

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSI ROBOT KONTROLÜ İÇİN OPERATÖR
HAREKETLERİ ALGILAMA SİSTEMİ

KEMAL GÜVEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
2017

**İNSANSI ROBOT KONTROLÜ İÇİN OPERATÖR
HAREKETLERİ ALGILAMA SİSTEMİ**

**OPERATOR MOTION DETECTION SYSTEM TO
CONTROL HUMANOID ROBOTS**

KEMAL GÜVEN

Başkent Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

MAKİNE Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2017

“İnsansı Robot Kontrolü İçin Operatör Hareketleri Algılama Sistemi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 07/08/2017 tarihinde, **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Andaç Töre ŞAMİLOĞLU

Üye : Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

ONAY

..../8/2017

Prof. Dr. Emin AKATA

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrencinin Adı, Soyadı : Kemal GÜVEN

Öğrencinin Numarası : 21410185

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Yüksek Lisans

Danışmanın Adı, Soyadı : Yrd. Doç. Dr. Andaç Töre ŞAMİLOĞLU

Tez Başlığı : İnsansı Robot Kontrolü için Operatör Hareketleri
Algılama Sistemi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 100 sayfalık kısmına ilişkin, 01/08/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 8' dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç

2. Alıntılar hariç

3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esasları”nı inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası

Onay

... / ... / 2017

Yrd. Do. Dr. Andaç Töre ŞAMİLOĞLU

TEŐEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan aileme, akademik boyunca her zaman yanımda olan ve beni bu konuda çalışmaya teşvik eden sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Andaç Töre ŞAMİLOĞLU'na, tez çalışması boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli meslektaşlarım Ahmet Cahit GÜNERİ ve Ahmetcan ÖNAL'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu TEYDEB-1512 Desteđinden(Proje No:2150023) faydalanılmıştır. Ar-Ge alanındaki geri ödemesiz hibe destekleriyle ülkemizde faaliyet gösteren firmalara desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a kendim ve ülkem adına teşekkürlerimi sunarım.

ÖZ

İNSANSI ROBOT KONTROLÜ İÇİN OPERATÖR HAREKETLERİ ALGILAMA SİSTEMİ

Kemal GÜVEN
Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez çalışmasında uzaktan kontrollü robotlarda, operatörün iş yükünü azaltmak için tele-operasyon faaliyetleri üzerine çalışılmıştır. Öncelikle insan görüşünü taklit eden bir görüntü aktarım sistemi tasarlanmıştır. Tek kameralı görüntü sistemlerinde operatör derinlik algısını yitirmektedir. Bundan dolayı sistemde derinlik algısını sağlayabilmek için iki adet kamera kullanılarak sanal gerçeklik uygulaması tasarlanmıştır. Sunulan sistem operatöre robotun bulunduğu ortamın üç boyutlu görüntüsünü aktarmaktadır. Aynı zamanda operatörün kafa hareketleri, kameraların bulunduğu pan-tilt mekanizmasında taklit edilmektedir. Kafa hareketlerine ek olarak insan kol ve el hareketlerini algılayıcı sistemler geliştirilmiştir. Omuz hareketi gibi çok eksenli hareketleri algılamak amacıyla küresel mafsalların oryantasyonunu algılayıcı bir test düzeneği tasarlanmıştır. Düzenekte kızılötesi alıcı verici çiftinden oluşan sensörler önerilmiştir. Mafsalın gerçek oryantasyonunu belirlemek için görüntü işleme yönteminden yararlanılmıştır. Önerilen sensörlerden toplanan değerler ile görüntü işleme algoritması sonucunda bulunan değerler eşleştirilerek veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti, tek katmanlı bir yapay sinir ağı modelini eğitmekte kullanılmış ve bu tip sensörlerin kullanılabilirliği gösterilmiştir. Kol hareketleri aynı zamanda çoklu ataletsel ölçüm birimleri kullanılarak algılanmış ve simule edilmiştir. Robot kısmı içinse 6 serbestlik dereceli bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan robot kol için kinematik ve kuvvet analizleri yapılmış sürekli ve ayrık zamandaki kontrolcü sistemleri üzerine çalışılmıştır. Son olarak el hareketlerini algılayıcı eldiven tasarlanmıştır. Tasarlanan eldiven ile operatör parmak açıları algılanmış ve simule edilmiştir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: tele-operasyon, stereo görüntüleme, hareket algılama, el hareketleri algılama, insansı robot, algılayıcı eldiveni, insan-robot etkileşimi

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Andaç Töre ŞAMİLOĞLU, Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

ABSTRACT

OPERATOR MOTION DETECTION SYSTEM TO CONTROL HUMANOID ROBOTS

Kemal GÜVEN

Başkent University Institute of Science and Technology

Department of Mechanical Engineering

In this thesis study, tele-operation facilities has been studied in order to reduce the workload of the operator in remote controlled robot. Firstly, an image transfer system that imitates human vision is designed. In single-camera display systems, the operator loses depth perception. Therefore, virtual reality application is designed consisting two cameras in order to provide depth perception in the system. The presented system transfers the three-dimensional image of the environment in which the robot is located to the operator. At the same time, the head movements of the operator are imitated in the pan-tilt mechanism where the cameras are located. In addition to head movements, the system that detects human arm and hand movements have been developed. In order to detect multi-axis movements such as shoulder motion, an experimental setup is designed. In this setup, sensors consisting of an infrared transceiver pair are proposed. Image processing is used to determine the true orientation of the joint. The data set was generated by matching the values obtained from the proposed sensors with the values obtained as a result of the image processing algorithm. his data set has been used to train a single layer artificial neural network model and the availability of such sensors has been demonstrated. Arm movements were also measured and simulated using multiple inertial measurement units. For the robot part, a system with 6 degrees of freedom is designed. The designed robot arm's mechanic analysis and its continuous and discrete time controllers have been studied. Finally, a data glove that detects hand gestures is designed. With the designed glove, the operator' finger angles has measured and simulated.

KEYWORDS: tele-operation, stereo vision, motion detection, hand gestures detection, humanoid robot, data glove, human-robot interaction

Advisor: Andaç Töre ŞAMİLOĞLU, PhD. Asst. Prof. in Mechanical Engineering, Başkent University, Mechanical Engineering Department.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması.....	1
1.2 Tez Çalışmasının Amacı	8
2 ROBOT KAFA VE ÜÇ BOYUTLU GÖRÜNTÜLEME	10
2.1 Giriş.....	10
2.1.1 Sanal gerçeklik.....	13
2.1.2 Medya Yayınlama Protokolü-RTSP.....	14
2.1.2.1 <u>Gerçek zamanlı aktarım protokolü-RTP</u>	15
2.1.2.2 <u>RTP kontrol protokolü-RTCP</u>	16
2.1.2.3 <u>Gerçek zamanlı akış protokolü-RTSP</u>	16
2.1.3 Sistem pozisyon algılayıcıları	16
2.1.4 İnsan kafa özellikleri	18
2.1.5 İnsan kafa hareketi	20
2.2 Operatör.....	21
2.2.1 Kafa hareketleri algılama.....	22
2.2.1.1 <u>Doğu-Kuzey-Yukarı (DKY-ENU) eksenli oryantasyon gösterimi</u>	24
2.2.2 Sanal gerçeklik uygulaması.....	25
2.3 Robot	26
2.3.1 Pan-Tilt mekanizması.....	26

2.3.1.1 <u>Kinematik analiz</u>	27
2.3.1.2 <u>Mekanik tasarım</u>	32
2.3.1.3 <u>Elektronik tasarım</u>	34
2.3.2 Görüntüleme sistemi	36
2.4 Sonuç.....	36
3 ROBOT KOL SİSTEMİ.....	37
3.1 Giriş.....	37
3.1.1 İnsan kolu biyomekaniği.....	39
3.1.2 İnsan kolu kinematik modeli	42
3.1.3 Kol hareketlerinin algılanması	43
3.2 Operatör.....	44
3.2.1 Kızılötesi alıcı-verici tabanlı sensörler ile kol hareketleri ölçümü.....	44
3.2.1.1 <u>Küresel mafsalsal oryantasyon ölçümü deney düzeneği</u>	45
3.2.1.2 <u>Küresel mafsalsal oryantasyon ölçümü için yapay sinir ağları uygulaması</u>	52
3.2.2 Ataletsel ölçüm birimi ile kol hareketlerinin algılanması.....	59
3.3 Robot	60
3.3.1 Robot kol tasarımı	60
3.3.2 Kinematik analiz	62
3.3.2.1 <u>İleri kinematik</u>	63
3.3.2.2 <u>Ters kinematik</u>	68
3.3.3 Kuvvet analizi	74
3.3.3.1 <u>Statik kuvvet analizi</u>	74
3.3.3.2 <u>Dinamik kuvvet analizi</u>	75
3.4 Hesaplanmış Tork Kontrolü.....	79
3.4.1 Oransal-Türevsel(PD) kontrol.....	80
3.4.2 Oransal-Türevsel-İntegral(PID) kontrol.....	81
3.4.3 Ayırık Zamanlı Oransal-Türevsel-İntegral(PID) kontrol.....	82

3.4.4 Kontrolcü çıktıları.....	83
3.5 Sonuç.....	87
4 ROBOT EL SİSTEMİ	89
4.1 Giriş.....	89
4.1.1 İnsan eli biyomekaniği	92
4.1.2 İnsan eli kinematik modeli	93
4.2 Algılayıcı Eldiven Tasarımı.....	95
5 SONUÇ	98
6 KAYNAKLAR LİSTESİ	101
7 EKLER LİSTESİ.....	108

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Newark Steam Man	1
Şekil 1.2 iCub	2
Şekil 1.3 ASIMO	2
Şekil 1.4 PETMAN	3
Şekil 1.5 ATLAS	4
Şekil 1.6 Protez sensör verilerinin sinir uçlarına geri beslenmesi	4
Şekil 1.7 İnsan eli serbestlik dereceleri	5
Şekil 1.8 Robotik el otomatik tutma operasyonu	6
Şekil 1.9 BioTac robot parmağı	6
Şekil 1.10 Basınç sensörlerine bağlı titreşim geri beslemeli eldiven sistemi	7
Şekil 1.11 Hava basıncıyla deforme olan silikon eyleyicilerle dokunma hissi geri beslemesi	8
Şekil 1.12 Johnny-T(a) ve RoboSally(b) robotları	8
Şekil 2.1 Oculus Rift kafa oryantasyonu	11
Şekil 2.2 InertiaCube2	12
Şekil 2.3 Çift katmanlı Kalman filtresi uygulaması	12
Şekil 2.4 Sensorama	13
Şekil 2.5 "Damokles'in Kılıcı" isimli sanal gerçeklik sistemi	14
Şekil 2.6 Oculus Rift 'in 2013 yılında geliştirilen versiyonu	14
Şekil 2.7 AS5145B Manyetik rotatif pozisyon sensörü	17
Şekil 2.8 AS5145B Çalışma prensibi	17
Şekil 2.9 Açık algılayıcı elektronik kart ve tasarımı	18
Şekil 2.10 İnsan kafa ölçüm standartları	18
Şekil 2.11 a) İnsan baş omurgası, b) Boyun omuru, c) Basitleştirilen kinematik modeli	20
Şekil 2.12 İnsan kafa hareketleri	21

Şekil 2.13 Akıllı telefon eksen dağılımı	23
Şekil 2.14 VR Box akıllı telefon yerleşimi	23
Şekil 2.15 Doğu-Kuzey-Yukarı(ENU) koordinat sistemi	24
Şekil 2.16 VR Box sanal gerçeklik gözlüğü	25
Şekil 2.17 Görüntüleme programı arayüzü	26
Şekil 2.18 Tasarlanan Pan-Tilt mekanizması	27
Şekil 2.19 Pan-Tilt kontrol şeması	27
Şekil 2.20 Pan-tilt mekanizması kinematik modeli	28
Şekil 2.21 Kinematik analiz doğrulama sonuçları	32
Şekil 2.22 Pan-tilt mekanizması ilk tasarımı	33
Şekil 2.23 Pan-tilt mekanizması son tasarımı	33
Şekil 2.24 DA motor açılı algılayıcı montajı	34
Şekil 2.25 Robot kafa blok şeması	35
Şekil 2.26 Motor sürücü devre şeması	35
Şekil 2.27 IP Kamera veri aktarımı	36
Şekil 3.1 7 serbestlik dereceli robot kol	37
Şekil 3.2 Ataletsel ölçüm birimlerinin yerleşimi	38
Şekil 3.3 7 serbestlik dereceli sistem	38
Şekil 3.4 Kol-EI Hareketleri	41
Şekil 3.5 İnsan kolu kinematik modeli	42
Şekil 3.6 Omuz eklemi paralel modeli	43
Şekil 3.7 TELESAR II	43
Şekil 3.8 Test düzeneği	46
Şekil 3.9 Test düzeneği şematik çizimi	46
Şekil 3.10 (a) RGB renk uzayı (b) L*A*B* renk uzayı	47
Şekil 3.11 L*A*B* renk uzayı	47
Şekil 3.12 Görüntü işleme akış şeması	48

Şekil 3.13 Ağırlık merkezlerinin bulunması	48
Şekil 3.14 Sensör şematik gösterimi	49
Şekil 3.15 Tek eksenli düzeneç	49
Şekil 3.16 Potansiyometre-Sensör ilişkisi	50
Şekil 3.17 Düzeneğin üstten şematik gösterimi	50
Şekil 3.18 Sistem blok şeması	51
Şekil 3.19 Örnek veri seti	51
Şekil 3.20 Girdilerin dağılımı	52
Şekil 3.21 Çıktıların dağılımı	52
Şekil 3.22 Perceptron yapısı	53
Şekil 3.23 Çok katmanlı sinir ağı modeli	54
Şekil 3.24 Aktivasyon fonksiyonları	54
Şekil 3.25 YSA yapısı	56
Şekil 3.26 Topların tahmin edilen koordinatları	57
Şekil 3.27 Yeşil top koordinat tahmin hatası	58
Şekil 3.28 Kırmızı top koordinat tahmin hatası	58
Şekil 3.29 BNO055	59
Şekil 3.30 Kol hareketleri Unity3D simülasyonu	60
Şekil 3.31 Robot kolu kinematik modeli	61
Şekil 3.32 Tasarlanan robot kolun teknik çizimleri	61
Şekil 3.33 İleri-Ters Kinematik Gösterimi	62
Şekil 3.34 D-H parametreleri ve koordinat eksenleri	63
Şekil 3.35 1 nolu eklem birim vektör ve pozisyon vektörü	66
Şekil 3.36 2 nolu eklem birim vektör ve pozisyon vektörü	67
Şekil 3.37 Üst kol hareket alanı	70
Şekil 3.38 Ön kol hareket alanı	71
Şekil 3.39 Dirsek konumları	71

Şekil 3.40 i nolu uzuv serbest cisim diyagramı	75
Şekil 3.41 Hesaplanmış tork kontrolü şeması [80]	80
Şekil 3.42 Hesaplanmış Tork PID Kontrol Şeması [80]	82
Şekil 3.43 Ayırık zamanlı kontrol şeması [64]	83
Şekil 3.44 Tork limitleme fonksiyonu	84
Şekil 3.45 Simulink hesaplanmış tork kontrolü blok şeması	84
Şekil 3.46 Hesaplanmış tork PD kontrol cevabı($K_p=25$ $K_d=10$)	85
Şekil 3.47 Hesaplanmış tork ayırık zamanlı PD kontrolü toplam kontrol torku ($K_p=11$ $K_d=5$)	85
Şekil 3.48 Hesaplanmış tork ayırık zamanlı PD kontrolü sistem cevabı ($K_p=11$ $K_d=5$)	86
Şekil 3.49 Hesaplanmış tork ayırık zamanlı PID kontrolü toplam kontrol torku ($K_p=15$ $K_d=6$ $K_i=2$)	87
Şekil 3.50 Hesaplanmış tork ayırık zamanlı PID kontrolü sistem cevabı ($K_p=15$ $K_d=6$ $K_i=2$)	87
Şekil 4.1 (a) Dış iskelet sistemi, (b) Hasta egzersiz arayüzü	89
Şekil 4.2 Da Vinci ameliyat robotu	90
Şekil 4.3 (a) Sol Tıklama Hareketi, (b) Sağ tıklama hareketi	90
Şekil 4.4 The Mattel Power Glove	92
Şekil 4.5 (a) Elin Üst Kısımındaki Tendon Yapısı, (b) Parmağın Alt Kısımındaki tendon yapısı	93
Şekil 4.6 İnsan eli serbestlik dereceleri	93
Şekil 4.7 İşaret parmağı kinematik modeli	94
Şekil 4.8 1 saniyede gerçekleşen eklem hareketleri	94
Şekil 4.9 Bir saniye içerisindeki eklem açıları değişimi	95
Şekil 4.10 Esnek(Flex) sensör tabanlı algılayıcı eldiven tasarımı	95
Şekil 4.11 Specra Symbol esnek sensörü	96
Şekil 4.12 Gerilim bölücü devresi	96
Şekil 4.13 Velostat tabanlı algılayıcı eldiven tasarımı	97
Şekil 4.14 Unity3D robot el simülasyonu	97

ÇİZELGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 İnsan kafa ölçüleri	19
Çizelge 2.2 Erkek kafası ortalama ağırlığı	19
Çizelge 2.3 Erkek kafası ortalama eylemsizlik momentleri	20
Çizelge 2.4 Kafa hareketi açıları	21
Çizelge 2.5 Pan-tilt mekanizması DH parametreleri	28
Çizelge 3.1 İnsan Kolu Uzunlukları	39
Çizelge 3.2 İnsan Kolu Kabiliyeti	40
Çizelge 3.3 İnsan Kolu Dayanımı 1	41
Çizelge 3.4 İnsan Kolu Dayanımı 2	42
Çizelge 3.5 YSA eğitim, doğrulama ve test seti sonuçları	57
Çizelge 3.6 Koordinat tahmin ortalama hataları	58
Çizelge 3.7 Robot kolu D-H parametreleri	64

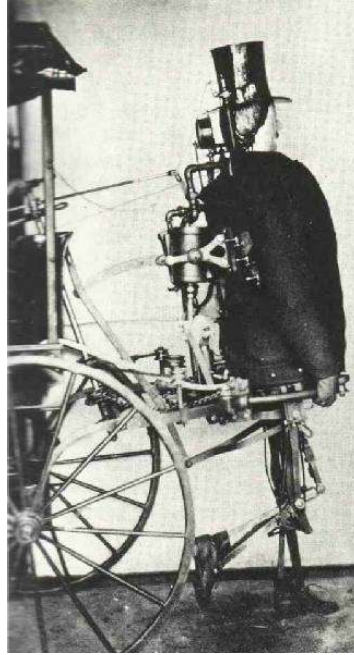
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

P.D.	Proportional-Derivative
P.I.D.	Proportional-Derivative-Integral
Y.S.A.	Yapay sinir ağıları
D-H	Denavit-Hartenberg
IMU	Inertial Measurement Unit
r.p.m	round per minute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu

1 GİRİŞ

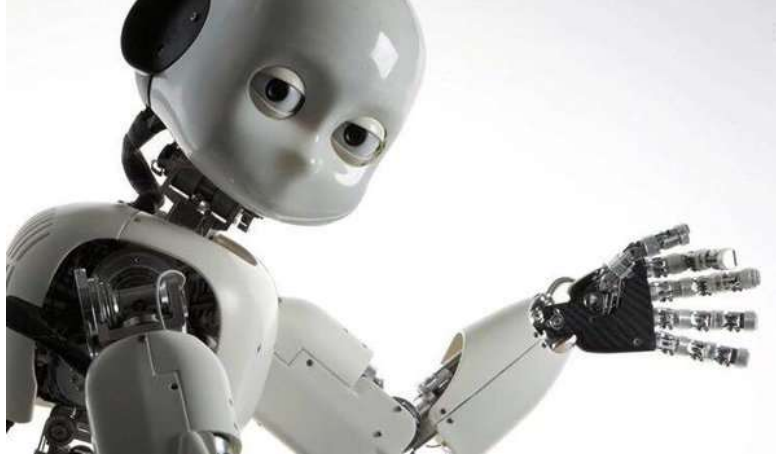
1.1 Literatür Araştırması

İnsansı robotlar üzerinde uzun yıllardır çalışmalar yapılmaktadır. 1868 yılında Zadoc Dederick ve Isaac Grass tarafından icat edilen “Newark Steam Man” olarak bilinen robot bu çalışmaların ilklerinden sayılabilir(Şekil 1.1). At arabasını çekmesi için tasarlanan bu robot yaklaşık 7ft uzunluğunda ve 500lb ağırlındadır. Buhar gücüyle çalışan bu robotun gövdesinde kazan bulunmaktadır [1].



Şekil 1.1 Newark Steam Man

Teknolojinin hızla gelişmesi insansı robot çalışmalarının da ileri seviyelere gelmesine neden olmuştur. Birkaç Avrupa üniversitesinin katılımıyla kurulan RobotCub birliği iCub isimli robotu duyurmuşlardır(Şekil 1.2). Bu robotun üst gövdesinde toplam 30 serbeslik derecesi bulunmaktadır. Bacakların her birinde ise 6 adet serbestlik derecesine izin verilmiştir. Toplam ağırlığı 22kg ı bulan bu robot açık kaynak kodlu olarak tasarlanmıştır [2].



Şekil 1.2 iCub

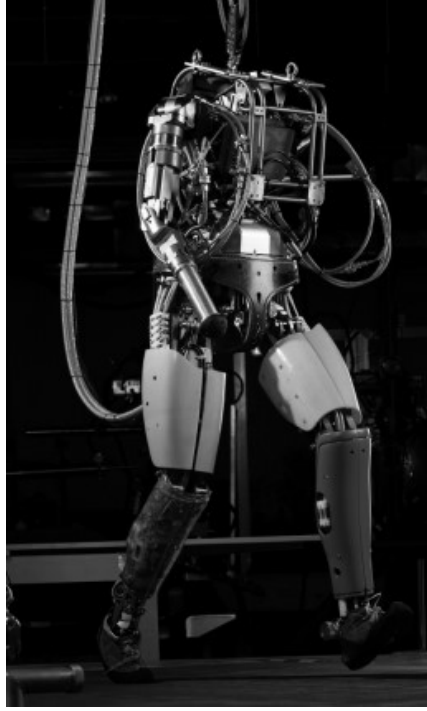
Günümüzde en popüler çalışma Japon firması Honda Motor tarafından yürütülen ASIMO'dur(Şekil 1.3). 130cm yüksekliğine ve 54kg ağırlığına sahiptir. Saatte 6km ye varan hızda yürüyebilir ve koşabilir. Hareketli nesnelere, jest ve mimikleri, çevreyi ve yüzü tanıma özelliklerinin yanında sesleri de ayırt edebilir [3].



Şekil 1.3 ASIMO

İnsansı robot çalışmalarına bir amerikan firması olan Boston Dynamics'te önemli katkılarda bulunmuştur. PETMAN adı verdikleri insansı robot kimyasal korumalı kıyafetleri test etmek için tasarlanmıştır. Bu robot serbestçe hareket edebilmekte ve kendini dengeleyebilmektedir. Isı, nem ve terlemeyi de kontrol ederek insan fizyolojisini simule edebilen PETMAN, gerçekçi test koşulları sunmaktadır. İnsansı

hareketlerde gerekli mobilite ve g¼c¼ sağlaması nedeniyle hidrolik eyleyiciler kullanılmıştır [4].



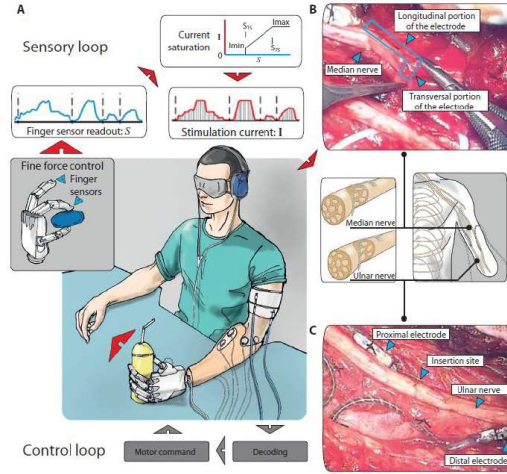
şekil 1.4 PETMAN

Boston Dynamics firmasının geliştirdiği bir başka insansı robot ise ATLAS adı verdikleri robottur(şekil 1.5). etin arazilerde bile taşıma ve tırmanma g¼revleri yapabilen bu robotta 28 hidrolik eyleyiciye sahip serbestlik derecesi mevcuttur. Kafasında ise stereo kameralar ve lazer mesafeoler bulunmaktadır [5].



şekil 1.5 ATLAS

İnsansı robot çalışmaları özellikle iki konuda insan hayatına yardımcı olmak üzere geliştirilmektedir. Bunlardan biri el, kol, bacak gibi uzuvlarını kaybetmiş insanlara protez robotik uzuvlar geliştirmek üzerinedir. Bu protezler, insan sinirlerinden komut alarak çalıştırılmaktadır. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda protezlerin çevreyle olan etkileşimleri ölçülerek, kullanıcıya sinir ağı üzerinden geri beslenme yapmak da amaçlanmıştır(Şekil 1.6) [6] [7].

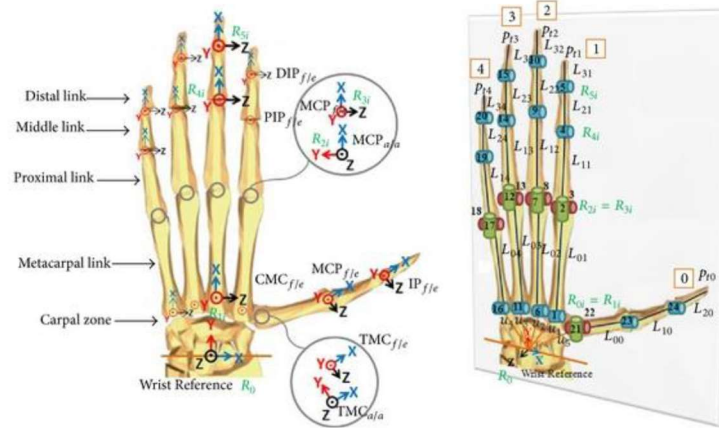


Şekil 1.6 Protez sensör verilerinin sinir uçlarına geri beslenmesi

İnsansı robotların çalışıldığı ikinci konu da operatörler tarafından uzaktan kontrol edilen (tele-operasyon) robotlardır. Bu robotlar insanlar için tehlikeli olan ortamlarda çalıştırılmak üzere ve alanında çok yetenekli insanların işlerini uzaktan yapabilmelerini sağlamak üzere geliştirilmektedir. Savaş alanlarında, yangında, doğal felaketlerde (deprem, sel, vb.), zehirli kimyasalların veya bulaşıcı biyolojik tehditlerin olduğu ortamlarda, radyoaktif ortamlarda mevcut yapay zeka teknolojileriyle çözülemeyen problemleri çözmek üzere alanlarında uzman insanlar tarafından kontrol edilen insansı robotlar kullanılabilir. Örneğin, muharebe ya da arama kurtarma operasyonları uzman personelin kontrol ettiği insansı robotlar tarafından gerçekleştirilebilir. Bunların yanı sıra acil durumlarda uzman personelin müdahale edebilmesi için yine insansı robotlar kullanılabilir. Operatörün, robotun bulunduğu ortama yakın olması bile gerekmeyecektir. İnsansı robot ve operatör etkileşimi internet üzerinden dahi gerçekleştirilebilir.

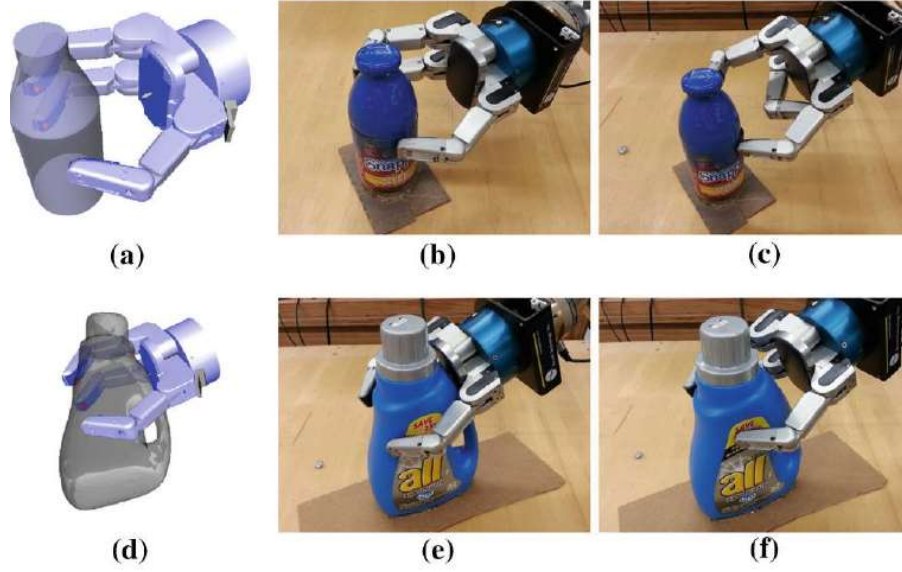
Operatör ve insansı robot arasındaki etkileşimi kurmak için ilk aşama operatörün hareketlerinin algılanmasıdır. İnsan uzuvlarının en karmaşığı ve yeteneklisi olan

parmakların bilekle birlikte toplam 27 serbestlik derecesi vardır(Şekil 1.7) [8]. Bu serbestliklerin hepsi bağımsız değildir. Robotik el uygulamalarında yapacağı işe bağlı olarak el serbestlik sayısı bazı varsayımlarla azaltılmaktadır [9]. Bu serbestliklerin algılanması için kullanılan metotlar genellikle esnek direnç ve straingauge içermektedir. Karacizmeli ve arkadaşları robotik el proje çalışmalarında her bir parmağın bir serbestlik derecesini ölçerek servo motorlara bağlı robot eli kontrol etmişlerdir [10].



Şekil 1.7 İnsan eli serbestlik dereceleri

Operatörler tarafından kontrol edilen insansı robotların sadece komut olarak çalışması, özellikle hassas operasyonlar için yeterli değildir. Bu problemi çözmek için iki yol benimsenmektedir. İki robotun hassas görevlerde otomasyona bağlı karar verebilmesidir. Örneğin, robot ellerle malzemelerin tutulması için parmaklara yerleştirilen basınç sensör verileri robot kontrolcü sistemine geri beslenmekte ve geliştirilen stratejilerle robot parmak eyleycilerini manipüle etmektedir (Şekil 1.8) [11]. Bu otomasyon sistemleri, özellikle tutma (grasping) işlemi için birçok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır [11] [12] [13].



Şekil 1.8 Robotik el otomatik tutma operasyonu

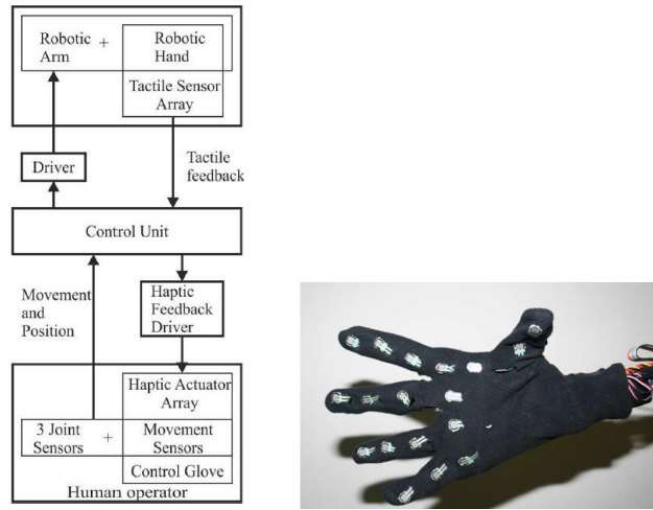
Hassas operasyonlarda benimsenen ikinci yol ise insansı robotun bulunduğu ortamla olan etkileşimlerinin operatöre geri beslenmesidir. Bu yolla operatör robotun karşılaştığı sıcaklık, kuvvet, tork, basınç, titreşim gibi olayları hissedebilecek ve operasyonu daha iyi yönetebilecektir. Robot eller yapılacak operasyona özel olarak tasarlanmakta ve ihtiyaç duyulan sensör değerleri farklılaşabilmektedir. Ancak bütün robot ellerde ilk beklenen işlem tutma işlemidir. Bu amaçla parmak uç ve gövdesinde özellikle iç tarafa bakan bölgelerdeki basınç değerleri ölçülmektedir. SynTouch LLC firması tarafından geliştirilen BioTac isimli robot parmağı kuvvet, akışkan basıncı, mikrotitreşimler, sıcaklık ve ısı akışı değerlerini ölçebilmektedir(Şekil 1.9) [14]. Bu ürünü kullanarak dokunma, tutma kontrolcü stratejilerinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar bulunmaktadır [15].



Şekil 1.9 BioTac robot parmağı

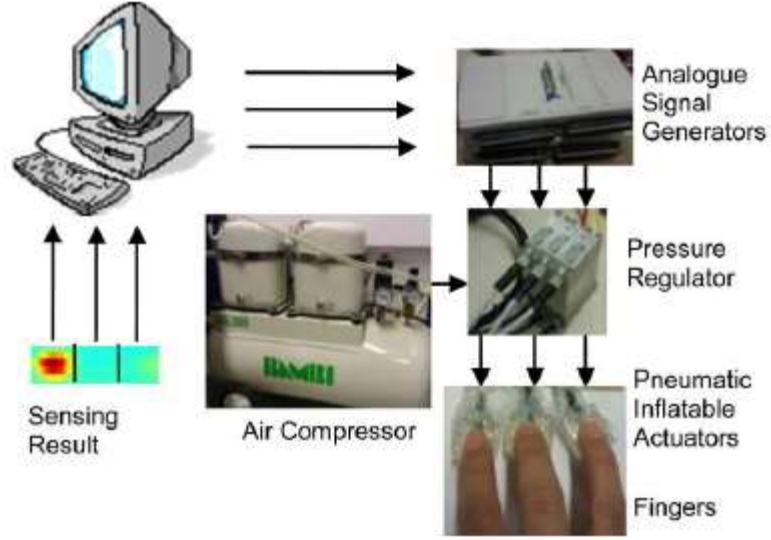
Robot ellerdeki dokunma sensörleri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların derlenerek performans, çözünürlük, frekans cevabı, maliyet, montaj, bakım gibi kriterlerin incelenerek kıyaslandığı çalışmaları da bulunabilmektedir [16] [17].

Geçtiğimiz bir iki yıl içinde operatör el hareketlerini algılayan, robot elde bu hareketleri kopyalayan ve robot elin çalıştığı ortamla etkileşimini operatöre geri besleyen sistemler üzerine yapılan çalışmaların sonuçlarını görebilmekteyiz. İnsansı robot el üzerindeki 20 basınç sensör verilerini toplayarak operatörün giydiği eldivene yerleştirilen titreşim motorlarını kontrol eden bir sistemin tasarım ve testlerinin yapıldığı çalışma Şekil 1.10 gösterilmiştir [9].



