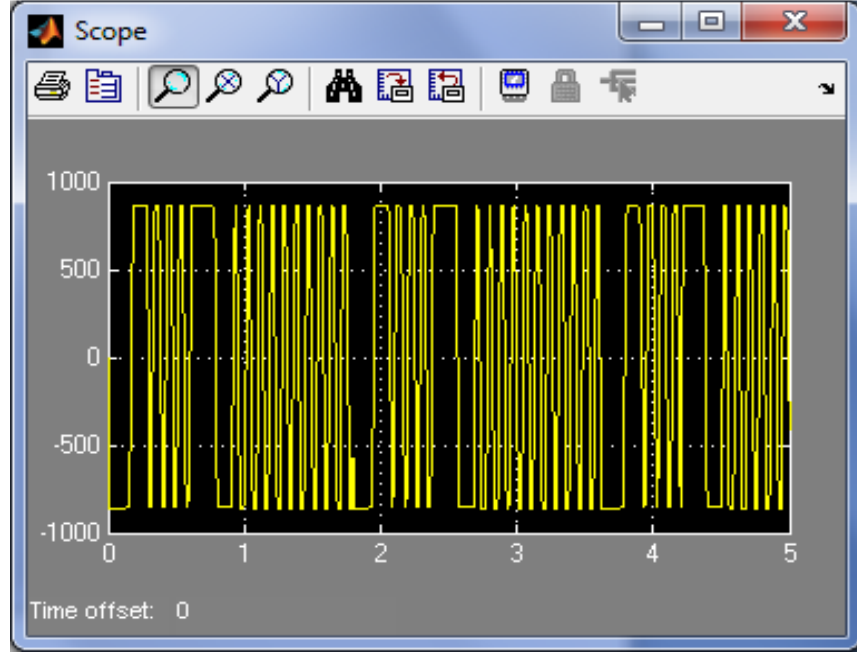
Şekil 9.10. Hareket sırasında bir eklemdaki açı değerinin zamana göre değişimi(deg)

Şekil 9.10'da her bir ekleme belirli bir zaman döngüsü ile lookup bloğu içerisinde tanımlanan açı değerinin zamana göre değişimini göstermektedir.



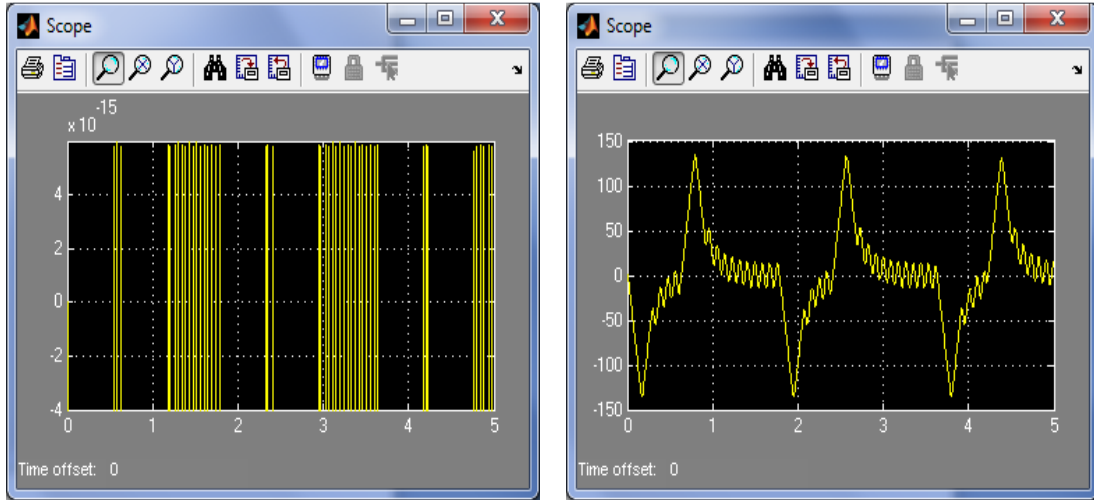
Şekil 9.11. Açık değişimi için ekleme uygulanan torkun zamana göre değişimi (N.m)

Şekil 9.11'de eklemlerin alması gereken açı değerleri için eklemlere uygulanan tork değerinin zamana göre değişimini göstermektedir.



