

**İNSANSI BİR ROBOT İÇİN ÜÇ BOYUTLU BENZETİM
ORTAMI GELİŞTİRME**

Gürkan GÜRGÜZE

**Yüksek Lisans Tezi
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT
HAZİRAN-2013**

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

**İNSANSI BİR ROBOT İÇİN ÜÇ BOYUTLU BENZETİM
ORTAMI GELİŞTİRME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gürkan GÜRGÜZE

102103108

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 25 Haziran 2013
Tezin Savunulduğu Tarih: 18 Temmuz 2013**

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

HAZİRAN - 2013

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, akademik düzeyde çalışmanın gereklerini öğreten danışman hocam Sayın Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT' a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımnda bilgi ve tecrübesini benden hiçbir zaman esirgemeyen, Sayın Yrd. Doç. Dr. Oğuz YAKUT'a , Sayın Yrd. Doç. Dr. Cafer BAL' a, Sayın Arş. Gör. İsmail Hakkı ŞANLITÜRK'e ve Sayın Arş. Gör. Deniz KORKMAZ' ateşekkürü bir borç bilirim.

Her yönde ve her an desteklerini hissettiğim, birlikte fikir alışverişinde bulunduğum tüm arkadaşlarıma gösterdikleri sabır ve anlayıştan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Gürkan GÜRGÜZE

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. Robot Kullanım Nedenleri.....	4
2.3. Robotların Sınıflandırılması	5
2.3.1. Endüstriyel Robotlar	6
2.3.1.1. Kartezyen Robotlar	6
2.3.1.2. Silindirik Robotlar	7
2.3.1.3. Küresel Koordinatlı Robotlar	7
2.3.1.4. Mafsallı Kol Konfigürasyonlu (Döner) Robotlar	8
2.3.1.5. Scara Tip Robot	8
2.3.2. Kontrol Yöntemlerine Göre Robotlar	9
2.3.2.1. Noktadan Noktaya Hareket Eden Robotlar	9
2.3.2.2. Sürekli Yörüngede Hareket Eden Robotlar	9
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	10
3.1. Tezle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	10
4. KİNEMATİK ANALİZ	14
4.1. Konum, Yönelim ve Homojen Dönüşüm Matrisi	15
4.1.1. Konum:	15
4.1.2. Dönme (Yönelim) Matrisi.....	16
4.1.3. Homojen Dönüşüm Matrisi.....	16
4.2. Düz (İleri Yön) Kinematik	17

4.2.1. Denavit-Hartenberg(DH) Dönüşümü.....	17
4.3. Ters Kinematik	19
4.3.1. Kapalı Form Yaklaşımı.....	19
4.3.2. Sayısal Yaklaşım.....	20
5. DİNAMİK ANALİZ.....	23
5.1. 24 Serbestlik Dereceli İnsansı Robot İçin Altı Serbestlik Dereceli Bacak ve Kol Kinematiği	25
5.1.1. Bacak İçin İleri Kinematik.....	26
5.1.2. Bacak İçin Ters Kinematik Çözümü.....	30
6. İNSANSI BİR ROBOT MODELİ İÇİN KONTROL	36
6.1. KAYMA KIPLI KONTROL.....	36
6.1.1. Kayma Kipli Kontrol Yöntemi	36
6.2. Bulanık Mantık	40
6.2.1. Bulanık Kontrol	41
7. SİMMECHANİCS	43
8. İKİ AYAKLI YÜRÜME.....	47
8.1. İki-Ayaklı Robotun Boyutları.....	48
9. İNSANSI (HUMANOİD) BİR ROBOTUN SİMMECHANİCS MODELİ	49
10. SONUÇ.....	59
KAYNAKLAR.....	60

ÖZET

Teknolojinin gelişmesiyle beraber robotik alanında yapılan çalışmalar yakın bir gelecekte insansı robotların endüstriyle sınırlı kalmayıp gündelik yaşamın bir parçası olacağını göstermektedir. Bu gelişmeler, gelişmiş ülkelerin robotik bilimine olan ilgisini arttırmış yatırımların ve araştırmaların hız kazanmasına neden olmuştur.

İnsan özelliklerini taşıyan ve insanın yaptığı işleri yapan iki ayaklı bu tür robotlar çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Kullanım alanları olarak fabrikalardaki üretimlerde insan sağlığına zararlı ortamlarda gerçekleştirilecek görevler de, askeri uygulamalarda, eğlence sektöründe, ev, restoran, hastane, otel gibi yerlerde robot hizmetçi tasarımları öngörülen robot tipleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Robot araştırmalarında yapılan çalışmalarda donanımsal prototipler oluşturulmasının, büyük mali külfetler getirmesi üreticilere çalışmaların yazılım ortamında gerçekleştirme fikrini vermiş ve böylelikle robot model paket programları geliştirilmiştir. Üreticilerin kendi modelleme programlarının yanı sıra özel olarak geliştirilen MATLAB/Simmechanics programı da bu alanda model çalışmalarına imkan sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, sistemimizin modelleme aşamasında, robot ileri/ters kinematik denklemlerinin çözümlenmesinde Denavit-Hartenberg Yaklaşımı'ndan yararlanılmıştır. Robot dinamik denklemlerinin çözümünde ise yaygın olarak kullanılan Langrange-Euler denklemine değinilmiştir. Bu dinamik denklemler arka planda ileri ve/veya ters dinamik çözümlenmelerde kullanılmakta olsa da Simmechanics ile sunulan olanaklar tasarımcıyı detaylı ve fazlasıyla karmaşık dinamik denklemlerin çözümünden kurtarmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; doğada mevcut hareket yöntemlerinden insansı iki ayaklı yürüme hareketinin kinematik analizi, kontrolü, dinamik benzetimi ve gerçek zamanlı sistem uygulaması ele alınarak sistemin modellenmesidir. Tasarlanması amaçlanan insansı robotun kontrolü için bulanık mantıklı kayma kipli kontrolör kullanılmıştır. Oluşturulan bu modeller ile gerçek uygulamalarda sistemin karşılaşılabileceği hatalar, sorunlar ve istenilenlere karşı vereceği cevaplar gözlemlenebilir.

Anahtar Kelimeler: İnsansı Robot, Simmechanics, Kayma Kipli, Bulanık, Kinematik

SUMMARY

Three-Dimensional Simulation Environment For The Development Of A Humanoid Robot

With the latest advances in robotic technology it is forecasted that humanoid robots will not only exist in the production industry but will also assist us in normal daily life. These developments have led the developed countries to put more investment in robot technology and thus, the research on robots have gained a considerable amount of pace.

Two legged humanoid robots that can act as human beings can be used in multiple environments. They are being planned to be operated in manufacturing plants where the environment is hazardous to the worker, but these robots can also be utilized in military, the entertainment sector, at home, restaurants and hotel where they will operate as robot servants.

The costs of producing hardware in robotics have led the researchers to execute their projects first in the software realm, and thus several robotics programs have been developed for this use. The producers can model their robots in specific roles with the help of these programs, and MATLAB/Simmechanics program is one them. The Denavit-Hartenbeg Approach is used in the modeling of the whole system and in robots' forward/backward kinematics design. The Langrange-Euler equation is the most used equation in robotic Dynamics. These dynamic equations are mostly used in the background for forward/backward Dynamics of robots, but with the Simmechanics help, the designer can avoid highly sophisticated equations in modeling their design, easing off their workload.

The objective of this study is to understand the existing kinematic analysis of two legged creatures in the nature, their controls and real time system application functions. The planned controller for the humanoid robot will be operating with fuzzy logic and wedge sliding techniques. With the help of the models produced prior to real applications, the errors, problems and possible requests by the designer from the robot can be analyzed and studied thoroughly.

Key Words: Humanoid Robot, Simmechanics, Sliding Mode, Fuzzy, Kinematic

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Humanoid robot KHR3	4
Şekil 2.2. Döner Eklem	5
Şekil 2.3. Kayar Eklem	5
Şekil 2.4. Seri robot (solda) ve paralel robot (sağda)	6
Şekil 2.5. Kartezyen robot	7
Şekil 2.6. Silindirik robot.	7
Şekil 2.7. Küresel robot	8
Şekil 2.8. Mafsallı kol konfigürasyonlu robot.....	8
Şekil 2.9. Scara tip robot	9
Şekil 3.1. Asimo prototipleri	10
Şekil 3.2. Üç ayaklı robotun Simmechanics modelleme yürüyüşü.....	12
Şekil 4.1. Bir noktanın konum ve yönelimi	14
Şekil 4.2. Uzuva eklem ve koordinat yerleşim gösterimi	14
Şekil 4.3. P Noktasının A Noktasına Göre Tanımı	15
Şekil 4.4. Denavit Hartenberg parametre yerleşimi	18
Şekil 4.5. Ters kinematik analizin şematik gösterimi	19
Şekil 4.6. Geometrik yaklaşımla açı tespiti örneği.....	20
Şekil 5.1. Dinamik model.....	23
Şekil 5.2. İnsansı bir robotun eklem ve eksen yerleşimi.....	26
Şekil 5.3. Bir bacak için eklem ve eksen yerleşimi.....	27
Şekil 5.4. θ_4 için bacağın geometrik görüntüsü.....	31
Şekil 5.5. θ_6 için bacağın geometrik görüntüsü.....	32
Şekil 6.1. İkinci derece bir sistem için ulaşma ve kayma modları	38
Şekil 6.2. Bulanık denetleyici yapısı.....	41
Şekil 7.1 Bir Simmechanic model ve blok örneği.....	43
Şekil 7.2. Gövde blok temsili	44
Şekil 7.3. Zemin (ground) blok temsili	44
Şekil 7.4. Prizmatik blok temsili	44
Şekil 7.5. Dönme eksenli (Revolute) blok temsili	44

Şekil 7.6. Kaynak blok temsili	45
Şekil 7.7. Gövde çalıştırıcı temsili	45
Şekil 7.8. Gövde sensor blok temsili	45
Şekil 7.9. Eklem çalıştırıcı blok temsili	45
Şekil 7.10. Eklem sensör blok temsili	45
Şekil 7.11. Başlangıç şart çalıştırıcı blok temsili	46
Şekil 7.12. Simmechanics model örneği.	46
Şekil 8.1. Robot yürümesi	47
Şekil 9.1. İnsansı (Humanoid) bir robotun simmechanics modeli	49
Şekil 9.2. Sürtünme Bloğu	50
Şekil 9.3. İnsansı robotun sağ ve sol bacak simmechanics modeli	51
Şekil 9.4. İnsansı robotun sağ ve sol kol simmechanics modeli	51
Şekil 9.5. Kontrolör Blok İçeriği.....	52
Şekil 9.6. Lookup Blok İçeriği	52
Şekil 9.7. Bulanık Mantıklı Kayma Kipli Kontrolör Blok İçeriği	53
Şekil 9.8. İleri yön hareketi için bir periyoda ait simülasyonun önden görüntüsü.....	54
Şekil 9.9. İleri yön hareketi için bir periyoda ait simülasyonun yandan görüntüsü	55
Şekil 9.10 Hareket sırasındaki sürtünme	56
Şekil 9.11 Hareket sırasında bir eklemdaki açı değişimi	56
Şekil 9.12 Açı değişimi için ekleme uygulanan tork	57
Şekil 9.13 Eklemdaki açı değişimindeki ivme	57
Şekil 9.14 Eklemin hareket hızı	58

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 5.1. Kinematik hesap için bir bacağın D-H Tablosu.....	27
--	----

SEMBOLLER LİSTESİ

x_0, y_0, z_0	: O_0 merkezli koordinat sisteminin eksenleri
${}^A P$	: P noktasının $\{A\}$ koordinat sistemine göre konum vektörü
P_i	: Konum vektörü
R	: Dönme matrisi
f	: Perspektif dönüşümü
n, s, a	: Dönme alt matrisi sütun vektörleri
N	: Uzuv 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
I	: Atalet
ω	: Açısal hız
m	: Kütle
L	: Lagrange
T	: Kinetik enerji
P	: Potansiyel enerji
g	: Yerçekimi
t	: Zaman
$\dot{q}$	: Zaman türevi
q	: Zaman değişkeni
c	: Kosinüs
s	: Sinüs
l_n	: Uzuv boyutları
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
cm	: Santimetre
rad	: Radyan

KISALTMALAR LİSTESİ

CNC	: Bilgisayarlı Nümerik Kontrol
SMN	: Sıfır Moment Noktası
LIMP	: Doğrusal Ters Sarkaç Modeli
D-H	: Denavit- Hartenberg
L-E	: Lagrange-Euler Yöntemi
R-L	: Rekürsif Lagrange Yöntemi
N-E	: Newton-Euler Yöntemi
G-D	: Genelleştirilmiş D'Alembert Yöntemi
T	: Homojen Dönüşüm Matrisi
L	: Langrange
K	: Kinetik Enerji
P	: Potansiyel Enerji
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım

1. GİRİŞ

Binlerce yıldır farklı şekillerde bilim dünyasında karşımıza çıkan robot kavramı asıl atılımını 1900'li yıllarda yapmıştır. Özellikle 1940'lı yıllardan sonra elektronik sistemlerdeki gelişmelerinde katkısı ile robotik sistemlerin fonksiyonları ve yetenekleri her geçen yıl katlanarak artmıştır. 1956 yılında elektrik motorları ve kontrol sistemlerinde elde edilen başarıların ardından ilk endüstriyel robotlar, endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek özelliklere ulaşmış ve 1960'lı yıllar da üretim hatlarında robot kolları yada manipülatörler olarak kullanılmaya başlanmıştır [1]. 1961 yılında, New Jersey'de kurulu olan General Motors otomobil fabrikasında, tarihte ilk defa bir robot işe alındı. 1980 yılından itibaren ise endüstriyel işlerde robotların kullanımı katlanarak artmıştır. Son yıllarda özellikle algılayıcı, eyleyici, imalat ve bilgisayar teknolojilerinde yaşanan gelişmeler robotikte yeni ufukların açılmasını sağlamıştır. Doğadan esinlenen robotlar buna en güzel örneklerdir [2-3]. Çeşitli işlerin yerine getirilmesi için taklit edilen makinelerin en iyisinin doğal ortamındaki şartları sağlayan tasarımlar olduğu düşüncesi uygulamalarda yer bulmuştur. Örümceklerden, köpeklere, çekirgelerden balıklara kadar çok çeşitli hayvanların hareket ilkelerini örnek alan çalışmalar yapılmıştır. Bu teknolojik gelişmeler aynı zamanda insanın özelliklerini taklit edebilen insansı robotlar olarak adlandırılan robotların tasarımına da imkân vermiştir. İnsan için bir ütopya olan bu fikir hayal olmaktan çıkmış ve günümüzde adım adım gerçekleşmeye başlamıştır. Birçok büyük firma, devlet kurumu ve üniversite bu hayal peşinde yıllarca koşmuş ve yavaş yavaş meyvelerini toplamaya başlamışlardır. Birçok üniversitenin robot topluluklarına sahip olması, firmaların ve devletlerin bu amaç uğruna milyar dolarlar harcaması, birçok bilim kurgu filminin insansı robotlar üzerine kurulması ya da onlara da yer vermesi bu konuya verilen önemi açıkça gözler önüne sermektedir [4-10].

Bu bağlamda birçok alanda insansı robotların kullanımına yönelik tasarımlar geliştirilmeye başlanmıştır. Fakat bu sistemlerin tasarımında gerek kısıtlı zaman ve gerekse yüksek maliyetlerden kaçınmak için öncelikle gerçek zamanlı şartlara uygun prototip veya modeller yapılmaya başlanmıştır. Bu sayede sistem tasarımındaki sorunlar, hatalar ve yapılması istenenler bu modeller üzerinde gözlemlenebilmiştir [11-13]. Özellikle son yıllarda bilgisayar yazılımlarındaki gelişmelerle birlikte modellemeler bilgisayar ortamında en son haline göre yapılabilmektedir. Bilgisayardaki bu modelleme programlarından biri

de SimMechanics'dir. SimMechanics diğerlerinden farklı olarak sistemin simülasyonunu, animasyonunu oluşturmamıza ve sistemin çalışırken ki vereceği cevapları görmemize imkan sağlar [14-15].

Bu tip yazılımların amacı standart Newton'un kuvvet ve moment dinamikleriyle eklemlerle bağlanmış katı cisim mekanik sistemlerinin simülasyonunu ve mühendislik tasarımını yapmaktır. SimMechanics, bir modelin araç paketleriyle sistemdeki olası hareketlerini, kinematik kısıtlamalarını, koordinat sistemlerini, sistemin hareketlenmesini ve hareket sonuçlarını gözlemeyi sağlar [16-17].

Bu yüksek lisans çalışmasının temel amacı, insansı bir robotun benzetim ortamında üç boyutlu modellemesini yaparak gerçek tasarımın ilk adımını oluşturup gelecekte yapılacak çalışmalara zemin oluşturmaktır. Bu model sayesinde, robotun mekanik tasarımı gerçekleştirilirken oluşacak hatalar ve sistemin cevapları öngörülerek, zamandan ve maliyetten tasarruf sağlanmış olacaktır.

2. ROBOT TEORİ BİLGİSİ

2.1. Robotiğe Giriş

Robot kavramı robot üreticilerinin birliği olan “Amerikan Robot Enstitüsü” tarafından; *“maddeleri, parçaları, alet veya özel düzenekleri programlanabilir şekilde hareket ettirmek üzere tasarlanmış bir sistem olarak”* tanımlanmaktadır[18].

Robot teknolojisi ismini Çek oyun yazarı Karel Capek’in “Rossum’un Evrensel Robotları(1921)” oyunundan almıştır. Yazar, zorunlu iş anlamındaki “Robaca” kelimesiyle işçi anlamına gelen “robotnik” kelimelerini birleştirerek “Robotic” kelimesini türetmiştir.

“Robotik” kelimesi bilimkurgu yazarı Isaac Asimov tarafından, ilk olarak 1941 yılında kullanıldı ve Asimov robotik biliminin sonraki yıllarda çok daha fazla gelişeceği ve güçlü bir robot endüstrisinin doğacağı öngörüsünde bulundu. Issac Asimov’un kitaplarında belirttiği üç kanun Asimov kuralları olarak bilinmektedir. Bu kurallar;

1. Bir robot, insanlara zarar vermez, onlara zarar gelmesine seyirci kalmamalıdır.
2. Birinci kurala aykırı olmadığı sürece bir robot daima insanlardan aldığı emirlere uymalıdır.
3. Birinci ve ikinci kural çelişmediği sürece bir robot kendini, kendine zarar verecek hareketlerden korur[19-22].

Yakın zamanda, endüstrideki robot kullanımının artması ile bu gelişim o kadar hızlandı ki artık “Robot Devrimi”, “Robot Çağı” vs. gibi kavramlar günlük hayatımıza bile girmeye başladı.[2]. Robot teknolojisi, günümüz sanayisindeki makineleşmeye dayalı olarak üretim hatlarındaki üretim süresini azaltmak, insan hayatı için tehlikeli ve insanın bulunması imkansız yerlerde işlem ve üretim yapabilmek amacıyla geliştirilmiştir. Böylece, üretim ortamları en az insan bağımlı, standart ürünler çıkaran, neredeyse yüzde sıfır hatayla üretim yapabilen, insanoğlunun zorlukla yapabileceği işlerin yapılabilirdiği üretim bantlarına dönüşmüş ve üretim ortamları bütünüyle insandan bağımsız düşünüp kontrol edilebilen üretim sistemlerine dönüşme yoluna gitmektedir[5].

Son yıllarda elektronik dünyasındaki ilerlemeler, yapay zeka ve mekatronik alanındaki gelişmeler, iki bacaklı yürüme üzerindeki araştırmalar ve robotik görüntüleme sistemlerindeki ilerlemeler artık insansı robotlar üzerinde araştırmalar yapılmasına izin vermiştir.