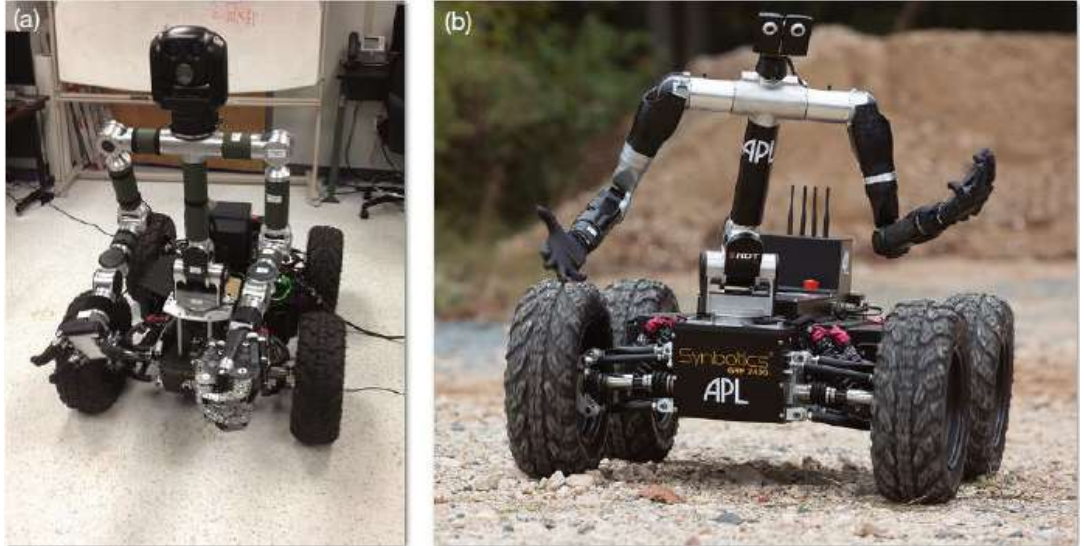
Şekil 1.10 Basınç sensörlerine bağlı titreşim geri beslemeli eldiven sistemi

Benzer bir çalışmada geri besleme için kauçuk ve silikon malzemelerden esnek olarak üretilmiş basınçlı hava (pneumatic) ile çalışan eldiven sistemi kullanılmıştır [18]. Robot elin algıladığı kuvvetler operatör parmaklarına basınçlı havanın esnettiği silikon yüzeylerle iletilmektedir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11 Hava basıncıyla deforme olan silikon eyleyicilerle dokunma hissi geri beslemesi

JohnnyT ve RoboSally (Şekil 1.12) isimli robotların mimarilerini inceleyen çalışmada kumanda yapısı, teleoperasyon metotları, kinematik yapıları, haptik geribesleme yapıları incelenmiştir [19].



Şekil 1.12 Johnny-T(a) ve RoboSally(b) robotları

1.2 Tez Çalışmasının Amacı

Bu tez çalışmasında uzaktan kontrollü robotlarda, operatörün iş yükünü azaltmak için tele-operasyon faaliyetleri üzerine çalışılmıştır. Tele-operasyon işlemlerinde

amaç operatörün hareketlerini doğru algılamak, bu hareketleri minimum gecikme ile robotlara yollamak ve robotlarda bu hareketleri minimum hata ile uygulamak olarak söylenebilir. Bu çalışmada insan üst vücut hareketleri üzerine yoğunlaşmıştır.

Uzaktan kontrollü(tele-operasyon) robotlarda ortam görüntülerinin operatöre iletilmesi sistemin en önemli parçalarından biridir. Tezin 2. bölümünde bu konu başlığı ele alınmıştır. Bu aşamada, insan görüşünü taklit eden bir görüntü aktarım sistemi üzerinde durulmuştur. Tek kameralı görüntü sistemlerinde operatör derinlik algısını yitirmektedir. Bundan dolayı sistemde derinlik algısını sağlayabilmek için iki adet kamera kullanılarak sanal gerçeklik uygulaması tasarlanmıştır. Sunulan sistem operatöre robotun bulunduğu ortamın üç boyutlu görüntüsünü aktarmaktadır. Operatör kısmının yanı sıra bu bölümde robotun kafa mekanizması incelenmiştir. Kafanın sağa-sola dönüş ve öne-geri eğilme hareketlerini taklit edebilen 2 serbestlik dereceli sistem geliştirilmiştir. Kameralar bu sisteme entegre edilmiştir.

Tele-operasyon işlemlerinde ikinci adım operatörün robotun bulunduğu ortama müdahale etmesini sağlayabilmektir. Robotun yapacağı bütün manipulasyon işlevinde kol ve bölümü önemli bir role sahiptir. Tezin 3. Bölümü bu konu üzerinde durmuştur. Öncelikle operatörün kol ve el hareketlerinin algılanması çalışılmıştır. Kol hareketleri omuz, dirsek ve bilek hareketlerinden oluşmaktadır. Bunlardan en zorlayıcı olan eklem yapısı ve hareket kabiliyeti bakımından omuz eklemidir. Omuz hareketi gibi çok eksenli hareketleri algılamak amacıyla küresel mafsalların oryantasyonunu algılayıcı bir test düzeneği tasarlanmıştır. Düzenekte kızılötesi alıcı verici çiftinden oluşan sensörler önerilmiştir. Mafsalın gerçek oryantasyonunu belirlemek için görüntü işleme yönteminden yararlanılmıştır. Önerilen sensörlerden toplanan değerler ile görüntü işleme algoritması sonucunda bulunan değerler eşleştirilerek veri seti oluşturulmuştur. Bu aşamada bir regresyon problemiyle karşılaşılmıştır. Bu problem yapay sinir ağı yöntemiyle çözülmüştür. Düzenekten elde edilen veri seti, tek katmanlı bir yapay sinir ağı modelini eğitmekte kullanılmış ve bu tip sensörlerin kullanılabilirliği gösterilmiştir. Kol hareketleri aynı zamanda çoklu ataletsel ölçüm birimleri kullanılarak algılanmıştır. Operatörün kolunan çeşitli yerlerine entegre edilen bu sensörler ile bütün kol oryantasyonları algılanmış ve bilgisayar ortamında simule edilmiştir. Robot kısmı içinse 6 serbestlik dereceli ve hidrolik eyleyici tabanlı bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan robot kol için kinematik

ve kuvvet analizleri yapılmış sürekli ve ayrı zamandaki kontrolcü sistemleri üzerine çalışılmıştır.

Operatörün manipulasyon işlemlerinin son parçası el kısmıdır. Tezin 4. Bölümünde operatörün el hareketlerini algılanması incelenmiştir. Bu aşamada esnek sensör teknolojisi kullanılmıştır. Eldivene yerleştirilen bu sensörler ile parmak hareketleri algılanmış ve simulasyonu yapılmıştır. İlk olarak hazır sensörler denenmiştir. Bu sensörlerin boyutları standart olduğundan eldivende çok yer kapladığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle “Velostat” malzemesi kullanılarak bu çalışmaya özgü esnek sensörler üretilmiş ve kullanılmıştır.

2 ROBOT KAFA VE ÜÇ BOYUTLU GÖRÜNTÜLEME

2.1 Giriş

Uzaktan kontrollü(tele-operasyon) robotlarda ortam görüntülerinin operatöre iletilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Sık kullanılan yöntemlerden biri, ortam görüntüsünü 2 boyutlu ve gerçek zamanlı olarak monitöre ya da bilgisayar ekranına aktarmaktadır. Bu tür sistemlerde operatörün işi oldukça zordur. Hem görüntüleme cihazını kontrol etmek hem de robota gerekli hareketli vermek ve bunların yanında 2 boyutlu görüntüleri yorumlayarak ortam koşulları hakkında bilgi almak için oldukça fazla tecrübe gerekmektedir.

Operatörün işini kolaylaştırmak ve çevre algısını arttırmak için 3 boyutlu görüntüleme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemler, ortam görüntüsünü iki adet kamera ile almaktadır. Bu görüntüler sanal gerçeklik gözlüğünde birleştirilerek 3 boyutlu görüntüler elde edilmektedir. Görüntünün yanında derinlik hissini de veren bu sistem operatörün robotun ortamını daha iyi algılamasına yardımcı olur.

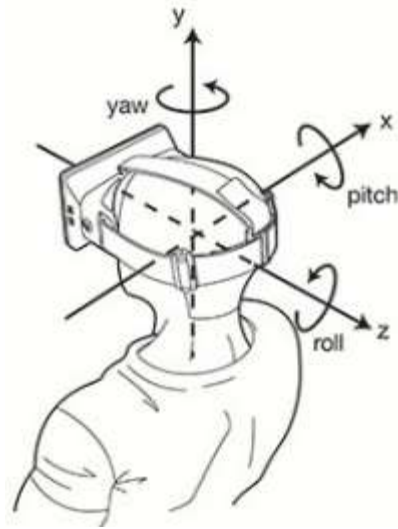
Görüntülerin aktarılmasının yanında kameraların bulunduğu platformun kontrolü de önemlidir. Platformun oryantasyonu manuel olarak ayarlanabilir; fakat bu operatörün çalışma koşulunu zorlaştırır. Bu sorunu çözmek içinde platform, operatörün kafa hareketleriyle kontrol edilebilir. Bunun için de kafa hareketlerinin doğru bir şekilde algılanması önemlidir.

Kafa hareketlerini algılamaya yönelik çalışmalar görüntü işleme ve sensör tabanlı olmak üzere iki alanda yoğunlaşmıştır. Görüntü işleme yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar çoğunlukla yüz tanıma işleminin ardından yapılmaktadır [20] [21].

Xu ve Li kafa hareketleri takibi için parçacık filtresi kullanmışlardır. Başın şeklini elips olarak modellemişler ve bunun yoğunluk gradyanını hesaplamışlardır. İç görünüşü modellemek için de renk histogramından faydalanmışlardır. Bu iki temel özellik karmaşık bir arka planda bile kafa hareketlerinin takibi için birbirini tamamlamakta olup başarılı sonuçlar vermiştir [22].

Wang ve Brandstein otomatik video konferans için yüz tanımanın yanına ses tanımayı ekleyerek kafa hareketlerinin takibi için melez bir sistem sunmuşlardır. Mikrofon girdileriyle konuşan kişinin yerini tespit eden sistem yüz tanıma için kamera kullanmaktadır. Aynı zamanda yüz takip edilerek kafa hareketi elde edilmiştir [23].

Sensör tabanlı çözümler tele-operasyon işlemlerinde sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. La Valle ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada gerçeklik gözlüğü olan *Oculus Rift* ile kafa oryantasyonunu ataletsel ölçüm birimi kullanarak belirlemeyi hedeflemişlerdir [24](Şekil 2.1).



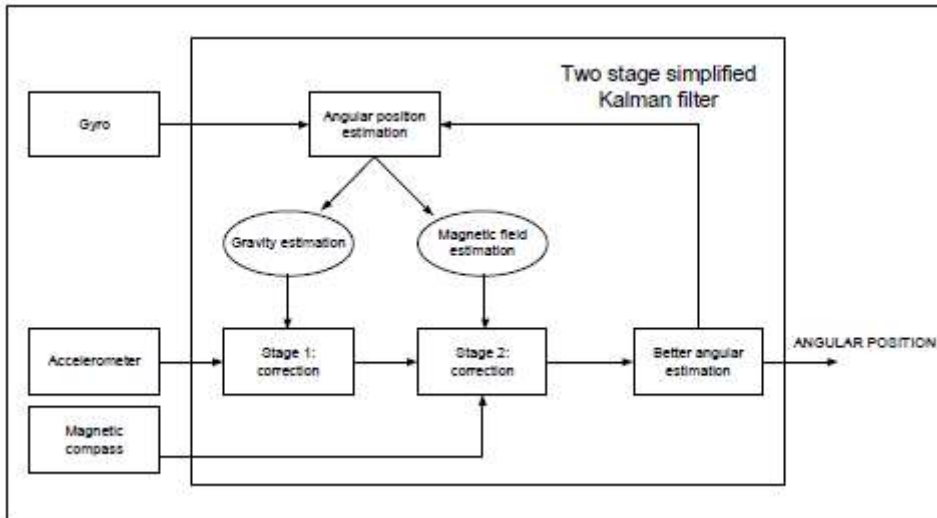
Şekil 2.1 Oculus Rift kafa oryantasyonu

Ataletsel ölçüm birimi kullanılarak yapılan bir başka çalışma da Foxlin ve Naimark 'a aittir. 3 eksenli jiroskop, ivmeölçer ve manyetometreden oluşan InertiaCube2 kullanmışlardır [25](Şekil 2.2).



Şekil 2.2 InertiaCube2

Jiroskop, ivmeölçer ve manyetometreden oluşan ataletsel ölçüm birimleri ile oryantasyon hesaplamaları oldukça yaygındır. Bu sensörlerden verimli çıktılar elde etmek için sensör füzyon algoritmaları ve filtreler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygını Kalman filtresidir. Sabotelli ve arkadaşları çift katmanlı Kalman filtresi modelini oryantasyon takibi için önermişlerdir [26]. İlk katmanında jiroskop çıktılarıyla yerçekimi vektörünü hesaplamışlar ve bunu ivmeölçer verisiyle düzeltmişlerdir. Modelin ikinci bölümü manyetik alan vektörü hesaplanarak manyetometre ile düzeltilmesiyle tamamlanmaktadır(Şekil 2.3). Kim ve arkadaşları ise oryantasyon hesabı için kuaterniyon tabanlı algoritma geliştirmişler ve bunu 6 serbestlikli ataletsel ölçüm birimiyle denemişlerdir [27].



Şekil 2.3 Çift katmanlı Kalman filtresi uygulaması

2.1.1 Sanal gerçeklik

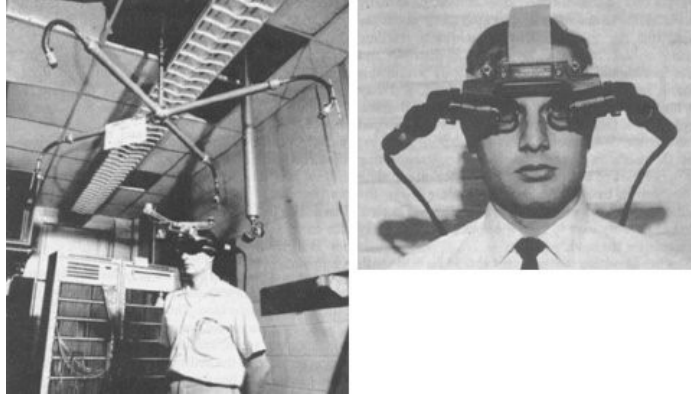
Sanal gerçeklik, kullanıcıya başka bir gerçek ortam ya da sanal bir ortam koşullarını sunan bilgisayar teknolojileridir. İlk olarak 1935 yılında bilim kurgu ürünü olarak ortaya atılmıştır. Stanley Weinbaum' un "Pygmalion's Spectacles" adlı kısa hikayesinde holografik görüntüleri gösteren bir gözlük tabanlı sistem kurgulanmıştır [28].

1950 yılında Morton Heilig "Experience Theatre" isimli tiyatrosunu bir ekranda yapmaya karar vermiştir. "Sensorama" olarak adlandırılan prototipte 5 adet kısa film görüntü, ses, koku ve dokunma efektleriyle gösterilmiştir(Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Sensorama

1968 yılında Ivan Sutherland ve Bob Sproull sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik için giyilebilen ilk sistemi icat ettiler. Kullanıcı arayüzü ve grafikler bakımından oldukça basit olan bu sistem ağırlığı sebebiyle tavanda asılı olarak kullanılmıştır. Görünüşü sebebiyle "Damokles'in Kılıcı" ismi verilmiştir(Şekil 2.5).



Şekil 2.5 "Damokles'in Kılıcı" isimli sanal gerçeklik sistemi

1970-1990 yılları arasında bu konudaki en önemli araştırma, 1978 yılında MIT de tasarlanan "Aspen Movie Map" olmuştur. Tasarlanan program kullanıcılara Aspen şehrinin sanal bir gezisini sunmaktadır. 1991 yılında Sega firması oyun platformu için Sega VR adında sistem geliştirmişlerdir. LCD ekran, stereo kulaklık ve atalet sensörlerinden oluşmaktadır [29].

2000 li yıllardan sonra sanal gerçeklik uygulamaları oldukça gelişmiştir. 2010 yılında Palmer Luckey tarafından Oculus Rift'in ilk prototipi tasarlanmıştır. 90 derecelik görüş alanına sahip bu prototip süregelen tasarımların temelini oluşturmuştur.



Şekil 2.6 Oculus Rift 'in 2013 yılında geliştirilen versiyonu

2.1.2 Medya Yayınlama Protokolü-RTSP

Hiper Metin Transfer Protokolü-HTTP metin ve görüntü yayınlama da sıklıkla kullanılan protokoldür. Metin ve görüntü aktarma da oldukça başarılı ve uygun olmasına karşın medya yayınlama da önerilmemektedir. Veri bütünlüğüne önem

vermesinden dolayı zaman kullanımı geri plandadır. HTTP kullanılarak medya yayını yapıldığında uygulamanın bir bölümü veriyi indirirken bir başka bölümü de görüntülemektedir. Bu da kullanıcı kontrolünü oldukça azaltmaktadır [30].

Multimedyanın bu özel isterlerini yerine getirmek için birçok uygulama geliştirildi. Gerçek zamanlı aktarım protokolü (RTP) ve onun eşliği olan RTCP kontrol protokolü (RTCP), multimedyanın zaman ve yüksek bant genişliklerini karşılama da yeterlidir. Bu protokol çiftinde , RTP taşıyıcı kanalı ve RTCP ise ayrı sinyal kanalını oluşturmaktadır. Senkronize Multimedya Entegrasyon Dili (SMIL), medya, metin, grafik ve animasyonun birleştirilmesi, sıralanması, ekranda tam olarak yer alması ve zengin bir çokluortam sunusu oluşturmak için senkronize olmasını sağlayan, metin tabanlı bir biçimlendirme dilidir [30]. Gerçek zamanlı akış protokolü(RTSP) ise, bir VCR, DVD veya CD oynatıcıda olduğu gibi yürütme, duraklatma gibi işlevlerinin uzaktan iletilmesini sağlar. Bu çalışmada kamera görüntüleri RTSP protokolüyle operatöre iletilmiştir.

2.1.2.1 Gerçek zamanlı aktarım protokolü-RTP

Medya yayınlama ortamlarında aktarım protokolü olarak HTTP yerine RTP kullanılır. RTP gerçek zamanlı verilerin aktarımı için uçtan uca dağıtım servisi sağlar. RTP eğer alt ağ tarafından destekleniyorsa çoklu veri aktarımı sağlayabilir.

RTP alıcıya sağladığı sıra numaralarıyla alıcıya, göndericinin paket sırasını yeniden düzenlemesine olanak sağlar. Bu sıra numaraları ayrıca, bir paketin düzgün konumunu sıradaki paketleri çözmeksizin belirlemek için kullanılabilir.RTP, genellikle, tamamlayıcı sinyal protokolü olan RTCP kontrol protokolüyle (RTCP) paralel olarak kullanılır.

RTCP, gönderici ve alıcıya hizmet kalitesiyle ilgili zamanında raporlar sunar ve devam eden bir oturumda katılımcılar hakkında bilgi verir. Pratikte, RTP çift sayılı bir bağlantı noktasına gönderilirken, ilişkili RTCP protokolü bir sonraki bağlantı noktasında çalışır.

2.1.2.2 RTP kontrol protokolü-RTCP

RTP kontrol protokolü (RTCP) periyodik olarak oturumdaki tüm katılımcılara kontrol paketleri göndermeye dayanır. RTCP, ilgili veri paketleri ile aynı dağıtım mekanizmasını kullanır. RTCP'nin temel işlevi, veri dağıtımının kalitesiyle ilgili geribildirim sağlamaktır. Bu, RTP'nin bir taşıma protokolü olarak rolünün önemli bir parçasıdır ve diğer aktarım protokollerinin akış ve sıkışma kontrol işlevleriyle ilgilidir. Geri bildirim, değişen ağ koşullarına uyum sağlayabilen codec bileşenlerini kontrol etmek için doğrudan yararlı olabilir. Buna ek olarak, dağıtım ağındaki arızaları teşhis etmek için alıcılardan geribildirim almak önemlidir.

2.1.2.3 Gerçek zamanlı akış protokolü-RTSP

Çoğu kişi filmleri veya diğer video programlarını izlemek için bir Videocassette Recorder (VCR) veya bir DVD oynatıcı kullanmaya aşinadır. Burada video kaseti, video ve ses bilgi akışını sağlar. Video akışının başlama ve durma zamanını kontrol etmek için başlatma, durdurma, duraklatma, hızlı ileri sarma ve kayıt dahil olmak üzere VCR üzerindeki kontroller kullanılır. İnternet üzerindeki akışlı medyaya erişirken, video kasete benzer şekilde akışı sağlamak için RTP protokolü kullanılır. Gerçek zamanlı akış protokolü (RTSP), bir akışı seçmek ve oynatmak, duraklatmak ve durdurmak için VCR üzerindeki kontrollere benzer şekilde kullanılır.

RTSP protokolü, kontrol ettiği gerçek ortam akışlarını sağlamak için RTP'ye dayanır. RTSP, çeşitli protokoller üzerinden taşınabilir; ancak genellikle TCP üzerinden taşınır.

2.1.3 Sistem pozisyon algılayıcıları

Robotik sistemlerde pozisyon kontrolü için sistemin uzuvlarının açılarının doğru bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu tür sistemlerde uzuv açıları çeşitli yöntemlerle ölçülmektedirler. Bunlardan en sık olanı potansiyometreler ve enkoderlerdir. Önal yaptığı çalışmada bir ekskavatörün tele operasyonunu gerçekleştirmiş ve bu sistemde açı algılayıcı olarak manyetik mutlak enkoder tipini kullanmıştır [31]. Bunun için özel açı algılayıcısı geliştirmiştir. Bu sistemde de önerilen açı algılayıcısı

modeli kullanılmıştır. Açık algılayıcılarda manyetik pozisyon sensörü olarak AMS firmasının ürettiği manyetik rotatif pozisyon sensörleri kullanılmıştır(Şekil 2.7).



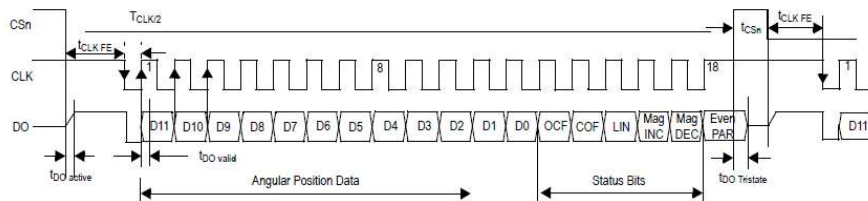
Şekil 2.7 AS5145B Manyetik rotatif pozisyon sensörü

Bu sensörün seçilmesindeki öne çıkan özellikler şunlardır:

- Tam turdaki rotasyonel pozisyonu yüksek çözünürlükte ve temassız olarak vermesi
- Kullanıcı tanımlı sıfır noktası
- Geniş sıcaklık aralığına sahip olması - 40°C +150°C
- Küçük bir pakete sahip olması

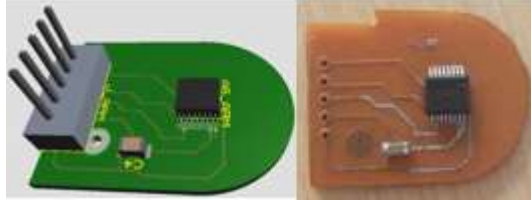
Bu sensör üzerine eş merkezli ve yüzeyleri arasında 0.5 mm – 1.5 mm aralığında bir mesafe kalacak şekilde yerleştirilen 6 mm çapında ve 2.5mm kalınlığında bir çapsal mıknatıs sayesinde artımsal çıktı verir. Bu alınan değer bir mikroişlemci vasıtasıyla yorumlanıp açı değerine dönüştürülmektedir.

AS5145B, haberleşme yöntemi olarak seri haberleşme kullanıldığında 18bit veri gönderir. İlk 12 bit açı değeridir. Bu da 12 bit çözünürlüğe sahip olduğunu gösterir. Bu değer açısal olarak 0.0879°çözünürlüğe karşılık gelmektedir. Kalan son 6 bit ise sistem bilgilerini (Manyetik alan durumu vb.) içerir(Şekil 2.8).



Şekil 2.8 AS5145B Çalışma prensibi

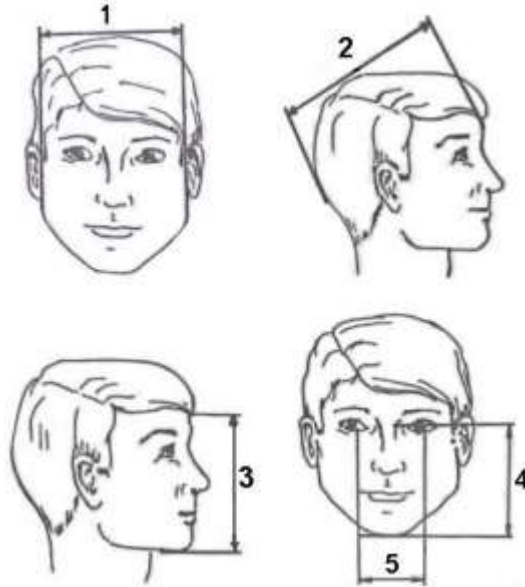
Bir sistemde birden fazla sensör kullanmak mümkündür. Bilgisine ihtiyaç duyulan sensörün çip seçme(CS: ChipSelect) bacağına t_{CSn} süresi boyunca tam darbe(High Pulse) verildiğinde ilgili sensör yanıt verir. Bundan dolayı her sensöre ayrı ayrı saat girdisi(CLK: Clock input) ve veri çıkışı(DO: Data Output) bacakları bağlantısı yapmaya gerek yoktur. Sistem boyunca veri çıkışı ve saat girdisi bacakları mikroişlemciye tek bir çıkıştan sağlanabilir. Şekil 2.9 DA motorlar için üretilen açığı algılayıcısının elektronik kartı ve bilgisayar ortamındaki tasarımını göstermektedir.



Şekil 2.9 Açığı algılayıcı elektronik kart ve tasarımı

2.1.4 İnsan kafa özellikleri

İnsan kafasını özellikleri ölçüm ve ağırlık olarak incelenebilir. İnsan kafa ölçüleri 5 standart ölçümle gösterilmektedir. Bunlar Şekil 2.10 da detaylı gösterilmiştir.



Şekil 2.10 İnsan kafa ölçüm standartları

Türk erkekleri üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen bu ölçümlerin ortalaması Çizelge 2.1 de verilmektedir [32].

Çizelge 2.1 İnsan kafa ölçüleri

	Ölçüm Yeri	Ortalama(cm)	Standart Sapma
1	Kafa genişliği	15.1	1.63
2	Kafa uzunluğu	18.71	1.01
3	Kafa yüksekliği	18.72	1.12
4	Göz-çene mesafesi	11.63	0.8
5	Gözler arası mesafe	6.12	0.45

Erkeklerin kafasının ortalama ağırlıkları gösterilen çalışmalarda araştırılmıştır(Çizelge 2.2) [33].

Çizelge 2.2 Erkek kafası ortalama ağırlığı

Kaynak	Veri sayısı	Ortalama vücut ağırlığı(kg)	Ortama kafa ağırlığı(kg)
Walker ve ark., 1973	16	67.1	4.49
Hubbard ve McLeod, 1974	11	-	4.54
Reynolds ve ark., 1975	6	65.2	3.98
HMRTF'ye göre düzeltilmiş	6	76.9	4.69
Beier ve ark., 1980	19	74.7	4.32
McConville ve ark., 1980	31	77.5	4.55
Robbins, 1983	25	76.7	4.54

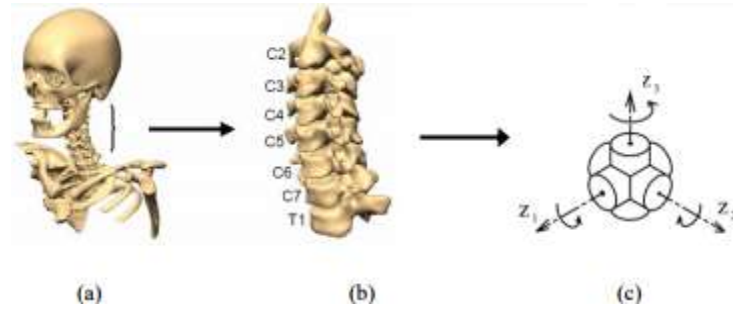
* The Human Mechanical Response Task Force (HMRTF)

Yine aynı çalışmada erkek kafasının ortalama eylemsizlik momentleri bulunmuştur(Çizelge 2.3) [33].

Çizelge 2.3 Erkek kafası ortalama eylemsizlik momentleri

Kaynak	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
Walker ve ark., 1973	-	23.3	-
Hubbard ve McLeod, 1974	17.4	16.4	20.3
HMRTF'ye göre düzeltilmiş	22.6	21.3	26.3
Beier ve ark., 1980	20.7	22.6	14.9
McConville ve ark., 1980	20.4	23.2	15.1
Robbins, 1983	20	22.2	14.5

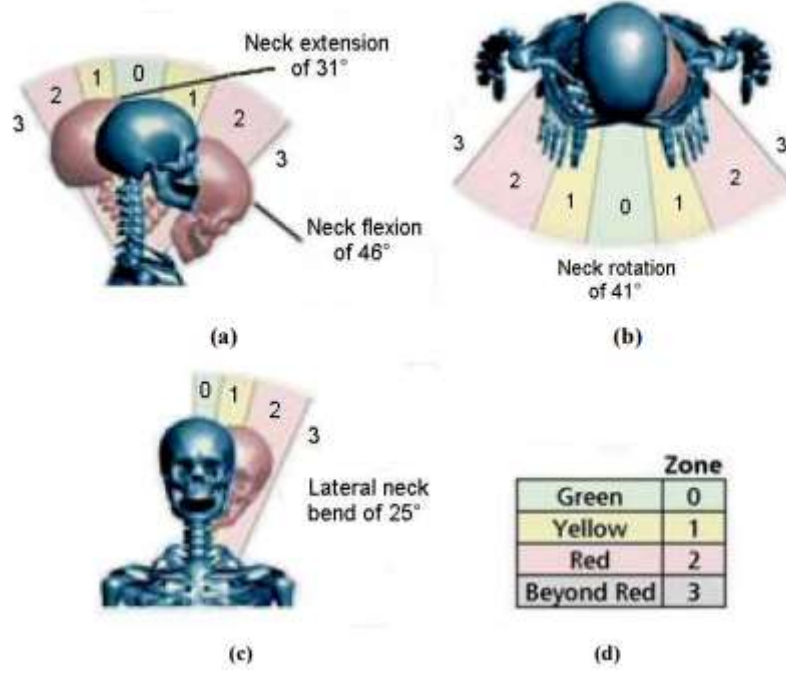
2.1.5 İnsan kafa hareketi



Şekil 2.11 a) İnsan baş omurgası, b) Boyun omuru, c) Basitleştirilen kinematik modeli

İnsanlarda kafa hareketi, baş ve boyun hareketlerinden oluşmaktadır. Sağa-sola dönüş hareketi C1-C2 omurları etrafında, öne-geri eğilme hareketi C1 omuru ve baş arasında ya da C6-7 ve T1 omurları arasında ve son olarak sağa-sola eğilme hareketi ise C2-C5 arasında oluşmaktadır [34].

Herbir omurda 3 serbestlik olduğu düşünülürse insan kafa kinematikğinde oldukça fazla serbestlik bulunmaktadır. Buna rağmen, insan kafasının hareketi göz önüne getirildiğinde, kafa hareketi 3 serbestlikli olarak düşünülebilir(Şekil 2.11. Bunlar kafanın öne-geri eğilmesi(flexion-extension), sağa-sola döndürülmesi ve sağa-sola eğilmesi olarak söylenir(Şekil 2.12-c).



Şekil 2.12 İnsan kafa hareketleri

Bahsedilen bu hareketlerin tarayabileceği açılar da Çizelge 2.4 de gösterilmiştir [35]. Ayrıca insanın yürüme ve koşma hareketinde kafanın açısal hızları 100°/sn yi geçmemektedir [36].

Çizelge 2.4 Kafa hareketi açıları

Hareket	Hareket alanı(derece)			
	0	1	2	3
Öne esneme(flexion)	0-9	10-22	23-45	46+
Geri esneme(extension)	0-6	7-15	16-30	31+
Sağa-sola dönüş	0-8	9-20	21-40	41+
Sağa-sola eğilme	0-5	6-12	13-24	25+

2.2 Operatör

Tez çalışmasının bu bölümünde operatör tarafında iki önemli konu bulunmaktadır. Bunlar kafa hareketleri/oryantasyonu algılanması ve sanal gerçeklik uygulaması

olarak düşünülebilir. Operatörün başına giyebildiği bir sistem olan, akıllı telefon entegreli sanal gerçeklik gözlüğü düşünülmüştür. Telefonun oryantasyon sensörü ile kafa hareketleri algılanmış, kafa oryantasyon bilgisi TCP/IP soket kullanılarak robota aktarılmış ve robottan gelen görüntüler telefon ekranında yayınlanarak sanal gerçeklik gözlüğünde 3D olarak gösterilmiştir.

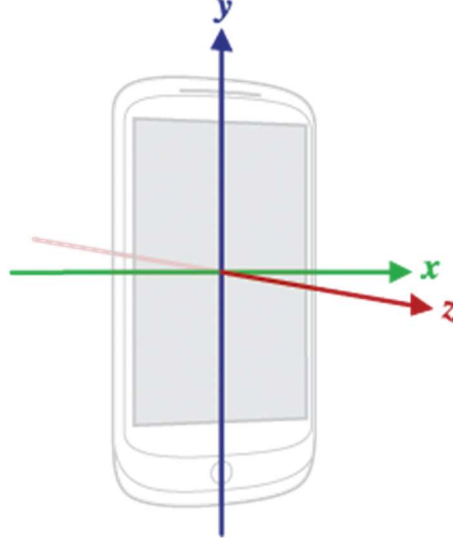
2.2.1 Kafa hareketleri algılama

Günümüzde hemen hemen herkesin sahip olduğu akıllı telefonların büyük bir çoğunluğunda oryantasyon sensörleri(ivmeölçer,jiroskop,manyetometre vs.) bulunmaktadır. Bu çalışmada da kafa hareketleri bu sensörler kullanılarak takip edilecektir. Kullanım yaygınlığı ve kolaylığı açısından Android işletim sahibine sahip akıllı telefon kullanılmıştır.

Android tabanlı sistemler programlama platformu sayesinde birçok sensör çeşidine erişilmesini sağlamaktadır. Bunlar donanımsal ve yazılımsal olarak ayrılabilir. Donanım tabanlı sensörler cihazda bulunan fiziksel bileşenlerdir. Bu sensörlerin çıktıları doğrudan ölçerek bulurlar. Bunlara ivme, manyetik alan kuvveti ve açısal hız örnek gösterilebilir. Yazılım tabanlı sensörler donanımsal sensörleri taklit etmelerine rağmen fiziksel değildirler. Sanal sensör olarak da adlandırılırlar. Bu sensörlerin çıktıları bir veya birden fazla donanım tabanlı sensör kullanılarak hesaplanır. Bu çalışmada sanal sensörler olan *TYPE_ORIENTATION* ve *TYPE_ROTATION_VECTOR* kullanılmıştır. Bu sensörler ivmeölçer ve manyetik alan sensörü(manyetometre) gibi donanım-tabanlı sensör verilerini kullanmaktadırlar. İkisi de oryantasyon sensörü olarak kullanılabilir. *TYPE_ROTATION_VECTOR* işletim sisteminin her sürümünde bulunmamasına rağmen oryantasyon hesabı için önerilen sensördür. Geliştirilen programda öncelikli olarak bu sensör kullanılmış; fakat *TYPE_ROTATION_VECTOR* sensörü bulunmadığı durumlar da düşünülmüştür. Bu gibi durumlarda program *TYPE_ORIENTATION* sensörünü kullanmaktadır.

Android programlama platformunda oryantasyon sensörleri için standart 3 eksenli koordinat sistemi kullanılır. Bu sensörler için koordinat sistemi cihaz varsayılan yönünde tutulduğunda X eksenini yatay ve sağa, Y eksenini dikey ve yukarı doğru ve Z eksenini ekranın dışına doğru bakar. Bu sistemde, ekranın arkasındaki koordinatlar

negatif Z değerlerine sahiptir. Eksen dağılımı Şekil 2.13 de gösterilmiştir. Bu koordinat sistemi cihazın ekran yönünden bağımsızdır. Kısacası cihaz hareket etse bile koordinat sistemi değişmez.