Şekil 9.12. Eklemdaki zamana göre ivme değişimi (cm/s^2)

Şekil 9.12’ de sistemin hareketi sırasında eklemda gerçekleşen ivme değişimini göstermektedir.



Şekil 9.13. Eklemin hareket hızı (deg/s)

Şekil 9.13’de sistemin hareketi sırasında eklemin hızının zamana göre değişimini göstermektedir.

10. SONUÇ

Tekerlekli, paletli veya raylı sistemlerin, çoğu arazi koşulunda bacaklı sistemlere göre iyi bir performans sergileyememesi robotik alanında yapılan çalışmaların çok kıvrak ve esnek bir şekilde hareket edebilen bacaklı sistemler üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Bu tez çalışmasında da öncelikle robotlarla ilgili genel bilgiler verilmiş ve bacaklı sistemlerle ilgili geniş bir literatür taraması yapılmıştır. Literatür taraması ışığında, dikdörtgen bir platforma bağlı eşit uzunluğa sahip her bir bacağı iki eklemden oluşan altı bacaklı bir robotun tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Genel olarak bacaklı sistemlerin eklem yapılarının 2 veya 3 serbestlik derecesine sahip olduğu incelenen çalışmalarda görülmüştür.

Bu çalışmada da en az serbestlik derecesine sahip olarak en uygun yürümeyi yapabilecek ve gerçek uygulamaların donanımsal olarak benzetiminin yanında hızlı prototipleme uygulamaları için de örnek olması amaçlanan bir model oluşturulmuştur. Sistemin modellenmesi MATLAB/Simulink-Simmechanics kullanılarak yapılmıştır. Modellenen sistemin denetimi de, bulanık mantıklı kayma kipli kontrolör yardımıyla sağlanmıştır. Gerçekleştirilen sistemin nonlinear yapıda olması bu yöntemin seçilmesinde belirleyici olmuştur.

İki serbestlik derecesine sahip olan bu robotun tasarımı için gerekli olan ileri kinematik ve ters kinematik çözümler yapılmış, bu sayede her bir eklemin alacağı açı değerleri bulunmuştur. İleri ve ters kinematik denklemlerinin çözümünde ise, yaygın olarak kullanılan Denavit-Hartenberg Yaklaşımından yararlanılmıştır. Ayrıca tez kapsamında robot dinamiğinin çözümünde yaygın olarak kullanılan Lagrange-Euler denklemine de değinilmiştir. Tez çalışmamızda benzetim ortamı olarak kullandığımız Simmechanics'in, detaylı ve fazlasıyla karmaşık olan bu dinamik denklemleri arka planda bloklar içerisinde çözüme ulaştırması dinamik çözümlere ihtiyaç duyulmadan modelin oluşturulmasına imkan vermiştir.

Altı bacaklı robotun uzuvları ve bacakların bağlı olduğu dikdörtgen platformun boyutları incelenen çalışmalar ışığında uygun bir yürüme şeklini gerçekleştirecek şekilde belirlenmiştir.

Son olarak hedeflenen model tasarımı Simmechanics blokları yardımıyla gerçekleştirilmiş ve kayma kipli kontrolör ile her bir eklemin açı kontrolü yapılarak istenilen uygun yürüme şekli simüle edilmiştir. Sistemin yürüme sırasında verdiği cevaplar(hız, konum, ivme vs.) grafikler şeklinde tezde sunulmuştur.