İnsansı robot çalışmaları teknolojik gelişmelere bağlı olmakla birlikte, aslında insan taklit edilmeye çalışıldığı için, insanın zeka, psikolojik ve fonksiyonel olarak çözümlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden insan beyni, psikolojisi ve anatomisi üzerinde yapılan çalışmalar insansı robotların tasarımında ve yapımında çok büyük önem taşırlar. Şu anda dünyada en çok bilinen insansı robot, Honda firmasının yapmış olduğu Asimo'dur. Asimo yaklaşık olarak 20 yıllık bir çalışmanın ürünüdür. Asimo insan gibi yolda yürüyebilen, basamak çıkabilen ve bir eşyayı bir yerden bir yere taşıyabilen bir robottur ve insansı robotların geldiği son noktayı bizlere göstermektedir [11].



Şekil 2.1. Humanoid robot KHR3 [11].

2.2. Robot Kullanım Nedenleri

Endüstriyel, askeri, sağlık, eğitim, araştırma alanlarında ayrıca şov veya promosyon, kişisel ve hobi amaçlı olarak robotların kullanımı mümkün olmaktadır. Örnek vermek gerekirse;

İşçilerin çalıştığı süre içerisinde %15-20'lik bir bölümü ortaya çıkan yorgunluğun giderilmesi ve diğer ihtiyaçların karşılanması için geçer. Bu süre robotlarda %2'yi geçmemektedir. Böylece çalışma zamanı arttırılmış olur.

İnsanlara göre robotlar daha hızlı çalışabilmektedir. Mesela, bir ark kaynağı robota dakikada 75 cm kaynak yapabilirken ortalama bir kaynak ustası dakikada ancak 25 cm kaynak yapabilir. Böylece üretkenlik daha da artmaktadır.

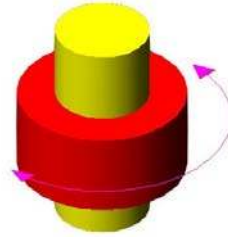
Bazen operasyon hızının yüksek olması kaliteyi artırabilir. Örneğin ince parçaların kaynağının hızlı yapılması ısı yayılımını önleyerek parçalardaki çarpılmaların azalmasını sağlayacaktır.

Robotlar, önceden programlanmış hareketleri büyük bir doğrulukla gerçekleştirdikleri gibi ne yapıldığını da büyük bir doğrulukla kaydedebilirler. Bu kayıtlar programlama, planlama ve kontrol işlemlerinin iyileştirilmesinde önemli bilgileri teşkil eder [23].

2.3. Robotların Sınıflandırılması

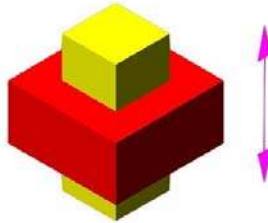
Bir robot çeşitli işlevleri olan uzuvlardan ve bu uzuvları birbirine bağlayan birbirinden bağımsız olarak hareket edebilen kayar (prismatic) veya döner (revolute) tip eklemlerden oluşur [24].

- a) Döner (Revolute – R) Eklemler :Menteşeye benzer ve iki uzuv arasında dönme hareketine izin verir.



Şekil 2.2. Döner Eklemler [1].

- b) Kayar (Prismatic – P) Eklemler : İki uzuv arasında doğrusal harekete izin verir



Şekil 2.3. Kayar Eklemler [1].

Robotlar genel yapılarına göre seri ve paralel olarak iki grubu ayrılırlar. Seri robotlar, sıralı eklemlerin birbirine bağlanmasıyla oluşur. Paralel robotlar ise eklemler arası bağlantı tek bağ ile değil aynı durumda birden fazla bağ ile bağlıdırlar. Seri robotlar paralel robotlara oranla daha basit yapılara ve işlevlere sahipken, paralel robotlar daha karmaşık yapıya sahiptirler [2,24].



Şekil 2.4. Seri robot (solda) ve paralel robot (sağda) [24].

Robotlar endüstriyel, operasyonel, sağlık ve insansı robotlar çalışma alanlarına, tasarımlarına ve kontrol yöntemlerine göre sınıflandırılırlar.

2.3.1. Endüstriyel Robotlar

Endüstriyel robotlar, farklı tip ve boyutlarda özelliklerine ve çalışma alanlarına göre yapılmaktadırlar. Bu robotların genel olarak sınıflandırılmaları ilk üç eklemin yapısına göre yapılmaktadır. İlk üç uzvu prizmatik ekleme sahip ise bu tür robotlar Kartezyen, ilk üç uzvu döner ekleme sahip ise bu tür robotlara da küresel robotlar denir. Bu tür robotlar genellikle altı serbestlik derecesine sahiptirler.

2.3.1.1. Kartezyen Robotlar

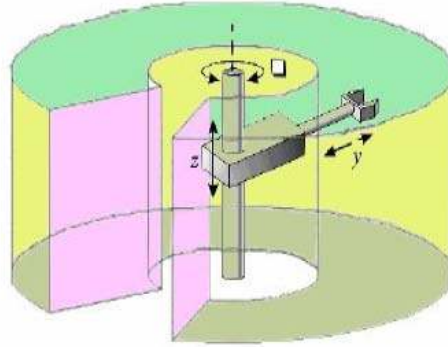
Üç kayar tip eklem ile elde edilen robotlardır. Mekanik yönden çok sağlamdır fakat çalışma uzayındaki hareket yeteneği bakımından zayıftır. Genellikle CNC tezgahlarında ve büyük hacimli ve ağırlıklı nesnelerin taşınması işlemlerinde kullanılırlar [25].



Şekil 2.5. Kartezyen robot [1].

2.3.1.2. Silindirik Robotlar

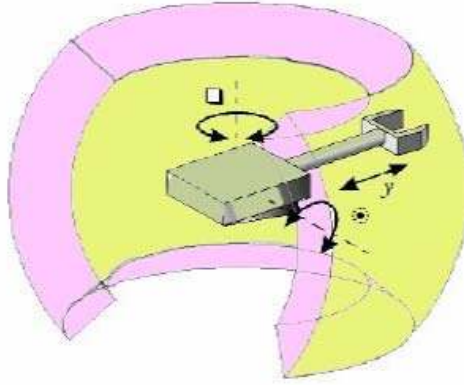
Bir döner iki kayar tip eklemlerden oluşan robot tipleridir. Mekanik yönden sağlamdırlar. Bilek hareketinde konum doğruluğu yatay harekete bağlı olarak azalır [25]. Kartezyen robotlar gibi büyük hacimli nesnelerin taşınmasında kullanılır.



Şekil 2.6. Silindirik robot [1].

2.3.1.3. Küresel Koordinatlı Robotlar

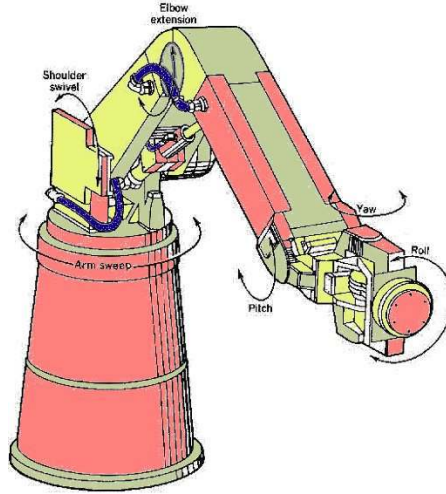
İlk iki eklemi döner üçüncü eklemi prizmatik olan robotlardır. Çalışma uzayındaki hareket yetenekleri Kartezyen ve silindirik robotla göre daha yüksektir. Ancak mekanik yapıları Kartezyen ve silindirik robotlara oranla daha zayıftır. Çoğunlukla makine montajlarında kullanılırlar.



Şekil 2.7. Küresel robot [1].

2.3.1.4. Mafsallı Kol Konfigürasyonlu (Döner) Robotlar

Tüm eklemleri döner tipli olan robotlardır. İnsan koluna benzer yeteneklere sahiptir. Çalışma uzayında en yetenekli manipülatörlerdir. Endüstride boyama, montaj, kaynak yapma gibi geniş kullanım alanlarına sahiptirler [26].

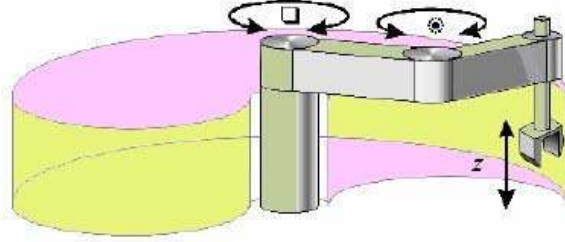


Şekil 2.8. Mafsallı kol konfigürasyonlu robot [1].

2.3.1.5. Scara Tip Robot

Japonya'da Yamanashi Üniversitesi'nde geliştirilen bir robot tipidir. Bu robot tip çok yüksek hıza ve en iyi tekraralama kabiliyetine sahip olan bir robottur. Doğruluk, yüksek hız ve kolay montaj yapabilme gibi üç genel özelliğe sahiptir. Hız ve konum performansı çok

iyi olduğundan dolayı bu robot kol en çok elektronik sanayinde, elektronik kartlara malzeme montajını gerçekleştirmek için kullanılmaktadır [1].



Şekil 2.9. Scara tip robot [1].

e.2.1. Kontrol Yöntemlerine Göre Robotlar

2.3.2.1. Noktadan Noktaya Hareket Eden Robotlar

Bir nesneyi bir yerden başka bir yere yerleştirmede kullanılır. En fazla 6 serbestlik derecesine sahip robotlardır.

2.3.2.2. Sürekli Yörüngede Hareket Eden Robotlar:

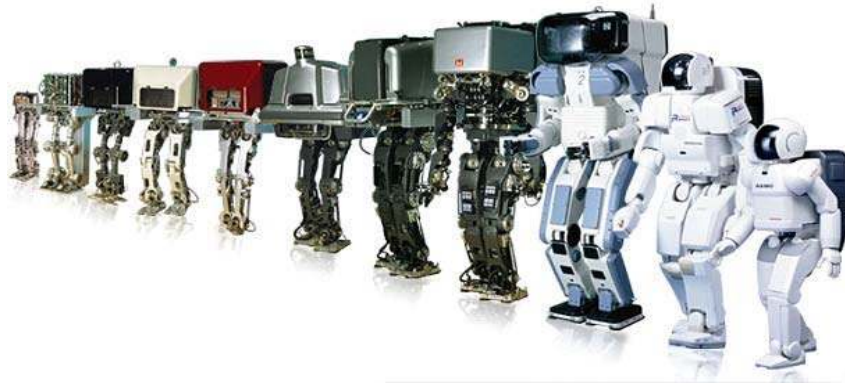
Küçük boyutlu ve belirli bir yörüngeyi takip etmesi istenen robotlardır. Noktadan noktaya robotlara göre daha düzgün ve kesintisiz hareket ederler [27,28].

Endüstriyel alanlarda kullanılan robotların dışında; insan hayatının tehlikeye girebileceği yerlerde insanların yerlerine kullanılan operasyonel robotlar, insan kol ve bacaklarını taklit eden protezler ve bazı ameliyatların gerçekleştirilmesinde geliştirilen tıp ve sağlık robotları ile insansı görünüş ve özelliklere sahip robotlar son zamanlarda üzerinde çalışılan robot türleridir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Tezle İlgili Yapılan Çalışmalar

1970'lerden günümüze kadar birçok iki ayaklı insansı robot çalışması gerçekleştirilmiştir. İlk yapılan çalışmalar çok yavaş hızlarda statik yürüme yapabilen robot tipleri olmuştur. Yaklaşık bunlar her adımı 10 sn gibi bir sürede gerçekleştirebilmişlerdir. Ancak insan gibi yürüme yapabilmesi bu statik yürüme şeklinde zor olduğu gözlenmiştir. Bundan dolayı dinamik yürüme geliştirilmiştir. Bu dinamik yürüme her adımı yaklaşık 1 sn yapabilmeyi sağlamıştır. Günümüzde iki ayaklı dinamik yürüme yapabilen HONDA firmasının Asimosu , Waseda üniversitesi tarafından WABIAN-2, AIST in HRP-3 , KHR-2 şu ana kadar gerçekleştirilen en teknolojik iki ayaklı yürüme ve insan özelliklerini barındıran çalışmalardır[10].



Şekil 3.1. Asimo prototipleri

Bunların yanında tezle ilgili diğer çalışmalar;

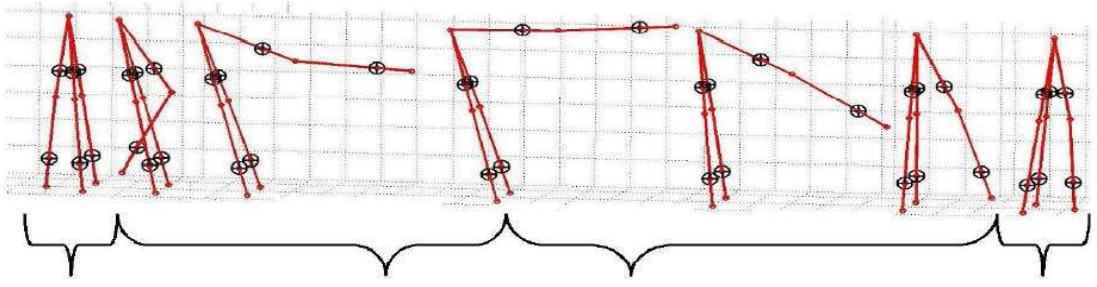
Lim H. Ve Takanishi A., “Waseda Biped Humanoid Robots Realizing Humanoid-like Motion” isimli çalışma Waseda Üniversitesi de 43 serbestlik dereceli WABIAN-RII adlı iki ayaklı insan gibi yürüme yapabilen bir robot tasarımıdır. Waseda WL-10RD adlı iki ayaklı yürüyebilen robotu 1984 yılında ilk çalışma olarak ortaya koymuştur. 1986 yılında yürüme şeklini daha insana özgü bir şekilde dinamik yapabilmesi sağlanmıştır. 1992 yılında WL-12RV adlı öncekilerden daha hızlı hareket yapabilen bir tipi geliştirildi. 1996 yılında ise yetişkin bir Japon kadın boyutlarında WABIAN adlı yaklaşık insan yürüme hızında bir robot geliştirildi [7].

Zutven V., “Modeling, identification and stability of humanoid robots” tezi 2009 yılında Hollanda da bulunan Delft, Eindhoven ve Twente Teknik üniversiteleri işbirliğiyle yapılan bir robot geliştirme projesidir. Tulib adı verilen bu insansı (humanoid) robot çalışmasında yapılan robotun yürümesi, dinamik analizi, kontrol ünitesi ve yapay zeka alanları üzerine bir çalışma platformu oluşturulmuştur. Çalışmada asıl amaç insansı robotun yürümesi üzerine yapılmış bir modelleme çalışmasıdır [29].

Akalın G., “İnsansı robotların 3 boyutlu uzayda 2 ayaklı hareketinin benzetimi” adlı tez çalışmasında 4 temel hareket evresini kapsayan sürdürülebilir bir 2 ayaklı yürüyüşü gerçekleştirebilmesi amacıyla belirlenmiş olan bir kontrol algoritması kullanılarak, bir insansı robotun tepkisinin simüle edilmesi amaçlanmıştır. İnsansı robot modelini oluşturan temel vücut parçaları, belirlenmiş olan temel fiziksel parametreler ve varsayılmış olan kinematik modeller doğrultusunda şekillendirilmiştir Simülasyon MATLAB Simulink’te yürütülmekte ve simülasyonun görüntülenmesi MATLAB Simulink Virtual Reality Toolbox ile sanal bir ortam içinde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada insansı robotların iki ayaklı hareketi için bir simülasyon ortamı kurulmuştur. Bu tezin yardımıyla kullanıcı, simülasyonun modüler yapısını değiştirerek çeşitli kontrol stratejilerini test edebilir ve insansı bir robotun yapılmasının öntasarım çalışması için gerekli olan bilgiyi elde edebilir [30].

Koca Ö., “İki bacaklı insansı bir robot için SMN tabanlı referans sentezi” tez çalışmasında iki bacaklı bir yürüme ve kontrolü üzerine durulmuştur. Kararlı bir yürüyüş referans yörüngesi sentezi insansı robotların kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır. Çok sayıda çalışma, iki ayaklı insansı robotlar için kararlı bir yürüyüş referans yörüngesi sentezinde Doğrusal Ters Sarkaç Modeli’ni (LIMP) ve Sıfır Moment Noktası (SMN) kriterini kullanmıştır. Bu tezde de, bu ana yaklaşım benimsenmiştir. Kararlı ve insaninkine benzer bir yürüyüş elde edebilmek için doğal ve sürekli SMN referans yörüngeleri önerilmektedir. Bu doğal ve insaninkine benzer yürüyüş, robot gövdesi tek bacak tarafından desteklendiği esnada destek ayak tabanı altında ileriye doğru hareket eden SMN yörüngeleri kullanılarak elde edilmiştir [31].

Kamerling D. Ve Larochelle P., “Proposed Design of a Triped Robot” adlı tezinde üç ayaklı bir robotun Simmechanic ortamda tasarımı Şekil 3.2. deki gibi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan simülasyon ile ayakların kontrolünü ve yürüme analizinin yapılmasını sağlamıştır. Bu simülasyonlarla yüksek maliyetli sistemlerin gerçekleştirilmeden robot tasarımını görüp eksikliklerini gidermek amacı güdülmüştür[34].



Şekil 3.2. Üç ayaklı robotun Simmechanics modelleme yürüyüşü [34].

Christensen J., Nielsen J.L., Svendsen M.S. ve Ørts P.F. tarafından “Development, modeling and control of a humanoid robot” isimli projede, insan gibi yürüyebilen “roberto” adlı humanoid bir robotun modellenmesi ve kontrolü üzerine çalışılmıştır. Tezin amacı iki ayaklı bir robotun tasarımı ve yürüme şeklinin araştırılması üzerinedir. Yapılan robot çalışmasında yürüme şekli, eklem yapısı gibi özellikler bu çalışmada göz önüne alınmıştır. Yapılan robot 21 serbestlik derecesine sahip 58 cm boyundadır. Öncelikle robotun yazılım ortamında modeli oluşturulup, yürüme işlemleri üzerine çalışılmıştır. Modeli Solidworks, Matlab gibi programlar ile gerçekleştirilmiştir [35].

Park,III-Woo ve arkadaşları “Mechanical Design of Humanoid Robot Platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot-3:HUBO” çalışmasında Kore KAIST Mekanik Mühendisliği departmanı tarafından KHR-1 ,KHR-2,KHR-3 humanoid robot tasarımı ve yürümesi üzerinde durulmuştur. İlk KHR-1 robotu el ve kafası olmadan 21 serbestlik derecesine olarak özellikle yürüme üzerine geliştirilmiştir. Daha sonra KHR-2 robotu 41 serbestlik derecesine sahip olarak insana benzer olarak geliştirilmiş ve insan gibi yürüme üzerine ilerlemeler kat edilmiştir. 3 yıl sonra KHR-2 tabanlı ancak daha insansı özelliklerin eklendiği KHR-3 geliştirildi. KHR-2 den farklı olarak daha esnek hareket kabiliyetine sahip ve daha hızlı hareket edebilen bir robot tasarlanmış oldu. Son olarak KHR-4 robotu geliştirilmiştir [11,36].

Kutilek P. Ve Hajny O, “Study of human walking by Simmechanics” adlı tezinde MATLAB\Simmechanics ortamında insan yürümesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. İnsansı yürümenin tasarımı rehabilitasyon terapi ve protektik tasarımlarda ve sporcuların hareketlerinin optimizasyonunda ki durumların incelenmesi gibi çalışmalarda kullanılmak amacıyla tasarlanmıştır. Özellikle insan yürüme özellik ve karakteristiği üzerinde durulmuştur. Psikoterapi araştırma ve çalışmalarına genellikle insan hareketleriyle ilgili

uzman sistem çalışması yoktur. İnsan hareket karakteristiğinin uygun araştırmasını yapabilmek amacıyla yapılmıştır [37].

Bayrak A., “Beş eksenli bir robot kolunun simülasyonu ve kontrolü” adlı tezinde beş eksenli bir robot kolunun ters kinematik hesaplamaları ve yörünge planlaması üzerine bir çalışma yapmıştır. Robotun hareketi esnasında önüne çıkabilecek engeli tanımlayacak bir sistem geliştirilmiş ve robot kolunun hareketi bilgisayar ortamında simüle edilmiştir. Matlab 2006 ve Delphi 7 programları kullanılmıştır [2].