Şekil 2.13 Akıllı telefon eksen dağılımı

Operatörün iki eksen etrafındaki kafa hareketleri bizim için önemlidir. Sanal gerçeklik gözlüğündeki telefonun yerleşimi(Şekil 2.14) düşünüldüğünde pan hareketi için telefonun X eksenine, tilt hareketi içinse Y eksenine etrafındaki dönüş açısı algılanmalıdır.



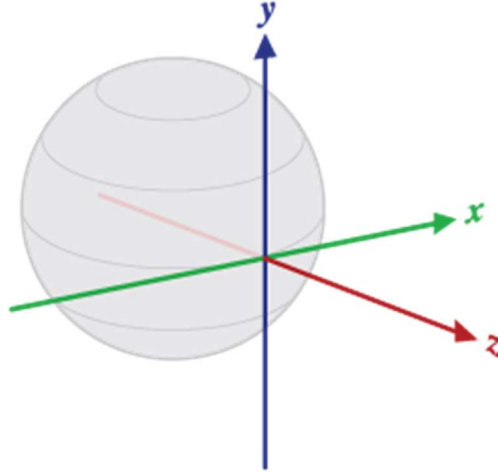
Şekil 2.14 VR Box akıllı telefon yerleşimi

Bahsedilen sensörler telefonun dönüşüm matrisini(R), ivmeölçer ve manyetometre kullanarak hesaplarlar. Referans olarak dünya alınmakta ve Doğu-Kuzey-Yukarı(ENU) eksenleri kullanılmaktadır.

2.2.1.1 Doğu-Kuzey-Yukarı (DKY-ENU) eksenleri oryantasyon gösterimi

DKY koordinat sistemi en temel koordinat sistemidir. Rastgele bir koordinat sistemi olarak düşünülebilir. Tanımı gereği, koordinat sistemi, elemanları koordinat sistemi kaynaklarına göre konumlandırmak için doğrusal X, Y ve Z koordinatlarını kullanan bir ve dünyayı düz kabul eden sistemidir. Bu koordinat sistemi, dünyanın geometrisinin önemli olmadığı (4 km'den daha küçük) alanlarda oldukça kullanışlıdır.

Koordinat sisteminde + Y eksenleri Kuzey'e, + X eksenleri Doğu'ya karşılık gelir. + Z eksenleri gökyüzüne doğru düşünülebilir. Bu nedenle "Doğu Kuzey Yukarı" (ENU) koordinat sistemi haline getirir. Şekil 2.15 koordinat sistemini göstermektedir.



Şekil 2.15 Doğu-Kuzey-Yukarı(ENU) koordinat sistemi

Bu gösterimde, koordinat eksenleri arasındaki dönüşüm matrisi, $R_{3 \times 3}$, 3 vektörden oluşur. Bunlar doğu (\vec{e}), kuzey (\vec{n}) ve yukarı (\vec{u}) vektörleridir. Bu vektörler ivmeölçer(\vec{A}) ve manyetometre(\vec{B}) çıktılarıyla bulunabilir. Bu veriler kullanılmadan önce normalize edilmelidir.

$$\vec{A} = \frac{\langle A_x \quad A_y \quad A_z \rangle}{\|\vec{A}\|} \quad (2.1)$$

$$\vec{B} = \frac{\langle B_x \quad B_y \quad B_z \rangle}{\|\vec{B}\|} \quad (2.2)$$

Dönüşüm matrisinde bulunan yukarı vektörü ivmeölçer verisiyle yazılabilir.

$$\vec{u} = \langle A_x \quad A_y \quad A_z \rangle \quad (2.3)$$

Doğu vektörü, manyetometre verisiyle(\vec{B}) ivmeölçer verisinin vektörel çarpımıyla kuzey vektörü(\vec{A}) ise ivmeölçer verisinin doğu vektörüyle vektörel çarpımından bulunur.

$$\vec{e} = \vec{B} \times \vec{A} \quad (2.4)$$

$$\vec{n} = \vec{A} \times \vec{e} \quad (2.5)$$

Vektörler hesaplandıktan sonra dönüşüm matrisi yazılabilir.

$$R_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} e_x & e_y & e_z \\ n_x & n_y & n_z \\ u_x & u_y & u_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.2.2 Sanal gerçeklik uygulaması

3 boyutlu görüntüyü operatöre aktarmak için VR Box markalı sanal gerçeklik gözlüğü kullanılmıştır.



Şekil 2.16 VR Box sanal gerçeklik gözlüğü

Görüntüleri Android işletim sistemine sahip telefonda göstermek için Android Studio platformunda arayüz tasarlanmış ve programlanmıştır. Arayüzde 2 adet *SurfaceView* aracı bulunmaktadır(Şekil 2.17). Sağ ve sol kameradan gelen görüntüler RTSP protokolü kullanılarak bu iki segmentte ayrı ayrı gösterilir. Sanal gerçeklik gözlüğünde bulunan lens bu iki görüntüyü eğirerek görüş alanını doldurur. İnsan gözü, bu iki ayrı görüntüyü stereoskopik olarak derinliğin ilüzyonunu yaratan tek bir görüntü olarak algılar.



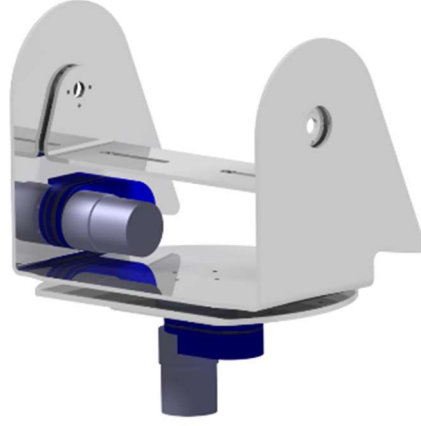
Şekil 2.17 Görüntüleme programı arayüzü

2.3 Robot

Robotun kafa kısmı iki bölümden oluşmaktadır. Bunlar 2 serbestlik derecesine sahip pan-tilt mekanizması ve 2 adet kameradan oluşan görüntüleme sistemidir.

2.3.1 Pan-Tilt mekanizması

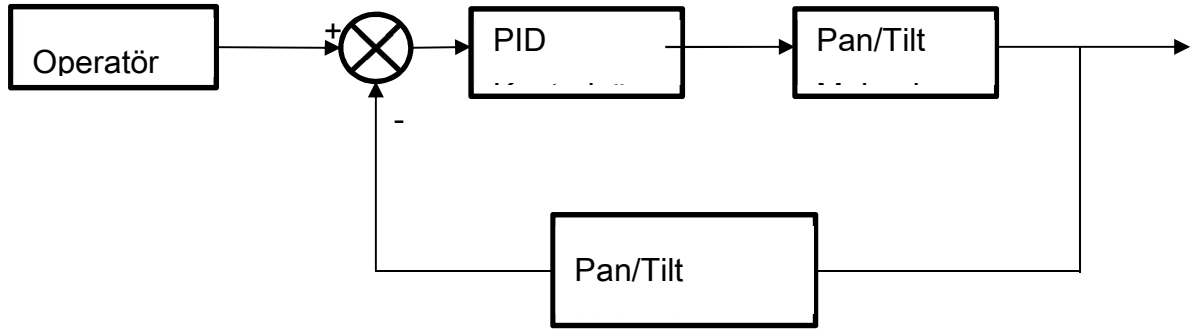
Operatörün kafa hareketleri 3 eksenle dönüş olarak düşünülebilir. 2 eksenle hareket bütün görüş mesafesini tarayabildiği için pan-tilt mekanizması 2 serbestlikli olarak tasarlanmıştır. Şekil 2.18 mekanizmanın bilgisayar ortamındaki çizimini göstermektedir.



Şekil 2.18 Tasarlanan Pan-Tilt mekanizması

Mekanizmanın herbir eksenindeki hareketi için fırçalı DA motorlar kullanılmıştır. Motorların özellikleri EK-2 bölümünde detaylı verilmiştir. DA motorların pozisyon kontrolü için servo kontrol metodu uygulanmış ve PID kontrolcü kullanılmıştır.

Pozisyon kontrolü yapabilmek için motorların bulunduğu açının ölçülmesi gerekmektedir. Bu sebeple bölüm 2.1.3'te anlatılan açı algılayıcı kullanılmıştır. Sensörün özellikleri de EK-1 'de sunulmuştur.



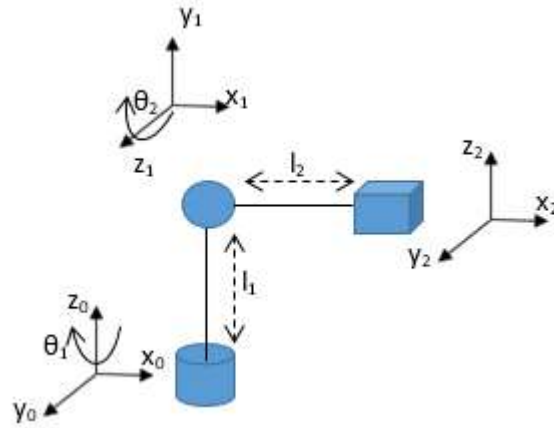
Şekil 2.19 Pan-Tilt kontrol şeması

2.3.1.1 Kinematik analiz

Kinematik, cisimlerin, noktaların ve ya sistemlerin kütesine bakılmaksızın hareketini tanımlayan bir alandır. İleri ve ters kinematik olarak ikiye ayrılır. İleri kinematik, kinematik zinciri oluşturan bağlantıların açısı veya yer değiştirmesini kullanarak son bağlantının oryantasyonunu ve pozisyonunu elde eder. Ters kinematik ise bunu tam tersidir. Uç noktanın oryantasyon ve pozisyon bilgisini,

bağlantıların açısını veya yer değiştirmesini tanımlamak için kullanır. Kinematik analiz hesabında değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunların detaylı anlatımı bölüm 3.3.2 de anlatılmıştır.

Bu çalışmada tasarlanan mekanizmanın kinematik analizi, “Homojen Dönüşüm Yöntemi” kullanılarak yapılmıştır. Öncelikle Şekil 2.20 de gösterilen kinematik model oluşturulmuştur. Bu modelden yararlanılarak Denavit-Hartenberg parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 2.5 de gösterilmiştir.



Şekil 2.20 Pan-tilt mekanizması kinematik modeli

Çizelge 2.5 Pan-tilt mekanizması DH parametreleri

Eksen No(i)	α_i (derece)	a_i (mm)	d_i (mm)	θ_i (derece)
1	90	0	l_1	θ_1
2	0	l_2	0	θ_2

İleri kinematik analizi

Homojen dönüşüm yönteminde eksenler arasındaki dönüşüm matrisleri DH parametreleri kullanılarak yazılır. Denklem 2.7 de i nolu eksene ait dönüşüm matrisi gösterilmiştir.

$$T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7 ve Çizelge 2.5 kullanılarak tasarlanan mekanizmanın dönüşüm matrisleri oluşturulmuştur. ($c\theta = \cos(\theta)$, $s\theta = \sin(\theta)$)

$$T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & l_2 s\theta_2 \\ 0 & 1 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Referans alınan eksene göre istenilen eksenin oryantasyon ve pozisyonu aralarındaki dönüşüm matrislerinin çarpımıyla bulunur. Buna göre 2 nolu eksenin 0 nolu eksene göre dönüşümü 2.10 ve 2.11 nolu denklemlerde gösterilmiştir.

$$T_2^0 = \prod_{i=1}^2 T_i \quad (2.10)$$

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 & -c\theta_1 s\theta_2 & s\theta_1 & l_2 c\theta_1 c\theta_2 \\ s\theta_1 c\theta_2 & -s\theta_1 s\theta_2 & -c\theta_1 & l_2 s\theta_1 c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & l_1 + l_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Ters kinematik analizi

Ters kinematik analizi, ileri kinematik analizinde olduğu gibi tekil çözüm vermeyebilir; fakat mekanizmadaki eklemlerin açılarının alabileceği değerler sınırlandırılabilir. Böylece kısıtlandırılmış hareket alanında tekil çözüme ulaşmak mümkündür.

Ters kinematik çözümü, 2.7 nolu denklem kullanılarak bulunabilir. Dönüşüm matrisini;

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_1 T_2 \quad (2.12)$$

şeklinde yazarsak $r_{3 \times 3}$ dönüşüm matrisi, $p_{3 \times 1}$ ise konum vektörüdür. Denklem her iki tarafı T_1^{-1} ile soldan çarpılırsa;

$$T_1^{-1}T_2^0 = T_2 \quad (2.13)$$

denklemini elde edilir. T_1^{-1} ve T_2 yerine yazıldığında;

$$\begin{bmatrix} c\theta_1 & s\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_1 \\ s\theta_1 & -c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_2c\theta_2 \\ s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & l_2s\theta_2 \\ 0 & 1 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & c\theta_1p_x + s\theta_1p_y \\ \cdot & \cdot & \cdot & p_z - l_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & s\theta_1p_x - c\theta_1p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_2c\theta_2 \\ s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & l_2s\theta_2 \\ 0 & 1 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

eşitlikleri bulunur. Denklem 2.15 kullanılarak;

$$p_z - l_1 = l_2s\theta_2 \quad (2.16)$$

yazılır ve θ_2 bulunabilir.

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{p_z - l_1}{l_2}\right) \quad (2.17)$$

$-\frac{\pi}{2} \leq \theta_2 \leq \frac{\pi}{2}$ aralığında tekil çözüm vardır. 2.15 nolu denklemde matrislerin (1,4) indeksli elamanları;

$$c\theta_1p_x + s\theta_1p_y = l_2c\theta_2 \quad (2.18)$$

eşitliğini verir. Bu denklemden θ_1 'i hesaplayabilmek için birkaç adım gerekmektedir.

$$p_x = Cs\varphi \quad (2.19)$$

$$p_y = Cc\varphi \quad (2.20)$$

Denklem 2.19 ve Denklem 2.20 ten ;

$$\varphi = \text{atan2}(p_x, p_y) \quad (2.21)$$

$$C = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (2.22)$$

olarak hesaplanır. Denklem 2.21 ve 2.22, 2.18 nolu denklemde yerlerine konulursa;

$$Cc\theta_1 s\varphi + Cs\theta_1 c\varphi = l_2 c\theta_2 \quad (2.23)$$

elde edilir. Bu denklemden,

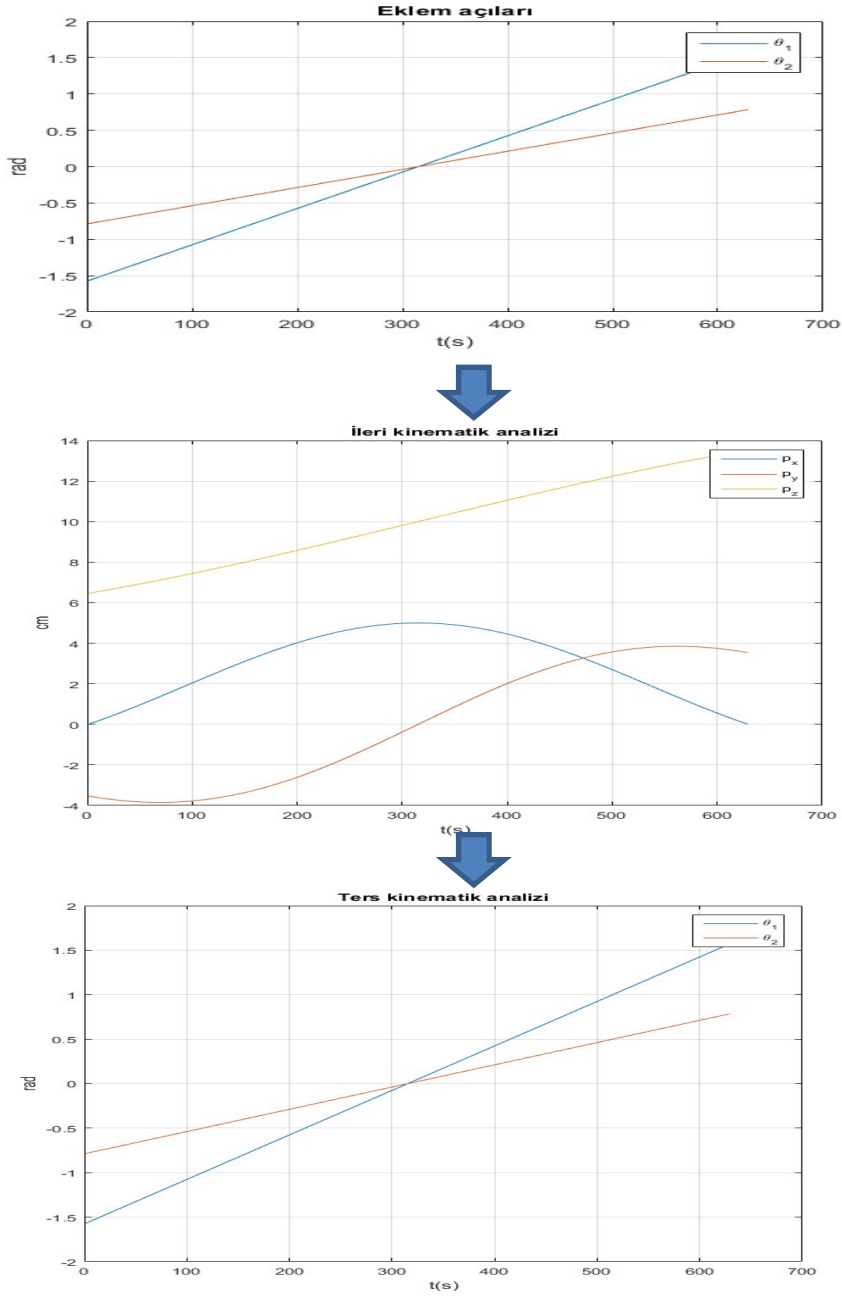
$$C\sin(\theta_1 + \varphi) = l_2 c\theta_2 \quad (2.24)$$

bulunur ve θ_2 kolaylıkla hesaplanabilir.

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{l_2 c\theta_2}{C}\right) + \varphi \quad (2.25)$$

Kinematik analizin doğrulanması

Analizi doğrulamak için θ_1 ve θ_2 açılarına $\frac{-\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ aralığında artan değerler verilmiş ve ileri kinematik denklemleriyle uç noktanın konumu hesaplanmıştır. Daha sonra bu sonuçlar ters kinematik denklemlerinde yerine konularak θ_1 ve θ_2 açıları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Şekil 2.21, analizin doğruluğunu göstermektedir.

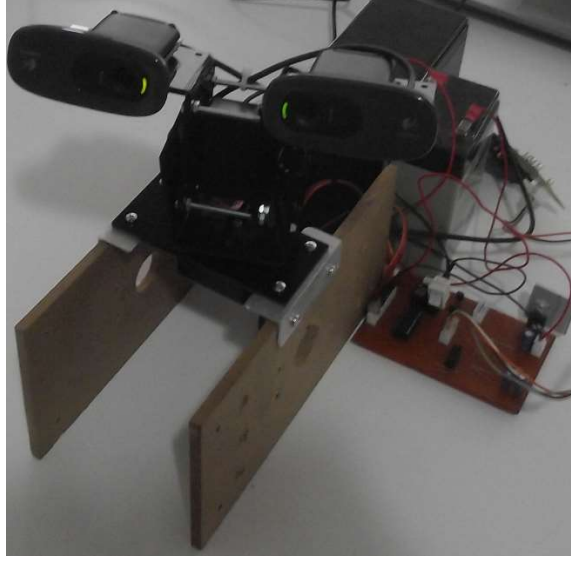


Şekil 2.21 Kinematik analiz doğrulama sonuçları

2.3.1.2 Mekanik tasarım

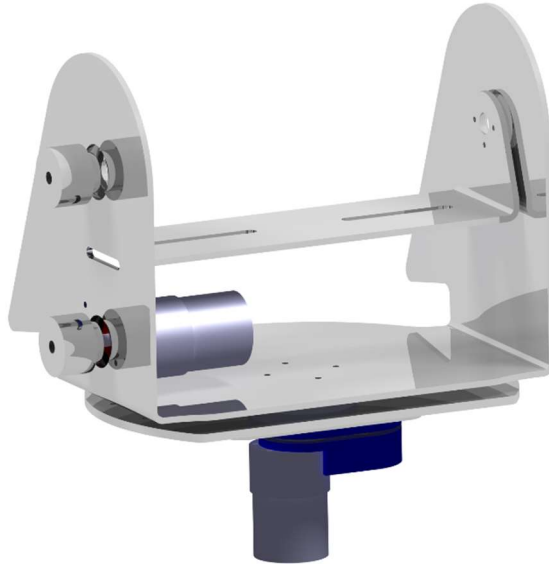
Pan-tilt mekanizması 2 serbestlikten oluşmaktadır. Tasarım öncelikle servo motor tabanlı olarak yapılmış basit bir sistem olarak oluşturulmuştur(Şekil 2.22). Servo motor tabanlı bir sistem olduğunda hareketlerde titremeler meydana gelmektedir. Servo motorlarda kontrolcüye müdahale imkanımız kısıtlı olduğundan DA motor

kullanımına karar verilmiştir. Mekanizma da geliştirilerek son tasarım oluşturulmuştur(Şekil 2.23).



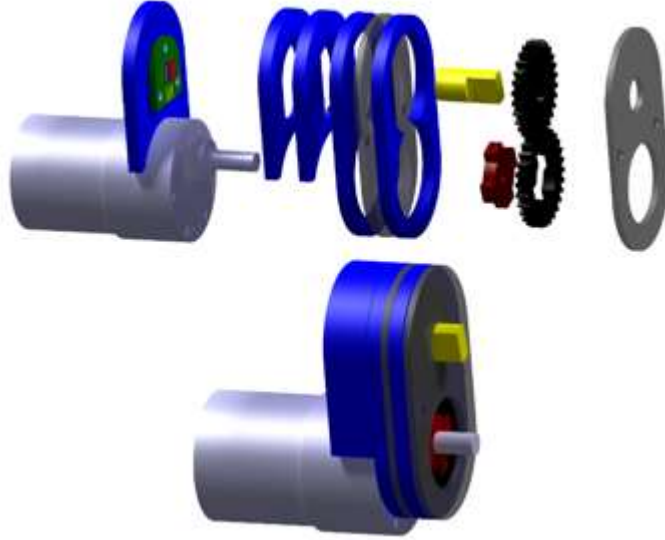
Şekil 2.22 Pan-tilt mekanizması ilk tasarımı

Robot kafa mekanizması 8mm alüminyum plaka kullanılarak üretilmiştir. CAD modelleri çizilen parçalar CNC makinelerde kesilmiştir. Farklı parçaların montajları bu tip sistemlerde dayanımı azaltmaktadır. Bu nedenle büküm yöntemleri kullanılarak parça sayısı minimize edilmiştir.



Şekil 2.23 Pan-tilt mekanizması son tasarımı

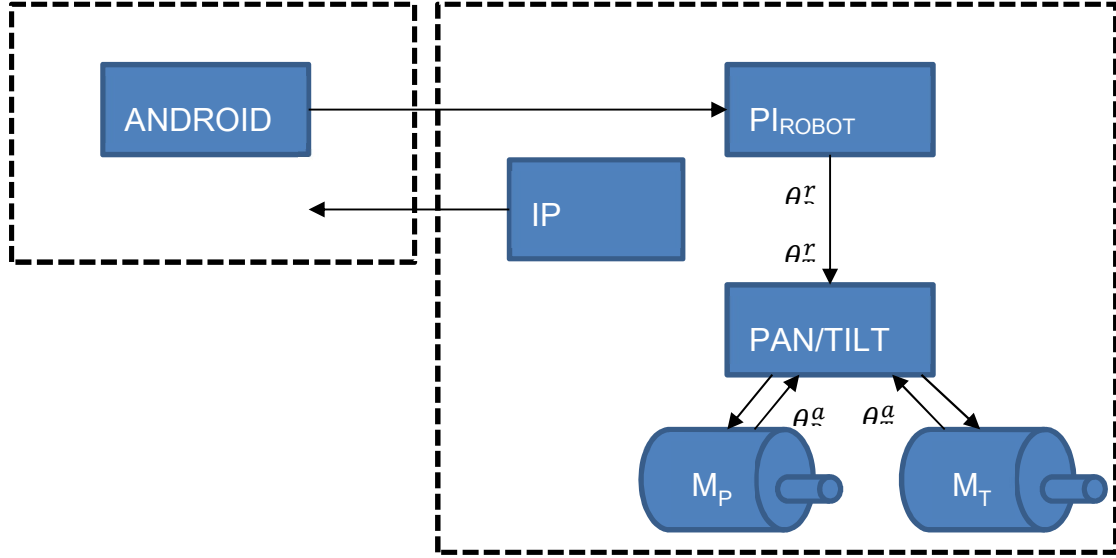
Sistem eyleyicileri fırçalı DA motorlardan oluşmaktadır. Bu motorlara açı kontrolü amacıyla sensörler entegre edilmiştir. Şekil 2.24 sensörlerin motorlara montajını göstermektedir. EK-2 de ise motorların özellikleri yer almaktadır. Rulmanlar ve motorun bağlantısını sağlayacak flanşlar kestamitten üretilmiştir. Kestamit malzemesinin özellikleri EK-3 te verilmiştir. Tilt hareketini sağlayan motorun hareket aktarımı için ise kayış-kasnak sistemi tercih edilmiştir.



Şekil 2.24 DA motor açı algılayıcı montajı

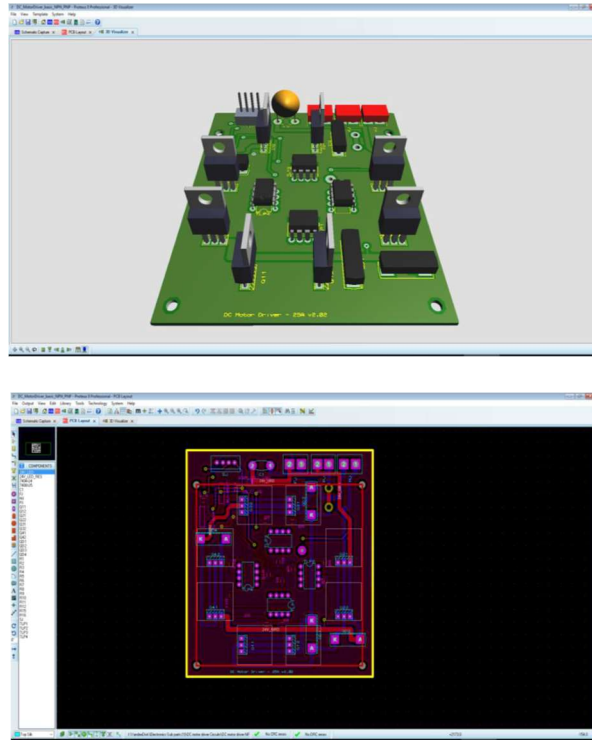
2.3.1.3 Elektronik tasarım

Bu bölümde robot elektronik tasarımı incelenmiştir. Operatörün kafa hareketleri android işletim sistemli bir akıllı telefonla algılanıp TCP/IP protokolüyle robota gönderilmektedir. Robotta bulunan bilgisayar aldığı pozisyon bilgilerini Pan/Tilt mekanizmasının sürücüsüne seri haberleşme protokolüyle göndermektedir. Sürücü, pan ve tilt motorlarını, ürettiği PWM sinyalleriyle sürmektedir. Motorların açıları ise üretilen algılayıcı devrelerle sürücüden okunmakta ve kapalı döngü kontrol sistemi uygulanmaktadır. Pan/Tilt mekanizmasına yerleştirilen IP kameralar ise görüntüleri RTSP/RTP protokolüyle operatöre iletmektedirler(Şekil 2.25).



Şekil 2.25 Robot kafa blok şeması

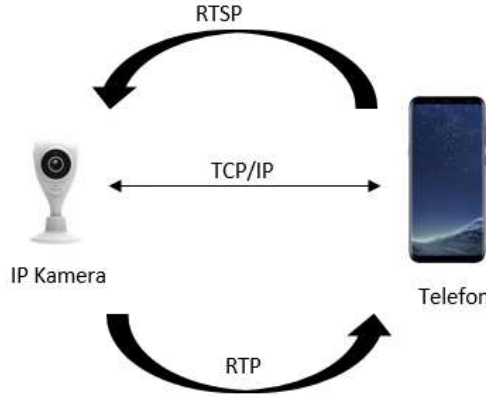
Sistemde iki adet DA motor sürmek için motor sürücü devresi tasarlanmıştır. Motorlar 24V ile sürülmektedir. Sürücü çipi olarak L298 motor sürücü entegresi kullanılmıştır. Bu entegrenin özellikleri EK-4 'te detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 2.26 Motor sürücü devre şeması

2.3.2 Görüntüleme sistemi

Görüntüleme sistemi için 2 adet aynı tipte 2 boyutlu IP kamera kullanılmıştır. Kameralar tilt mekanizmasının üstüne monte edilmiştir. IP kameralar gerek kullanım kolaylığı gerekse kablosuz veri aktarımı sağlaması nedeniyle seçilmiştir. Veri aktarımı RTP ve RTSP protokolüyle sağlanmıştır(Şekil 2.27).



Şekil 2.27 IP Kamera veri aktarımı

2.4 Sonuç

Bu bölümde operatör tarafından kumanda edilen insansı robotun görüntüleme sistem alt bileşenleri için yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Operatörün, robotu daha etkin kumanda edebilmesi için derinlik algısı oluşturabilecek bir stereo görüntüleme sistemi tasarlanmıştır. Stereo görüntülerin alındığı IP kamera çifti bir Pan/Tilt mekanizmasına bağlanmış ve operatör kafa hareketleriyle senkron hareket edebilmesi için gerekli algılayıcı ve eyleyici sistemleri oluşturularak denetleyici algoritmaları geliştirilmiştir. Elde edilen sistem sayesinde operatör, robot kafasının (Pan/Tilt mekanizması) bakış açısını kontrol edebilmekte ve derinlik algısı oluşturan stereo görüntüleri izleyebilmektedir. İlerleyen çalışmalarda, kamera çiftinin odaklanan mesafeye bağlı olarak odak eksenine doğru yönlendirilmesi ve otomatik odaklamanın derinlik algısına etkisinin incelenmesi üzerine yoğunlaşılabilir.

3 ROBOT KOL SİSTEMİ

3.1 Giriş

Klasik endüstriyel robot kollarından çok farklı yapıya sahip olan insansı robot kolu, robotun en önemli uzuvlarından biridir. Robotun yapacağı bütün manipulasyon işlevinde kol bölümü önemli bir role sahiptir. Bu çalışmada, 6 serbestlik dereceli insansı robot kolun tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Robot kolun kontrolü operatörün kol hareketlerinin algılanmasıyla yapılacaktır.

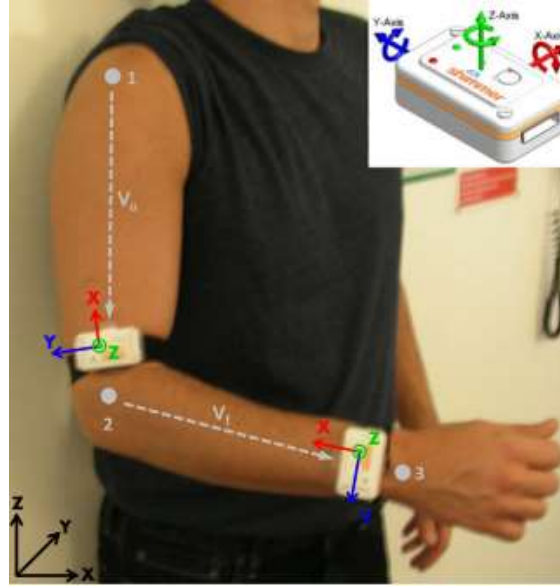
Günümüze kadar insansı robot kollar üstüne birçok araştırma yapılmıştır. Alman Hava-Uzay Merkezi'nin (DLR) geliştirdiği 7 serbestlik dereceli robot kolda bütün elektronik bileşenler kolun içine entegre edilmiştir [37] [38]. Paik ve arkadaşlarının geliştirdiği 7 serbestlik dereceli robot kol herhangi bir tork sensörü kullanmadan eklemlerdeki motorlar ile dış kuvvetleri algılayabilmektedir(Şekil 3.1) [39]. Zhou ve arkadaşları robot kollarının ağırlıklarını minimize etmeyi amaçlamışlardır [40].



Şekil 3.1 7 serbestlik dereceli robot kol

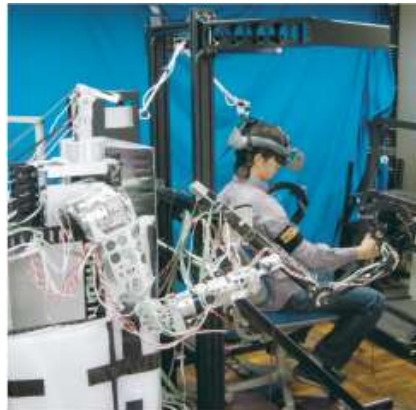
İnsansı robot kolların tasarımının yanında kontrolü de önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada efendi-köle sistemiyle kontrol hedeflenmiştir. Bu nedenle operatörün kol hareketlerinin ve eklemlerinin algılanması gerekmektedir. Mazomenos ve arkadaşları kol açılarının tespitinde ataletsel ölçüm birimi

kullanmışlardır [41]. 2 adet sensörü bilek ve dirsekte kullanmışlardır. Şekil 3.2'de gösterilen v_u ve v_l vektörleri üst ve ön kolun pozisyonlarını göstermektedir.



Şekil 3.2 Ataletsel ölçüm birimlerinin yerleşimi

Lana ve arkadaşlarının çalışması insan-robot etkileşiminin EEG ile yapılan örneklerinden biridir. Bu çalışmada EEG sinyalleri analiz edilerek insan kolu hareketleri analiz edilmiştir [42]. Aung ve Al-Jumaily yapmış oldukları çalışmada EMG sinyalleri yoluyla kol eklem açılarını tahmin etmeyi hedeflemişlerdir. Kayıtlı sinyalleri kullanarak yapay sinir ağları modeli geliştirmişlerdir [43]. Al-Faiz ve Shanta kol hareketlerinin tespitinde Kinect sensöründen faydalanmıştır [44]. Tadakuma ve arkadaşları, kol açılarını ölçmek için 7 serbestlik dereceli sistem tasarlamışlardır(Şekil 3.3) [45].





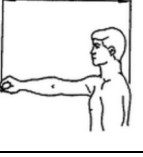


Şekil 3.3 7 serbestlik dereceli sistem

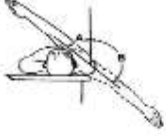


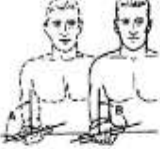

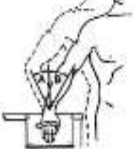
3.1.1 İnsan kolu biyomekaniği

Robot kolun tasarımına başlanmadan önce insan kolunun fiziksel ve biyomekanik özellikleri incelenmiştir. Bunun için NASA'nın yayınladığı 40 yaşındaki standart bir Amerikalı erkeğin özelliklerinden faydalanılmıştır. Ortalama insan kolu uzunlukları Çizelge 3.1'de verilmiştir [46]. Uzunlukları verilen insan kolunun hareket kabiliyeti Çizelge 3.2'de gösterilmiştir [47].