Bu çalışmayla altı bacaklı robotlar ile ilgili ilerde yapılacak olan gerçek zamanlı uygulamalara, hem teorik hem de pratik düzeyde bir zemin oluşturulması ve sunulması amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Acar, M., 2007.** İki Ayaklı Yürüme Hareketinin Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] <http://www.delinetciler.net/forum/icatlar-ve-kesifler/46006-turkiyenin-ilk-cokbacakli-robotu.html>, 14.01.2012
- [3] **Kern and Woo, 2005.** Implementation of a hexapod mobile robot with a fuzzy controller, Northern Illinois University Electrical Engineering Department, Dekalb, IL 60115 (USA).
- [4] http://www.mobilrobot.com/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=60 , 14.01.2012
- [5] **Genç, İ.,** Bilgisayar Kontrollü Altı Ayaklı Gezgin Robot Tasarımı Projesi.
- [6] <http://tez2.yok.gov.tr/tezvt/listemetin.php?-recid=256712>, 14.01.2012
- [7] **Sabancı, K., 2005.** Yapay Kas Kullanılarak Örümcek Robot Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [8] **Erden, S. M., 2006.** Six Legged Walking Machine: The Robot - EA308, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [9] **Saranlı, U. and Buehler, M. and Koditschek, D. E., 2001.** Rhex-A simple and highly mobile hexapod robot, ", Int. J. Robot. Res., 20, pp. 616-631.
- [10] **Barutçuoğlu, E.I., 2001.** Robotların Tarihçesi.
- [11] **Baydaş, Ş., 2006.** 2x3R Sabit Çatı Değişimli Robotik Modelleme, Doktora Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- [12] **Akkoç, H., 2008.** Robot Kontrol Sistemlerindeki Algılayıcılarda Meydana Gelen Arızaların Tespit ve Teşhisi İçin Algoritmalar, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] <http://www.teknoturk.org/docking/yazilar/tt000052-yazi.htm>, Boğaziçi Üniversitesi'ndeki Robot Araştırmaları - Geleceğe Giden Yol, 13.01.2013.
- [14] **Varol, A., 2000.** Robotik, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul.
- [15] **Aksoy, R. ve Kurnaz, S., 2009.** İnsansız Kara Araçları ve Muharebe Gereksinimleri, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi Cilt 4 Sayı 1 (1-10).
- [16] **Şahin, Y. ve Çakan, A.,** Endüstriyel Robotlar ve Fanuc R-J3iC Robot Deneyi.
- [17] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Robot>, 25.05.2013