Amca A.M ve arkadaşları, “Koparma Kaldırışının Biyomekanik Analizi için Mekanik Model Geliştirilmesi” adlı tezinde olimpik halter de koparma tekniğinin çekiş evresinin mekanik olarak modellenmesi, ters dinamik çözümleme ile eklemlere etkiyen kuvvetlerin ve hareketi sağlayan eklem torklarının hesaplanması ve çekiş evresinin incelenmesi üzerine Simmechanics ortamında iki boyutlu bir model çalışması yapılmıştır. Model ters dinamik çözümlenmiş ve bu çözümleme sonrasında eklemler üzerinde etki eden kuvvetler ve torklar elde edilmiştir. Eklemlerde oluşan kuvvetlerin ve torkların bilinmesi, başarısız koparma kaldırışlarındaki mekanik problemlerin anlaşılmasında önemli bir yere sahiptir. Ayrıca bu veriler sporcularda yaşanan sakatlıkların anlaşılması ve önlenmesi için yapılacak incelemelerde kullanıma da uygundur [38].

Güzel M.S., “Altı eksenli robot kolun hareketsel karakteristiğinin görsel programlanması ve gerçek zamanlı uygulamalar” tez çalışmasında beş ve altı eksenli robot kolların matematiksel analizinin yapılması için görsel tabanlı yazılımlar geliştirme uygulaması yapılmıştır. Tezin amacı robot kolların yönetilmesi ve gerçek zamanlı akıllı uygulamalarda matematiksel analizinin yapımında kolaylık sağlamasıdır [26].

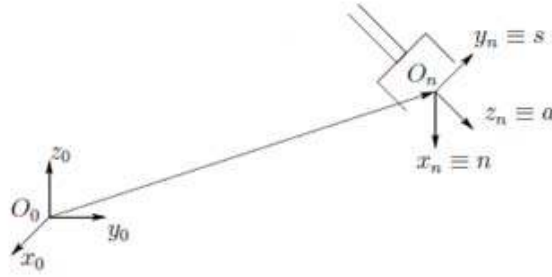
Demircioğlu M., “Bilgisayar destekli robot el tasarımı ve gerçekleştirilmesi” adlı yüksek lisans tezinde robot çalışmalarına katkıda bulunmak amacıyla karmaşık ve detaylı bir yapıya sahip olan el incelenmiş, modelleme ve gerçekleştirilmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır [8].

Rodas R., “Advanced Biped Locomotion in Real/Simulated Humanoid Robots” insansı bir robotun gerçek zamanlı simülasyonu ile iki ayaklı yürüme kontrolü üzerine bir proje çalışmasıdır. Geliştirilen kontrol yapısı ile farklı hızlarda yürüme yapabilmesi amaçlanmış ve başarılmıştır [39].

Williams R.L., Humanoid robotun simülasyonu üzerine bir tez çalışmasıdır. 35 serbestlik derecesine sahip bir robottur. Yapılan simülasyon ile insansı robotun yürüme, denge, hız gibi davranışları test edilmiştir [40].

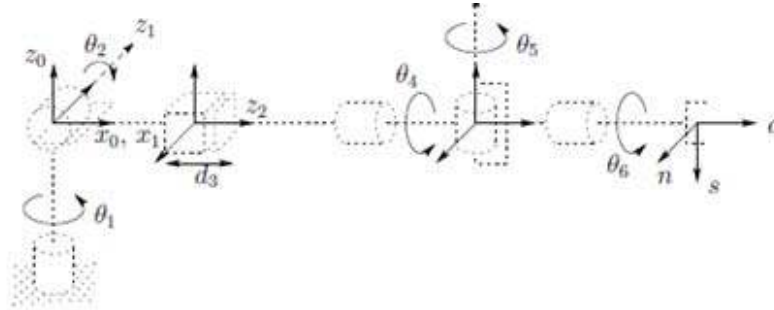
4. KİNEMATİK ANALİZ

Robotlarda uzuvlar birbirlerine döner ve kayar tip eklemlerle bağlanırlar. Bu bağlanma eklemler ve uç işlevci arasında kinematik bir zincir oluşturur. Bu kinematik zincirin bir ucu destek görevi görürken diğer ucu ise serbesttir. Şekil 4.1. de görüldüğü gibi destek görevi gören kısım sıfır iken uç işlevcinin numarası n olarak numaralandırılır.



Şekil 4.1. Bir noktanın konum ve yönelimi [42].

Kinematik analizini yapacağımız bir robot için, önce robotun destek (taban) noktasına bir referans eksen takımı bir 14artezyen koordinat sistemi yerleştirilir. Daha sonra her eklem ya da uzva birer yerel 14artezyen koordinat sistemi Şekil 4.2. deki gibi yerleştirilir. Uç elemanının konum ve yönlenmesi, işte bu eklemlere yerleştirilen yerel koordinat sistemlerine göre bağlı konumları ile belirlenir [41]. XYZ koordinat sistemi genelde kullanılan koordinat sistemidir, bu çalışma içinde bu koordinat sistemi tercih edilmiştir.



Şekil 4.2. Uzva eklem ve koordinat yerleşim gösterimi [42].

Robotların çalışma uzayındaki bu yönelim ve konumlarına bağlı olarak uç işlevcinin konumu ve eklem açılarının analizi için ileri (düz) ve ters kinematik hesaplamaların da yapılması gerekir. Buna binaen, konum, yönelim, homojen dönüşüm matrisleri, ileri ve ters kinematik analiz konuları kısaca bahsedilmiştir.

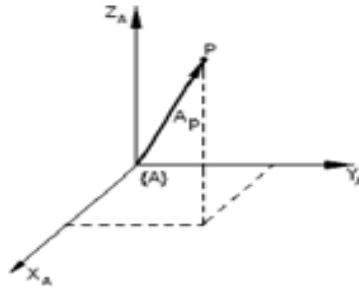
e.2. Konum, Yönelim ve Homojen Dönüşüm Matrisi

4.1.1 Konum:

Bir nokta, koordinat sistemi tanımlanmak suretiyle evrensel çerçeve içerisinde her hangi bir yere konumlanabilir. Üç boyutlu uzayda bir nokta seçilen koordinat sisteminin merkezine göre tanımlanmış 3x1 boyutlu bir vektörle aşağıdaki gibi gösterilir ve bu vektöre konum vektörü denir.

$${}^A \mathbf{p}_x = \begin{bmatrix} {}^A p_x \\ {}^A p_y \\ {}^A p_z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Bu vektör hangi koordinat sistemine göre tanımlanmışsa ona göre isimlendirilir. Örneğin P noktasının {A} koordinat sistemine göre konumu ${}^A \mathbf{p}$ şeklinde bir vektörle ifade edilir. Ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterilir [26].



Şekil 4.3. P Noktasının A Noktasına Göre Tanımı [26].

4.1.2. Dönme (Yönelim) Matrisi

Yönelim bir koordinat sisteminin başka bir koordinat sistemine göre dönme miktarıdır ve 3x3 boyutlu bir matrisle ifade edilir, bu matrise de dönme matrisi denir [24]. XYZ koordinat sistemine göre dönme matrisi;

$$R = \begin{bmatrix} x^1 & y^1 & z^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^1_x & y^1_x & z^1_x \\ x^1_y & y^1_y & z^1_y \\ x^1_z & y^1_z & z^1_z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

şeklinde gösterilir [43].

4.1.3. Homojen Dönüşüm Matrisi

Homojen dönüşüm matrisi T, robotun bir eksen takımının başka bir eksen takımına göre konum ve dönme durumunun matris olarak ifadesidir [41]. İleri ve düz kinematik hesaplamalar da bu homojen dönüşüm matrisi kullanılır.

Bir homojen dönüşüm matrisi 4x4 matristir ve 4 adet alt matrisi vardır. Genel gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & 1 \times 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{dönme matrisi} & \text{konum vektörü} \\ \text{perspektif dönüşüm} & \text{ölçek} \end{bmatrix}$$

$R_{3 \times 3}$ dönme matrisini gösterir. $P_{3 \times 1}$ referans koordinat sistemine göre döndürülmüş koordinat sistemi orijininin konum vektörünü, $f_{1 \times 3}$ üç boyut transformasyonunu ve dördüncü diyagonal elemanda ölçek vektörünü gösterir [18]. Robotik uygulamalarda izdüşüm (perspektif) sıfır, ölçek faktörü ise bir alınır [44].

Uygulamalardaki gösterim biçimi;

$$T = T_{\text{öteleleme}} T_{x,\alpha} T_{y,\phi} T_{z,\theta} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

şeklindedir [41].

Bu gösterimde Homojen Dönüşüm Matrisindeki n, s, a sütun vektörleri dönme alt matrisini oluşturur [41]. P matrisi ise uç eksen takımının referans takımına göre konumu ifade eder.

4.2. Düz (İleri Yön) Kinematik

Robotun ileri yön kinematiği (forward kinematics); robot eklemlerinin konumları, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkiyle ilgilenir. Bir robot bir destek noktasından uç işlevciye doğru birbirine prizmatik ve dönel eklemler tutturulmuş bağlardan oluşur. Her bir ekleme koordinat sistemi yerleştirilerek komşu eklemler arasındaki ilişkiyi veren genel dönüşüm matrisleri bulunur. İki komşu arasındaki ilişkiyi veren dönüşüm matrisi ${}^{i-1}_iT$ ile gösterilir. Örneğin birinci, ikinci ve üçüncü eklemler için dönüşüm matrisleri sırasıyla 0_1T , 1_2T , 2_3T olarak ifade edilir. Elde edilen bu dönüşüm matrisleriyle destek noktasıyla uç işlevci arasında bir ilişki tanımlanır ve bu ilişkiye ileri kinematik denir. İleri kinematik, uç işlevcisinin yönelimini ve konumunu destek noktası koordinatına göre ifade eder ve eşitlik 4.4' deki gibi gösterilir. İleri kinematik, verilen eklem değişkenlerine göre uç işlevcisinin 17artezyen uzayda nerede olduğunu belirleme işlemi olarak da tanımlanabilir.

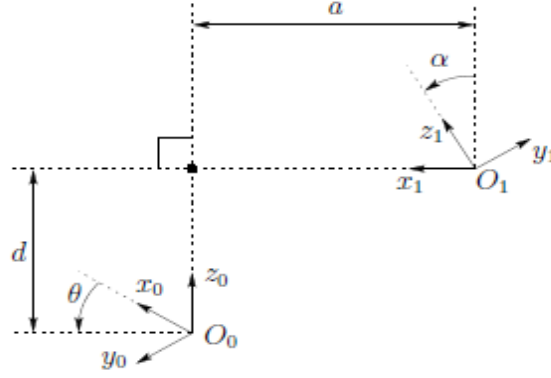
$${}^0_NT = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot \dots \cdot {}^{N-1}_NT \quad (4.4)$$

0_NT dönüşüm matrisi N tane eklemi olan bir robotun ileri kinematik matrisi olarak tanımlanır [45].

4.2.1. Denavit-Hartenberg(DH) Dönüşümü

Robot ileri kinematik analizi elde edilirken bağlantıları oluşturan mafsalları ilişkilendirmek üzere son zamanlarda birçok çalışmada güncel olarak kullanılan Denavit-Hartenberg yaklaşımından yararlandığı görülmektedir.

Denavit-Hartenberg yaklaşımının işleyişi, uzuv ve mafsalları biçimlerinin ve aralarındaki ilişkilerin sınıflandırılmasında kendini gösterir. Birbirini takip eden herhangi iki koordinat sisteminin göreceli konum ve yönelimleri sadece dört parametre kullanılarak belirlenmektedir. Bu parametreleri aşağıdaki gibi tanımlanır: [46].



Şekil 4.4. Denavit Hartenberg parametre yerleşimi [42].

A_{i-1} : x_i eksenini boyunca z_{i-1} den z_i eksenine olan uzunluk

d_i : z_{i-1} eksenini boyunca x_{i-1} den z_i eksenine olan uzunluk

α_{i-1} : z_{i-1} ile z_i eksenleri arasındaki x_i etrafındaki açı

θ_i : x_{i-1} ile x_i eksenleri arasındaki z_i etrafındaki açı [47].

Robot modelinde Denavit Hartenberg parametrelerinin belirlenmesi özel bir çabayı gerektirmektedir. Doğru biçimde belirlenmeyen parametreler ileri ve ters kinematik analizlerde tutarsız sonuçların hesaplanmasına sebep olmaktadır [46].

Eklemler için aşağıdaki matris çarpım notasyonu gerçekleştirilerek homojen dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi elde edilir [42].

$$T_{i-1}^i = R_{z,\theta_i} \cdot Trans_{z,d_i} \cdot Trans_{x,a_i} \cdot R_{x,\alpha_i}$$

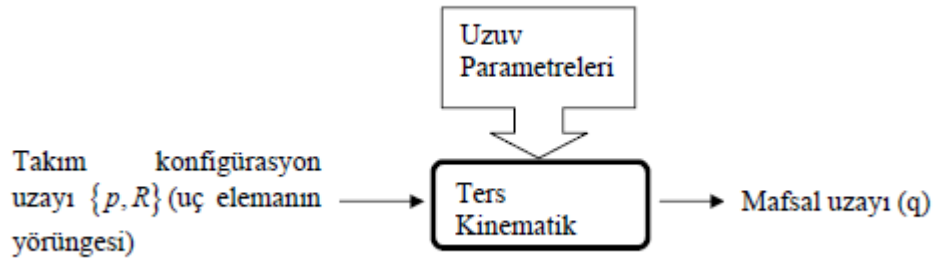
$$\begin{bmatrix} c(\theta_i) & -s(\theta_i) & 0 & 0 \\ s(\theta_i) & c(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{a_i} & -s_{a_i} & 0 \\ 0 & s_{a_i} & c_{a_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} c(\theta_i) & -s(\theta_i) \cdot c_{a_i} & s(\theta_i) \cdot s_{a_i} & a_i \cdot c(\theta_i) \\ s(\theta_i) & c(\theta_i) \cdot c_{a_i} & -c(\theta_i) \cdot s_{a_i} & a_i \cdot s(\theta_i) \\ 0 & s_{a_i} & c_{a_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(4.5)

4.3. Ters Kinematik

Uç işlevcinin gitmesi istenilen bir pozisyon ve yönelimi için eklem değişkenlerinin (eklem açısı) hesaplanmasıdır. Genelde robotun izlemesi istenen yörünge bilinir ve bu yörüngeyi sağlayacak mafsalsal değişkenlerinin bulunması gerekir ve bu da ters kinematik analizle Şekil 4.5 deki gibi mümkündür [48].



Şekil 4.5. Ters kinematik analizin şematik gösterimi

Ters kinematik analiz çözümü için iki ana yöntem mevcuttur.

- e- Kapalı Form Yaklaşımı
- 2- Sayısal(İteratif) Yaklaşım

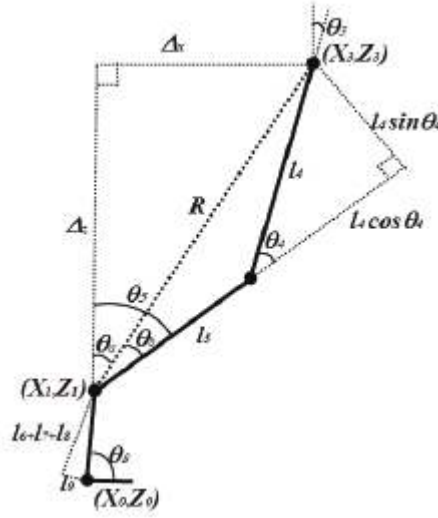
4.3.1. Kapalı Form Yaklaşımı

Kapalı form yaklaşımı, homojen dönüşüm matrisinden elde edilen eşitliklere bağlı olarak genel eklem değişkenleri çözümü elde etmeyi sağlar.

Böylece çok hızlı hesaplamaların gerektiği çevrimiçi robot uygulamaları için pratik ve hızlı bir yaklaşım sağlar. Kapalı form yaklaşımı iki alt başlıkta incelenir.

a) Geometrik Yaklaşım: Geometrik yaklaşım, özellikle analitik çözümün zor ve karmaşık olduğu çok eklemlili robotlarda manipülatör duruşuna bağlı olarak oluşan geometrik şekilden yararlanılarak bazı açıların tespiti sağlar. Ters kinematik çözümlerde denklem karmaşasının zor olması gibi sebeplerle ters konum kinematiklerinin çözümünde tercih edilir [26]. Örneğin Şekil 4.6 daki gibi bir bacağın belirlenen duruşuna

bağlı olarak geometrik yaklaşım ile dik üçgen veya kosinüs teoremi yardımıyla istenilen açıları tespit edilebilir [49].



Şekil 4.6. Geometrik yaklaşımla açı tespiti örneği [49].

b) Cebirsel(Analitik) Yaklaşım: Bu yaklaşım manipülatörün parametreleri ve eklem değişkenleri arasındaki cebirsel ilişkilerden yararlanır. Çoğunlukla ters yönelim kinematiğinin çözümünde tercih edilir.

4.3.2. Sayısal Yaklaşım

Eklem değişkenlerinin başlangıç değerlerinden ve diferansiyel kinematik eşitliklerinden faydalanılarak eklem değişkenlerinin sayısal değerleri bulunabilir [26].

Bu tezdeki robot sisteminin ters kinematik çözümünde geometrik ve analitik yaklaşım kullanılmıştır.

Ters kinematik çözüm işlemi, eklem dönüşüm matrislerinin çarpımı olan ileri kinematik matrisinin bulunması işleminden sonra başlar. Altı serbestlik derecesine sahip bir robotun ileri yön kinematiği aşağıdaki gibi yazılır.

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 \quad (4.6)$$

Matrislerin çarpımı sonucunda eşitlik 4.7’de matris formunda aşağıdaki gibi elde edilir.

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$[{}^0_1T]^{-1} \cdot {}^0_1T = I$ olduğu bilinerek ileri yön kinematik matrisi, eşitlik 4.8 deki denklemin her iki tarafının da $[{}^0_1T]^{-1}$ ile çarpılması sonucu aşağıdaki basit denklem

$$[{}^0_1T]^{-1} \cdot {}^0_6T = {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \cdot {}^5_6T \quad (4.8)$$

elde edilir.

Bu denklemin her iki tarafı bulunup eşitlenir ve bu şekilde açı çözümleri bulunmaya çalışılır. Tüm açıların çözümü için eşitlik 4.8’de elde edilen denklem gibi benzer olarak aşağıdaki eşitlikler kullanılır.

$$[{}^0_1T]^{-1} \cdot {}^0_6T = {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \cdot {}^5_6T \quad (4.9)$$

$$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T]^{-1} \cdot {}^0_6T = {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \cdot {}^5_6T \quad (4.10)$$

$$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T]^{-1} \cdot {}^0_6T = {}^3_4T \cdot {}^4_5T \cdot {}^5_6T \quad (4.11)$$

$$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T]^{-1} \cdot {}^0_6T = {}^4_5T \cdot {}^5_6T \quad (4.12)$$

$$[{}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T]^{-1} \cdot {}^0_6T = {}^5_6T \quad (4.13)$$

Bu eşitliklerin çözümünde elde edilen denklemlerin daha çok uzuv boyutları cinsinden olmasına çalışılmalıdır. Böylelikle açı tespitleri daha kolay gerçekleşecektir. Eşitliklerdeki çözümlerde bazı trigonometrik eşitliklerden de faydalanılır. Eklem açılarını bulmak için arctan2 trigonometrik fonksiyonu kullanılmalıdır [24].

$$I. \quad \cos \theta = a \text{ ise } \theta = \arctan2(\pm\sqrt{1-a^2}, a) \quad (4.14)$$

$$II. \quad \sin \theta = a \text{ ise } \theta = \arctan2(\pm a, \sqrt{1-a^2}) \quad (4.15)$$

$$\text{III. } \cos \theta = a \text{ ise } \sin \theta = b \text{ ise } \theta = \arctan 2(b, a) \quad (4.16)$$

$$\text{IV. } a \sin \theta + b \cos \theta = 0 \text{ ise } \theta = \arctan 2(-b, a) \text{ veya } \theta = \arctan 2(b, -a) \quad (4.17)$$

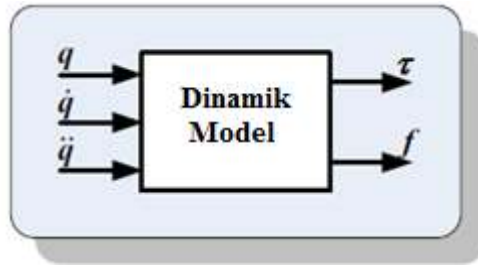
$$\text{V. } a \sin \theta + b \cos \theta = c \text{ ise } \theta = \arctan 2(a, b) + \arctan 2(\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \text{ [24].} \quad (4.18)$$

5. DİNAMİK ANALİZ

Robot dinamiğinin amacı gerekli genelleştirilmiş kuvvetleri tespit etmektir [50].