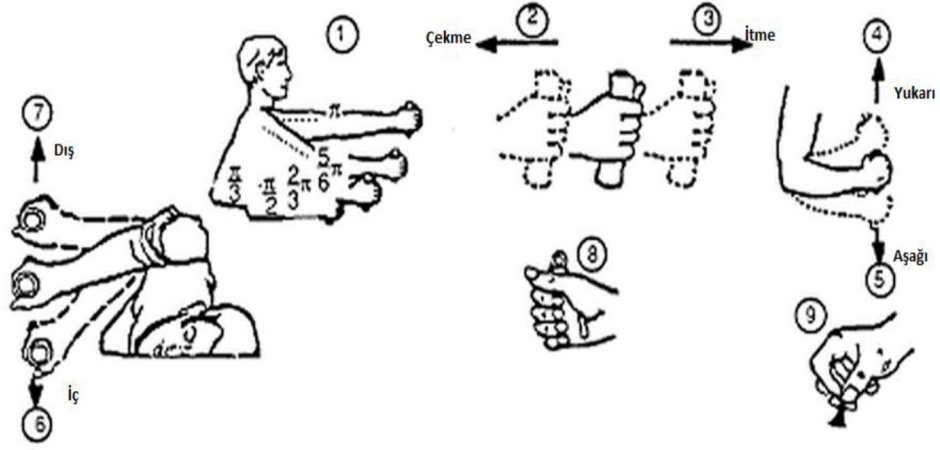
Çizelge 3.1 İnsan Kolu Uzunlukları

Ölçüm Yeri	Uzunluklar(mm)
	Omuz-Dirsek 394
	Dirsek-Parmak Ucu 446
	Omuzlar Arası 532
	Kol uzunluğu 979
	Sırt-Parmak Ucu 882

Çizelge 3.2 İnsan Kolu Kabiliyeti

Ölçülen Hareket		Açılar(Derece)
	<u>Omuz Yatay Hareketi</u> A+B	188.7
	<u>Omuz Döndürme Hareketi</u> A B	96.7 126.6
	<u>Omuz Açma Kapama Hareketi</u> A B	210.9 83.3
	<u>Ön Kol Döndürme</u> A B	125.8 116.1
	<u>Dirsek Bükülmesi</u> A	159
	<u>Bilek Bükülmesi</u> A B	47.9 36.7

Tasarlanacak robot kolda bulunacak motorların seçimi için dayanım bilgisine ihtiyaç vardır. Ortalama bir insan kolunun belirli hareketlerdeki dayanım değerlerini görebilirsiniz.



Şekil 3.4 Kol-El Hareketleri

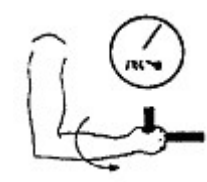
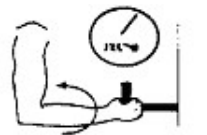
Şekil 3.4'de gösterilen hareketlerde kolun dayanımı Çizelge 3.3'te detaylı olarak Newton birimiyle verilmektedir [48].

Çizelge 3.3 İnsan Kolu Dayanımı 1

(1)	(2)		(3)		(4)		(5)		(6)		(7)	
Dirseğin hareket açısı(rad)	Çekme		İtme		Yukarı		Aşağı		İç		Dış	
	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ
π	222	231	187	222	40	62	53	75	58	89	36	62
$5/6 \pi$	187	249	133	187	57	80	80	89	67	89	36	67
$2/3 \pi$	151	137	116	160	76	107	93	116	89	98	45	67
$1/2 \pi$	142	165	98	160	76	89	93	116	71	80	45	71
$1/3 \pi$	116	107	96	51	67	89	80	89	76	89	53	76

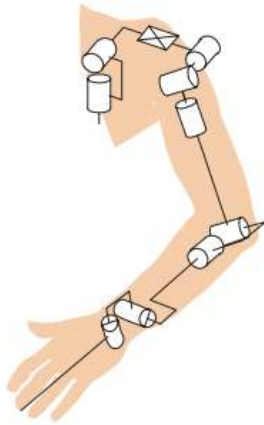
İnsan elinin dışa ve içe bükülme sonucu oluşan maksimum momentler Çizelge 3.4'te gösterilmiştir [49].

Çizelge 3.4 İnsan Kolu Dayanımı 2

Maksimum Tork Tipi	Maksimum Tork(Nm)
 Dışa Bükülme	13.73
 İçe Bükülme	17.39

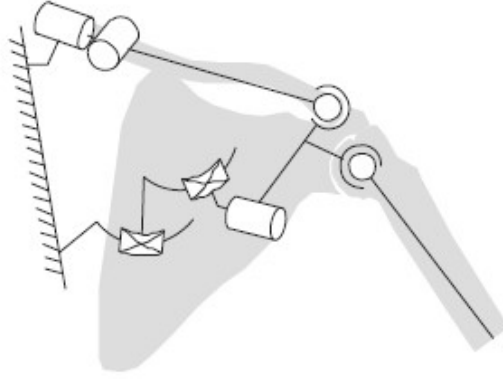
3.1.2 İnsan kolu kinematik modeli

İnsan kolunu kinematik olarak incelerken 4 altkesite ayırabiliriz. Bunlar omuz kemeri, üst kol, ön kol ve elden oluşur. Omuz kemeri 2 adet dönme ve 1 adet öteleme olmak üzere toplam 3 adet serbestlik derecesi vardır. Kemer ile üst kol arasındaki bağlantıyı omuz eklemi sağlamaktadır. Bu eklem 3 adet serbestlik derecesine sahiptir. Kolun modeli 2 adet dirsek ve 2 adet bilekte de olmak üzere toplam 10 serbestlik derecesiyle tanımlanabilir [50].



Şekil 3.5 İnsan kolu kinematik modeli

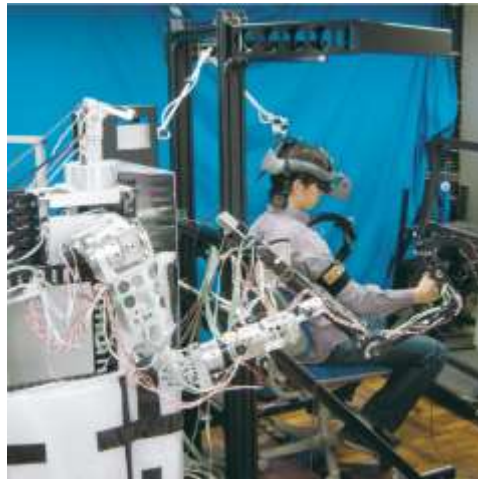
İnsan vücudunun en karmaşık eklemlerinden biri olan omuz eklemi de kolda bulunur. Bu karmaşıklık bu eklemün modellenmesini de güçleştirir. Lenarcic ve Stanisic bu eklemi paralel mekanizma olarak modellemiştir [51]. Bu paralel model Şekil 3.6 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Omuz eklemi paralel modeli

3.1.3 Kol hareketlerinin algılanması

İnsan hareketlerini algılayan sistemler günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadır. Robotik ve insan-makine etkileşiminden, spor ve rehabilitasyona kadar insan hareketlerinin gerçek zamanlı bilgilerine ihtiyaç duyan bi çok alan bu sistemlere muhtaçtırlar. İnsan kolunun hareketlerinin algılanmasında değişik yöntemler kullanılmaktadır. Dış iskelet görünümündeki mekanik çözümler, operatörün sistemi manipule etmesi sonucunda eklemlerdeki değişimi açıölçerler ya da enkoderlerle ölçmektedirler. Tadakuma ve arkadaşları, geliştirdikleri TELESAR isimli çalışmada 6 serbestlik dereceli mekanik sistem ile robot kolun kontrolünü gerçekleştirmişlerdir(Şekil 3.7) [52].



Şekil 3.7 TELESAR II

Kol açılarının tahmininde EMG sinyallerinden de faydalanılmıştır. Kaslardaki gerilme sonucu oluşan bu biyolojik sinyaller çözümlenerek hareket analizinde kullanılmıştır [53] [54]. Günümüzde yaygın olan sistemler çok yapıllı yüksek çözünürlüklü kameralara dayanmaktadırlar. Özel geliştirilmiş stüdyolara kurulan bu sistemlere Vicon ve BTS örnek verilebilir [55] [56]. Bu sistemler, yüksek hassasiyete sahip olsalarda oldukça pahalıdırlar. Microsoft firmasının geliştirdiği bir hareket sensörü olan Kinect, hareket analizinde kullanılan başka bir yöntemdir. Orjinalinde oyun amaçlı üretilen bu sensör, bir çok çalışmada da kullanılmıştır [57] [58] [59].

Atalet ve manyetik sensörlerdeki hızla yükselen gelişim, bu sensörlerin hareket algılama alanında kullanımını arttırmaktadır. Beraberinde sensör birleştirme filtreleri de kullanılan bu yöntem üzerinde oldukça yoğun araştırmalar yapılmıştır. Kalman filtresi ve türevleri, en çok kullanılan sensör birleştirme algoritmasıdır. Ataletsel ölçüm birimlerinden elde edilen veri, kalman süzgecinden geçirilip oryantasyon bilgileri elde edilmiştir [60] [61] [62]. Kalman filtresinin yanında geometrik yöntemler de geliştirilmiştir [63] [64]. Zhang ve arkadaşları ise Kalman filtresini geometrik yaklaşımla birleştirerek daha iyi bir sonuca ulaşmışlardır [65].

3.2 Operatör

Tezin bu bölümünde operatörün kol hareketlerini algılayıcı sistemler üzerine çalışılmıştır. Kol hareketleri omuz, dirsek ve bilek olmak üzere üç eklemden oluşmaktadır. Bu eklemlerin açı ölçümleri önce hareket sensörü olan kinect ve çoklu ataletsel sensörleriyle analiz edilmiştir. Bu sensörlerin yanında kol açılarının ölçümü için esnek sensörler ve bu çalışmada sunulan kızılötesi alıcı-verici tabanlı sensörler denenmiş ve karşılaştırılmıştır.

3.2.1 Kızılötesi alıcı-verici tabanlı sensörler ile kol hareketleri ölçümü

Bu bölümde kızılötesi alıcı-verici çiftinden tasarlanan sensör ile kol hareketlerinin ölçümü çalışılmıştır. Öncelikle tasarlanan sensör için test düzeneği oluşturulmuştur. Bu düzeneğe ile üç serbestlik dereceli küresel mafsalin oryantasyonunu ölçmek hedeflenmiştir. Bu düzeneğten elde edilen veri ile sensör modeli incelenmiştir.

3.2.1.1 Küresel mafsall oryantasyon ölçümü deney düzeneği

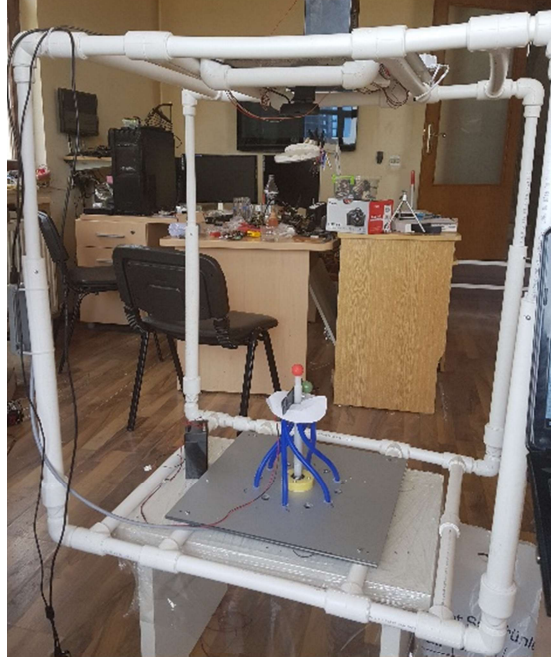
Küresel mafsallar günümüzde bir çok sistemde kullanılmaktadır. Bu tip sistemlerin otomatik kontrolünde küresel mafsalların da pozisyonlarının algılanması gerekmektedir. Bu mafsallara özel oryantasyon ölçen sensörler bulunmamaktadır; fakat tek serbestlikli hareketlerin ölçümü çeşitli sensörlerle yapılabilmektedir. Optik ve manyetik enkoderler sıklıkla kullanılan sensörlerdir. Bu sensörler eklemlerin dönüş eksenlerine yerleştirilerek eklemlerin dönüş açılarını ölçerler. Bunların yanında potansiyometreler de aynı amaçla kullanılmaktadır [66].

Benzer hareketlerin ölçümünde kullanılan bir başka sensör tipi ise atalet sensörleridir. İvmeölçer, jiroskop ve manyetometreden oluşan bu sensörlerin avantajı yerleşim serbestliğidir. Wang ve arkadaşları, robot açılarının tahmininde ataletsel sensörleri kullanmışlardır. Sensör verilerini, Kalman filtresiyle birleştirerek robot manipulatörün eklem açılarını 2° lik çözünürlükte elde etmişlerdir [67]. Vikas ve Crane birden fazla atalet sensörü kullanarak eklem açılarını ölçmüşlerdir [68].

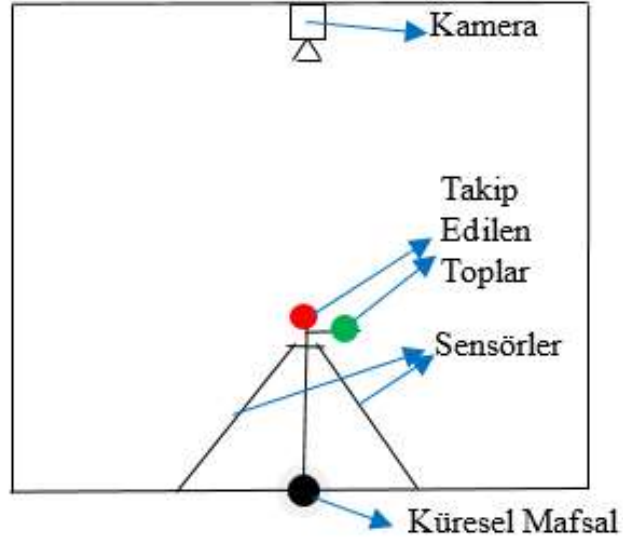
Tek eksenli dönüş hareketlerini algılamak için esnek sensörler de kullanılmaktadır. Bu sensörler eklemlerin hareketiyle eğilirler. Değişen şekilleri sensörlerin dirençlerini değiştirmekte, böylece eğilme açıları hesaplanabilmektedir. Saggio çalışmasında bu sensörleri kullanarak parmak açılarını algılayan eldiven tasarlamıştır. Örneklerinden farklı olarak yerleştirdiği sensörler sayesinde çözünürlüğü yükseltmiş ve standart sapmayı azaltmıştır [69]. Esnek sensörler kolay kullanım ve yerleşimine karşın tek eksenli hareket edebilirler. Bu çalışmada önerilen sensörde böyle bir kısıtlama bulunmamaktadır. Küresel mafsalların oryantasyonunu algılayan sistemlerin incelenmesi için test düzeneği tasarlanmıştır.

Düzeneğin tasarımı

Düzenek genel olarak görüntü alabilmek için kullanılan kamera, pozisyon değişimini algılamak için kullanılan sensörler, küresel mafsala bağlı üzerinde x ve y eksenlerindeki hareketi ve z eksenini etrafındaki rotasyonu görüntü işlemede algılayabilmek için bir çift farklı renklerde top bulunan bir çubuk ve platform olmak üzere 4 bölümden oluşmaktadır(Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Test düzeneği



Şekil 3.9 Test düzeneği şematik çizimi

Platform 370x370mm alüminyum kompozit malzemeden üretilmiştir. Yüksek çözünürlüklü USB kamera platformdan 800mm yükseğe sabitlenmiştir. Kamera etrafında ışık şiddetinin değişkenliğini azaltmak amacıyla RGB LED şeritler yerleştirilmiştir. Pozisyon değişimini algılayabilmek için 6 adet 180mm sensör 60° aralıklarla yerleştirilmiştir. Bu 6 adet sensördeki değişimi analog olarak okumak için

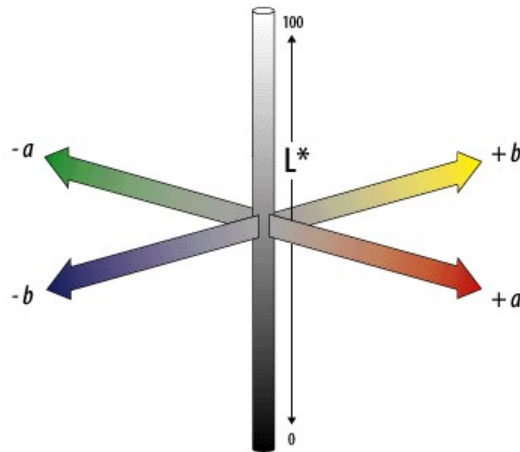
ATMEGA firmasının ürettiği 328P mikroişlemcisi kullanılmıştır. Sensör verileri, seri port üzerinden bilgisayar üzerindeki bilgisayar programına aktarılmaktadır.

Görüntü işleme yöntemi

Deney düzeneğinde topların konumlarının bulunması için topların görüntülerden ayrılması gerekmektedir. Bu nedenle renk tabanlı segmentasyon işlemi yapılmıştır. Segmentasyon işleminin karmaşık olmaması ve olabildiğince doğru olabilmesi için topların renkleri farklı seçilmiştir. Düzenekte kırmızı ve yeşil renkli toplar yerleştirilmiştir. Görüntüler $L^*A^*B^*$ renk uzayında analiz edilmiştir. Bu renk uzayında L, parlaklığı temsil etmektedir. A^* eksenini kırmızıdan yeşile, B^* eksenini ise maviden sarıya artmaktadır (Şekil 3.11). Bu renk uzayının en büyük avantajı cihazdan bağımsız olması ve parlaklıktan minimum etkilenmesidir [70]. Şekil 3.10 orjinal görüntü RGB ve $L^*A^*B^*$ renk uzayını göstermektedir.

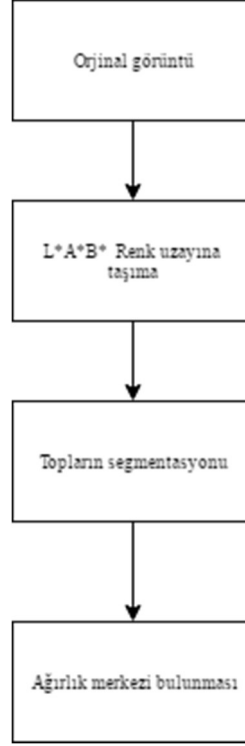


Şekil 3.10 (a) RGB renk uzayı (b) $L^*A^*B^*$ renk uzayı

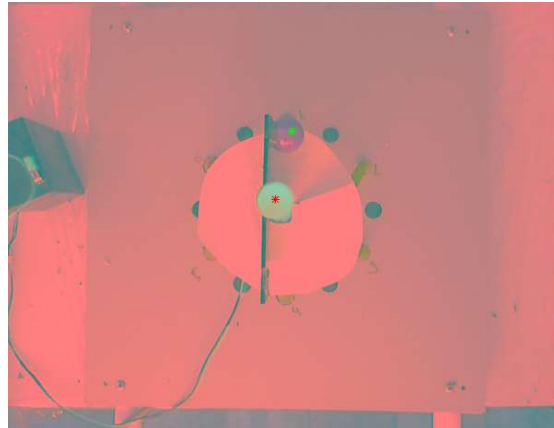


Şekil 3.11 $L^*A^*B^*$ renk uzayı

L*A*B renk uzayına taşınan görüntülerde basit bir eşik değeriyle kırmızı ve yeşil topraklar orijinal görüntüden ayrılır. Segmente edilen toprakların ağırlık merkezlerinin koordinatları bulunarak görüntü işleme algoritması sonlandırılır(Şekil 3.13).



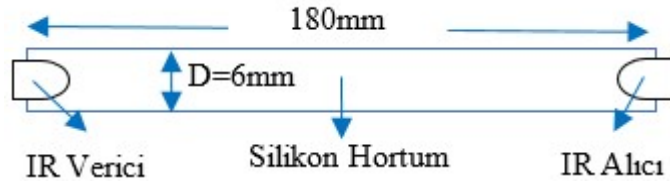
Şekil 3.12 Görüntü işleme akış şeması



Şekil 3.13 Ağırlık merkezlerinin bulunması

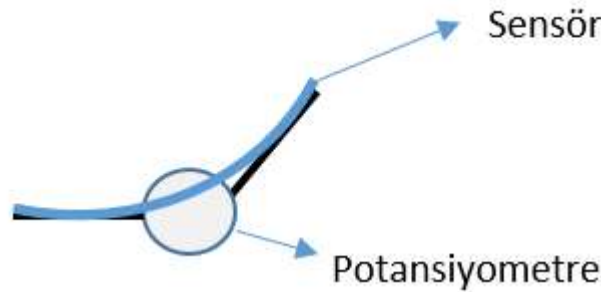
Sensörlerin tasarımı ve yerleşimi

Tasarlanan sensörler kızılötesi alıcı-verici ve 180mm uzunluğundaki mavi parlak silikon hortumdan üretilmiştir(Şekil 3.14). İçinden kızılötesi ışık geçirilen bu hortumun şeklinin değişimi ile ölçülen kızılötesi ışık şiddeti de değişmektedir.



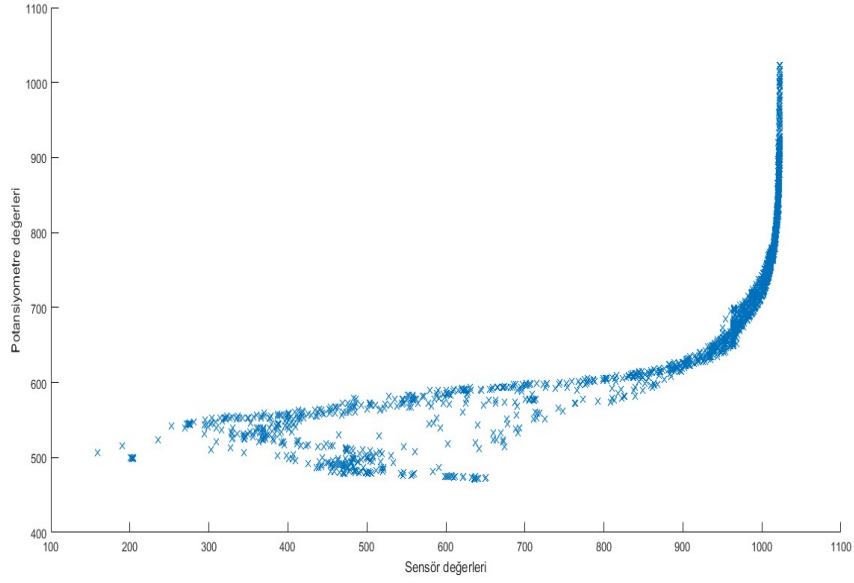
Şekil 3.14 Sensör şematik gösterimi

Tasarlanan sensör düzeneğe yerleştirilmeden önce sensörün tek eksenli hareketi incelenmiştir. Bunun için tek serbestlikli basit bir düzenek tasarlanmıştır. İki uzvun bağlantı noktasına potansiyometre yerleştirilmiş ve uzuvların üzerine de sensör yerleştirilmiştir(Şekil 3.15). Düzenekte potansiyometre değerleri ile sensör değerleri arasındaki bağıntı incelenmiştir.



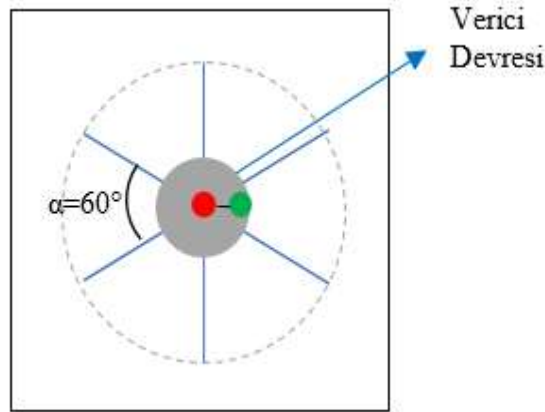
Şekil 3.15 Tek eksenli düzeneğin şematik gösterimi

Tek serbestlik dereceli düzeneğin 90° lik açılı hareketinde 2000 adet veri toplanmıştır. Sensör ve potansiyometre değerleri arasındaki ilişki Şekil 3.16 da gösterilmiştir.



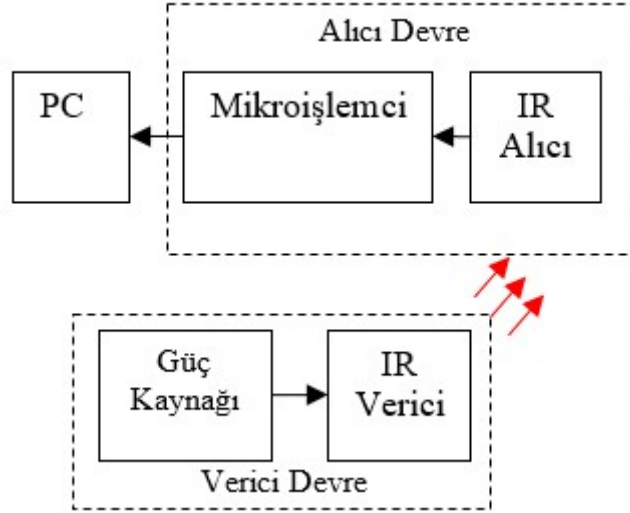
Şekil 3.16 Potansiyometre-Sensör ilişkisi

Sensörler tek eksenle incelendikten sonra deney düzeneğine 60° aralıklarla yerleştirilmiştir(Şekil 3.17).



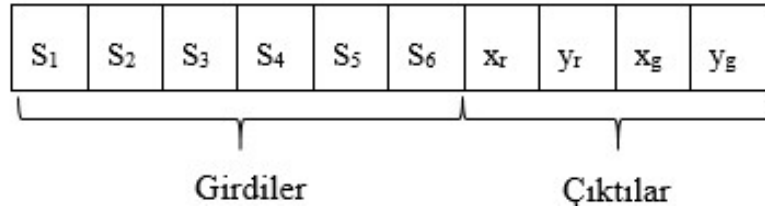
Şekil 3.17 Düzeneğin üstten şematik gösterimi

Düzenek alıcı ve verici devresinden oluşmaktadır. Verici devresinde 6 adet kızılötesi verici bulunmaktadır. Bu devre için 80mm çapında kart tasarlanmıştır. Alıcı devresinde ise 6 adet kızılötesi alıcı bulunmaktadır. Sensörlerin verileri Arduino UNO kartıyla 0-1023 aralığında analog olarak okunarak bilgisayara seri porttan gönderilmektedir.



Şekil 3.18 Sistem blok şeması

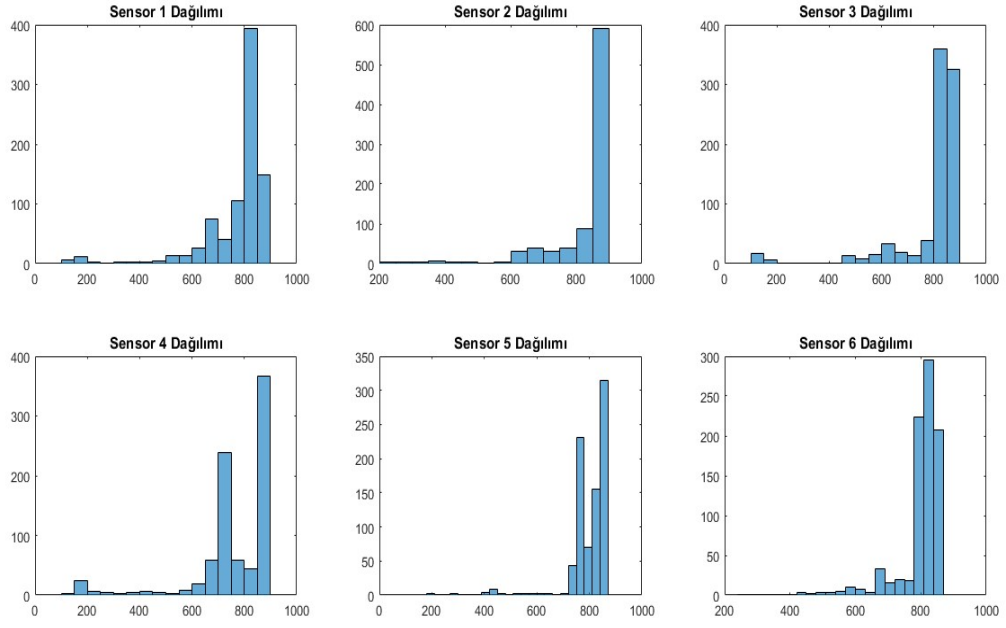
Bilgisayarda ise sensör verileri ile görüntü verileri birleştirilerek veri seti oluşturulmaktadır. Veri setinde her bir örnek, 6 girdi ve 4 çıktıdan oluşmaktadır. Sensör verileri girdileri, düzenekteki topların koordinatları ise çıktıları oluşturmaktadır(Şekil 3.19).



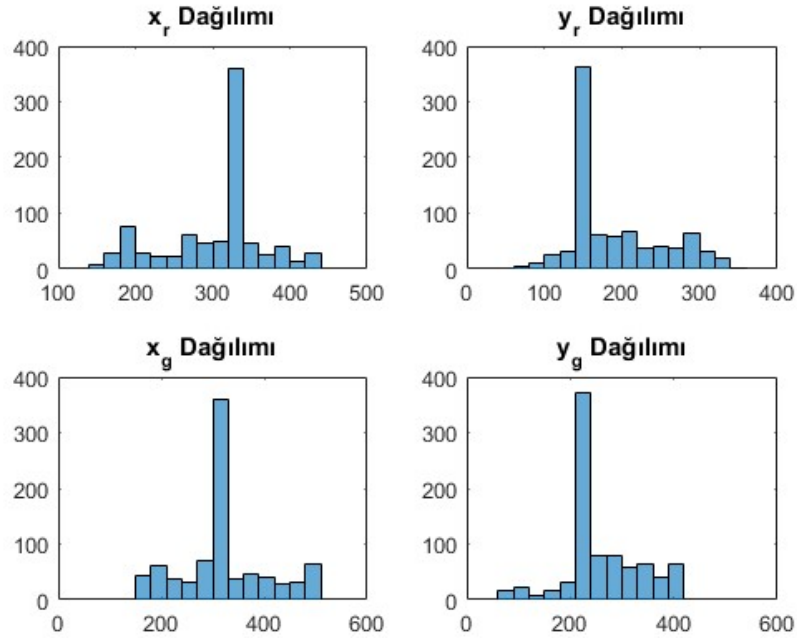
Şekil 3.19 Örnek veri seti

Sonuçlar

Bu çalışmada üretilen deney düzeneği ile istenilen 851 örnekten oluşan veri seti oluşturulmuştur. Veri setinin girdilerinin ve çıktılarının dağılımı Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 de verilmiştir. Bir sonraki çalışmada da oluşturulan bu veri seti analiz edilerek sensör verileri ile topların konumları arasındaki bağıntıyı sağlayan model tasarlanması hedeflenmektedir.



Şekil 3.20 Girdilerin dağılımı



Şekil 3.21 Çıktıların dağılımı

3.2.1.2 Küresel mafsallı oryantasyon ölçümü için yapay sinir ağırları uygulaması

Bir önceki başlıkta anlatılan sensörlerin birden fazla yerleştirilmesiyle, bu sensörlerin eksen açılarıyla ilişkilendirilmesi önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu

probleme regresyon problemi de denilebilir. Bu problemler istatiksel metotların yanısıra yapay zeka yöntemleriyle de incelenebilir. Bu yöntemlerden başlıcaları bulanık mantık ve yapay sinir ağları olarak söylenebilir. Ayrıca evrimsel algoritmalar da bu problemlerde kullanılmıştır.

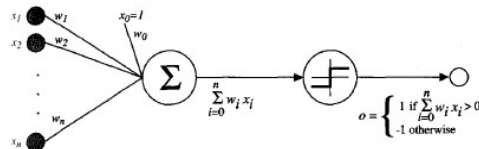
Ghorbanian, kompresörün performans tahmini için farklı yapay sinir ağı modelleri kullanmıştır [71]. Çalışmada regresyon problemi için genel regresyon sinir ağı kullanışlar ve bunu kendi geliştirdikleri döndürülmüş genel regresyon ağı ile karşılaştırmışlardır. Kompresör verimi için çok katmanlı sinir ağı modeline karar vermişlerdir. Tahminler ve yapılan deneyler ile başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Bir başka çalışmada tahmin ve optimizasyon problemlerinde regresyon analizi ve yapay sinir ağları karşılaştırılmıştır [72]. Biyomedikal alanında yapılan bu çalışmada sıcaklık, nem gibi ortam değişkenleri ksiloz tüketimi vee üretimini tahmin etmek için kullanılmıştır. Modeli değerlendirmek için kararlılık katsayısını kullanmışlardır. Kullandıkları yapay sinir ağı modelinin regresyon modeline göre daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

Tezin bu bölümünde tasarlanan düzenden üretilen veri seti ile yapay sinir ağları ile modellenerek sensör verileri ile küresel mafsallı oryantasyonunu temsil eden koordinatlar tahmin edilmiştir.

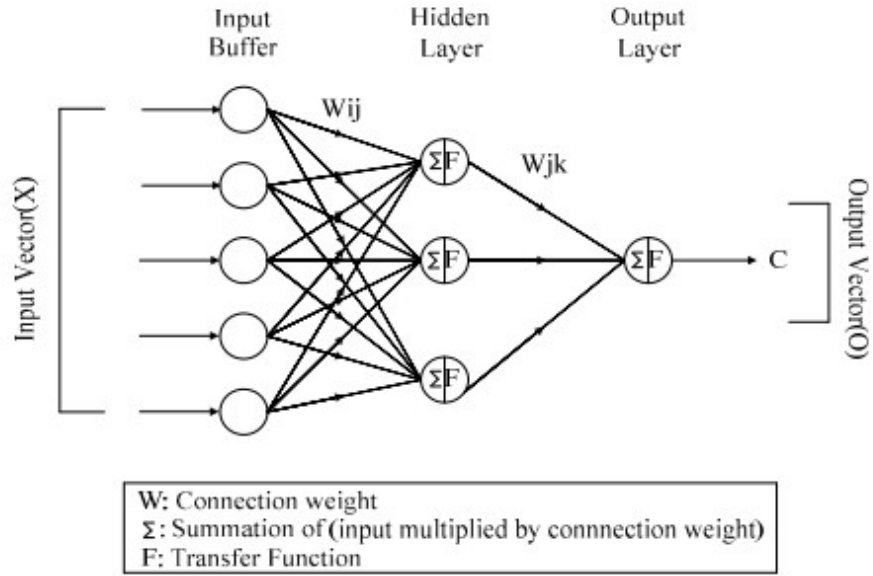
Yapay sinir ağları

Yapay Sinir Ağları(YSA) , insan beyninin yapısını taklit eden bir modelleme algoritmasıdır. YSA, nöron olarak bilinen yapay sinir hücrelerinden oluşmaktadır. En basit YSA yapısı perceptron olarak adlandırılır [73].



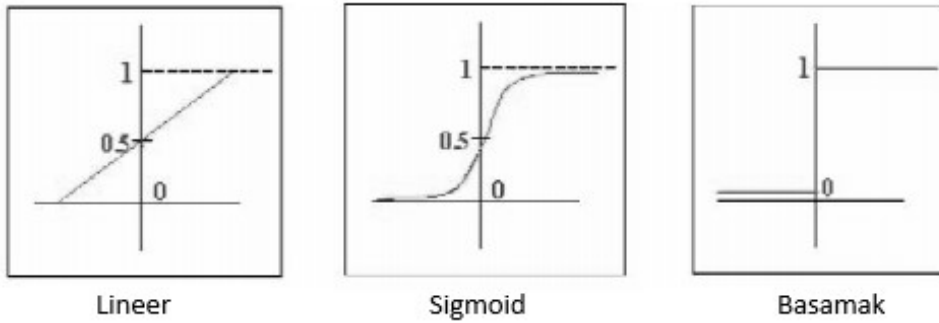
Şekil 3.22 Perceptron yapısı

YSA'lar giriş katmanı, gizli katmanlar ve çıkış katmanı olmak üzere birden fazla katmandan oluşabilirler.