- [18] **Demircan, O., Karakuş, R. ve Abacı, B.,** Bir Katı Modeli Boyayabilen bir Mekanizma Geliştirilmesi, V. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi, 423-429.
- [19] **Gün, A.,** Robotik Ders Notu, Dumlupınar Üniversitesi EEM.
- [20] **Bayrak, A., 2007.** Beş Eksenli Bir Robot Kolunun Simülasyonu ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [21] **Yıldız, İ., Ömürlü V. E., Ekicioğlu, Z. ve Güney, A.,** 6 serbestlik Dereceli Paralel Mekanizmadaki İleri Kinematik Analiz Yöntemleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [22] **Kaplan, B., 2006.** Localization Of Six-Legged Mini Robots and Mapping, M. Sc. Thesis by, İstanbul Technical University Institute Of Science and Technology, İstanbul.
- [23] **Çetinkaya, Ö., 2009.** Bir Kolun Hareketlerini takip Eden Dört Dönel Mafsallı Robot Kolu Tasarımı ve Deneysel Araştırılması, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [24] **Sönmez, A. C., 1998.** Robot Teknolojisi Ders Notu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [25] **Koca, H., 2007.** Robot Manipülatör Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [26] **Bingül Z., Küçük, S., 2005.** Robot Tekniği-I, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [27] **Saygılı, Ç., 2006.** Scara Tipi Bir Robotun Tasarımı ve Animasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [28] **Soygüder, S., 2009.** Zıplayarak Yürüyen Çok Bacaklı Robotların Dinamik Modeli ve Yapay Zeka Algoritmaları İle Denetimi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [29] http://www.robotokulu.com/index_dosyalar/robotokulu_sayi_01.pdf, Toyota'dan Tek Bacaklı Robot, 31.05.2013
- [30] **Mamkegh, T., Hindash, A. and Al-Jabari, M., june 2010- May 2011.** Hexapod Robot, German Jordanian University, Mechatronics Department.
- [31] **Oral, G., 2008.** Flexible Multibody Dynamic Modeling and Simulation Of RHEX Hexapod Robot With Half Circular Compliant Legs, M.SC.Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- [32] **Arslan, E., 2011.** Altı Bacaklı Yürüyen Robotun Tasarımı ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- [33] **Özdemir, D. ve Köse, C., 2009.** Using Mobile Robots in Detecting The Location Of Products and Carriage in The Farms, EÜFBED- Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Cilt-sayı:1-1 Yıl:2008.
- [34] **Soygüder, S. ve Alli, H.,** ROBOTÜRK SA-2 Sekiz Bacaklı Örümcek Robotun Tasarımı ve Denetimi, Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ.
- [35] **Erden, M.S., 2006.** Six-Legged Walking Machine: The Robot-EA308, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ph.D. Thesis, Ankara.
- [36] **Uzundere, C.M., 2007.** Sekiz Bacaklı Mobil Robotun Mekanik Tasarımı, Modellenmesi ve Lokomasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] **Darıcı, O., 2008.** Dört Bacaklı Mobil Robotlarda Yürüme Analizi ve Yol İzleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [38] **Karaca, C., 2010.** Modeling, Controlling and Real Time System Implementation Of A Hexapod Platform, M.Sc. Thesis, İstanbul Technical University Institute Of Science and Technology, İstanbul.
- [39] **Woering, R. I., 2011.** Simulation The “First Steps” Of A Walking Hexapod Robot, M.Sc. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven Department Mechanical Engineering Control Systems Technology Group, Eindhoven.
- [40] **Buehler, M., Battaglia, R., Cocosco, A., Hawker, G., Sarkis, J. And Yamazaki, K.,** “SCOUT: A Simple Quadruped That Walks, Climbs, and Runs”, Centre For Intelligent Machines, McGill university, Montreal, QC H3A 2A7, Canada.
- [41] **Yorulmaz, S. ve Yılmaz, A., 2007.** Hedef Bulan Robot Projesi, Elektrik Mühendisleri Odası 3. Proje Yarışması, İstanbul.
- [42] **Ekin, O., 2011.** Yüksek Serbestlik Dereceli Mekatronik Sistemlerin Tasarımı ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [43] **Güzel, M. S., 2008.** Altı Eksenli Robot Kolun Hareketsel Karakteristiğinin Görsel Programlanması ve Gerçek Zamanlı Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [44] www.mathworks.com, SimMechanics For Use With Simulink User's Guide Version 1, 01.12.2012
- [45] **Durmaz, U., 2007.** Bir Robot Kolunun Sinirsel Bulanık Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [46] **Güzel, M. S., 2008.** Altı Eksenli Robot Kolun Hareketsel Karakteristiğinin Görsel Programlanması ve Gerçek Zamanlı Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [47] **Közkurt, C. ve Soyaslan, M., 2011.** Euler Bilekli Scara Robot Kolu İçin Kinematik Analiz Yazılımı Geliştirilmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ.
- [48] **Duran, M. A., 2007.** Puma Tipi Bir Manipülatörün Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [49] **Eren, İ., 2006.** Gereğinden Çok Serbestlik Dereceli Robot Kolu Kontrol Sistemi Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [50] **Duran, M. A. ve Ankaralı, A., 2010.** Üç Serbestlik Dereceli Puma Tipi Bir Manipülatörün PID Kontrolü, Selçuk Üniversitesi, Journal Of Technical – Online ISSN 1302/6178 Volume 9, Number:1.
- [51] **Darıcı, O., 2008.** Dört Bacaklı Mobil Robotlarda Yürüme Analizi ve Yol İzleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [52] **Bernardi, R. D., Cordero, A. F. and Cruz, J. J. D., 2011.** Biologically Inspired Locomotion Control Of A Climbing Robot, Sao Paulo University, Brazil.
- [53] **Zutven, V., 2009.** “Modelling, Identification and Stability Of Humanoid Robots”, Masters's Thesis, Eindhoven University Of Technology Department Of Mechanical Engineering Dynamics and Control Group, Eindhoven.
- [54] **Shah, H. L., 2010.** Kinematic, Dynamic and Workspace Analysis Of A Novel 6-DOF Parallel Manipulator, M.SC.Thesis, Buffalo University, New York.
- [55] **Köse, E., Abacı, K. Ve Aksoy, S., 2011.** Kayma Kipli Kontrolde Farklı Erişim Alt Yaklaşımlarının Analizleri, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ.
- [56] **Abidi, K., 2004.** Sliding-Mode control For High-Precision Motion control Systems, M.SC.Thesis, Sabancı University, İstanbul.