Robot kolu dinamiği, robot kolu hareket denklemlerinin matematiksel formülasyonu ile ilgilenir. Bir manipülatörün dinamik denklemleri, manipülatörün dinamik davranışını tanımlayan matematik denklemler grubudur. Bu denklemler, robot kolunun hareketinin bilgisayar simülasyonu, robot koluna uygun kontrol denklemlerinin tasarımı, kinematik tasarım ve robot kolunun yapısının hesaplanması için oldukça faydalıdır.

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 [41].



Şekil 5.1. Dinamik model [35].

Bir robot mekanizmasının dinamik modeli genel olarak bilinen Newton mekaniği ve Lagrange mekaniği gibi fiziksel kanunlardan elde edilebilir. Bu kanunların uygulanmasıyla değişik sayıda mafsallı manipülatörün belirlenen kollarının geometrik ve atalet parametrelerine göre hareketin dinamik denkleminin elde edilmesi mümkündür.

Bu denklemler ileri dinamik problemlerinin (düz dinamik-ters dinamik) çözümü için kullanılabilir. Öyle ki, arzu edilen moment ve kuvvetler verilirse, dinamik denklemler mafsallı ivmelerinin çözümü için kullanılır. Daha sonra entegre edilerek mafsallı genelleştirilmiş koordinatlarının ve hızlarının hesaplanması için kullanılır. Eğer ters problemler için yani istenen genelleştirilmiş koordinat ve bunların zamana göre ilk iki türevi verilmişse genelleştirilmiş kuvvetler/torklar hesaplanabilir. L–E denklemlerinin, gerçek zamanlı kontrol amaçlı olarak basitleştirilmeden kullanılmaları oldukça zordur [51].

Robot kollarının dinamik denklemlerini elde etmek için literatürde bilinen birçok yöntemden bazıları şunlardır:

1. Lagrange-Euler (L-E) yöntemi
2. Rekürsif Lagrange (R-L) yöntemi
3. Newton-Euler (N-E) yöntemi
4. Genelleştirilmiş D'Alembert (G-D) yöntemi

Robot kol mekanizmalarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan Lagrange-Euler (L-E) yöntemidir. Bu yöntemle 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 nedeni ile gerçek-zaman uygulaması için her zaman uygun değildir. Ancak buna rağmen bilgisayar teknolojisindeki çok hızlı gelişmeler nedeni ile kullanılabileceğini söylemek mümkündür [41].

Genel dinamik denklemi aşağıdaki gibidir;[29]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial K}{\partial q} + \frac{\partial P}{\partial q} = \underline{Q}_{nc}^T \quad [29] \quad (5.1)$$

Lagrange modelleme Hamilton ilkesine dayanır [35]. Lagrange fonksiyonu sistemin kinetik enerjisi ile potansiyel enerjisi arasındaki fark olarak tanımlanır [44].

Dinamik çözümlerin nihai hedefi sistemin hareket denklemlerini elde etmektir. Fakat çok serbestlik dereceli sistemlerin analizi karmaşık ve zordur. Bundan dolayı bu çok serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemlerinin çözümü enerji yöntemi ile elde edilir. Genellikle Euler-Lagrange enerji yöntemi ile hareket denklemleri bulunur.

N serbestlik dereceli bir sistemin hareket analizinde aşağıdaki Lagrange-Euler denklemi kullanılır.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_t} - \frac{\partial L}{\partial q_t} = \tau_t \quad (5.2)$$

$$L=K-P \quad (5.3)$$

Bu denklemlerdeki L Langrange, K kinetik enerji ve P potansiyel enerjiyi ifade eder. Sistemin toplam kinetik enerjisi eşitlik 5.4'deki gibidir. I atalet tensörü, ω açısal hız ifadesidir.

$$K=\frac{1}{2}mv^T+\frac{1}{2}\omega^T I \omega \quad (5.4)$$

Her bir link için toplam kinetik enerji denklemi eşitlik 5.5 deki gibi olur.

$$K=\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2} m_i v_i^T v_i + \frac{1}{2} \omega_i^T R_i I_i R_i^T \omega_i \right\} \quad (5.5)$$

n serbestlik dereceli bir sistem için gerekli potansiyel enerji eşitlik 5.6. daki gibidir ve q –zaman değişkenidir.

$$P=mgh=\sum_{i=1}^n m_i g h_{ci}(q) \quad (5.6)$$

Son olarak Langrange- Euler formülasyonu genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [52].

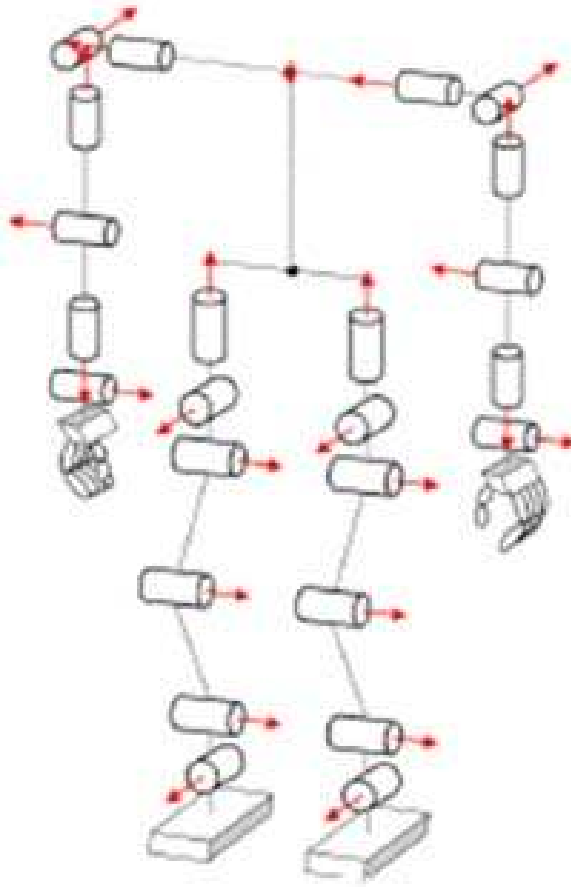
$$L = K - P = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} - P(q) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j - \sum_{i=1}^n m_i g h_{ci}(q) \quad (5.7)$$

5.1. 24 Serbestlik Dereceli İnsansı Robot İçin Altı Serbestlik Dereceli Bacak ve Kol Kinematiği

Bu tez çalışmasında insansı bir robot için üç boyutlu benzetim ortamı geliştirilecektir. Benzetim ortamını gerçekleştirebilmek için öncesinde açı, konum gibi parametrelerin elde edilmesi gerekir. Bu parametreler sistemin kinematik analiziyle çözülür. Daha önce de anlatıldığı gibi eklemlerin dönüşüm matrisleri ve bunlara bağlı olarak sabit eksen takımının uç eksen takımına göre homojen dönüşüm matrisi elde edilir. Bu sayede hareketin

gerçekleşmesi için gerekli olan sistemin uç elemanın gittiği konum (ileri kinematik) ve buna bağlı olarak eklemlerin açılarının tespiti (ters kinematik) yapılır.

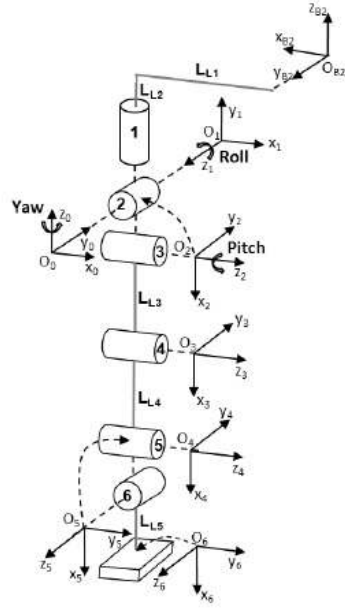
Kinematik çözümler her bacak ve kol için ayrı ayrı yapılmıştır. Her bacak ve kol 6 serbestlik derecelidir. Ters kinematik çözüm de analitik ve geometrik yöntem kullanılmıştır. Kinematik hesaplamaları gerçekleştirecek olan İnsansı (Humanoid) Robot Şekil 5.2 de ki gibi ele alınmıştır.



Şekil 5.2. İnsanı bir robotun eklem ve eksen yerleşimi [36].

e.2.1. Bacak İçin İleri Kinematik

İleri kinematik denklemlerin çözümü D-H tablosu oluşturularak çözülür. Her bir bacak için eksenlerin yerleşimi Şekil 5.3 deki gibi yapılmıştır.



Şekil 5.3. Bir bacak için eklem ve eksen yerleşimi

D-H tablosu ;

Tablo 5.1. Kinematik hesap için bir bacağın D-H Tablosu

i	θ	α	a	D
1	180	0	l_1	$-l_2$
2	θ_1	90	0	0
3	θ_2-90	-90	0	0
4	θ_3	0	l_3	0
5	θ_4	0	l_4	0
6	θ_5	90	0	0
7	θ_6	0	l_5	0

Oluşturulan bu D-H tablosuna göre kinematik çözüm eşitlik 5.8 deki genel dönüşüm matrisi kullanılarak öncelikle her eksen takımı için dönüşüm matrisi elde edilir.

Genel dönüşüm matrisi;

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i-1} & -\sin \theta_{i-1} \cdot \cos \alpha_i & \sin \theta_{i-1} \cdot \sin \alpha_i & \alpha_i \cdot \cos \theta_{i-1} \\ \sin \theta_{i-1} & \cos \theta_{i-1} \cdot \cos \alpha_i & -\cos \theta_{i-1} \cdot \sin \alpha_i & \alpha_i \cdot \sin \theta_{i-1} \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

${}^0T_1, {}^1T_2, {}^2T_3, {}^3T_4, {}^4T_5, {}^5T_6, {}^6T_7$ dönüşüm matrislerini bulalım.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos 180 & -\sin 180 \cdot \cos 0 & \sin 180 \cdot \sin 0 & l_1 \cdot \cos 180 \\ \sin 180 & \cos 180 \cdot \cos 0 & -\cos 180 \cdot \sin 0 & l_1 \cdot \sin 180 \\ 0 & \sin 0 & \cos 0 & -l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos 90 & \sin \theta_1 \cdot \sin 90 & 0 \cdot \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cdot \cos 90 & -\cos \theta_1 \cdot \sin 90 & 0 \cdot \sin \theta_1 \\ 0 & \sin 90 & \cos 90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 - 90) & -\sin(\theta_2 - 90) \cdot \cos -90 & \sin(\theta_2 - 90) \cdot \sin -90 & 0 \cdot \cos(\theta_2 - 90) \\ \sin(\theta_2 - 90) & \cos(\theta_2 - 90) \cdot \cos -90 & -\cos(\theta_2 - 90) \cdot \sin -90 & 0 \cdot \sin(\theta_2 - 90) \\ 0 & \sin -90 & \cos -90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$= \begin{bmatrix} \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & 0 \\ -\cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 \cos 0 & \sin \theta_3 \cdot \sin 0 & l_3 \cdot \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \cdot \cos 0 & -\cos \theta_3 \cdot \sin 0 & l_3 \cdot \sin \theta_3 \\ 0 & \sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \cdot \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_3 \cdot \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 \cos 0 & \sin \theta_4 \cdot \sin 0 & l_4 \cdot \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 \cdot \cos 0 & -\cos \theta_4 \cdot \sin 0 & l_4 \cdot \sin \theta_4 \\ 0 & \sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & l_4 \cdot \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & l_4 \cdot \sin \theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 \cos 90 & \sin \theta_5 \cdot \sin 90 & 0 \cdot \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 \cdot \cos 90 & -\cos \theta_5 \cdot \sin 90 & 0 \cdot \sin \theta_5 \\ 0 & \sin 90 & \cos 90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$${}^6_7T = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 \cos 0 & \sin \theta_6 \cdot \sin 0 & l_5 \cdot \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 \cdot \cos 0 & -\cos \theta_6 \cdot \sin 0 & l_5 \cdot \sin \theta_6 \\ 0 & \sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & l_5 \cdot \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & l_5 \cdot \sin \theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Düz Kinematik;

$${}^0_7T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \cdot {}^5_6T \cdot {}^6_7T \quad (5.17)$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & 0 \\ -\cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \cdot \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_3 \cdot \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & l_4 \cdot \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & l_4 \cdot \sin \theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & l_5 \cdot \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & l_5 \cdot \sin \theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

matrislerinin çarpımı ile uç dönüşüm matrisini elde ederiz.

$$\begin{bmatrix} * & * & * & -C \theta_1 \cdot (S \theta_2 \cdot (C \theta_6 \cdot C \theta_{3+4+5} \cdot l_5 + l_4 \cdot C \theta_{3+4} + l_3 \cdot C \theta_3) + C \theta_2 \cdot l_5 \cdot S \theta_6) + *** \\ * & * & * & -S \theta_1 \cdot (S \theta_2 \cdot (C \theta_6 \cdot C \theta_{3+4+5} \cdot l_5 + l_4 \cdot C \theta_{3+4} + l_3 \cdot C \theta_3) + C \theta_2 \cdot l_5 \cdot S \theta_6) - *** \\ * & * & * & -C \theta_2 \cdot (C \theta_6 \cdot C \theta_{3+4+5} \cdot l_5 + l_4 \cdot C \theta_{3+4} + l_3 \cdot C \theta_3) + S \theta_2 \cdot l_5 \cdot S \theta_6 - l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Sonuç olarak;

$${}^0_7T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \cdot {}^5_6T \cdot {}^6_7T \quad (5.20)$$

$${}^0_7T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

şeklinde ifade edebiliriz.

$$P_x = -C\theta_1 \cdot (S\theta_2 \cdot (C\theta_6 \cdot C\theta_{3+4+5} \cdot l_5 + l_4 \cdot C\theta_{3+4} + l_3 \cdot C\theta_3) + C\theta_2 \cdot l_5 \cdot S\theta_6) + S\theta_1 \cdot ((C\theta_6 \cdot S\theta_{3+4+5} \cdot l_5 + l_4 \cdot S\theta_{3+4} + l_3 \cdot S\theta_3) + l_1) \quad (5.22)$$

$$p_y = -S\theta_1 \cdot (S\theta_2 \cdot (C\theta_6 \cdot C\theta_{3+4+5} \cdot l_5 + l_4 \cdot C\theta_{3+4} + l_3 \cdot C\theta_3) + C\theta_2 \cdot l_5 \cdot S\theta_6) - C\theta_1 \cdot (C\theta_6 \cdot S\theta_{3+4+5} \cdot l_5 + l_4 \cdot S\theta_{3+4} + l_3 \cdot S\theta_3) \quad (5.23)$$

$$p_z = -C\theta_2 \cdot (C\theta_6 \cdot C\theta_{3+4+5} \cdot l_5 + l_4 \cdot C\theta_{3+4} + l_3 \cdot C\theta_3) + S\theta_2 \cdot l_5 \cdot S\theta_6 - l_2 \quad (5.24)$$

5.1.2. Bacak İçin Ters Kinematik Denklemlerin Çözümü

Ters kinematik çözüm için;

$${}^0_7T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

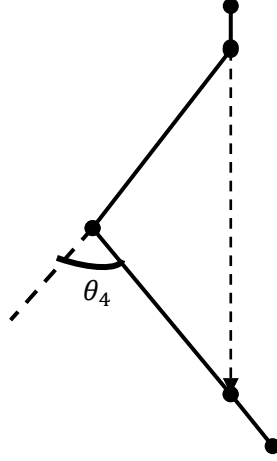
olarak alalım.

1- θ_4 açısı için;

geometrik yaklaşım yöntemiyle ;

$$[{}^0_1T]^{-1} \cdot {}^0_7T \cdot [{}^6_7T]^{-1} = \begin{bmatrix} -r_{11} \cdot \cos \theta_6 + r_{12} \cdot \sin \theta_6 & -r_{11} \cdot \sin \theta_6 - r_{12} \cdot \cos \theta_6 & -r_{13} & l_1 - P_x + r_{11} \cdot l_5 \\ -r_{21} \cdot \cos \theta_6 + r_{22} \cdot \sin \theta_6 & -r_{21} \cdot \sin \theta_6 - r_{22} \cdot \cos \theta_6 & -r_{23} & -P_y + r_{21} \cdot l_5 \\ r_{31} \cdot \cos \theta_6 - r_{32} \cdot \sin \theta_6 & r_{31} \cdot \sin \theta_6 - r_{32} \cdot \cos \theta_6 & r_{33} & l_2 + P_z - r_{31} \cdot l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

$$l^2_x = (l_1 - P_x + r_{11} \cdot l_5)^2 + (-P_y + r_{21} \cdot l_5)^2 + (l_2 + P_z - r_{31} \cdot l_5)^2 \quad (5.27)$$



Şekil 5.4 θ_4 için bacağın geometrik görüntüsü

cos teoreminden;

$$\cos \theta_4 = \frac{l_x^2 - l_3^2 - l_2^2}{2.l_3.l_4} \quad (\cos \theta = a \text{ ise } \theta = \arctan2(\pm\sqrt{1-a^2}, a) \text{ kuralından})$$

$$\theta_4 = \arctan2\left(\pm\sqrt{1 - \left(\frac{l_x^2 - l_3^2 - l_2^2}{2.l_3.l_4}\right)^2}, \frac{l_x^2 - l_3^2 - l_2^2}{2.l_3.l_4}\right) \quad (5.28)$$

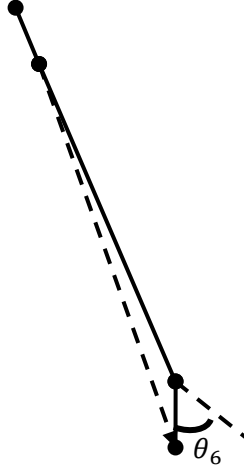
2- θ_6 açısı için;

$$[{}^0T]^{-1} \cdot {}^0T = \begin{bmatrix} -r_{11} & -r_{12} & -r_{13} & l_1 - P_x \\ -r_{21} & -r_{22} & -r_{23} & -P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & l_2 + P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

tersini alırsak

$$\begin{bmatrix} -r_{11} & -r_{21} & r_{31} & r_{11} * (l_1 - P_x) - P_y * r_{21} - r_{31}(l_2 + P_z) \\ -r_{12} & -r_{22} & r_{32} & r_{12} * (l_1 - P_x) - P_y * r_{22} - r_{32}(l_2 + P_z) \\ -r_{13} & -r_{23} & r_{33} & r_{13} * (l_1 - P_x) - P_y * r_{23} - r_{33}(l_2 + P_z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

olur.