Şekil 3.23 Çok katmanlı sinir ağı modeli

YSA'da öğrenilen bilgi ilgili ağırlıklarda saklanır. Şekil 3.23 'te görüldüğü gibi bütün girdiler sisteme verilir. Model girdileri ağırlıklarla çarparak gizli katmana iletir. Gizli katmanda da aynı işlemler tekrar uygulanarak son katmana iletilir ve aktivasyon fonksiyonuna gönderilirler. Aktivasyon fonksiyonları girdilere bağlı olarak son çıktı değerlerini üretirler. Aktivasyon fonksiyonları lineer, sigmoid ve basamak fonksiyonları olabilirler.



Şekil 3.24 Aktivasyon fonksiyonları

Bu çalışmada aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu seçilmiştir. Bu fonksiyonun matematiksel ifadesi;

$$f(x) = \frac{1}{(1 + e^{-x})} \quad (3.1)$$

olarak gösterilir.

Veri setinin eğitime hazırlanması

YSA modelini eğitmeden önce veri setinin eğitime uygun bir hale getirilmesi gerekmektedir. Öncelikle sensör çıktılarının oluşturduğu girdiler incelenmiştir. Sensör verileri 0-1023 aralığında analog değerlerden oluşmaktadır. Şekil 3.16'da sensörlerin tek eksenli hareketteki çıktıları gösterilmiştir. Sensörlerin değişim hassasiyetlerinin yüksek olması nedeniyle veri setinde girdiler 800-1000 aralığında yoğunlaşmıştır.

Eğitime başlamadan önce girdiler ve çıktılar normalize edilmiştir.

$$x_{norm} = \frac{x_{in} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3.2)$$

Literatürde benzer problem tiplerinde ileri beslemeli sinir ağı modeli kullanılmıştır. Bu neden bu çalışmada da bu model tercih edilmiştir. YSA modeli ve hesaplamaları MATLAB® programının ilgili modülünde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle tek bir gizli katmandan oluşan model üzerinde çalışılmıştır. Gizli katmandaki nöron sayısı, Weigend tarafından sunulan eşitsizlik ile belirlenmiştir.

$$1.1NP \leq 10NH[NI + 1] \leq 3NP \quad (3.3)$$

NP: Eğitilen girdi sayısı
NH: Gizli katmandaki nöron sayısı
NI : Giriş katmanındaki nöron sayısı

Veri seti 851 örnekten oluşmaktadır. Eğitim seti ise bunların %70 inden oluşmaktadır. Girdiler 6 adet parametreden oluşmaktadır. Bu değerlerle, NP=596 ve NI=6 olarak kullanılabilir ve

$$9.4 \leq NH \leq 25.5 \quad (3.4)$$

eşitsizliği yazılabilir.

Eşitsizlik kullanılarak farklı nöron sayılarının performansı ortalama karesel hata(mean square error-MSE) ve kararlılık katsayısı (R^2) göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Formüller aşağıda verilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.5)$$

y_i : i nolu çıktı değeri
 \hat{y}_i : i nolu tahmin değeri
n : örnek sayısı

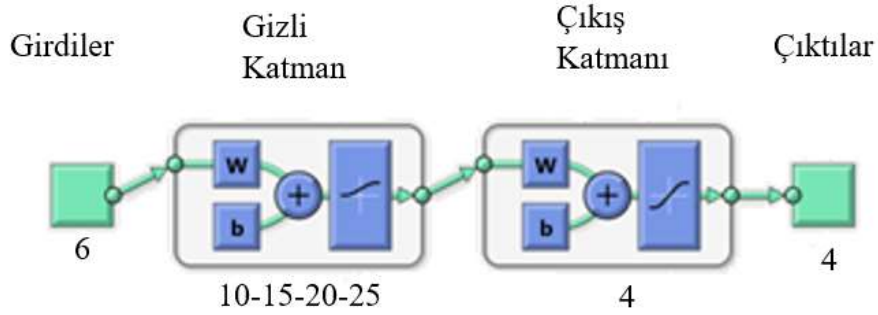
$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right) \quad (3.6)$$

\bar{y} : ortalama tahmin değeri

Sonuçlar

YSA modelinin eğitim aşamasında eğitim fonksiyonu olarak MATLAB programında bulunan trainlm kullanılmıştır. Bu fonksiyon ağırlıkları güncellerken Levenburg-Marquardt algoritmasını kullanmaktadır.

Veri seti eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç kümeye ayrılmıştır. 851 örneğin %70 i eğitim, %15 i doğrulama ve kalan %15 i ise test kümesine bölünmüştür. Eşitsizlik sonucunda nöron sayıları sırasıyla 10-15-20-25 olarak alınmış ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.25 YSA yapısı

Çizelge 3.5'te farklı nöron sayılarına göre YSA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.5 YSA eğitim, doğrulama ve test seti sonuçları

Nöron Sayısı	Eğitim Seti Sonuçları		Doğrulama Seti Sonuçları		Test Seti Sonuçları	
	MSE(e-3)	R2	MSE(e-3)	R2	MSE(e-3)	R2
10	7.126	0.93	7.282	0.93	9.813	0.90
15	5.882	0.95	5.593	0.95	8.504	0.91
20	6.215	0.94	6.611	0.94	7.049	0.93
25	6.534	0.94	7.473	0.92	7.177	0.92

Sonuçlar incelendiğinde Çizelge 3.5 den görüldüğü gibi en uygun olan yapı 20 nöronlu sinir ağıdır. Bu tablodaki hatalar normalize edilmiş çıktılar üzerinden gösterilmiştir. Sistem çıktıları, deney düzeneğinde bulunan yeşil ve kırmızı renkli topların koordinatlarıdır. Koordinatların tahmin hataları normalize edilen değerler geri dönüştürülerek bulunabilir. Denkem 3.2 hatırlanırsa koordinat değerleri;

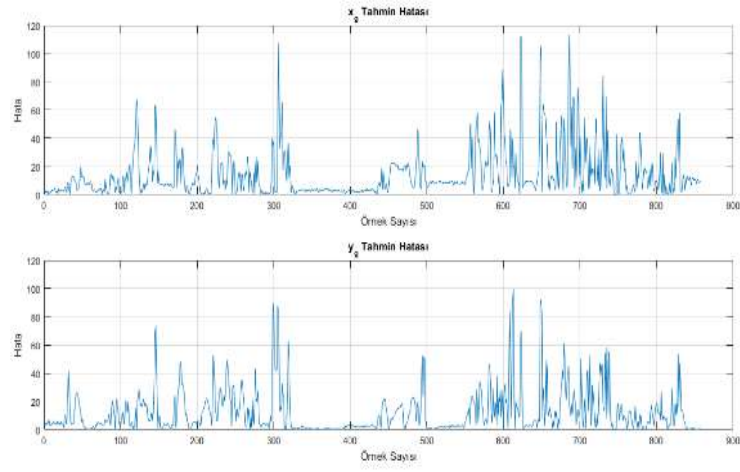
$$x_{in} = (x_{max} - x_{min})x_{norm} + x_{min} \quad (3.7)$$

formülüyle hesaplanır. Sinir ağlarının tahmin ettiği Şekil 3.26 'da 'o' simgesiyle gösterilmiştir. '*' lar ise hedeflenen çıktılardır.

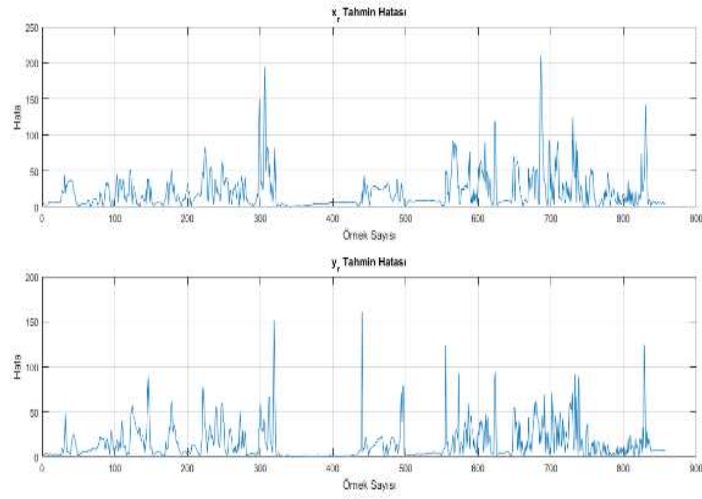


Şekil 3.26 Topların tahmin edilen koordinatları

Yeşil ve kırmızı topun koordinat tahmin hataları Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 verilmiştir.



Şekil 3.27 Yeşil top koordinat tahmin hatası



Şekil 3.28 Kırmızı top koordinat tahmin hatası

Çizelge 3.6 da ortalama hata değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 Koordinat tahmin ortalama hataları

Koordinat	Ortalama Hata(Piksel)	Standart Sapma
x_g	14.378	17.31
y_g	12.189	15.36
x_r	19.909	24.56
y_r	14.590	19.24

Yapılan deneyde gürültülerden dolayı hatalar bazı yerlerde ani yükselişler göstermiştir. Bu gürültüler düzenekteki görüntü işleme hataları, sensörlerin kalibrasyon hataları ve topların hızlı hareketinden meydana gelmiştir. Düzenekteki hızlı hareketler sensörlerle görüntülerin eşleşmesini zorlaştırmıştır. Bu hatalara rağmen deney, sunulan çoklu sensör yapısının çoklu eksen hareketlerinde oryantasyon ölçümlerinde kullanılabilirliğini göstermiştir.

3.2.2 Ataletsel ölçüm birimi ile kol hareketlerinin algılanması

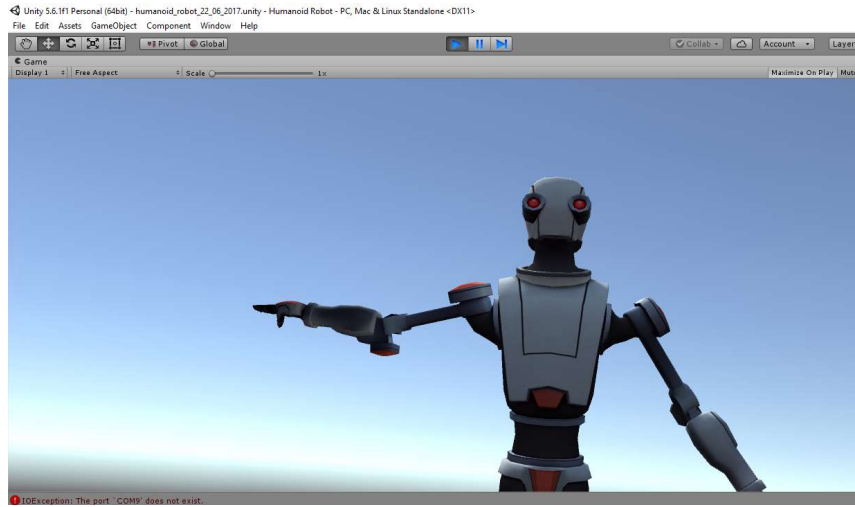
Bu bölümde operatörün kol hareketlerini algılamak için ataletsel ölçüm birimleri(Inertial measurement unit-IMU) üzerinde yoğunlaşmıştır. IMU, ivmeölçer, jiroskop ve manyetometreden oluşan elektronik elemanlardır.

IMU ile oryantasyon bilgisini algılamak için sensör verilerinin birleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlemlere sensor füzyon algoritması da denebilir. Kalman filtresi buna bir örnektir. Jiroskoptan ölçülen oryantasyon bilgisi, ivmeölçer ve manyetometre bilgisiyle güncellenerek güvenilir bir oryantasyon bilgisi elde edilir. Bu çalışmada Bosch firmasının ürettiği BNO055 (Şekil 3.29) sensörü kullanılmıştır. Sensörün tercih edilmesindeki en büyük sebeplerden biri sensör füzyon algoritmasının gömülü olarak sunulmasıdır. Sensör ile ilgili detaylı bilgi EK-6 da sunulmuştur.



Şekil 3.29 BNO055

Operatör hareketlerini algılamak için 3 adet IMU kullanılmıştır. Bunlar operatörün üst kol ,alt kol ve omuzuna yerleştirilmiştir ve algılanan hareketler Unity 3D programında simule edilmiştir.

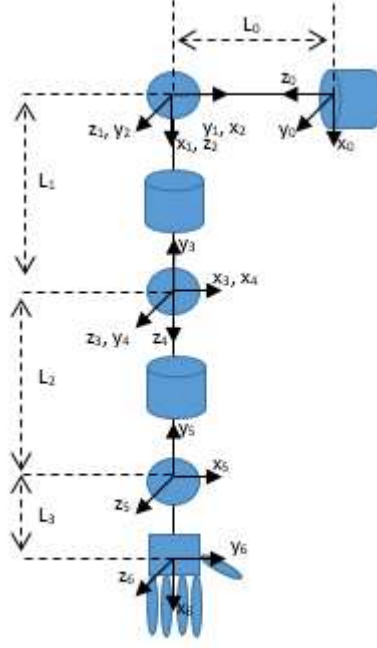


Şekil 3.30 Kol hareketleri Unity3D simülasyonu

3.3 Robot

3.3.1 Robot kol tasarımı

Yapılan araştırmalar kapsamında insan kolunu 7 serbestlik derecesiyle modellenilebilir. Bu serbestlik dereceleri Şekil 3.5'te görüldüğü gibi 3 omuz, 2 dirsek ve 2 bilek olarak dağıtılabildiği gibi bir takım çalışmalarda dirsekteki serbestliklerden biri bilekte gösterilerek 3 omuz, 1 dirsek ve 3 bilek olarak dağıtılmıştır. Uzayda herhangi bir noktaya ulaşmak için 6 serbestlik derecesi yeterlidir. Bu çalışmada 6 serbestlik dereceli bir robot kol tasarlanmıştır. Bunlar 3 omuz, 2 dirsek ve 1 bilek olarak dağıtılmıştır(Şekil 3.31). Eksenler Denavit-Hartenberg kuralına göre atanmıştır.



Şekil 3.31 Robot kolu kinematik modeli

Kinematik modelin yanında diğer tasarım şartlarında da insan kolu temel alınmıştır. Bunlar boyutlar ve hareket kabiliyetidir.



Şekil 3.32 Tasarlanan robot kolun teknik çizimleri

3.3.2 Kinematik analiz

Cisimlerin, üzerine uygulanan kuvvet ya da momentleri düşünmeksizin yapılan hareket analizine kinematik analiz denir. Günümüzde birçok mühendislik alanında robotik manipulatörler kullanılmaktadır. Çeşitli serbestlik derecelerine sahip olan bu sistemlerde robotların kinematik modellerinin çıkarılması büyük önem arz etmektedir. Bu tür kinematik problemlerin çözümüne yönelik bir çok yöntem denenmiş ve geliştirilmiştir. Sunulan yöntemlerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları vardır.

Kinematik analiz genellikle kartezyen veya kuaterniyon uzayında incelenir. Kartezyen uzaydaki en çok kullanılan yöntem Homojen Dönüşüm Yöntemi'dir. Burada dönüşüm operatörü olarak vektörler ve matrislerden faydalanılmıştır. Denavit-Hartenberg, 4x4 homojen dönüşüm matrislerini kullanarak bir koordinat sisteminin konumunu ve oryantasyonunu başka bir koordinat sistemine göre tanımlamıştır [74].

Kim-Kumar kuaterniyon adı verilen doğrusal vektörler ve dönüşüm operatörleri kullanarak robot kinematiğini tanımlamıştır [75]. Dönüşüm gösterimlerinde oldukça başarılı olan bu yöntem, homojen dönüşümler kadar kullanılmamaktadır.

Robot kinematiği, ileri ve ters kinematik olmak üzere ikiye ayrılır. İleri kinematik problemi, eklem uzayından kartezyen ya da kuaterniyon uzayına dönüşüm olarak tanımlanabilir. Basit olarak verilen eklem parametreleri yardımıyla robotun uç noktasının oryantasyon ve pozisyonunun hesaplanmasıdır. Çözümünde herhangi bir karmaşıklık içermez ve her manipulatör için çözümü vardır. Ters kinematik probleminde ise amaç, kartezyen veya kuaterniyon uzayından eklem uzayına geçiş yapmaktır. İleri kinematik problemin tersine bu problem oldukça karmaşıktır. Tekillikler ve doğrusal olmayan denklemler bu problemi oldukça zorlaştırır. İleri ve ters kinematik şematik olarak Şekil 3.33 da gösterilmiştir [76].



Şekil 3.33 İleri-Ters Kinematik Gösterimi

3.3.2.1 İleri kinematik

Tasarlanan robot kolun ileri kinematik çözümü için Homojen Dönüşüm Yöntemi ve Kuaterniyon Modelleme Yöntemi ayrı ayrı kullanılmıştır. Bu çözüm, kuvvet analizinde gerekmektedir.

Homojen dönüşüm yöntemi

Bu dönüşüm için sistemin Denavit-Hartenberg(DH) parametreleri gerekmektedir [74]. Bu parametreler;

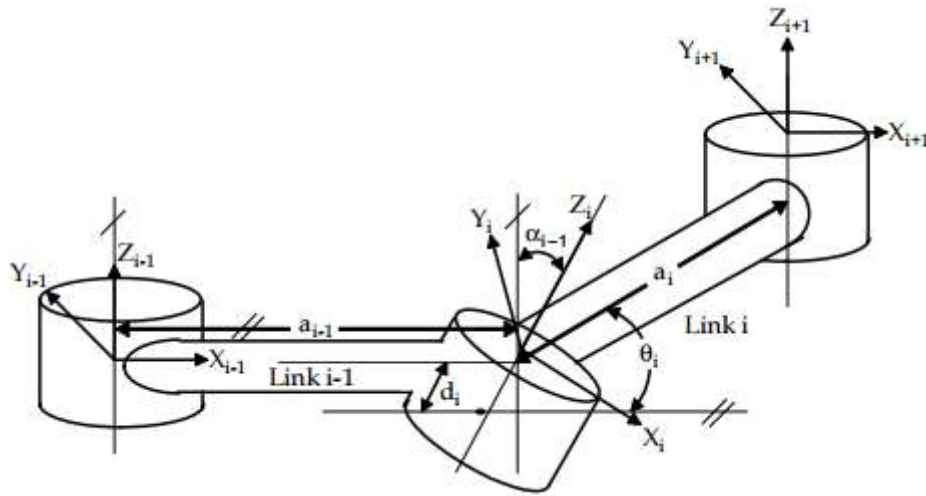
a_i : x_i yönünde z_{i-1} ile x_i kesişiminin i nolu ekleme olan uzaklığı

d_i : z_{i-1} yönünde z_{i-1} ile x_i kesişiminin $i-1$ nolu ekleme olan uzaklığı

θ_i : z_{i-1} yönünde x_{i-1} ile x_i arasındaki açı

α_i : x_i yönünde z_{i-1} ile z_i arasındaki açı

şeklinde tanımlanır [74]. Koordinat eksenleri ve parametreler gösterilmiştir(Şekil 3.34).



Şekil 3.34 D-H parametreleri ve koordinat eksenleri

Bu tanımlamalar doğrultusunda Şekil 3.31'de gösterilen robot kolun D-H parametreleri Çizelge 3.7'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 Robot kolu D-H parametreleri

Eklem No(i)	α_i (derece)	a_i (mm)	d_i (mm)	θ_i (derece)
1	-90	0	L_0	θ_1
2	90	0	0	θ_2+90
3	-90	0	L_1	θ_3
4	90	0	0	θ_4
5	-90	0	L_2	θ_5
6	0	L_3	0	θ_6-90

Bu parametreler kullanılarak 6 eklem için 6 adet dönüşüm matrisi yazılabilir. Denklem 3.8 eklemler için oluşturulan dönüşüm matrisi gösterilmiştir.

$$T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.8 nolu denklem kullanılarak eksenler arasındaki dönüşüm matrisleri yazılabilir.

$$T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} -s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & 0 \\ c\theta_2 & 0 & s\theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & -s\theta_3 & 0 \\ s\theta_3 & 0 & c\theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$T_5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & -s\theta_5 & 0 \\ s\theta_5 & 0 & c\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$T_6 = \begin{bmatrix} s\theta_6 & -c\theta_6 & 0 & L_3 s\theta_6 \\ c\theta_6 & s\theta_6 & 0 & L_3 c\theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$T_6^0 = \prod_{i=1}^6 T_i \quad (3.15)$$

Denklem 3.15 'te gösterildiği gibi ilk eklemden uç noktaya olan dönüşüm matrisi, her bir eklem matrislerinin çarpımıyla elde edilir. Çözüm MATLAB® programı yardımıyla hesaplanmıştır. Dönüşüm matrisini ;

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

şeklinde yazarsak $r_{3 \times 3}$ dönüşüm matrisi, $p_{3 \times 1}$ ise konum vektörüdür.

Kuaterniyon modelleme yöntemi

3 Boyutlu bir ortamda bir cismin oryantasyonu kuaterniyon adı verilen 4 elemanlı vektörler sayesinde gösterilebilir [75]. Kuaterniyon uzayına karmaşık sayıların genişletilmiş versiyonu denilebilir. Kuaterniyonlar skaler ve vektörel olmak üzere iki değerden oluşmaktadırlar. $q = [s, v]$ olarak gösterilebilir. $\langle k_x, k_y, k_z \rangle$ vektörü etrafında θ açılı bir dönüş;

$$q = \left[\cos \frac{\theta}{2}, \sin \frac{\theta}{2} \langle k_x \ k_y \ k_z \rangle \right] \quad (3.17)$$

şeklindeki kuaterniyon ile tanımlanır.

Birim kuaterniyon, rijit bir cismin oryantasyonunu tanımlamakta çok uygun olmasına karşın konumu hakkında bilgi veremez. Konum ve oryantasyonu aynı anda göstermek için ikili kuaterniyonlar kullanılır. Döner eklem için ikili kuaterniyon kullanılarak tanımlanan dönüşüm vektörü gösterilmiştir. $p_{1 \times 3}$ pozisyon vektörü olarak adlandırılır.

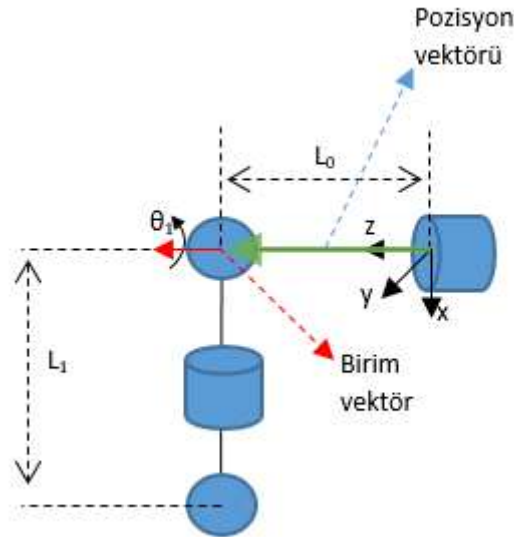
$$Q(q, p) = \left(\left[\cos \frac{\theta}{2}, \sin \frac{\theta}{2} \langle k_x \ k_y \ k_z \rangle \right], \langle p_x \ p_y \ p_z \rangle \right) \quad (3.18)$$

İleri kinematik analizinde eksenler arasındaki dönüşüm kuaterniyonların sırasıyla çarpımıyla hesaplanır. Kuaterniyon uzayında çarpım işlemi(*);

$$q_1 * q_2 = [s_1, v_1] * [s_2, v_2] = [s_1 s_2 - v_1 \cdot v_2, s_1 v_2 + s_2 v_1 + v_1 \times v_2] \quad (3.19)$$

denklemlerle ifade edilir. Skaler çarpım “.”, vektörel çarpım ise “x” ile gösterilmiştir.

Şekil 3.31 de gösterilen robot kolun eklemleri için ikili kuaterniyon kullanarak dönüşüm vektörlerini yazalım. ($\bar{\theta} = \frac{\theta}{2}$)



Şekil 3.35 1 nolu eklem birim vektör ve pozisyon vektörü

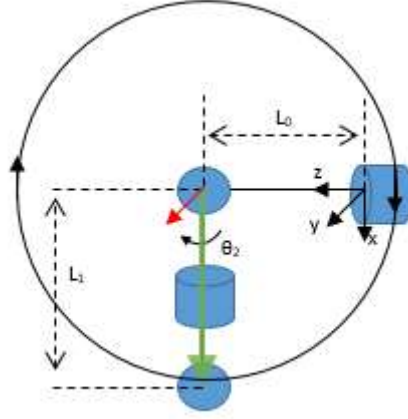
Şekil 3.35 da görüldüğü gibi 1 nolu eklemin dönüş eksenini referans eksenine göre z eksenine yönündedir. Bu nedenle birim vektör $\langle 0 \ 0 \ 1 \rangle$ olarak yazılır. Pozisyon vektörü de referans eksenine göre yazılmaktadır.

$$q_1 = [\cos \bar{\theta}_1, \sin \bar{\theta}_1 \langle 0 \ 0 \ 1 \rangle] \quad (3.20)$$

Şekil 3.35, 1 nolu eklemin referansa göre pozisyon vektörü gözükmemektedir. θ_1 'deki değişimin etkilemediği bu vektör;

$$p_1 = \langle 0 \ 0 \ L_0 \rangle \quad (3.21)$$

vektörüyle ifade edilir.



Şekil 3.36 2 nolu eklem birim vektör ve pozisyon vektörü

Şekil 3.36, 2 nolu eklem birim vektörünü ve pozisyon vektörünü göstermektedir. Görüldüğü gibi birim vektör y -eksenindedir. Bu eklem için pozisyon vektörü ise çizilen çemberin içindeki herhangi bir noktayı kapsamalıdır. Benzer şekilde diğer eklemler için ikili kuaterniyonlar yazılabilir.

$$q_2 = [\cos \bar{\theta}_2, \sin \bar{\theta}_2 < 0 \ 1 \ 0 >] \quad (3.22)$$

$$p_2 = < L_1 \cos \theta_2 \ 0 \ L_2 \sin \theta_2 > \quad (3.23)$$

$$q_3 = [\cos \bar{\theta}_3, \sin \bar{\theta}_3 < 1 \ 0 \ 0 >] \quad (3.24)$$

$$p_3 = < 0 \ 0 \ 0 > \quad (3.25)$$

$$q_4 = [\cos \bar{\theta}_4, \sin \bar{\theta}_4 < 0 \ 1 \ 0 >] \quad (3.26)$$

$$p_4 = < L_2 \cos \theta_4 \ 0 \ -L_2 \sin \theta_4 > \quad (3.27)$$

$$q_5 = [\cos \bar{\theta}_5, \sin \bar{\theta}_5 < 1 \ 0 \ 0 >] \quad (3.28)$$

$$p_5 = < 0 \ 0 \ 0 > \quad (3.29)$$

$$q_6 = [\cos \bar{\theta}_6, \sin \bar{\theta}_6 < 0 \ 1 \ 0 >] \quad (3.30)$$

$$p_6 = < L_3 \cos \theta_6 \ 0 \ -L_3 \sin \theta_6 > \quad (3.31)$$

İleri kinematik çözümü, oluşturulan ikili kuaterniyonların sırasıyla çarpımıyla elde edilir. İkili kuaterniyonların çarpımı;

$$Q_1 \otimes Q_2 = (q_1, p_1) * (q_2, p_2) = (q_1 * q_2, q_1 * p_2 * q_1^{-1} + p_1) \quad (3.32)$$

$$q_1 * p_2 * q_1^{-1} = p_2 + 2s_1(v_1 \times p_2) + 2v_1 \times (v_1 \times p_2) \quad (3.33)$$

denklemleriyle hesaplanabilir. Birim kuaterniyonun tersi, sadece vektör kısmının çarpıma göre tersiyle bulunur.

$$q^{-1} = [s, v]^{-1} = [s, -v] \quad (3.34)$$

Bu denklemden faydalanılarak ikili kuaterniyonun tersi de hesaplanabilir.

$$q^{-1} = (q^{-1}, -q^{-1} * p * q) \quad (3.35)$$

$$-q^{-1} * p * q = -p + [-2s(v \times (-p)) + 2v \times (v \times p)] \quad (3.36)$$

3.3.2.2 Ters kinematik

Ters kinematik problemleri, ileri kinematik problemlerine göre daha karmaşık olabilirler. Buradaki amaç, robotik sistemin uç noktasının oryantasyon ve pozisyon bilgisini kullanarak robot eklem değişkenlerinin değerlerini bulabilmektir. Uç noktanın tek bir konumunda birden fazla çözümlerin olabileceği durumlar söz konusudur. Bu nedenle sistemin özelliğine göre gerek indirgemeler ve varsayımlar yapmak gerekebilir. Bu çalışmada homojen dönüşüm yöntemi ve kuaterniyon modelleme yöntemi anlatılmıştır.

Homojen dönüşüm yöntemi

İleri kinematik probleminde son konumun oryantasyon ve konum bilgisi dönüşüm matrislerinin çarpımı olarak verilmişti.

$$T_0^6 = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

1 nolu eklem değişkenini bulmak için denklemin her iki tarafı T_1^{-1} ile soldan çarpılırsa;

$$T_1^{-1} T_0^6 = T_1^{-1} T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \quad (3.38)$$

$$T_1^{-1} T_0^6 = T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \quad (3.39)$$

denklemleri yazılabilir. Bu adımlar her bir eklem için tekrarlanabilir ve sistem değişkenleri bulunur. Buna kinematik ayırım da denebilir.

Tasarlanan robot kolda kinematik ayırım metodu uygulanamamaktadır. Bunun sebebi son üç eklemlerinin koordinatlarındaki z-eksenlerinin çakışmamasıdır. Bu nedenle problem geometrik yaklaşımla çözülebilir.

Kuaterniyon modelleme yöntemi

Kuaterniyon modelleme yönteminde, ters kinematik problemi çözümü için bazı tanımlamalara ihtiyaç vardır. M ve N, 3.41 ve 3.42 nolu denklemlerde gösterildiği gibi ikili kuaterniyonlar olsun. Herbir ekleme ait ikili kuaterniyon(Q_i) leri kinematik bölümünde gösterilmiştir.

$$Q_i = (q_i, p_i) \quad (3.40)$$

$$M_i = Q_i M_{i+1} \quad (3.41)$$

$$N_{i+1} = Q_i^{-1} N_i \quad (3.42)$$

n serbestlikli bir sistem düşünülürken $1 \leq i \leq n - 1$ ve $M_n = Q_n$ değerlerini almaktadır. Sistemdeki uç noktanın bilinen oryantasyon(q_e) ve pozisyon (p_e) bilgileri ise $N_1 = (q_e, p_e)$ ikili kuaterniyonunu oluşturmaktadır. Burada $q_e = [w, \langle a, b, c \rangle]$ ve $p_e = \langle p_x \ p_y \ p_z \rangle$ olarak söylenebilir. İkili kuaterniyonların tersi ise;

$$Q^{-1} = (q^{-1}, -q^{-1} * p * q) \quad (3.43)$$

$$-q^{-1} * p * q = -p + [-2s(v \times -p) + 2v \times (v \times -p)] \quad (3.44)$$

denklemleriyle hesaplanır. Denklem 3.43 ve 3.44 te görüldüğü gibi M ve N ikili kuaterniyonları birbirine eşittir. Bu eşitlikler yardımıyla ters kinematik problemi çözülebilir.

Geometrik yaklaşım

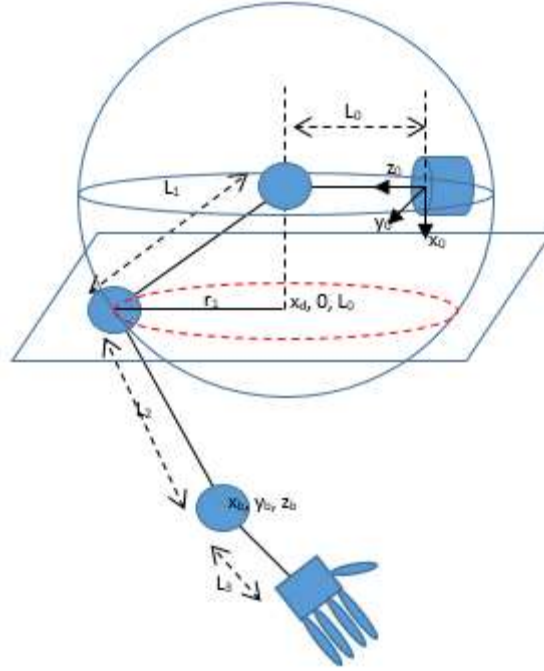
Tasarlanan robot kolda kinematik ayırım yapılamamaktadır. Bu nedenle, geometrik yaklaşım ile ters kinematik problemi çözülmüştür [77]. Homojen dönüşüm matrisi;

$$T_0^6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

olarak yazılabilir. Burada $n_{3 \times 1}$ normal vektörü, $o_{3 \times 1}$ oryantasyon vektörü ve $a_{3 \times 1}$ yaklaşım vektörü olarak adlandırılır. Bileğin referans eksenine göre konumu (p_b) uç noktanın verilen dönüşüm matrisinden bulunabilir.

$$p_b = p - L_3 n \quad (3.46)$$

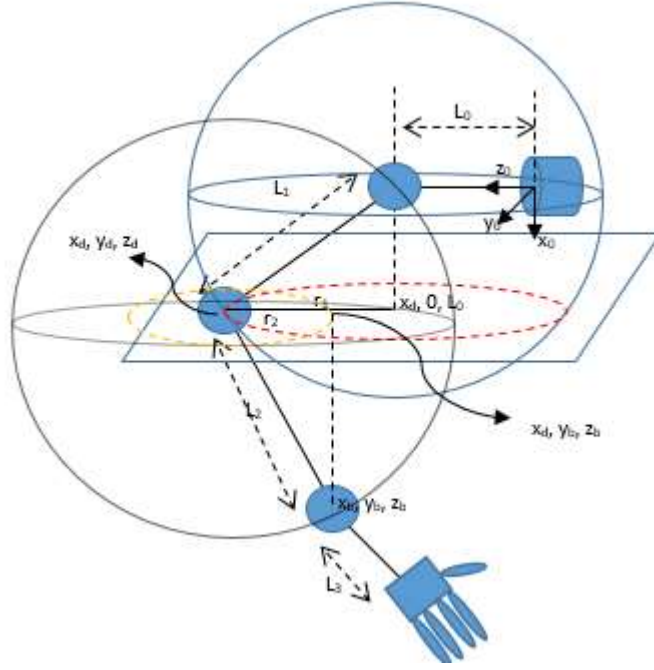
Üst kolun hareket edebileceği konumlar L_2 yarıçaplı küre ile gösterilebilir (Şekil 3.37). Dirsek konumunu x-ekseninde sabit tutarsak, üst kol r_1 yarıçaplı bir çember çizecektir.



Şekil 3.37 Üst kol hareket alanı

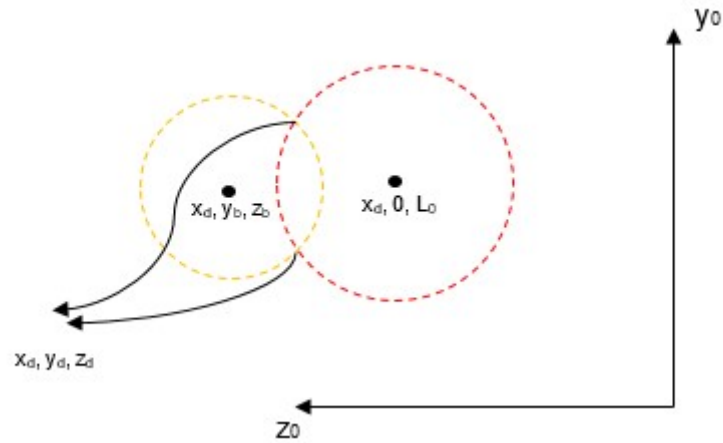
$$r_1 = \sqrt{L_2^2 - x_d^2} \quad (3.47)$$

Ön kolun da hareket alanı çizilirse aynı düzlem üzerinde r_2 yarıçaplı çember üzerinde olacağı görülmektedir.