- [57] Akpolat, Z. H. And Guldemir, H., 2003. Trajectory Following Sliding Mode Control Of Induction Motors, *Electricall Engineering*, 205-209.
- [58] Koca, G. Ö., 2010. Dört Kol Mekanizmalı Mekatronik Bir Sistemin Akıllı Yöntemlerle Kontrolü, Doktora Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [59] Hung, J.Y., Gao, W.B. and Hung, J.C., 1993. Variable Structure Control: A Survey, *IEEE Trans Ind Electron.*, 40 (1), 2-22.
- [60] Gao, W.B. and Hung, J.C., 1993. Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach, *IEEE Trans Ind Electron.*, 40 (1), 45-55.
- [61] Koca, G.Ö. and Bal, C., 2011. Fuzzy Control of a Nonlinear Deterministic System for Different Operating Points, *Int. Journal of Electrical & Computer Sciences*, 11 (4), 56-60.
- [62] Akpolat, Z. H., 1999, Application of Fuzzy-Sliding Mode Control and Electronic Load Emulation to the Robust Control of Motor Drives, *PhD Thesis*, University of Nottingham, England.
- [63] Akpolat, Z. H., Avcı, E. ve Avcı, L., 2003. Bulanık Mantık Kullanarak Ortalama Kan Basıncının Denetimi, *Politeknik Dergisi Cilt:6 Sayı:4 s. 637-643*.
- [64] Bodur, K. ve Gökalp, H., 2011. Deprem Konumlarının Belirlenmesinde Bulanık Mantık Yaklaşımı, 1.Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji konferansı, ODTÜ, Ankara.
- [65] Altaş, İ. H., 1999. Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı, “Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e”, Sayı 62, Sayfalar:80-85, Bilesim Yayıncılık A.Ş., İstanbul.
- [66] Kıyak, E. ve Kahvecioğlu, A., 2003. Bulanık Mantık ve Uçuş Kontrol Problemine Uygulanması, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi Cilt 1 Sayı 2 (63-72)*.
- [67] Koca, G. Ö., 2005, Kayma Kipli Kontrol ve Bulanık Mantık Kullanarak Elektrikli Araçların Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [68] Alcı, M. ve Karatepe, E., 2002, Bulanık Mantık ve MATLAB Uygulamaları, Birinci Baskı, İzmir.
- [69] Akpolat, Z.H., 2000, Bulanık Mantık Ders Notları.
- [70] Duru, N., Kurtulmuş, C. ve Canbay, M., 2008, Gürültü Etkilerinin Bulanık Mantık Temelli bir Yöntemle Analizi, *Uygulamalı Yerbilimleri Sayı: 2 (62-75)*.

- [71] **Bodur, F. N., 2008**, Süspansiyon Sistemlerinin Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrolü, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [72] **Demirtaş, M. ve Altun, Y., 2009**. LAB-VIEW Kullanılarak Dönen Ters Sarkacın Gerçek Zamanlı Kayan Kip Kontrolü, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.
- [73] **Yıldız, İ., 2011**, Uzaysal Hareket Eden Taşıtların Stewart Platform Mekanizması İle Tek Noktadan Kuvvet Geri Beslemeli Kontrolü, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [74] **Ekin, O., 2011**. Yüksek Serbestlik Dereceli Mekatronik Sistemlerin Tasarımı ve Kontrolü, Yüksek lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [75] **Yıldız, İ., 2007**, 3x3 Kuvvet Geri Beslemeli Bir Stewart Platformunun Kinematik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [76] **Zeren, Z. U., 2007**, Simulation Of A 1-D Muscle Model in simulink, M.SC.Thesis, Middle East Technical University, Ankara.