Şekil 5.5. θ_6 için bacağın geometrik görüntüsü

$$l_x = \sqrt{(p'_y)^2 + (p'_z)^2} \quad l_y = \sqrt{(p'_y)^2 + (p'_z - l_5)^2}$$

$$\theta_6 = \arccos\left(\frac{l_x^2 - l_y^2 - l_5^2}{2 \cdot l_y \cdot l_5}\right) \quad (5.31)$$

3- θ_2 açısı için;

$${}^0T \cdot [{}^5T \ {}^6T]^{-1} = {}^0T \cdot {}^1T \cdot {}^2T \cdot {}^3T \cdot {}^4T \cdot {}^5T \quad \text{eşitliğinden;} \quad (5.32)$$

$${}^0T \cdot [{}^5T \ {}^6T]^{-1} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_5 \cdot \cos \theta_6 & \sin \theta_5 \cdot \cos \theta_6 & \sin \theta_6 & -l_5 \\ -\cos \theta_5 \cdot \sin \theta_6 & -\sin \theta_5 \cdot \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 \\ \sin \theta_5 & -\cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} \cdot \cos \theta_5 \cdot \cos \theta_6 - *** & r_{11} \cdot \sin \theta_5 \cdot \cos \theta_6 - *** & r_{11} \cdot \sin \theta_6 + r_{12} \cdot \cos \theta_6 & P_x - r_{11} \cdot l_5 \\ r_{21} \cdot \cos \theta_5 \cdot \cos \theta_6 - *** & r_{21} \cdot \sin \theta_5 \cdot \cos \theta_6 - *** & r_{21} \cdot \sin \theta_6 + r_{22} \cdot \cos \theta_6 & P_y - r_{21} \cdot l_5 \\ r_{31} \cdot \cos \theta_5 \cdot \cos \theta_6 - *** & r_{31} \cdot \sin \theta_5 \cdot \cos \theta_6 - *** & r_{31} \cdot \sin \theta_6 + r_{32} \cdot \cos \theta_6 & P_z - r_{31} \cdot l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

$${}^0T \cdot {}^1T \cdot {}^2T \cdot {}^3T \cdot {}^4T \cdot {}^5T =$$

$$\begin{bmatrix} * & * & -\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 & -\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 (\cos \theta_{3+4} \cdot l_4 + l_3 \cos \theta_3) + * \\ * & * & -\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 (\cos \theta_{3+4} \cdot l_4 + l_3 \cos \theta_3) - * \\ * & * & \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 (\cos \theta_{3+4} \cdot l_4 + l_3 \cos \theta_3) - l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

$\sin \theta_2 = r_{31} \cdot \sin \theta_6 + r_{32} \cdot \cos \theta_6$ ($\sin \theta = a$ ise $\theta = \arctan2(a, \pm \sqrt{1 - a^2})$) kuralından

$$\theta_2 = \arctan2(r_{31} \cdot \sin \theta_6 + r_{32} \cdot \cos \theta_6, \pm \sqrt{1 - (r_{31} \cdot \sin \theta_6 + r_{32} \cdot \cos \theta_6)^2}) \quad (5.36)$$

4- θ_1 açısı için;

$${}^0T \cdot [{}^5T \ {}^6T]^{-1} = {}^0T \cdot {}^1T \cdot {}^2T \cdot {}^3T \cdot {}^4T \text{ yine eşitliğinden} \quad (5.37)$$

$$-\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 = r_{21} \cdot \sin \theta_6 + r_{22} \cdot \cos \theta_6 \quad (\sin \theta = a \text{ ise } \theta = \arctan2(a, \pm \sqrt{1 - a^2}))$$

kuralından

$$\theta_1 = \arctan2\left(\frac{r_{21} \cdot \sin \theta_6 + r_{22} \cdot \cos \theta_6}{-\cos \theta_2}, \pm \sqrt{1 - \left(\frac{r_{21} \cdot \sin \theta_6 + r_{22} \cdot \cos \theta_6}{-\cos \theta_2}\right)^2}\right) \quad (5.38)$$

5- θ_3 açısı için;

$$[{}^0T \ {}^1T \ {}^2T]^{-1} \cdot {}^0T \cdot [{}^6T]^{-1} = {}^3T \cdot {}^4T \cdot {}^5T \quad \text{eşitliğinden} \quad (5.39)$$

$$A = l_5 \cdot (-\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot r_{11} - \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot r_{21} - \cos \theta_2 \cdot r_{31}) - \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot P_x - \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot P_y \cos \theta_2 \cdot P_z + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot l_1 - \cos \theta_2 \cdot l_2 \quad (5.40)$$

$$B = l_5(\sin \theta_1 \cdot r_{11} - \cos \theta_1 \cdot r_{21}) + \sin \theta_1 \cdot P_x - \cos \theta_1 \cdot P_y - \sin \theta_1 \cdot l_1 \quad (5.41)$$

$$l_4 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4 - \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_4 \cdot l_4 + \cos \theta_3 \cdot l_3 = A \Rightarrow \cos \theta_3 (l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_3) - \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_4 \cdot l_4 = A \quad (5.42)$$

$$l_4 \cdot \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_4 \cdot l_4 + \sin \theta_3 \cdot l_3 = B \Rightarrow \sin \theta_3 (l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_3) + \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_4 \cdot l_4 = B \quad (5.43)$$

$$\text{her iki tarafı } -\sin \theta_4 \cdot l_4 \text{ çarparsak } \cos \theta_3 (l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_3) + \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_4 \cdot l_4 = A \quad (5.44)$$

$$\sin \theta_3 = \frac{-\sin \theta_4 \cdot l_4 \cdot A + (l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_3) \cdot B}{l_4^2 + l_3^2 + 2l_3 \cdot l_4 \cos \theta_4} \quad (5.45)$$

$$\text{her iki tarafı } (l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_3) \text{ çarparsak } \sin \theta_3 (l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_3) + \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_4 \cdot l_4 = B \quad (5.46)$$

$$\cos \theta_3 = \frac{\sin \theta_4 \cdot l_4 \cdot B + (l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_3) \cdot A}{l_4^2 + l_3^2 + 2l_3 \cdot l_4 \cos \theta_4} \quad (5.47)$$

($\sin \theta = a$ ve $\cos \theta = b$ ise $\theta = \arctan2(a, b)$ kuralından

$$\theta_3 = \arctan2(-\sin \theta_4 \cdot l_4 \cdot A + (l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_3) \cdot B, \sin \theta_4 \cdot l_4 \cdot B + (l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_3) \cdot A) \quad (5.48)$$

olur.

Aynı zamanda θ_3 a.sin θ + b.cos θ = c ise

$\arctan2(a, b) + \arctan2(\sqrt{(a^2 + b^2 - c^2)}, c)$ kuralından da bulunabilir.

6- θ_5 açısı için;

$$[{}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 T]^{-1} \cdot {}^0T_7 \cdot [{}^6T_7]^{-1} = {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad \text{eşitliğinde} \quad (5.49)$$

$$\begin{bmatrix} * & * & -\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot r_{13} - \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot r_{23} - \cos \theta_2 \cdot r_{33} & * \\ * & * & \sin \theta_1 \cdot r_{13} - \cos \theta_1 \cdot r_{23} & * \\ * & * & -\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot r_{13} - \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot r_{23} + \sin \theta_2 \cdot r_{33} & * \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * & * & \sin \theta_{3+4+5} & * \\ * & * & -\cos \theta_{3+4+5} & * \\ * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

buradan

$$\sin \theta_{3+4+5} = -\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot r_{13} - \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot r_{23} - \cos \theta_2 \cdot r_{33} \quad (5.51)$$

$$\cos \theta_{3+4+5} = \cos \theta_1 \cdot r_{23} - \sin \theta_1 \cdot r_{13} \quad (5.52)$$

($\cos \theta = a$ ve $\sin \theta = b$ ise $\theta = \arctan2(b, a)$ kuralından)

$$\theta_{3+4+5} = \arctan2(-\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot r_{13} - \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot r_{23} - \cos \theta_2 \cdot r_{33}, \cos \theta_1 \cdot r_{23} - \sin \theta_1 \cdot r_{13}) \quad (5.53)$$

son olarak

$$\theta_5 = \theta_{3+4+5} - \theta_3 - \theta_4 \quad \text{bulunur.}$$

Kol kinematik analizi benzer şekilde çözülerek sisteme uygulanmıştır.

Eklemlerin hareket sırasında istenilen yürüme şekline göre gitmesini istediğimiz konum ve açı değerleri yukarıda da bahsedildiği gibi ileri ve ters kinematik analizle çözümlenebilir. İki ayaklı yürüme modellemesinde yürüme için belirlenecek açı değerleri sistemin dengede kalmasını sağlayacak ve eklemleri gerçekte uzuv boyutlarına göre zorlamayacak şekilde olmalıdır. Yapılan bu araştırmalara göre sistemin eklem yapısı ve uzuv boyutları dikkate alınarak açı değerleri simülasyonda verilmiştir.

6. İNSANSI BİR ROBOT MODELİ İÇİN KONTROL

6.1. KAYMA KIPLİ KONTROL

6.1.1. Kayma Kipli Kontrol Yöntemi

Son yıllarda geliştirilen mekanik sistemlerde yüksek hassasiyetli hareket iletimi bir ihtiyaç halini almıştır. Ancak kontrol tasarımlarında genellikle kullanılan PID gibi klasik kontrol yöntemleri tatmin edici sonuçlar verememektedir. Literatürde birçok kontrol yaklaşımı önerilmesine rağmen sistem parametrelerindeki belirsizlikler, bozucu etkenler ve yüksek dereceli sistem dinamiği içeren kontrol problemleri, kontrol mühendisliği çalışmalarında bir sorun teşkil etmektedir [53]. Ancak V.Utkin'in 1970'li yıllarda Kayma Kipli Kontrol yöntemiyle ilgili yapmış olduğu toparlayıcı çalışması kontrol sistemlerdeki bu sorunlara çözüm getirmiştir. Böylelikle robotlara, motor sürücülerine, AC/DC dönüştürücülerine, nükleer güç reaktörlerine, havacılık ve motorlu araçlara, DC/DC dönüştürücülerine, rüzgar enerji sistemlerine, kimyasal süreçlere, hard disk sürücüsü gibi pek çok elektriksel ve elektromekanik sistemlere uygulanmıştır [54]. Kayma Kipli Kontrol, bir robust kontrol metodudur ve belirsizliklerin, parametre değişimlerinin ve dış bozucuların bulunduğu sürücü kontrol sistemlerinde uygulanabilir [55].

Kayma Kipli Kontrol teorisi, parametrik belirsizliklere ve dışarıdan gelen bozucu etkenlere karşı kararlılık sağlayarak kontrolör tasarımında sistematik bir yaklaşım sunmaktadır [53]. Özellikle doğrusal olmayan veya değişen parametrelere sahip sistemlerin kontrolü için kullanılan en etkili dayanıklı kontrol yöntemlerinden biri Kayma Kipli Kontrol yöntemidir [56].

Bu yöntemin asıl amacı; sistem kaçınıcı dereceden olursa olsun sistemin davranışını birinci dereceye indirgeyecek kontrol girişini belirlemek ve sistemi birinci derece gibi davranmaya zorlamaktır [57,58].

Bu yöntemin en büyük dezavantajı kontrol sinyalinin bir değerden başka bir değere sonsuz hızda anahtarlanmasıdır. Bu yönteminin pratikteki uygulamalarında kalıcı durumda ulaşılmak istenilen değerlerde çatırdama (chattering) olarak bilinen yüksek frekans salınımları oluşmaktadır [56]. Son yıllarda bu çatırdamayı yok etmeye veya azaltmaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır [59].

İkinci dereceden tek girişli bir sistem için ; [56-60]:

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

Burada $\underline{x}(t)$ durum vektörü, $u(t)$ 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;

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

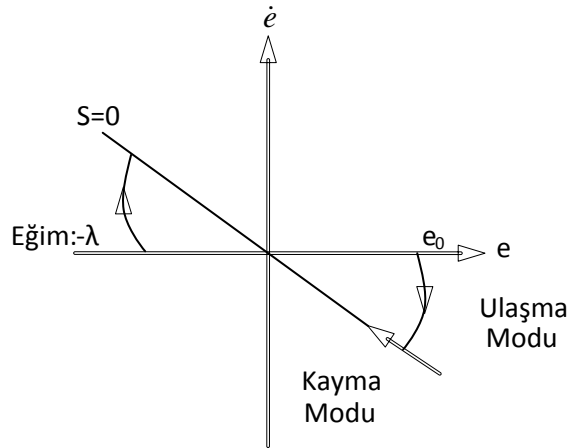
olarak ifade edilir. Böylece ikinci derece denklem parametre belirsizlikleri ile birlikte en genel haliyle tanımlanmış olur. Burada kontrolün amacı, model belirsizlikleri ve harici bozucular olsa bile $\underline{x}$ durum vektörünün ulaşılacak istenilen durum vektörü $\underline{x}^d$ 'i izlemesinin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

$$Cb_n u_{\max} \geq Cb_n L \operatorname{sgn}(S) + \eta \quad (6.15)$$

olur. Dayanıklı bir kontrolün sağlanması için,

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

olması gerekmektedir. Böylece denklem (6.2) ile ifade edilen sistem için dayanıklı bir kontrolör tasarlanmış olur [56,60].

6.2. Bulanık Mantık

Bulanık Mantık ve Bulanık Küme Teorisi, ilk kez 1965 yılında Kaliforniya Üniversitesi'nden Azerbaycanlı Prof. Dr. Lotfi A. Zadeh tarafından bulunmuş ve hızla gelişerek birçok bilim adamının ilgisini çeken yeni bir konu olmuştur [61]. Bulanık kümelere dayalı olan bulanık mantık, gerçek dünyada meydana gelen her değere bir üyelik derecesi vererek insan düşüncesine özdeş işlemlerin gerçekleşmesini sağlar. Böylece belirsiz ve kesin olmayan verilerin modellenmesine olanak sağlar [56,62].

Bulanık mantık; bulanık matematik, bulanık sistemler, bulanık kontrol, belirsizlik, ve yapay zeka gibi birçok araştırma alanında kullanılmaktadır. Bu alanların hiçbiri bağımsız değildir, aralarında kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır. Örneğin bulanık matematik ve bulanık mantık kavramları kullanılarak bulanık denetim oluşmuştur [56]. Günümüzde denetimi bulanık mantığa dayalı olarak gerçekleştirilen sistemler çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bulanık mantık sistemlerinin ilk uygulama alanları çimento sanayi ve su arıtma sistemleri olmuştur. Daha sonra buhar türbini, nükleer reaktör, asansör ve vinç denetimi gibi değişik alanlarda da bulanık mantıktan yararlanılmıştır. Özellikle Japonya'da çok geniş uygulama alanları oluşmuştur. 1988 yılında Japonya'da Hitachi firmasının Sendai'deki metro için gerçekleştirdiği bulanık mantık sistemi çok başarılı olmuş ve bu olaydan sonra Japonya'da Bulanık Mantık Sistemleri çok rağbet görmüştür. Günümüzde, bulanık mantık uygulamalarına yönelik yazılım ve donanımlar piyasada hazır bir şekilde

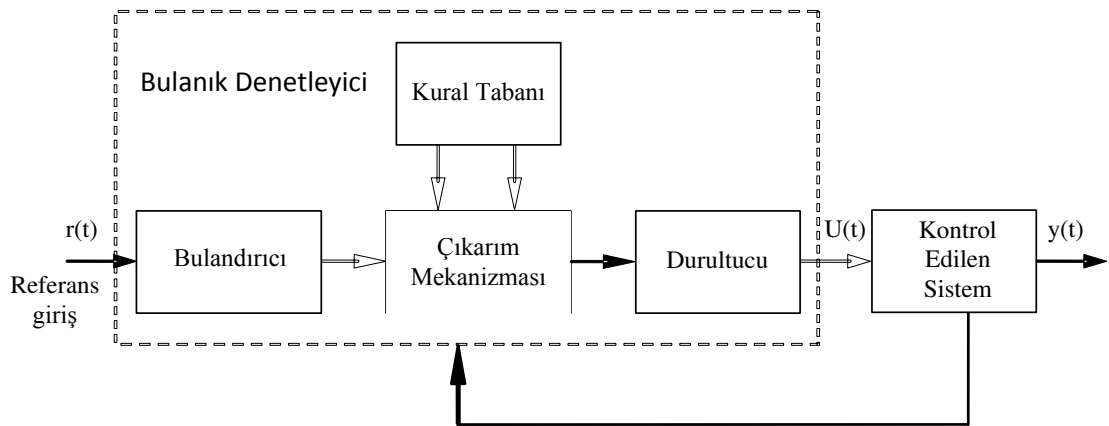
kullanıcılara sunulmaktadır. Çamaşır makinesi, mikrodalga fırın, televizyon gibi akıllı olarak nitelendirdiğimiz aletler bu mantığa göre çalışmaktadır [56,60,63].

Bulanık kümelerle dayalı olan bulanık mantık, evrendeki bütün bireylere bir üyelik derecesi atayarak onları matematiksel olarak tanımlamaktadır. Bu üyelik dereceleri [0-1] kapalı aralığındadır. Bulanık kümelerde, üye olandan olmayana geçiş kesin biçimde değildir. Oysa geleneksel var-yok mantığında kümeye kesinlikle ait ya da kesinlikle ait değil şeklinde iki grup vardır. Keskin küme olarak adlandırılan bu kümeler üye olanlarla olmayanlar arasında kesin bir fark vardır. Ancak gerçekte çoğu terim için bu kesinlik kavramının kullanılması doğru olmaz. Bu sebeple önermelerin doğru (1), yanlış (0) değerleri arasındaki değerleri de içermesi daha doğru sonuç verecektir. Bulanık küme kavramı olarak ifade edilen bu yaklaşım az, sık, orta, düşük, çok gibi dilsel etiketleri kullanarak dereceli veri modellemesini gerçekleştirmektedir. Böylece daha gerçekçi sonuçlar elde edilir [63].

6.2.1. Bulanık Kontrol

İnsanın düşünme tarzını kullanan bulanık kontrol sistemlerinde kontrolör yapısı üç ana bölümden oluşur ve genel yapısı Şekil 6.2. de gösterildiği gibidir [62,64].

- Bulandırıcı
- Kural Tabanı ve Bulanık Çıkarım
- Durultucu olarak adlandırılır.



Şekil 6.2. Bulanık denetleyici yapısı [64].

Bulandırıcı aşamasında giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları tanımlanır. Böylece kesin değerler bulanık değerlere dönüştürülür.

İkinci aşama olan kural tabanı –çıkarım mekanizmasında ise daha önceden sistem hakkında sahip olunan bilgiye dayanarak hazırlanan kural tablosu kullanılarak, sisteme yapılan girişlere göre kontrolcü çıkışının ne olacağına karar verilir [44]. Kural tabanı, uzman bilgisinin sözel ifadelerinden oluşur. Uzman kişiden alınan bu bilgilerle “IF-THEN” formülasyonu ile kurallar kural tabanında tanımlanır [65].

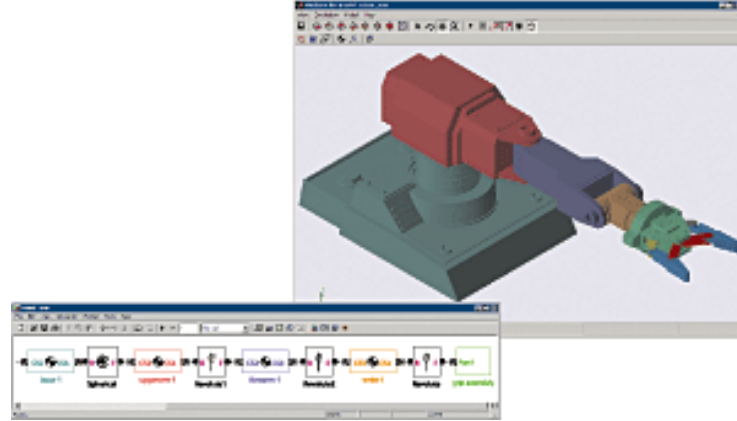
Çıkarım mekanizmasında AND, OR veya NOT işlemleri kullanılarak giriş değerlerinin üyelik dereceleri arasında kesinlik derecesi oluşturulur. Daha sonra oluşturulan bu kesinlik dereceleri ile ilgili kuralın bulanık çıkış kümesi arasında ima işlemi gerçekleştirilir ve ima edilen bulanık çıkış kümesi elde edilir. Son aşamada ise ima edilen bulanık çıkış kümelerinde “TOPARLAMA” işlemi gerçekleştirilerek “Sonuç Bulanık Çıkış Kümesi” bulunur.

Üçüncü son aşamada, bulunan sonuç bulanık çıkış kümesi kullanılarak denetleyicinin çıkışı durultma işlemiyle sayısal olarak hesaplanır. Durulma aşamasında “Ağırlık Merkezi” ve “Merkezlerin Ağırlıklı Ortalaması” olmak üzere iki yöntem kullanılır. En çok kullanılan yöntem ağırlık merkezi yöntemidir.