Şekil 3.38 Ön kol hareket alanı

$$r_2 = \sqrt{L_2^2 - (x_b - x_d)^2} \quad (3.48)$$



Şekil 3.39 Dirsek konumları

Şekil 3.38 deki çemberler kesiştirildiğinde dirseğin konumunun x-ekseni sabitken alabileceği değerler bulunabilir(Şekil 3.39). Çemberlerin referans eksenine göre denklemleri yazılır ve eşitlenirse dirsek konumunun y ve z-eksenindeki değerleri bulunabilir.

$$r_1^2 = y_d^2 + (z_d - L_0)^2 \quad (3.49)$$

$$r_2^2 = (z_b - z_d)^2 + (y_b - y_d)^2 \quad (3.50)$$

Denklem 3.49 ve denklem 3.50 eşitlenerek $-L_1 \leq x_d \leq L_1$ aralığında z_d ve y_d bulunur. Uç noktanın oryantasyon bilgisini kullanarak ise dirsek konumu tek çözüme düşürülebilir. Dirseğin oryantasyonu 4. eksene kadar olan dönüşüm matrislerinin çarpımıyla yazılır.

$$T_4^0 = \prod_{i=1}^4 T_i = \begin{bmatrix} n_{d_{3x1}} & o_{d_{3x1}} & a_{d_{3x1}} & p_{d_{3x1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Bu ekseninde yaklaşım vektörü dirsekten bileğe doğru olan vektördür. Dirsek ve bileğin pozisyon vektörleri kullanılarak yaklaşım vektörü yazılabilir.

$$a_d = \frac{(p_b - p_d)}{\|p_b - p_d\|} \quad (3.52)$$

Aynı şekilde omuzdan dirseğe olan vektörü de yazabiliriz. Omuzun konum vektörü (p_o), $\langle 0 \ 0 \ L_0 \rangle$ olarak alınabilir.

$$a_o = \frac{(p_o - p_d)}{\|p_o - p_d\|} \quad (3.53)$$

Bu bilgiler doğrultusunda 4. eksenin dönüşüm matrisinde bulunan normal ve oryantasyon vektörleri yazılabilir.

$$o_d = a_o \times a_d \quad (3.54)$$

$$n_d = o_d \times a_d \quad (3.55)$$

Aynı adımlar 3 ve 5 nolu eklemler için de yapılmıştır.

$$T_3^0 = \prod_{i=1}^3 T_i = \begin{bmatrix} n_{3_{3x1}} & o_{3_{3x1}} & a_{3_{3x1}} & p_{3_{3x1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

$$o_3 = \frac{(p_d - p_b)}{\|p_d - p_b\|} \quad (3.57)$$

$$a_3 = a_o \times o_3 \quad (3.58)$$

$$n_3 = o_3 \times a_3 \quad (3.59)$$

$$T_5^0 = \prod_{i=1}^5 T_i = \begin{bmatrix} n_{b_{3x1}} & o_{b_{3x1}} & a_{b_{3x1}} & p_{b_{3x1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

$$o_5 = \frac{(p_b - p)}{\|(p_b - p)\|} \quad (3.61)$$

$$a_b = o_b \times \frac{(p_d - p_b)}{\|p_d - p_b\|} \quad (3.62)$$

$$n_b = o_b \times a_b \quad (3.63)$$

Denklem 3.45 te uç noktaya ait dönüşüm matrisi verilmiştir. Dirsek konumu (p_d) ye göre dirseğin oryantasyon matrisi(o_d) ve bileğin yaklaşım matrisi (a_b) bulunmuştur. Bunlar son konumun yaklaşım vektörüyle (a) eşitlenerek çözüm yapılır.

$$o_d = a \quad (3.64)$$

$$a_b = a \quad (3.65)$$

3, 4 ve 5 nolu eklemlere ait dönüşüm matrisleri bulunduktan sonra eklem açıları bulunabilir.

$$\theta_1 = atan2(y_d, x_d) \quad (3.66)$$

$$\theta_2 = atan2\left(\sqrt{x_d^2 + y_d^2}, z_d - L_0\right) - \frac{\pi}{2} \quad (3.67)$$

$$Q = T_1^{-1}T_0^3 = T_1^{-1}T_1T_2T_3 = T_2T_3 \quad (3.68)$$

$$\theta_3 = atan2(Q(1,3), Q(3,3)) \quad (3.69)$$

$$R = T_1^{-1}T_0^4 = T_1^{-1}T_1T_2T_3T_4 = T_2T_3T_4 \quad (3.70)$$

$$\theta_4 = atan2(R(3,3), R(1,3)) \quad (3.71)$$

$$S = T_4^{-1}T_3^{-1}T_2^{-1}T_1^{-1}T_0^5 = T_5 \quad (3.72)$$

$$\theta_5 = atan2(S(1,2), S(1,1)) \quad (3.73)$$

$$M = T_5^{-1}T_4^{-1}T_3^{-1}T_2^{-1}T_1^{-1}T_0^6 = T_6 \quad (3.74)$$

$$\theta_6 = atan2(M(1,1), M(1,2)) \quad (3.75)$$

3.3.3 Kuvvet analizi

3.3.3.1 Statik kuvvet analizi

Robot kolun hareketsiz konumunda uç noktasına etki eden kuvvetin, eklemlerde oluşturduğu torku hesaplamak için statik kuvvet analizi gerekmektedir. n serbestlik dereceli seri bağlantılardan oluşan bir robot kolun, $F \in R^{6 \times 1}$ uç nokta kuvvet ve momentine karşı eklemlerinde oluşan torklar($\tau \in R^{n \times 1}$) denklem 3.76 ile gösterilir [78].

$$\tau = J^T F \quad (3.76)$$

J : 6 x n Jakobiyen matrisi

$$F = (F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z)^T \quad (3.77)$$

Bu denklemlerde yer çekimi ve sürtünmeler hesaba katılmamıştır. Denklem 3.16 daki dönüşüm matrisini, rotasyon(R) ve pozisyon(O) matrisi olarak;

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} R_i^{i+1} & O_i^{i+1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

şeklinde yazabiliriz. Döner eklemlerden oluşan n serbestlik dereceli sistemin Jakobiyen matrisi de;

$$J = [J_1 \ J_2 \ \dots \ J_n] \quad (3.79)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} J_{vi} \\ J_{wi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{i-1} * (O_n - O_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

Jakobiyen matrisindeki J_{vi} i nolu eklemin ötelenmesini, J_{wi} ise dönmesini ifade eden 3x1 boyutunda ki vektörlerdir.

$$z_j = R_j^0 k \quad (3.81)$$

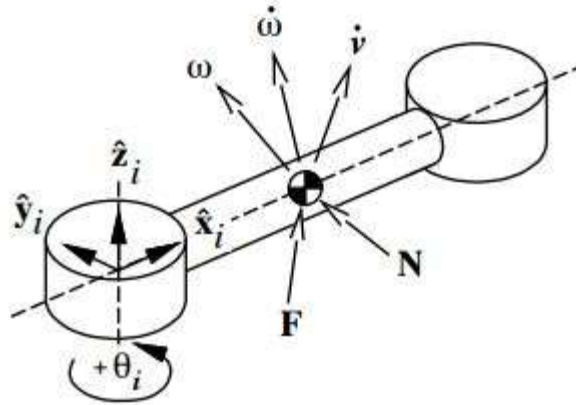
denklemleri kullanılarak bulunur [79]. k , $(0 \ 0 \ 1)^T$ değerli birim vektördür. Hesaplamalar MATLAB® programı kullanılarak yapılmıştır.

3.3.3.2 Dinamik kuvvet analizi

Robotik sistemlerde dinamik, eyleyicilerin uyguladığı torklar ile robotun uzuvlarının konum, hız ve ivmesi arasındaki ilişki olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle robotun hareket halinde iken eklemlerdeki torkların hesaplanması için dinamik kuvvet analizi gerekmektedir. Bu analiz için sistemin öncelikle hareket denklemleriyle matematiksel modellenmesi önem arz etmektedir. Robotik sistemlerin hareket denklemlerinin bulunmasında iki yöntem öne çıkmaktadır. Bunlar Newton-Euler ve Euler-Lagrange yöntemleridir.

Newton-Euler modelleme

Newton-Euler yönteminde hareket denklemleri her bir uzuv için ayrı ayrı çözülmektedir. Rijit bir cismin hareketi, cismin ağırlık merkezinin ötelenmesi ve cismin bu nokta etrafındaki dönmesiyle tanımlanabilir.



Şekil 3.40 i nolu uzuv serbest cisim diyagramı

Cismin öteleme hareketi Newton denklemiyle tanımlanabilir.

$$F = \frac{d}{dt} [R_i(m_i v_i)] = R_i [m_i \dot{v}_i + (\omega_i * m_i v_i)] \quad (3.82)$$

Dönme hareketini tanımlamak içinse Euler denklemi kullanılmaktadır.

$$N = \frac{d}{dt} [R_i(I_i \omega_i)] = R_i [I_i \dot{\omega}_i + (\omega_i * I_i \omega_i)] \quad (3.83)$$

Bu denlemlerde F ve N , i nolu uzuvu etkleyen net kuvvet ve tork vektörleridir. Atalet merkezine göre yazılır. R_i , i nolu koordinat ekseninden atalet merkezine olan dönüşüm matrisidir. ω_i ise i nolu uzuvun toplam açısal hızıdır. Bu yöntemde bütün sistem denklemini elde etmek için uzuvlar peşpeşe çözülür.

Euler-Lagrange modelleme

N-E metodunda eklem torkları ve eklem açıları arasındaki ilişkiyi veren denklem için fazladan aritmetik işlemlere ihtiyaç vardır. Euler-Lagrange metodunda ise hareket denklemleri iş-enerji kullanılarak çıkarılmıştır. Bu nedenle sistemdeki gereksiz kuvvetler otomatik olarak elenmektedir [78].

Bu yöntemde öncelikle Lagrangian adı verilen Lagrange fonksiyonu tanımlanmaktadır. Sistemdeki toplam kinetik enerjiyle toplam potansiyel enerjinin farkından oluşur. Robotun kinetik enerjisi her bir uzuvu ait kinetik enerjinin toplamıdır. Robotun i nolu uzvundaki toplam kinetik enerji gösterilmiştir.

$$k_i = \frac{1}{2} (v_i^T m_i v_i + \omega_i^T I_i \omega_i) \quad (3.84)$$

Denklem iki ayrı tanımın toplamından oluşmuştur. Bunlardan birincisi lineer hareket, ikincisi ise dönme hareketi sonucu oluşa kinetik enerjidir. m_i , i nolu uzvun kütleliğini, I_i , kütle merkezinin atalet tensörünü gösterir.

$$v_i = J_{vi} * \dot{q} \quad (3.85)$$

$$w_i = J_{wi} * \dot{q} \quad (3.86)$$

$$I_i = R_i * I_{ci} * R_i^T \quad (3.87)$$

Denklemlerdeki J_{vi} ve J_{wi} , Jakobiyan matrisinden gelmektedir. q , dönel eklemler için açıyı, prizmatik eklemler içinse yer değiştirmeyi göstermektedir. R_i , ilk eklem ile i nolu eklem arasındaki dönüşüm matrisidir. I_{ci} ise i nolu uzvun dönme eksenindeki eylemsizlik momentidir. n serbestlikli bir sistemin toplam kinetik enerjisi aşağıda gösterilmiştir.

$$K = \sum_{i=1}^n k_i \quad (3.88)$$

Robota ait potansiyel enerji de benzer şekilde yazılabilir.

$$u_i = m_i g^T h_i \quad (3.89)$$

$$U = \sum_{i=1}^n u_i \quad (3.90)$$

Bu denklemlerde g , yer çekimi ivmesini, h_i , i nolu uzuvun ağırlık merkezinin konumunu göstermektedir. Kinetik ve potansiyel enerjinin farkından Lagrangian(L) yazılabilir.

$$L = K - U \quad (3.91)$$

Lagrangian yazıldıktan sonra hareket denklemleri bu fonksiyonun hıza ve konuma göre türevleriyle yazılır. Bu denklemde q , dönel eklemler için açığı, prizmatik eklemler içinse yer değiştirmeyi göstermektedir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (3.92)$$

Bu çalışmada robot kolun modeli Euler-Lagrange yöntemi kullanılarak çıkarılmıştır. 3.84 ve 3.88 nolu denklemler kullanılarak robot kolun toplam kinetik enerjisi yazılabilir.

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T \left[\sum_{i=1}^6 (m_i * J_{vi}^T(q) * J_{vi}(q)) + J_{wi}^T(q) * R_i(q) * I_{ci} * R_i^T(q) * J_{wi}(q) \right] * \dot{q} \quad (3.93)$$

$$M(q) = \left[\sum_{i=1}^6 (m_i * J_{vi}^T(q) * J_{vi}(q)) + J_{wi}^T(q) * R_i(q) * I_{ci} * R_i^T(q) * J_{wi}(q) \right] \quad (3.94)$$

$M(q)$ atalet tensörü olarak bilinir. Sistemdeki elemanların kütleli özellikleriyle ilgilidir.

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \quad (3.95)$$

Toplam potansiyel enerji için 3.89 ve 3.90 nolu denklemler kullanılmıştır.

$$U = \sum_{i=1}^n m_i g^T h_i \quad (3.96)$$

Sistemin Lagrange fonksiyonu yazılabilir.

$$L = K - U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \left(\sum_{j=1}^6 (M_{i,j}(q) * \dot{q}_i * \dot{q}_j) \right) - U(q) \quad (3.97)$$

Denklem 3.96 ve denklem 3.97 kullanılarak matris vektör formunda yazılabilir.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (3.98)$$

Bu denklemde M, atalet matrisi, V, Coriolis ve merkezci kuvvet vektörü ve G ise yerçekimi vektörüdür. Bu denklemdeki yerçekimi vektörü toplam potansiyel enerjinin konuma göre kısmi türevinden bulunur.

$$G(q) = \frac{\partial U}{\partial q} \quad (3.99)$$

Coriolis ve merkezci kuvvet etkisini temsil eden $V(q, \dot{q})$ vektörü, Christoffel sembolleri(Γ_{ijk}) kullanılarak oluşturulan Coriolis matrisi(C) yardımıyla bulunur. 6 serbestlikli robot kolumuz için 6x6 boyutunda Coriolis matrisi oluşturulur.

$$V(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) * \dot{q} \quad (3.100)$$

$$C_{ij}(q, \dot{q}) = \sum_{k=1}^6 \Gamma_{ijk} \dot{q}_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial M_{ij}}{\partial q_j} - \frac{\partial M_{kj}}{\partial q_i} \right) \dot{q}_k \quad (3.101)$$

Bunların yanında gerçek hayatta robotik sistemler sürtünme kuvvetine ve çeşitli gürültülere de mağruz kalmaktadır. Sürtünmenin(F) ve gürültünün(τ_D) de eklendiği son model 3.102 nolu denklemde verilmiştir [80].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_D = \tau \quad (3.102)$$

Sürtünme Kuvveti:

Robotik sistemlerde sürtünme iki terimden oluşmaktadır. Bunlar viskoz ve dinamik sürtünmedir. Sürtünme modeli denklem 3.103 te verilmiştir.

$$F(\dot{q}) = F_v \dot{q} + F_d(\dot{q}) \quad (3.103)$$

Viskoz sürtünme hıza bağlı olarak değişmektedir. Dinamik sürtünme ise hızın yönüne bağlıdır.

$$F_d(\dot{q}) = f_d \operatorname{sgn}(\dot{q}) \quad , \quad \operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ \text{belirsiz}/0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (3.104)$$

3.4 Hesaplanmış Tork Kontrolü

Hesaplanmış tork kontrolü robot manipulatörler için önerilen kontrol yöntemlerinden bir tanesidir. Doğrusal olmayan sistemlerin geri besleme linearizasyonunun özel bir uygulamasıdır.

Denklem 3.102 de gösterilen robot kolun dinamik modelini aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + \tau_D = \tau \quad (3.105)$$

Bu denklemde τ_D , bozuntuyu, τ ise kontrol torkunu göstermektedir. Sistemde takip edilecek hatayı giriş ve çıkış konumlarından yazabiliriz.

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (3.106)$$

Hatanın türevlerinden aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$\dot{e}(t) = \dot{q}_d(t) - \dot{q}(t) \quad (3.107)$$

$$\ddot{e}(t) = \ddot{q}_d(t) - \ddot{q}(t) \quad (3.108)$$

3.105 ve 3.108 nolu denklemler kullanılarak hata ve kontrol torku arasındaki ilişki bulunabilir.

$$\ddot{e}(t) = \ddot{q}_d + M^{-1}(N + \tau_d - \tau) \quad (3.109)$$

Kontrol ve bozuntu fonksiyonları;

$$u(t) = \ddot{q}_d + M^{-1}(N - \tau) \quad (3.110)$$

$$w(t) = M^{-1}\tau_d \quad (3.111)$$

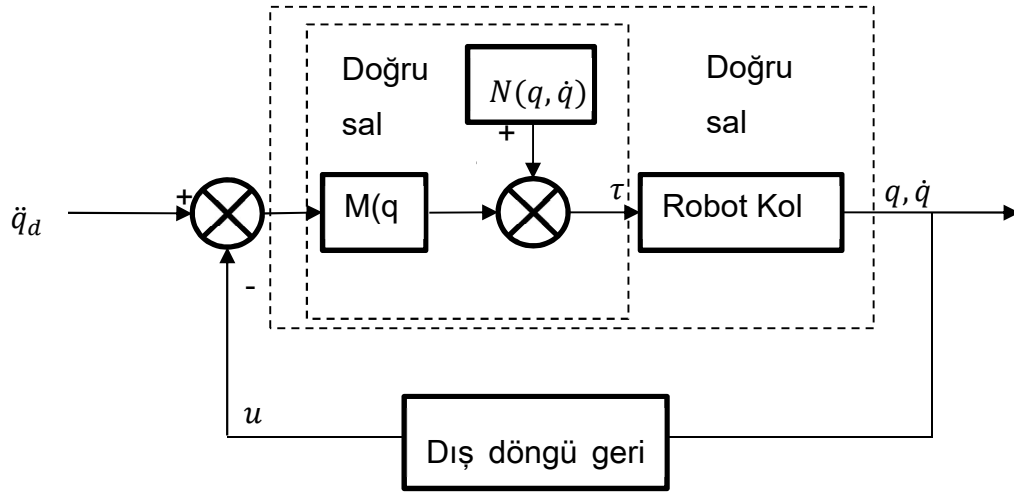
şeklinde yazılabilir. Durum uzayında ise aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \quad (3.112)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} w \quad (3.113)$$

Denklem 3.110 tersine çevrilerek kontrol torku bulunabilir. Hesaplanmış tork kontrolü şeması gösterilmiştir(Şekil 3.41) [80].

$$\tau = M(\ddot{q}_d - u) + N \quad (3.114)$$



Şekil 3.41 Hesaplanmış tork kontrolü şeması [80]

3.4.1 Oransal-Türevsel(PD) kontrol

PD kontrolcü için kontrol fonksiyonu oransal ve türevsel katsayılardan oluşmaktadır.

$$u(t) = -K_d \dot{e} - K_p e \quad (3.115)$$

Kontrol fonksiyonu oluşturulduktan sonra kontrol torku aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + K_d \dot{e} + K_p e) + N(q, \dot{q}) \quad (3.116)$$

Kapalı devre hata dinamiği;

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = w \quad (3.117)$$

şeklinde yazılır ve karakteristik denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta(s) = s^2 I + K_d s + K_p \quad (3.118)$$

2. dereceden bir sistemin karakteristik denklemi sönümlenme oranı(ζ) ve doğal frekansa(ω_n) bağlı olarak yazılabilir.

$$p(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.119)$$

3.118 ve 3.119 nolu denklemlerin eşitliğinden ;

$$K_p = \omega_n^2 \quad (3.120)$$

$$K_d = 2\zeta\omega_n \quad (3.121)$$

eşitlikleri bulunabilir. Robot kollarında sapma istenmeyen bir durumdur, bu nedenle kritik sönümlenme durumu istenmektedir [80]. Bu durumda sönümlenme oranı(ζ) 1 olarak alınmaktadır. Böylece türevsel ve oransal katsayıların ilişkisi bulunabilir.

$$K_d = 2\sqrt{K_p} \quad (3.122)$$

3.4.2 Oransal-Türevsel-İntegral(PID) kontrol

PD kontrolcü sonucunda durağan durum hatası devam etmektedir. Bu hata her ne kadar kabul edilebilir olsa bile, hatayı sıfıra indirmek mümkündür. Bunun içinde kontrolcüye integral katsayısı eklenmelidir. Bunun içinde hatanın integrali gerekmektedir.

$$\dot{\varepsilon} = e \quad (3.123)$$

Kontrol fonksiyonu ve kontrol torku aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$u(t) = -K_i\varepsilon - K_d\dot{\varepsilon} - K_p e \quad (3.124)$$

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + K_i\varepsilon + K_d\dot{\varepsilon} + K_p e) + N(q, \dot{q}) \quad (3.125)$$

İntegral kontrolcüsü eklenen hata dinamiği ve karakteristik denklemi yeniden düzenlenir.

$$\ddot{\varepsilon} + K_d\dot{\varepsilon} + K_p e + K_i\varepsilon = w \quad (3.126)$$

$$\Delta(s) = s^3 I + K_d s^2 + K_p s + K_i \quad (3.127)$$

Kontrolcü katsayılarını sistemi kararlı yapacak şekilde seçmeliyiz. Bu nedenle katsayıları belirlemek için Routh-Hurwitz kararlılık kriterini kullanılabilir. Karakteristik denklemi Routh-Hurwitz kriterine göre düzenleyelim.

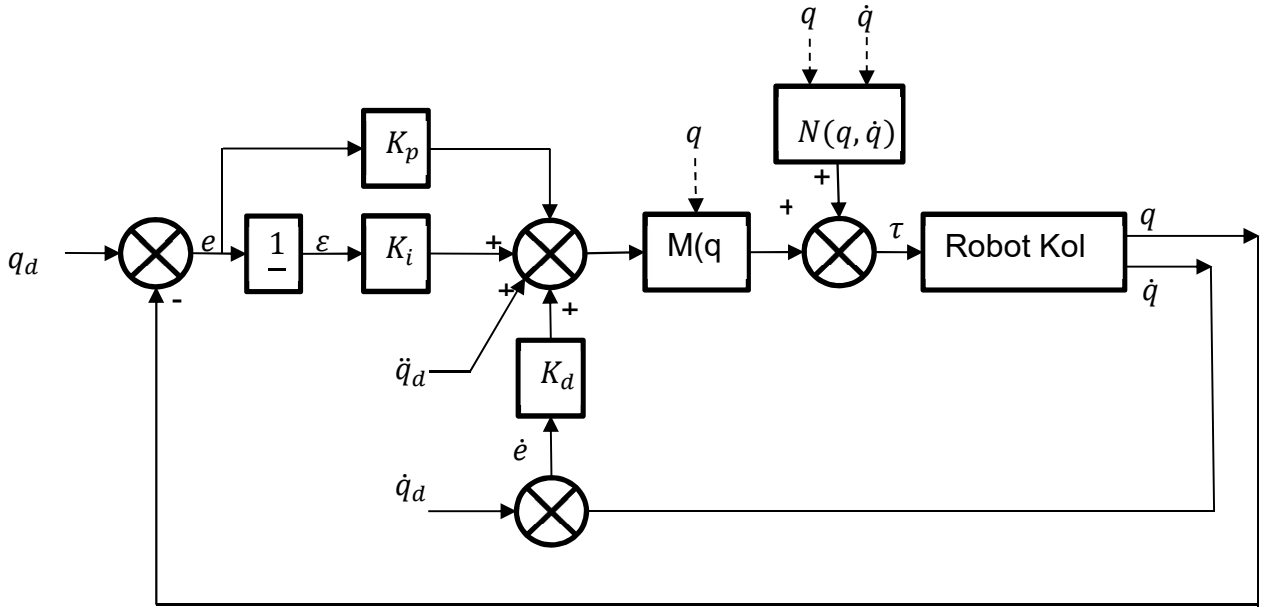
$$\left(\begin{array}{c|cc} s^3 & 1 & K_p \\ s^2 & K_d & K_i \\ s & b_1 & 0 \\ 1 & c_1 & 0 \end{array} \right) \quad (3.128)$$

$$b_1 = \frac{K_d K_p - K_i}{K_d} \quad (3.129)$$

$$c_1 = \frac{b_1 K_i}{b_1} \quad (3.130)$$

Routh-Hurwitz kriterine göre b_1 ve c_1 sıfırdan büyük olmalıdır. Kontrolcü katsayıları pozitif olduğundan bu durumu sağlayan koşul yazılabilir.

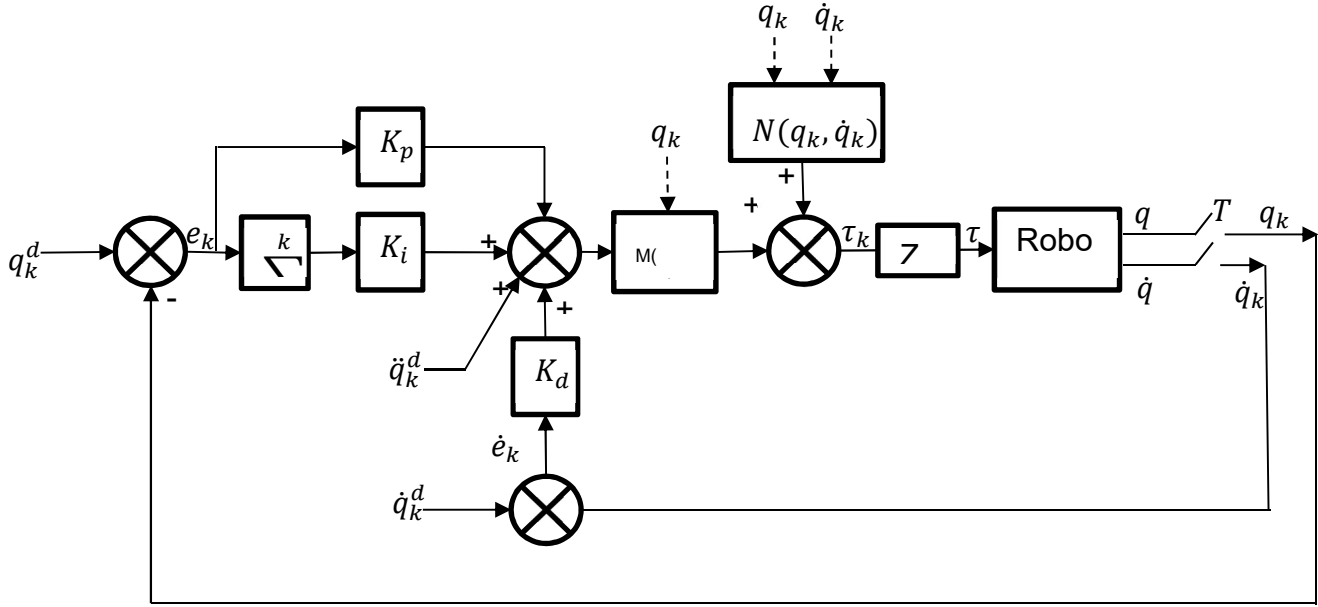
$$K_d K_p > K_i \quad (3.131)$$



Şekil 3.42 Hesaplanmış Tork PID Kontrol Şeması [80]

3.4.3 Ayrık Zamanlı Oransal-Türevsel-İntegral(PID) kontrol

Robot dinamiğinin içerdiği doğrusal olmayan terimler sürekli zamanda yapılan kontrol şemalarının sonuçlarını oldukça etkilemektedir. Bu nedenle, çoğu robot kontrolü ayrık zamanlı kontrolcülerle yapılmaktadır. Bu hem daha gerçekçi hem de güvenilir bir yaklaşımdır.



Şekil 3.43 Ayırık zamanlı kontrol şeması [64]

Şekil 3.41 te gösterilen şemayı hatırlarsak sürekli zamanda hesaplanmış tork kontrolü doğrusal olmayan iç döngü ve dış döngü geri beslemesinden oluşmaktadır. Ayırık zamanda kontrol için sistemin ayırık zamanda ifade edilmesi gerekmektedir. Doğrusal olmayan sistem genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.132)$$

Bu denklemi ayırık zamanda yazmak için Euler yaklaşımı kullanılabilir [80].

$$x_{k+1} = x_k + Tf(x_k, u_k) \quad (3.133)$$

Bu yaklaşımla eklem hızları;

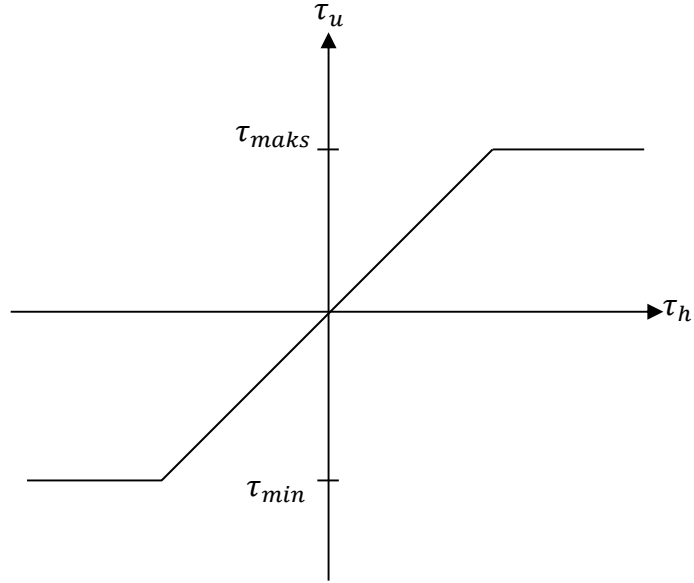
$$\dot{q}_k = (q_k - q_{k-1})/T \quad (3.134)$$

şeklinde elde edilir.

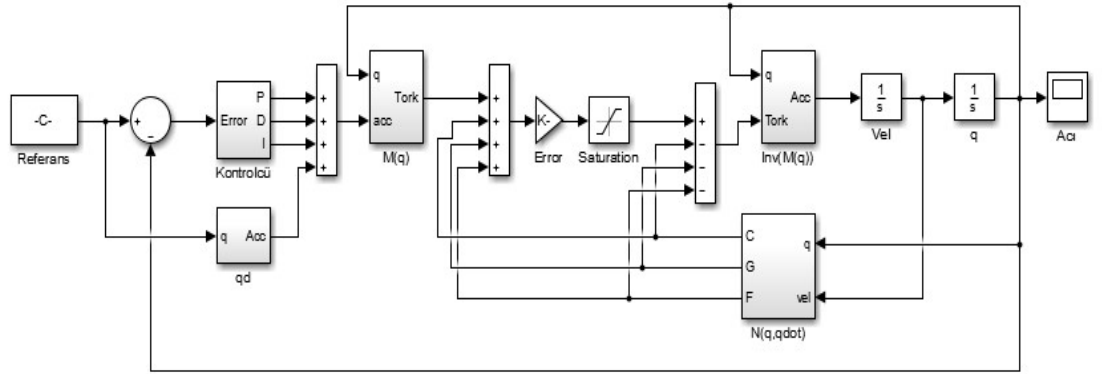
3.4.4 Kontrolcü çıktıları

MATLAB® Simulink programında sürekli ve ayırık zamanlı kontrolcüler oluşturulmuş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Hesaplanmış tork kontrol modelinde teorik olarak iyi sonuçlar alınmaktadır; fakat pratikte eyleyicilere uygulanan torklar belli değerlerle

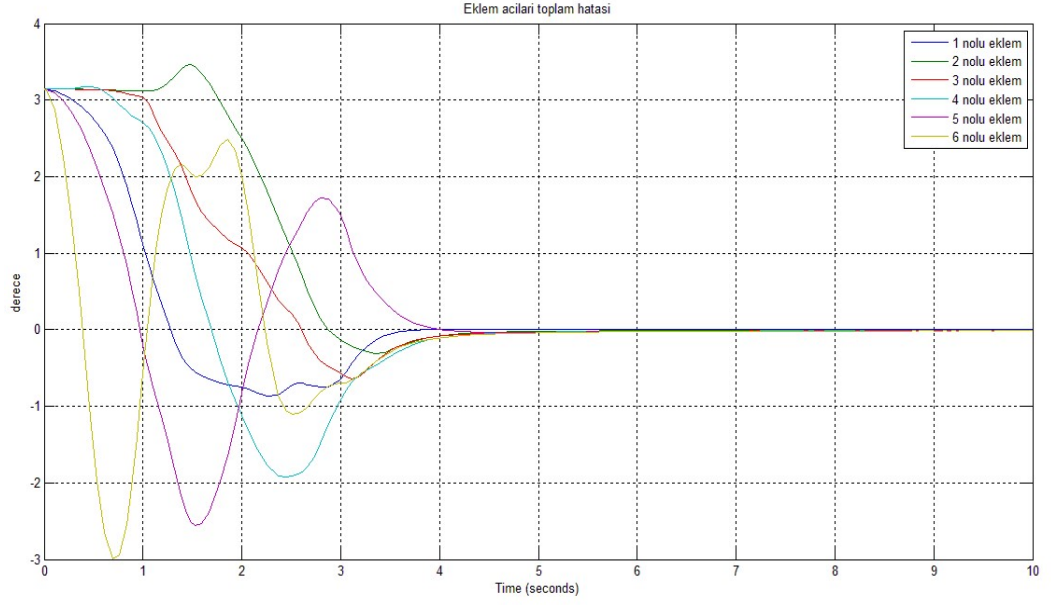
sınırlı olmalıdır. Bu nedenle sisteme uygulanan tork limitlenmelidir. Hesaplanan ve uygulanan tork arasındaki bağıntı gösterilmiştir(Şekil 3.44).