Bu tez çalışmasında bulanık mantıklı kayan kipli kontrolcü tasarımı kullanılmıştır. Kayma Kipli Kontrol, bir robust kontrol metodudur ve belirsizliklerin, parametre değişimlerinin ve dış bozucuların bulunduğu sürücü kontrol sistemlerinde uygulanabilir [55]. Diğer klasik denetleyicilerin, doğrusal olmayan ve zamanla değişen sistemlerin denetiminde iyi bir performans göstermemesi, bu kontrol yönteminin tercih edilmesinde belirleyici olmuştur. Bu yöntemin bilinen özellikleri; değişmezlik, dayanıklılık, derece indirgeme olarak bilinir. Bu kontrol yönteminin kullanılması halinde sistemin parametre belirsizlikleri, parametre değişimleri, dış bozucular gibi unsurlardan etkilenmesi önlenerek sisteme değişmezlik, dayanıklılık ve sağlamlık özellikleri kazandırılır. Bu sayede sistemin frekansını yavaşlatan bu öğelerin ortadan kaldırılması ile daha hassas bir sistem elde edilir ve başarılı sonuçlar alınır[66,67]. İnsansı robotun Simmechanics modelin kontrolünde kullanılan bulanık mantıklı kayma kipli kontrolör ile ilgili ayrıntılı bilgi bölüm 9’da verilmiştir.

7. SIMMECHANICS

Simmechanics MATLAB Simulink altında çalışan sistemlerin blok diyagramları şeklinde modellendiği, katı cisimlerin ve bu cisimlere ait hareketlerin Newton Dinamiği yasalarına göre çözümlendiği bir yazılımdır [68].



Şekil 7.1. Bir Simmechanic model ve blok örneği

Simmechanic, temel fiziksel prensiplere göre sistemin tasarım ve modellemesini kapsayan Simulink fiziksel modelleme ailesi için bir ürün platformu olan SimScape'e dayanmaktadır. Simscape blokları, matematiksel işlemleri ve sinyal işlemleri temsil eden diğer Simulink bloklarının aksine, fiziksel bileşenleri temsil eder.

Simmechanic, oluşturulan bir mekanik sistemin olası hareketlerini, kinematik kısıtlamalarını, koordinat sistemlerini, sistemin hareketlenmesini ve hareket sonuçlarını gözlemeyi sağlar [16].

Simmechanicte mekanik sistemlere ait girişler (moment, kuvvet) bloklara iletilir ve sisteme ait çıkış (ivme, hız, konum) bilgileri ilave bloklar yardımıyla mekanik sistemin herhangi bir noktasından okunup grafiğe dökülebilir [69].

Bir modelin oluşturulabilmesi için “Body”, “Joint”, “Actuator”, “Sensör” gibi blok bileşenleri kullanılır. Bir model oluşturulurken temel olarak katı cisimlerin temsili için body blokları, eklemler için joint blokları, sistemin body veya joint bloklarına giriş olarak verilecek tork/kuvvet gibi sinyaller için actuator blokları ve sistemin çalışmasıyla çıkış olarak elde edilen sinyallerin alınabilmesi için ise sensörlerin kullanılması gerekir. Tüm bu bileşenler oluşturulmadan önce uzaydaki yerinin belirlenmesi için ise ground bileşeni kullanılır.

Simmechanic bloklarının yanı sıra grafik bilgilerinin alınması gibi işlemleri gerçekleştirmek amacıyla diğer Simulink bileşenleri de bu ortamda kullanılabilir [70].

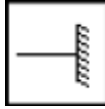
Model aşamasında kullanılacak bloklar [71]:

Gövde (Body) : Katı cisimlerin temsilini yapar. Cisimlerin kütle, atalet momenti, ağırlık merkezi koordinat sistemi ve bulunduğu koordinat sistemi gibi özelliklerini içerir.



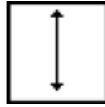
Şekil 7.2. Gövde blok temsili

Zemin (Ground): Dünya koordinat sistemine göre oluşturacağımız modelin hareketsiz zemin noktalarının temsilini yapar.



Şekil 7.3. Zemin (ground) blok temsili

Prizmatik (Prismatic): İki body arasında belirlenmiş bir eksen boyunca bir eksenli kayma (translasyon) hareketinin prizmatik temsilini yapar.



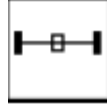
Şekil 7.4. Prizmatik blok temsili

Dönme Eksenli (Revolute): İki gövde arasında belirlenmiş bir eksen etrafında dönme hareket temsilini yapar.



Şekil 7.5. Dönme eksenli (Revolute) blok temsili

Kaynak (Weld): Hareket imkanı sağlamayan sadece bileşenleri bağlamaya yarayan bir elemandır.



Şekil 7.6. Kaynak blok temsili

Gövde Çalıştırıcı (Body Actuator) : Bir gövdeye güç ve tork uygulanmasını sağlar. Kaynak güç sinyal uygulanır.



Şekil 7.7. Gövde çalıştırıcı temsili

Gövde Sensör (Body Sensör): Bir body'nin hareketlerinin ölçümünü yapar. Çıkış sinyalleri alınır.



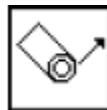
Şekil 7.8. Gövde sensör blok temsili

Eklem Çalıştırıcı (Joint Actuator): İki gövde arasında eklemi hareketlendirmek veya güç/tork uygulamak.



Şekil 7.9. Eklem çalıştırıcı blok temsili

Eklem Sensör (Joint Sensor): Bir eklemden oluşan güç/tork ve hareketlerin ölçülmesini sağlar.



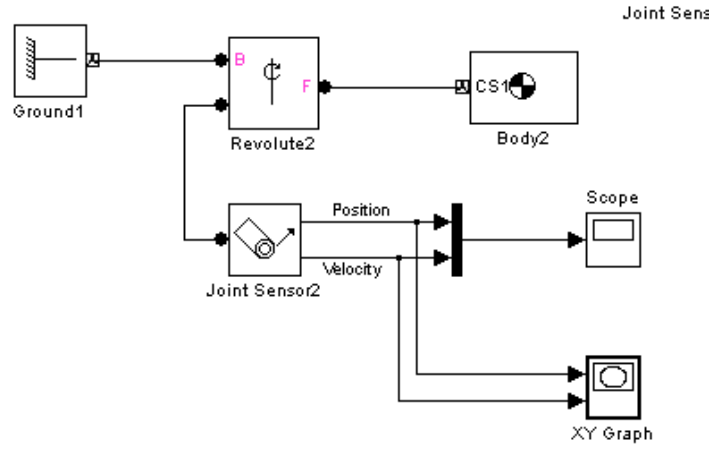
Şekil 7.10. Eklem sensör blok temsili

Başlangıç Şart Çalıştırıcı (Initial Condition Actuator): Bir simülasyona başlamadan önce bir eklem için başlangıçta istenilen konum ve hız değerlerinin uygulanmasını sağlar.



Şekil 7.11. Başlangıç şart çalıştırıcı blok temsili

Simmechanics bloklarıyla örnek bir model aşağıda Şekil 7.12 de gösterilmiştir.



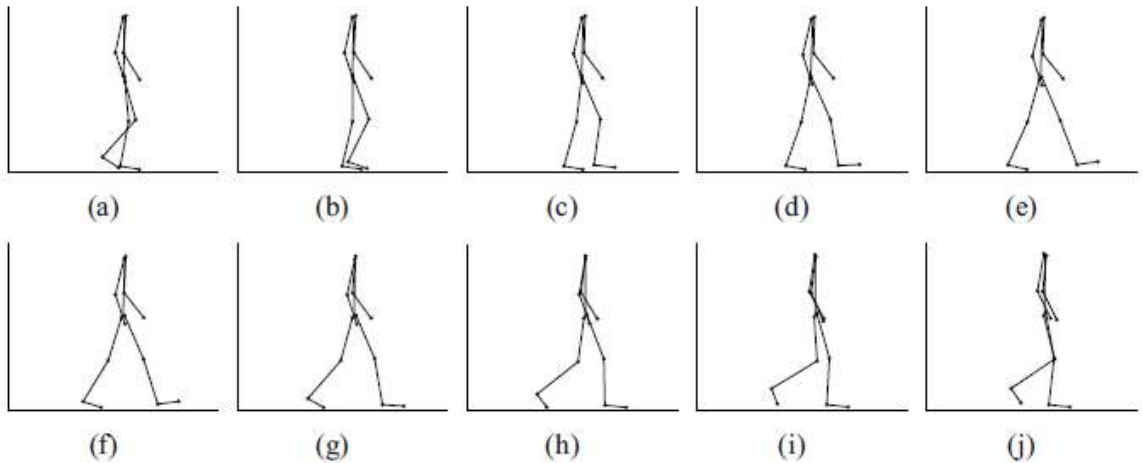
Şekil 7.12. Simmechanics model örneği [71].

8. İKİ AYAKLI YÜRÜME

Hareket kabiliyeti açısından esneklik sunan iki ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmaların temelini insan oluşturmaktadır [6].

İki ayaklı robotların mekanik dizaynını anlamak için öncelikle iki ayaklı yürüme hareketini anlamak gerekir. Bu alanda uzun süre bir çok çalışma yapılmış olmasına rağmen sadece geçtiğimiz yıllarda bilişim alanındaki hızlı gelişmeler sayesinde iki bacaklı robotların yürümesi hedeflenen düzeyde gerçekleşmeye başlamıştır. O zamandan beri, problemler farklı yönlerden ele alınmıştır. Robotlar ilk olarak statik yürümeyi kullanırlardı. Bu yürüme şeklinde, zemindeki yerçekimi merkezinin izdüşümünün daima ayak destek bölgesinin içinde olması gerekiyordu. Ancak bu yürüme şeklinde yürüme hızının düşük olması ve sadece düz alanlarda başarı elde ediliyor olması bu yaklaşımdan vazgeçilmesine neden oldu. Statik yürümenin yerini dinamik yürüme aldı. Dinamik yürümede ise, statik yürümenin aksine yerçekimi merkezi destek bölgesinin dışında gerçekleşebileceği çalışmalarda görülmüştür. Bu sayede hareketin daha hızlı ve istenilen düzeyde yapılması sağlandı [72].

İki ayaklı yürüyüş iki kısımdan oluşur. İki bacaklı destek kısmı ve tek bacaklı destek kısmı. İki bacaklı destek fazı adım atan ayağın topuğunun yere değmesiyle başlar ve arka ayağının parmak ucunun adım atmak için havaya kalkması ile biter. Tek bacaklı adım fazında bir bacak gövdeyi desteklerken diğer bacak adım atmak için havaya kalkıp ilerler. İki bacaklı yürüyüş tipleri Şekil 8.1. de gösterilmiştir [35,73].



Şekil 8.1. Robot yürümesi [35].

Bu tez çalışmasında dinamik yürüme hareketleri uygulanacaktır.

8.2. İki-Ayaklı Robotun Boyutları

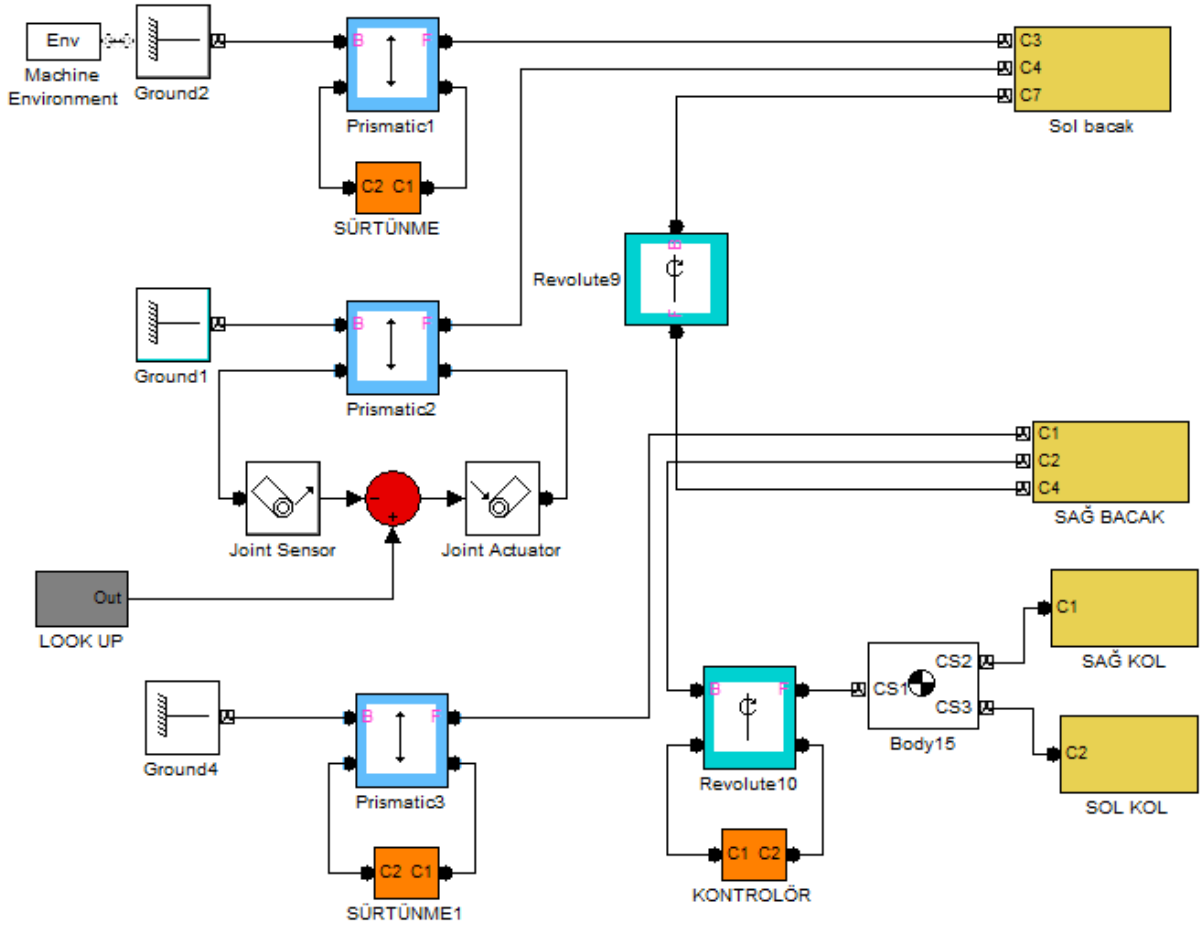
Amaç insanların hüküm sürdüğü bir ortamda dengeli çalışacak bir robot tasarımı oluşturmaksa uzuv boyutları da buna uygun seçilmelidir. Çünkü iki-ayaklı robotun boyutları kontrol mimarisi başta olmak üzere tasarımda belirleyici bir etkidir. Küçük bir robot hedeflenirse merdiven çıkmak gibi eylemleri yapamayacaktır. Gereğinden büyük iki-ayaklı robot hedeflenirse de daha fazla güç ve enerji gerektirecek buda tasarımı zorlaştıracak hatta imkânsız hale getirebilecektir [14].

Bu bilgiler ışığında yaptığımız tez çalışmasında ilerde yapılacak gerçek zamanlı çalışmalara katkısı olması hedeflenerek herhangi bir çalışma veya model baz alınmadan modelin dengeli ve kontrollü bir şekilde yürümesini sağlamaya yönelik uzuv boyut değerleri öngörülmüştür. Uzuv boyutları ayak-baldır arası 50 cm, gövde 30 cm olarak seçilmiştir.

9. İNSANSI (HUMANOID) BİR ROBOTUN SİMMECHANİCS MODELİ

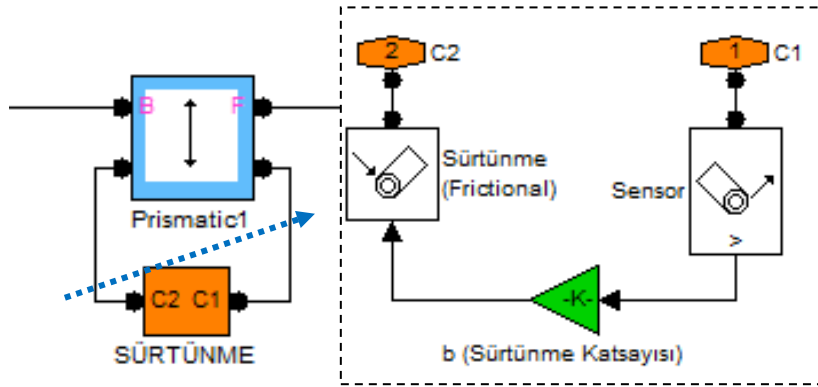
Simmechanics modelleme blok diyagramlarıyla model oluşturulması prensibine dayalıdır. Bu blokların temelinde modeli oluşturulacak sisteme ait kuvvet, momentlerin Newton dinamikleri, üç boyutlu uzaydaki hareket ve davranışlarını belirleyen alt fonksiyonlara bağlı programcıklar bulunur. Bu Simmechanics blokları, matematiksel işlemleri ve sinyal işlemleri temsil eden diğer Simulink bloklarının aksine, fiziksel bileşenleri temsil eder. Ayrıca, Simmechanics te oluşturulan bir mekanik sistemin olası hareketleri, kinematik kısıtlamaları, koordinat sistemleri, sistemin hareketlenmesi ve hareket sonuçları, gerçek uygulamalarda sistemin karşılaşılabileceği hatalar, sorunlar ve istenilenlere karşı vereceği cevaplar simülasyon ekranında görüntülenebilir.

Bu tez çalışmasında insansı robotun modellemesi ve kontrolü Simmechanics blokları yardımıyla aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 9.1. İnsansı (Humanoid) bir robotun Simmechanics modeli

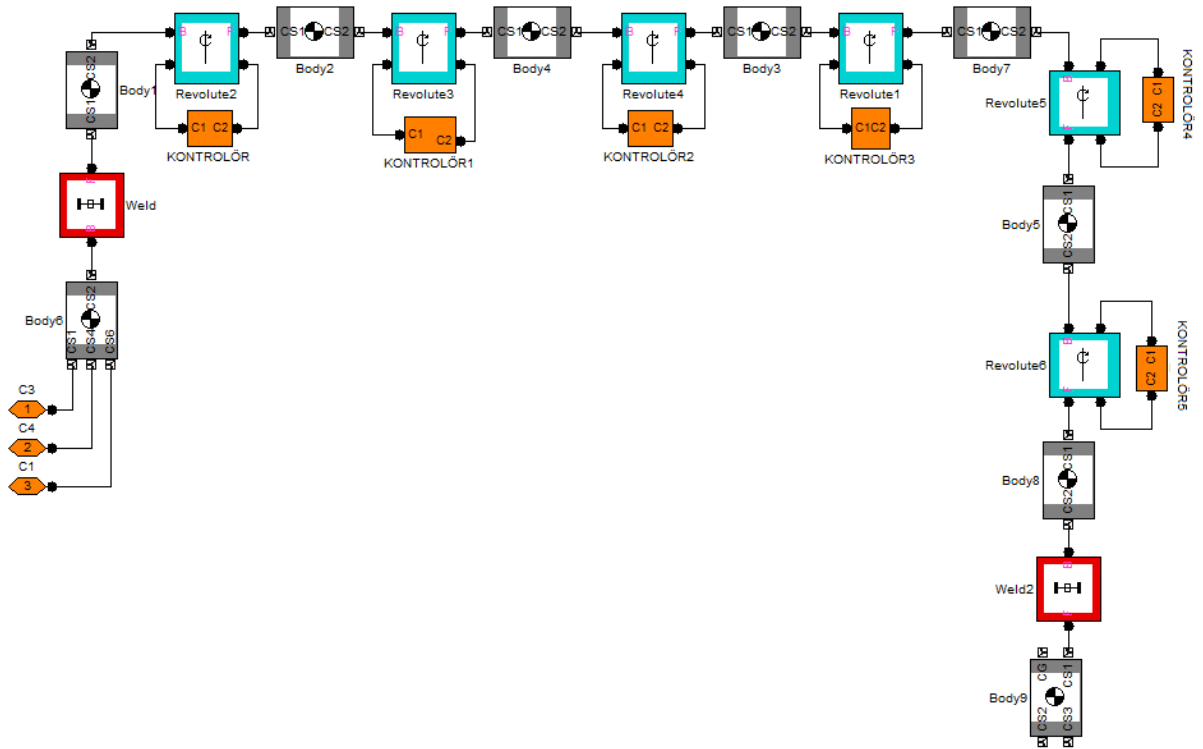
Gerçek zamanlı uygulamalarda yapılan çalışmalar sürtünmeli bir ortamda gerçekleştirilirken Simmechanics bize sürtünmesiz bir ortam sunmaktadır. Ancak oluşturulan modelin amacı gerçek zamanlı uygulamadaki parametreleri, sorunları ve durumları görebilmek olmasına rağmen sürtünmenin olmaması doğru sonuçların alınmamasına ve hareketin doğru bir şekilde gerçekleşmemesine neden olmaktadır. Çünkü sürtünmesiz ortamda hareketin yavaşlaması ve ileri geri istemsiz hareketlerin kontrolü mümkün değildir. Bu da ileri yön (kayar) hareket eklemlerine sürtünme bloğu eklenmesini gerektirir. Sürtünmeye bağlı olarak hareketi gerçekleştirebilmek için prizmatik eklem bloğuna Şekil 9.2 deki gibi “SÜRTÜNME” bloğu eklenmiştir.



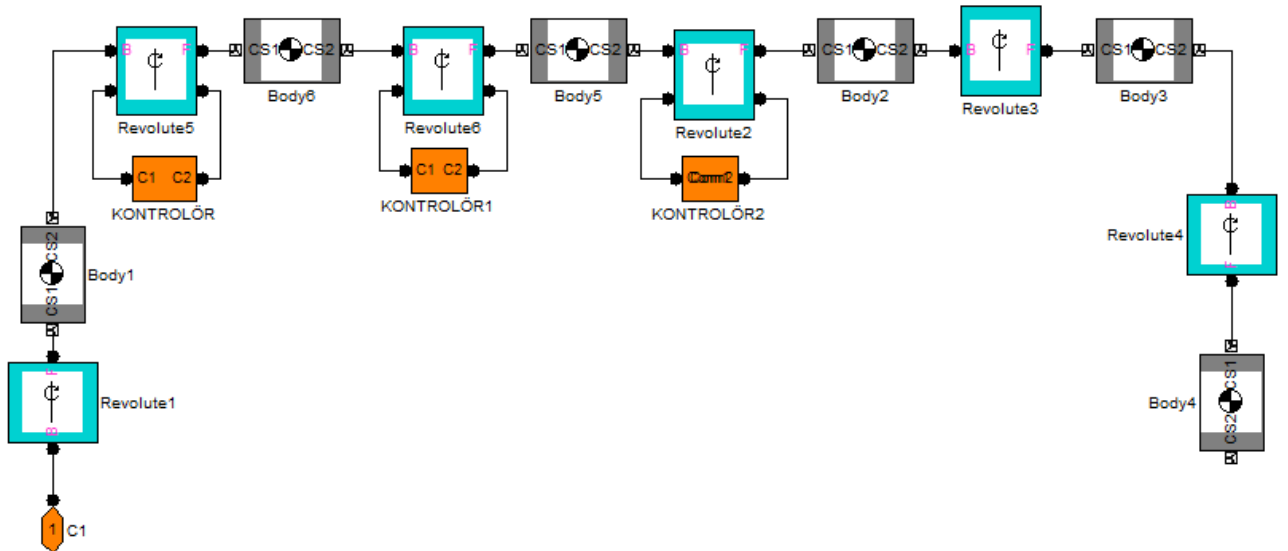
Şekil 9.2. Sürtünme bloğu

Şekil 9.2’ deki “SÜRTÜNME” alt bloğunda görüldüğü gibi sistemin hız parametresi sensör yardımıyla alınıp “b” sürtünme katsayısı ile çarpılarak actuator bloğu yardımıyla prizmatik ekleme sürtünme uygulanır. B katsayısı -0.5 olarak alınmıştır. b katsayısı deneme yanılma yöntemiyle seçilmiştir.

Şekil 9.3’te insansı modelin sağ ve sol bacak modeli ve Şekil 9.4’te de sağ ve sol kol modeli gösterilmiştir.



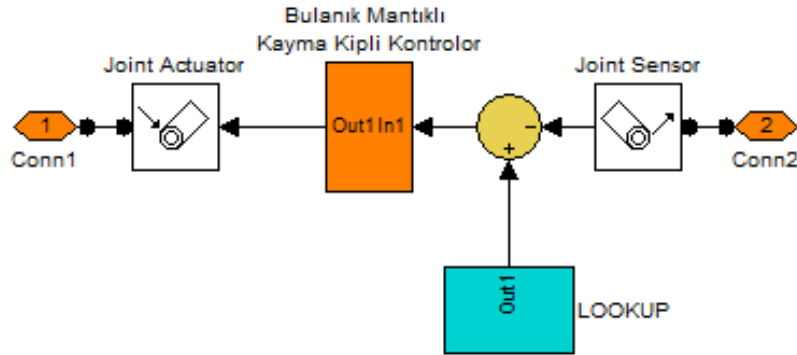
Şekil 9.3. İnsansı robotun sağ ve sol bacak Simmechanics modeli



Şekil 9. 4. İnsansı robotun sağ ve sol kol Simmechanics modeli

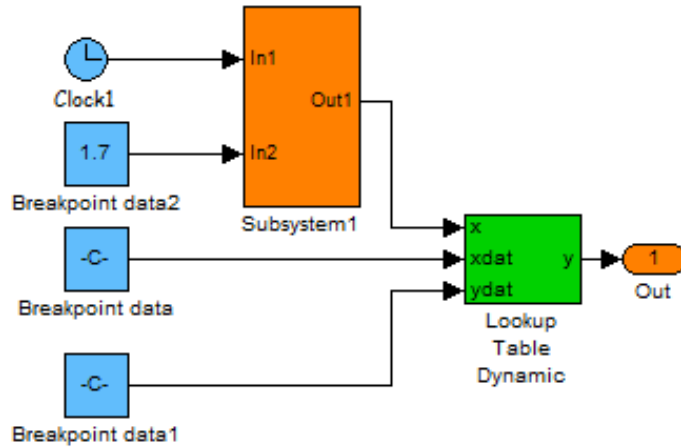
Şekil 9.3 ve Şekil 9.4 deki sağ-sol bacak ve sağ-sol kol modellerinde görüldüğü gibi hareket için kullanılan tüm eklemlerde açı kontrolü yapılmıştır. Bu açı değerleri de belirlenen dinamik yürüme şekline uygun olarak kinematik analiz bölümünde belirlenen maksimum ve minimum sınır değerleri arasında bir değer seçilmiştir. Böylece uygun bir yürüme şekli elde edilmiştir.

Yürüme için belirlenen açı değerleri eklemlere referans giriş olarak Şekil 9.5 deki lookup bloğu ile verilir. Ancak bu değerlere sistemin ulaşması ve uygun cevaplar vermesi için Şekil 9.5. de görüldüğü gibi Bulanık Mantıklı Kayma Kipli Kontrolör bloğu kullanılmıştır. Bu kontrolör yardımıyla dış bozuculardan ve parametre değişimlerinden etkilenmeyen hassas bir yürüme şekli elde edilir. Bu kontrolörün çıkışı eklemlere tork şeklinde verilerek istenilen açı değerinde kalması sağlanır.

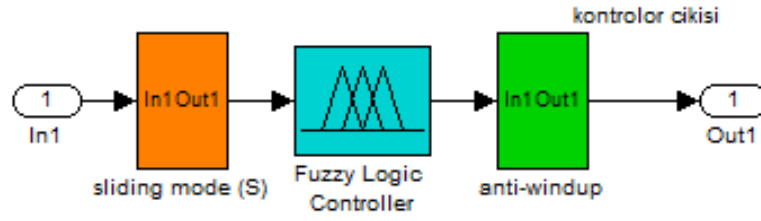


Şekil 9.5. Kontrolör blok içeriği

Lookup bloğu, sistemin eklemleri için kinematik analiz ile belirlenmiş referans açı değerlerinin belirli bir zaman döngüsü ile eklemlere uygulanmasını sağlar. Genel yapısı Şekil 9.6. da gösterildiği gibidir.



Şekil 9.6. Lookup blok içeriği

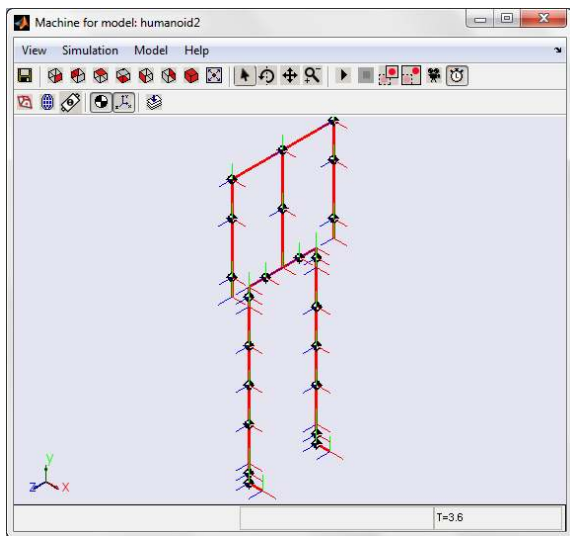


Şekil 9.7. Bulanık Mantıklı Kayma Kipli Kontrolör blok içeriği

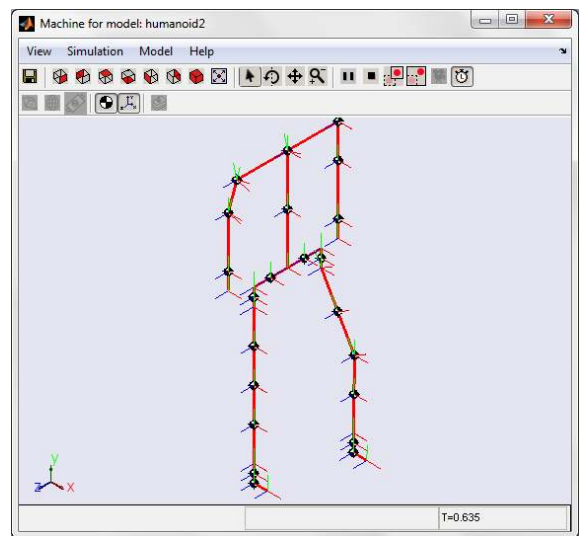
Şekil 9.7 da Bulanık Mantıklı Kayma Kipli Kontrol Blok içeriğinde sliding mode(kayma kipli), fuzzy logic controller (bulanık mantıklı kontrolör) ve anti-windup bloğu kullanılmıştır.

Bulanık Mantıklı Kayma Kipli Kontrol, sistemin kontrol edilmesinde sınırlayıcı etkileri olan; sistemin non-lineeritesi, parametre belirsizlikleri ve bozucu büyüklükleri gibi durumların modellenenebilmesine imkan sağladığı için bu tez çalışmasında tercih edilmiştir. Kayma kipli kontrol parametreleri gerçek bir tasarım yapılmaksızın bu ön çalışma için deneme yanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Bulanık Mantık için 3'er adet (küçük,orta,büyük) giriş-çıkış üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır. Genelde sistemler yapılarına göre sınırlı bir çalışma aralığı barındırmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada da sistemin modellenmesindeki Bulanık Mantık çıkışını sonsuz değer aralığından sınırlı bir değer aralığına getirmek için anti-windup bloğu kullanılmıştır. Çalışma aralığı olarak ± 15 aralığı seçilmiştir [60].

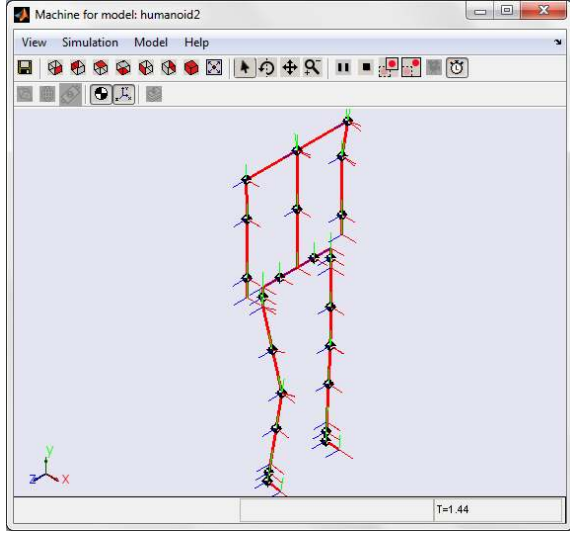
Son olarak Simmechanics ortamda oluşturulan modelin dinamik yürümesi Şekil 9.8 ve Şekil 9.9 da gösterilmiştir.



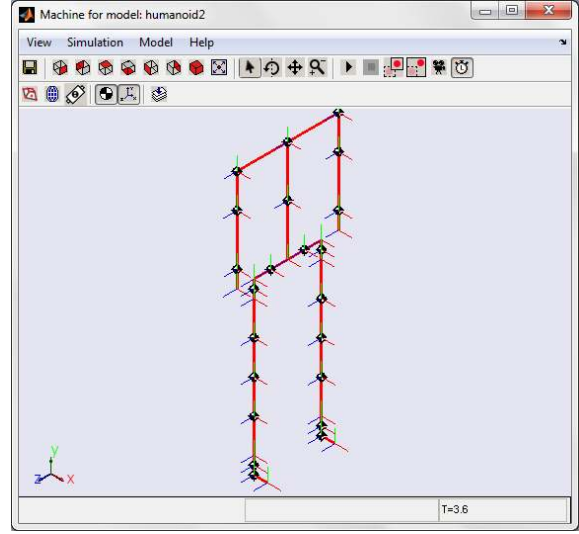
(a)



(b)



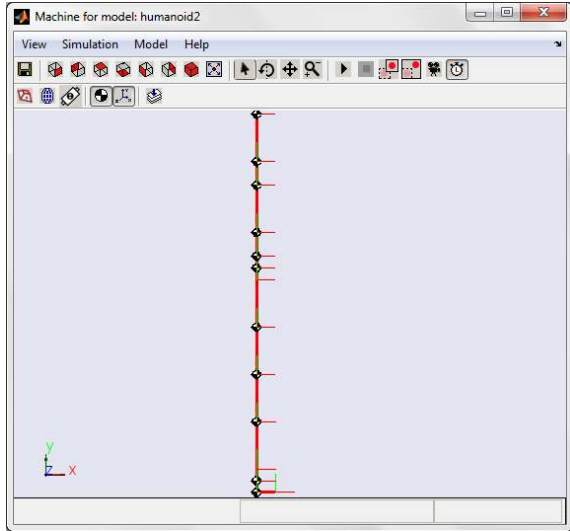
(c)



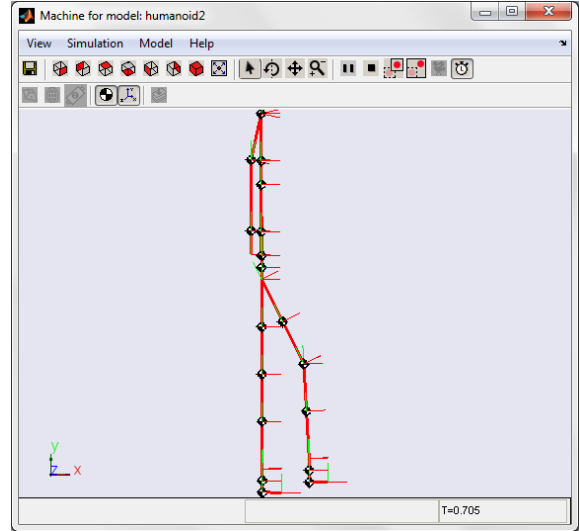
(d)

Şekil 9.8. İleri yön hareketi için bir periyoda ait simülasyonun önden görüntüsü:

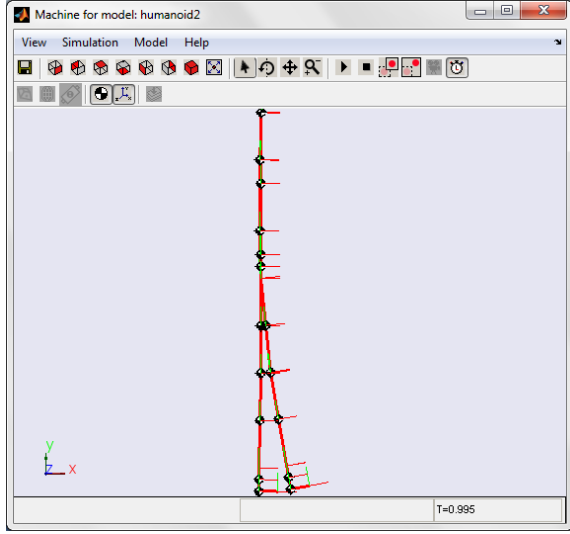
- a) Hareket başlangıç anı b) Sol ayağın ve sağ kol hareket gösterimi c) Sağ ayak ve sol kol hareket gösterimi d) Hareketin durma anı



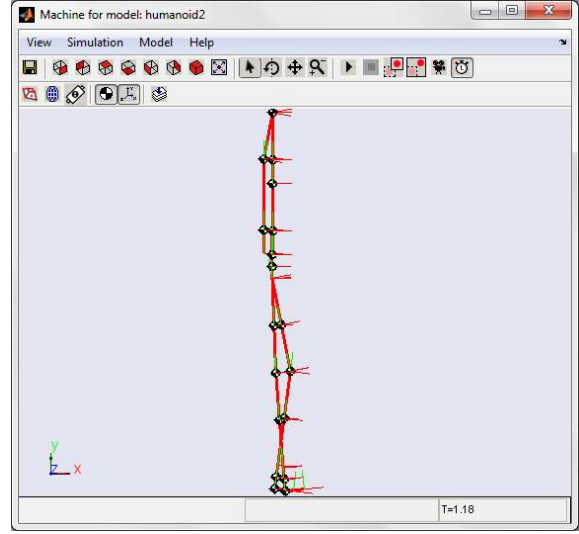
(a)



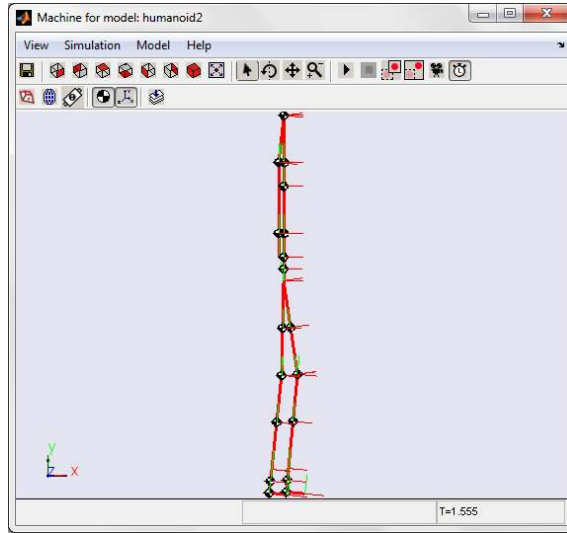
(b)



(c)



(d)

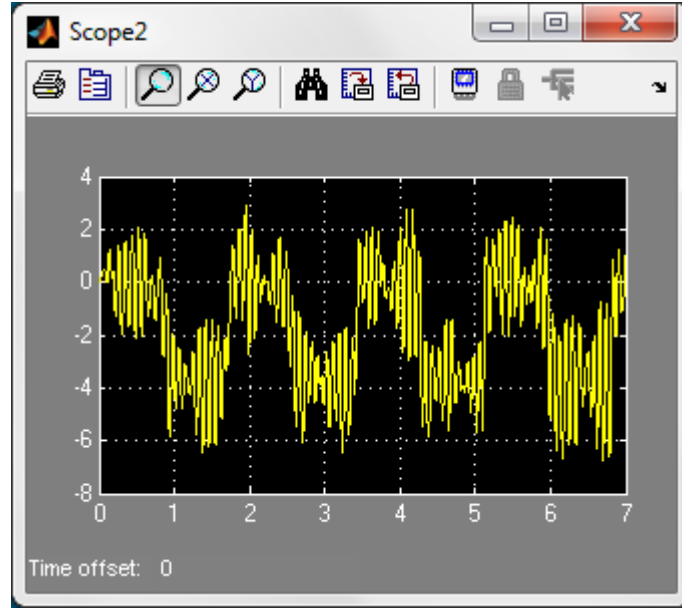


(e)