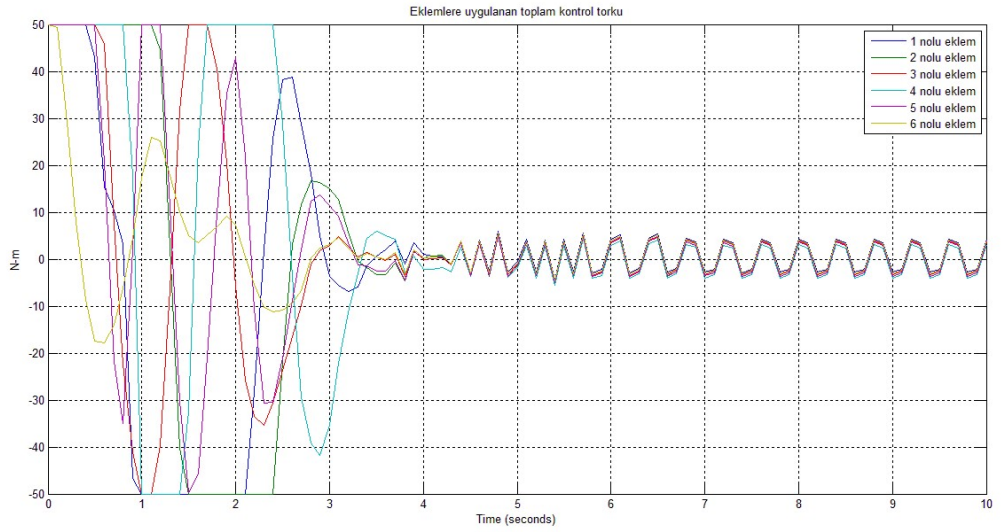
Şekil 3.44 Tork limitleme fonksiyonu



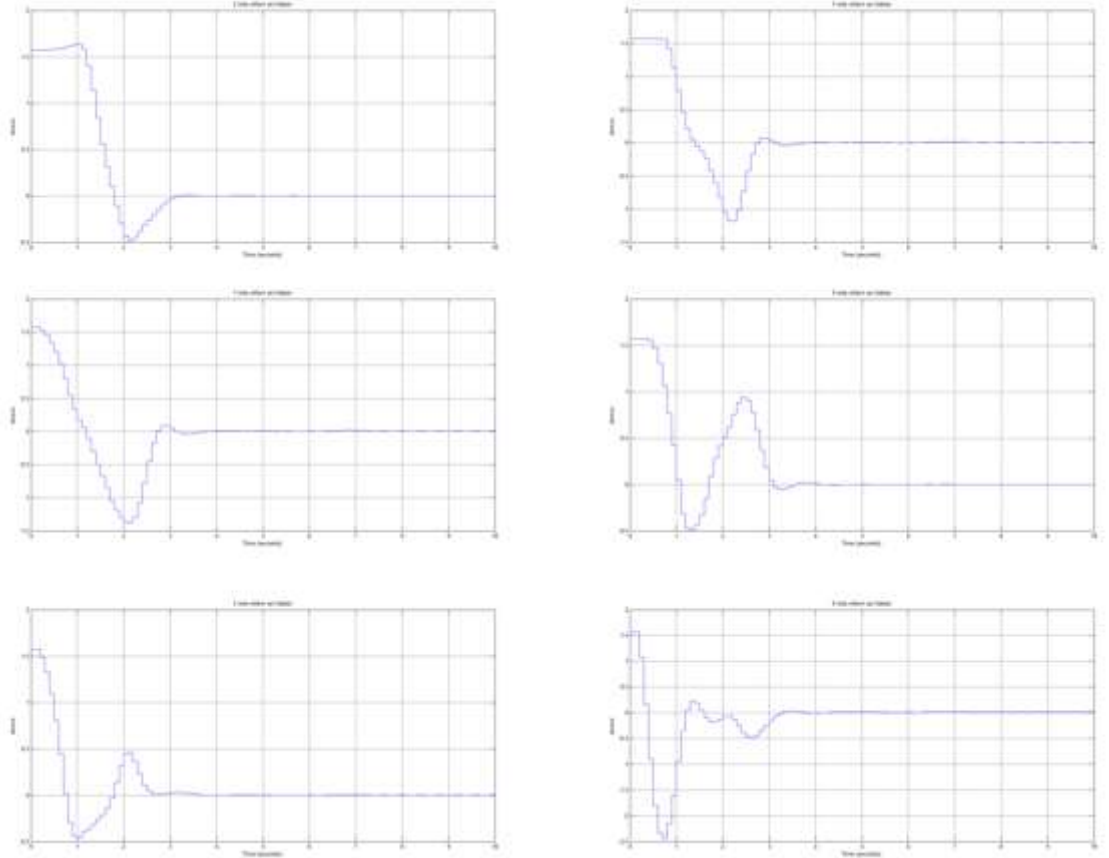
Şekil 3.45 Simulink hesaplanmış tork kontrolü blok şeması



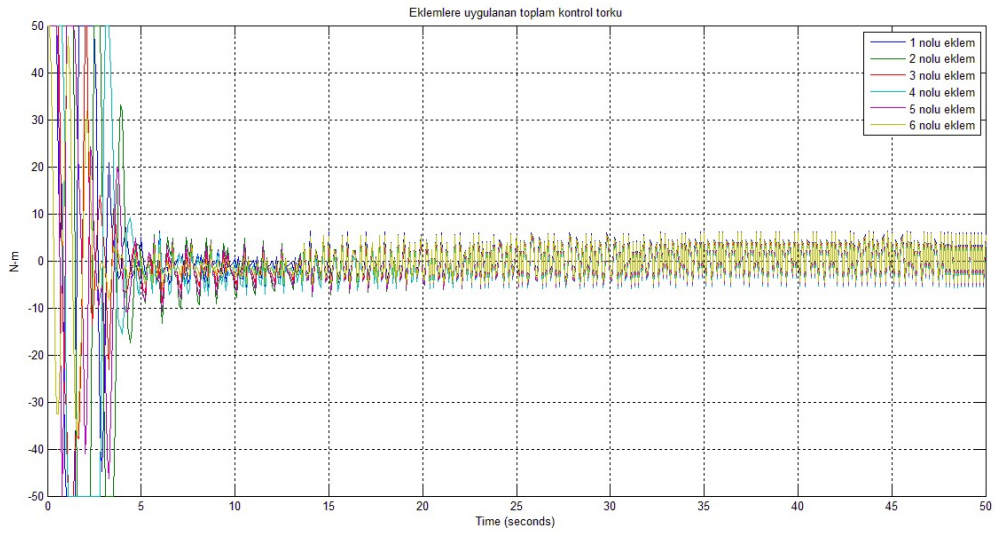
Şekil 3.46 Hesaplanmış tork PD kontrol cevabı($K_p=25$ $K_d=10$)



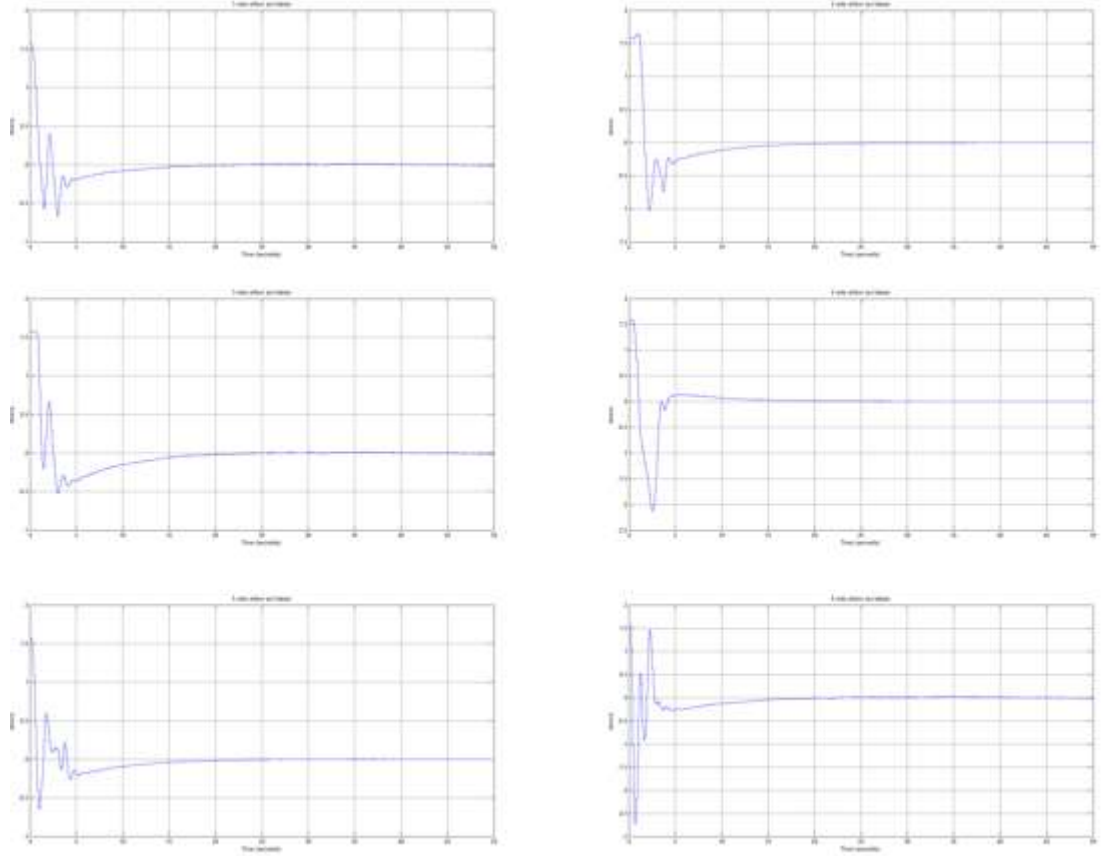
Şekil 3.47 Hesaplanmış tork ayırık zamanlı PD kontrolü toplam kontrol torku($K_p=11$ $K_d=5$)



Şekil 3.48 Hesaplanmış tork ayırık zamanlı PD kontrolü sistem cevabı($K_p=11$
 $K_d=5$)



Şekil 3.49 Hesaplanmış tork ayırık zamanlı PID kontrolü toplam kontrol torku
($K_p=15$ $K_d=6$ $K_i=2$)



Şekil 3.50 Hesaplanmış tork ayırık zamanlı PID kontrolü sistem cevabı ($K_p=15$
 $K_d=6$ $K_i=2$)

3.5 Sonuç

Tezin bu bölümünde tele-operasyon robotları kontrolü için kol hareketleri algılanması üzerine durulmuştur. Öncelikle operatörün omuz oryantasyonun ölçülmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bunun için kızılötesi alıcı-verici çiftinden oluşan sensörler tasarlanmış ve deney düzeneği hazırlanmıştır. Küresel mafsal oryantasyon ölçümüne dayalı bu deney düzeneği sonuçları, tek katmanlı yapay sinir ağı modelinde girdi olarak kullanılmıştır. Modellenen sinir ağı ile bu tip sensörler ile küresel mafsal oryantasyonun ölçülebileceği kanıtlanmıştır.

Kol hareketlerinin algılanmasında ataletsel ölçüm birimleri(IMU) tabanlı sistem de tasarlanmıştır. Bunun için operatörün koluna iki adet IMU yerleştirilmiştir.

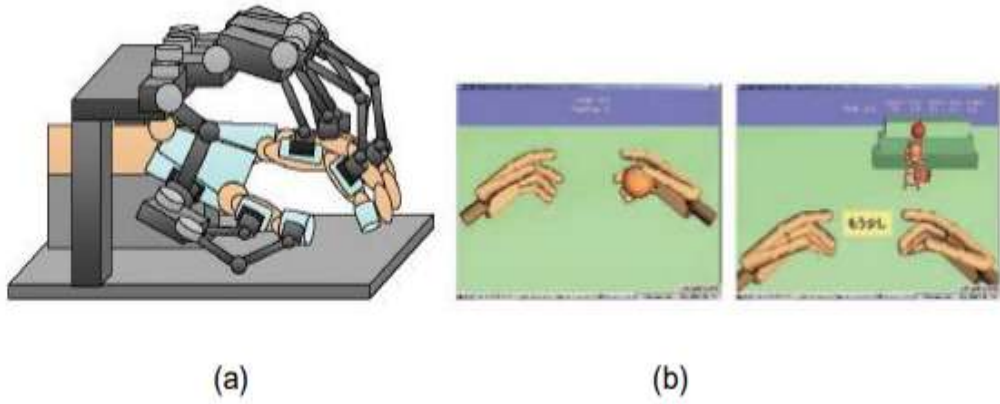
Operatörün vücuduna yerleştirilen başka bir IMU referans olarak alınarak kol hareketleri algılanmıştır. Başarılı bir şekilde ölçülen kol açıları Unity3D programında görselleştirilmiştir.

Tele-operasyon robotları için hidrolik eyleyici tabanlı 6 serbestlik dereceli robot kol tasarlanmıştır. Bu robot kolun mekanik analizleri yapılmış ve sürekli-ayrık zamanda kontrolcöleri üzerinde durulmuştur.

4 ROBOT EL SİSTEMİ

4.1 Giriş

Operatörün manipulasyon işlemlerinin son parçası el kısmıdır. Bu nedenle operatörün el hareketlerinin doğru bir şekilde algılanması ve robota iletilmesi gerekmektedir. Günümüzde insan el hareketlerinin eldiven veya dış iskelet benzeri yapılar tarafından algılanarak taklit edilmesinin pek çok kullanım alanı bulunmaktadır ve bu alan gün geçtikçe de genişlemektedir. Örneğin medikal sektöründe yer alan bir kullanım çalışması, Kawasaki ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [81]. Sistem bir dış iskelet yapısıdır. Elini kullanma konusunda problem yaşayan hastalara egzersiz yaptırmak için kullanılmaktadır. Ayrıca görsel bir arayüzle de zenginleştirilerek hastalara sanal gerçeklik hissini yaşatarak ellerini kullanmaya teşvik etmektedir. Dış iskelet sistemi ve rehabilitasyon arayüzü Şekil 4.1 de görülmektedir.



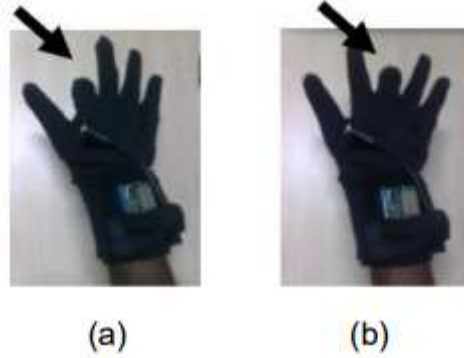
Şekil 4.1 (a) Dış iskelet sistemi, (b) Hasta egzersiz arayüzü

Bir diğer kullanım alanı ise insan elinin hassasiyetinin yetmediği durumlardır. Buna örnek olarak iste da Vinci® Cerrahi Sistemi gösterilebilir. El, her ne kadar en stabil kontrol edebildiğimiz organ olsa da ameliyat gibi durumlarda daha kontrollü hareketlere ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirilen sistem eldeki tüm istem dışı hareketleri kompanse ederek cerrahın, robotik kontrollü cihazı mikro hareketlerle kullanmasına olanak vermektedir [82].



Şekil 4.2 Da Vinci ameliyat robotu

Bir diğer çalışmada ise Kumar ve arkadaşları insan-bilgisayar iletişimde kullanılan bir araç olan farenin yerine veri eldiveni kullanımını ele almışlardır. Bilgisayar arayüzünde fare vasıtasıyla gerçekleştirilen tıklama, sürüleme, döndürme gibi işlevler el hareketleriyle gerçekleştirilmiştir. Böylece fareden daha yüksek bir hareket imkanına sahip olunmuştur [83].



Şekil 4.3 (a) Sol Tıklama Hareketi, (b) Sağ tıklama hareketi

Şekil 4.3 de gösterilen hareketler ile fare kullanırken yapılan hareketler bir aracı kullanılmaksızın eldiven giyilip tekrarlandığında basit bir şekilde işlevini yerine getirebilmektedir.

Direkt olarak eldivenden ölçüm almanın haricinde elin hareketlerini modellemede kullanılan ve harici sistemlerle desteklenen yöntemlerde mevcuttur. Bu yöntemler

optik izleme, manyetik izleme ve akustik izleme olarak 3 başlık altında toplanabilir [84].

Optik izleme yöntemi de kendi içerisinde işaretleme sistemi ve silüet analizi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [85]. İşaretleme sisteminde gövde üzerine yanıp sönen kızılötesi LED lambalar veya kızılötesi ışınları yansıtan noktalar koyulmaktadır. 2 veya daha fazla kamera objeyi çevrelemektedir. Sistem yazılımı kameraların farklı bakış açıları ve farklı perspektiflerle elde ettiği her bir nokta için 3 boyut bilgisini birbiriyle ilişkilendirir. Silüet analizinde ise tek bir kamera objelerin oluşturduğu silüet görüntüsünü kaydetmekte ve yazılım da silüeti oluşturan objelerin pozisyonlarını çözmeye çalışmaktadır.

Manyetik izlemede temel olarak, ortamda manyetik alan yaratan bir kaynak bulunmaktadır. Objeye üzerinde bulunan manyetik alan sensör ise objenin kaynağa göre pozisyon ve oryantasyonunu belirlemektedir. Bu alanda Hoff ve Lisle 'ın yaptığı bir çalışma mevcuttur [86]. Askeri ve güvenlik alanlarında kullanılabilmesi amacıyla yola çıkılarak gerçekleştirilen çalışmada, manyetik izleyicilerin bulunduğu eldivenin bilek kısmına bir de ekran monte edilerek kullanıcının yaptığı hareketleri görmesi sağlanmıştır.

Son olarak akustik izlemede obje üzerindeki yüksek-frekansta sinyal gönderen kaynağın, gönderildiği sinyallerin çevreye yerleştirilen mikrofonlar tarafından algılanarak birkaç milimetrelik sapmayla objenin pozisyonun belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu yönetime örnek olarak ise Nintendo firmasının 1989 senesinde, eğlence sektöründe kullanılmak üzere piyasaya sürdüğü eldiven gösterilebilmektedir. The Mattel Power Glove adını taşıyan eldiven ile üzerinde bulunan ultrasonik vericilerin gönderdiği sinyallerin televizyon üzerine yerleştirilen mikrofon sayesinde algılanarak parmak pozisyonlarının elde edilmesi sağlanmıştır.

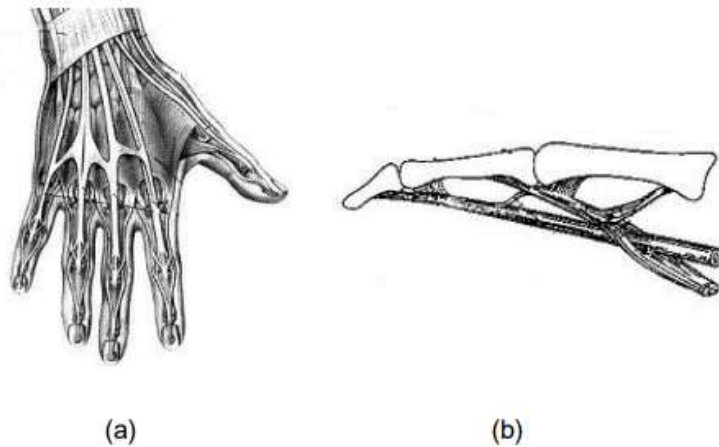


Şekil 4.4 The Mattel Power Glove

Elde edilen pozisyon bilgileri ise televizyon ekranının görünen video oyununun kontrollerinde kullanılmıştır.

4.1.1 İnsan eli biyomekaniği

El, özellikle insanlarda pozisyon kabiliyeti en yüksek olan organdır. Bu sebepten çevreyle etkileşime girme ve hissetme anlamında en ön plandadır. Hareket kabiliyetini sağlayan en önemli etken çok sayıda eklemden oluşmasıdır. Eklemler, kemiklerin üzerine bağlı olan tendonlar sayesinde hareket edebilmektedir [87].

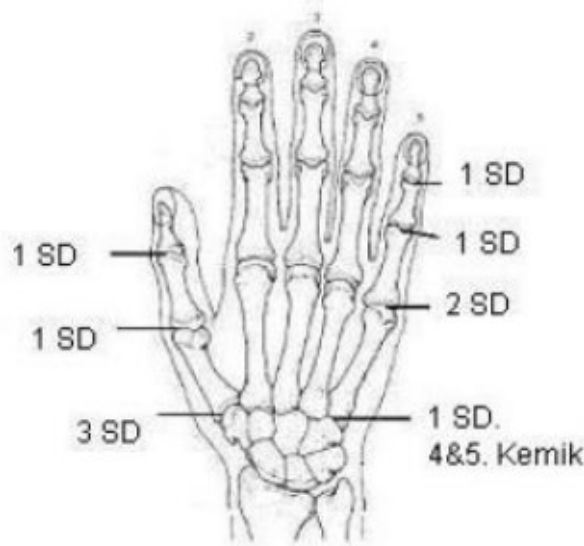


Şekil 4.5 (a) Elin Üst Kısımındaki Tendon Yapısı, (b) Parmağın Alt Kısımındaki tendon yapısı

Dirseğin iç kısmından başlayan kaslar, el bileğine ulaştıklarında tendonlara dönüşerek parmak kemiklerini sararlar. Kasların yaptığı çekme hareketi tendonlar vasıtasıyla parmaklara iletilir. İnsan elinin modellenmesi konusunda tendon yapısı ilham alınan çalışmalar yapılmıştır. Shadow Hand Company firmasının kullandığı havalı kas sistemi buna iyi bir örnektir. Çalışmada tendon davranışları oldukça başarılı bir şekilde taklit edilebilmiştir [88].

4.1.2 İnsan eli kinematik modeli

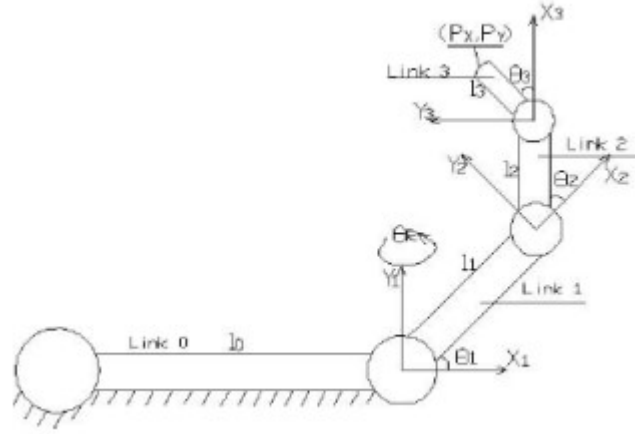
İnsan eli toplamda 29 serbestlik derecesine(SD) sahiptir. Bu serbestlik derecelerinin 23'ü, elin yapısını oluşturan 17 adet eklem tarafından meydana getirilir. Kalan 6 serbestlik derecesi ile elin rotasyon ve yönelim hareketlerinden meydana gelir [87].



Şekil 4.6 İnsan eli serbestlik dereceleri

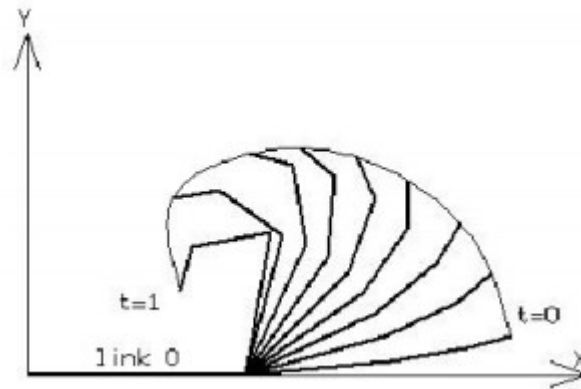
İşaret parmağı ve orta parmak 4 serbestlik derecesine sahiptirler. Yüzük ve serçe parmak, işaret ve orta parmağın sahip olduğu 4 serbestlik derecesinin yanı sıra, bileğe bağlandıkları ekleminde 1 serbestliği olduğunda 5'er serbestlik derecelerine sahiptirler. Başparmak ise diğer parmalardan farklı olarak 2 ekleme sahiptir. Ancak el ayasına bağlantı noktasında 3 serbestlik derecesi olduğundan toplamda 5 serbestlik derecesi bulunmaktadır.

İşaret, orta, yüzük ve serçe parmakların birbirlerine benzer yapılarından ötürü bir tanesinin modellenmesi, hareket karakteristiği konusunda bilgi sahibi olabilmek adına yeterli bulunmaktadır. İşaret parmağının kapanma hareketi, parmak şekillerinin geometrik olarak silindirik, eklemlerin ise küresel olması dolayısıyla, Arslan tarafından Şekil 4.7 de gösterilen şekilde modellenmiştir [87].

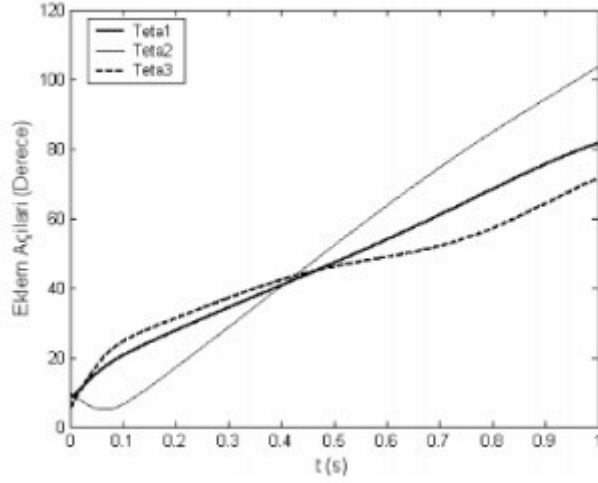


Şekil 4.7 İşaret parmağı kinematik modeli

Çalışmada işaret parmağının kapanma hareketi analiz edilmiştir. Parmağın kapanma hareketinin 1 saniye olduğu göz önünde bulundurularak, eklem yörüngeleri modellenerek Şekil 4.8'teki grafikte gösterilmiştir. Ayrıca eklem açılarındaki değişimde Şekil 4.9 da grafiğe dökülmüştür.



Şekil 4.8 1 saniyede gerçekleşen eklem hareketleri



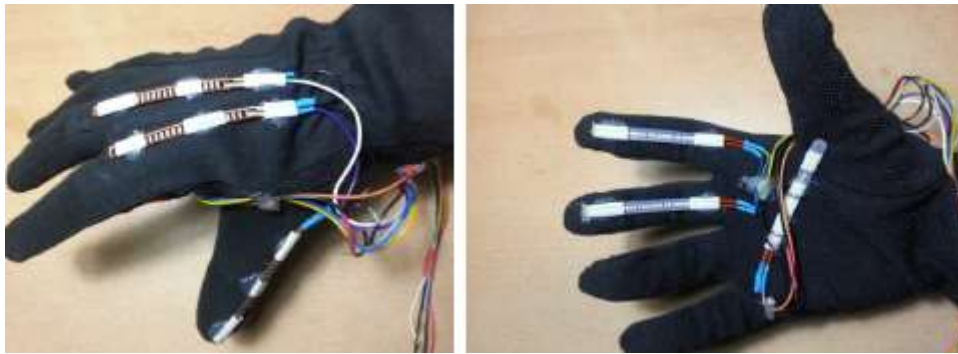
Şekil 4.9 Bir saniye içerisindeki eklem açıları değişimi

4.2 Algılayıcı Eldiven Tasarımı

Robotik ve sanal gerçeklik uygulamalarında kullanılmak üzere insan elinin hareketlerinin taklit edilebilmesi için öncelikle parmaklardaki eklem açısı değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu verilerin elde edilebilmesinde en uygun maliyetli ve verimli yöntemin veri eldiveni kullanmak olduğuna kanaat getirilmiştir.

Eldivenin, eli tam olarak sarabiliyor olması, üzerine konumlandırılacak algılayıcılardan doğru ölçüm alabilmek adına önem teşkil etmektedir. Bu sebepten ötürü içi kauçuk kaplı kumaş iş eldiveni kullanılmıştır.

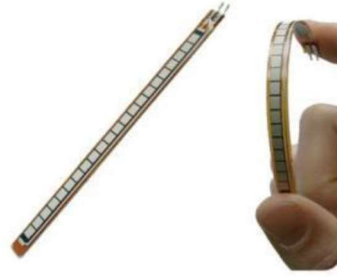
Algılayıcılar her bir serbestlik için bir adet olmak üzere eldiven üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 4.10 Esnek(Flex) sensör tabanlı algılayıcı eldiven tasarımı

Parmakların dış kısmına ve başparmağın iç kısmına yerleştirilen algılayıcıların 3 farklı noktadan orta ve işaret parmaklarının iç kısmına ise iki noktadan silikon yardımıyla sabitlenmesi yapılan denemeler sonucunda uygun görülmüştür. Bu sayede parmaktaki eklem açılarındaki değişiklikler gerçek harekete en yakın şekilde algılanarak, mikroişlemci tarafından işlenmek üzere devre kartına gönderilmektedir.

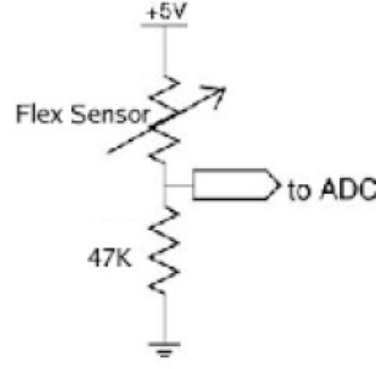
Veri eldiveni üzerinde parmakların eklem açılarını ölçebilmek için ilk olarak Specra Symbol firmasının üretmiş olduğu esneklik sensörleri kullanılmıştır.



Şekil 4.11 Specra Symbol esnek sensörü

Boyut olarak piyasada 2,2 inç (55,88mm) ve 4,5 inç (114,3mm) olmak üzere iki farklı boyutta sensör bulunmaktadır. Bu çalışmada parmaklardaki 2 şer eklem kontrol edilmek istendiğinden 2,2 inç'lik sensörler kullanılmıştır.

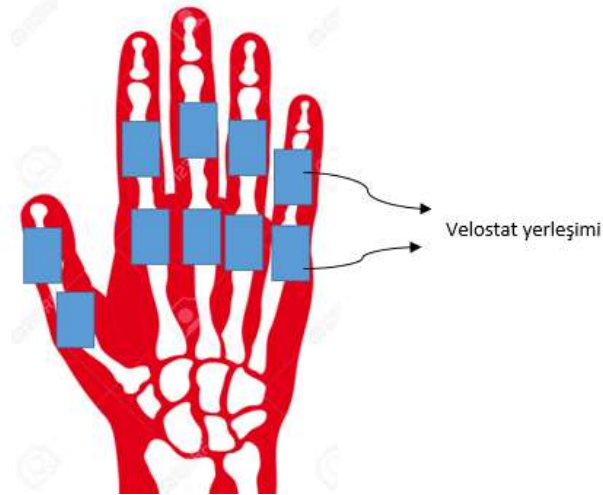
Esneklik sensörü temelde ayarlanabilir bir direnç görevi görmektedir. Büküldüğü takdirde direnç değeri 7000 Ohm ile 13000 Ohm arasında değişmektedir. Meydana gelen bu değişiklikler mikro işlemciye gönderilerek mikroişlemci yazılımı sayesinde açı değerlerine dönüştürülmekte, ardından elde edilen değerler bilgisayar yazılımı ve tasarlanan robot elde bulunan sürücü motorlara gönderilmektedir. Sensörlerin değerlerini mikroişlemciyle ölçmek için basit bir gerilim bölücü devresi gerekmektedir.



Şekil 4.12 Gerilim bölücü devresi

Ölçüleri sabit olarak üretilen bu sensörlerin algılayıcı eldivene entegre edilmeleri oldukça zordur. Bununla beraber kapladığı alan çok fazladır. Bu nedenle daha pratik ve basit bir çözüm için Velostat malzemesi kullanılmıştır.

Velostat, opak, iletken ve karbon emdirilmiş poliolefinden üretilen bir malzemedir. Üzerindeki basınca bağlı olarak direnci değişen bu malzeme ile esnek sensör uygulamaları da yapılabilir. Bu yöntemin avantajı kendi istediğimiz ölçülerde sensörler üretilmesidir. Aynı zamanda esnek sensörlere göre oldukça ekonomik bir çözüm olmuştur.



Şekil 4.13 Velostat tabanlı algılayıcı eldiven tasarımı

Şekil 4.13' algılayıcı eldivene velostat yerleşimleri gösterilmiştir. Eklemlerdeki değişiklik Velostat' alrın direncini deıştirmekte böylece eklem açıları

algılanabilmektedir. Algılanan parmak açıları Unity 3D programında simule edilmiştir.



Şekil 4.14 Unity3D robot el simulasyonu

5 SONUÇ

Bu tez çalışmasında tele-operasyon işlemleri için kullanılması hedeflenen algılayıcı ve robot sistemi çalışılmıştır. Bu tip sistemlerde operatörün görüş açısını robot ile mümkün olduğunca benzetmek önemlidir. Bu nedenle, ilk olarak robot kafa ve görüntüleme sistemi ele alınmıştır.

Görüntüleme sisteminde derinlik algısını operatöre iletebilecek bir sistem düşünülmüştür. Bunun için stereo görüntüleme sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem iki adet IP kameradan aldığı görüntüleri sanal gerçeklik gözlüğünde birleştirerek operatöre iletmektedir. Haberleşme yöntemi olarak TCP/IP üzerinden RTP/RTSP protokolleri kullanılmıştır. Görüntüleme sisteminin operatör tarafından manipulasyonu, operatör için zorlayıcı olabilmektedir. Operatörün bu işlem için ellerini kullanmasını önlemek amacıyla kafa hareketleri ile hareket ettirilebilen iki serbestlik dereceli robot kafa sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Kameralar bu sistem üzerine entegre edilmiştir. Android işletim sistemine sahip bir telefon kullanılarak kafa hareketleri algılanmıştır. Görüntüleme ekranı olarak ta yine telefon kullanılmıştır. İlerleyen çalışmalarda, kamera çiftinin odaklanan mesafeye bağlı olarak odak eksenine doğru yönlendirilmesi ve otomatik odaklamanın derinlik algısına etkisinin incelenmesi üzerine yoğunlaşılabilir. Ayrıca tasarlanan robot kafanın serbestlik derecesi artırılarak hareket kabiliyeti artırılabilir.

Görütüleme sisteminden sonra operatörün robotun bulunduğu ortamı manipule edebilmesi için robot kol sistemine gereksinim vardır. Bunun içinde öncelikle operatörün kol hareketlerinin algılanması üzerinde durulmuştur. Kol eklemlerinden en karmaşık olanı yapısı itibariyle omuz eklemidir. Kol hareketlerini algılama çalışmaları ilk olarak bu ekleme yoğunlaşarak başlamıştır. Omuz eklemine basitleştirirsek küresel mafsalsal olarak düşünebiliriz. Bu nedenle küresel mafsalsal oryantasyonunu ölçebilen herhangi bir sistemi kolaylıkla omuza entegre edebiliriz. Bu kanıdan yola çıkarak küresel mafsalsal oryantasyonunu ölçebilen bir sistem düşünülmüş ve test düzeneği hazırlanmıştır. Bu düzenekte kızılötesi alıcı-verici çiftinden tasarlanan sensörler önerilmiştir. Küresel mafsalsal oryantasyon ölçümüne dayalı bu deney düzeneği sonuçları, tek katmanlı yapay sinir ağı modelinde girdi olarak kullanılmıştır. Modellenen sinir ağı ile bu tip sensörler ile küresel mafsalsal oryantasyonun ölçülebileceği kanıtlanmıştır.

Kol hareketleri algılanmasında sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri ataletsel ölçüm birimleridir(IMU). Bu çalışmada da IMU tabanlı kol hareketleri algılama sistemi tasarlanmıştır. Bahsedilen yöntem için 3 adet IMU kullanılmıştır. Bunlardan biri operatörün üstkoluna, diğeri operatörün önkoluna yerleştirilmiştir. Sonuncu IMU ise referans olarak kullanılmış ve operatörün vücuduna entegre edilmiştir. Kol hareketleri başarılı bir şekilde algılamış ve Unity3D programında simule edilmiştir.

Kol hareketlerinin taklit edileceği ve operatörün manipulasyon işlemleri için robotik bir kola ihtiyaç vardır. Bu tez çalışmasında hidrolik eyleyici tabanlı 6 serbestlik dereceli bir kol sistemi önerilmiştir. Bu robot kol üzerinde mekanik analizler yapılmış ve kontrolcü çalışmalarına yoğunlaşmıştır. İlerleyen çalışmalarda robot kol üretilerek gerçek zamanlı kontrolü üzerine çalışılabilir.

Son olarak manipule işlemlerinin son bulacağı robot elin kontrolü için operatörün parmak hareketlerinin algılanması amaçlanmıştır. Bunun için algılayıcı eldiven tasarlanmıştır. Eldivende esnek sensörler ve Velostat malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan esneklik sensörlerinin, parmak eklemlerindeki açılarının ölçümü konusunda oldukça yüksek performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak en net sonuçların alınabilmesi için eldiven üzerine doğru konumlandırılmaları ve olabildiğince sağlam sabitlenmeleri gerekmektedir. Performansının aksine bu sensörlerin yerleşimi eldivende oldukça yer tutmaktadır ve maliyetleri de oldukça yüksektir. Bu sorun da

Velostat malzemesi kullanılarak çözülmüştür. Bu teknolojiyle tasarlanan eldiven ile parmak açıları ölçülmüş ve Unity3D programında görselleştirilmiştir. Bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında, EMG sistemleri ile ölçülen kas hareketleri algılayıcı eldiven sisteminin çıktılarıyla eşleştirilebilir. Bunun yanısıra 5 parmaklı robot el sistemi üretilerek gerçek zamanlı kontrol çalışılabilir.

6 KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] L. Nocks, *The Robot: The Life Story of a Technology*, London: Greenwood Press, 2007.
- [2] G. Metta, G. Sandini, D. Vemon, L. Natale ve F. Nori, «The iCub humanoid robot: an open platform for research in embodied cognition».
- [3] Y. Sakagami, S. Matsunaga, R. Watanabe, N. Higaki, C. Aoyama ve K. Fujimura, «The intelligent ASIMO: System overview and integration,» %1 içinde *International Conference on Intelligent Robots And Systems*, Lausanne, Switzerland, 2002.
- [4] G. Nelson, A. Saunders, N. Neville, B. Swilling, J. Bondaryk, D. Billings, C. Lee, R. Playter ve M. Raibert, «PETMAN: A Humanoid Robot for Testing Chemical Protective Clothing,» *Journal of the Robotics Society of Japan*, cilt 30, no. 4, pp. 372-377, 2012.
- [5] Boston Dynamics, [Çevrimiçi]. Available: http://www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html. [Erişildi: 24 11 2016].
- [6] S. Raspopovic, M. Capogrosso, F. M. Petrini, M. Bonizzato, J. Rigosa, G. Di Pino, J. Carpaneto, M. Controzzi, T. Boretius, E. Fernandez, G. Granata, C. M. Oddo, L. Citi, C. Cipriani, M. C. Carrozza, W. Jensen, E. Guglielmelli, T. Stieglitz, P. M. Rossini ve S. Micera, «Restoring Natural Sensory Feedback in Real-Time Bidirectional Hand Prostheses,» *Science Translational Medicine*, cilt 6, no. 222, p. 222ra19, 2014.
- [7] M. S. Johannes, J. D. Bigelow, J. M. Burck, S. D. Harshbarger, M. V. Kozlowski ve T. V. Doren, «An Overview of the Developmental Process for the Modular Prosthetic Limb,» *John Hopkins APL Technical Digest*, cilt 30, no. 3, pp. 207-216, 2011.
- [8] F. C. Chen, S. Appendino, A. Battezzato, A. Favetto, M. Mousavi ve F. Pescarmona, «Constraint Study for a Hand Exoskeleton: Human Hand Kinematics and Dynamics,» *Journal of Robotics*, cilt 2013, 2013.
- [9] M. Dascalu, M. S. Teodorescu, A. Plavitu, L. Milea, E. Franti, D. Coroama ve D. Moraru, «Tele-operated robotic arm and hand with intuitive control and haptic feedback,» *American Journal of Aerospace Engineering*, cilt 1, no. 4, pp. 21-27, 2014.
- [10] C. Karacizmeli, G. Çakır ve D. Tükel, «Robotic hand project,» %1 içinde *IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2014.
- [11] H. Dang ve P. K. Allen, «Stable Grasping under Pose Uncertainty Using Tactile Feedback,» *Autonomous Robots*, cilt 36, no. 4, 2014.

- [12] H. Dang, J. Weisz ve P. K. Allen, «Blind grasping: Stable robotic grasping using tactile feedback and hand kinematics,» %1 içinde IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011.
- [13] B. Özyer, İ. Erkmen ve A. M. Erkmen, «Grasping an object by approaching with optimal hand preshaping,» %1 içinde IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2012.
- [14] B. Matulevich, V. Pandit, C.-H. Lin, G. E. Loeb ve J. A. Fishel, «Low-cost, compliant contact sensor for fragile grasping with reduced cognitive load,» %1 içinde Myoelectric Controls Symposium, 2014.
- [15] Z. Su, J. A. Fishel , T. Yamamoto ve G. E. Loeb, «Use of tactile feedback to control exploratory movements to characterize object compliance,» Frontiers in Neurorobotics, cilt 6, no. 7, 2012.
- [16] M. I. Tiwana, S. J. Redmond ve N. H. Lovell, «A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering,» Sensors and Actuators A: Physical, cilt 179, pp. 17-31, 2012.
- [17] M. Almassari, W. Z. Hasan, S. A. Ahmad, A. J. Ishak, A. M. Ghazali, D. N. Talib ve C. Wada, «Pressure Sensor: State of the Art, Design, and Application for Robotic Hand,» Journal of Sensors, 2015.
- [18] M. Li, S. Luo, T. Nanayakkara, L. D. Seneviratne, P. Dasgupta ve K. Althoefer, «Multi-fingered haptic palpation using pneumatic feedback actuators,» Sensors and Actuators A: Physical, cilt 218, pp. 132-141, 2014.
- [19] E. W. Tunstel, K. C. Wolfe, M. D. Kutzer, M. Johannes, C. Y. Brown, K. D. Katyal, M. P. Para ve M. J. Zeher, «Recent Enhancements to Mobile Bimanual Robotic Teleoperation with Insight Toward Improving Operator Control,» Johns Hopkins Apl Technical Digest, cilt 32, no. 3, pp. 584-594, 2013.
- [20] W. Yu ve L. Gang , «Head Pose Estimation Based on Head Tracking and the Kalman Filter,» %1 içinde International Conference on Physics Science and Technology, Dubai, 2011.
- [21] K. Diaz-Chito, A. Hernández-Sabaté ve A. M. López, «A reduced feature set for driver head pose estimation,» Applied Soft Computing, cilt 45, pp. 98-107, 2016.
- [22] X. Xu ve B. Li, «Head Tracking Using Particle Filter with Intensity Gradient and Color Histogram,» %1 içinde IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Amsterdam, 2005.
- [23] C. Wang ve M. S. Brandstein, «A hybrid real-time face tracking system,» %1 içinde IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Seattle, WA, 1998.

- [24] S. La Valle, A. Yershova , M. Katsev ve M. Antonov, «Head Tracking for the Oculus Rift,» %1 içinde IEEE International Conference on Robotics & Automation, Hong Kong, 2014.
- [25] E. Foxlin ve L. Naimark, «VIS-Tracker: A Wearable Vision-Inertial Self-Tracker,» %1 içinde IEEE Virtual Reality Conference, Los Angeles, CA, USA, 2003.
- [26] S. Sabatelli, M. Galgani, L. Fanucci ve A. Rocchi, «A double stage Kalman filter for sensor fusion and orientation tracking in 9D IMU,» IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, cilt 62, no. 3, pp. 590-598, 2012.
- [27] Kim ve M. F. Golnaraghi, «A Quaternion-Based Orientation Estimation Algorithm Using an Inertial Measurement Unit,» %1 içinde IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001.
- [28] S. G. Weinbaum, Pygmalion's Spectacles, 1935.
- [29] K. Horowitz, «Sega VR: Great Idea or Wishful Thinking?,» 28 12 2004. [Çevrimiçi]. Available: https://web.archive.org/web/20100114191355/http://sega-16.com/feature_page.php?id=5&title=Sega%20VR:%20Great%20Idea%20or%20Wishful%20Thinking? [Erişildi: 25 01 2017].
- [30] M. Hofmann ve L. Beaumont, «Caching Techniques for Streaming Media,» %1 içinde Content Networking-Architecture, Protocols and Practice, San Francisco, Elsevier, 2005, pp. 81-103.
- [31] Önal, «Ekskavatör teleoperasyon sistemi ve kuvvet geri beslemesi kazanımları,» Ankara, 2015.
- [32] Kayış, «Türk Erkek Toplumunun Antropometrik Ölçülerinin Belirlenmesi,» TÜBİTAK, YAE, Ankara, 1989.King ve D. C. Viano, «Mechanics of the Head/Neck,» %1 içinde The Biomedical Engineering Handbook: Second Edition, CRC Press LLC, 2000.
- [33] W. Peterson, H. Choi, T. Hain, E. Keshner ve G. . C. Y. Peng, «Dynamic and Kinematic Strategies for Head Movement Control,» Annals of the New York Academy of Sciences, cilt 942, pp. 381-393, 2001.
- [34] S. Openshaw ve E. T. Allsteel, Ergonomics an Design-A Reference Guide, Allsteel, 2006.
- [35] R. J. Leigh ve D. S. Zee, The Neurology of Eye Movements, Oxford University Press, 1999.
- [36] J. Butterfass, G. Hirzinger, S. Knoch ve H. Liu, «DLR's multisensory articulated hand, Part 1: Hard and software architecture,» %1 içinde IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 1998.

- [37] J. Butterfass, G. Hirzinger ve P. Meusel, «DLR's multisensory articulated hand, Part 2: Parallel torque/position control system,» %1 içinde IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 1998.
- [38] J. K. Paik, B. H. Shin, Y.-b. Bang ve Y.-B. Shim, «Development of an Anthropomorphic Robotic Arm and Hand,» Journal of Bionic Engineering, no. 9, pp. 133-142, 2012.
- [39] L. Zhou, S. Bai ve M. R. Hansen, «Integrated dimensional and drive-train design optimization of a light-weight,» Robotics and Autonomous Systems, no. 60, pp. 113-122, 2012.
- [40] E. B. Mazomenos, D. Biswas, A. Cranny, A. Rajan, K. Maharatna, J. Achner, J. Klemke, M. Jöbges, S. Ortmann ve P. Langendörfer, «Detecting elementary arm movements by tracking upper limb joint angles with MARG Sensors,» IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, cilt 20, no. 4, pp. 1088-1099, 2016.
- [41] E. P. Lana, B. V. Adorno ve C. J. Tierra-Criollo, «Detection of movement intention using EEG in a human-robot interaction environment,» Research on Biomedical Engineering, cilt 31, no. 4, pp. 284-294, 2015.
- [42] Y. M. Aung ve A. Al-Jumaily, «Estimation of upper limb joint angle using surface EMG signal,» International Journal of Advanced Robotic Systems, cilt 10, no. 10, p. 369, 2013.
- [43] M. Z. Al-Faiz ve A. F. Shanta, «Kinect-based humanoid robotic manipulator for human upper limbs movements tracking,» Intelligent Control and Automation, cilt 6, pp. 29-37, 2015.
- [44] R. Tadakuma, Y. Asahara, H. Kajimoto, N. Kawakami ve S. Tachi, «Development of anthropomorphic Multi-DOF master-slave arm for mutual teleexistence,» IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, cilt 11, no. 6, 2005.
- [45] NASA, Man-Systems Integration Standarts NASA-STD-3000, cilt 1, 1995, pp. 121-128.
- [46] NASA, Man-Systems Integrated Standarts NASA-STD-3000, cilt 1, 1995, pp. 711-713.
- [47] NASA, Man-Systems Integrated Standarts NASA-STD-3000, cilt 1, 1995, p. 113.
- [48] NASA, Man-Systems Integrated Standarts NASA-STD-3000, cilt 1, 1995, pp. 5-20.
- [49] Gams ve J. Lenarcic, «Humanoid arm kinematic modeling and trajectory generation,» %1 içinde International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006.

- [50] J. Lenarcic ve M. Staniscic, «A humanoid shoulder complex and the humeral pointing kinematics,» IEEE Transactions on Robotics and Automation, cilt 19, no. 3, pp. 499-506, 2003.
- [51] R. Tadakuma, Y. Asahara, H. Kajimoto, N. Kawakami ve S. Tachi, «Development of Anthropomorphic Multi-D.O.F. Master-Slave Arm for Mutual Telexistence,» IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, cilt 11, no. 6, 2005.
- [52] Y. Mon Aung ve A. Al-Jumaily, «Estimation of Upper Limb Joint Angle Using Surface EMG Signal,» International Journal Of Advanced Robotic Systems, cilt 10, no. 369, 2013.
- [53] Chai ve E. Lim, «Conceptual design of master-slave exoskeleton for motion prediction and control,» %1 içinde International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems, Taipei, Taiwan, 2015.
- [54] «Vicon Motion Capture Systems,» [Çevrimiçi]. Available: www.vicon.com.
- [55] «BTS Bioengineering,» [Çevrimiçi]. Available: www.btsbioengineering.com.
- [56] López-Méndez, M. Alcoverro, M. Pardàs ve J. R. Casas, «Real-time upper body tracking with online initialization using a range sensor,» %1 içinde IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, Barcelona, 2011.
- [57] M. Burke ve J. Lasenby, «Fast Upper Body Joint Tracking Using Kinect Pose Priors,» %1 içinde Articulated Motion and Deformable Objects, Palma de Mallorca, Springer International Publishing, 2014, pp. 94-105.
- [58] N. J. S. Seo, M. F. Fathi, P. Hur ve V. Crocher, «Modifying Kinect placement to improve upper limb joint angle measurement accuracy,» Journal of Hand Therapy, pp. 465-473, 2016.
- [59] R. Zhu ve Z. Zhou, «A Real-Time Articulated Human Motion Tracking Using Tri-Axis Inertial/Magnetic Sensors Package,» IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, cilt 12, no. 2, pp. 295-302, 2004.
- [60] H. J. Luinge ve P. H. Veltink, «Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers,» Medical Biological Engineering Computing, cilt 43, no. 2, pp. 273-282, 2005.
- [61] X. Yun ve E. Bachmann, «A simplified quaternion-based algorithm for orientation estimation from Earth gravity and magnetic field measurements,» IEEE Transactions on Robotics, cilt 22, no. 6, pp. 1216-1227, 2006.
- [62] Z. Zhang ve J. Wu, «A novel hierarchical information fusion method for three-dimensional upper limb motion estimation,» IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, cilt 60, no. 11, pp. 3709-3719, 2011.
- [63] Z. Zhang, W. Wong ve J. Wu, «Ubiquitous human upper-limb motion estimation using wearable sensors,» IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, cilt 15, no. 4, pp. 513-521, 2011.

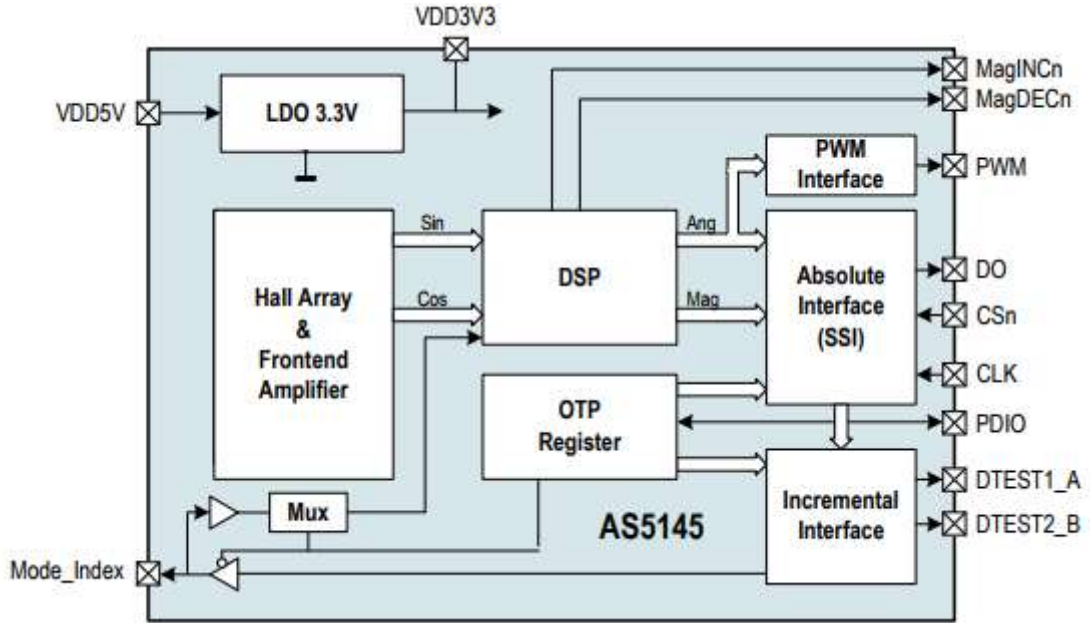
- [64] Z.-Q. Zhang, L.-Y. Ji, Z.-P. Huang ve J.-K. Wu, «Adaptive Information Fusion for Human Upper Limb Movement Estimation,» IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, cilt 42, no. 5, pp. 1100-1108, 2012.
- [65] R. Morris ve R. Langari, «Chapter 20- Rotational Motion Transducers,» %1 içinde Measurement and Instrumentation, Academic Press, 2016, pp. 599-632.
- [66] Y. Wang, W. Chen ve M. Tomizuka, «Extended Kalman Filtering for Robot Joint Angle Estimation,» IFAC Proceedings Volumes, cilt 46, no. 5, pp. 406-413, 2013.
- [67] V. Vikas ve C. D. Crane, «Joint Angle Measurement Using Strategically Placed Accelerometers and Gyroscope,» Journal of Mechanisms and Robotics, cilt 8, no. 2, 2015.
- [68] G. Saggio, «A novel array of flex sensors for a goniometric glove,» Sensors and Actuators A:Physical, cilt 205, pp. 119-125, 2014.
- [69] [Çevrimiçi]. Available: http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/models/cielab.html..
- [70] K. Gorbanian ve M. Gholamrezaei, «An artificial neural network approach to compressor performance prediction,» Journal of Applied Energy, cilt 86, pp. 1210-1221, 2009.
- [71] S. M. J. Pappu ve S. N. Gummadi, «Artificial neural network approach and regression coupled genetic algorithm to optimize parameters for enhanced xylitol production by Debaryomyces nepalensis in bioreactor,» Biochemical Engineering Journal, cilt 120, pp. 136-145, 2017.
- [72] T. M. Mitchell, Machine Learning, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1997.
- [73] J. Denavit ve R. S. Hartenberg, «A kinematic notation for Lower-pair mechanisms based on matrices,» ASME Journal of Applied Mechanics, pp. 215-221, 1955.
- [74] J.-H. Kim ve V. R. Kumar, «Kinematics of robot manipulator via line transformations,» Journal of Robotic Systems, cilt 7, no. 4, pp. 649-674, 1990.
- [75] S. Küçük ve Z. Bingül, «Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics,» %1 içinde Industrial Robotics Theory Modelling and Control, Germany, Pro Literatur Verlag, 2006, pp. 117-148.
- [76] T. Asfour ve R. Dillmann, «Human-like Motion of a Humanoid Robot Arm Based on a Closed-Form Solution of the Inverse Kinematics Problem,» %1 içinde International Conference on Intelligent RObots and Systems, Las Vegas, Nevada, 2003.

- [77] H. H. Asada, Introduction to Robotics.
- [78] M. W. Spong, S. Hutchinson ve M. Vidyasagar, Robot Dynamics and Control, 2004.
- [79] F. L. Lewis, D. M. Dawson ve C. T. Abdallah, Robot Manipulator Control, New York: Marcel Dekker, 2004.
- [80] H. Kawasaki, S. Ito, Y. Nishimoto, H. Hayashi ve H. Sakaeda, «Hand Rehabilitation Support System Based on Self-Motion Control, with a Clinical Case Report,» %1 içinde Automation Congress, Budapest, Hungary, 2006.
- [81] [82] «da Vinci® Surgery: Minimally Invasive Surgery,» Intuitive Surgical, Inc, [Çevrimiçi]. Available: <http://www.davincisurgery.com/>. [Erişildi: 14 7 2017].
- [82] P. Kumar, S. S. Rautaray ve A. Agrawal, «Hand data glove: A new generation real-time mouse for Human-Computer Interaction,» %1 içinde Recent Advances in Information Technology (RAIT), 2012 1st International Conference , Dhanbad, India, 2012.
- [83] J. Sturman ve D. Zeltzer, «A survey of glove-based input,» Computer Graphics and Applications, cilt 14, no. 1, pp. 30-39, 1994.
- [84] M. W. Krueger, Artificial Reality 2nd Ed., Reading, MA, 1990.
- [85] W. A. Hoff ve J. C. Lisle, «Mobile robot control using a small display,» %1 içinde Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, USA, USA, 2003.
- [86] Y. Z. Arslan, « İnsan Eli Modelinin Kinematik ve Dinamik Analizi,» %1 içinde 11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Ankara, 2003.
- [87] Shadow Robot Company, [Çevrimiçi]. Available: <http://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand/>. [Erişildi: 14 7 2017].
- [88] [Çevrimiçi]. Available: <http://www.polikim.com.tr/pdf/kestamid.pdf>. [Erişildi: 16 7 2017].

7 EKLER LİSTESİ

EK1 AS5145B-Manyetik sensör özellikleri	109
EK2 Motor özellikleri.....	111
EK3 Kestamid özellikleri.....	112
EK4 L298 Motor sürücü özellikleri	113
EK5 Devre şemaları	115
EK6 BNO055 özellikleri	116

EK1 AS5145B-MANYETİK SENSÖR ÖZELLİKLERİ



Şekil EK1.7.1 AS5145B Blok şeması

Pin Name	Pin Number	Pin Type	Description
MagINCn	1	Digital output open drain	Magnet Field Magnitude Increase. Active low. Indicates a distance reduction between the magnet and the device surface. (see Figure 15)
MagDECn	2		Magnet Field Magnitude Decrease. Active low. Indicates a distance increase between the device and the magnet. (see Figure 15)
DTest1_A	3	Digital output	Test output in default mode
DTest2_B	4		Test output in default mode
NC	5	-	Must be left unconnected
Mode_Index	6	Digital input/output pull-down	Select between slow (open, low: VSS) and fast (high) mode. Internal pull-down resistor (10kΩ).
VSS	7	Supply pin	Negative supply voltage (GND)

Şekil EK1.7.2 AS5145B pinleri

Parameter	Min	Max	Units	Comments
Electrical Parameters				
DC supply voltage at pin VDD5V	-0.3	7	V	
DC supply voltage at pin VDD3V3		5	V	
Input pin voltage	-0.3	VDD5V +0.3	V	Except VDD3V3
Input current (latchup immunity)	-100	100	mA	EIA/JESD78 Class II Level A
Electrostatic Discharge				
Electrostatic discharge	± 2		kV	JESD22-A114E
Temperature Ranges and Storage Conditions				
Storage temperature	-55	150	°C	Min -67°F; Max 302°F
Package body temperature		260	°C	The reflow peak soldering temperature (body temperature) specified is in accordance with <i>IPC/JEDEC J-STD-020 "Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Non-Hermetic Solid State Surface Mount Devices"</i> . The lead finish for Pb-free leaded packages is matte tin (100% Sn).
Relative humidity non-condensing	5	85	%	
Moisture sensitivity level (MSL)	3			Represents a maximum floor time of 168h

Şekil EK1.7.3 AS5145B özellikleri

EK2 MOTOR ÖZELLİKLERİ

Çizelge EK2.1 Motor özellikleri

Redüktör Tipi	Metal
Redüksiyon oranı	8:1
Hız yüksüz	200rpm
Çalışma Voltajı	6-24 V
Çalışma Akımı	580mA
Nominal Tork	12 Kg.cm
Max Tork	0.7 Kg.cm
Boyutlar	
Motor çapı	37 mm
Motor uzunluğu	33.3 mm
Şanzıman uzunluğu	33mm
Şaft uzunluğu	14 mm
Şaft kalınlığı	6 mm
Toplam uzunluk	89 mm

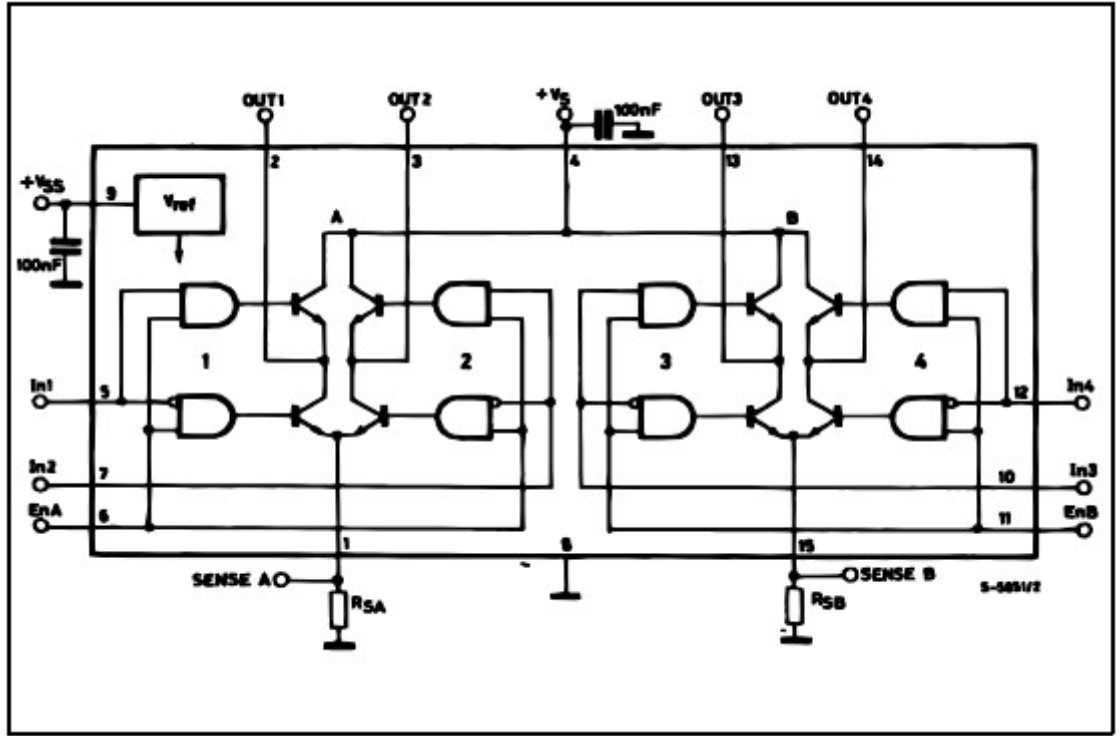
EK3 KESTAMİD ÖZELLİKLERİ

Robot kafanın montaj elemanlarında kullanılan kestamid malzemesinin özellikleri verilmiştir [89].

Çizelge EK3.1 Kestamid özellikleri

Özellikler	Test Metodu ISO	Birim	Değer
Özgül Ağırlık	1183	gr/cm ³	1.15
Su emme(doymuş)	62	%	7
Mekanik Özellikler			
Çekme Dayanımı	527	Kg/cm ²	850
Elastik Modülü	527	Mpa	4000
Kopma Uzaması	527	%	>20
Basma Dayanımı	179	Kg/cm ²	950
Basma Modülü	604	Mpa	2700
Darbe Dayanımı(çentiksiz)	179	Kj/m ²	Kırılmadı
Darbe Dayanımı(çentikli)	180	Kj/m ²	5.6
Sertlik	868	Shore D	84
Termal Özellikler			
Isı Genleşme Katsayısı	11359	°C ⁻¹	8 x 10 ⁻⁵
Elektriksel Özellikler			
Dielektrik Sabiti	60250		3.7
Dielektrik Dayanımı	60243	kV/mm	25
Hacimsel Direnç	60093	Ω cm	>10 ¹⁴
Yüzeysel Direnç	60093	Ω	>10 ¹³

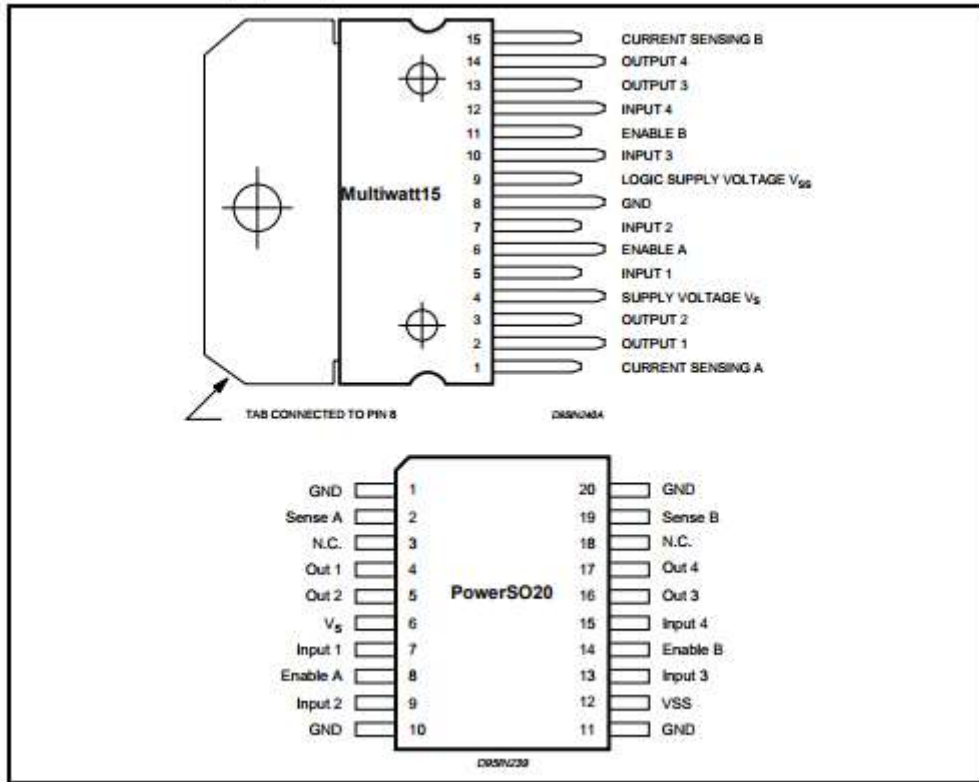
EK4 L298 MOTOR SÜRÜCÜ ÖZELLİKLERİ



Şekil EK4.1 L298 Motor sürücü entegresi

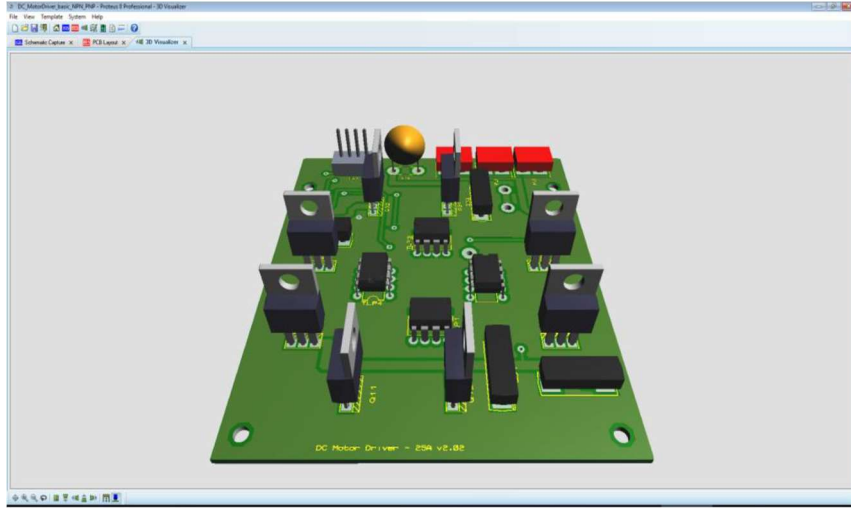
Symbol	Parameter	Value	Unit
V_s	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_i, V_{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_o	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive ($t = 100\mu s$)	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$)	2.5	A
	- DC Operation	2	A
V_{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_j	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

Şekil EK4.2 L298 özellikleri

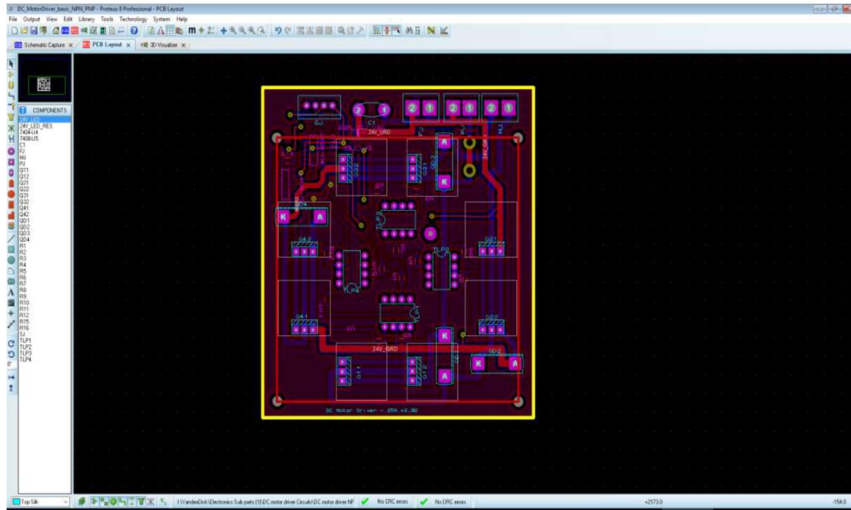


Şekil EK4.3 L298 pin girişleri

EK5 DEVRE ŞEMALARI



Şekil EK5.1 DC motor sürücü devresi(1)



Şekil EK5.2 DC motor sürücü devresi(2)

EK6 BNO055 ÖZELLİKLERİ

OPERATING CONDITIONS BNO055						
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Supply Voltage (only Sensors)	V_{DD}	--	2.4	--	3.6	V
Supply Voltage (μ C and I/O Domain)	V_{DDIO}	--	1.7	--	3.6	V
Voltage Input Low Level (UART, I2C)	V_{DDIO_VIL}	$V_{DDIO} = 1.7-2.7V$	--	--	0.25	V_{DDIO}
		$V_{DDIO} = 2.7-3.6V$	--	--	0.3	V_{DDIO}
Voltage Input High Level (UART, I2C)	V_{DDIO_VIH}	$V_{DDIO} = 1.7-2.7V$	0.7	--	--	V_{DDIO}
		$V_{DDIO} = 2.7-3.6V$	0.55	--	--	V_{DDIO}
Voltage Output Low Level (UART, I2C)	V_{DDIO_VOL}	$V_{DDIO} > 3V, I_{OL} = 20mA$	--	0.1	0.2	V_{DDIO}
Voltage Output High Level (UART, I2C)	V_{DDIO_VOH}	$V_{DDIO} > 3V, I_{OH} = 10mA$	0.9	0.8	--	V_{DDIO}
POR Voltage threshold on VDDIO-IN rising	V_{DDIO_POT+}	V_{DDIO} falls at 1V/ms or slower	--	1.45	--	V
POR Voltage threshold on VDDIO-IN falling	V_{DDIO_POT-}		--	0.99	--	V
Operating Temperature	T_A	--	-40	--	+85	$^{\circ}C$
Total supply current normal mode at T_A (9DOF @100Hz output data rate)	$I_{DD} + I_{DDIO}$	$V_{DD} = 3V, V_{DDIO} = 2.5V$	--	--	12.3	mA
Total supply current Low power mode at T_A	I_{DD_LPM}	$V_{DD} = 3V, V_{DDIO} = 2.5V$	--	--	0.4	mA
Total supply current suspend mode at T_A	I_{DD_SUSM}	$V_{DD} = 3V, V_{DDIO} = 2.5V$	--	--	0.04	mA

Şekil EK6.1 BNO055 elektriksel parametre özellikleri

Parameter	Symbol	Condition	Min	Max	Units
Voltage at Supply Pin	V_{DD} Pin		-0.3	4.2	V
	V_{DDIO} Pin		-0.3	3.6	V
Voltage at any Logic Pin	$V_{non\ supply}$ Pin		-0.3	$V_{DDIO} + 0.3$	V
Passive Storage Temp. Range	Trps	$\leq 65\%$ rel. H.	-50	+150	$^{\circ}C$
Mechanical Shock	$MechShock_{200\mu s}$	Duration $\leq 200\mu s$		10,000	g
	$MechShock_{1ms}$	Duration $\leq 1.0ms$		2,000	g
	$MechShock_{free\ fall}$	Free fall onto hard surfaces		1.8	m
ESD	ESD_{HEM}	HBM, at any Pin		2	kV
	ESD_{CDM}	CDM		400	V
	ESD_{MM}	MM		200	V

Şekil EK6.2 BNO055 mutlak maksimum değerleri