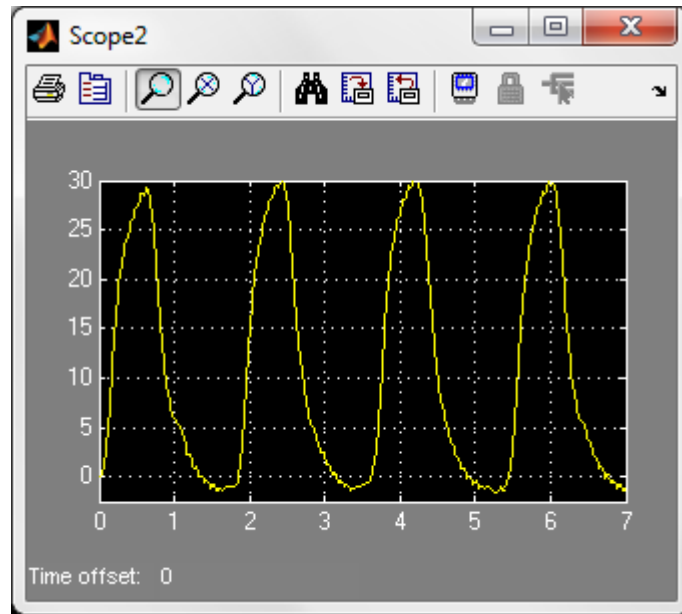
Şekil 9.9. İleri yön hareketi için bir periyoda ait simülasyonun yandan görüntüsü :

- a) Hareket başlangıç anı b) Sol ayağın ve sağ kol hareket gösterimi c) Sol ayağın yere teması d) Sağ ayak ve sol kol hareket gösterimi e) Hareketin durma anı

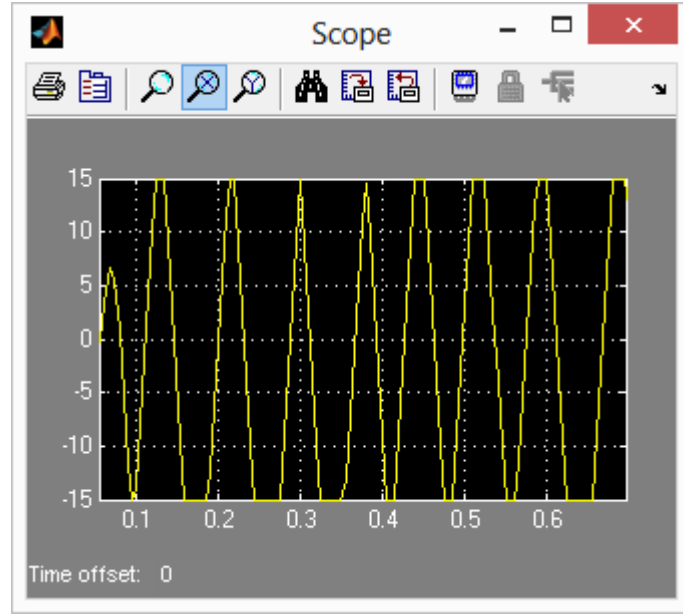
Simmechanic ortamda oluşturulan modelin hareketi sırasında sürtünme, tork, ivme, hız vb. gibi durumlarını sensörler yardımıyla öğrenebiliriz. Aşağıda modelin hareketi sırasında herhangi bir eklemden ki tork, ivme, hız ile hareket sırasındaki sürtünmeleri Şekil 9.10 ve Şekil 9.14 arasında gösterilmiştir.



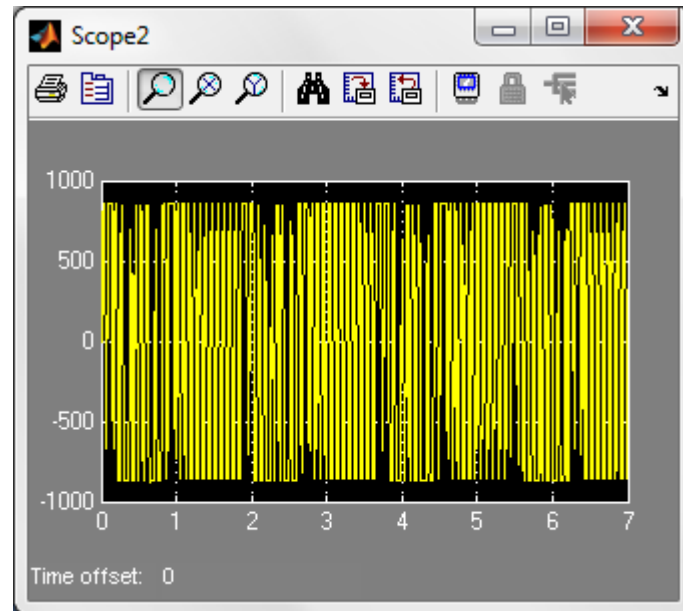
Şekil 9.10 Hareket sırasındaki sürtünmenin zamana göre değişimi(N)



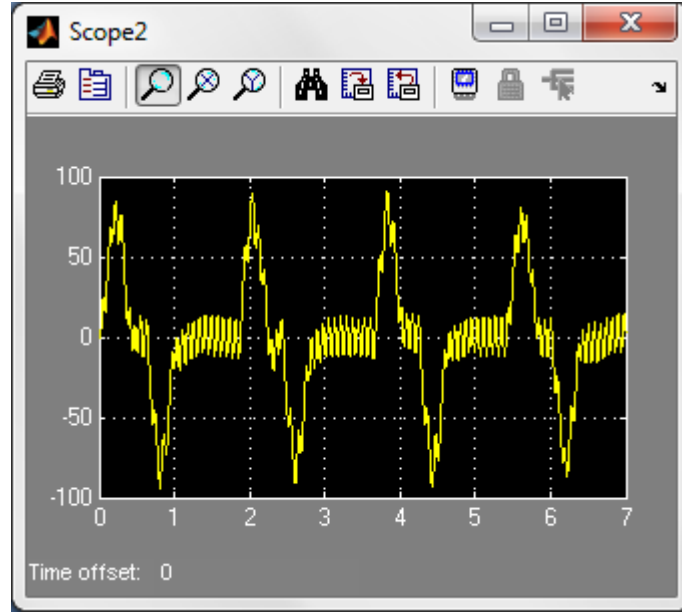
Şekil 9.11 Hareket sırasında bir eklemdaki açı değerinin zaman göre değişimi(deg)



Şekil 9.12 Ekleme uygulanan torkun zamana göre değişimi (N.m)



Şekil 9.13 Eklemdaki zamana göre ivme değişimi (cm/s^2)



Şekil 9.14 Eklemin hareket hızı (deg/s)

10. SONUÇ

Robot araştırmalarında yapılan çalışmalarda donanımsal prototipler oluşturmanın buyk mali klfetler getirmesi üreticilere bu çalışmaları yazılım ortamında gerçekleştirme fikrini vermiş ve boylice gerçek uygulamalarda sistemin karşılaşabileceği hatalar, sorunlar ve istenilenlere karşı vereceği cevaplar gözlemlenebilmiştir.

Bu tez çalışmasında, 24 serbestlik derecesine sahip insansı bir robotun kinematik analizi , kontrolü, dinamik benzetimi ele alınmıştır. Sistemin, gerçek uygulamaların donanımsal olarak benzetiminin yanında hızlı prototipleme uygulamaları için de örnek olması amaçlanarak bir model oluşturulmuştur. Sistemin modellenmesi MATLAB/Simulink-Simmechanics kullanılarak yapılmıştır. Modellenen sistemin denetimi de, bulanık mantıklı kayma kipli kontrolör yardımıyla sağlanmıştır. Gerçekleştirilen sistemin doğrusal olmayan yapıda olması bu yöntemin seçilmesinde belirleyici olmuştur.

Sistemin modellemesi aşamasında öncelikle hareket için gerekli olan parametreler (açı, konum), Denavit-Hartenberg Yaklaşımı'ndan yararlanılarak ileri/ters kinematik denklemlerinin çözümlenmesi ile bulunmuştur. Robot dinamik denklemlerinin çözümünde ise yaygın olarak kullanılan Langrange-Euler denklemine değinilmiştir. Bu dinamik denklemler arka planda ileri ve/veya ters dinamik zmlmelerde kullanılmakta olsa da Simmechanics'in bloklar içerisinde kapalı alt programlar ile sunduğu olanaklar detaylı ve fazlasıyla karmaşık olan bu dinamik denklemlerin çözümünden kurtarmıştır.

Çalışmanın bir diğer önemli konusu da insana benzer yürümenin gerçekleşebilmesi için en uygun yürüme tipinin seçilmesidir. Bu konuyla ilgili yapılan araştırmalarda dinamik yürümenin en uygun yürüme tipi olduğu görüldü ve sistem için bu yürüme şekli seçildi.

İki-ayaklı robotun boyutları kontrol mimarisi başta olmak üzere tasarımıda belirleyici bir etkidir. Bu tez çalışmasında gerçek zamanlı çalışmalara katkısı olması hedeflenerek, modelin dengeli ve kontrollü bir şekilde yürümesini sağlamaya yönelik uzuv değerleri ngrlmştir.

Hedeflenen model tasarımıda kayma kipli kontrolör ile her bir eklemin aı kontrolü yapılarak istenilen uygun yürüme şekli simüle edilmiştir. Sistemin yürüme sırasında hız, konum, ivme vs. gibi parametreleri grafikler şeklinde tezde sunulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Özyalçın,İ.,2006.** “Kartezyen robot tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya
- [2] **Bayrak,A., 2007.** “Beş Eksenli Bir Robot Kolunun Simülasyonu ve Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü- Ankara .
- [3] İnternet: Robot & Elektronik, Çeviren: Özkal Özsoy, “Yakın Tarihte Robotik Biliminin Gelişimi”[http://www.endtas.com/robot/modules.php?name=Content&pa=showpage &pid=28](http://www.endtas.com/robot/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=28) (2002).
- [4] **Albayrak, M., Albayrak, Ü. ve Yaman, M.M, 2006.** “KHR-1 Ayaklı Robot Mekanîği Üzerinde Hareket Öğretmen Yazılımı Geliştirme”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi,6,59-64.
- [5] **Acar,M.,2007.** “İki Ayaklı Yürüme Hareketinin Modellenmesi ve Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-İstanbul.
- [6] **Yapıcı,K.O.,2008.** “14 Serbestlik Dereceli İki Ayaklı Bir Robotun Dinamik Yürüme Hareketinin Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-İstanbul.
- [7] **Takanishi, A., Lim H.,2000.** “Waseda Biped Humanoid Robots Realizing Human-like Motion”, Proceedings of the International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 525-530, Nagoya, Japan.
- [8] **Demircioğlu,M.,2006.** “Bilgisayar Destekli Robot El Tasarımı ve Gerçeklenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-Sakarya.
- [9] **Tonbul,T.S.,Sarıtış,M.,2003.** “Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar ve Yörünge Planlaması.”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,18,145-167.
- [10] **Kim, J., Park, I. and Oh, J. 2007.** “Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 48(4), 457–484.
- [11] **I. W. Park, J. Y. Kim, J. Lee, J. H. Oh.2005.** Mechanical Design of Humanoid Robot Platform KHR-3(KAIST Humanoid Robot-3:HUBO). Paper Presented at the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, Tsukuba, Japan, 5-7.

- [12] **K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, 1998.** “The Development of Honda Humanoid Robot”, in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automations, pp.1321-1326,
- [13] **Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, and T. Isozumi, 1998.** “Design of Prototype Humanoid Battery Main controller (PC) Robotics Platform for HRP”, in Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2431-2436.
- [14] **Altınorak, S., 2006.** “İki Ayak Robot Modellemesi Denetleyici Tasarımı ve Dinamik Benzetimi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-İstanbul.
- [15] **Yuan, S., Liu, Z., Li, X., 2008.** “Modeling and Simulation of Robot Based on Matlab/Simmechanics”, Proceedings of the 27th Chinese Control Conference 16-18.
- [16] www.mathworks.com, Simmechanics 2 User's Guide, 29.12.2012
- [17] Simmechanics For Use With Simulink.pdf, (2010)
- [18] **Duran, M. A., 2007.** Puma Tipi Bir Manipülatörün Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [19] ODTÜ Robot Topluluğu Web Sayfası, <http://robot.metu.edu.tr/index.php?link=5> 13.01.2012
- [20] **Sutherland T., C., 1991.** ”Kütüphanede Robot Kullanımı”, TÜRK KÜTÜPHANECİLİĞİ, 5,1, (33-35s)
- [21] **Barutçuoğlu, E. I., 2001.** Robotların Tarihçesi.
- [22] **Varol, A., 2000,** Robotik, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul.
- [23] **Şahin, Y. ve Çakan, A.,** Endüstriyel robotlar ve Fanuc R-J3iC Robot Deneyi.
- [24] **Çetinkaya, Ö., 2009.** Bir Kolun Hareketlerini Takip Eden Dört Dönel Mafsallı Robot Kolu Tasarımı ve Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25] **Gün, A.,** Robotik Ders Notu, Dumlupınar Üniversitesi EEM.
- [26] **Güzel, M. S., 2008.** Altı Eksenli Robot Kolun Hareketsel Karakteristliğinin Görsel Programlanması ve Gerçek Zamanlı Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [27] **Bingöl, Z. ve Küçük, S., 2005.** Robot Tekniği-I, Birsan Yayınevi, İstanbul.

- [28] **Saygılı, Ç., 2006.** Scara Tipi Bir Robotun Tasarımı Ve Animasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [29] **Zutven, V., 2009.** “Modeling, Identification and Stability Of Humanoid Robots”, Masters's Thesis, Eindhoven University of Technology Department of Mechanical Engineering Dynamics and Control Group, Eindhoven.
- [30] **Akalın, G., 2010.** Simulation Of Biped Locomotion Of Humanoid Robots In 3D Space, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [31] **Koca, Ö., 2009.** ZMP Based Reference Generation For A Bipedal Humanoid Robot, Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] **Kamerling, D. Larochelle, P., 2007.** Proposed Design Of A Triped Robot, Florida Conference on Recent Advances in Robotics, Florida.
- [35] **Christensen, J., Nielsen, J.L., Svendsen, M.S. and Qrts, P.F., 2007.** “Development, Modelling and Control Of A Humanoid Robot, Master’s Thesis, Aalborg University, Denmark.
- [36] **Ali, M.A., Park, H. A. and Lee, C.S.G.,** Closed-Form Inverse Kinematic Joint Solution for Humanoid Robots.
- [37] **Kutilek, P. and Hajny, O.,** Study Of Human Walking By Simmechanics, Czech Technical University in Prague, Faculty of Biomedical Engineering, Çek Cumhuriyeti, Prag
- [38] **Amca, A.M., 2010.** Koparma Kaldırışının Biyomekanik Analizi İçin Mekanik Model Geliştirilmesi, Hacettepe j. Of Sport Sciences, 21-29.
- [39] **Rodas R., 2011.** Advanced Biped Locomotion in Real/Simulated Humanoid Robots, Master Thesis, School Of Engineering and Institute Of Microengineering.
- [40] **Williams R.L., 2007.** Simulation Of A Humanoid Robot, Master Thesis, Russ College Of Engineering And Technology Of Ohio University, Ohio.
- [41] **Durmaz, U., 2007.** Bir Robot Kolunun Sinirsel Bulanık Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [42] **Schilling, R.J,** Fundamentals Of Robotics: Forward Kinematics The Denavit-Hartenberg Convention.
- [43] **Koca, H., 2007.** Robot Manipülör Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [44] **Hacıoğlu, Y., 2004.** Bir Robotun bulanık Mantıklı kayan Kipli Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [45] **Közkurt, C. ve Soyaslan, M., 2011.** Bilekli Scara Robot Kolu İçin Kinematik Analiz Yazılımı Geliştirilmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ.
- [46] **Ekin, O., 2011.** Yüksek Serbestlik Dereceli Mekatronik Sistemlerin Tasarımı ve Kontrolü, Yüksek lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [47] **Hong, S.M.,** Introduction to Robotic Engineering, School of Electrical Engineering and Computer Science Kyungpook National University.
- [48] **Şahin, Y., 2006.** Scara Tip Robotun Yörünge Kontrolünde PID Kontrol Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [49] **Santos, C.H., Leal, E.R., Soto, R. and Gordillo, J.L, 2012.** Kinematics and Dynamics Of A New 16 DOF Humanoid Biped Robot with Active Toe Joint, Center for Robotics and Intelligent Systems, Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México.
- [50] **Xie, M., 2003.** Fundamentals Of Robotics Linking Perception To Action, Singapore-MIT Alliance & Nanyang Technological University, Singapore
- [51] **Çuha, Y., 2002.** 4+1 serbestlik Dereceli Puma Tipi bir Robotun Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- [52] **Han, J., 2012.** Bipedal Walking For A Full-Sized Humanoid Robot Utilizing Sinusoidal Feet Trajectories and Its Energy Consumption, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- [53] **Abidi, K., 2004,** Sliding-Mode control For High-Precision Motion control Systems, M.SC.Thesis, Sabancı University, İstanbul.
- [54] **Köse, E., Abacı, K. Ve Aksoy, S., 2011.** Kayma Kipli Kontrolde Farklı Erişim Alt Yaklaşımlarının Analizleri, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ.
- [55] **Z.H.Akpolat,H.Güldemir, 2003.** Trajectory following sliding mode control of induction motors,elektrical engineering, 205-209
- [56] **Koca, G.Ö., 2010.** Dört Kol Mekanizmalı Mekatronik Bir Sistemin Akıllı Yöntemlerle Kontrolü, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [57] **Hung, J.Y., Gao, W.B. and Hung, J.C., 1993.** Variable Structure Control: A Survey, *IEEE Trans Ind Electron.*, 40 (1), 2-22.
- [58] **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.
- [59] **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.]
- [60] **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.
- [61] **Altınörs, A. and Akpolat, Z.H., 2008.** Robust Speed Control of Electrical Drive Systems Using Type-II Fuzzy Logic and Sliding Mode Control Methods, *e-Journal of New World Sciences Academy*, **3** (1), 133-144.
- [62] **Koca, G.Ö., 2005.** Kayma Kipli Kontrol ve Bulanık Mantık Kullanarak Elektrikli Araçların Hız Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [63] **Akpolat, Z.H., 2000.** Bulanık Mantık Ders Notları.
- [64] **Passino, K.M. and Yurkovich, S., 1998.** Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, Inc.
- [65] **Bodur, F. N., 2008.** Süspansiyon Sistemlerinin Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrolü, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [66] **Akpolat, Z.H., Avcı, E. ve Avcı, L., 2003.** Bulanık Mantık Kullanılarak Ortalama Kan Basıncının Denetimi, *Politeknik Dergisi* Cilt:6 Sayı:4 s. 637-643
- [67] **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
- [68] **Serbest, K, Çilli, M. ve Eldoğan, O.,** Oturup Kalkma Hareketinin Simmechanics Ortamında Dinamik Modellenmesi ve Benzetimi,
- [69] **Yıldız, İ., 2007.** 3x3 Kuvvet Geri Beslemeli Bir Stewart Platformunun Kinematik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [70] **Dede, M.I.C. and Tosunoğlu, S., 2006.** Virtual Rapid Robot Prototyping, ASME Early Career Technical Journal Vol. 5 No.1 pp. 7.1-7.8
- [71] **Dede, M.I.C. and Tosunoğlu, S., 2004.** Modeling Of Single DOF Force Feedback Teleoperation System, 17th Florida Conferance on Recent Advances in Robotics, Florida.
- [72] **Coşkun, G., 2007.** Bipedal Walking Uygulaması ve Bunun Bir Robota Uygulanması, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İzmir.
- [73] **Darıcı, O., 2008.** Dört Bacaklı Mobil Robotlarda Yürüme Analizi ve Yol İzleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul