

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKILLI YÖNTEMLERLE NESNE TANINMASI VE ROBOT KOLU
KONTROLÜ**

Muhammet Ali ARSERİM

Tez Yöneticisi
Prof. Dr. Yakup DEMİR

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELAZIĞ, 2009

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKILLI YÖNTEMLERLE NESNE TANINMASI VE ROBOT KOLU
KONTROLÜ**

Muhammet Ali ARSERİM

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez,/...../..... tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman	: Prof. Dr. Yakup DEMİR	
Üye	: Prof. Dr. Mustafa POYRAZ	
Üye	: Prof. Dr. Mehmet AKIN	
Üye	: Prof. Dr. Erhan AKIN	
Üye	: Doç. Dr. Mehmet KAYA	

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam süresince, her konuda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Pof.Dr.Yakup DEMİR'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bilimsel olarak desteklerini esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. Ayşegül UÇAR, Arş.Gör. M. Temel ÖZDEMİR, Arş.Gör. Ramazan POLAT, Yrd.Doç.Dr. Yavuz EROL, Arş.Gör. Mehmet POLAT, Arş.Gör. Abuzer ÇALIŞKAN, Yrd.Doç.Dr. Bilal GÜMÜŞ, Elektrik-Elektronik Yük.Müh. Hakan Çelik, Yrd. Doç.Dr. Mustafa TÜRK ile bölümümüzün diğer akademik personeline ve ayrıca manevi desteklerini her zaman gördüğüm bölümümüzün idari personeline teşekkür ederim.

Ayrıca doktora öğrenimim süresince maddi ve manevi açıdan her türlü desteği sunan ailem ile arkadaşlarım M. Sıtkı DÖNER, Ercan GEDİK ve İsmail DOLAP'a da teşekkür ederim.

Muhammet Ali ARSERİM

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VIII
SİMGELER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Organizasyonu	4
2. GÖRÜNTÜNÜN ELDE EDİLMESİ VE STEREO GÖRME.....	6
2.1. İnsan Görme Sistemi	6
2.2. Kamera	7
2.2.1. Video Kameralar	8
2.2.1.1. Vidikon Kameralar	8
2.2.1.2. CCD Kameralar.....	9
2.2.1.3. CMOS Kameralar.....	10
2.3. Stereo Görme	10
2.3.1. Homojen Koordinatlar	11
2.3.2. Kamera Ve Gerçek Dünya Koordinatları	11
2.3.3. İdeal İğne-Delikli Kamera	13
2.3.4. İğne-Delikli Kamera Modeli İçin Epipolar Geometri	15
2.3.5. Paralel Eksenli Stereo Görme	18
3. ROBOT MANİPÜLATÖRLER	20
3.1. Robot Sistemlerinde Koordinat Dönüşümleri	21
3.2. Robot Manipülatörün İleri Yön Kinematığı.....	22
3.2.1. Denavit- Hartenberg (D-H) Yöntemi.....	22
3.2.2. Beş Dönel Eksenli Robotun İleri Yön Kinematığı.....	24

3.3. Robot Manipulatörlerin Ters Kinematığı	26
3.3.1. Ters Kinematik Çözümlerin Genel Özellikleri	27
3.3.1.1. Çözümlerin Varlığı	27
3.3.1.2. Çözümlerin Tekliği	27
3.3.2. El Konfigürasyonu	28
3.3.4. Beş-Eksenli Dönel Robotun El Konfigürasyonu	29
4. YAPAY SİNİR AĞLARI VE BULANIK MANTIK.....	32
4.1. Yapay Sinir Ağları	32
4.1.1. Perseptron.....	34
4.1.2. İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları.....	34
4.2. Bulanık Mantık	38
4.2.1. Bulanık Kümeler ve Üyelik Fonksiyonları	39
4.2.2. Mantık İşlemleri ve If-Then Kuralları.....	39
4.2.3. Bulanık Çıkarım Sistemi	40
5. ÖZELLİK ÇIKARIMI VE ZERNİKE MOMENT METODU	42
5.1. Moment Metodu.....	42
5.1.1. Geometrik Moment Tanımı.....	42
5.1.2. Düşük Dereceli Momentler	43
5.1.3. Moment Bağımsızları	43
5.2. Dikgen Momentler	44
5.3. Zernike Moment Metodu	45
5.4. Zernike Momentlerinin Geometrik Momentlerden Elde Edilmesi	48
6. DENEYSEL DÜZENEK VE ÇALIŞMA	52
6.1. Deneysel Düzeneği Oluşturan Kısımlar	52
6.1.1. Aktif Kamera Sistemi.....	52
6.1.2. DSP-FPGA Tümlleşik Görüntü İşlemci.....	54
6.1.3. Robot Kolu ve Kontrol Ünitesi	56
6.1.3.1. Robot Kolu	57
6.1.3.2. Robot Kolu Kontrolör Ünitesi.....	58
6.1.4. Deneysel Düzenekte Çeşitli Amaçlar için Tasarlanan Giriş ve Çıkış Devreleri	59
6.1.4.1. PIC Mikrodenetleyici Devresi	59
6.1.4.2. FPGA Giriş Portu Devresi	60

6.1.4.3. FPGA Çıkış Kartı.....	62
6.2. DSP-FPGA Tümlleşik Görüntü İşlemcinin Programlanması ve Çalışması	63
6.2.1. Görüntü İşlemcinin Çalışma Prensihi	65
6.2.1.1. BT.656 Formatı	66
6.3. Deneysel Çalışma.....	67
6.3.1. Deneysel Çalışmaya Ait Bir Örnek.....	75
7. SONUÇLAR	86
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ.....	93
EKLER.....	94

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Gözün enine kesiti.....	7
Şekil 2.2 Vidikon kameranın yapısı ve bileşenleri.....	9
Şekil 2.3 Referans ve kamera koordinatları	12
Şekil 2.4 İdeal iğne-delikli kamera modeli	14
Şekil 2.5 Derinliğin kamera düzleminde tek bir noktaya yansımaları.....	14
Şekil 2.6 Dünya koordinat sistemindeki bir noktanın görüntü düzlemine yansıtılması.....	15
Şekil 2.7 Epipolar düzlem	16
Şekil 2.8. Bir görüntüdeki bir noktanın diğer bir görüntüye tanımlanan düzlem yoluyla transferi	16
Şekil 2.9 Optik eksenleri paralel stereo görme sistemi	19
Şekil 3.1 Robotların eklem çeşitlerine göre sınıflandırılması	21
a) Kartezyen robot	21
b) Silindirik robot	21
c) Küresel robot	21
d) SCARA robot	21
e) Dönel robot	21
Şekil 3.2 D-H yönteminde kullanılan değişkenlerin gösterilmesi.....	22
a) eklem açısı(θ) ve eklem uzunluğu (d)	22
b) link uzunluğu (a) ve link bükme açısı (α)	22
Şekil 3.3 Bilek eksenleri çakışık 5 eksenli robotun eksenel gösterimi	25
Şekil 3.4 Yaklaşım vektörünün tabana göre oryantasyonu	26
Şekil 3.5 Robotun bir noktaya farklı pozisyonlarda yaklaşımı	27
Şekil 4.1 YSA'nın temel yapısı.....	33
Şekil 4.2 Nöronun basit yapısı	33
Şekil 4.3 Lineer olmayan aktivasyon fonksiyonlu ve tek katmanlı YSA' nın nöronu.....	35
Şekil 4.4 Çok katmanlı yapay sinir ağları	37
Şekil 4.5 Çeşitli üyelik fonksiyonları	39
a) Üçgen	39
b) Trapezoid	39
c) Gauss	39
d) Zil Biçimli	39
Şekil 4.6 FIS sisteminin blok şeması	40
Şekil 5.1. Kare görüntünün birim çembere eşlenmesi	47

a) NxN Piksellik Görüntü	47
b) Birim Çemberin Çapının Görüntünün Bir Kenarına Eşit Olması.....	47
c) Birim Çemberin Çapının Görüntünün Bir Kenarının $\sqrt{2}$ katına eşit olması ..	47
Şekil 5.2. Piksel işleme teknikleri	49
a)Klasik metot.....	49
b)Geometrik hatayı azaltmak için kullanılan metot.....	49
Şekil 6.1 Sistemin blok şeması.....	52
Şekil 6.2 Aktif kamera sistemin hareketli kısmı	53
Şekil 6.3 Görüntü işlemci kartı	54
Şekil 6.4 Görüntü işlemci kartının blok şeması	55
Şekil 6.5 Görüntü kartının işleyişi	56
Şekil 6.6 Robot kolu ve kontrolör ünitesi	57
Şekil 6.7.(a) Robot kolunun bileşenleri.....	58
(b) Robot kolunun eklem dönüş yönleri	58
Şekil 6.8 (a) Robot kolunun çalışma düzlemi(Üstten bakış).....	58
(b) Robot kolunun çalışma düzlemi(Yandan bakış)	58
Şekil 6.9. PIC mikrodeneleyici devresi.....	60
Şekil 6.10. FPGA giriş devresi.....	61
Şekil 6.11. FPGA giriş devresinin şeması.....	61
Şekil 6.12. FPGA çıkış devresi	62
Şekil 6.13. FPGA çıkış devresi şeması	63
Şekil 6.14. İşlemciler ve bağlantı şekilleri	64
Şekil 6.15. Görüntü işleme kartının video sinayellerinin işleyiş döngüsü	65
Şekil 6.16. BT. 666 video formatı.....	66
Şekil 6.17. Görüntü çerçevelerinin satırlarının gösterilimi	67
Şekil 6.18 Deneyde kullanılan nesneler	68
Şekil 6.19 Deneyde kullanılan nesnelerin Y bileşenleri	68
Şekil 6.20 Nesnenin stereo görüntüleri	69
Şekil 6.21 Nesnenin eşik fonksiyonlu stereo görüntüleri.....	69
Şekil 6.22 YSA'nın performans eğrisi	71
Şekil 6.23 Test verilerine göre YSA'nın çıkışı	71
Şekil 6.24 n noktasının düşey dönme noktasına göre gösterimi	72
Şekil 6.25 Kameranin yatay dönme noktasına göre koordinat dönüşümü	73
Şekil 6.26 Tabla ve robot kolu arasındaki koordinat dönüşümü	73
Şekil 6.27 Sol görüntü ve eşik fonksiyonu uygulanmış hali	75

Şekil 6.28 Sağ görüntü ve eşik fonksiyonu uygulanmış hali	75
Şekil 6.29 Robot kolunun nesneyi alma hareket sırası.....	76
Şekil 6.30 Robot kolunun ilk üç açısı	77
Şekil 6.31 Eğitimde kullanılan taban açısı ve YSA'nın çıkışı	78
Şekil 6.32 Testte kullanılan taban açısı ve YSA'nın çıkışı.....	78
Şekil 6.33 Eğitimde kullanılan omuz açısı ve YSA'nın çıkışı.....	79
Şekil 6.34 Testte kullanılan omuz açısı ve YSA'nın çıkışı.....	79
Şekil 6.35 Eğitimde kullanılan dirsek açısı ve YSA'nın çıkışı	80
Şekil 6.36 Testte kullanılan dirsek açısı ve YSA'nın çıkışı.....	80
Şekil 6.37 Servomotor Modeli ve Bulanık Kontrolör.....	82
a) Servomotor ve kapalı çevrim kontrol modeli.....	83
b) Bulanık PD+I kontrolör modeli	82
Şekil 6.38 Bulanık PD giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları	82
Şekil 6.39 Referans konum ve PID'ye bağlı çıkış ($Teta=\pm 310^\circ$).....	83
Şekil 6.40 Referans konum ve BM denetleyiciye bağlı çıkış ($Teta=\pm 310^\circ$).....	84
Şekil 6.41 Referans konum ve PID'ye bağlı çıkış ($Teta=\pm 310^\circ$).....	84
Şekil 6.42 Referans konum ve PID'ye bağlı çıkış ($Teta=\pm 50^\circ$).....	85
Şekil 6.43 Referans konum ve BM denetleyiciye bağlı çıkış ($Teta=\pm 50^\circ$).....	85

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Eklemlere ait D-H değikenleri	24
Tablo 6.1 Zernike moment katsayıları	70
Tablo 6.2. Bulanık PD kural tablosu	83

SİMGELER LİSTESİ

ϕ, θ, ψ	: Euler Açıları
$\tilde{X}_w$	: Noktanın dünya koordinat ekseninde homojen gösterimi
$\tilde{X}_c$	: Noktanın kamera koordinat ekseninde homojen gösterimi
R	: Rotasyon matrisi
t	: Yer değiştirme vektörü
K	: Kameranın iç parametre matrisi
Π	: Kameranın dış parametre matrisi
F	: Temel matris
H	: Homografi matrisi
e	: Epipole
$[t]_x$	: Bükülme simetri matrisi
D	: Diagonal matris
f	: Odak uzunluğu
${}^i_{i-1}T$	: Eklem dönüşüm matrisi
w	: El konfigürasyon vektörü
o_{iref}	: Referans çıkış vektörü
o_i	: Gerçek çıkış vektörü
η	: Öğrenme oranı
W	: Ağırlık matrisi
∇E	: Toplam hatanın eğimi
β	: Öğrenme katsayısı
μ	: Ortalama değer
σ	: Standart sapma
H	: Eğitim veri kümesinin giriş vektörüne karşılık gelen çıkış vektörü
$\mu()$	: Üyelik fonksiyonu

m_{pq}	:	(p+q). dereceden geometrik moment
μ_{pq}	:	Normalize geometrik moment
ρ	:	Pikselin koordinatlarından merkez noktasına çizilen vektörün boyu
Z_{pq}	:	Zernike polinomu
λ_p	:	Normalizasyon faktörü

KISALTMALAR LİSTESİ

YSA	:	Yapay Sinir Ağı
BM	:	Bulanık Mantık
DSP	:	Sayısal İşaret İşlemci (Digital Signal Processor)
FPGA	:	Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array)
CCD	:	Yük Bağlaşmalı Eleman (Charge Coupled Device)
CMOS	:	Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken (Complimentary Metal Oxide Semiconductor)
TDA	:	Tek Değerli Ayrıştırma
D-H	:	Denavit-Hartenberg
BÇS	:	Bulanık Çıkarım Sistemi

ÖZET

Doktora Tezi

AKILLI YÖNTEMLERLE NESNE TANINMASI VE ROBOT KOLU KONTROLÜ

Muhammet Ali ARSERİM

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2009, Sayfa: 98

Otomasyon, insanlar için tarihi çok eskiye dayanan bir çalışma konusudur ve her zaman ilgi çekmiştir. Otomasyonla ilgili çalışma alanlarından birisi de, robotlar ve uygulamalarıdır. Çeşitli görevleri yapmak için robotların uzuvlarının hareket ettiği düşünülürse, bu görevlerin yerine getirilmesinde çevresel verilerin toplanması ve bunların dikkate alınması önem kazanır. Bu verilerin toplanması için kamera gibi görsel algılayıcılar, sıklıkla kullanılmaktadır. İnsanlar için üç boyutlu algılamayı sağlayan stereo görme olayı, birden fazla kamera kullanarak bilgisayar görmesi için de oluşturulabilir. Böylece, stereo görme sisteminin bakış açısında bulunan sahnenin derinlik bilgileri de belirlenebilir. Bu derinlik bilgilerinin robot otomasyonlarında kullanılmasıyla; robotların nesneleri tanınması, alması ve belirli bir yere götürmesi ya da belirli bir iş için eklenen araçlarla çeşitli işleri yapması mümkün olur.

Bu tezde, nesnelerin görüntü içerisindeki yerine, oryantasyonuna ve görünen büyüklüğüne bağlı kalmadan tanınması ve belirli bir referans noktaya göre uzaklığının bulunması amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak da tezin kapsamı içerisinde bir deneysel düzenek oluşturulmuştur. Bu deneysel düzenekte aktif bir kamera sistemi, nesnelerin özelliklerinin çıkarılmasında kullanılan Zernike moment metodu algoritması, bu özelliklerin kullanılarak nesnelerin tanınmasını sağlayan bir Yapay Sinir Ağı (YSA) algoritması, tanınan nesnelerin yerlerini bulmada kullanılan bir stereo görme algoritması ile bir robot kolu ve kontrolör ünitesi kullanılmıştır. Ayrıca robot kolunun ilk üç eklemine ait açıları bulmada üç tane YSA kullanılmıştır. Robot kolunun eklem hareketlerini sağlayan elektrik motorlarının kontrolünün adaptif olarak yapılması, eklemlerin istenen pozisyonlara hızlı ve doğru bir şekilde ulaşması açısından önemlidir. Deneysel düzenekte kullanılan klasik PID kontrolörün performansı ile karşılaştırmak için, robot kolunun taban eklemine hareket ettiren elektrik motorunun Bulanık Mantık (BM) denetleyicisiyle kontrolünün benzetimi yapılmıştır.

Bu sistem içerisinde gerekli algoritmaları hızlı bir şekilde gerçekleştirecek DSP-FPGA gömülü kartı kullanılmıştır. Bu kart normal koşullar altında bir video görüntü işlemci kartı olarak tasarlanmıştır. Fakat çeşitli çalışmalar ve hazırlanan devrelerin sayesinde, stereo görüntü

işleme ve robot kolu için gerekli bilgileri gönderme işlemlerini yapabilme özelliği kazandırılmıştır.

Bu tez çalışmasının sonucunun farklı uygulamalarda kullanılması umulmaktadır. Çünkü bu sistem, nesne tanımayı, stereo görme işlemini, pozisyon belirlemeyi, robot kolunun ters kinematik probleminin YSA ile çözülmesi gibi çeşitli işlemleri bir arada yapmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İğne-delikli kamera, stereo görme, DSP, FPGA, gömülü sistem, robot kolu, ters kinematik problem, yapay sinir ağı, bulanık mantık

ABSTRACT

PhD Thesis

OBJECT RECOGNITION AND ROBOT ARM CONTROL BY INTELLIGENT METHODS

Muhammet Ali ARSERİM

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

2009, Page: 98

Automation is a working matter, which has a very long historical background, for human and always arouses interest. Also one of the working areas related with the automation is robots, and their applications. If it is thought that parts of a robot act for executing several tasks, collecting the environmental data and taking them in to account become important. Visual sensors like cameras are often used for collecting these data. Stereovision process, which provides human three dimensional sensing, can be formed for computer vision by using more than one camera. Therefore the depth information of scene in the field of view of stereovision system can be determined. The acts as object grasping, and taking them to the certain localization or doing certain works with attached tools can be possible for robots by using the depth information in robot automation.

In this thesis, it is aimed to recognize certain objects without regarding its location, orientation, and scale in a video frame and to determine object distance to a certain reference point. For this aim, an experimental system is implemented in the thesis concept. This system includes an active camera system, Zernike moment method, which is used in feature extraction, an Artificial Neural Network (ANN), used for recognition by using these features, a stereovision algorithm for determining the objects distance from a reference point, a robot arm and its controller unit. Also three ANN's are used for determining the angles of robot's first three joints. Adaptive control of electric motors, which actuates the joints of robot, is important from the viewpoint of robot's reaching the target quick and accurately. So a Fuzzy Logic (FL) controller simulation of the robot's base motor is done for comparing it with the performance of PID's, used in the experimental system.

In this system a DSP-FPGA based embedded card for implementing the necessary algorithms very fast. Normally, this card is designed as a video processor card, but it makes the card possess the features of stereovision process and capability of transmitting necessary information for robot arm after some efforts, and through circuits, prepared.

It is hoped that applications of this thesis can be used in different applications. Because this system executes several activities such as stereovision process, position estimation, and solving the inverse kinematic problem of the robot arm by neural network together.

Keywords: Pine-hole camera, stereovision, DSP, FPGA, embedded system, robot arm, inverse kinematic problem, artificial neural network, fuzzy logic

1. GİRİŞ

Robot; fiziksel nesneleri manipüle etmek üzere programlanan hareketler için bir veya birden çok uç-işlevcisini hareket ettirmede sensörleri kullanan, yazılım-kontrollü mekanik cihaz olarak tanımlanabilir [1]. Bunlar; endüstri, sağlık ve güvenlik başta olmak üzere birçok sektörde çeşitli görevleri yapmak için kullanılmaktadır.

Robotların kontrolü için çeşitli algılayıcılar (görsel, ultrasonik, kuvvet vs.), tek tek ya da birlikte kullanılabilirler. Robotların bazı işleri yapabilmesi için, görsel algılayıcı sistemlere ihtiyacı vardır. Görme sistemleri, elektronik bir kameradan alınan görüntüleri işleme esasına dayanır. Bu görüntülerden robotun görevi ile ilgili özellikler bulunur. Bu özellikler çeşitli işlemlerden geçirilerek kontrolöre uygun hale getirilir ve böylece robot kontrol edilir. Stereo görme sistemi, aynı görüntü sahnesi için farklı noktalardan birden fazla görüntünün elde edilmesi ve böylece görüş açısının içinde bulunan sahnenin derinliğine ait bilgilerin belirlenmesinde kullanılır. Stereo görme sisteminde, optik eksenleri paralel olan iki kameranın kullanılması, aykırılığın hesaplanmasını kolaylaştırmaktadır. Çünkü ayrı kameralardan alınan iki görüntü arasındaki fark, sadece yatay ekseninde oluşur. Bu tip kamera sistemleri, pratik uygulamalarda kullanılmaktadır.

Görüntü verilerine dayanılarak yapılan nesne tanıma, genellikle iki kategoride incelenir [2]. Bunlardan birincisi, nesneyi çevreleyen sınırları dikkate alarak yapılan tanımadır. İkincisi ise nesnenin görüntüsünü oluşturan görüntü elemanlarının tamamının kullanıldığı, bölge temelli tanımadır. İkinci kategorinin içerisinde yer alan moment metodu, nesnelerin tanınmasına ve bu nesnelerin görüntü içerisindeki geometrik yerlerinin bulunmasına olanak sağlar. Moment metodunun bu özellikleri, tezin amacına uygundur.

Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Bulanık Mantık (BM) yapay zekânın konularının içerisinde yer almaktadır. YSA, biyolojik nöral sistemlerden esinlenerek düzenlenmiş bir matematiksel modeldir. YSA, birçok bilim dalında geniş uygulama alanları bulmuş ve sınıflandırma, tahmin ve kontrol gibi problemlerin çözümüne başarılı bir şekilde uygulanmıştır [3]. YSA, öğrenmeyi temel almaktadır. Yani bir problemin o ana kadar hiç karşılaşmadığı bir durumunu, daha önceden öğrendiği bilgileri kullanarak çözer [4]. YSA, görüntü işlemenin ön işleme, özellik çıkartımı, bölütleme, nesne tanıma, görüntünün anlaşılması ve optimizasyon gibi konularına uygulanmıştır [5]. BM, insanın düşünce ve karar verme yapısına uygun olarak geliştirilen bir modelleme yöntemidir. Bu modelleme yöntemi, uzman kişilerin tecrübesi ve tecrübeye dayalı dilsel kuralların ortaya çıkarılmasına dayanmaktadır. BM, ilk kez Zadeh tarafından 1965 yılında ortaya atılmış ve 1970'lerde Prof. Ebrahim Mamdani ilk pratik bulanık sistemini, buhar makinesi kontrolörü olarak uygulamıştır [6, 7, 8].

Görüntü işleme ile ilgili algoritmalar, bilgisayar programları veya görüntü elde etme ve görüntü işlemeye yönelik olarak hazırlanan özel birimler vasıtasıyla yapılabilir. Genel amaçlı kullanıma yönelik tasarlanan bilgisayarların, gerçek zamanlı görüntü işlemede kullanılması zaman problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle gerçek zamanlı görüntü uygulamalarında, özellikle donanımsal olarak geliştirilmiş birimlere ihtiyaç vardır. Bu birimlere, sayısal işaret işlemci (Digital Signal Prosesor, DSP), alan programlanabilir kapı dizisi (Field Programmable Gate Array, FPGA) veya DSP-FPGA gömülü sistemleri örnek olarak verilebilir.

FPGA çok hızlı işlem yapan bir birimdir. Çünkü FPGA, işlemleri donanımsal olarak gerçekleştirmektedir ve FPG'nın içerisinde birden fazla işlemin aynı anda yapılabilmesi için paralel çalışan donanım blokları oluşturulabilir. FPGA'nın en önemli avantajlarından biri de donanımın program yoluyla değiştirilebilmesidir [9]. DSP ise özel işlemleri yapma amacı ile tasarlanmış bir merkezi işlem birimidir. DSP'nin programlanması, bilgisayarda yapılan programlamaya benzerdir. Bununla birlikte, yüksek dereceli kesinlik isteyen matematiksel işlemler için FPGA'nın yerine, DSP'nin kullanılması daha uygundur [10]. Günümüzde, görsel verilerin işlenmesi amacıyla uygun olarak tasarlanan DSP-FPGA gömülü sistemler bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, bu tür bir gömülü sistem kullanılmıştır. Gömülü sistem içerisinde bulunan FPGA, ham görüntü verilerini almakta, bu verileri BT.656 formatına dönüştürmektedir. Ayrıca FPGA, her piksele ait satır ve sütun indislerini belirlemekte ve görüntüye ait çeşitli ön işlemler yaptıktan sonra DSP'ye göndermektedir.

Görüntü verilerinin analizinden yola çıkarak, robot kolunu bir noktadan diğerine sevk etmek için robot kolunun lineer olmayan ters kinematik problemini çözmek gerekmektedir. Bu problemin analitik olarak çözümü, ancak belli varsayımlar altında yapılabilir. Bu çözüme alternatif olarak eğitilen bir YSA kullanılabilir.

Adaptif kontrol yöntemlerinden biri olan BM, elektrik motorlarının kontrolünde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajlarından birisi, matematiksel bir modellemeye ihtiyaç duymamasıdır. Ayrıca, sistem performansını etkileyen modellenmemiş birçok ortam değişkenine karşı, oldukça iyi sonuçlar üretmektedir. Robot kolunun hareketliliğini sağlayan motorların hız ve doğruluk ilişkisi açısından, BM kontrolörü klasik kontrolörlere göre daha iyi bir performans gösterebilir.

Declerc ve De Keyser, bir konveyörün üzerinde hareket eden kutuların etiketlerini tanımak için tek kameralı bir sistem kurmuşlardır [11]. Bu çalışmada, özellik çıkartımı için Zernike metodu kullanılmıştır ve bir YSA kullanılarak nesne tanıma yapılmıştır. Daha sonra bu nesneler, bir robot kolu tarafından ayrı ayrı yerlere bırakılmıştır. Chen ve diğerleri [12], metal kaynağında kullanılan robotun görsel verilerle kontrolünü yapmışlardır. Bu çalışmada, paralel eksenli stereo görme kullanılmış ve dikiş kaynakların köşe noktaları Zernike metodu ile

bulunmuştur. Bir başka çalışmada, stereo görme için kullanılan kalibrasyonsuz kameralardan alınan görüntülerin eşleştirilmesi için bir donanım önerilmiştir [13]. Bu çalışmada, noktaların eşleştirilmesi için Harriş köşe çıkartıcı ve Zernike momentleri kullanılmıştır. Gu ve Su [14], el hareketlerine bağlı insan robot etkileşiminde, özellik çıkarmada Zernike moment metodunu kullanmıştır. Ayrıca el pozisyonunun düzenli olmayan dağılımıyla ilgili, çok değişkenli karar verme ağacı ve parçalı doğrusallaştırma kullanılmıştır. Kim ve Kweon [15], 3 boyutlu nesne tanımada lokal Zernike momentlerini ve olasılıksal oylama yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada, tek kamera ile alınan görüntülerin bilgisayar destekli tasarımı gerçekleştirilmiştir. Nesne tanımada ise, alınan görüntü ve modelin lokal Zernike momentlerinin homografisi, olasılıksal oylama ile bulunmuştur. İnsanımsı bir robotun, göz-el koordinasyonunda stereo görme kullanılmıştır ve görsel geri beslemeyle robotun kamera kalibrasyonuna daha az bağımlı kalacağı elde edilmiştir [16]. Bir başka çalışmada, robot kolunun üzerine monte edilmiş stereo görme sistemi ile nesnelerin alınması konusu incelenmiştir [17].

Stereo görme işleyişinin, donanımsal veya yazılımsal olarak gerçekleştirildiği çalışmalar vardır [18, 19]. Gerçek zamanlı stereo görme uygulamaları için özel paralellik ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bunun için; FPGA, DSP veya bunlarda oluşan gömülü sistemler önerilmektedir [19]. Görüntü işleme konusunda yapılan bir çalışmada; donanımsal bir işlemci, bir P-3 bilgisayar ve bir yazılım benzetimi karşılaştırılmış ve gömülü sistemin diğerlerine göre daha hızlı olduğu belirtilmiştir [20].

Yapılan bazı çalışmalarda, robot kolunun ters kinematik problemi için YSA kullanılması önerilmiştir [21-23]. Bu çalışmalarda, robot kolunun uç işlevcisinin bilinen pozisyonundan, robotun eklem açılarının bulunması için YSA kullanılmıştır.

Geometrik moment metodu, ilk olarak Hu tarafından önerilmiştir [24]. Bu çalışmada 7 tane moment bağımsız tanımlamıştır. Teague, dikgen momentleri görüntüye uygulamış ve görüntünün tekrar bu momentlerden elde edilmesini ortaya koymuştur [25]. Teh ve Chin, çeşitli moment metotlarını ele almış ve pseudo-Zernike metodunu önermiştir [26]. Xin ve arkadaşları, kare görüntü düzleminin birim çembere eşleşmesinden doğan geometrik hatanın piksellerin bikübik dönüşümü ile azaltılabileceğini önermişlerdir [27]. Chong ve arkadaşları, lineerden dairesele görüntü eşleşmesi için yeni bir metot önermişlerdir [28]. Son dönemde yapılan çalışmalardan ikisi, Zernike momentlerinin geometrik momentlerde hızlı bir şekilde elde edileceğini göstermiştir [29-30]. Zernike, pseudo-Zernike metotlarını özellik çıkartımında kullanılırken sınıflandırıcı olarak YSA'nın önerildiği bazı çalışmalar da mevcuttur [31-34]. Kotoulas ve Andreadis ise yaptıkları çalışmada, Zernike moment metodunun hızlı olarak gerçekleştirilmesi için FPGA kullanmışlardır [35].

Bu tezin amacı; daha önceden belirlenen nesnelerin aynı anda alınan bir görüntü çiftinde görünen yerine, oryantasyonuna ve kapladığı alana bağlı kalmadan tanınması, görüntü çifti yardımıyla referans bir noktaya göre uzaklığının bulunması ve bir robot manipülatörün istenen nesneyi almasıdır. Bu amaca uygun bir örnek olarak, bir deneysel düzenek kurulmuştur. Bu düzeneğin ilk bloğu, seçilen nesnenin pozisyonunu belirlemede kullanılacak iki görüntüyü elde etmek üzere oluşturulan, optik eksenleri aynı çizgi üzerinde yer alan hareketli stereo görme sistemidir. Bu bloğun çıkışında elde edilen görüntü çiftleri, bir görüntü işleme kartına gönderilmektedir. Bu kart bir DSP-FPGA tümleşik kartıdır ve kameralardan ham görüntü verileri almak, bunları uygun formata dönüştürmek, çeşitli görüntü işleme uygulamalarını yapmak, YSA algoritmalarını oluşturmak ve nesnenin belirlenen pozisyon bilgisini robot manipülatörün kontrol ünitesine iletmek üzere düzeneğe yerleştirilmiştir. Düzeneğin son bloğu, istenen nesneyi alacak robot manipülatör ve buna ait kontrol ünitesidir. Robot kolunun eklem motorlarının kontrolünde kullanılan klasik PID kontrolörün performansını karşılaştırmak için, sistemin kontrol kısmına müdahale etme imkânı da olmadığından dolayı BM kontrolörün kullanımına ilişkin sadece bilgisayar benzetimi yapılmıştır.

1.1. Tezin Organizasyonu

Bölüm 2: Öncelikle insan görmesi ve kameralar hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra stereo görme anlatılmıştır. Burada, homojen koordinatlar ve koordinat takımlarının dönüşümünden bahsedilmiş ve ilgili matematiksel bağıntılar gösterilmiştir. Bunlara ilaveten, ideal iğne-delikli kamera modeli anlatılmış ve epipolar geometriyle iki kamerada oluşan görüntü arasındaki ilişki verilmiştir. Bu bölümün sonunda ise paralel eksenli stereo görmenin nasıl elde edildiği anlatılmıştır ve iki kamera arasındaki aykırılık mesafesinin hesaplanmasına yönelik matematiksel hesaplamalar gösterilmiştir.

Bölüm 3: Robotların ne olduğu, robot manipülatörlerdeki eklem çeşitleri ve robot manipülatörlerin eklem çeşitlerine göre nasıl sınıflandırıldıkları anlatılmıştır. Robot manipülatörlerin ileri kinematiği ve Denavit-Hartenberg metodu hakkında teorik bilgiler verilmiştir ve çakışık bilekli, 5 eksenli dönel robotun ileri kinematiği çıkarılmıştır. Ayrıca robot manipülatörlerin ters kinematiği anlatılmıştır. Daha sonra 5 eksenli dönel robotun ters kinematiğinin, el konfigürasyon vektörü kullanılarak analitik olarak hesaplanması gösterilmiştir.

Bölüm 4: Başlangıçta YSA hakkında genel bilgiler verilmiştir. İleri beslemeli YSA ve geri yayılım algoritması anlatılmıştır. Daha sonra BM, genel olarak anlatılmıştır. Ayrıca bulanık küme, üyelik fonksiyonları, mantık işlemleri, kural kümesi ve bulanık çıkarım sistemi hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 5: Başlangıçta özellik çıkarımıyla ilgili bilgiler verilmiştir. Daha sonra, bu konunun içerisinde yer alan moment metodu hakkında bilgiler verilmiştir. Bu bölümün içerisinde; geometrik momentler ve Zernike momentleri ile ilgili matematiksel bağıntılar, görüntünün birim çembere olan lineer dönüşümü için kullanılan bir teknik ve Zernike momentlerinin geometrik momentlerden nasıl elde edildiğine ilişkin hızlı çalışan bir metod gösterilmiştir.

Bölüm 6: Kurulan deneysel düzenek anlatılmıştır. Bu bölümün içerisinde, deneysel düzeneği oluşturan bloklar ve bu blokların nasıl çalıştığı hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca hazırlanan devrelere ait şemalar gösterilmiştir, çalışmaları anlatılmıştır ve BT.656 video görüntü iletim formatı anlatılmıştır. Daha sonra deneysel düzeneğin işleyişi bir örnekle açıklanmıştır.

Bölüm 7: Sonuç bölümünde, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve ileriye dönük öneriler irdelenmiştir.

Ek-1: Aktif stereo görme sisteminde kullanılan kontrolöre ait program.

Ek-2: Deneysel çalışmada kullanılan nesnelere ait farklı görüntüler için elde edilen Zernike moment katsayıları tablosu

Bu tez çalışması, TÜBİTAK tarafından hızlı destek projesi kapsamında 107E170 projesi ile desteklenmiştir.

2. GÖRÜNTÜNÜN ELDE EDİLMESİ VE STEREO GÖRME

Bilgisayar görme sistemi, elektronik bir kameradan alınan görüntüleri işler. Bu sistem, insanların görme sistemine dayanan beynin, göz tarafından türetilen görüntüleri işleme esasına benzemektedir [36]. Bilgisayar görmesi hakkında çalışılan konular oldukça fazladır ve bununla ilgili sistemlerin ticareti yapılmaktadır. Günümüzde çeşitli alanlarda kullanılan görme sistemleri vardır. Bu sistemlerle mekanik parçaların boyut tespiti, yiyeceklerin şekilsel olarak kalite kontrolü, otomatik yüz tanıma ve robotun cisimleri yakalaması gibi çeşitli işlemler yapılabilir. Görüntünün bilgisayar veya bilgisayar benzeri cihazlarla analizi için, genellikle piksel olarak adlandırılan resim elemanlarının bilgisayar tarafından işlenecek şekilde bir sayı dizisi olması gerekir. Film şeritli fotoğraf makinesinde çekilen anlık fotoğraf, iki boyutlu bir film karesinden elde edilmektedir. Bununla birlikte, dijital kameralarda görüntünün üzerine düşürüldüğü iki boyutlu CCD veya CMOS algılayıcısı bulunur. Bu yüzden, görüntüyle ilgili yapılan işlemlerde iki boyutlu işlemler yapılır.

İnsanlar, görüş açılarındaki sahnenin derinliğini, bu sahnenin sağ ve sol göz üzerine yansımadaki farktan çıkarmaktadırlar [37]. Buna, stereo etki denir ve bununla ilgili hesaplamalar tamamen geometrik olarak yapılır. Kameralarla ilgili stereo görmede iki veya daha fazla kamera kullanımı, bu kameralarda oluşan iki boyutlu görüntülerin, görme alanındaki sahnenin derinliğini çıkartmak için gerekmektedir.

2.1. İnsan Görme Sistemi

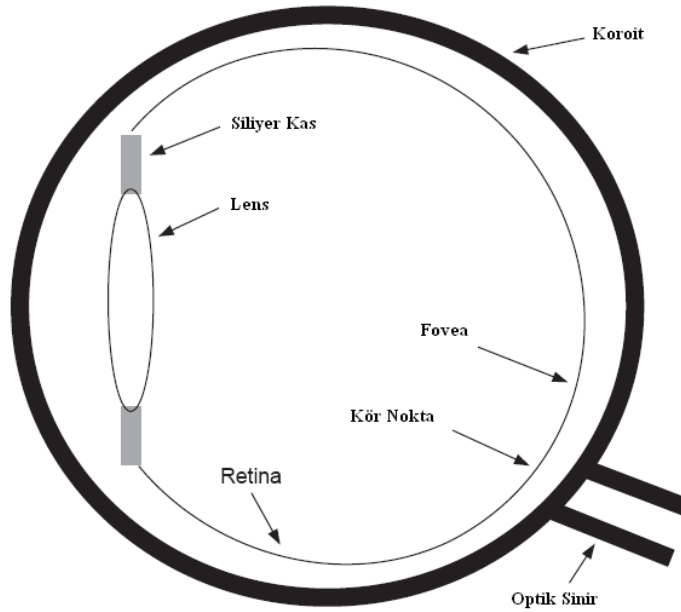
Göz, optik sinir ve beyinden oluşan insan görme sisteminin işleyişi karmaşık olmasına rağmen hızlı bir yapıdadır [37]. Bu sistem tarafından çok büyük miktardaki görsel veri, anlık olarak alınır ve çok kısa bir sürede işlenir. İnsanların ve diğer canlıların büyük bir kısmı için, en önemli algılayıcılardan birisi olan gözün fonksiyonu, görüntü oluşturmaktır Gözün basit yapısı, Şekil 2.1’de görülmektedir. Bir cisim deride nasıl dokunma hissi oluşturursa, ışık da göz için bir uyarıcıdır ve görme hissine neden olur. Işık, göz içerisinde düştüğü bölgede fotokimyasal ve elektriksel olmak üzere iki reaksiyona yol açar. Işık gözde aydınlık, şekil, kontrast ve renk hisleri olmak üzere dört tip duyu açığa çıkarır [37].

Göz, şekil olarak ortalama çapı 20 mm olan bir küreye benzer ve dış tabaka, damar tabaka ve retina olmak üzere üç kısımdan meydana gelir. Dış tabaka, gözün ön tarafında saat camı gibi saydam olan kornea ve geri kalan kısmı yumurta akına benzeyen skleradan meydana gelir [37]. Kornea, ortamdaki gelen ışınları bir miktar kırarak göz merceğine odaklar. Damar tabaka, gözün beslenmesinin ana kaynağı olan bir damar ağına sahiptir. Gözün en iç kısmındaki tabakaya retina denir. Retinanın dış yüzeyinde görme hücreleri, orta yüzeyinde bipolar hücreler

ve en ite ganglion hücreleri vardır. Ganglion hücrelerinin aksonları optik siniri oluşturur ve optik sinir görüntü bilgilerini beyine iletir. Retinada iki tip görme sensörü vardır ve bunlar şekillerinden dolayı koni ve çubuk olarak adlandırılırlar. Retinada yaklaşık olarak, 100 milyon çubuk ve 10 milyon koni hücreleri vardır. Koni hücrelerinin büyük çoğunluğu, retinanın fovea olarak adlandırılan odak bölgesinin içindedir ve bu hücreler renge duyarlıdır [38]. Koni hücrelerin görmesi, gün ışığı görmesi olarak adlandırılır ve detayların algılandığı görme şeklidir. ubuk hücreler ise retinal yüzeye dağılmışlardır, fakat foveada bulunmazlar. Bu hücreler konilere göre ışık şiddetinin daha düşük seviyelerine duyarlıdırlar, renkli görmede aktif değildirler ve gece görüşü (siyah-beyaz görme) bu hücrelerin uyarılmasıyla olur.

Gzn doğal lensinin odak uzunluğu, yaklaşık olarak 14 ile 17 mm arasındadır. Lensin kalınlığı, lensi tutan siliyer liflerin gerginliğine bağlıdır ve cisimlerin göze olan mesafesine göre lens bu siliyer lifler tarafından kalınlaştırılır veya düzleştirilir [38].

Ortamdaki nesnelerden yansıyan ışınların, büyük bir bölümü kornea ve göz merceğinden kırılarak geçer. Daha sonra, koni ve çubuk hücrelerinin büyük bir çoğunluğunun yer aldığı gözün arkasındaki retinanın merkez bölgesi ve yakın civarında toplanır. Bu bölgedeki çubuk ve koni adlı hücreler, gelen ışığı elektriksel uyarılara dönüştürür ve retina ile bağlantılı olan optik sinirde bu uyarıları beyine iletir ve beyinde görüntü oluşur.



şekil 2.1 Gzn enine kesiti.

2.2. Kamera

Görüntünün elde edilmesi için kullanılan düzenekler, genellikle kamera olarak isimlendirilir. Kamera terimi, karanlık oda anlamına gelen Latince camera obscura'dan

türetilmiştir. Durağan görüntüleri elde etmek için fotoğraf makineleri ve hareketli görüntüleri elde etmek için video kameralar kullanılmaktadır [39].

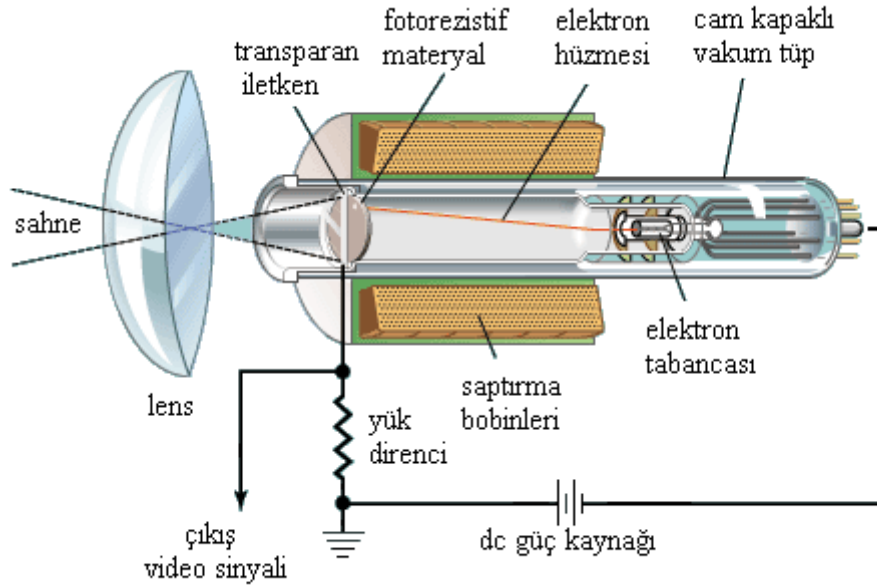
Günümüzde fotoğraf makinesi ve kamera özellikleri, tek bir cihazda toplanabilmektedir. Basit olarak kameraları oluşturan düzeneklerde ışığın girdiği bir açıklık, ışığı görüntünün oluşacağı yüzeye odaklayan bir lens ve görüntünün oluştuğu özel bir yüzey vardır. Fotoğraf makineleri ve kameralarda örtücü (shutter) olarak adlandırılan mekanizmada ile de mekanizma alınacak görüntü anı belirlenir. Bu bileşenlerin hepsi gözün yapısında da bulunur. Yani gözün; gözbebeği denilen bir açıklığı, lensi, görüntünün üzerine düştüğü özel bir bölgesi (retina) ve örtücü olarak da göz kapağı vardır.

2.2.1. Video Kameralar

Video kameralar; vidikon, yük bağlaşmalı eleman (CCD) ve bütünleyici metal oksit yarıiletken (CMOS) olarak üç ana grupta incelenir.

2.2.1.1. Vidikon kameralar

Vidikon kamera tüpü, ön yüzü ışığı bozmadan geçirmek için düz olarak yapılmış ve havası boşaltılmış bir cam tüptür. Ön yüzün arkasında, hedef levhası veya görüntü düzlemi olarak adlandırılan bir malzeme vardır. Bu malzeme iki tabakaya sahiptir. Bunlardan birincisi olan kameranın lensi tarafındaki tabaka (transparan iletken), ışığı geçirir ve elektrik akımını iletir. Bu tabaka, tüpü çevreleyen hedef halkası denilen bir metal ile elektrik akımının iletimini sağlar ve bu halkadan video işareti elde edilir. Hedef levhasının arka yüzeyindeki ikinci tabaka (fotorezistif malzeme) ışığa duyarlıdır. Bu tabakanın üzerine düşen ışık miktarına göre, elektronlar iletim bandına geçer ve bu elektronlar dış tabakaya doğru hareket eder. Bu hareket sonucunda ışığa duyarlı tabakada, optik görüntüye karşılık gelen bir pozitif yük dağılımı olur. Tüpteki elektron tabancası tarafından gönderilen ve tarama tarzında hareket eden bir elektron huzmesi, her görüntü elemanı üzerinde ilgili elemanın potansiyelini sıfır yapacak kadar elektron bırakır. Böylece bir elektrik akımı meydana gelir. Optik görüntüde değişen ışık şiddetine göre oluşan elektrik akımı da video işaretidir [40]. Vidikon kameranın yapısı ve bileşenleri Şekil 2.2’de verilmiştir [41].



Şekil 2.2 Vidikon kameranın yapısı ve bileşenleri.

2.2.1.2. CCD kameralar

CCD ve CMOS kameralarda hedef levhası, ayırık görüntü elemanlarının matris diziliminden meydana gelir ve gözün retina tabakasına benzer yapıdadır. CCD görüntü düzlemi içerisindeki her bir görüntü elemanı, yalıtılmış geçitli alan etkili tranzistörden oluşmuştur. Bu görüntü elemanlarının oluşumu için P-tipi bir yarıiletken üzerine çok sayıda geçit elektrodu konmuştur. Her elektroda uygulanan pozitif gerilim ile orantılı olarak, elektrodun altında bir elektrik alan oluşur ve bu alan, yarıiletkenin enerji iletim band seviyesini aşağıya çekerek bir potansiyel çukuru oluşturur. Daha sonra geçitlere clock darbeleri uygulandığında, her bir hücredeki elektrik yükü bir sonraki hücreye ilerler ve sonuncu hücreden çıkış bilgisi olarak alınır. Bu çıkış bilgisi, bir kondansatör vasıtasıyla dönüştürülen gerilim değeridir. Ancak bu süreç esnasında yüklerin miktarında bir değişim olmaz. Başlangıç anında sadece ilk hücrenin kontrol geçidine gerilimin uygulandığı ve yüklerin birinci hücrede biriktiği farz edilirse, potansiyel çukuru ilk hücrede meydana gelir. Bir sonraki clock palsında, ikinci hücrenin geçidine birinci hücrenin geçidinin sahip olduğu bir potansiyel uygulanırsa, eş potansiyel elde edilir ve yükler birinci hücreden ikinci hücreye doğru akmaya başlar. Bu süreçte ilk hücrenin geçit gerilimi yavaş yavaş azaltılır ve sonunda sıfır değerine getirilir. Bu sürenin sonunda da, birinci hücredeki bütün yükler ikinci hücreye aktarılmış olur. Daha sonraki clock palslarında, bu süreç sıralı olarak diğer hücreler içinde tekrarlanır ve böylece yükler kaydırılmış olur [40].

CCD görüntü düzlemi için işleyiş biraz daha farklıdır. Burada giriş elektrodu yoktur, bunun yerine geçitler elektrodu ışığı geçiren malzemeden oluşturulurlar. Gelen ışık

yarıiletkendeki elektronları uyarır ve serbest hale getirir. Ancak bu geçitlerin altında oluşan serbest yük miktarı, o bölgeye gelen ışık şiddeti ve pozlanma süresi ile orantılıdır. Görüntünün elektriksel olarak elde edilmesi için ışık, CCD düzlemi üzerine bir süreliğine düşürülür ve sonra CCD elemanlarının önü kapatılır. Bu durumda ekstra yük oluşmayacağından, hücrelerdeki yük miktarı sabit kalacaktır. CCD düzleminin dikey bileşenlerinin sonuncusu bir tane yatay satıra bağlıdır. Bu yatay satırın önü kapalı olduğundan dolayı ışık almaz ve bu satırda yük birikmesi olmaz. Düşey clock palslar uygulanarak, her bir satır bir aşağıya kaydırılır. Bundan sonra en alt satıra yatay clock palslar uygulanarak, bu satırın tümünün çıkışa aktarılması işlemi gerçekleştirilir. Bu iki olay, en son satırın aktarılmasına kadar devam eder ve görüntünün tamamı çıkışa aktarıldıktan sonra bir sonraki görüntü alma işlemi başlatılır [40].

Gerçek CCD görüntü elemanları için tasarım biraz daha farklı yapıdadır. Çünkü yüklerin çıkışa gönderilmeleri süresi boyunca, bu elemanlar ışık almamalıdır ve bu işlemin televizyon standartları ile uyumlu olması gerekir. Bu problemlerin aşılması için görüntü ve aktarma hücreleri ayrılmakta ve böylece pozlanma ve öteleme işlemleri birbirinden bağımsız olarak gerçekleştirilmektedir [40].

2.2.1.3. CMOS kameralar

CMOS kamera, CCD kamera ile benzer şekilde ayrıık görüntü elemanları matrisine sahiptir, ancak görüntü elemanların oluşturulma şekli CCD kameralardan farklılık gösterir [36]. CMOS kameralarda her bir görüntü elemanı fotodiyot ve CMOS'dan meydana gelir. Görüntü elemanının üzerine düşen ışık şiddetine göre, fotodiyotta bir potansiyel oluşur ve bu CMOS'un kapı devresine uygulanır. Görüntü elemanından elde edilen çıkış değeri oldukça düşük olmasına rağmen, bu çıkış değeri alınan ışık miktarı ile ilişkilidir.

CMOS algılayıcılar, CCD algılayıcılarına göre daha ucuzdur. Fakat her iki algılayıcının birbirlerine göre bazı üstünlükleri vardır. CCD görüntü elemanlarının boyutları, daha büyük olduğu için daha fazla miktarda ışık alabilirler. CMOS görüntü elemanlarında yük akışı gibi karışık işlemler ve beyaz ışığın dağılması gibi olaylar gözlenmez. Bununla birlikte uygulamada var olan koşullar ve arzu edilen özelliklere göre, bu algılayıcılardan herhangi biri tercih edilebilir [36].

2.3. Stereo Görme

Temel olarak görüntüleme tekniklerinin tümü, üç boyutlu uzayı iki boyutlu görüntü düzlemine dönüştürür. Görüntü düzleminde olmayan bir boyut, gözlenen sahnenin geometrisi hakkında çok fazla bilgi kaybına yol açar [42].

İnsanlar, sağ ve sol gözleri ile aynı sahnenin farklı görüntülerini görürler ve bu görüntülerden sahnenin derinliğini çıkartabilirler. Stereo etkisi tamamen geometrik olup, Öklit Geometrisinin kuralları kullanılarak bulunabilir. Kameralarla stereo görme olayı ise değişik pozisyonlardan alınan görüntülerdeki farklılıklardan, sahneye ait derinlik bilgilerinin hesaplanmasına dayanmaktadır [43].

2.3.1. Homojen Koordinatlar

2 boyutlu bir Öklit Uzayında bir nokta, (x, y) gibi bir reel sayı çifti olarak gösterilirler. Bu koordinat çiftine üçüncü bir koordinat eklenirse, noktanın gösterilimi $(x, y, 1)$ olur. Bu gösterilimle $(2x, 2y, 2)$ de aynı noktayı göstermektedir. Bunun genel hali, t sıfırdan farklı bir sayı olmak üzere (tx, ty, t) 'dir. İki boyutlu uzaydaki bu gösterilime noktanın homojen koordinatları denir ve gerçek nokta elde edilmek istenirse ilk iki koordinat üçüncü koordinata bölünür. Burada, (x, y) koordinatları ile $(x, y, 1)$ koordinatları aynı noktayı gösterir. Ancak $(x, y, 0)$ diye bir nokta gösterilimi yoktur. Bu nokta sonsuzdaki bir nokta olarak ifade edilir [43].

Klasik Öklit geometrisinde uzayın tümü homojendir. Bir koordinat eklendiği zaman sanki bir nokta merkez olarak alınmış gibi olur. Bunun özel bir koordinat takımının seçilmesinin bir sonucu olarak algılanması önemlidir. Sonuç olarak, Öklit yüzeyinin koordinatlarının kaydırıldığı ve rotasyona uğratıldığı bir başka koordinat takımı düşünülmelidir [42].

Üç boyutlu uzayda ise homojen koordinatlar (2.1)'de gösterildiği gibi 4 elemanlı bir sütun vektörü olarak ifade edilirler ve üç boyutlu nokta, homojen koordinatların ilk üç elemanının dördüncü elemanına bölünmesiyle bulunur [42].

$$\tilde{X} = [tX, tY, tZ, t]^T \quad (2.1)$$

2.3.2. Kamera ve Gerçek Dünya Koordinatları

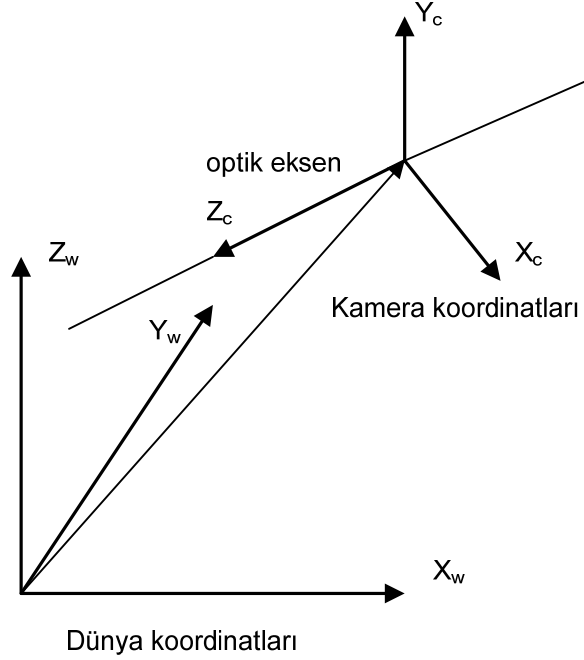
Nesneler üç boyutlu uzayda, gerçek dünya koordinatları ve kamera koordinatlarında olmak üzere iki şekilde gösterilirler ve bu gösterim Şekil 2.3'te verilmiştir [42]. Gerçek dünya koordinatları sahnenin gözlendiği koordinatlardır. Burada X_w ile Y_w yatay eksenler, Z_w ise düşey eksenidir. Diğer koordinat sistemi ise sahneyi gözleyen kamera koordinat sistemidir. Kamera koordinat sisteminin Z_c eksen, Şekil 2.3'ten görüleceği gibi, kameranın optik eksenine ile çakışmıştır. Herhangi bir noktanın kamera ve gerçek dünya koordinat eksenlerine göre vektörel gösterilimi

$$X_c = [x, y, z]^T \quad (2.2)$$

ve

$$\mathbf{X}_w = [X, Y, Z]^T \quad (2.3)$$

gibidir [42].



Şekil 2.3 Referans ve kamera koordinatları.

Gerçek dünya koordinatlarındaki herhangi bir noktayı, görüntü düzleminde gösterebilmek için yer değiştirme ve rotasyon işlemleri yapılır. Önce gerçek dünya koordinat sisteminin merkezi kamera koordinat merkezine kaydırılır, sonra da kaydırılmış dünya koordinat sisteminin uygun eksenleri rotasyona tabi tutularak, bu eksenlerin kamera koordinat düzlemi ile çakışması sağlanır. Yer değiştirme vektörel olarak çıkarma işlemiyle, rotasyon ise koordinat vektörünün bir matrisle çarpılma işlemiyle açıklanabilir [43]. Bu durumların matematiksel gösterimi

$$\tilde{\mathbf{X}}_c = R(\tilde{\mathbf{X}}_w - \mathbf{t}) \quad (2.4)$$

şeklindedir. Burada $\tilde{\mathbf{X}}_w$, noktanın dünya koordinat sisteminde homojen gösterimi ve $\tilde{\mathbf{X}}_c$ ise bu noktanın görüntü düzlemindeki yansımasının kamera koordinat ekseninde homojen gösterimidir.

Koordinat sisteminin rotasyonunda iki hususa dikkat edilmelidir. Yani rotasyon, vektörün uzunluğunu değiştirmemeli ve koordinat vektörlerinin dikliğine etki etmemelidir. Rotasyonda kullanılan yaygın bir algoritma Euler açılarını (ϕ , θ , ψ) kullanmaktır. Bu açılara bağlı Euler koordinat dönüşümü 12 şekilde yapılabilir ve hangi açıların kullanılacağı isteğe

bağlı olarak değişmektedir. Eğer sağ el koordinat sistemi ve z-x-z rotasyonunun saat yönünün tersi yönde olduğu durum seçilirse [42];

1) Z_w koordinatı ϕ açısı kadar döndürülür ve X_{w1}, Y_{w1} ve Z_{w1} eksen takımı elde edilir. R_ϕ matrisi

$$R_\phi = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

olur.

2) X_{w1} eksenini θ kadar döndürülür ve X_{w2}, Y_{w2} ve Z_{w2} eksen takımı elde edilir. R_θ matrisi

$$R_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

olur.

3) Z_{w2} eksenini ψ kadar döndürülür ve X_{w3}, Y_{w3} ve Z_{w3} eksen takımı elde edilir. R_ψ matrisi

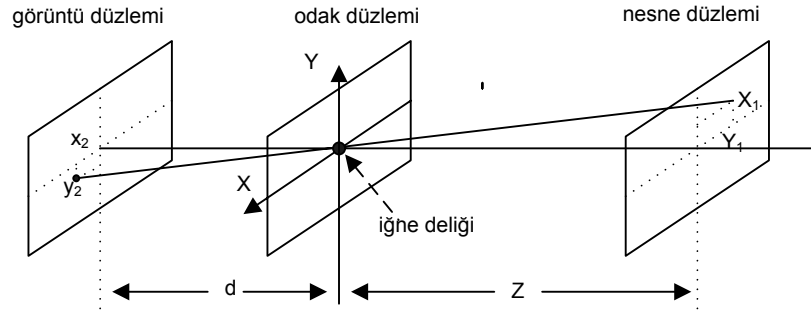
$$R_\psi = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

elde edilir ve $\mathbf{R}$ rotasyon matrisi 2.8' deki gibi olur.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{R}_\psi \mathbf{R}_\theta \mathbf{R}_\phi \\ &= \begin{bmatrix} \cos\psi \cdot \cos\phi - \cos\theta \cdot \sin\phi \cdot \sin\psi & \cos\psi \cdot \sin\phi + \cos\theta \cdot \sin\phi \cdot \sin\psi & \sin\theta \cdot \sin\psi \\ -\sin\psi \cdot \cos\phi - \cos\theta \cdot \sin\phi \cdot \sin\psi & -\sin\psi \cdot \sin\phi + \cos\theta \cdot \sin\phi \cdot \sin\psi & \sin\theta \cdot \cos\psi \\ \sin\theta \cdot \sin\phi & -\sin\theta \cdot \sin\phi & \cos\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.3.3. İdeal İğne-Delikli Kamera

İdeal iğne-delikli kamera modeli, kameranın görüş açısındaki sahne ve bu sahnenin görüntü düzlemi üzerine yansımaları arasındaki geometriyi anlamak için uygun bir modeldir [38]. Bu kamera modelinde optik açıklık bir nokta olarak düşünülür.



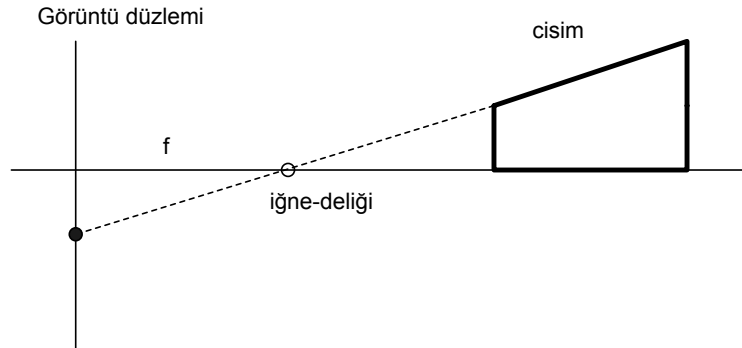
Şekil 2.4 İdeal iğne-delikli kamera modeli.

Şekil 2.4'ten de görüldüğü gibi nesne, $\mathbf{X} = [X_1, Y_1, Z]^T$ noktasında olsun. Bu noktadan yansıyan ışın kameranın çok küçük olan açıklığından geçer ve görüntü düzlemini $[x_2, y_2, d]$ noktasında keser. Üç boyutlu dünya ile 2 boyutlu görüntü düzlemindeki ilişki

$$x_2 = \frac{-d X_1}{Z} \quad (2.9)$$

$$y_2 = \frac{-d Y_1}{Z} \quad (2.10)$$

şeklindedir. Bu bağıntılardan görüldüğü gibi verilen herhangi bir noktanın dünya koordinatlarındaki iki boyutu kamera koordinatlarında ölçeklenmiştir. Buna ilaveten gerçek dünyadaki cisimlerin boyutları ve kameranın odak noktasından olan uzaklığı (bir boyut eksildiği için) görüntü düzlemindeki yansımadan çıkarılamaz [42]. Bu durum şöyle açıklanabilir: Dünya yüzeyindeki bir nesnenin aynı ışın üzerinde bulunan noktaları, görüntü düzleminde sadece bir noktaya yansır [42]. Bu anlatım, Şekil 2.5'de basit olarak gösterilmiştir. Bu şekilde cismin üst sınırındaki bütün noktaların, aynı ışın üzerinde kameraya düştüğü varsayılmıştır ve cismin üst çizgisi, görüntü düzleminde sadece bir nokta olarak yansımaktadır.



Şekil 2.5 Derinliğin kamera düzleminde tek bir noktaya yansması.

İğne-delikli kameralar için, kamera düzlemi ile gerçek dünya arasında, homojen koordinatlarda, (2.11)'deki ilişki bulunmaktadır [43, 44].

$$\tilde{\mathbf{X}}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R}\mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_w = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R}\mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

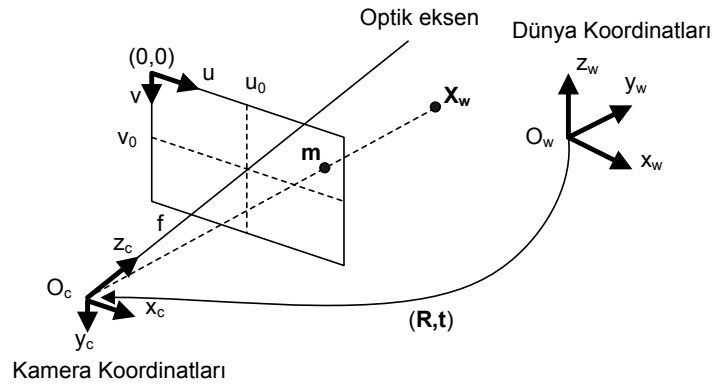
Şekil 2.6’da gösterildiği gibi üç boyutlu dünya koordinat sistemindeki bir $\mathbf{X}_w$ noktası homojen gösterilimle, $\tilde{\mathbf{X}}_w = [X, Y, Z, 1]$ olarak ve bu noktanın kamera düzlemine olan projeksiyonu ise homojen koordinatlarda, $\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]$ ile gösterilsin. Görüntü düzlemi CCD elemanı olarak kabul edilirse, iğne delikli kamera modeli

$$\tilde{\mathbf{X}}_c = \mathbf{K} \mathbf{\Pi} \tilde{\mathbf{X}}_w \quad (2.12)$$

gibi yazılır. Burada, $\mathbf{K}$ kameranın iç parametrelerini gösteren 3x3 matris ve $\mathbf{\Pi}$ ise kameranın dış parametrelerini gösteren 3x4 matristir [44].

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_u f & \gamma & u_0 \\ 0 & k_v f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Pi} = [\mathbf{R} | \mathbf{t}] \quad (2.13)$$

Ayrıca $\mathbf{K}$ matrisinde, k_u ve k_v birim uzunluğa karşılık gelen piksel sayısını, (u_0, v_0) kamera düzleminin merkez noktasının piksel cinsinden koordinatlarını, f odak uzunluğunu ve gamma ise eğrilik(skew) faktörünü ifade eder.

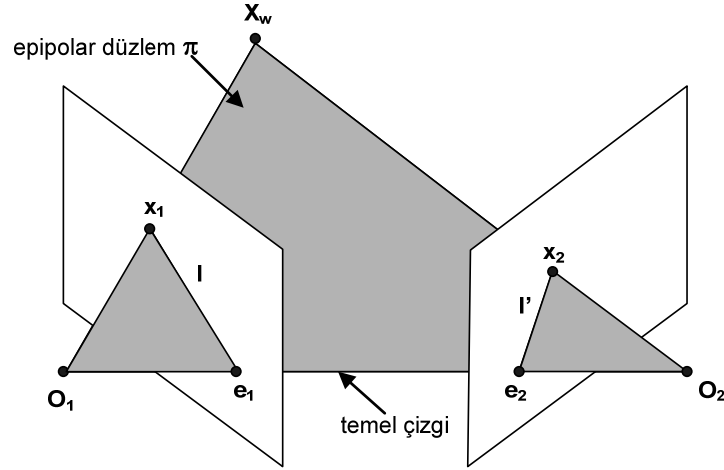


Şekil 2.6 Dünya koordinat sistemindeki bir noktanın görüntü düzlemine yansıtılması.

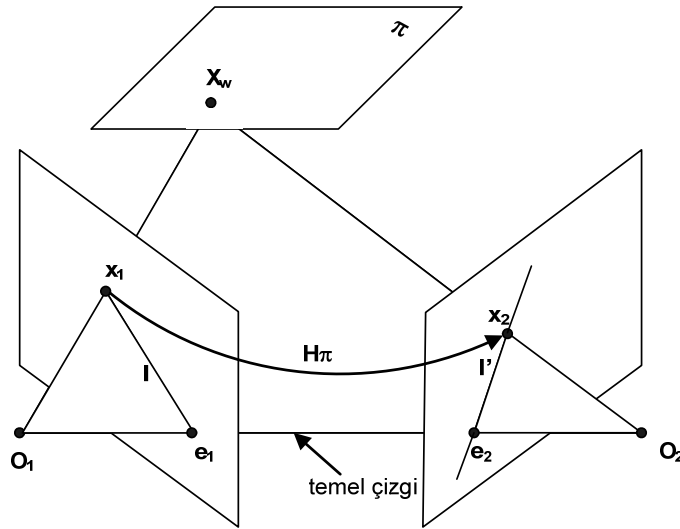
2.3.4. İğne-Delikli Kamera Modeli İçin Epipolar Geometri

İki görüntü arasındaki epipolar düzlem, kameraların optik merkezleri ile kamera düzlemlerinde görüntülenen nokta arasındaki düzlemdir ve bu bölge Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu şekilden görülebileceği gibi dünya koordinat düzleminde bir $\mathbf{X}_w$ noktası tanımlanmıştır ve kamera merkezi $\mathbf{O}_1$ olan kamera düzlemini $\mathbf{x}_1$ noktasında ve kamera merkezi $\mathbf{O}_2$ olan ikinci kamera düzlemini de $\mathbf{x}_2$ noktasında kesmektedir. Kamera düzlemlerindeki bu iki noktanın arasındaki ilişki epipolar geometri ile açıklanmaktadır [43].

Kameraların optik merkezlerini birleştiren çizgi, temel çizgi olarak adlandırılır. Bu çizgi görüntü düzlemlerini epipole noktalarında keser. Bir başka deyişle epipole, bir kameranın merkezinin diğer görüntüdeki yansımasıdır. Bir epipolar çizgi ise epipolar düzlemin görüntü düzlemi ile kesiştiği çizgidir [43].



Şekil 2.7 Epipolar düzlem.



Şekil 2.8 Bir görüntüdeki bir noktanın diğer bir görüntüye tanımlanan düzlem yoluyla transferi.

Epipolar geometrinin cebirsel gösterimi temel matris (F) olarak adlandırılır. Bu matrisin geometrik olarak çıkarılması, temel matrisin anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Bu çıkarım iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada Şekil 2.7'den de görüleceği gibi 1. görüntüdeki x_1 noktası 2. görüntü düzlemindeki l' epipolar çizgisinin üzerinde yer alacak x_2 noktasına eşleştirilir. İkinci aşamada ise l' epipolar çizgisi x_2 noktası ve e_2 epipolu birleştirilerek elde edilir. Bu işlemleri yaparken önce kamera merkezlerinden geçmeyen ve X noktasının üzerinde bulunduğu bir π düzlemi tanımlanır. Birinci kameranın merkezi ile x_1 noktasını birleştiren çizgi bu düzlemi X noktasında keser ve bu nokta görüntü düzlemindeki x_2 noktasına yansır [43].

$$\mathbf{x}_2 = \mathbf{H}_\pi \mathbf{x}_1 \quad (2.14)$$

Sonuç olarak bu ilişkidenden elde edilen $\mathbf{x}_2$ noktası ve $\mathbf{e}_2$ epipolü birleştirilerek epipolar çizgi elde edilir.

$$\mathbf{l}' = \mathbf{e}_2 \times \mathbf{x}_2 = [\mathbf{e}_2]_x \mathbf{x}_2 \quad (2.15)$$

Burada $[\mathbf{e}_2]_x$ skew-simetrik matris

$$[\mathbf{e}_2]_x = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_2 = [x \ y \ z]^T$$

olarak ifade edilir. Buradan $\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1$ cinsinden yazılırsa

$$\mathbf{l}' = [\mathbf{e}_2]_x \mathbf{H}_\pi \mathbf{x}_1 = \mathbf{F} \mathbf{x}_1 \quad (2.16)$$

olur ve burada

$$\mathbf{F} = [\mathbf{e}_2]_x \mathbf{H}_\pi \quad (2.17)$$

şeklindedir. Buna ilaveten temel matris kameraların iç parametre matrisleri $\mathbf{K}_1$ ve $\mathbf{K}_2$, kameraların göreceli yer değiştirme vektörü $\mathbf{t}$ ve rotasyon matrisi $\mathbf{R}$ 'ye göre

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}_2^{-T} [\mathbf{t}]_x \mathbf{R} \mathbf{K}_1^{-1} \quad (2.18)$$

olarak tanımlanır [39]. Burada $[\mathbf{t}]_x$

$$[\mathbf{t}]_x = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t} = [x \ y \ z]^T \quad (2.19)$$

olup, skew_simetrik matrisi göstermektedir [43]. Dünya koordinat sistemindeki herhangi bir $\mathbf{X}$ noktasıyla kamera düzlemlerindeki karşılığı olan $\mathbf{x}_1$ ve $\mathbf{x}_2$ noktaları arasındaki ilişki

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{F} \mathbf{x}_1 = 0 \quad (2.20)$$

şeklindedir [39]. Burada $\mathbf{F} \mathbf{x}_1$, ikinci kamera düzlemindeki $\mathbf{l}'$ epipolar çizgisini göstermekte ve $\mathbf{x}_2$ noktası bu çizgi üzerinde yer almaktadır. Bir çizgi üzerindeki noktanın çizgi ile skaler çarpılması sıfıra eşit olduğundan, epipolar çizgi ve $\mathbf{x}_2$ görüntü noktasının çarpımı 0 çıkar. Eğer $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ noktaları homojen koordinatlarda $\mathbf{x}_1 = [x_1 \ y_1 \ 1]^T$, $\mathbf{x}_2 = [x_2 \ y_2 \ 1]^T$ olarak verilmişse

$$x_2x_1f_{11} + x_2y_1f_{12} + x_2f_{13} + y_2x_1f_{22} + y_2y_1f_{22} + y_2f_{23} + x_1f_{31} + y_1f_{32} + f_3 = 0 \quad (2.21)$$

ilişkisi vardır. Eğer 9 elemandan oluşan bir $\mathbf{f}$ vektörü tanımlanırsa

$$[x_2x_1, x_2y_1, x_2, y_2x_1, y_2y_1, y_2, x_1, y_1, 1]\mathbf{f} = 0 \quad (2.22)$$

olarak gösterilir [39]. Eğer eşleşen nokta çiftlerinden n tane varsa

$$\mathbf{A}\mathbf{f} = \begin{bmatrix} x_2x_1 & x_2y_1 & x_2 & y_2x_1 & y_2y_1 & y_2 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{2n}x_{2n-1} & x_{2n}y_{2n-1} & x_{2n} & y_{2n}x_{2n-1} & y_{2n}y_{2n-1} & y_{2n} & x_{2n} & y_{2n-1} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{f} = 0 \quad (2.23)$$

olur. $\mathbf{A}$ matrisinin çözümünün tekliği için rankının 8 olması gerekir. Eğer görüntü verilerinin koordinatları kesin değilse, bu matrisin rankı 9 çıkabilir. Bu durumda en küçük kareler yöntemi kullanılır. $\mathbf{F}$, en küçük kareler yöntemi ile bulunan $\mathbf{A}$ matrisinin en küçük singüler değerine uyan singüler vektördür ve $\mathbf{A}$ matrisinin Tek Değerli Ayrıştırılmasıyla (TDA), $\mathbf{TDA} \mathbf{A} = \mathbf{UDV}^T$, ortaya çıkan $\mathbf{V}$ matrisinin son sütunudur. Ayrıca temel matrisin en önemli özelliği singüler ve rankının 2 olmasıdır. $\mathbf{F}$ için (2.22)'nin çözülmesiyle elde edilen sonuç matrisinin rankı genellikle 2 değildir. Bu yüzden $\mathbf{A}$ matrisinin TDA işleminden elde edilen $\mathbf{F}'$ 'nin düzeltilmesi gerekir ve bu düzeltme, $\mathbf{F}$ matrisinin $\mathbf{F}'$ matrisiyle değiştirilmesidir. $\mathbf{F}'$ matrisi ise Frobenius normunu, $\|\mathbf{F} - \mathbf{F}'\|$, $\det(\mathbf{F}')=0$ koşulunda minimize eden matristir. Bu matrisin bulunması için TDA tekrar kullanılabilir. $\mathbf{F}$ matrisinin tek değerli ayrıştırılması

$$\mathbf{F} = \mathbf{UDV}^T \quad (2.24)$$

şeklindedir. $\mathbf{D}$ diyagonal matrisi

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & t \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

olarak gösterilir ve $r \geq s \geq t$ koşulunu sağladığı düşünülürse, $\mathbf{F}'$ matrisi

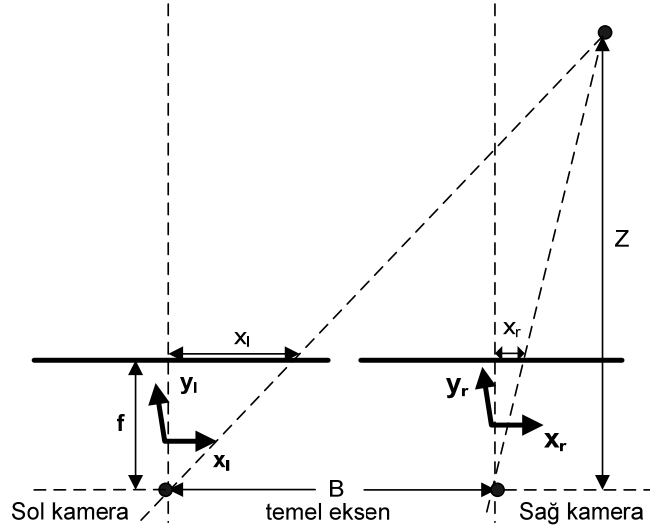
$$\mathbf{F}' = \mathbf{U} \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (2.26)$$

Frobenius normunu minimize eder [43].

2.3.5. Paralel Eksenli Stereo Görme

İki kameranın görüntü düzlemlerinin paralel olarak yerleştirilmesi ile paralel eksenli stereo görme elde edilmektedir ve bu durum Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Bu tip stereo görme sistemlerinde, iki görüntü arasındaki aykırılık mesafesi (d) basit geometrik işlemlerle

hesaplanabilmektedir. Bu tip stereo görme sistemlerinde cisimlerin iki görüntüdeki yansıması sadece görüntülerin yatay ekseninde yer değiştirmektedir [45].



Şekil 2.9 Optik eksenleri paralel stereo görme sistemi.

Şekil 2.9' dan görülebileceği gibi basit geometrik hesaplamalarla ve $d=x_l-x_r$ kabul edilirse

$$\frac{Z-f}{Z} = \frac{B-(x_l-x_r)}{B} \quad (2.27)$$

$$ZB - fB = ZB - Zd \quad (2.28)$$

işlemlerinden sonra, Dünya koordinat sistemindeki noktanın, kameranın optik noktasına olan uzaklığı,

$$Z = \frac{Bf}{d} \quad (2.29)$$

olur. Bu noktanın diğer eksenlerdeki bileşenleri de

$$X = \frac{Zx_l}{f}, Y = \frac{Zy}{f} \quad (2.30)$$

olarak bulunur ve daha önceden de bahsedildiği gibi iki görüntüdeki yükseklik de aynıdır.

3. ROBOT MANİPÜLATÖRLER

Robot, kompleks işleri birlikte yapabilme ve insanlar gibi karar verme yeteneğine sahip kontrol edilebilen bir manipülatördür [46]. Günümüzde robotlar; yük taşınması, boyacılık, kaynak endüstrisi ve tıp gibi çok çeşitli alanlarda insanlara hizmet etmektedir [47].

Robotlar, seri ve paralel olmak üzere iki temel gruba ayrılırlar. Seri robotlar bir dizi eklemler ve bu eklemleri oluşturan bağlardan meydana gelir, geniş çalışma uzayları vardır. Paralel robotlar ise ana çerçeve ile yük arasında pek çok paralel bağın bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Seri robotların kinematik denklemleri paralel manipülatörlere göre daha basittir, fakat paralel robotlar seri robotlara göre daha fazla ağırlık kaldırabilir [47].

Kinematik, geometrik bir sistemin yapısını ve hareketlerini inceleyen bilim dalıdır. Robot kinematiği ise robotun, üç boyutlu uzaydaki yapısı ve etrafındaki nesnelerin yerleşimi ile ilgilenir. Bununla ilişkili olarak yerleşim bilgisi, nesnelerin konumunu belirten bir konum vektörü ve yönelimini belirten bir yönelim matrisi ile tanımlanır. 3 boyutlu uzayda bir nesnenin konumunu ve yönelimini belirlemek için, o nesnenin merkezine bir koordinat düzlemi yerleştirilir. Eğer bu robot manipülatörler için yapıyorsa, robotun bütün eklemlerine ve çalışma uzayındaki bütün nesnelerin merkezlerine koordinat sistemleri yerleştirilir. Bu koordinat sistemlerinin yardımıyla robotun çalışma uzayındaki nesneler ve robot arasındaki yönelim ve konum ilişkisi tanımlanır [47].

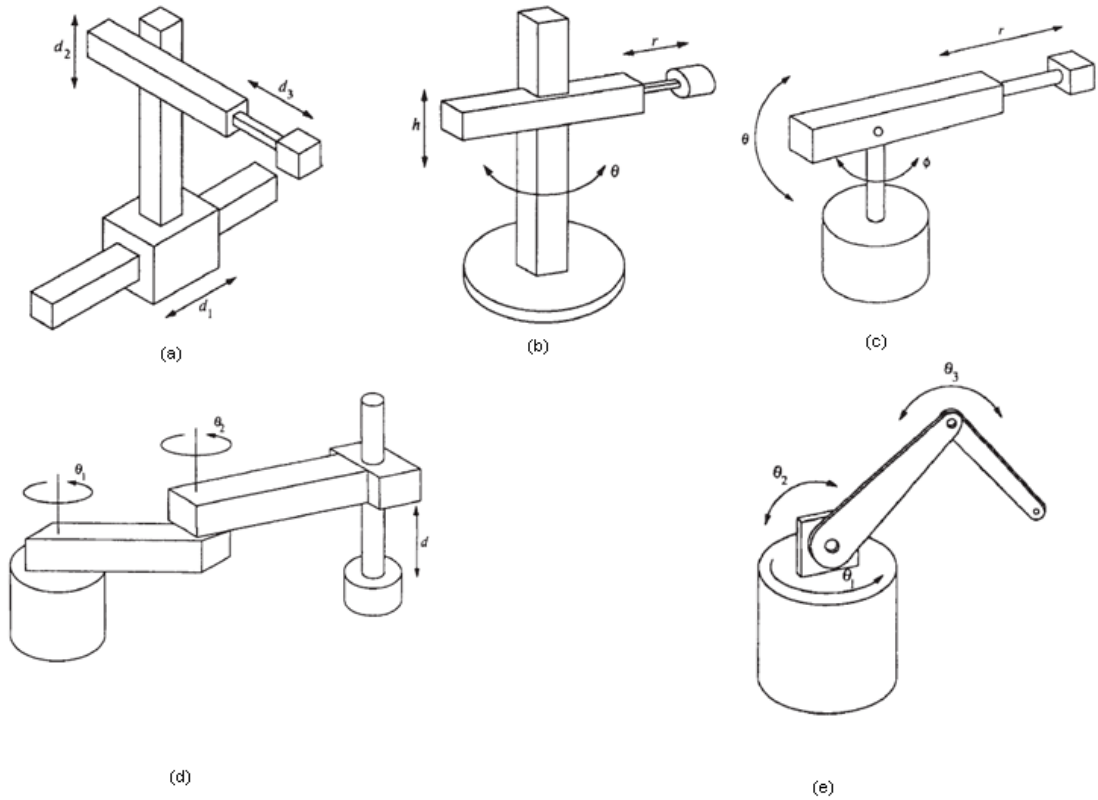
Robot manipülatörlerde bulunan eklemler, yaptığı harekete göre iki kategoride sınıflandırılır. Bunlar prizmatik ve dönel eklemler olarak adlandırılır. Dönel eklemler R ile gösterilir ve dönen bir eksen etrafında dönme hareketine izin vermektedir. Prizmatik eklemler P ile tanımlanır ve uzama veya teleskopik hareketle tarif edilir [46].

Robotlar eklem çeşitlerine göre sınıflandırıldıklarında, ilk üç bağın eklem özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu sınıflandırma, eklemlere ve eklemlerin düzenleniş şekillerine şöyle yapılmaktadır [47];

- 1) Eğer ilk üç bağın tümü prizmatik bağ ise robot kartezyen (PPP) düzenlemeye sahiptir. Bu robotlar ağır yük transferinde kullanılmaktadır.
- 2) Silindirik (RPP) düzenlemeli robotun ilk eklemi dönel, diğer iki eklemi prizmatiktir. Bu robotun geometrisinde, ikinci eklem birinci eklemle paralel ve üçüncü eklem ikinci eklemle diktir. Böylece robot bir silindirik çalışma uzayını tanımlayabilir.
- 3) Küresel (RRP) düzenlemeye sahip robotlarda, ilk iki eklem dönel ve üçüncü eklem prizmatiktir. Bu robotların çalışma uzayı küreseldir.

- 4) SCARA robotlar, RRP eklem düzenlenişine sahiptir. Bu düzenleşim eklem yapısına göre küresel düzenleşime benzese de, eklemlerin geometrisi açısından Küresel düzenleşimli robotlardan farklıdır. Bu robotlarda eklemler tamamen birbirine paraleldir.
- 5) Eğer robotun ilk üç eklemi de dönel ise bu robot dönel (RRR) düzenleşime sahiptir.

Bu robotların ilk üç eklemlerinin yaptığı hareketler Şekil 3.1’de gösterilmiştir [46].



Şekil 3.1 Robotların eklem çeşitlerine göre sınıflandırılması, **a)** kartezyen robot, **b)** silindirik robot, **c)** küresel robot, **d)** SCARA robot, **e)** dönel robot.

3.1. Robot Sistemlerinde Koordinat Dönüşümleri

Robot manipülatörler üç boyutlu bir çalışma uzayında hareket etmektedir. Bu durum, robotların ve çalışma uzayındaki nesnelerin birbirlerine göre koordinat ve yönelim tanımlamaları ihtiyacını doğurmaktadır. Bunu yapabilmek için de robotun her eklemine ve nesnelere bir koordinat sistemi yerleştirilir. Bütün bu koordinat sistemleri, evrensel çerçeve üzerinde bulunur ve herhangi bir noktanın konum veya yönelimi evrensel çerçeveye veya dünya çerçevesine göre yapılmaktadır [47].

3.2. Robot Manipülâtörün İleri Yön Kinematığı

Bir seri robot, taban çerçevesinden el çerçevesine doğru birbirlerine prizmatik veya döneleklemlerle birbirine tutturulmuş seri bağlardan meydana gelmektedir [47]. Her bir ekleme bir koordinat sistemi eklenirse, i . eklemden $(i-1)$. ekleme olan koordinat dönüşümü, ${}_{i-1}^iT$ dönüşüm matrisi ile tanımlanır. Arka arkaya sıralanan bu ekleme dönüşüm matrislerinden faydalanılarak, el ile taban çerçevesi arasında bir ilişki tanımlanır ve (3.1)'de gösterilen bu ilişki direkt kinematik olarak adlandırılır [1].

$${}^N_0T = {}^1_0T {}^2_1T {}^3_2T \wedge \dots \wedge {}^N_{N-1}T \quad (3.1)$$

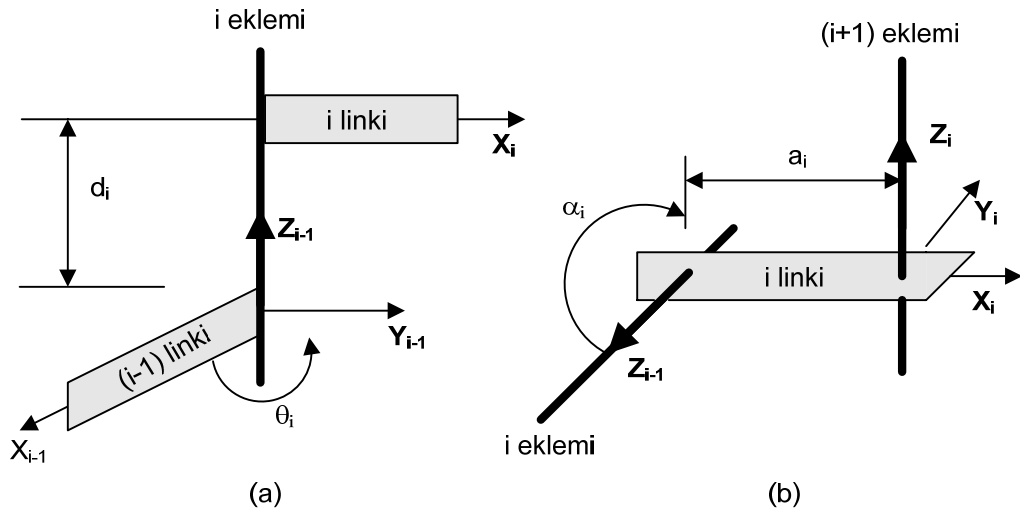
Robotların, el çerçevesi ile taban çerçevesi arasındaki direkt kinematığını belirlemek için Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem ardışıl iki ekleme arasındaki ilişkiyi sistematik notasyonla belirlemeye yarar [1].

3.2.1. Denavit- Hartenberg (D-H) Yöntemi

Bu yöntemle robot kinematığının çıkarılması için, aşağıda verilen 4 ana değişken kullanılmaktadır [1, 47].

- İki eksen arasındaki link uzunluğu (a_i)
- $i-1$ ile i eksenleri arasındaki açı (α_i)
- Üst üste çakışan bağlar arasındaki bağ kaçıklığı (d_i)
- İki bağ arasında oluşan ekleme açısı (θ_i)

Bu değişkenler Şekil 3.2'de gösterilmiştir [1].



Şekil 3.2 D-H yönteminde kullanılan değişkenlerin gösterilmesi: a) ekleme açısı(θ) ve ekleme uzunluğu (d), b) link uzunluğu (a) ve link bükme açısı (α).

Burada eklemlere koordinat yerleştirilmesi için aşağıdaki aşamalar takip edilir [47]:

- 1) Sistemdeki eklem eksenlerinin dönme ve kayma yönleri belirlenir. Burada eklem eksenleri, döner eksenler için dönme yönü ve prizmatik eklemler için kayma yönü Z eksenini olarak belirlenir.
- 2) Z eksenine dik olarak kol istikametinde X eksenini olarak kabul edilir ve sağ el kuralıyla Y eksenini belirlenir.
- 3) Bir seri robotun eklemlerine koordinat takımı yerleştirilirken, genellikle birinci eksenin dönme yönü Z eksenini olarak belirlenir. Daha sonra X eksenini kendi etrafında döndürüldüğünde, birinci Z ekseninin ikinci Z eksenine çakışmasını sağlayacak şekilde X yönü belirlenir.

Eklem koordinat sistemleri belirlendikten sonra, eklem değişkenleri şöyle adlandırılabilir [48].

- a) Z_{i-1} ile Z_i arasında X_i boyunca belirlenen uzunluk a_i 'dir.
- b) Z_{i-1} ile Z_i arasında X_i boyunca ölçülen açı α_i 'dir.
- c) X_{i-1} ile X_i arasında Z_{i-1} boyunca belirlenen uzunluk d_i 'dir.
- d) X_{i-1} ile X_i arasında Z_{i-1} boyunca ölçülen açı θ_i 'dir.

Belirlenen bu değişkenlerden faydalanılarak robotun bir eklemine ait dönüşüm matrisi eşitlik 3.2'de olduğu gibi elde edilir [48].

$${}_{i-1}^iT = D_{Z_{i-1}}(d_i)R_{Z_{i-1}}(\theta_i)D_{X_{i-1}}(a_i)R_{X_{i-1}}(\alpha_i) \quad (3.2)$$

Burada ${}_{i-1}^iT$ (3.3)'te verildiği gibi olur.

$${}_{i-1}^iT = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

D-H değişkenlerinin belirlenmesi için Tablo 3.1 kullanılarak çıkartılır. Bu tablonun satırlarındaki değişkenler kullanılarak, her bir ekleme ait dönüşüm matrisi elde edilir. Satır sayısı, robotun serbestlik derecesini belirlemektedir. Tablo 3.1'de yer alan α_i ve a_i değerleri, robot hareket ederken değişmemektedir. Buna karşın d_i ve θ_i , robotun hareketiyle değişen parametrelerdir ve her bir eklem için bu parametrelerden sadece biri değişken olarak seçilebilir [47].

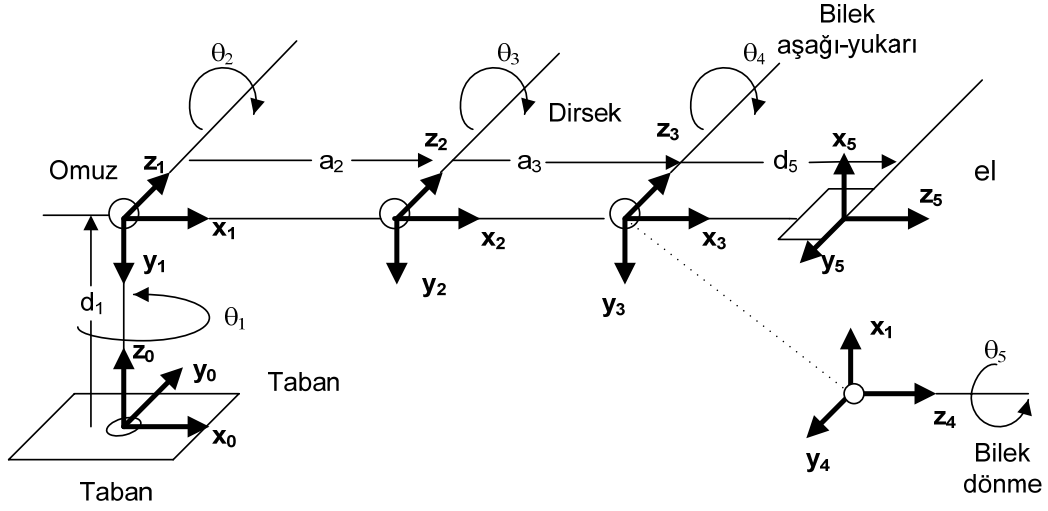
Tablo 3.1 Eklemlere ait D-H değikenleri

Eksen No	D-H Değişkenleri				i. Eklem Değişkenleri
i	α_i	a_i	d_i	θ_i	d_i veya θ_i
1	α_1	a_1	d_1	θ_1	d_1 veya θ_1
2	α_2	a_2	d_2	θ_2	d_2 veya θ_2
3	α_3	a_3	d_3	θ_3	d_3 veya θ_3
4	α_4	a_4	d_4	θ_4	d_4 veya θ_4
5	α_5	a_5	d_5	θ_5	d_5 veya θ_5

Tablo 3.1 ‘deki değişkenlerin yardımıyla her bir eklem için, (3.3)’te verilen genel eklem dönüşüm matrisi çıkartılır. Eklemlere ait bu matrislerin (3.1)’ de yerine konulmasıyla elin konumu ve rotasyonunu içeren ve eklem değişkenlerinin bir fonksiyonu olan 4x4’lük bir genel dönüşüm matrisi elde edilir [47].

3.2.2. Beş Dönel Eksenli Robotun İleri Yön Kinematığı

Bu tezde kullanılan robot beş dönel eksene sahip olduğundan, bu tip robotların ileri yön kinematığının bulunması gerekmektedir. Beş eksenli dönel robotta; taban, omuz, dirsek eklemlerine ilaveten elin aşağı yukarı ve dönme hareketleri vardır [1]. Bu tip robotlara çalışmada kullanılan SCORBOT-ER VPlus’a ilaveten Rhino XR-3 eğitim robotu ve Microbot Alpha II endüstriyel robotu örnek verilebilir. Bu çalışmada kullanılan robotta olduğu gibi Microbot Alpha II robotta taban motoru gövdeye dikey olarak monte edilmiş ve taban eksenini yatay olarak döndürmektedir. Omuz ve dirsek eklem motorları, gövdeye yatay olarak monte edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan robotun bilek eksenlerinin merkezleri, Microbot Alpha II’de olduğu gibi çakışıktır. Bu robotun yapısal formu, eklem eksenleri ve D-H değişkenleri Şekil 3.3’te gösterilmiştir [1].



Şekil 3.3 Bilek eksenleri çakışık beş eksenli robotun eksenel gösterimi.

Bu robotun bilek ile tabanı arasındaki dönüşüm matrisi (3.4)' de verilmiştir [1].

$${}^1_0T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^2_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_0T = {}^1_0T {}^2_1T {}^3_2T \quad (3.4)$$

$\cos q_k$, $\sin q_k$, $\cos(q_k+q_j)$ ve $\sin(q_k+q_j)$ değerlerinin, sırasıyla C_k , S_k , C_{kj} ve S_{kj} terimlerine kısaltılırsa (3.4)'deki dönüşüm matrisi (3.5) şeklinde yazılır [1].

$${}^3_0T = {}^1_0T {}^2_1T {}^3_2T = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & -S_1 & C_1(a_2 C_2 + a_3 C_{23}) \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -S_1 & S_1(a_2 C_2 + a_3 C_{23}) \\ -S_{23} & -C_{23} & 0 & d_1 - a_2 S_2 - a_3 S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Elden bileğe olan dönüşüm matrisi de (3.6)'da gösterilmiştir.

$${}^4_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^5_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

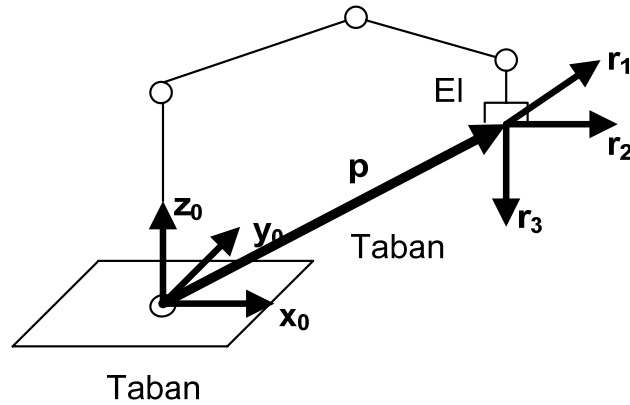
$${}^5_3T = {}^4_3T {}^5_4T = \begin{bmatrix} C_4C_5 & -C_4S_5 & S_4 & -d_5S_4 \\ S_4C_5 & -S_4S_5 & C_4 & d_5C_4 \\ -S_5 & -C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Böylece el ile taban arasındaki ilişki, (3.5) ve (3.6)'daki sonuç matrislerinin çarpımıyla elde edilir. Gerekli trigonometrik dönüşümler ve kısaltmalardan sonra oluşan sonuç matrisi, (3.7)'de verilmiştir [1].

$${}^5_0T = {}^3_0T {}^5_3T = \begin{bmatrix} C_1C_{234}C_5 + S_1S_5 & -C_1C_{234}S_5 + S_1C_5 & -C_1S_{234} & C_1(a_2C_2 + a_3C_{23} - d_5S_{234}) \\ S_1C_{234}C_5 - C_1S_5 & -S_1C_{234}S_5 - C_1C_5 & -S_1S_{234} & S(a_2C_2 + a_3C_{23} - d_5S_{234}) \\ -S_{234}C_5 & S_{234}S_5 & -C_{234} & d_1 - a_2S_2 - a_3S_{23} - d_5C_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Burada C_{ijk} ve S_{ijk} sırasıyla $\cos(q_i + q_j + q_k)$ ve $\sin(q_i + q_j + q_k)$ terimlerinin kısaltılmış halidir.

Elin, taban koordinatlarına göre pozisyon ve oryantasyonu Şekil 3.4'te gösterilmiştir. (3.7)'de verilen sonuç matrisi ve Şekil 3.4 göz önüne alındığında yaklaşım vektörü $\mathbf{r}_3$ ve pozisyon vektörü $\mathbf{p}$, elin θ_5 dönme açısından bağımsızdır [1].



Şekil 3.4 Yaklaşım vektörünün tabana göre oryantasyonu.

3.3. Robot Manipülörlerin Ters Kinematığı

Robot manipülörlerin ters kinematik problemi, kartezyen uzayda elin taban koordinat düzlemine göre verilen yer değiştirme ve rotasyon verileri yardımıyla eklem değişkenlerinin bulunması olarak tanımlanabilir. İleri kinematik problemlerde daima çözüm vardır. Ancak, robot manipülörlerin ters kinematik problemlerinin analitik çözümü her zaman olmayabilir. Ayrıca, ters kinematik problemin matematiksel çözümü her zaman fiziksel çözümü temsil etmeyebilir. Ters kinematik problemin çözümünün zorluk derecesi, eklemlerin yapısına bağlı olmaktadır. Yani, dönel eklem sayısı arttıkça çözüm de o derece zorlaşmaktadır [47].

3.3.1. Ters Kinematik Çözümlerin Genel Özellikleri

İleri kinematik problemlerinin genel bir çözümü olmasına rağmen, ters kinematik problemler için kesin bir çözüm bulmak, robotun özelliklerine bağlı olmaktadır [1]. Robotun ters kinematik probleminin çözümünde, normal durum 6 eksenidir. Böyle durumlarda, ters kinematiğin çözümleri sınırlı sayıda olur. Eğer serbestlik derecesi altıdan küçükse, el oryantasyonunu belli yönlerde sınırlama gibi serbestlik derecesini azaltan durumların dışında çözüm bulunamaz. Eklem sayısı altıyı geçen robotlarda sonsuz çözüm oluşur [48].

Ters kinematik problemlerin çözümünde; deküple ters dönüşüm, dönen cebir, dual matrisler, dual dörtlüler ve geometrik teknikler gibi çeşitli metotlar kullanılabilir. Lineer olmayan trigonometrik eşitliklerin kümesi, analitik olarak çözülememesine rağmen aynı merkezli bilek eksenlerine sahip robotlarda analitik çözüm yapılabilir [48].

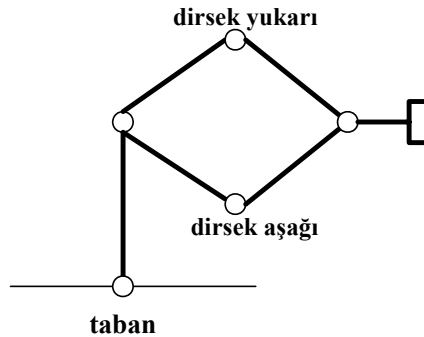
3.3.1.1. Çözümlerin Varlığı

Ters Kinematik problemlerin çözümü için bazı koşulların olması gerekmektedir. Bunlardan en önemlisi, elin pozisyonunun çalışma düzleminin içinde olmasıdır. Ancak bu durumda bile elin bazı oryantasyonları, bir veya daha fazla eklem değişkenlerinin limitlerini aşmadan çözülemeyebilir [1].

Ters kinematik problemin çözümündeki zorluk bilek eksenleri çakışık robotlarda azalmaktadır. Bu tip robotlarda ters kinematik problem, bilekte iki küçük probleme ayrılır. Bu problemlerde; elden bileğe ve bilekten tabana olan dönüşümlerdir [1].

3.3.1.2. Çözümlerin Tekliği

Ters kinematik problemin çözümünün varlığı, tek başına yeterli olmamaktadır. Çünkü bu çözümler birden fazla olabilir. Yani robot kolu bazen bir noktaya birden fazla yoldan ulaşabilir. Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi robot aynı noktaya iki farklı şekilde gitmektedir.



Şekil 3.5 Robotun bir noktaya farklı pozisyonlarda yaklaşımı.

Bu nokta el konfigürasyon yüzeyinde aynıdır. Bunun nedeni aynı rotasyonu ve yer değiştirmeyi üretmeleridir. Ancak çözümler eklem yüzeyinde tamamen farklıdır [1].

3.3.2. El Konfigürasyonu

El koordinatlarından taban koordinatlarına göre, kol matrisi (3.8)'deki gibi verilsin. Bu matristeki $\mathbf{R}$ bileşenleri rotasyon ve p bileşenleri ise yer değiştirme ile ilgili matris elemanlarıdır [43].

$${}_{taban}^{tutacak}T = \begin{bmatrix} R & \vdots & p \\ \dots & \vdots & \dots \\ 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \vdots & p_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \vdots & p_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & \vdots & p_3 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$\mathbf{R}$ matrisi saf koordinat dönüşümü olduğundan dolayı bir ortonormal yüzeyden diğerine rotasyonu gösterir. Buradan $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$ özelliği göz önüne alınırsa, $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$ olur. Yani $\mathbf{R}$ nin üç sütunu da ortonormal set oluşturur. Mutual ortogonalite (3.9)'a yol açar [1].

$$\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2 = 0, \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_3 = 0, \mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{r}_3 = 0 \quad (3.9)$$

Bu eşitlikler, $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$ eşitliğinin diyagonal olmayan terimlerinden gelmektedir. Diyagonal bileşenlere bakıldığında oluşan ekstra koşullar,

$$\|\mathbf{r}_k\| = 1, \quad 1 \leq k \leq 3 \quad (3.10)$$

gibidir. El oryantasyonunun, saf rotasyon $\mathbf{R}$ matrisinin son sütunundan (yaklaşım vektörü- $\mathbf{r}_3$) sağlandığı düşünülürse; yaklaşım vektörü el normal vektörünü ve kayma vektörünü belirler. Ancak el dönme vektörü yaklaşım vektörüyle belirlenemez, çünkü dönme açısı yaklaşım vektörü etrafındaki dönmeyi temsil eder. (3.10) bağıntısında olduğu gibi, $\mathbf{r}_3$ 'ün sadece bir yönde birim vektör olduğuna dikkat edilmelidir. Bu yaklaşım vektörünün uzunluğu, belirlenen yön değiştirilmeden pozitif bir katsayı ile ölçeklenebilir [1].

El dönme açısını ölçeklenmiş bir yaklaşım vektöründen elde etmek için, $\mathbf{r}_3$ vektörünü dönme açısı θ_n 'in geri döndürülebilir bir fonksiyonuyla ölçeklemek gerekmektedir. Bu açının sınırlanmadığı varsayılırsa (3.11)'de verilen pozitif, geri döndürülebilir, üstel ölçek fonksiyonu kullanılabilir [1].

$$f(\theta_n) \triangleq \exp \frac{\theta_n}{\pi} \quad (3.11)$$

Eğer $\mathbf{r}_3$ vektörü, $f(\theta_n)$ ile ölçeklendiğinde bu el oryantasyonu için tam bir gösterime yol açar. Bu fonksiyon ile el pozisyonu birleştirildiğinde (3.12)'deki gibi 6 boyutlu bir vektör oluşur ve bu vektör el konfigürasyon vektörü olarak adlandırılır [1].

$$\mathbf{w} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \dots \\ \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \dots \dots \dots \exp(\theta_n/\pi) \mathbf{r}_3 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

El konfigürasyon vektörünün 6 bileşeni vardır ve genel halde el konfigürasyonunun minimum gösterilimidir. Bu vektörün ilk üç bileşeni $\mathbf{w}_1=\mathbf{p}$ tutacağıın pozisyonunu ve diğer üç bileşeni $\mathbf{w}_2=[\exp(\theta_n/\pi)]\mathbf{r}^3$ elin oryantasyonunu göstermektedir [1].

3.3.4. Beş-Eksenli Dönel Robotun El Konfigürasyonu

Ters kinematik problemlerine temel yaklaşımlardan biri de, ileri kinematiğin özel doğasından faydalanarak bu problemleri analitik veya kapalı formda çözmektir [1]. Bu kesin metotlar, robotun yapısına bağlı kalmaktadır ancak nümerik metotlara göre oldukça hızlıdır. Ters kinematik problemlerin bu yolla çözümüne, el konfigürasyon matrisinin bulunmasıyla başlanır. Beş eksenli bilek eksenleri çakışık robot manipülatörler için el konfigürasyon matrisi,

$$\mathbf{w}(\theta) = \begin{bmatrix} C_1(a_2C_2+a_3C_{23}-d_5S_{234}) \\ S_1(a_2C_2+a_3C_{23}-d_5S_{234}) \\ d_1-a_2S_2-a_3S_{23}-d_5C_{234} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ -\left[\exp\left(\frac{\theta_5}{\pi}\right)\right]C_1S_{234} \\ -\left[\exp\left(\frac{\theta_5}{\pi}\right)\right]C_1S_{234} \\ -\left[\exp\left(\frac{\theta_5}{\pi}\right)\right]C_1S_{234} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

şeklinde verilmiştir [1]. Bu matris dikkate alınır, robot manipülatörün eklem açıları şöyle bulunabilir:

- a) Taban eklem açısı: En kolay bulunabilen açı, temel eklem açısıdır. $\mathbf{w}$ vektörünün ilk iki elemanı olan w_1 ve w_2 kullanılarak taban ekleminin açısı bulunabilir ve taban açısı (3.14)' de verilmiştir [1].

$$\theta_1 = \tan^{-1}(w_2/w_1) \quad (3.14)$$

- b) Dirsek eklem açısı: Dirsek açısı θ_3 , bulunması en zor olan açıdır. Bunun nedeni dirsek ekleminin omuz ve el aşağı yukarı açıları ile çok fazla ilişkili olmasındandır. Bunun çözülmesi için global el aşağı yukarı ara açı değişkeni, $q_{234}(q_{234}=q_1+q_2+q_3+q_4$ ve $q=\theta)$, tanımlanır. Bu açı çalışma veya xy düzlemine göre ölçülen el açısıdır. $\mathbf{w}$ vektörünün son üç elemanı dikkate alınır

$$q_{234} = \tan^{-1}(-(C_1 w_4 + S_1 w_5)/-w_6) \quad (3.15)$$

bulunur [43]. Omuz açısı θ_4 ve dirsek açısı θ_3 bilindikten sonra, global el aşağı-yukarı açısı bulunabilir. Burada omuz eklem açısı ve dirsek açılarının izole edilmesi için (3.16) ve (3.17) eşitliklerinde gösterildiği gibi iki ara değer tanımlanır [1].

$$b_1 \triangleq C_1 w_1 + S_1 w_2 - a_4 C_{234} + d_5 S_{234} \quad (3.16)$$

$$b_2 \triangleq d_1 + a_4 S_{234} - d_5 C_{234} - w_3 \quad (3.17)$$

Burada θ_1 ve q_{234} daha önceden hesaplandığı için, b_1 ve b_2 değerleri bilinmektedir. Eğer el konfigürasyon matrisinin elemanlarını alınır ve b_1 ile b_2 'de yerine konulursa

$$b_1 = a_2 C_2 + a_3 C_{23} \quad (3.18)$$

$$b_2 = a_2 S_2 + a_3 S_{23} \quad (3.19)$$

elde edilir [1]. Böylece elin aşağı-yukarı açısı elimine edilir. Dirsek açısı ise $\|b\|^2$ 'nin hesaplanmasıyla bulunur.

$$\|b\|^2 = a_2^2 + 2a_2 a_3 C_3 + a_3^2 \quad (3.20)$$

Burada $\|b\|$, dirsek çerçevesinden bilek çerçevesine olan mesafeyi gösterir. Eşitlik 3.20, θ_3 için çözümlerse iki tane olası çözüm elde edilir ve bu Şekil 3.5'de gösterilen dirsek yukarı ve dirsek aşağı çözümleridir [1].

$$\theta_3 = \pm \cos^{-1} \frac{\|b\|^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3} \quad (3.21)$$

(3.20)'ye göre 5 eksenli dönel eksenli robotun ters kinematik probleminin çözümü tek değildir. Genellikle dirseğin yukarı olduğu durum seçilir, böylece dirsek çalışma yüzeyine çok yakın tutulmamış olur. Gerçekten de bu durum, çoğu endüstriyel robot manipülatör için tek çözümdür [1].

- c) Omuz eklem açısı: θ_2 'yi bulmak için de (3.18) ve (3.19) kullanılır. Çeşitli trigonometrik eşitlikler kullanılır ve terimler, düzenlenirse (3.22) ve (3.23) eşitlikleri elde edilir.

$$b_1 = (a_2 + a_3 C_3)C_2 - (a_3 S_3)S_2 \quad (3.22)$$

$$b_2 = (a_2 + a_3 C_3)S_2 - (a_3 S_3)C_2 \quad (3.23)$$

Dirsek açısı θ_3 , bilindiğinden dolayı, (3.22) ve (3.23) eşitlikleri iki bilinmeyenli iki lineer denkleme dönüşür. Sonuç olarak, C_2 ve S_2 için sırası ile (3.24) ve (3.25) eşitlikleri elde edilir.

$$C_2 = \frac{(a_2+a_3C_3)b_1+a_3S_3b_2}{\|b\|^2} \quad (3.24)$$

$$S_2 = \frac{(a_2+a_3C_3)b_2-a_3S_3b_1}{\|b\|^2} \quad (3.25)$$

Dirsek açısının kosinüsü ve sinüsü bilindiğinden dolayı omuz açısı $[-\pi, \pi]$ aralığında arctanjant fonksiyonu ile bulunur ve θ_2 (3.26)'da verilmiştir.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{(a_2+a_3C_3)b_2-a_3S_3b_1}{(a_2+a_3C_3)b_1+a_3S_3b_2} \right] \quad (3.26)$$

- d) El aşağı-yukarı açısı: Global el aşağı-yukarı açısı q_{234} , omuz açısı θ_2 ve θ_3 'ün bulunmasından sonra bu değerler (3.27)'de yerine yazılarak el aşağı-yukarı açısı bulunur.

$$q_4 = q_{234} - q_2 - q_3, \quad \theta_4 = q_4 \quad (3.27)$$

- e) El dönme açısı: Bulunacak en son eklem değişkeni el dönme açısıdır. Bu w vektörünün son üç elemanından elde edilebilir.

$$\theta_5 = \pi \cdot \ln (w_4^2 + w_5^2 + w_6^2)^{1/2} \quad (3.28)$$

4. YAPAY SİNİR AĞLARI VE BULANIK MANTIK

İnsanlar olayları algılama, düşünme ve karar verme yönleriyle makinelerden ayrılırlar. İnsanların karar verme mekanizmasında, çevresel koşulların yanı sıra fizyolojik ve psikolojik durum, tecrübe, anlama kapasitesi ve duygusal hisler gibi birçok faktör etkili olur. Yani, farklı bireyler aynı koşullardaki olaylar için değişik kararlar verebilirler. Bu yüzden, insan karar verme mekanizmasını modellemek imkânsızdır.

Bilgisayarlar çok karmaşık işlemleri anında çözebilirler, fakat iş olayları idrak etme ve deneyimlerle kazanılmış bilgileri kullanabilme noktasına gelince yetersiz kalmaktadırlar. Burada insan beynini makinelerden üstün kılan özellik ise, sinirsel algılayıcılar vasıtası ile kazanılmış ve göreceli olarak sınıflandırılmış çok geniş bir veri kümesini kullanabilmesidir.

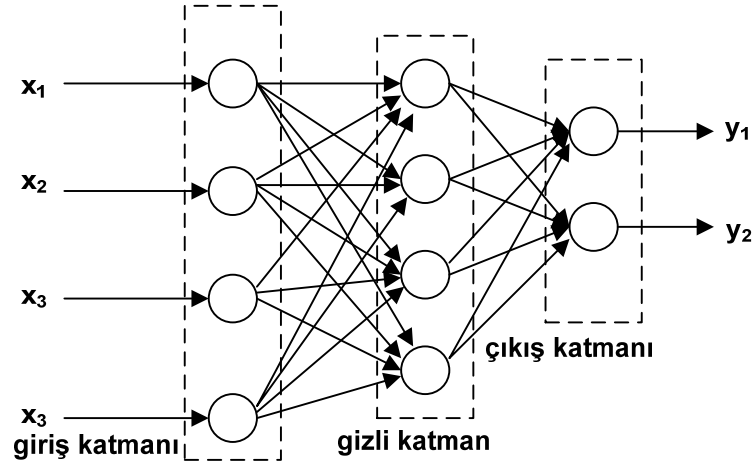
Uzman sistemler, temelde insan düşüncelerini bilgisayarlarda gerçekleştirmek üzere tasarlanan yazılımlardır. Yani uzman sistemler gerçekleştirilirken, uzmanların belirli konulardaki bilgi ve deneyimlerinin bilgisayara aktarılması istenmektedir [4]. BM, bulanık küme teorisine dayanmaktadır. Bulanık mantık klasik mantıktaki ya hep ya hiç yerine, insan mantığında olduğu gibi ara değerlere göre işlem yapmaktadır. Genetik algoritmalar, yapay zekânın bir kolu olan evrimsel hesaplama tekniğinin bir parçasını oluşturmaktadır. Genetik algoritma Darwin'in evrim kuramındaki doğada en iyinin yaşaması ilkesini göz önüne alarak oluşturulan bir veri kümesinden, özel bir çözüm arama yöntemidir. YSA, insan beynindeki sinirsel ağları taklit eden modellerdir. YSA bir anlamda, paralel bilgi sistemi olarak düşünülebilir. YSA'ya bilgiler, ilgili olaya ait örnekler üzerinden kazandırılması amaçlanır. Böylece daha önce yapılan genellemelerle o ana kadar hiç rastlanmamış olaylara da çözüm üretilebilir.

Bu tezin çeşitli kısımlarında YSA ve BM modellerinin kullanılmasından dolayı, bu iki konunun temel özellikleri aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir

4.1. Yapay Sinir Ağları

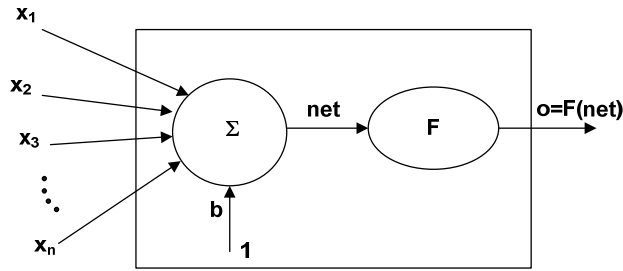
YSA, bir veri giriş vektörünü bir veri çıkış vektörüne eşleyen bilgi işleme sistemi olarak tanımlanabilir. YSA, biyolojik sinir ağlarından esinlenerek tasarlanmış ve nöron adı verilen çok sayıda basit işlem birimlerinin birleşmesinden meydana gelmiştir [2].

YSA'nın temel yapısı Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu yapı giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşur.



Şekil 4.1 YSA'nın temel yapısı.

YSA'daki nöronların, tipik olarak insan sinir sistemini oluşturan biyolojik nöronların yapısını ve işlevini taklit eder bir yapısı vardır [2]. Basit bir yapay nöronun yapısı, Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Nöronun basit yapısı.

Nörona gelen giriş vektöründeki elemanlardan her biri, belirli bir katsayı ile çarpıldıktan sonra aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılan bir fonksiyona uygulanır ve bu fonksiyondan nörona ait çıkış elde edilir. YSA'nın yapısında bulunan nöronlar için, çeşitli aktivasyon fonksiyonları bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar eşik, lineer, sigmoid veya hipertanjant fonksiyonları olabilir ve aşağıdaki eşitliklerdeki gibi tanımlanır [2].

Lineer aktivasyon fonksiyonu;

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ x & 0 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases} \text{ veya } F(x) = \begin{cases} -1 & x \leq -1 \\ x & -1 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

Eşik aktivasyon fonksiyonu;

$$F(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \text{ veya } F(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Sigmoid aktivasyon fonksiyonu;

$$f(x) = \frac{1}{1+\exp(-\alpha x)} \quad (4.3)$$

Hipertanjant aktivasyon fonksiyonu;

$$f(x) = \frac{1-\exp(-\alpha x)}{1+\exp(-\alpha x)} \quad (4.4)$$

4.1.1. Perseptron

Perseptron modeli, tek bir nörondan oluşmuş en basit YSA modelidir. Bu nöron, aktivasyon fonksiyonu olarak eşik fonksiyonunu kullanır. Basit perseptron modeli, iki seçenekli karar verme problemlerine uygulanabilir. Bu model, girişlerin lineer olarak ayrıldığı problemlerde bir sınıflandırıcı olabilir. Birden fazla nöronu olan bir ağ modeli için eğitim safhasında giriş ve çıkış vektörleri ağın eğitiminde kullanılır. Her bir giriş vektörü için YSA'nın gerçek çıkışı, arzu edilen çıkışla karşılaştırılır ve bu ikisi arasındaki farkla ağırlık vektörü ve eşik değeri güncellenir [2].

4.1.2. İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları

İleri beslemeli YSA'lar nöronları içeren katmanların kaskat olarak bağlanmasından oluşmaktadır. Bir katmandaki nöronlardan her biri, bir önceki katmandaki nöronlardan bilgi alırlar ve bulundukları katmanı takip eden katmandaki nöronlara iletirler. İleri beslemeli ağların hafıza elemanları yoktur ve bu yüzden çıkış sadece o andaki girişlere bağlıdır [6].

İleri beslemeli YSA'ların eğitimindeki en popüler algoritma, geri yayılımdır. Bu algoritma, sigmoid aktivasyonlu nöronlardan oluşan ileri beslemeli YSA'nın eğitiminde kullanılır ve YSA'nın toplam işlem hatasının minimizasyonunda bir eğim iniş metodudur. Toplam hata (4.5)'te tanımlanan fonksiyondur ve giriş vektörünün tamamı ile ilgilidir [6].

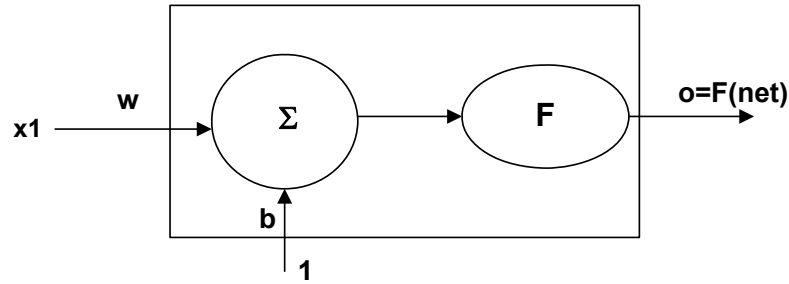
$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_p} (o_i^{ref} - o_i)^T (o_i^{ref} - o_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_p} \|o_i^{ref} - o_i\|^2 \quad (4.5)$$

Burada; $\mathbf{o}_i$: gerçek çıkışları temsil eden bir sütun vektörü, $\mathbf{o}_i^{ref}$: referans çıkış vektörüdür. Her bir eğitim aşamasında tüm nöronların ağırlıkları ve eşik ağırlıkları toplam hatanın düşmesi yönünde güncellenir. Nöronların ağırlıkları ve eşik ağırlıklarından oluşan bir $\mathbf{W}$ vektörü, N boyutlu bir uzayda bir noktayı gösterirse (N yapay sinir ağındaki ağırlıkların ve eşik ağırlıklarının sayılarının toplamıdır); $\mathbf{W}$ vektörünün katsayılarını güncellemek için en etkili yol, toplam

hatanın eğimini (∇E) gösteren eğri üzerinde $\mathbf{W}$ noktasını kaydırmaktır. Ağırlık matrisinin güncellenmesi (4.6)'da gösterilmiştir [6].

$$\mathbf{W}(t+1) = \mathbf{W}(t) - \eta \cdot \nabla E = \mathbf{W}(t) - \eta \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial w_1} \quad \frac{\partial E}{\partial w_2} \quad \frac{\partial E}{\partial w_3} \quad \dots \quad \frac{\partial E}{\partial w_N} \right)^T \quad (4.6)$$

Burada; $\mathbf{W}(t)$ mevcut ağırlıkları, $\mathbf{W}(t+1)$ bir sonraki eğitim safhasında kullanılacak ağırlıkları ve η ise öğrenme-oranı sabitini göstermektedir. İdeal olarak eğitim safhası toplam hata sıfır olunca durur. Ancak pratikte eğitimin toplam hatanın ihmal edilebilecek seviyeye gelmesi durumunda sonlanır [6].



Şekil 4.3 Lineer olmayan aktivasyon fonksiyonlu ve tek katmanlı YSA' nın nöronu.

Lineer olmayan aktivasyon fonksiyonlu ve tek katmanlı YSA'da geri yayılım algoritmasında kullanılan yapay nöron Şekil 4.3'teki gibi olursa, bu nöronun girişi (4.7)'de verilen ağırlıklı toplamla bulunur [2].

$$net = \sum_{j=1}^n o_j w_j + b \quad (4.7)$$

Şekil 4.3'teki aktivasyon fonksiyonu sigmoid olarak seçilmiştir ve bunun nedeni basit bir türevi olmasından kaynaklanır. Sigmoid aktivasyon fonksiyonuna sahip bir nöronun çıkışı ve çıkışının türevi, sırasıyla,

$$o = F(net) = \frac{1}{1 + \exp(-net)} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial F(net)}{\partial net} = F(net)(1 - F(net)) \quad (4.9)$$

gibidir. Eğitim süresince, giriş-çıkış vektör çiftleri ağırlık eğitiminde kullanılmaktadır. Başlangıçta, ağırlıklara küçük değerler atanır. Giriş vektörü ağırlıklara uygulanır ve ilgili çıkış vektörü elde edilir. Ağırlık çıkışı arzu edilen çıkışlarla karşılaştırılır ve ağırlıklar hatanın-karesini minimize etmek için tekrar hesaplanır. Öğrenme adımlarını aşağıdaki gibi açıklayabiliriz [2];

- 1) Başlangıçta ağırlık vektörüne küçük değerler atansın

- 2) Giriş vektörü $\mathbf{x}=(x_1,x_2,\dots,x_n)^T$ ağı uygulansın ve $\mathbf{o}_i$ çıkışı elde edilsin.

$$net_i = \sum_{j=1}^n w_{ij}x_j + b_i \quad (4.10)$$

$$o_i = \frac{1}{1+\exp(-(net_i+b_i))} \quad (4.11)$$

w_{ij} ağırlığındaki değişim,

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (4.12)$$

gibi olur. Türev için zincir kuralı kullanıldığında zaman (4.12), (4.13)'e dönüşür.

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial o_i} \frac{\partial o_i}{\partial net_i} \frac{\partial net_i}{\partial w_{ij}} = \eta (o_i^{ref} - o_i) o_i (1 - o_i) x_j \quad (4.13)$$

Benzer şekilde eşikteki değişim;

$$\Delta b_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial o_i} \frac{\partial o_i}{\partial net_i} \frac{\partial net_i}{\partial b_i} = \eta (o_i^{ref} - o_i) o_i (1 - o_i) \quad (4.14)$$

olur.

- 3) Ağırlıklar ve eşik değeri güncellenir.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij} \quad (4.15)$$

$$b_i(t+1) = b_i(t) + \Delta b_i \quad (4.16)$$

- 4) 2. ve 3. adımlar değişim olmayana kadar veya maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar tekrarlanır.

- 5) 2. adımdan 5. adıma kadar olan aşamalar bütün örnekler için tekrarlanır.

Geri yayılım algoritması Şekil 4.4'te görülen çok katmanlı YSA için uygulandığında aşağıdaki algoritma izlenir [2].

- 1) L_1 - L_2 katmanları ve L_2 - L_3 katmanları arasındaki ağırlıklara, küçük değerler atanır. Böylece YSA, ağırlıkların büyük değerlerinden dolayı doyuma ulaşmaz.
- 2) L_1 katmanına $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ giriş vektörü uygulanır ve L_3 katmanında bir çıkış vektörü $\mathbf{o}=[o_1, o_2, \dots, o_m]^T$ elde edilir. Bu çıkış vektörünü elde etmek için hesaplama katman katman yapılır. L_2 katmanındaki her bir nöron için net_i değeri elde edilir. Daha sonra L_2 katmanındaki nöronların çıkışları, L_3 katmanındaki nöronlar için giriş

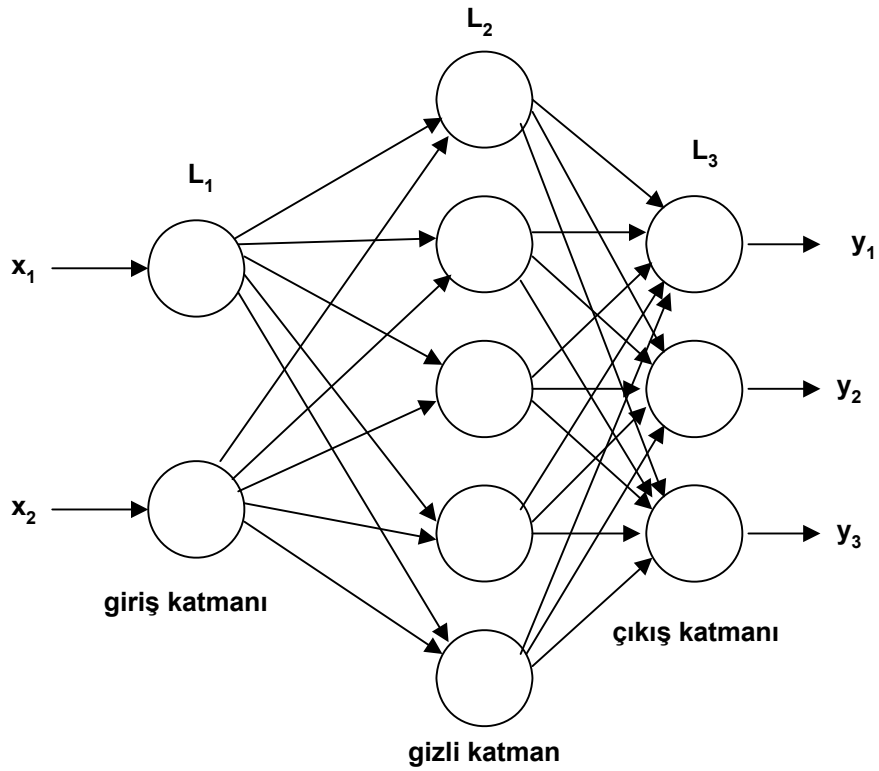
vektörünü oluşturur ve bir önceki aşama L_3 katmanındaki $\mathbf{o}$ çıkış vektörünü bulmak için tekrarlanır. L_2 katmanındaki nöronlar için net_i girişi

$$net = \sum_{j=1}^n x_j w_j \quad (4.17)$$

olur ve L_2 katmanındaki çıkış vektörünün bileşenleri

$$o_1 = \frac{1}{1 + \exp(-net_i)} \quad (4.18)$$

olarak bulunur.



Şekil 4.4 Çok katmanlı yapay sinir ağları.

- 3) Ağırlıklardaki değişimi bulmak için çıkış vektörü, istenen çıkış vektörü ile karşılaştırılır ve ikisi arasındaki hata bulunur. Ağırlıklar ise hatanın geri yayılımı ile bulunur. Önce L_2 ile L_3 arasındaki ağırlıklar (4.19)'daki gibi bulunur [2].

$$\Delta w_{ij} = \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial o_i} \frac{\partial o_i}{\partial net_i} \frac{\partial net_i}{\partial w_{ij}} = \eta (o_i^{ref} - o_i) o_i (1 - o_i) o_j \quad (4.19)$$

(4.19)'daki o_i ve o_i^{ref} sırasıyla L_3 katmanındaki gerçek çıkışı ve arzu edilen çıkışı göstermektedir. L_2 katmanının hedef vektörünün olmaması nedeniyle, (4.19) eşitliği L_1 ve L_2 arasındaki ağırlıkları ayarlama kullanılamaz. Böylece geri yayılım algoritması, hatayı

sistemde yayarak her bir gizli katman için ağırlıkları ayarlar. Buradan, L_1 katmanını L_2 katmanına bağlayan ağırlıklardaki değişim için

$$\begin{aligned}\Delta w_{ij} &= \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = -\beta \frac{\partial E}{\partial o_i} \frac{\partial o_i}{\partial net_i} \frac{\partial net_i}{\partial w_{ij}} \\ &= \beta o_j o_i (1 - o_i) \sum_{k=1}^m (o_k^{ref} - o_k) o_k (1 - o_k) w_{ik}\end{aligned}\quad (4.20)$$

kullanılır [2]. Burada β değeri, L_2 katmanı için öğrenme katsayısıdır ve o_j ise L_1 katmanındaki j . nöronun çıkışıdır ve toplam işareti (4.20)'de elde edilen L_3 katmanında bütün nöronlarla ilgili olarak elde edilen ağırlıklı toplamdır.

4) Ağırlıklar güncellenir.

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij} \quad (4.21)$$

5) L_3 katmanındaki hata (4.22)'deki bağıntıyla bulunur. Eğer bu hata E , arzu edilen hatadan büyükse 2-4 arası adımlar tekrarlanır, aksi halde eğitim işlemine son verilir.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (o_i^{ref} - o_i)^2 \quad (4.22)$$

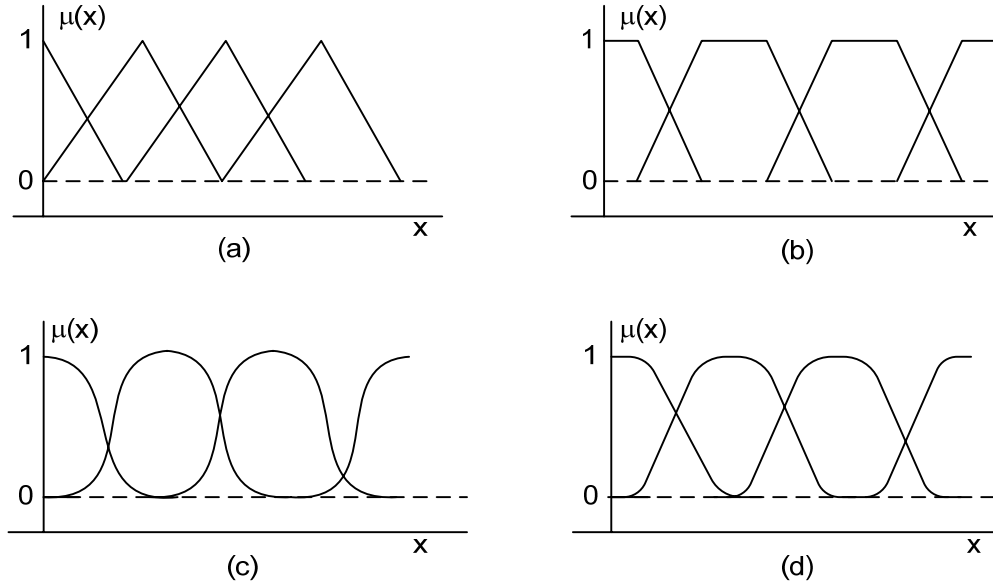
4.2. Bulanık Mantık

BM, insan düşünce mekanizmasının kesinlik yerine yaklaşıklıkla etkin olarak uyguladığı sonuç çıkarma modunu taklit etme yeteneğine sahiptir. Yani insanın düşünme sürecindeki bulanıklığın olması, düşünmenin arkasında yatan mantığın klasik iki değerli mantıktan veya çok değerli mantıktan çok daha fazla şey olduğunu önermektedir [2].

BM ve bulanık küme kavramları ilk kez Zadeh tarafından 1965 yılında ortaya atılmıştır [7]. Zadeh, Lukasiewicz'in çok değerli mantığını klasik küme teorisine uygulamış ve elemanların farklı derecelerinin olduğu bulanık küme kavramını ortaya atmıştır. Bulanık küme klasik mantığın 0 ve 1 değerlerinin yerine 0'dan 1'e çoklu değerler önermektedir [6]. Zadeh'in çalışması başlarda matematiksel düşüncenin bilgisayar benzetimi olarak kalmasına rağmen, 1970'lerde Prof. Ebrahim Mamdani buhar makinesi kontrolörü olarak ilk bulanık sistemi [8] ve daha sonra ilk bulanık trafik ışıklarını oluşturmuştur [6]. Bu, günümüzde görülen bulanık mantık denetleyici ve uygulamalarının gelişmesine yol açmıştır.

4.2.1. Bulanık Kümeler ve Üyelik Fonksiyonları

Bulanık küme, klasik kümenin genişletilmiş halidir. Ancak bulanık kümeler, kısmi üyeliğe izin vermektedir. Bir x elemanın bir A kümesine ait olup olmaması, μ_A üyelik fonksiyonuyla açıklanır ki burada $\mu_A=0$ eğer $x \in A$ ve $\mu_A=1$ eğer $x \notin A$ 'dır. Ancak U uzayındaki bir bulanık A kümesi, $A=\{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\}$ olarak tanımlanır. Üyelik fonksiyonları olarak trapezoid, genelleştirilmiş çan eğrisi, Gauss eğrileri, polinom eğrileri ve sigmoid gibi fonksiyonlar kullanılmaktadır ve bunlardan bazıları Şekil 4.5'te verilmiştir [2].



Şekil 4.5 Çeşitli üyelik fonksiyonları a) Üçgen, b) Trapezoid, c) Gauss, d) Zil Biçimli.

4.2.2. Mantık İşlemleri ve If-Then Kuralları

Bulanık kümeler için işlemler, klasik kümeler için yapılanlara benzerdir. Bulanık küme için mantık işlemlerinde, bulanık değerlerin maksimum ve minimum değerleri 0 ve 1 olarak belirlenirse, standart mantık işlemleri uygulanabilir. En temel klasik küme işlemlerinin kesişim, birleşim ve tümleyen olduğu bilinmektedir ve bunlar sırasıyla VE, VEYA, DEĞİL'dir. BM' de herhangi bir durumun doğruluğunda bir derecelendirme söz konusudur ve temel küme işlemlerinin yerini min, max ve tümleyen işlemleri almaktadır. Bu işlemler (4.23)'de gösterilmiştir [2].

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.23)$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Bununla birlikte, bulanık birleşim ve kesişim işlemleri (4.24)'deki gibi de tanımlanabilir [2].

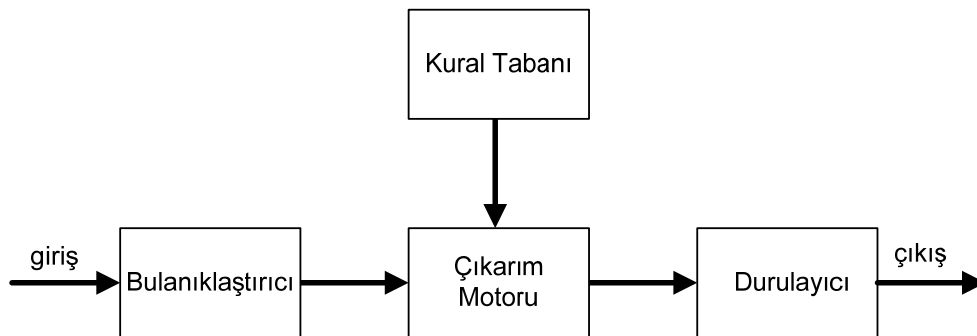
$$\begin{aligned}\mu_{A \cup B}(x) &= \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x) \\ \mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x)\mu_B(x)\end{aligned}\quad (4.24)$$

Bulanık çıkarım sistemleri, giriş ve çıkış arasındaki ilişkiyi belirleyen if-then kurallarına sahiptir. Bulanık ilişkiler, iki veya daha fazla kümenin elemanları arasındaki ilişkinin varlığı veya yokluğunun derecesini belirlemektedir. Bu ifade şöyle açıklanabilir: U ve V' nin konuşmanın iki uzayı olduğu farz edilsin. Buna ilaveten x,y gibi iki küme, $x \in U$ ve $y \in V$, tanımlansın ve böylece $R(U,V)$ bulanık ilişkisi $U \times V$ uzayında bir küme olur ve $\mu_R(x,y)$, $\mu_R(x,y) \in [0, 1]$, üyelik fonksiyonu ile gösterilir. Sadece bir tane if-then kuralı “if $x \in A$, then $y \in B$ ’dir.” formu ve $\mu_{A \rightarrow B}(x,y)$ üyelik fonksiyonu ile gösterilir. Kuralın if kısmı “ $x \in A$ ’dır” ve then kısmı ise “ $y \in B$ ’dir.” şeklindedir. Bir if-then kuralını yorumlamak iki ayrı aşamayı içerir. Bunlardan birinci aşama önce gelen koşulu değerlendirme ve ikinci aşama ise ilk koşulun sonucunu, kuralın ikinci kısmına uygulamaktır. Çoğu uygulamada bir ilişki için verilen bulanık üyelik fonksiyonu $\mu_{A \rightarrow B}(x,y)$ (4.25)'de verilen minimum veya çarpma işlemleri ile gerçekleşir [2].

$$\begin{aligned}\mu_{A \cap B}(x) &= \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \\ \mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x)\mu_B(x)\end{aligned}\quad (4.30)$$

4.2.3. Bulanık Çıkarım Sistemi

Bulanık Çıkarım Sistemi (BÇS), temel olarak bir giriş vektörünün bulanık kurallara bağlı olarak bir skaler çıkışa lineer olmayan eşlemesini tanımlamaktadır. Genel bir BÇS sistemi Şekil 4.6’da verilmiştir [2].



Şekil 4.6 BÇS sisteminin blok şeması.

Bu sistemin çalışması, aşağıdaki aşamalarla özetlenebilir.

- 1) Bulanık girişler: Girişler alınır ve bu girişlerin üyelik fonksiyonları yardımıyla hangi bulanık kümeye ne derecede bağlı olduğu bulunur.

- 2) Bulanık işlemlerin uygulanması: Girişler bulanıklaştırıldıktan sonra, kuralın ilk kısmının her kuralı ne derecede sağladığı artık bilinmektedir. Eğer verilen kural birden fazla kısma sahipse, her bir kuralın birleşik gücü BM işlemleri yapılarak bulunur.
- 3) İma metodunun uygulanması: İma metodu, kuralın aktifliği temelinde çıkış üyelik fonksiyonlarının şeklini belirler. İma işleminin girişi sadece bir sayıdır ve çıkışı ise bir bulanık kümedir. İmanın en yaygın metotlarından ikisi minimum ve çarpımdır.
- 4) Bütün çıkışların toparlanması: Toparlama, kuralların çıkışlarının birleştirildiği bir süreçtir ve her bir çıkış değişkeni için bir defa yapılır. Toparlama işleminin girişi, bulanık kümelerin her kuralın ima işleminden geçtikten sonra oluşan kesilmiş çıkış bulanık kümelerdir.
- 5) Durulama: Durulama işleminin girişi, toparlama işleminden elde edilen birleştirilmiş bulanık çıkış kümesidir ve durulama sürecinin çıkışı, merkez, yükseklik veya maksimum metotları ile bulunan tek bir sayıdır.

5. ÖZELLİK ÇIKARIMI VE ZERNİKE MOMENT METODU

Bir görüntü içerisindeki herhangi bir nesne, piksel topluluğu olarak görülür. Nesneyi tanımak için, görüntü içerisindeki bu piksel topluluğunun özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Buna ilaveten, bir görüntüdeki nesnelerin özellikleri daha önceden belirlenmiş çeşitli nesnelerin bilinen özellikleriyle karşılaştırılarak, nesneler tanınabilir. Ancak özelliklerin, nesneleri tanıma sürecinde kullanılabilmesi için aşağıda verilen çeşitli koşulların oluşması gerekmektedir [36];

- 1) Özellikler tam bir küme oluşturmalıdır. Yani iki nesne aynı özelliklere, ancak ve ancak nesneler aynı nesne ise sahip olmalıdır.
- 2) Özellikler uyumlu olmalıdır. Yani benzer nesnelerin tanınabilmesi için özelliklerin de benzer olması gerekir.
- 3) Özellikler çeşitli koşullardan bağımsız olmalıdır. Yani nesnenin görüntü içerisindeki yeri, rotasyonu, boyutu gibi çeşitli koşullar nesnenin tanınmasını engellememelidir.
- 4) Özellikler tam bir küme oluşturmalıdır ve bir nesne diğerlerinden ayırt edilebilmesi için gerekli bilgileri içermelidir. Ancak genel nesnelerin birbirlerinden ayırt edilmesi için gerekli tam ve kesin bir özellik kümesi olmadığından dolayı, en iyi tanıma performansı dikkatlice seçilen özelliklerin yardımıyla olur.

Görsel veriler kullanılarak yapılan nesne tanıma işleminde, temel olarak nesnenin görüntü içerisinde kapladığı alanın iki özelliği kullanılır. Bunlar; dış karakteristik (nesneyi sınırlayan pikseller) ve iç karakteristik (görüntü içerisinde nesneyi oluşturan pikseller topluluğu) [38].

Bu tezde, görüntüler aktif kamera sistemiyle alınmakta ve farklı şekillere sahip nesnelerin tanınması çalışılmıştır. Konuyla ilgili olarak bağımsız özellik çıkarım metodlarından, moment metodu alt bölümlerde verilmiştir

5.1. Moment Metodu

Genel olarak moment kavramı, bir nokta veya bir referans eksene göre belirli bir uzaklıktaki sayısal değerleri tanımlama olarak açıklanabilir. Genellikle moment metodu; istatistikte rasgele dağılmış değişkenlerin dağılımında, mekanikte cisimlerin yüzeysel kütle dağılımını karakterize etmede kullanılmaktadır. Eğer görüntüler, iki boyutlu yoğunluk dağılımlı fonksiyonlar olarak düşünülürse, moment metodu görüntü işleme için de kullanılabilir [49].

5.1.1. Geometrik Moment Tanımı

İki boyutlu sürekli bir fonksiyonun $f(x, y)$, $(p+q)$. dereceden geometrik momenti (m_{pq})

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (5.1)$$

gibi tanımlanır [49]. Eğer görüntü sayısal ve NxM piksele sahip ise integral toplam işareti dönüşür ve (p+q). dereceden moment, (5.2)'deki gibi olur.

$$m_{pq} = \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} x^p y^q f(x, y) \quad (5.2)$$

5.1.2. Düşük Dereceli Momentler

Bir f(x,y) fonksiyonunun 0. dereceden moment, m_{00} , (5.3)'de verilmiştir ve bu moment, verilen fonksiyonun toplam kütlesini göstermektedir [49].

$$m_{00} = \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} xy f(x, y) \quad (5.3)$$

Birinci dereceden moment terimleri, m_{10} ve m_{01} , verilen iki boyutlu fonksiyonun hesaplanan kütlesinin merkezini bulmada kullanılmaktadır. Referans noktası bulunan kütle merkez noktasına taşınırsa, birinci dereceden moment terimleri 0 çıkar. Moment terimleri cinsinden nesnenin kütle merkezi (5.4)'te verilmiştir [2].

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (5.4)$$

5.1.3. Moment Bağımsızları

Görüntünün alındığı pozisyon ve mesafeye bağlı olarak, nesnenin boyutu ve görüntüdeki pozisyonu değişmektedir. Ayrıca, bu değişiklikler moment terimlerini de etkiler. Moment terimlerinin, yer değiştirmeden bağımsız olabilmesi için sırasıyla görüntünün referans noktasını moment metodu ile hesaplanan kütle merkezine kaydırmak gerekmektedir. Bu işlem (5.5)'de verilmiştir. Ayrıca, nesnelerin görüntü düzlemine olan uzaklıklarına göre boyutları ve görüntüdeki kapladıkları alandaki piksel sayıları değişmektedir. Buna bağlı olarak da moment terimleri, aynı cisimler için farklı olmaktadır. Ölçekten bağımsız olarak moment terimlerini elde etmek için kullanılan normalize merkezsiz momentin hesaplanması (5.6)'da verilmiştir [49].

$$m_{pq} = \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad (5.5)$$

$$\mu_{pq} = \frac{m_{pq}}{m_{00}^{(2+p+q)/2}} \quad (5.6)$$

Moment bağımsızları konusunda, ilk kez 1961 yılında yer değiştirme, ölçekten ve oryantasyondan bağımsız 7 merkezsiz moment tanımlamıştır. Bu momentler (5.7)'de gösterilmiştir [50].

$$\begin{aligned}
& (\mu_{20} + \mu_{02}) \\
& (\mu_{20} + \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2 \\
& (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2 \\
& (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{21} + \mu_{03})^2 \tag{5.7} \\
& (\mu_{30} + \mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2] \\
& + (3\mu_{21} + \mu_{03})(\mu_{21} + \mu_{03})[3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2] \\
& (\mu_{20} - \mu_{02})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2] + 4\mu_{11}(\mu_{30} + \mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03}) \\
& (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{30} + \mu_{12})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2] \\
& + (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03})[3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2]
\end{aligned}$$

Bu momentler klasik olarak çok bilinirler. Bazı zayıflıklarına rağmen moment teorisinin gelişiminde büyük bir rol oynamıştır.

5.2. Dikgen Momentler

Lineer cebirden, dikgen tabanlı yüzeylerinin diğer tabanlarda ifade edilenlere göre daha kullanışlı olduğu bilinmektedir. Ayrıca herhangi bir tabandaki vektör, diğer tabandaki vektörlerle torik olarak ifade edilebilir. Çünkü bir tabandaki herhangi bir vektör, diğer tabandaki vektörlerin lineer kombinasyonudur [25].

Dikgen moment ile görüntüye ait bir $f(x,y)$ fonksiyonunun, bir $P(x,y)$ dikgen polinomu üzerine yansması anlaşılmaktadır ve bu işlem (5.8)' de verilmiştir. Görüntünün dikgen momentlerle tekrar elde edilmesi ise geometrik momentlere göre daha basit olup (5.9)'da gösterilmiştir [25].

$$M_{pq} = \iint P_{pq}(x,y)f(x,y) dx dy \tag{5.8}$$

$$f(x,y) = \iint M_{pq}(x,y)P_{pq}(x,y) dx dy \tag{5.9}$$

Görüntünün, moment terimlerinden tekrar elde edilmesini Teague [25] önermiştir ve yaptığı çalışmada geometrik momentin, $f(x,y)$ fonksiyonunun dikgen olmayan $x^p y^q$ tek terimli taban kümesine yansması formuna sahip olduğunu görmüştür. Ayrıca yapılan bu çalışmada, Legendre ve Zernike dikgen moment metodu kullanılmıştır [25].

5.3. Zernike Moment Metodu

Radial dikgen momentlerin bulunması için, radial dikgen fonksiyonların tanımlanması gerekir. Bu fonksiyonlar $V(x,y)$, birim çember $D=\{x,y: x^2+y^2 \leq 1\}$, üzerinde tanımlanır ve rotasyondan bağımsız olduğu farz edilirse

$$V(x,y) = A(\theta)V(x',y') \quad (5.10)$$

elde edilir [50]. Burada $A(\theta)$, 2π periyoduna sahip ve θ 'nın sürekli bir fonksiyonu olup $A(0)=1$ 'dir. Eğer $V(x,y)$ fonksiyonu (5.10)'u sağlıyorsa bağımsızdır ve bununla ilgili teorem aşağıda verilmiştir [50].

“Teorem: Derecesi p olan bir polinom $V(x,y)$, sadece ve sadece kutupsal koordinatlarda ifade ediliyorsa (ρ, θ) ve aşağıdaki formda ise bağımsız olarak kabul edilir.

$$V_{pq}(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta) = R_{pq}(\rho)e^{jq\theta}$$

Burada q pozitif veya negatif bir tamsayı ya da 0 olabilir ve $R_{pq}(\rho)$, ρ 'nun kuvvetlerini $|q|$ dan daha küçük olarak içermeyen, ρ 'nun p . dereceden bir polinomudur. Buna ilaveten $R_{pq}(\rho)$, q 'nın tek veya çift olmasına bağlı olarak, tek veya çift bir polinomdur.”

Bu teoremi sağlayan sonsuz polinom bulunmaktadır ve dikgenleştirme prosedürü ile ağırlık fonksiyonuna, $w(\rho)$, $0 \leq \rho \leq 1$, ve $0 \leq \gamma$ koşuluna göre (5.11)'de olduğu gibi lineer bağımsız fonksiyonlar elde edilebilir [50].

$$\rho^{|q|}e^{jq\theta}, \rho^{|q|+\gamma}e^{jq\theta}, \rho^{|q|+2\gamma}e^{jq\theta}, \dots \quad (5.11)$$

Eğer $\gamma=2$ ve $w(\rho)=1$ seçilip dikgenleştirme sürecinde dairesel $R_{pq}(\rho)$ fonksiyonu bulunmak istenirse, bulunan bağımsız polinomlar Zernike fonksiyonlarıdır. Zernike fonksiyonları, her bir izin verilen derece (p tamsayısı) ve açı bağımlılığına (q tamsayısı) göre, $p \geq 0$, $p \geq |q|$ ve $p - |q|$ 'nin çift sayı olma koşulunu sağlayan polinomlardır [50]. Böylece n . dereceden Zernike polinomları, $V_{pq}(\rho, \theta)$,

$$V_{pq}(x,y) = R_{pq}(\rho)e^{jq\theta} \quad (5.12)$$

gibi tanımlanır [5, 6]. Burada $\rho=\sqrt{x^2+y^2}$ 'dir ve pikselin koordinatlarından merkez noktasına çizilen vektörün boyunu ve θ açısı da bu vektörün x eksenine yaptığı açıyı göstermektedir [50]. (5.12)'de gösterilen $R_{pq}(\rho)$ gerçek değerli bir radial polinomdur. Bu polinom

$$R_{pq}(\rho) = \sum_{\substack{m=0 \\ p-|q| \text{ çift}}}^{(p-|q|)/2} (-1)^m \frac{(p-m)!}{m![(p-2m+|q|)/2]![(p-2m-|q|)/2]!} \rho^{p-2m} \quad (5.13)$$

gibi tanımlanır [48]. Burada $k=p-2m$ dönüşümü yapılırsa, (5.13), (5.14)'e dönüşür.

$$R_{pq}(\rho) = \sum_{k=|q|}^p B_{p|q|k} \rho^k$$

$$= \sum_{\substack{k=|q| \\ p-|q| \text{ çift}}}^p (-1)^{(p-k)/2} \frac{[(p+k)/2]!}{[(p-k)/2]![(k+|q|)/2]![(k-|q|)/2]!} \rho^k \quad (5.14)$$

Bununla birlikte $R_{p-q}(\rho)$ ve $R_{pq}(\rho)$ birbirine eşittir. Zernike polinomlarının yukarıda tanımlanmasından sonra, iki boyutlu bir görüntü fonksiyonun, $f(x, y)$, p . dereceden ve q tekrarlı Zernike momenti

$$Z_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \iint V_{pq}^*(x, y) f(x, y) dx dy \quad (5.15)$$

gibidir. Burada gösterilen integralin sınırları $x^2+y^2 \leq 1$ koşullarını sağlamaktadır ve gösterilen Zernike momenti kutupsal koordinatlarda

$$Z_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 V_{pq}^*(\rho, \theta) f(\rho, \theta) r dr d\theta \quad (5.16)$$

$$= \frac{p+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 R_{pq}(\rho) e^{-jq\theta} f(\rho, \theta) r dr d\theta$$

gibi olur [29]. Ancak (5.15) veya (5.16)'daki denklemler, sayısal iki boyutlu bir görüntüye uygulanamaz. Bu eşitliklerdeki integraller yerini toplam sembolüne bırakır ve $N \times N$ boyutlu bir sayısal görüntü fonksiyonuyla, $f(i, j)$; $i=0, 1, 2, \dots, N-1$ ve $j=0, 1, 2, \dots, N-1$, ilgili Zernike polinomlarının bulunması için, $f(i, j)$ fonksiyonunun birim çember içerisindeki (x, y) bölgesine lineer eşlenmesi gerekir. Sürekli Zernike moment integrali yerini ayrıklaştırılmış toplamaya bırakır ve

$$Z_{pq} = \lambda(p, N) \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} f(i, j) V_{pq}^*(\rho_{ij}, \theta_{ij}) \quad (5.17)$$

gibi hesaplanır [51]. Zernike momentinin hesaplanmasında görüntü ile ilgili kare görüntü düzleminden birim çembere eşlemede genel olarak iki yaygın teknik kullanılmaktadır. Bunlardan ilki birim çemberi görüntü içerisine yerleştirmek, ikincisi ise görüntüyü birim çember içine yerleştirmektir. Bu anlatım Şekil 5.1'de gösterilmiştir [28]. Yapılan lineer eşleşmelerde, birim çemberin merkezi iki boyutlu görüntünün ortasına yerleştirilmektedir. Şekil 5.1.b'de görüntünün birim çember dışında kalan kısmı alınmamaktadır, bu durum bilgi kaybına yol açar. Şekil 5.1.c ve (5.17) eşitliği göz önüne alındığında, birim çember üzerine eşleştirilen

görüntü için ρ , θ ve $\lambda(p,N)$ normalizasyon faktörüne ait görüntü düzleminin merkez noktası ile ilgili bağıntılar,

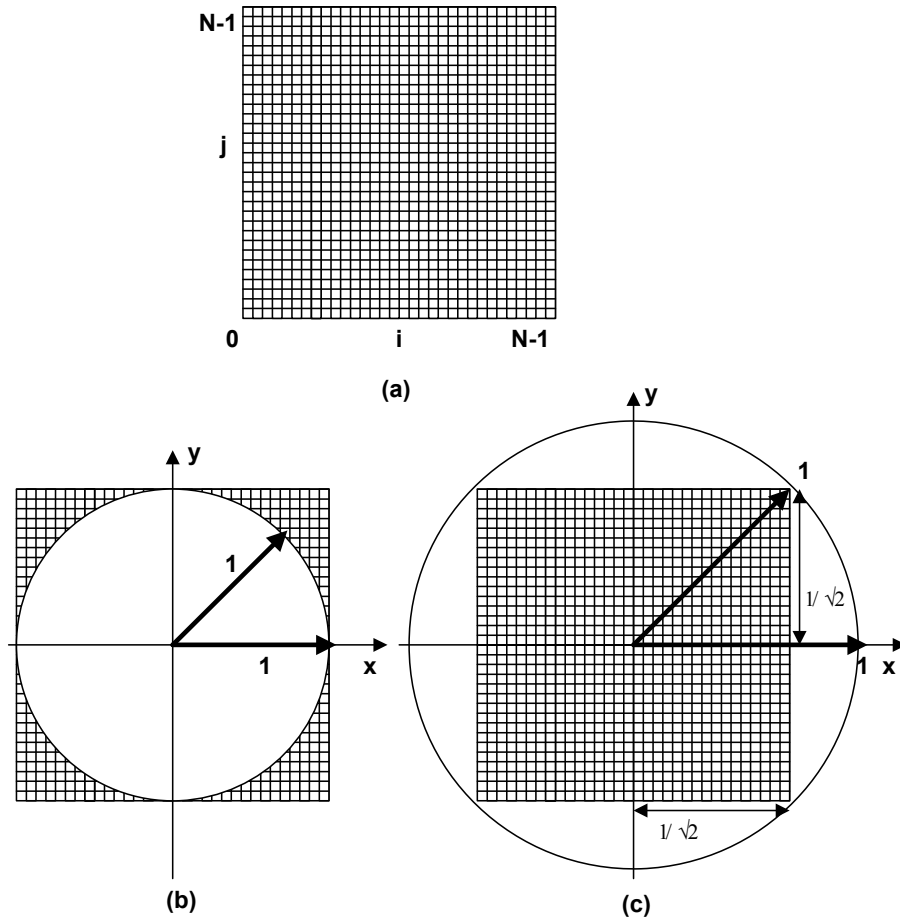
$$r = \sqrt{(c_1 i + c_2)^2 + (c_1 j + c_2)^2} \quad (5.18)$$

şeklinde gösterilmiştir [24].

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{c_1 j + c_2}{c_1 i + c_2} \right) \quad (5.19)$$

$$\lambda(p, N) = \frac{2(p+1)}{\pi(N-1)^2} \quad (5.20)$$

$$c_1 = \frac{\sqrt{2}}{N-1}, \quad c_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5.21)$$



Şekil 5.1. Kare görüntünün birim çembere eşlenmesi; **a)** $N \times N$ piksellik görüntü, **b)** Birim çemberin çapının görüntünün bir kenarına eşit olması, **c)** Birim çemberin çapının görüntünün bir kenarının $\sqrt{2}$ katına eşit olması.

Belirli bir dereceye ($p_{\max}$) kadar olan tüm Zernike momentlerinin $V_{pq}(\rho, \theta)$, bilindiği varsayılırsa, yaklaşık görüntünün bilinen bu polinomlardan tekrar elde edilmesinde,

$$\hat{f}_{\max}(x, y) = \sum_{p=0}^{p_{\max}} \sum_m \lambda_p Z_{pq} V_{pq}(\rho, \theta) \quad (5.22)$$

kullanılabilir [25]. Burada λ_p normalizasyon faktörüdür.

Zernike momentin doğasında, rotasyondan bağımsızlık vardır ve bu aşağıdaki işlemlerle kolaylıkla gösterilebilir [51].

- 1) Görüntü aynı koordinatta α açısı kadar dönerse ve Zernike momenti için (5.16), (5.23)'teki gibi olur.

$$Z'_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 R_{pq}(\rho) e^{-jq\theta} f(\rho, \theta - \alpha) r dr d\theta \quad (5.23)$$

- 2) Değişken dönüşümü, $\theta_1 = \theta - \alpha$, yapılarak (5.24) elde edilir.

$$\begin{aligned} Z'_{pq} &= \frac{p+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 R_{pq}(\rho) e^{-jq(\theta_1 + \alpha)} f(\rho, \theta_1) r dr d\theta \\ &= \left[\frac{p+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 R_{pq}(\rho, \theta) e^{-jq(\theta_1)} f(\rho, \theta_1) r dr d\theta_1 \right] e^{-jq\alpha} \end{aligned} \quad (5.24)$$

- 3) Buradan yola çıkarak, bir görüntünün Zernike momentleri ile aynı görüntünün belirli bir açı kadar döndürülmüş halinin Zernike momentleri arasında, (5.25)'te verilen ilişki vardır.

$$Z'_{pq} = Z_{pq} e^{-jq\alpha} \quad (5.25)$$

Bu bağıntıdan Zernike momentinin doğası gereği rotasyondan bağımsız olduğu görülmektedir.

5.4. Zernike Momentlerinin Geometrik Momentlerden Elde Edilmesi

Zernike momentleri ile geometrik momentler arasındaki ilişki

$$V_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \sum_{k=|q|}^p \sum_{j=0}^s \sum_{m=0}^{|q|} w^m \binom{s}{j} \binom{|q|}{m} B_{p|q|k} M_{k-2j-m, 2j+m} \quad (5.26)$$

gibidir [24]. Burada $s=(k-|q|)/2$, $p-k=\text{çift sayı}$, $j=\sqrt{-1}$ ve $w=-j, m>0$, ve $+j, m\leq 0$, ilişkileri vardır. Ayrıca, $M_{k-2j-m, 2j+m}$ terimi geometrik momentleri göstermektedir.

(5.26)'daki, ölçekten ve yer değiştirmeden bağımsız momentlerin kullanılması, nesnelerin görüntü içerisinde değişen yerleri ve boyutlarından bağımsız olmasını sağlar. Yer değiştirme ve ölçekten bağımsız geometrik momentler (5.5) ve (5.6) kullanılarak bulunabilir

[50]. Eğer NxN boyutlu bir kare görüntü fonksiyonunun $f(x,y)$, koordinatları ayırık iki boyutlu noktalar, $f(x_i,y_j)$ olarak düşünülürse, Zernike momentleri

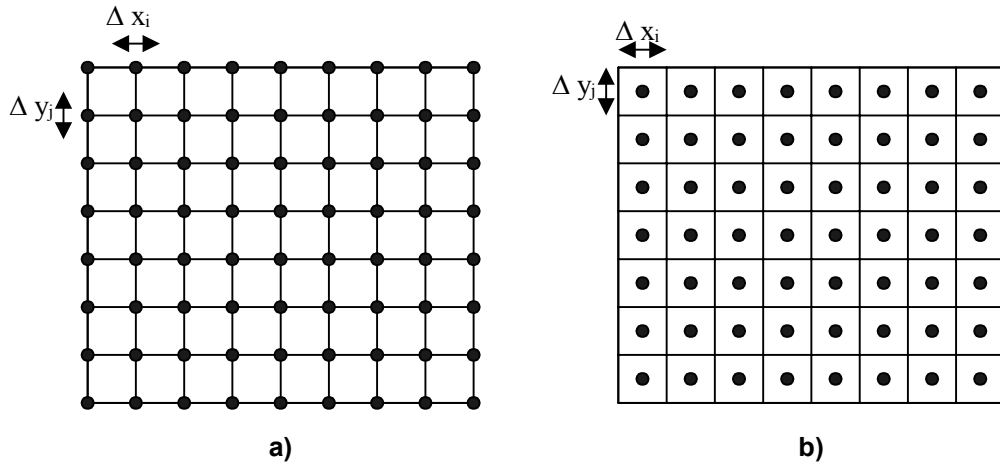
$$Z_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(x_i, y_j) \int_{x_i - \frac{\Delta x_i}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x_i}{2}} \int_{y_j - \frac{\Delta y_j}{2}}^{y_j + \frac{\Delta y_j}{2}} V_{pq}^*(x, y) dx dy \quad (5.27)$$

gibi yazılabilir [29]. Burada $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ ve $\Delta y_j = y_{j+1} - y_j$ değerleri, x ve y koordinatlarında iki ardışık piksel arasındaki mesafedir.

Klasik yaklaşımda integral terimleri sıklıkla Zernike polinomlarının değerlerinin iki piksel arasındaki aralıkta aynı kaldığı varsayılmakta ve örnekleme noktaları aralığın ortasında kabul edilmektedir. Böylece 0. dereceden yaklaştırma ile bulunan Zernike momentleri

$$\hat{Z}_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(x_i, y_j) V_{pq}^*(x, y) \Delta x_i \Delta y_j \quad (5.28)$$

olarak verilmiştir [29]. Çift katlı integralin toplamıyla yaklaşıklığı, hataya neden olmaktadır. Bu hatayı azaltmak için Liao ve Pawlak [52], iki katlı integral için çeşitli kübik denklemler önermişlerdir. Bu geometrik hatanın azaltılması için bir başka yol ise, Şekil 5.1.c'deki lineer dönüşümü uygulamak ve görüntü noktalarını piksellerin merkezi olarak seçmektir. Bununla ilgili olarak, klasik ve geometrik hatayı azaltmada kullanılan piksel eşleşmeleri Şekil 5.2'de gösterilmiştir [29].



Şekil 5.2 Piksel işleme teknikleri; **a)** Klasik metot, **b)** Geometrik hatayı azaltmak için kullanılan metot.

Her bir pikselin orta noktasını almak için 0.5 değere sahip terim eklenir ve böylece x_i ve y_j değişkenleri (5.29)'da gösterilen hale dönüşür [29].

$$x_i = c_1(i + 0.5) + c_2, \quad y_j = c_1(j + 0.5) + c_2 \quad (5.29)$$

Burada $c_1=\sqrt{2}/N$ ve $c_2=-1/\sqrt{2}$ 'dir. Eğer $N \times N$ boyutunda kare bir görüntü fonksiyonu, $f(x,y)$, $[-1,1] \times [-1,1]$ aralığında tanımlanmışsa, bu fonksiyonla ilgili M_{pq} geometrik momentleri,

$$M_{pq} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 x^p y^q f(x,y) dx dy \quad (5.30)$$

gibi tanımlanır [29]. Eğer görüntü sayısal olarak sadece (x_i, y_i) noktalarında tanımlı ise (5.30), (5.31) şeklinde yazılabilir [25].

$$\begin{aligned} M_{pq} &= \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(x_i, y_j) \int_{x_i - \frac{\Delta x_i}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x_i}{2}} \int_{y_j - \frac{\Delta y_j}{2}}^{y_j + \frac{\Delta y_j}{2}} x^p y^q dx dy \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(x_i, y_j) h_p(x_i) h_q(y_j) \end{aligned} \quad (5.31)$$

Burada verilen $h_p(x_i)$ ve $h_q(y_j)$, eşitliğin integral kısmının birbirinden bağımsız, x_i ve y_j 'ye bağlı iki ayrı fonksiyondur ve bu iki fonksiyon

$$h_p(x_i) = \int_{x_i - \frac{\Delta x_i}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x_i}{2}} x^p dx \quad (5.32)$$

$$h_q(y_j) = \int_{y_j - \frac{\Delta y_j}{2}}^{y_j + \frac{\Delta y_j}{2}} y^q dy \quad (5.33)$$

gibidir [29]. $h_p(x_i)$ ve $h_q(y_j)$ fonksiyonlarının integralleri alındığında elde edilen sonuçlar,

$$h_p(x_i) = \int_{x_i - \frac{\Delta x_i}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x_i}{2}} x^p dx = \left[\frac{x^{p+1}}{p+1} \right]_{x_i - \frac{\Delta x_i}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x_i}{2}} \quad (5.34)$$

$$h_q(y_j) = \int_{y_j - \frac{\Delta y_j}{2}}^{y_j + \frac{\Delta y_j}{2}} y^q dy = \left[\frac{y^{q+1}}{q+1} \right]_{y_j - \frac{\Delta y_j}{2}}^{y_j + \frac{\Delta y_j}{2}} \quad (5.35)$$

olmaktadır [29]. (5.34) ve (5.35)'ten de görüldüğü gibi $h_p(x_i)$ ve $h_q(y_j)$ fonksiyonları içerisinde görüntüye ait bir terim yoktur. Bu yüzden bu fonksiyonlar tekrarlı hesaplamalardan kurtulmak ve performansı arttırmak için önceden hesaplanabilir ve kaydedilebilir. Böylece işlem hızı artırılabilir. Buradan yola çıkarak, Zernike momentlerini geometrik momentlerden (5.36)'daki gibi elde edilir [29].

$$V_{pq} = Ax B \quad (5.36)$$

$$A = \frac{p+1}{\pi} \sum_{k=|q|}^p \sum_{j=0}^s \sum_{m=0}^{|q|} w^m \binom{s}{j} \binom{|q|}{m} B_{p|q|k}$$

$$B = M_{pq} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(x_i, y_j) h_p(x_i) h_q(y_j) \quad (5.37)$$

Zernike polinom katsayıları $B_{p|q|k}$, aşağıdaki ilişkiler kullanılarak elde edilir [30].

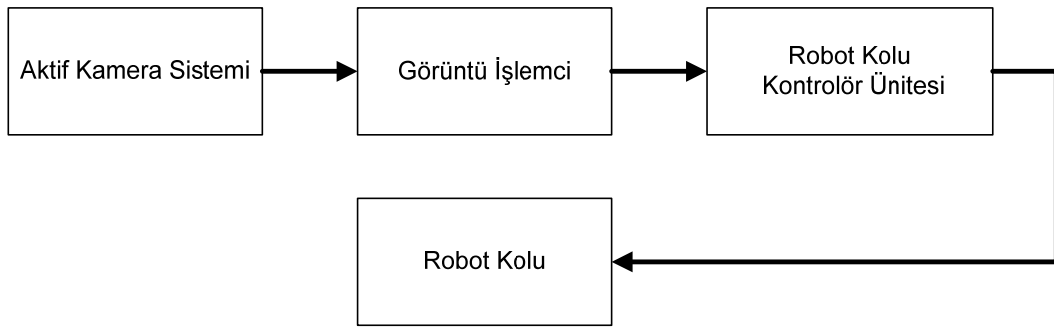
$$B_{ppp} = 1 \quad (5.38)$$

$$B_{p(q-2)p} = -\frac{p+q}{p-q+2} B_{pq p} \quad (5.39)$$

$$B_{pq(k-2)} = -\frac{(k+q)(k-2)}{(p+q)(p-k+2)} B_{pq k} \quad (5.40)$$

6. DENEYSEL DÜZENEK VE ÇALIŞMA

Bu tezde, belirlenen nesnelerin iki kamera ile alınan görüntüler içerisindeki; yerine, oryantasyonuna ve kapladığı alana bağlı kalmadan tanınması, görüntü çifti yardımıyla referans bir noktaya göre uzaklığının bulunması ve bir robot manipülatörün istenen nesneyi alması konularında çalışılmıştır. Buna ilişkin olarak da deneysel bir düzenek kurulmuştur. Bu deneysel düzenek Şekil 6.1’de verildiği gibi dört bloktan oluşmaktadır. Bu bloklar aktif stereo görme sistemi, DSP-FPGA tümleşik görüntü işlemci (SUNDANCE SMT339) ve robot ile robot kolunun kontrol ünitesidir.



Şekil 6.1 Sistemin blok şeması.

Deneysel çalışmadaki işleyiş; aktif kamera sistemi yatayda ve düşeyde dönerek görüş alanındaki yüzeyi tarayacak, bu sistemin durduğu anlarda alınan stereo görüntülerden nesnelerin varlığı veya yokluğu araştırılacaktır. Eğer istenen nesne algılanmış ise nesnenin koordinat bilgisi çıkartılır. Bu işleyişin son kısmı olarak, robot kolu nesnenin pozisyonuna gönderilir ve nesne robot kolu tarafından alınır.

6.1. Deneysel Düzeneği Oluşturan Kısımlar

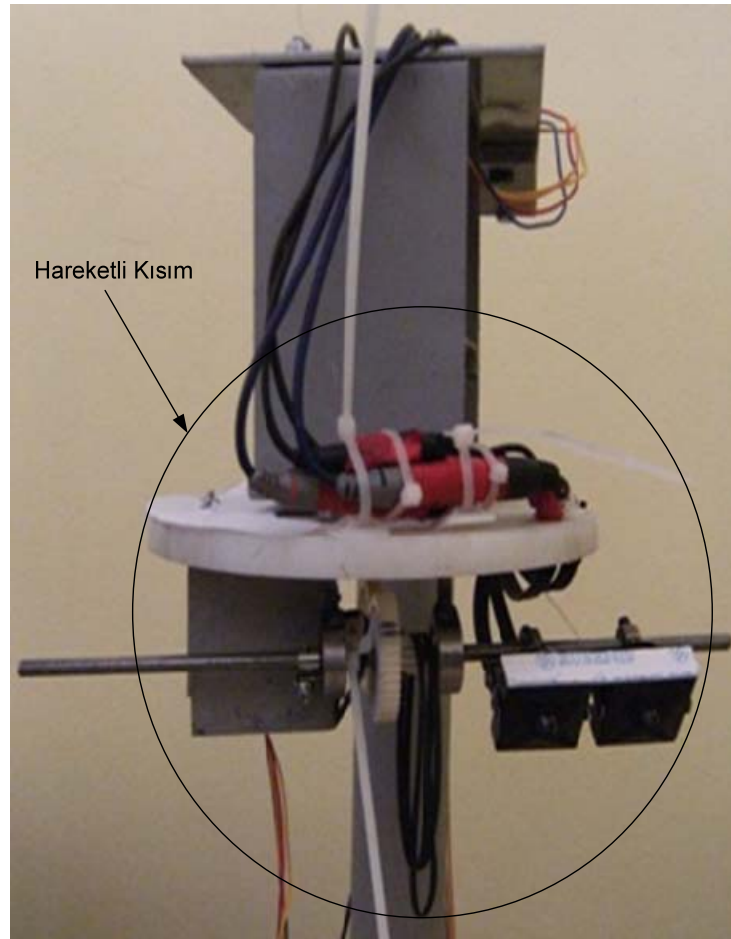
Deneysel düzeneğin, aktif stereo görme sistemi ile robot kolu deney masası üzerine sabitlenmiştir. Deneysel düzeneğin içinde bulunan DSP-FPGA tümleşik işlemci, INTEL Pentium Core 2 Duo 2.0GHz işlemci ve 1 Gbayte RAM’e sahip bir bilgisayara, bu bilgisayarın PCI yolu üzerinden takılmıştır. Tümleşik görüntü işlemci ile robot kolunun kontrol ünitesi için gerekli olan programlar bahsedilen bilgisayara yüklenmiş ve çalıştırılmıştır.

6.1.1. Aktif Kamera Sistemi

Aktif kamera sisteminin hareketli kısmı, bir metal ayağa tutturulmuştur. Bu hareketli kısım içerisinde bir adım motoru, bu motorun yatayda hareket ettirdiği bir tabla, bu tablaya monte edilmiş iki tane renkli iğne-delikli kamera ve bu kameraları düşeyde çeviren ikinci bir

adım motoru vardır. Bu sistemin diğer kısımları ise adım motorlarının kontrol kartları ve deneysel çalışmada uygulanan aktif stereo algoritmasına göre hareketliliği sağlamak için gerekli işaretleri üreten bir PIC kontrol devresi bulunmaktadır.

Aktif kamera sisteminde, iki tane AVTECH AVC566ZP/P37C mini renkli iğne-delikli kamera kullanılmıştır. Bu kameralarda Sony1/3'' CCD algılayıcı bulunmaktadır. Bu kameralar 350 TV çizgisine ve PAL yayını için 500x582 piksel çözünürlüğüne sahip olup odak uzunluğu 3.7 mm'dir.



Şekil 6.2 Aktif kamera sistemin hareketli kısmı.

Düşey hareketliliği sağlayan step motor, her bir harekette kameraları 4 kez, 4.5° döndürmekte ve her dönüşte belirli bir süre durmaktadır. Düşey motor bu işleyişi tamamladıktan sonra, ilk konumuna dönmektedir. Bundan sonra, yatay hareketliliği sağlayan motor 5.4° 'lık 6 dönme hareketi yapmakta ve her 5.4° dönüşten sonra durmaktadır. Bu durma anında düşey motor, yukarıda anlatılan hareketleri tekrarlamaktadır. Yatay hareketliliği sağlayan motor, son görüntülerin düşey motorun en son adımındaki işleyişini bitirmesinden sonra ilk konumuna,

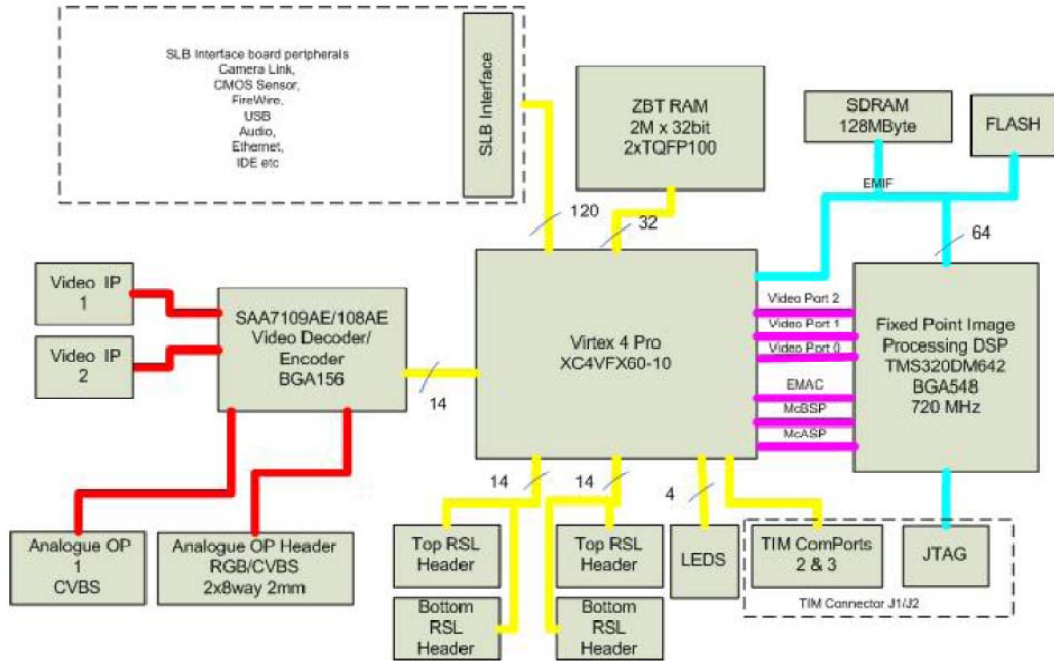
dönmektedir. Anlatılan bu prosedür deneysel düzeneğin diğer kısımlarından bağımsız olarak çalışmaktadır. Aktif kamera sisteminin hareketli kısmı Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

6.1.2. DSP-FPGA Tümlleşik Görüntü İşlemci

Bu çalışmada, Sundance firması tarafından üretilen SMT339 görüntü işlemci kullanılmıştır. Bu görüntü işlemcinin fotoğrafı ve blok şeması Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’te verilmiştir [53].



Şekil 6.3 Görüntü işlemci kartı.



Şekil 6.4 Görüntü işlemci kartının blok şeması.

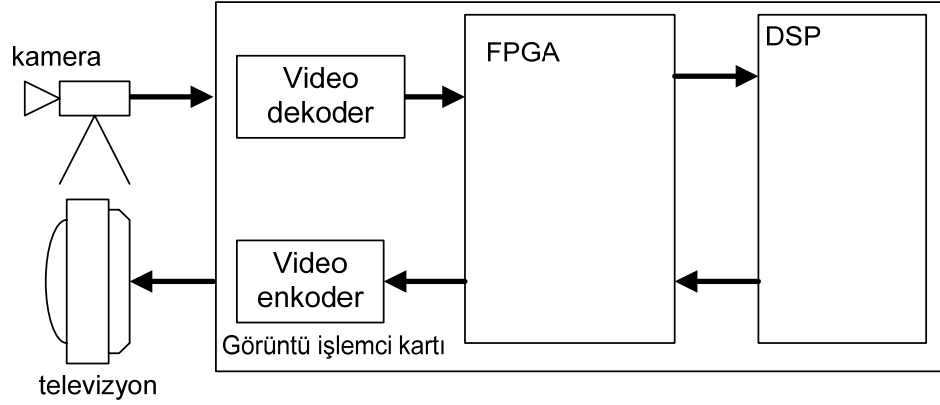
Görüntü işlemci motoru; TEXAS INSTRUMENTS tarafından üretilen, 720 Mhz’de çalışabilen TMS320DM642 sabit noktalı video DSP’sidir. İçerisinde giriş veya çıkış olarak kullanılabilen 10 bitlik 2 kanala sahip 3 tane video portu vardır. DSP’nin videoportları ham görüntü verilerinin yanı sıra YCbCr formatındaki verileri alıp gönderebilir. DSP ‘nin ön belleği fazla olmadığından dolayı, FPGA’dan gelen görüntü verileri 128 Mbaytlık bir SDRAM’a kaydedilmekte ve tekrar buradan alınıp FPGA’ya iletilmektedir. Ayrıca FPGA konfigürasyon verilerinin ve DSP programlama verilerinin de saklandığı 8 Mbayt’lık flaş belleği vardır. DSP ile FPGA’nın Şekil 6.4’te gösterilen bağlantılarının yanı sıra I²C yolu ile kartta bulunan bir video dekode/enkoder entegresini kontrol eder [53].

Bu görüntü işlemcisinde kullanılan FPGA, Xilinx firması tarafından üretilen Virtex-4 XC4VFX60-10’dur. Bu işlemcinin çalışma hızı 100MHz’e kadar çıkmaktadır ve kart üzerindeki çevre elemanları ile 64 bitlik veri aktarımı yapabilmektedir. Bu kartta FPGA ve DSP’nin çeşitli giriş çıkış üniteleri de bulunmaktadır. Bu portlar sayesinde kullanıcı da çeşitli verileri görüntü işlemciye iletebilir veya alabilir. Bu çalışmada, FPGA’nın üretici tarafından çeşitli amaçlarla ayrılmış olan bir giriş çıkış bankı kullanılmaktadır [53].

Görüntü işlemci kartı üzerinde bulunan video dekode/enkoder entegresi, Philips Semiconductors’ un üretmiş olduğu SAA7109AE/108AE entegresidir. Bu entegre, giriş video sinyalinin PAL, SECAM, NTSC formatlarına göre kodlanmasını sağlar [50]. Kart üzerinde iki tane hazır giriş konnektörü vardır. I²C yolu ile uygun programlama yapıldıktan sonra, bu girişlerden iki tane CVBS ya da bir tane Y/C alınabilir. Video dekode/enkoderin çıkışındaki görüntü

verileri, FPGA'ya iletilir. Görüntü verileri burada istenen önışlemlerden geçirildikten sonra, DSP'nin video giriş portuna iletilir. Video enkoder kısmı ise DSP'den gelen verilerin PAL, NTSC ve VGA gibi çeşitli formatlarda görüntülenmesine yaramaktadır [54].

Görüntüye ait video sinyalleri kameralardan görüntü işlemci kartı tarafından alınır, işlenir ve daha sonra çeşitli görüntüleme cihazlarına gönderilir. Bu işleyiş basit olarak Şekil 6.5'de gösterilmiştir [54].



Şekil 6.5 Görüntü kartının işleyişi.

6.1.3. Robot Kolu ve Kontrol Ünitesi

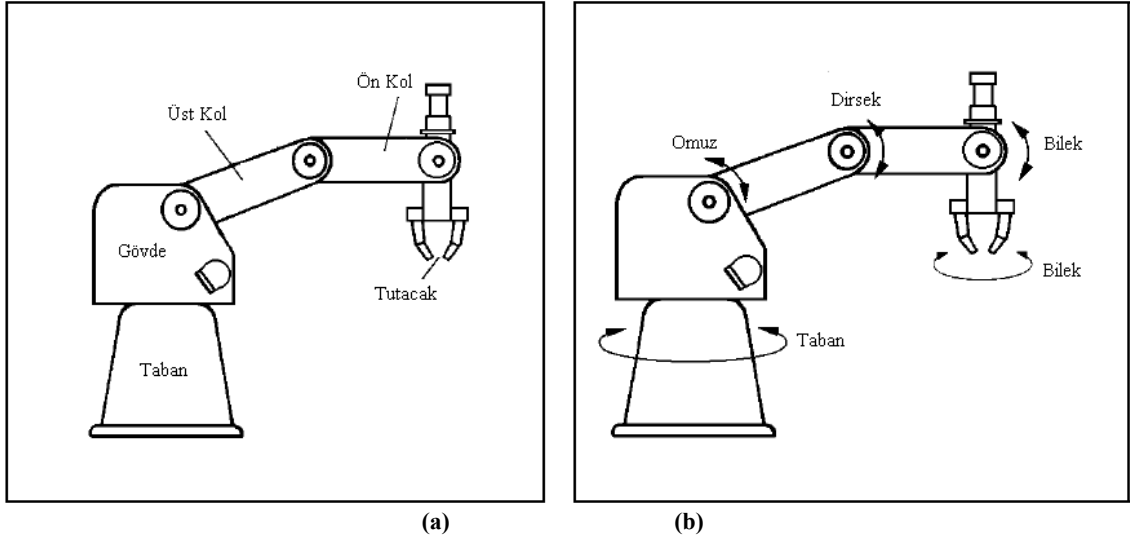
Bu çalışmada kullanılan robot kolu INTELITEK firmasının ürünlerinden biri olan SCORBOT-ER VPlus'tır. Aynı zamanda bu firmanın Controller-A isimli kontrol ünitesi, bu robot kolunun kontrolünde kullanılmaktadır. Bu kol ile kontrol ünitesi Şekil 6.6'da gösterilmiştir [55].



Şekil 6.6 Robot kolu ve kontrolör ünitesi.

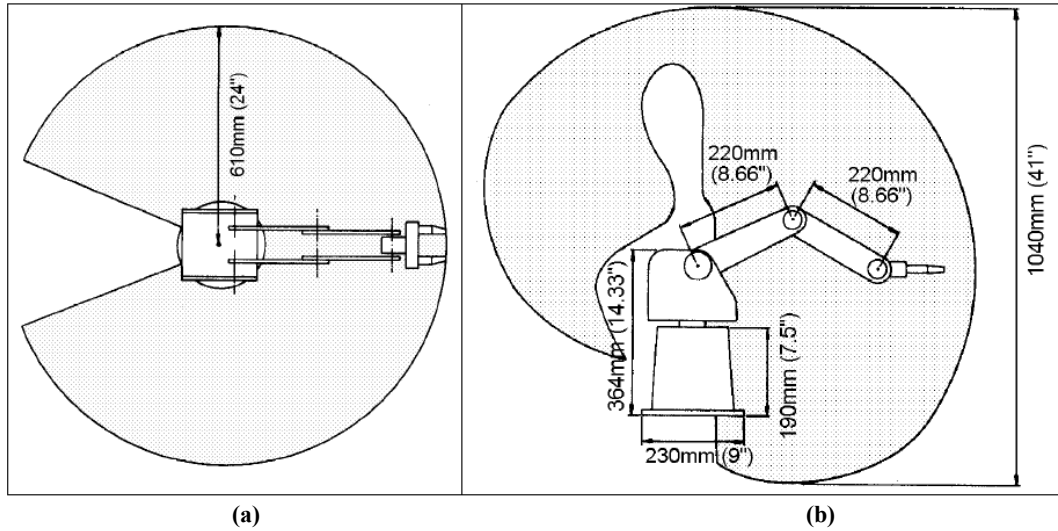
6.1.3.1. Robot Kolu

SCORBOT-ER VPlus dönel eklemlili bir robot koludur ve 5 eksene sahiptir. Bu robot kolunun linkleri ve bağlantıları Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Robot kolunun eksen hareketleri taban rotasyonu, omuz rotasyonu, dirsek rotasyonu, bileğin aşağı yukarı hareket etmesi ve bileğin eksen etrafında dönmesidir. Robot kolunun taban hareketi 310° , omuz ekleminin hareketi $+135^\circ/35^\circ$, dirsek ekleminin hareketi $\pm 130^\circ$, bileğinin aşağı yukarı hareketi $\pm 130^\circ$ ve bileğin dönmesi mekanik olarak sınırsız, elektriksel olarak $\pm 570^\circ$ ’ye kadar olmaktadır. Robot kolunun eklem noktaları, 12V DC servomotorlar ile hareket ettirilmektedir. Motorların geribeslemesi, her bir eksenindeki optik enkoderlerin yardımıyla yapılmaktadır. Robot kolunda transmisyon; dişliler, kasnaklar ve ilerleyen vidalarla sağlanmaktadır. Robot kolunun uç noktasında, paralel iki parmağa sahip bir eli vardır. Bu el, optik enkoderli DC servo motorla açılıp kapanmakta ve maksimum açılma uzunluğu 75 mm’dir. Robot kolu, tutacağı ağırlığı da dâhil olmak üzere maksimum 1.2 kg’lık bir ağırlığı kaldırabilmektedir [55].



Şekil 6.7 (a) Robot kolunun bileşenleri, (b) Robot kolunun eklem dönüş yönleri.

Robot kolunun maksimum çalışma yarıçapı 610 mm'dir ve çalışma aralığının üstten ve yandan görünüşü Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Robot kolunun maksimum yol hızı ise 600 mm/s' dir.



Şekil 6.8 (a) Robot kolunun çalışma düzlemi(Üstten bakış), (b) Robot kolunun çalışma düzlemi (Yandan bakış).

6.1.3.2. Robot Kolu Kontrolör Ünitesi

Robot kolunun kontrolör ünitesi, INTELITEK firması tarafından üretilmiş olan Controller-A'dır. Bu kontrolör gerçek zamanlı, tek başına çalışabilen, PID kontrolöre sahip ve çıkış için PWM üreten bir kontrolördür. Bu kontrolör ünitesinin, kontrol edebildiği maksimum 11 servo eksenı vardır. Kontrol ünitesi, servo motorları sürmek için 20 KHz'lik PWM işaretleri üretir. Controller-A eklem, lineer, dairesel kullanıcı-tanımlı yol kontrolü yapabilmektedir [55].

Controller-A'nın işlemcisi Motorola 68010'dur ve 384 Kbayt EEPROM'a sahiptir. Bu kontrolör ünitesinde, sistem için 64 Kbayt ve kullanıcı için 128 KBayt RAM hafızalar bulunmaktadır. Kontrolörün maksimum 24 V DC, NPN veya PNP lojik modlarında çalışabilen 16 girişi ve 12 açık kolektörlü çıkışı vardır. Bununla birlikte 4 tane de röle çıkışı vardır. Bu ünitenin programlama dili, İleri Kontrol Dili (ACL)'dir. Koordinat düzlemindeki herhangi bir noktanın pozisyonunun kaydedilmesi Tam, İlgili, Kartezyen veya Eklem açısı şeklinde olabilir. Robot kolunun koordinat sistemi, kontrolöre bağlı olarak Kartezyen veya Eklem koordinatları şeklinde seçilebilir [55].

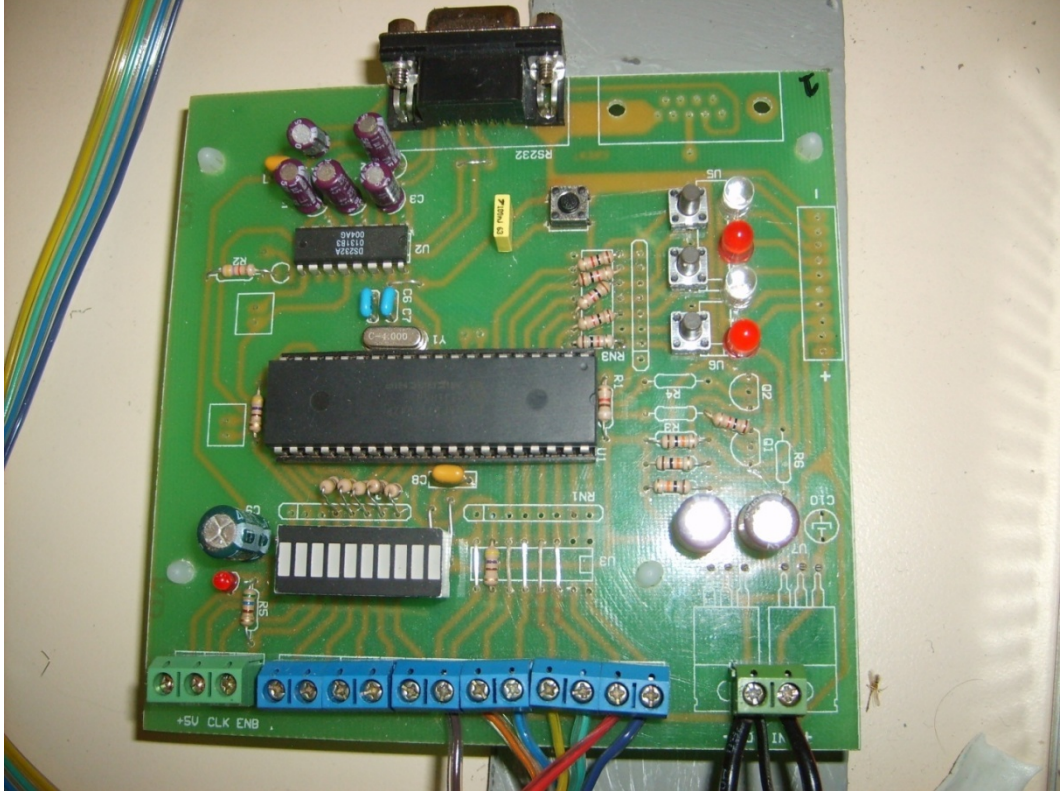
6.1.4. Deneysel Düzenekte Çeşitli Amaçlar için Tasarlanan Giriş ve Çıkış Devreleri

Deneysel düzende, aktif kamera sistemindeki motor sürücülerini sürmek ve kameraların durma anı bilgisini video görüntü işlemciye bildirmek için, bir PIC mikrodnetleyici devresi hazırlanmıştır. Ayrıca, bu bilgiyi işlemciye iletmede kullanılan bir FPGA giriş portu devresi ve görüntü işlemciden robot kolu kontrolör ünitesine pozisyon bilgisini iletmede kullanılan FPGA çıkış portu devresi tasarlanmıştır.

6.1.4.1. PIC Mikrodnetleyici Devresi

Bu tez çalışmasında kameralardan alınan anlık görüntüler, kameraların pozisyonuna göre, çalışma yüzeyinin belirli bir bölgesiyle ilgilidir. Bu yüzeyin istenen kısmının tamamının taranabilmesi için hareketli bir görüntüleme sistemine ihtiyaç duyulmuştur ve bu sistem deneysel düzeneğin ilk bloğunu oluşturmaktadır. Ayrıca, bu sistemin kontrolü ise bir PIC mikrodnetleyici devresi tarafından yapılmaktadır.

Bu devrede, PIC mikrodnetleyicisi için yazılan program ile kameraların yatay ve düşey dönme hareketlerini sağlayan adım motorların dönme açıları ve dönme hızları kontrol edilmektedir. Buna ilaveten, düşey motorun durma anı süresi de değiştirilebilmektedir. Yazılan program şu işlemleri sağlamaktadır. Düşey adım motoru 4.5° hareket ettirilmekte, her hareketten sonra bir durma sinyali gönderilmekte ve bu işlem dört kez tekrarlanmaktadır. Düşey motor için bu işlemlerin dört kez tekrarlanmasından sonra, motor başlangıç pozisyonuna dönmekte ve kameraların monte edildiği tablayı hareket ettiren motor 5.4°'lik bir adım döner. Bu sıralı işlemler yatay hareketliliği sağlayan motorun altı kez dönmesine kadar devam eder ve sistem ilk başlangıç konumuna geri döner. PIC mikrodnetleyici devresinin fotoğrafı Şekil 6.9'da ve yazılan program EK-1'de verilmiştir.

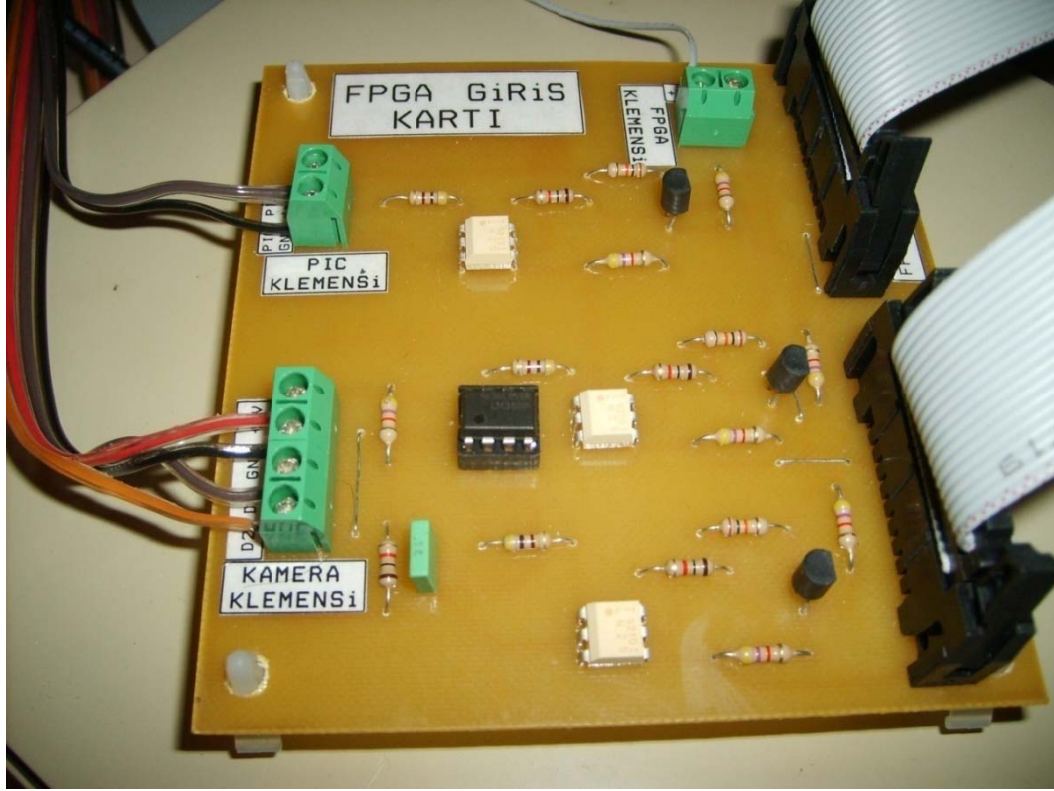


Şekil 6.9 PIC mikrodnetleyici devresi.

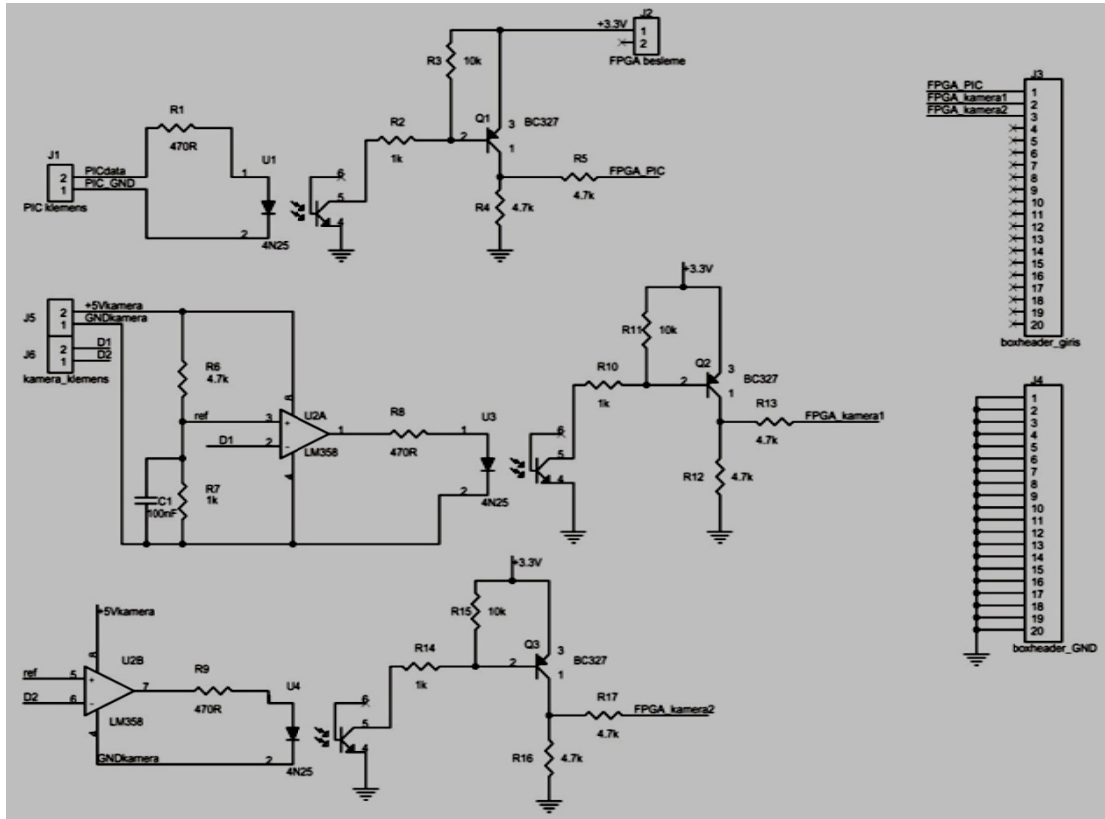
6.1.4.2. FPGA Giriş Portu Devresi

Bu devre, PIC mikrodnetleyiciden gelen kamera durma işaretini, FPGA' nın giriş portlarına uygun hale getirmek için yapılmıştır. Bahsedilen bu girişte oluşabilecek problemlerden dolayı, FPGA'nın zarar görmesini engellemek için giriş pinlerinin FPGA pinlerinden izolasyonu optokuplörlerce sağlanmaktadır.

Yapılan devre şu şekilde çalışmaktadır. Devrenin giriş pinlerinden herhangi birisi lojik 1 değerini aldığıında, bu pine bağlı olan optokuplör aktif olmakta ve bu optokuplöre bağlı olan transistor iletime geçmektedir. Transistor iletimde iken, bu transistorun kolektör ucuna bağlı olan direncin üzerine +3.3 V bir gerilim düşmekte ve bu gerilim de FPGA'nın ilgili giriş pinini lojik 1 seviyesine getirecektir. Bu devrenin fotoğrafı Şekil 6.10'da ve devre şeması da Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.10 FPGA giriş devresi.

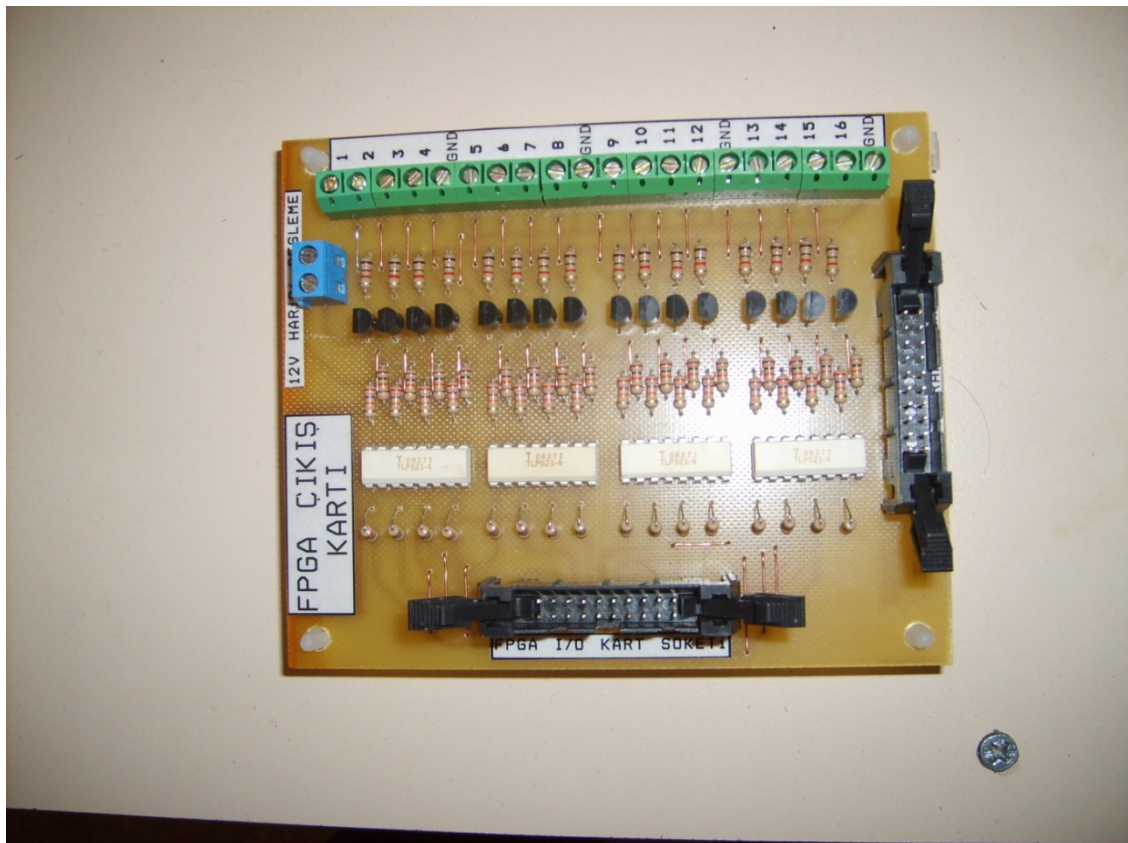


Şekil 6.11 FPGA giriş devresinin şeması.

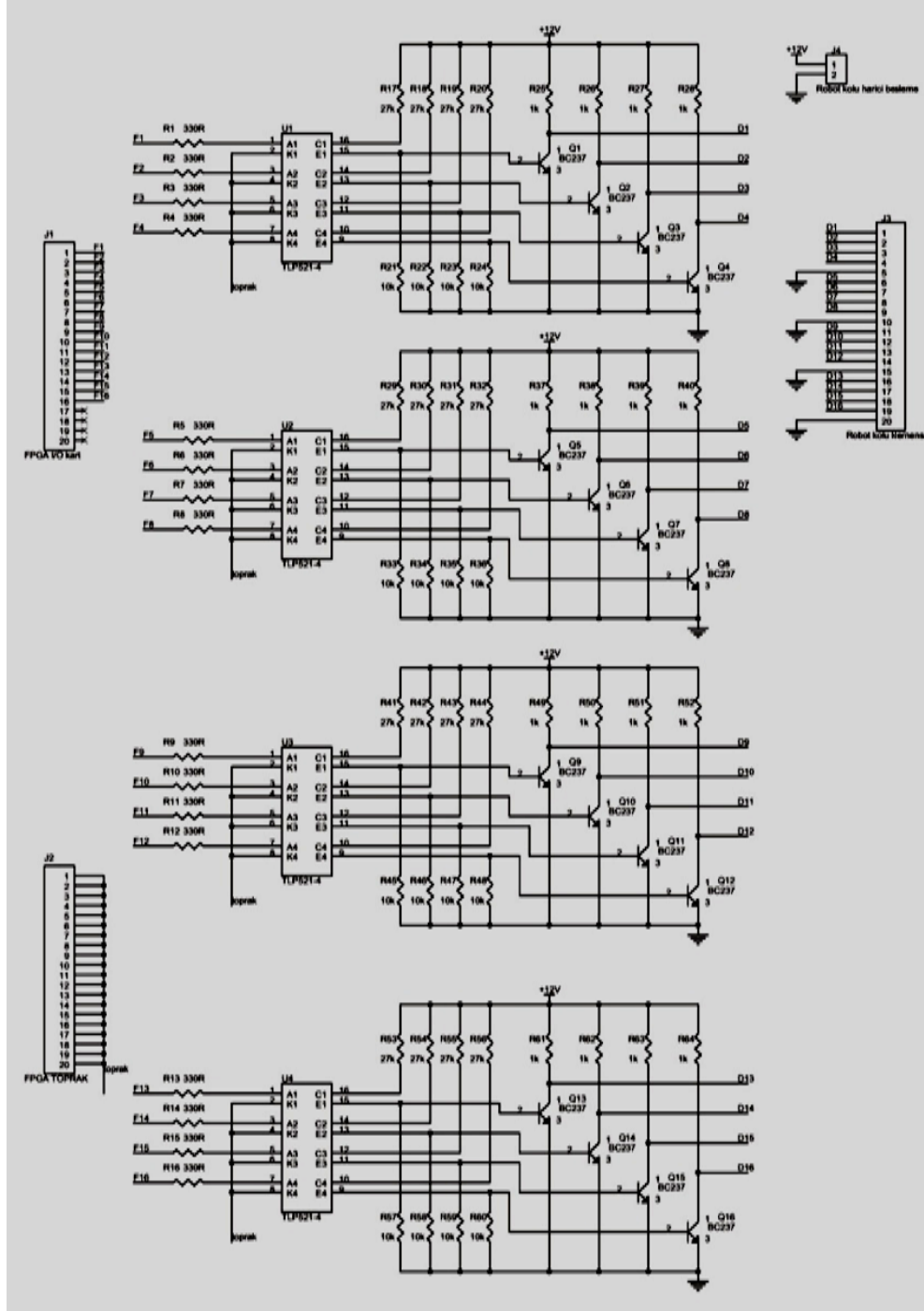
6.1.4.3. FPGA Çıkış Kartı

FPGA çıkış kartı, görüntü işlemciden robot kolunun kontrol ünitesine pozisyon bilgisinin iletilmesi için tasarlanmıştır. Bu kart üzerindeki devrenin girişleri olarak, görüntü işlemcide bulunan FPGA'nın çıkış portu kullanılmıştır. FPGA'nın çıkış pinlerinin, kart üzerindeki devrenin diğer elemanlarından izolasyonu optokuplörler vasıtasıyla sağlanmıştır.

Devrenin tasarımı, robot kolunun kontrolör ünitesinin girişlerinin negatif lojik modda çalışacağı varsayılarak yapılmıştır. FPGA'nın çıkış pinlerinden gelen lojik 1 seviyesi, +12V kaynağın bağlı olduğu tranzistörü aktif hale getirecek ve tranzistörün çıkış gerilimi +1.5V'luk gerilim seviyesinin altına düşecektir. Bu da kontrolör tarafından lojik 1 olarak algılanacaktır. FPGA pinlerinin gerilimi lojik 0 seviyesindeyken, kontrolöre uygulanan gerilim +5 V'tan büyük olması nedeniyle, bu değer kontrolör tarafından lojik 0 olarak algılanacaktır. Bu devrenin fotoğrafı Şekil 6.12'de ve devre şeması da Şekil 6.13'te verilmiştir.



Şekil 6.12 FPGA çıkış devresi.



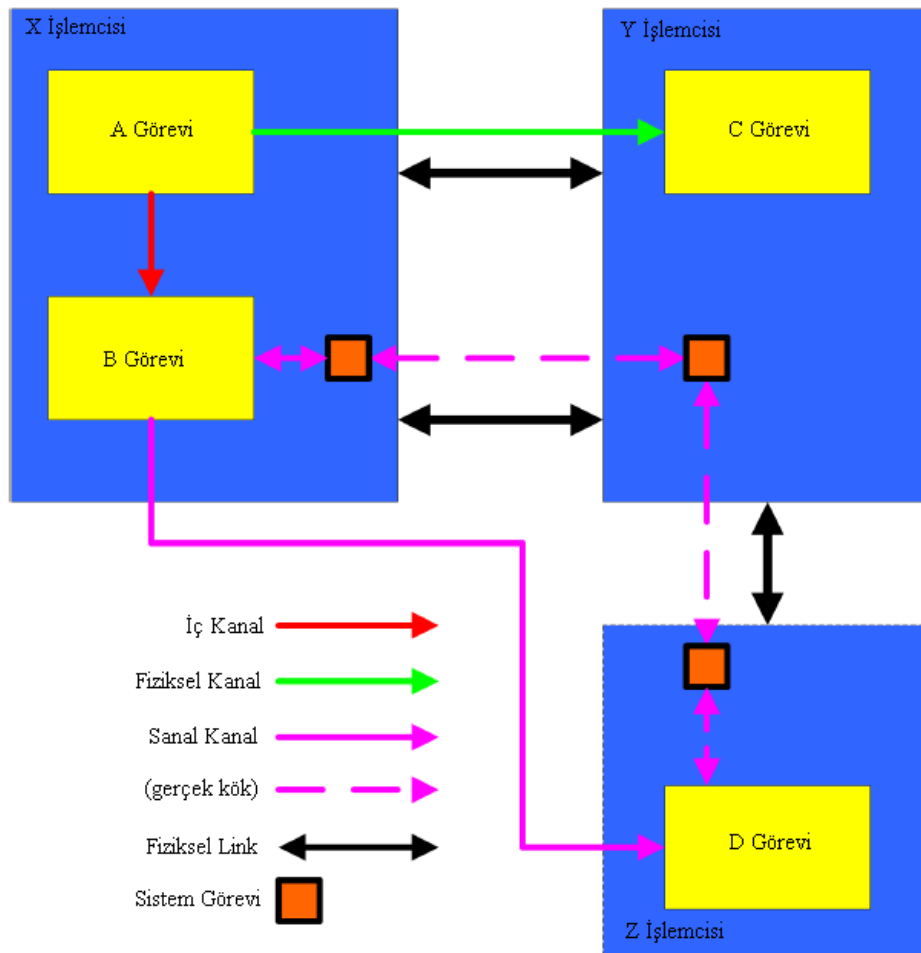
Şekil 6.13 FPGA çıkış devresi şeması.

6.2. DSP-FPGA Tümlleşik Görüntü İşlemcinin Programlanması ve Çalışması

Kullanılan görüntü işlemci kartı, Bölüm 6.1.2’de bahsedildiği gibi SUNDANCE firmasının ticari olarak üretmiş olduğu SMT339 video görüntü işlemcidir. Bu görüntü işlemcinin programlanabilmesi için gerekli olan ve TEXAS INSTRUMENTS firmasının üretmiş olduğu CODE COMPOSER STUDIO 3.3, 3L firması tarafından yazılmış olan

DIAMOND IDE BETA ve Xilinx firması tarafından yazılmış olan ISE FOUNDATION programları bilgisayara yüklenmiştir. Diamond Ide Beta programı, görüntü işlemcide bulunan DSP' nin programlanabilmesi için C programlama dili ve FPGA'nın programlanabilmesi için VHDL dili yazım ortamı sağlamaktadır. ISE FOUNDATION programı ise DIAMOND IDE BETA programında yazılan VHDL programının FPGA yüklenmesi için kullanılmaktadır.

Görüntü işlemcinin programlanması için gerekli olan DIAMOND IDE BETA programında, DSP ve FPGA ayrı işlemciler olarak gösterilmektedir. Bu işlemcilerden DSP ana işlemci ve FPGA ise bu işlemciye iliştirilmiş düğüm işlemcisi olarak gösterilmektedir. Bu programın mantığı ise her bir işlemcinin altında görev adı verilen alt programların yazılıp, bunların birleştirilmesinden ibarettir. Her bir alt program, bağlanacağı diğer alt programa giriş ve çıkış portları vasıtasıyla sağlanmaktadır. İki işlemci arasında bağlantı, fiziksel linkle sağlanmaktadır. Ayrı işlemcilerdeki görevlerin birbirine bağlantısı, fiziksel link üzerinden fiziksel veya sanal kanal tanımlanarak yapılabilir. Ancak fiziksel kanalların sayısı, işlemciler arasındaki doğrudan bağlantı ile sınırlıdır. Şekil 6.14, bu programda işlemciler ve işlemcilerde bulunan görevlerin bağlantı şeklini göstermektedir [56].

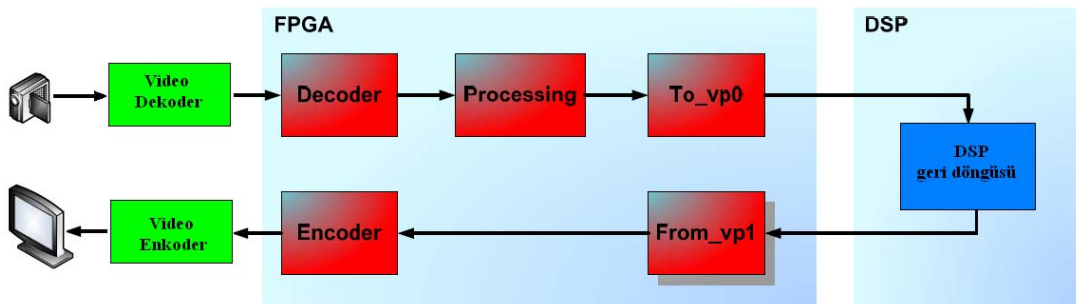


Şekil 6.14 İşlemciler ve bağlantı şekilleri.

DSP işlemcisindeki görevlerin içerisinde ana C programı ve başlık dosyaları bulunmaktadır. Bununla birlikte kullanıcıya bağlı kütüphanelerde tanımlanabilir [56]. Görüntü işlemcide kullanılan FPGA ise standart VHDL ile programlanmaktadır. Bu işlemcisinin içerisinde oluşturulan görevler, birbiriyle veya başka bir işlemcideki bir görevle bağlı olabilir. FPGA görevlerinin içerisinde bir program, bu programın paket programı ve biri kullanıcı tanımlı, diğeri de ISE FOUNDATION tarafından oluşturulabilen sınırlama dosyaları vardır.

6.2.1. Görüntü İşlemcinin Çalışma Prensipleri

Görüntü işlemci için 3L yazılım firması tarafından, Diamond Video Library (DVL) adlı bir C kütüphane programı yazılmıştır. Bu kütüphane programı içerisinde adreslemeler ile ilgili komutlar, DMA işlemi, görüntü formatı ve görüntü alma ile vermeye yönelik fonksiyonlar bulunmaktadır. Bununla birlikte görüntünün alınmasından tekrar görüntülenmesine kadar olan süreçte, FPGA da çeşitli görevler üstlenmektedir [54]. Bu görevler Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Bu şekilde; FPGA'da bulunan Decoder görevi giriş video sinyallerini alır ve her bir piksel için bilgileri belirler. Decoder görevi video işaretlerini BT.656 formatına çevirir ve her pikselin hangi çerçeveye ait olduğunu, çerçevede hangi çizgi üzerinde yer aldığını, çizgi üzerinde kaçınıcı piksel olduğunu, görüntüye veya boş bölgelere ait olduğunu belirler ve çıkışına gönderir. Bundan sonraki video formatı BT.655 olarak diğer görevlerde işlem görür. Decoder görevinin çıkışındaki video sinyalleri Processing adlı görevde işlendikten sonra, bu görevden To_vp0 adlı göreve iletilir. Bu görevin çıkışı DSP'nin bir video portuna (VP0) bağlıdır. From_vp1 görevi DSP'nin diğer bir video portuna (VP1) bağlıdır ve BT.656 formatındaki görüntü DSP'deki geri döngüsünden sonra bu göreve giriş olarak uygulanır. Bu görevin çıkışına ise Encoder görevi bağlıdır. Encoder görevi gelen video sinyallerini video enkodere iletir ve video sinyalleri video enkodere bağlı görüntüleme cihazları ile görüntülenir [54].

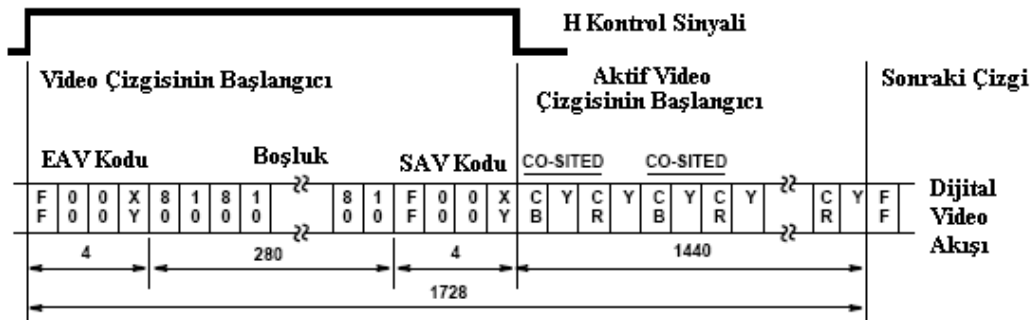


Şekil 6.15 Görüntü işleme kartının video sinyallerinin işleyiş döngüsü.

6.2.1.1. BT.656 Formatı

Bu tezde, BT.656 video formatı kullanılmıştır. Video sinyallerinin iletilmesi için ITU-R BT.601 formatının geliştirilmesinden bir süre sonra, ITU-R BT.656 formatı geliştirilmiştir. Bu format video sinyallerinin 4:2:2 YCbCr formatında iletilmesi prosedürünü tanımlar. Aktif video çözünürlüğü 720x576'dır (625/50 video sistemlerinde). BT.656 paralel interface 8 veya 10 bit çoğullanmış 27 MHz frekansındaki YCbCr video sinyallerini sağlar ki, bu klasik video zamanlama sinyallerine (VSYNC, HSYNC, BLANK) olan ihtiyacı ortadan kaldırır [57]. 4:2:2 YCbCr formatında video işaretleri $Cb_0Y_0Cr_0Y_1Cb_1Y_2Cr_1$ şeklinde iletilir. Burada 4:2:2'nin anlamı gri seviyeli piksellerin renkli piksellerin herhangi birinin iki katı olduğudur. PAL yayını (625/50 video formatı) için video sinyallerinin akışı Şekil 6.16'da gösterilmiştir [57].

Her bir Aktif Video Başlama (Start of Active Video-SAV) kodundan sonra gelen video sinyalleri her zaman mavi piksel ile başlar ve Şekil 16.a'daki gibi devam eder. Her bir video çizgisi 13.5 MHz ile örneklenir ve 24 bitlik 4:4:4 YCbCr işareti üretilir ve bu işaret de 16 bitlik 4:2:2 YCbCr video sinyallerine çevrilir. Bir aktif video çizgisinde 720 Y ve 360'ar tane Cb ve Cr pikselleri bulunur. Bu da aktif video çizgisinin 1440 pikselden oluşmasını sağlar. Y ve CbCr verileri çoğullandıktan sonra toplam 27 MHz'lik bir video sinyali elde edilir [57].

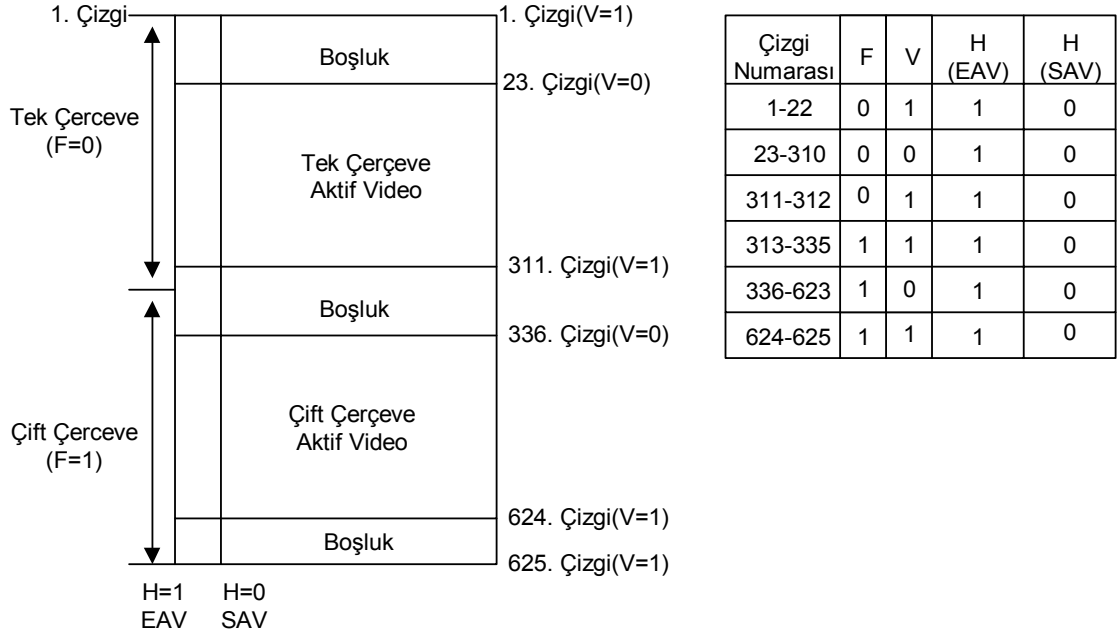


Şekil 6.16 BT. 656 video formatı.

Kare piksellerin elde edilmesi için 27 MHz saat darbeleri yerine 24.54 Mhz'lik saat darbeleri kullanılmaktadır [57]. Çalışmada kullanılan görüntü işlemci için de 27 MHz'lik sinyal, FPGA'da ofset zamanı kullanılarak aktif genişliği 24.54 Mz'lik saat darbelerine eşit olacak saat darbeleri elde edilmiştir.

SAV ve Aktif Video Sonu (End of Active Video-EAV) kodlarındaki XY olarak gösterilen 8 bitlik veri kelimesinden aktif çizginin başlangıcı veya sonu olduğu bilgisi çıkartılır. Ayrıca bu durum kelimesinin Çerçeve-Dikey-Yatay (Frame Vertical Horizontal FVH) bilgi bitleri vardır. F bitinin, lojik 0 olması çizgilerin çift (0, 2, 4, 6,...) olduğu çerçeveyi ve lojik 1 olması çizgilerin tek (1, 3, 5, 7,...) olduğu tek çerçeveyi gösterir. V bitinin lojik 0 veya lojik 1

olması, video çizgisinin sırasıyla aktif görüntü bölgesine veya dikey boşluk bölgesine ait olduğunu belirler. SAV kodunda H biti lojik 1 ve EAV kodunda H biti lojik 0'dır. Bu anlatım Şekil 6.17'de gösterilmiştir [57].



Şekil 6.17 Görüntü çerçevelerinin satırlarının gösterilimi.

BT.656 video formatında veri paketleri 8 bitten oluşuyor ise, 00xH ve FFxH değerleri zamanlama bilgisi için kullanıldığından, bu işaretlerin görüntü verisi olarak kullanılmaması gerekmektedir.

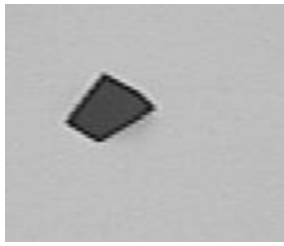
6.3 Deneysel Çalışma

Bu tezde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, 3 farklı nesne kullanılmıştır. Bu nesneler Şekil 6.18'den de görüldüğü gibi bir küp, üçgen prizması ve yarım silindirden meydana gelmektedir. Ancak sınıflandırma için Zernike moment metodu kullanıldığından, moment hesaplaması görüntü içerisindeki piksel sayısına ve piksellerin yerlerine göre değişik çıkmaktadır. Yani görüntü içerisindeki tanınması istenen nesneye ilaveten farklı bir nesnenin bulunması moment terimlerini etkileyebilmekte ve farklı değerlerde çıkmasına sebep olabilmektedir. Buna bağlı olarak, cismin tanınması ve geometrik moment merkezinin bulunması mümkün olmayabilir. Bu anlatılanların sonucunda, yapılan deneysel çalışmada kullanılmak üzere alınan görüntü karelerinde sadece bir nesne bulunmaktadır.

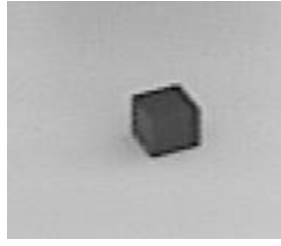


Şekil 6.18 Deneyde kullanılan nesneler.

Yapılacak sınıflandırma için özellik vektörlerinin çıkartılmasında, Zernike moment metodu kullanılmıştır. Zernike moment katsayılarının daha önceden de belirtildiği gibi yer değiştirme, ölçek ve rotasyondan bağımsız olduğu bilinmektedir. Buna bağlı olarak kullanılan nesnelerin görüntü içerisinde yer değiştirmesi veya nesnenin farklı pozisyonları veya ölçeklenmesine bağlı olarak çok çeşitli sayılarda görüntü alınmıştır. Bu görüntülerden bir kaçı Şekil 6.19’da görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.19 Deneyde kullanılan nesnelerin Y bileşenleri.

Deneyisel çalışmada kullanılan görüntü işlemci kartındaki mevcut video yakalama şekli, kompozit video (YCbCR) formatındadır. Yapılan deneysel çalışmada bu format kullanılmıştır ve Şekil 6. 19’da verilen görüntüler, her bir nesnenin alınan renkli görüntülerindeki aydınlık bileşenleridir (Y). Diğer mavi ve kırmızı bileşenleri bu aşamada kullanılmamıştır. Tezin amacına yönelik olarak, her bir nesnenin aynı anda 128x128 piksel boyutunda iki farklı (sol ve sağ) görüntüsü alınmıştır. Bu görüntü çiftlerinden biri Şekil 6.20’de verilmiştir. Kameralar paralel eksenli olduklarından dolayı nesnenin sağ kameradaki görüntüsü sol kameradaki görüntüsüne göre x ekseninde ötelenmiş olarak görülmektedir.



Şekil 6.20 Nesnenin stereo görüntüleri.

Görüntü çiftlerinin ışığa ve gölgeye karşı duyarlılığını azaltmak için bu görüntülere bir eşik fonksiyonu uygulanmış ve görüntülerin 0 ve 1 değerleriyle birlikte ikili karşılıkları elde edilmiştir. Burada 1 değeri beyazı ve 0 değeri siyahı temsil etmektedir ve görüntüde 1 değeri nesneye, 0 değeri ise nesnenin bulunduğu yüzeye karşılık gelmektedir. Bu fonksiyonun görüntülere uygulanmasından sonra elde edilen ikili görüntüler Şekil 6.21’de gösterilmiştir.



Şekil 6.21 Nesnenin eşik fonksiyonlu stereo görüntüleri.

İkili görüntüler elde edildikten sonra, görüntülerden özellik çıkartımı için Zernike moment metodu uygulanmıştır. Zernike moment katsayıları [25] ve [26]’da belirtildiği gibi geometrik moment metodundan faydalanılarak bulunmuştur. Wee ve Paramesran tarafından yapılan çalışmada [26] örnek bir veri Zernike moment katsayıları ve DSP’de elde edilen katsayılar Tablo 6.1’de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere DSP’de yazılan program doğru sonuçları vermektedir. Bununla birlikte, nesnelerin yer değiştirmeden ve nesnelerin kameraya olan uzaklıklarına bağlı olarak meydana gelen ölçekten bağımsız olabilmeleri için geometrik moment merkezinin 0 noktasına çekilmesi ve normalize edilmesi gerekmektedir. DSP’deki program, geometrik momentlerin (5.5) ve (5.6)’ya göre hesaplanması için düzenlenmiştir.

Tablo 6.1 Zernike moment katsayıları

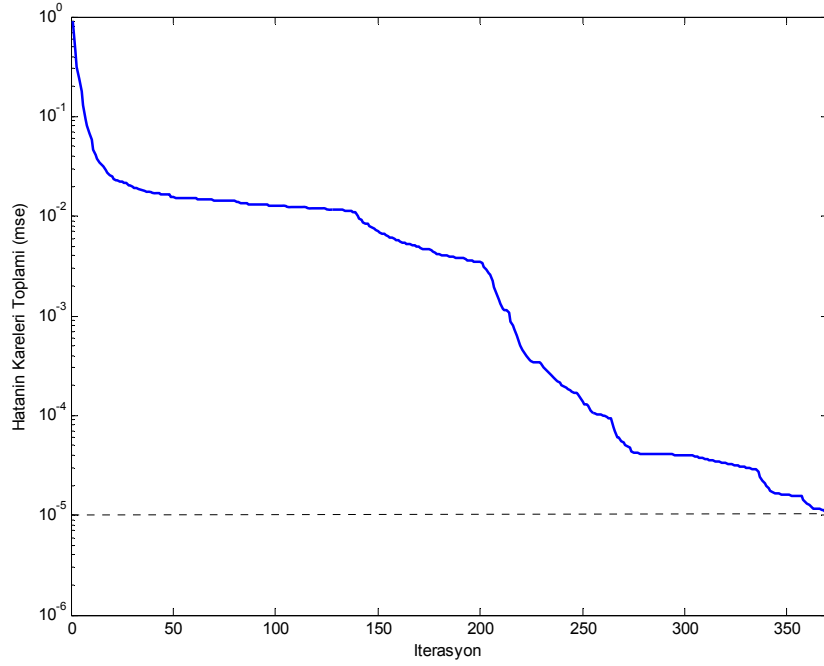
p	q	Zpq[26]	Zpq(DSP'de elde edilen)
0	0	5.4113	5.411268
1	1	0	0
2	0	-5.4113	-5.41127
2	2	0	0
3	1	-0.3376-1.3505i	-0.337618-1.350474i
3	3	0.3376-1.3505i	0.337619-1.350474i
4	0	-1.8038	-1.80375
4	2	0	0
4	4	-1.8038	-1.80376
5	1	0.2321+0.9285i	0.232113+0.928450i
5	3	-0.4959+1.9835i	-0.495878+1.983509i
5	5	0.2638+1.0551i	0.263764+1.055058i
6	0	1.8038	1.803745
6	2	0	0
6	4	1.8038	1.803752
6	6	0	0
7	1	0.5495+2.1980i	0.549504+2.198043i
7	3	0.1328-0.5311i	0.132763-0.531048i
7	5	-0.4669-1.8675i	-0.466861-1.867451i
7	7	-0.2154+0.8616i	-0.215408+0.861631i
8	0	1.0823	1.082241
8	2	0	0
8	4	1.0823	1.082268
8	6	0	0
8	8	1.0823	1.082255

Bu çalışmada, 8. dereceye kadar olan zernike moment katsayılarının mutlak değerlerinden oluşan özellik vektörü çıkarılmıştır. Geometrik μ_{10} , μ_{01} ve μ_{00} momentleri sırasıyla 0, 0 ve 1 olarak bulunur. Dolayısıyla, bu momentlerden elde edilen Z_{00} ve Z_{11} zernike moment katsayıları özellik vektörünün dışında tutulmuştur. Böylece 23 elemandan meydana gelen özellik vektörü aşağıdaki gibi oluşur.

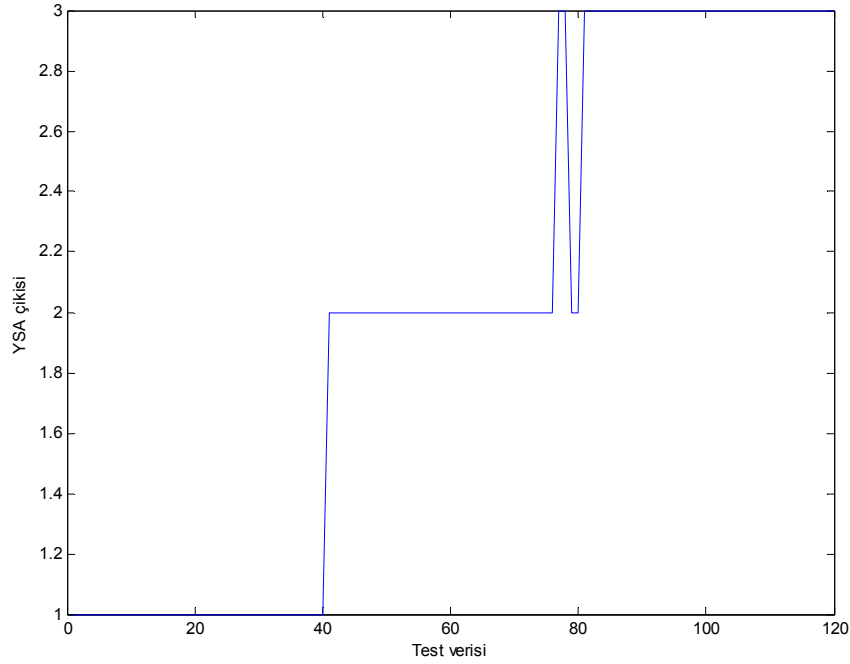
$$X=[Z_{00}, Z_{11}, Z_{20}, Z_{22}, Z_{31}, Z_{33}, Z_{40}, Z_{42}, Z_{44}, Z_{51}, Z_{53}, Z_{55}, Z_{60}, Z_{62}, Z_{64}, Z_{66}, Z_{71}, Z_{73}, Z_{75}, Z_{77}, Z_{80}, Z_{82}, Z_{88}]$$

Yapılan çalışmada her bir görüntüye ait özellik vektörü çıkarılmıştır. Çalışmada kullanılan 3 nesnenin özellik vektörlerine ait örnekler Ek.2' de verilmiştir. Bu özellik vektörleri kullanılarak 3 nesnenin sınıflandırılması için bir YSA, MATLAB programı kullanılarak eğitilmiştir. Ancak bu momentlerden 14'ü ile yapılan YSA uygulamasının başarılı olduğu tespit edilmiştir. Yukarıdaki özellik vektörünün 3., 4., 7., 10., 13., 14., 17., 18., 22. ve 23. elemanlarının değerleri 0'a çok yakın olduklarından dolayı YSA'nın yanlış çalışmasına yol

açmamaları için, bu elemanlar oluşturulan YSA'da bulunmamaktadır. Eğitilen YSA'nın performans eğrisi, Şekil 6.22 ve 6.23'de verilmiştir. Buradan elde edilen ağırlık ve eşik katsayıları, deneysel çalışma için oluşturulan programda kullanılmıştır. Bu YSA için eğitim datasının başarısı % 100, test verisi için ise % 98.33'tür.



Şekil 6.22 YSA'nın performans eğrisi.

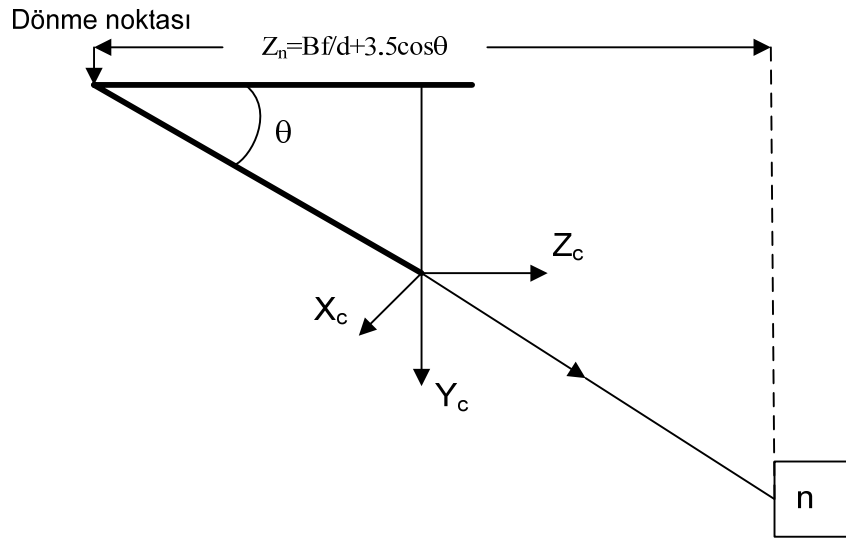


Şekil 6.23 Test verilerine göre YSA'nın çıkışı.

Nesnelerin tanınmasından sonraki süreç, nesnenin gerçek dünya koordinatlarının bulunmasını kapsamaktadır. Bunun için, (5.4)'te verilen geometrik moment merkezleri kullanılmıştır. Elde edilen stereo görüntü çiftindeki her bir görüntünün, geometrik moment merkezleri bulunmuştur. Bulunan bu geometrik moment merkezleri (6.1) ve (6.2)'de kullanılarak geometrik moment merkezlerinin her birinin ilgili görüntüdeki piksel karşılıkları bulunmuştur. Elde edilen bu piksel koordinatları, metrik birime çevrilmiş ve bu koordinatlarla birlikte (2.29) ve (2.30)'un kullanılmasıyla kameranın odak noktası ile cismin koordinat merkezi arasındaki uzaklığın Z ve X bileşenleri bulunmuştur. Ancak görüntülere ait pikseller dikdörtgen olduklarından dolayı **X** yönünde bir çarpan kullanılmaktadır. Daha sonra bu pozisyon bileşenleri, çeşitli koordinat dönüşümleri kullanılarak, robot kolunun referans koordinatlarına göre tanımlanmaktadır. Bu anlatılanlarla ilgili bağıntılar (6.1) ve (6.12) arasında verilmiştir.

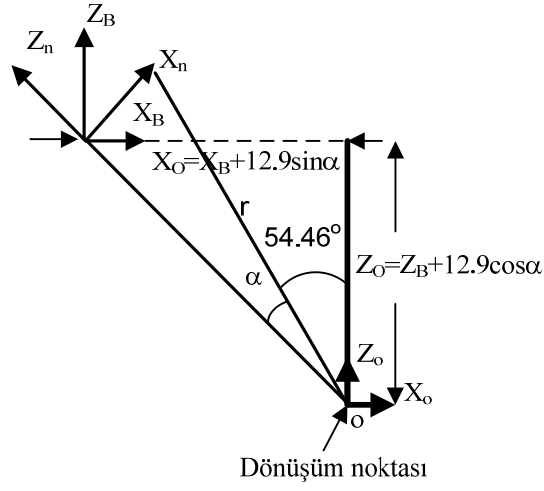
$$x_{cm} = 64 + 64 \times \sqrt{2} \times \mu_{10} \quad (6.1)$$

$$y_{cm} = 64 - 64 \times \sqrt{2} \times \mu_{01} \quad (6.2)$$

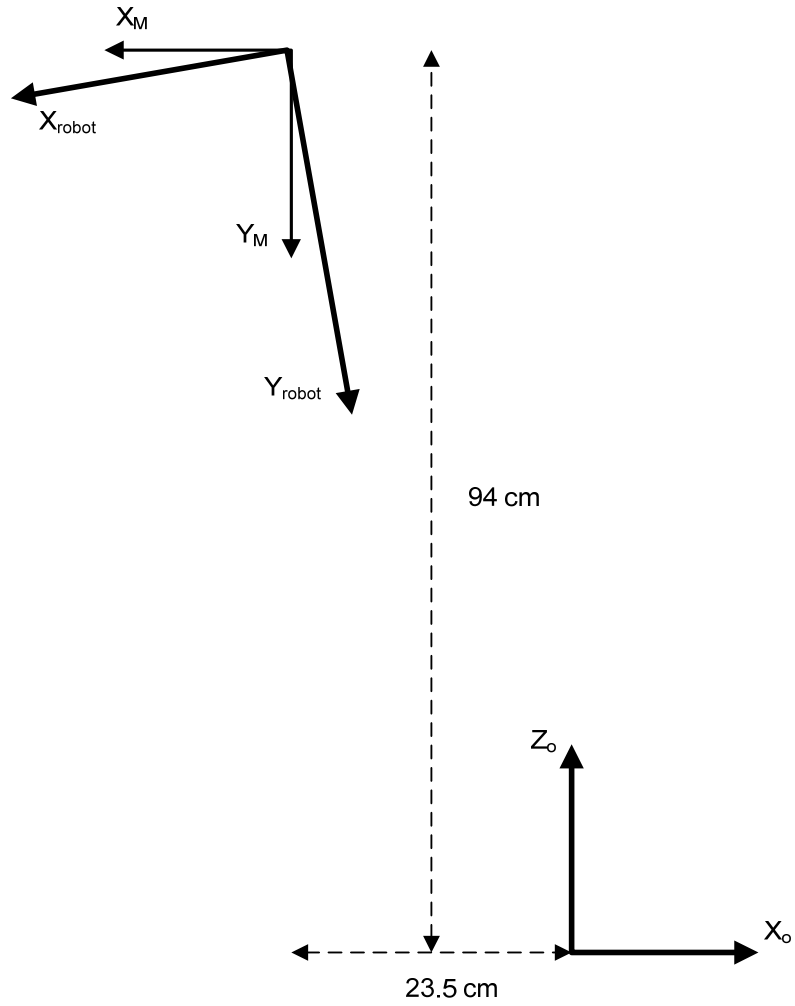


Şekil 6.24 n noktasının düşey dönme noktasına göre gösterimi.

$$Z_n = \frac{Bf}{d} + 3.5 \cos \theta \quad (6.3)$$



Şekil 6.25 Kameranın yatay dönme noktasına göre koordinat dönüşümü.



Şekil 6.26 Tabla ve robot kolu arasındaki koordinat dönüşümü.

Bu çalışmada yapılan ölçümler sonucunda, görüntü işlemci ile kameralardan elde edilen görüntülere göre kameraların odak merkezleri yaklaşık 7.6 cm bulunmuştur. Ancak yukarıda da bahsedildiği gibi x yönünde değeri 1.1 olan bir çarpan bulunmaktadır. Gerekli koordinat dönüşümleri göz önüne alınarak, kameranın görüş açısındaki herhangi bir noktanın kameraların bağlı bulunduğu tablanın merkez noktasına olan uzaklığı aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$d = 2.2 (xl - xr)/128 \quad (6.4)$$

$$Z = Bf/d \quad (6.5)$$

$$X = 2.2 Z(xl - 64)/(7.6 \times 128) \quad (6.6)$$

$$r = \sqrt{((l_1 + l_2)^2 + l_3^2)} = 12.9cm, \quad l_1 = 4cm \quad l_2 = 3cm \quad l_3 = 10.5cm, \quad (6.7)$$

$$X_B = X \cos \alpha - Z \sin \alpha - r \sin(54.46 + \alpha) \quad (6.8)$$

$$Z_B = X \sin \alpha + Z \cos \alpha + r \cos(54.46 + \alpha) \quad (6.9)$$

Kameraların bağlı olduğu tablanın merkez noktasındaki koordinat takımı ile robot koluna uyumlu olarak masanın yüzeyine çizilen koordinat arasındaki rotasyon matrisi

$$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} \quad (6.10)$$

ile verilmektedir. Bu matris ve iki koordinat takımı arasındaki öteleme kullanılarak, koordinat takımları arasındaki ilişki

$$\begin{vmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_N \\ Y_N \\ Z_N \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -23.5 \\ 94 \\ 52.6 \end{vmatrix} \quad (6.11)$$

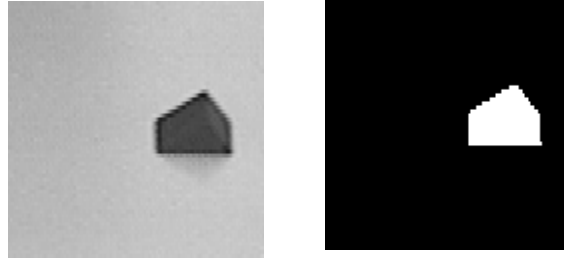
dir. Masa üzerinde bulunan herhangi bir nesnenin robot kolu tarafından alınması için, nesnenin robot koluna göre koordinat bilgisinin tanımlanması gerekmektedir. Masa üzerine yerleştirilen eksen takımı ve robot kolunun eksen takımı arasında 6.7° lik bir açı bulunması nedeniyle, robot kolunun koordinat takımı

$$\begin{vmatrix} X_{robot} \\ Y_{robot} \\ Z_{robot} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos 6.7^\circ & \sin 6.7^\circ & 0 \\ -\sin 6.7^\circ & \cos 6.7^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{vmatrix} \quad (6.12)$$

dönüşüm matrisi kullanılarak, masaya yerleştirilen eksen takımı cinsinden ifade edilmiştir. Yapılan çalışmada nesnelerin masanın yüzeyinde bulunmasından dolayı, robot kolunun eksen takımının düşey eksenindeki bileşeni dikkate alınmamıştır. Sonuç olarak masa yüzeyindeki herhangi bir nesnenin koordinat bilgisi robot kolunun eksen takımına göre ifade edilmiştir.

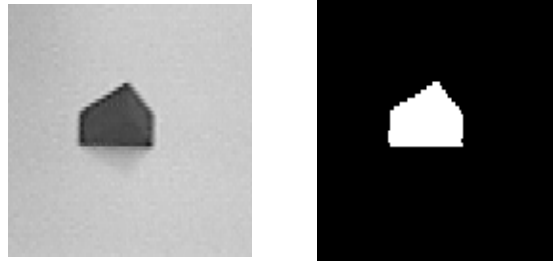
6.3.1. Deneysel Çalışmaya Ait Bir Örnek

Burada yapılan deneysel çalışmaya ait bir örnek verilmiştir. Kameraların durma anında gelen sinyal ile birlikte sol kameradan bir görüntü çerçevesi alınmış, eşik fonksiyonu uygulandıktan sonra özellik vektörü ve geometrik merkezi hesaplanmıştır. Alınan görüntü ve eşik fonksiyonu uygulanmış hali Şekil 6.27’de verilmiştir.



Şekil 6.27 Sol görüntü ve eşik fonksiyonu uygulanmış hali.

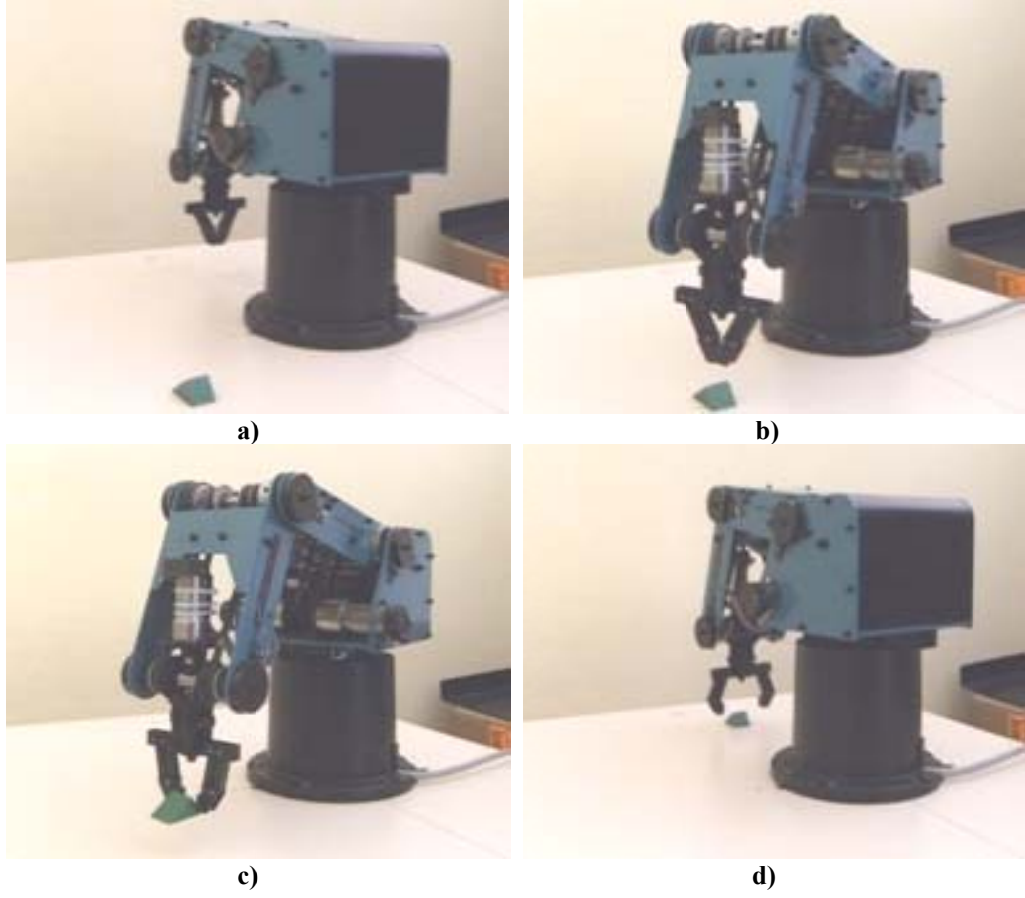
Daha sonra sağ kamera için aynı işlemler tekrarlanmıştır. Bu kameradan alınan görüntü ve eşik fonksiyonu uygulanmış hali ise Şekil 6.28’de verilmiştir.



Şekil 6.28 Sağ görüntü ve eşik fonksiyonu uygulanmış hali.

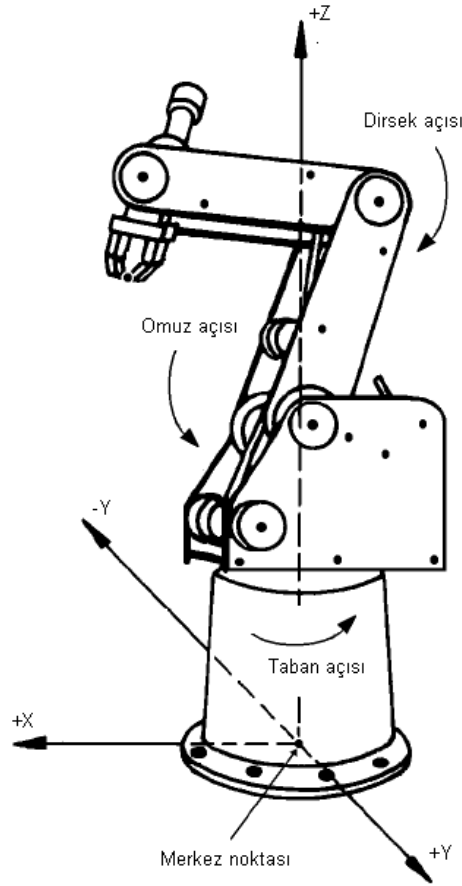
Bulunan özellik vektörleri, YSA’ya uygulanmış ve nesne tanınmıştır. Tanınan nesnenin sağ ve sol kameraya ait geometrik merkezleri, metrik birim cinsinden ifade edilmiştir. Bu değerler ve Bölüm 2’de açıklanan stereovizyon algoritması kullanılmıştır ve nesnenin pozisyonu sol kameraya göre hesaplanmıştır. Bulunan bu değer, (6.7)-(6.12) denklemleri kullanılarak, kameraların bağlı bulunduğu tablanın orjinine, masa yüzeyine ve sonuç olarak ta robot kolunun koordinat düzlemine dönüştürülmektedir.

Bulunan x ve y koordinat bileşenleri sırası ile DSP’de üretilmekte ve FPGA çıkış portundan robot kolunun kontrol ünitesinin giriş portuna iletilmektedir. Kontrol ünitesinin yönlendirmesi ile robot kolu bu noktanın Z ekseninde 5 cm üzerine gitmekte robot kolunun tutacağı açılmakta, sadece düşey olarak 1 cm mesafeye gelecek kadar tekrar hareket yapılmakta ve daha sonra tutacak kapanıp nesne tutulmaktadır. Daha sonra, tutacakta nesne olduğu halde bu işlemler ters bir şekilde yapılarak, nesne istenilen yere robot kolu tarafından bırakılmaktadır. Anlatılan bu işlemler Şekil 6.29’da sırası ile verilmiştir.



Şekil 6.29 Robot kolunun nesneyi alma hareket sırası.

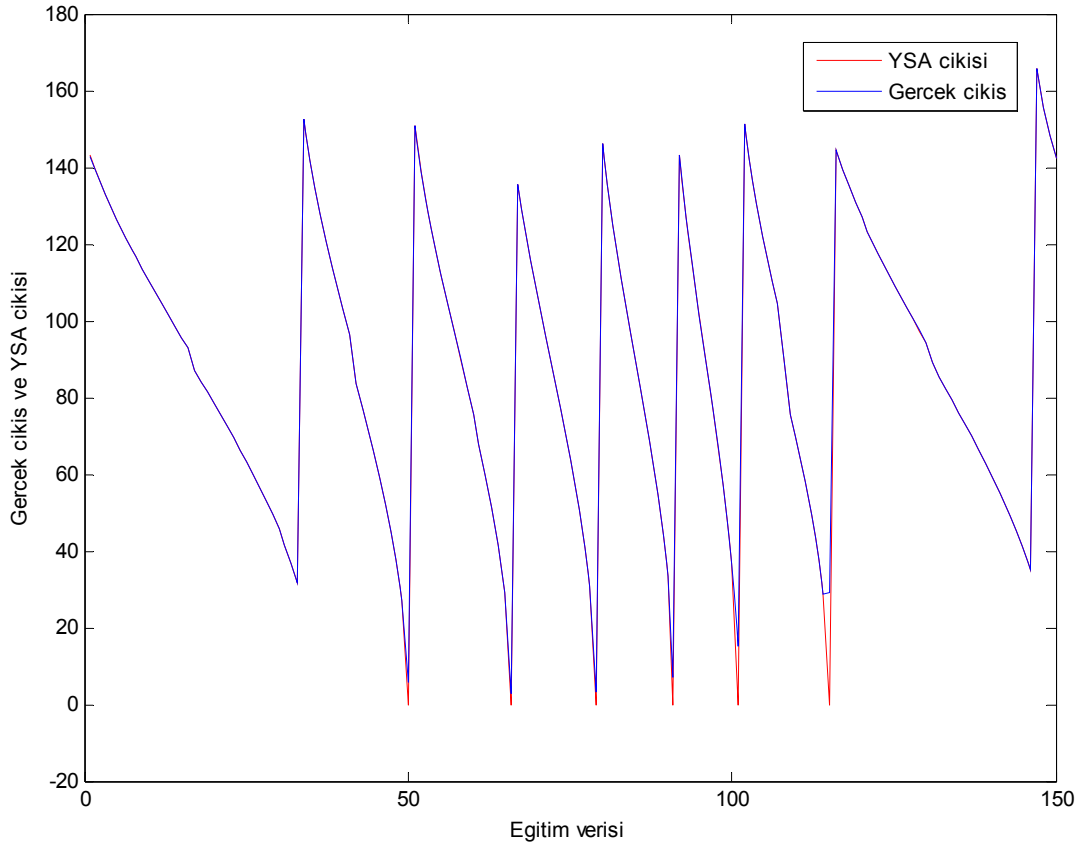
Deneysel çalışmanın bir başka aşamasında, robot kolunun sevk edileceği koordinatları sağlayabilen ilk üç ekleminin dönme açıları YSA ile bulunmuştur. Bu işlemi yapabilmek için robot kolunun manuel hareketinin de yapılabildiği, Scorbace programı ile deneysel pozisyon bilgileri robot koluna giriş olarak verilmiş ve ilk üç eklemine ait elde edilen açılar kaydedilmiştir. Robot kolunun açıları, eklem motorlarına ait encoder çıkışları ile verilmektedir. Encoder çıkışları 142.5 ile bölünerek o motora ait açılar bulunmaktadır. Giriş verileri, bir önceki deneysel çalışma ile uyumlu olarak x ve y koordinat bilgileri ile sabit z koordinat bilgisinden ($z=5\text{cm}$) oluşmaktadır. Robot kolunun bilek hareketini sağlayan açıları da sabit tutulmuştur. Robot kolunun x ve y koordinat bilgilerine göre ilk üç eklemine ait açılar Şekil 6.30'da görülmektedir.



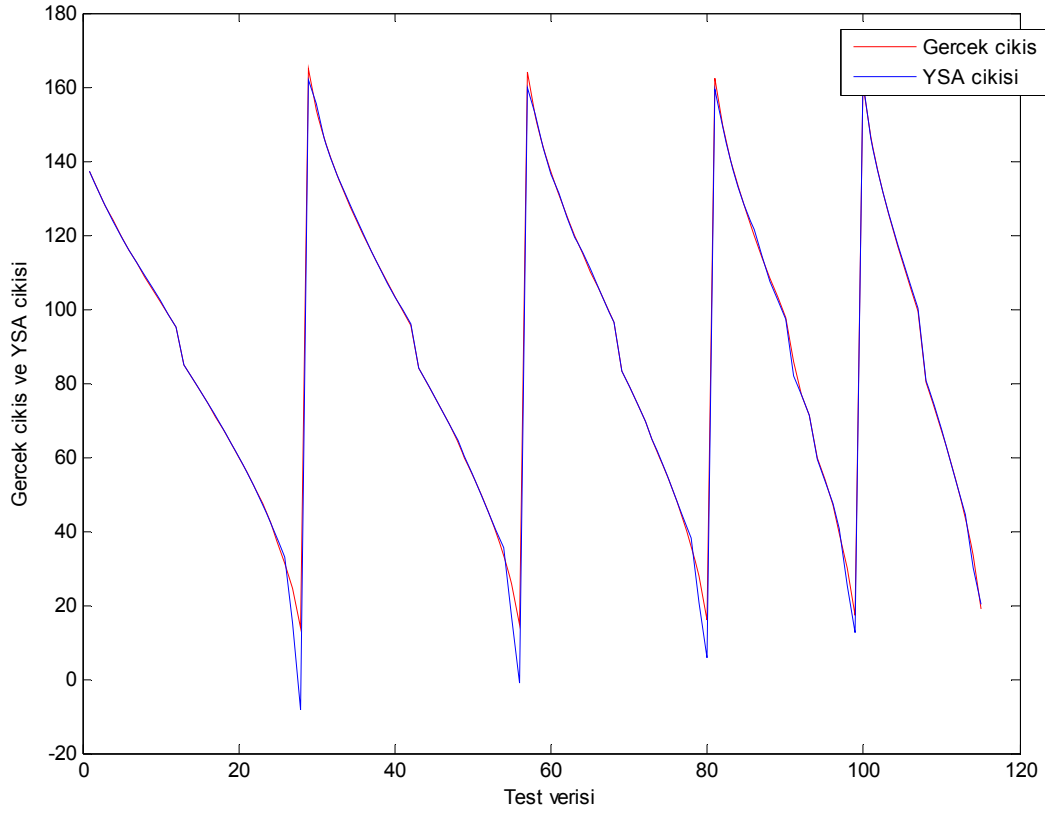
Şekil 6.30 Robot kolunun ilk üç açısı.

Robot kolunun açılarını bulmak için üç tane ayrı YSA kullanılmıştır. Bunun yapılmasındaki amaç, dirsek ekleminin açısının diğerleri ile birlikte bulunamamasından kaynaklanmaktadır.

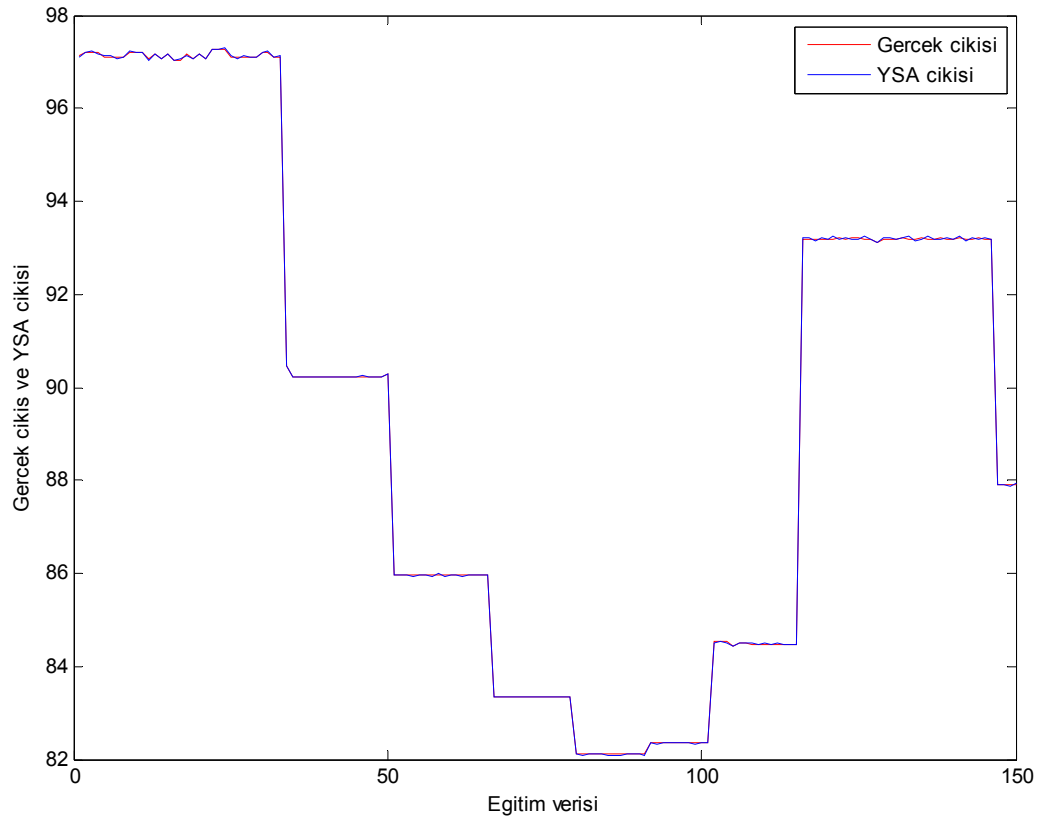
Robot kolunun açılarının bulmak üzere masa yüzeyi taranarak toplam 266 veri alınmıştır. Bu verilerin ilk 150 tanesi YSA'yı eğitmede, geri kalanları ise test verisi olarak kullanılmıştır. Oluşturulan YSA'ların eğitim ve test verilerine verdiği cevaplar Şekil 6.31-36'da gösterilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, gerçek hatanın kararlı durumlarda ortaya çıkan veriler olduğudur ve bu şekillerden de görüldüğü üzere çok küçük değerler almaktadır. Şekillerde örülen yüksek eğimli pikler ise robot kolunun bir pozisyondan diğer pozisyona anlık olarak gitmesi durumunda oluşabilecek sonuçlardır ve bu da pratik devreler için mümkün görünmemektedir.



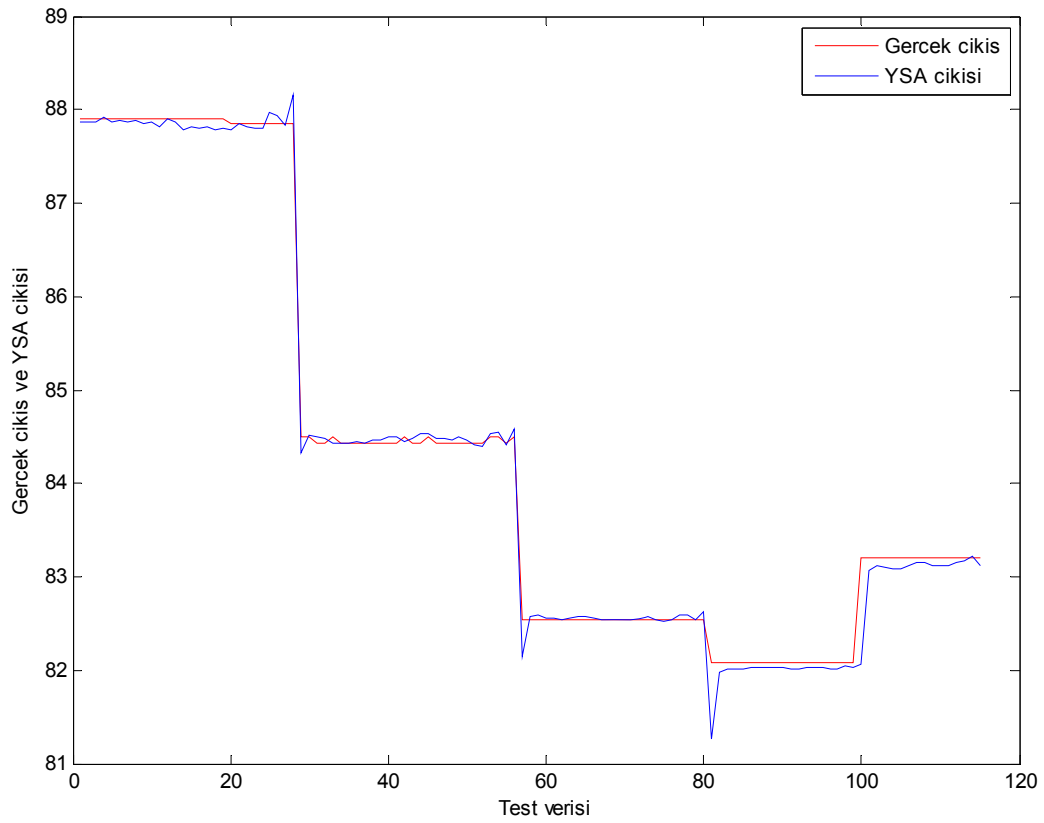
Şekil 6.31 Eğitimde kullanılan taban açısı ve YSA'nın çıkışı.



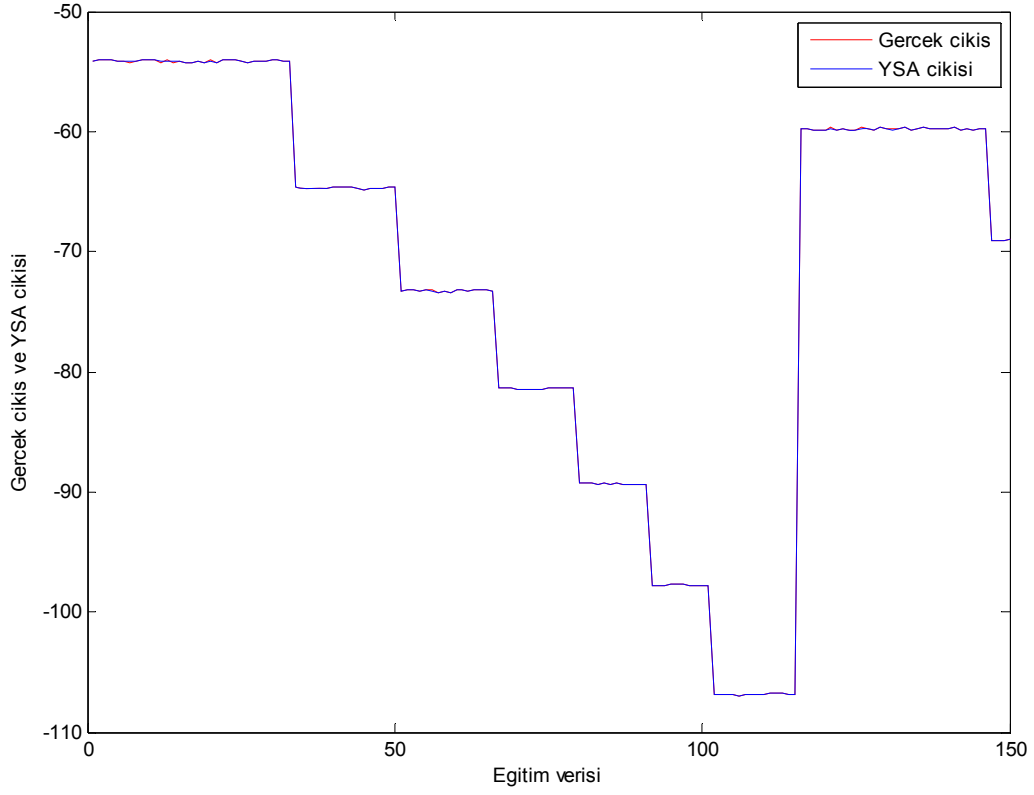
Şekil 6.32 Testte kullanılan taban açısı ve YSA'nın çıkışı.



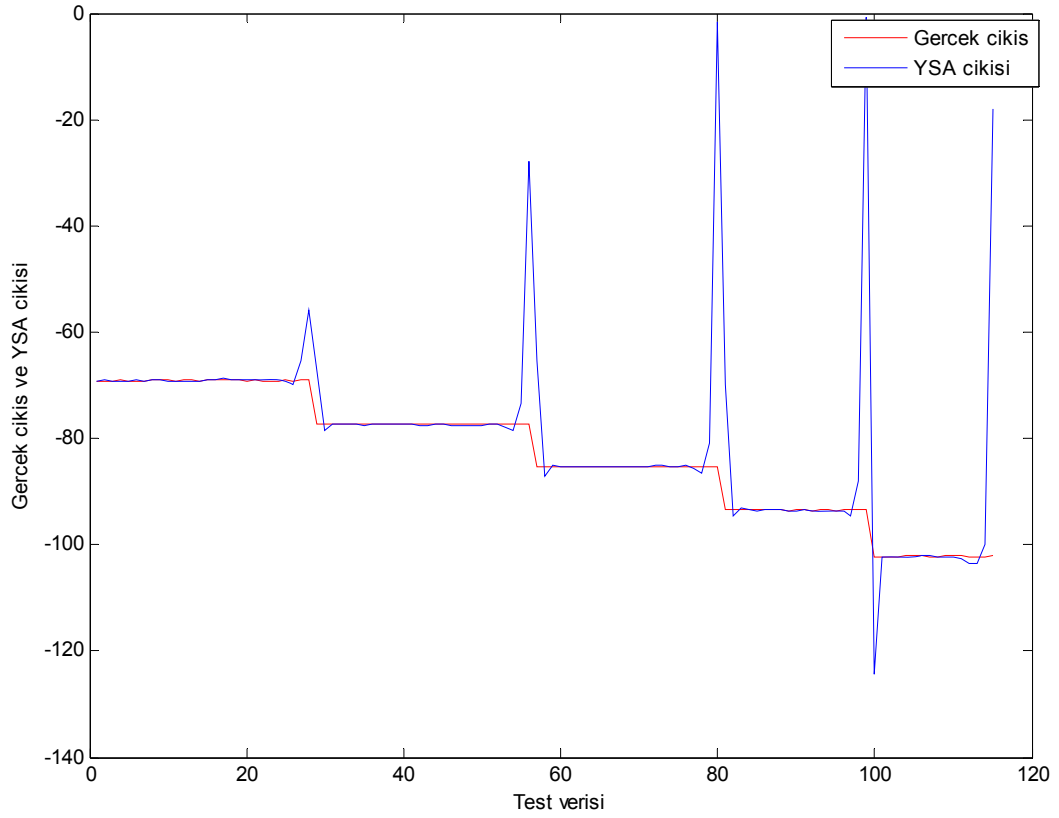
Şekil 6.33 Eğitimde kullanılan omuz açısı ve YSA'nın çıkışı.



Şekil 6.34 Testte kullanılan omuz açısı ve YSA'nın çıkışı.



Şekil 6.35 Eğitimde kullanılan dirsek açısı ve YSA'nın çıkışı.

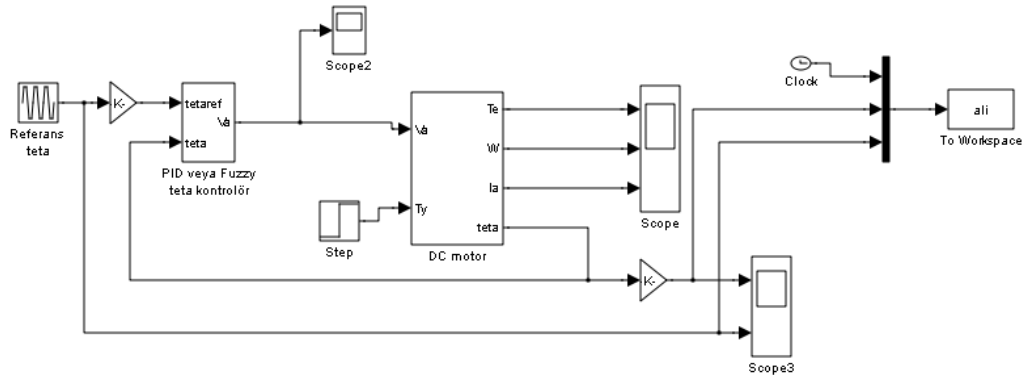


Şekil 6.36 Testte kullanılan dirsek açısı ve YSA'nın çıkışı.

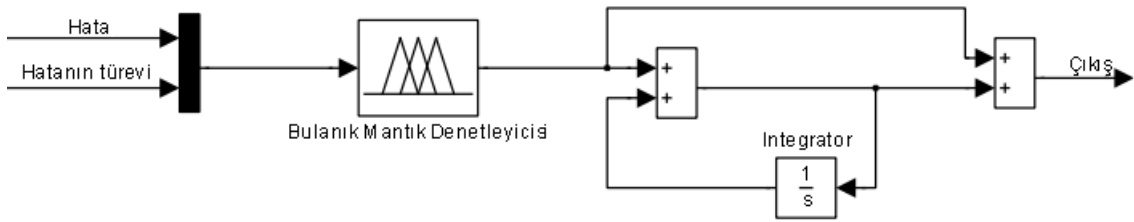
Bu tez çalışmasının son kısmı ise robot kolunu yatayda hareket ettiren motorun PID kontrolörünün bulanık kontrolörle değiştirilerek simüle edilmesini kapsamaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan robot kolunun eklemleri DC servomotorlar tarafından hareket ettirilmektedir. Bu motorlar Pitman fırçalı DC motorlardır ve statorlarında sabit mıknatıslar bulunmaktadır. Robot kolunda 3 farklı modelde 6 tane DC motor bulunmaktadır. Bu motorlardan üçü robot kolunun ilk üç eklemine hareket ettirmekte, diğer iki tanesi robot kolunun bilek hareketlerini yaptırmakta ve bir tane motor da robot kolunun tutacağını açıp kapatmaktadır. Bu motorların kontrolü robot kolu kontrolör ünitesinde var olan PID kontrolörler tarafından yapılmaktadır. PID kontrolörlerin çıkışları ± 2.5 V çıkış vermekte ve bu gerilim değeri ile PWM sinyali üretilerek motorun hareket ettirilmesi sağlanmaktadır. Deneysel çalışmanın son kısmında robot kolunun yatay hareketini yaptıran motor, MATLAB/Simulink programında modellenmiştir. Bu motor Pitman 9413 model DC fırçalı servomotordur. Bu motor yukarıda da bahsedildiği gibi motorun statorunda sabit mıknatıs olduğundan dolayı serbest uyarımlı DC motor olarak modellenmiştir. Bu özellikten dolayı motorun uç gerilimi ile hızı arasında doğrusal bir ilişki vardır [58]. Bu motora ait parametreler ise aşağıdaki gibidir [59].

$$\begin{array}{ll}
 V_a=12V & V_f=12V \\
 R_a=2.17\Omega & L_a=1.54e-3H \\
 K_t=0.01997Nm & K_w=0.01451Nm \\
 T_y=0 & J=0.0000002782kgm^2
 \end{array}$$

Motorun Simulink modeli Şekil 6.40' da verilmiştir. Motorun nominal uç gerilimi 12V ve nominal hızı 5592 dev/dak.'dır. Uyarım kısmında mıknatıs bulunduğundan dolayı uyarım eşdeğer parametreleri r_f ve l_f [59] üretici firmanın teknik verilerine göre uygun olarak seçilmiştir. Motorun maksimum uç gerilimi 24 volta kadar çıkabilmekte ancak üretici firma tarafından motorun maksimum gerilim değerinde uzun süre çalıştırılması önerilmemektedir. Üretici tarafından robot kolunun kontrol ünitesine yüklenen bu motora ait PID parametre değerleri ise sırasıyla 200, 1000 ve 250'dir. Oluşturulan Simulink modelinde PID kontrolör de tasarlanmış ve model çalıştırıldıktan sonra verilen referans konum için motorun bu değere ulaştığı gözlenmiştir. Oluşturulan model ve kontrolör Şekil 6.37'de verilmiştir.



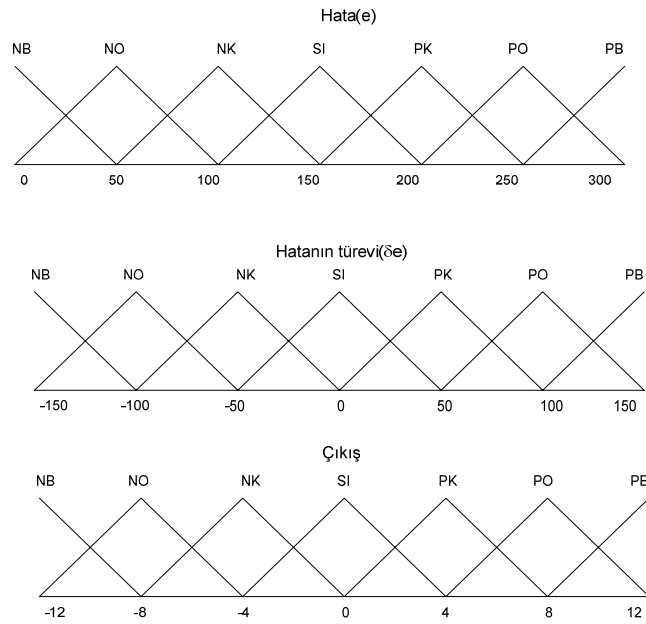
a) Servomotor ve kapalı çevrim kontrol modeli.



b) Bulanık PD+I kontrolör modeli

Şekil 6.37 Servomotor Modeli ve Bulanık Kontrolör.

Deneysel çalışmanın bu kısmında robot kolunun kontrolünün bulanık kontrolör ile yapılması hedeflenmiştir. Bu bulanık kontrolün modeli [60]'da verilen 2 girişli Bulanık PID kontrolörün sürekli hali gibi düşünülerek yapılmıştır. Bu kontrolörün simülasyonu yapılmıştır. Oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 6.38'de gösterilmiş ve bulanık kontrolöre ait kural tablosu ise Tablo 6.2'de verilmiştir [61].



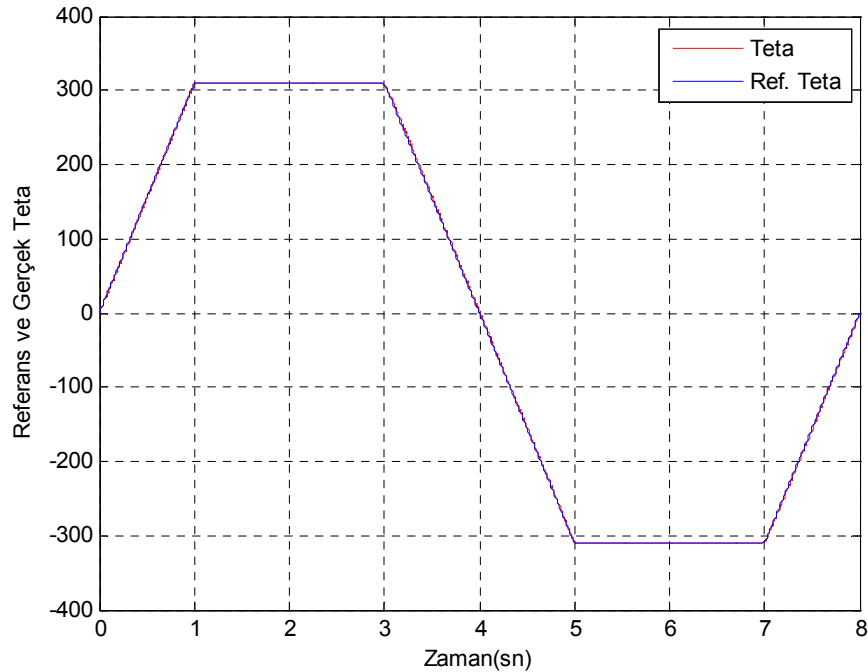
Şekil 6.38 Bulanık PD giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları.

Tablo 6.2. Bulanık PD kural tablosu

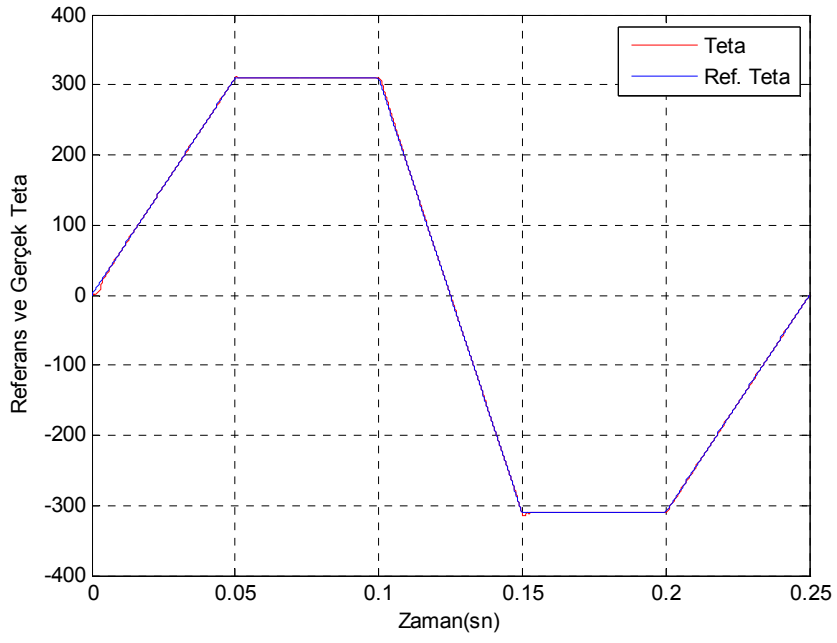
δe e	NB	NK	SI	PK	PB
NB	NB	NB	NO	NK	SI
NK	NB	NO	NK	SI	PK
SI	NO	NK	SI	PK	PO
PK	NK	SI	PK	PO	PB
PB	SI	PK	PO	PB	PB

Bu motorun PID ve Bulanık PID kontrolünden elde edilen, konum ve hıza göre çeşitli sonuçlar Şekil 6.39-6.43’de gösterilmektedir. Benzetim sonuçlarından da görüldüğü gibi, adaptif özelliğe sahip BM denetleyicinin hız performansı klasik PID kontrolöre göre çok daha iyidir. Ayrıca ulaşılmaması istenen herhangi bir hedef noktaya göre, BM denetleyicinin konum hatası daha az olmaktadır.

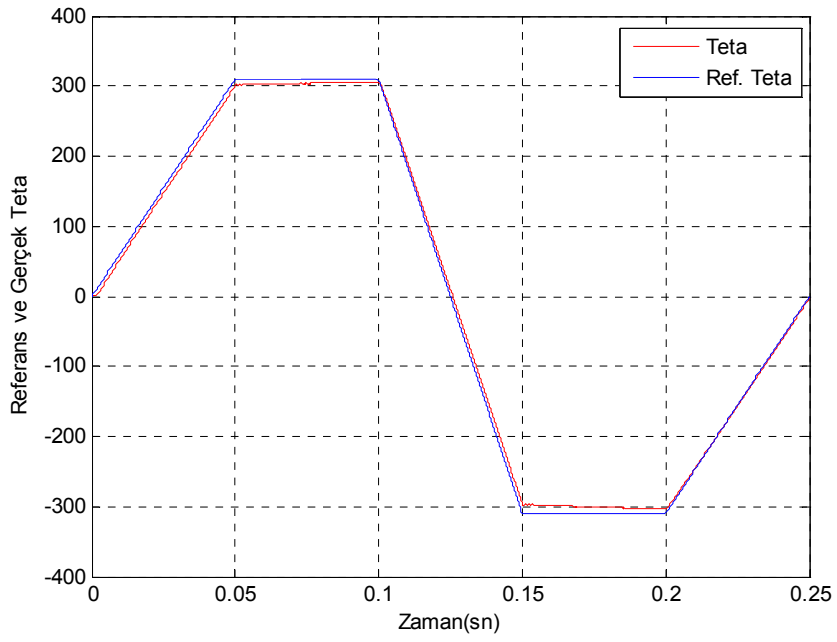
BM kontrolörünün sadece benzetiminin yapılması da, üretici firmanın PID kontrolörleri donanımsal olarak oluşturması ve kontrolöre dışarıdan müdahale edilme imkânı vermemesinden kaynaklanmıştır. Bu nedenle donanıma müdahale edilme imkânı olmadığından, BM denetleyicinin pratik uygulaması yapılmamıştır.



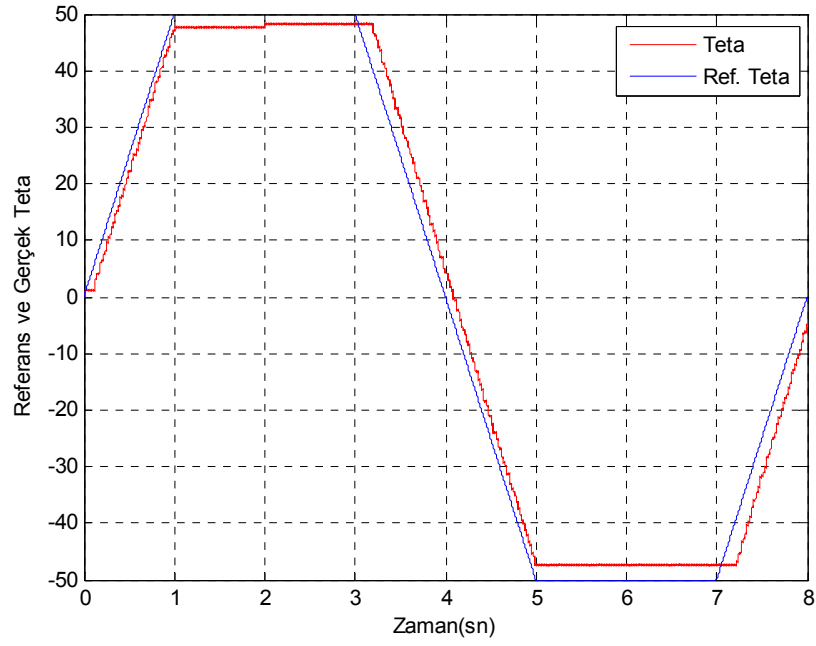
Şekil 6.39 Referans konum ve PID’ye bağlı çıkış (Teta=±310°).



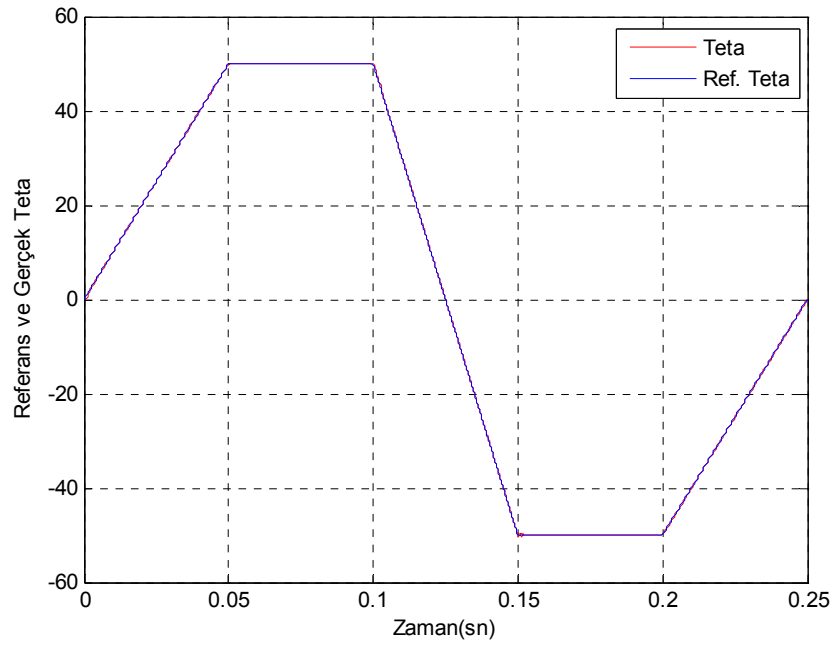
Şekil 6.40 Referans konum ve BM denetleyiciye bağlı çıkış(Teta= $\pm 310^\circ$).



Şekil 6.41 Referans konum ve PID'ye bağlı çıkış (Teta= $\pm 310^\circ$).



Şekil 6.42 Referans konum ve PID'ye bağlı çıkış (Teta=±50°).



Şekil 6.43 Referans konum ve BM denetleyiciye bağlı çıkış (Teta=±50°).

Robot kolunun kontrol ünitesinde motorları hareket ettirmeden önce hız bilgisi sabit olarak girilmekte ve robot kolu gideceği pozisyon için hareketini tamamlayana kadar hız değiştirilememektedir. Motorları hareketlendirmek için servo kontrolün aktif hale getirilme zorunluluğu dışında doğrudan üretilen gerilimi etkileyen dijital analog dönüştürücü çıkışına -2.5V ile +2.5V gerilim değerleri atanabilmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı; görsel verilerin yardımıyla, çeşitli nesnelerin birbirinden ayırt edilerek tanınması, görüntü içerisindeki bir nesnenin referans bir noktaya göre uzaklığının bulunması ve bir robot kolunun bu veriler yardımıyla yönlendirilerek o nesneyi almasıdır. Bu amaca yönelik olarak bir deneysel düzenek kurulmuştur.

Deneysel düzenekte, belirli nesnelerin görüntü verileri yardımıyla tanınması için, alan temelli özellik vektörleri çıkartılmış, istenen nesnenin bir referans noktasına göre geometrik yeri stereo görme işlemi ile bulunmuş ve bir robot kolu da bulunan bu noktaya yönlendirilip nesne alınmıştır. Bunun için deneysel düzenekte bulunan görüntü işleme kartı ve robot kolu kontrolör ünitesi için çeşitli programlar yazılmıştır. Bu programlar arasında; nesnelerin ölçekten, yer değiştirmeden ve rotasyondan bağımsız olarak özellik vektörünün çıkarımını sağlayan Zernike moment metodu ve nesnenin tanınmasında kullanılan YSA algoritması, nesnelerin pozisyon bilgilerinin çıkartıldığı paralel eksenli stereo görme algoritması bulunmaktadır. Ayrıca koordinat eksenlerinin birbirine dönüştürülmesi için bir program parçası, robot kolunun ilk üç eklemine ait açıların bulunması için üç tane YSA algoritması ve robot kolunun deneysel çalışmanın amacına yönelik olarak hareket ettirmeyi sağlayan programlar da yazılmıştır. Robot kolunun yönlendirileceği bir pozisyona gitmesi için gerekli ilk üç eklemının açılarını bulmak üzere üç ayrı YSA'nın benzetimi yapılmıştır ve başarılı oldukları görülmüştür. Bunlara ilaveten robot kolunun taban motorunun hareketini kontrol eden PID kontrolörün yerine kullanılan bir bulanık kontrolörün benzetimi yapılmıştır. PID kontrolörün parametrelerinin değişmeyeceği düşünülürse, adaptif bir kontrolör olan BM kontrolörün kullanılması sistemin hız ve zaman ilişkisi açısından daha uygun sonuçlar üretecektir. Bu tezde, önceki bölümlerde bahsedilen nedenlerden dolayı BM kontrolörün pratik uygulaması yapılamamıştır.

İlk yapılan uygulamada görüntüler için çıkartılan Zernike moment katsayılarının tanınması istenen her bir nesne için kendi içerisinde tutarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca nesnelerin tanınmasında kullanılan YSA için yapılan 180 verilik testte nesnelerin tanınma başarımı % 98.33 olmuştur. Bu uygulamanın içerisinde bulunan koordinat dönüşümü işlemi için, DSP'nin görüntü işleyiş şekline ve görüntü işlemede kullanılan video frekansına bağlı olarak eşdeğer kamera modeli çıkartılmıştır. Bu modelin kullanılması ve oluşturulan stereovizyon ve koordinat dönüşüm programları sayesinde, nesnenin pozisyonu robot koluna aktarılmaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan hareketli kameralar için yatay ve düşey açıların, yapılan masa yüzeyinin taranması için 6° den daha küçük olmasına karar verilmiştir. Bunun nedeni ise daha büyük açılarda kameraların görüş açısının masa yüzeyini aşarak deneysel çalışmayı olumsuz etkilemesidir.

Robot kolunun her bir eklemine ait, ayrı bir servo statoru sabit mıknatıslı dc fırçalı motor bulunmaktadır. Her bir motorun ise ayrı bir PID kontrolörü vardır. Bunlardan taban eklemine ait motor için BM denetleyicinin benzetimi yapılmıştır. Bu kontrolörün ani değişen konumlara iyi bir performans gösterdiği, yapılan benzetimin sonuçlarından görülmektedir.

Nesnenin bulunduğu ortamdaki ışık miktarına ve gölgelenmeye bağlı olarak görüntü bilgilerinin değeri değişmektedir. Bu yüzden aynı görüntünün farklı ışık koşullarında elde edilen geometrik momentler ve bunlara bağlı olarak hesaplanan zernike momentleri farklı çıkabilmektedir. Sonuç olarak, görüntü işlemede moment metodlarının kullanılabilmesi için ışık koşullarının etkisinin minimuma indirgenmesi gerekmektedir.

Görüntülerin alınmasını sağlayan DSP-FPGA tümleşik görüntü işlemci, üretici firma tarafından tek video kanalı ile görüntülerin iletilebildiği bir şekilde tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, bu kart iki kameradan da görüntü alabilecek hale getirilmiştir. Böylece bu kart ile stereo görme işlemi uygulanabilmektedir.

Bir kamera görüntüsünde mevcut olan nesneler, kameranın görüş açısı ve uzaklığına bağlı olarak çeşitli pozisyonlarda, büyüklüklerde veya görüntünün farklı yerlerinde olabilmektedirler. Nesnelerin bu tip değişken durumlardan etkilenmeden tanınabilmeleri için zernike moment metodu kullanışlı olmaktadır. Ancak bu metodun bir dezavantajı, eğer alanla tanımlama yapılmak isteniyorsa sadece tanınması gereken nesnenin görüntü içerisinde bulunması zorunluluğudur.

Bu tezde stereo görme algoritması için kullanılan kamera çifti paralel eksenli olarak tasarlandığından dolayı Bölüm 2’de anlatılan stereo görme algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmanın ve iğne delikli kamera modelinin kullanılması işlem yükünü azaltmakta ve kamera lenslerinin kenarlarına doğru meydana gelen bozulma etkisini ihmal etmektedir. Deneysel çalışmanın başında da anlatıldığı gibi paralel eksenli kameraların kullanılması sadece nesnenin yatay ekseninde kaymasına yol açmaktadır. Böylece ilgilenilen nokta ile kameranın odak merkezinin arasındaki uzaklığın koordinatları, basit geometrik eşitliklerle bulunabilmektedir.

Bu çalışmada, robot kolunun herhangi bir pozisyona gitmesi için çeşitli programlar yazılmıştır. Buna ilaveten, robot kolu ile görüntü işlemci arasında iletişiminin simülasyonu için ilk önce, robot kolunun kontrolör ünitesinin girişlerine anahtarlar bağlanmıştır. Bu anahtarlar sayesinde istenilen koordinat bilgileri girilmiş ve yazılan bir program sayesinde robot kolunun verilen koordinat noktalarına doğru gittiği gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmayla ilgili olarak da görüntü işlemcinin FPGA çıkışları ile robot kolu kontrolör ünitesi arasında iletişim sağlanmıştır.

Kullanılan robot kolu kontrolör ünitesinin ucuz ve eski tip olmasından dolayı çeşitli sınırlamalar yaşanmıştır. Bu sınırlamalar içerisinde robot kolu kontrolör ünitesinin girişlerinin azlığı, daha yeni modellerinin üretilmesinden dolayı yeterli bilginin olmaması, mevcut

kontrolörlerin farklı bir kontrolörlerle değiştirilememesi gibi sıkıntılar mevcut idi. Bu yüzden kontrolör değiştirilmesi hususunda simulasyon yapılmıştır.

Görüntü işlemcinin içerisinde bulunan FPGA çok hızlı işlem yapabilen bir birimdir. Görüntüler FPGA'dan DSP işlemcisine doğru iletiildiğinden dolayı ITU-R BT.656 formatında kompozit video görüntülerinin yukarıdaki işlemler yapılarak iletilmesinin sonucunda elde edilen görüntülerdeki kayma, tekrar görüntünün elde edilememesi sonuçlarını ortaya çıkarmıştır. Bu yüzden FPGA, sadece video görüntülerin doğrudan iletilip tekrar görüntü cihazına FPGA üzerinden gönderildiği bir formda, görüntü yakalama sinyalinin alınması ve robot kolu kontrolör ünitesine gerekli bilgileri göndermede görüntü işlemci kartının çıkışı olarak kullanılmıştır.

Herhangi bir görüntüdeki birden fazla farklı özelliklere sahip nesnelerin içerisinde bir tanesini seçmek, bu çalışmanın ileriki aşamalarından birini oluşturabilir. Bunu yaparken mevcut nesnelerin her birinin kenarlarının çıkartılması gerekir. Nesnelerin kenarlarının çıkartılmasında çeşitli filtreler kullanılmaktadır. Ancak görüntünün erozyona uğratıldıktan sonra genişletilmesinin kullanılması önerilmektedir. Böylece kenarlar sadece bir pikselden oluşur ve nesneler zincir kuralıyla tanındıktan sonra zernike metodu kullanılarak nesne tanınabilir. Buradaki olumsuzluk ise iteratif olarak görüntünün bütün yüzeyinin taranmasıdır.

Sonraki çalışmalar için FPGA'nın görüntü işlemede aldığı işlem yükü arttırılabilir. Böylece sistemin performansı çok daha artar. Bunun en önemli nedenlerinden biri FPGA'nın, ayrı ayrı birçok işlemi paralel olarak gerçekleştirebilmesidir. Ancak reel sayılardaki işlemleri yapmada FPGA'nın performansı azalmaktadır. Bu yüzden, DSP ve FPGA arasındaki işlem paylaşımının dikkatli yapılması gerekir.

KAYNAKLAR

1. Schilling ,R.J., 1990, Fundamental of Robotics: Analysis and Control, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 425s
2. Kulkarni.A.D., 2001, Computer vision and fuzzy-neural systems, Prentice Hall, 509 s.
3. Malamas, E.N., Petrakis, Zervakis, E.G.M., Petit, M., L. and Legat, 2003, J-D., “A survey of industrial vision systems, applications and tools, Image and vision Computing,21, 171–188
4. Elmas,Ç., 2003, Yapay Sinir Ağları (Kuram, Mimari, Uygulama), Seçkin Yayıncılık, 192s.
5. Egmont-Petersen, M., de Ridder, D., and Handels, H., 2002, ‘Image processing with neural networks a review’, Pattern Recognition, 35,10, 119–141.
6. Cirstea, M.N., Khor, J.G., and McCormick, M., 2002. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems, Newnes an imprint of ElsevierScience, Woburn, 399s.
7. Zadeh, L., 1965, Fuzzy sets, Inf. Control, 8, pp. 338–353.
8. Mamdani E.H. and Assilian S., 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man-Machine Studies, 7, 1-13.
9. Maxfield Clive ‘Max’, 2004, The Design Warrior's Guide to FPGAs: Devices, Tools and Flows, Newnes an imprint of Elsevier Science, 541s.
10. Montani, M., De Marchi, Marcianesi, L. A. and Speciale, N., 2003, Comparison of a programmable DSP and FPGA implementation for a wavelet-based denoising algorithm Proc. 46th Midwest Symp Circuits and Systems,Kairo, Egypt, 2, 602-605.
11. Declercq, F. and DeKeyser, R., 1999, Object recognition and selective handling by a Robot, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 25, 121-132.
12. Chen, S.B., Chen, X.Z. and Qiu, T., 2005, Acquisition of Weld Seam Dimensional Position Information for Arc Welding Robot Based on Vision Computing Journal of Intelligent and Robotic Systems, 43, 77–97.
13. Gonidis,P., Kotoulas, L. and Andreadis, I., 2007, A New Hardware Module for Stereo Matching using Zernike Moments, Third International Conference on Autonomic and Autonomous System, 33-33.
14. Gu L., and Su, J., 2008, Natural Hand Posture Recognition Based on Zernike Moments and Hierarchical Classifier, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, 3088-3093
15. Kim, S. and Kweon, I.S., 2005, Automatic model-based 3D object recognition by combining feature matching with tracking, Machine Vision and Applications. 16, 5, 267–272

16. Pang, Y., Huang,Q., Jia, D., Tian, Y., Gao, J. and Zhang, W., 2007, Object manipulation of a humanoid robot based on visual, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, 1124-1129.
17. Luqiao, F., Xifan,Y., Hengnian,Q., Liangzhong, J., and Wei,W., 2007, A single-hand and binocular visual system for EOD robot servoing, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, 1930-1935
18. Gelautz M., Markovic D., 2004, "Recognition of Object Contours from Stereo Images: an Edge Combination Approach", 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 774-780.
19. Cuadrado C., Zuloaga A., Martin J. L., Laizaro J., Jimenez J., 2006, "Real-Time Stereo Vision Processing System in a FPGA", IEEE 32nd Annual Conference on Industrial Electronics, 3455-3460.
20. Kyo, S., Koga, T., Okazaki, S., 2001, "IMAP-CE: a 51.2 GOPS Video Rate Image Processor with 128 VLIW Processing Elements", International Conference on Image Processing, 3, 294-297.
21. Sharkey, N.E., 1997, Neural networks for coordination and control: The portability of experiential Representations, Robotics and Autonomous Systems, 22, 345- 359.
22. Sekiguchi, N., Ogawa T. and Kanada H., 2007, Inverse Estimation of Joint Angles of Robot Arm by Network Inversion, SICE Annual Conference, 991-995.
23. Ogawa,T., Matsuura, H. and Kanada, H.,2005, A Solution of Inverse Kinematics of Robot Arm Using Network Inversion, CIMCA-IAWTIC,1, 858-862
24. Hu, M.K., 1962, Visual Pattern Recognition by Moment Invariants, IRE Transactions on Information Theory, IT-8, 179-187.
25. Teague, M.R., 1980, Image analysis via the general theory of moments, J. Opt. Soc. Am, 70 (8), 920–930.
26. Teh, C.H., and Chin,R.T., 1988, On Image Analysis by The Method of Moments, IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-10, 2, 496-513
27. Xin,Y., Liao, S. and Pawlak, M., 2005, On The Improvement of Rotational Invariance of Zernike Moments, Image Processing, ICIP 2005. IEEE International Conference, 2,842-845
28. Wee, C.Y., Paramesran, R. and Mukundan R., 2003, A comparative analysis of algorithms for fast computation of Zernike moments, Patt. Recognition, 36, 731–742.

29. Wee C.-Y. and Paramesran, R., 2007, On the computational aspects of Zernike moments, *Image Vis. Comput.* 25, 967–980.
30. Hosny, K.M., 2008, Fast computation of accurate Zernike moments, *J Real-Time Image Proc* ,3,97–107.
31. Khotanzad, A. and Lu, J.H., 1989, Object recognition using a neural network and invariant Zernike features, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings*, San Diego, USA, 200-205.
32. Haddadnia, J., Ahmadi, M., Faez, K., 2002, An efficient method for recognition of human face recognition using higher order pseudo Zernike moment Invariant The Fifth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, Washington, DC, USA, 315–320.
33. Hajati, F., Faez, K. and Pakazad S. K., 2006, An Efficient Method for Face Localization and Recognition in Color Images, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Taipei, Taiwan, 4214-4219.
34. Saaidia, M., Lelandais, S., Vigneron, V., 2007, Face detection by neural network trained with Zernike moments”, *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation*, Corfu Island, Greece, 36-41.
35. Kotoulas, L., Andreadis, I., 2008, Fast Moment Generating Architectures, *IEEE Transactions On Circuits And Systems For Video Technology*, 18, 4, 533-537.
36. Nixon, M.S., Alberto S. A., 2002, *Feature extraction and image processing*, Elsevier ,405 s
37. Miller, S.J.H., 1989, *Parsons' Göz Hastalıkları*, Özçetin H (Çeviri editörü), Atlas Tıp Kitapçılık, Ankara, 384s
38. Gonzales R.C., Woods R.E., 2002, *Digital Image Processing*, 2ed., Prentice Hall PH, 793s
39. <http://en.wikipedia.org/wiki/Camera>
40. Ataman, A., Morgül, A., 1997, *Televizyon Tekniği* Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 181s,
41. <http://media-2.web.britannica.com/eb-media/24/70024-004-DD89C130.gif>
42. Jahne, B., 1997, *Digital Image Processing: Concepts, Algorithms, and Scientific Applications*, Springer Verlag, 598s
43. Hartley, R.I., Zisserman, A., 2004, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Second Edition, 672s

44. Mariottini, G.L. and Prattichizzo.D., 2005, The Epipolar Geometry Toolbox: multiple view geometry and visual servoing for MATLAB, IEEE Robotics and Automation Magazine.
45. Shape from Stereo <http://isgwww.cs.uni-magdeburg.de/bv/skript/VLcv05.pdf>
46. Lewis, F. L., Dawson, D.M., Abdallah, C.T., 2006, Robot Manipulator Control Theory and Practice, Marcel Dekker, 607s
47. Bingül Z., Küçük, S., 2005, Robot Tekniği I, Birsen Yayınevi, 337s
48. Jazar, R.N., 2007, Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control, Springer, 693s.
49. Prokop, R.J., Reeves, A.P., 1992, A survey of moment-based techniques for unoccluded object representation and recognition, CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 54, 5, 438-460.
50. Pawlak, M., 2006, Image Analysis by Moments: Reconstruction and Computational Aspects, Tech. Report
51. Khotanzad, A. and Hong, Y.H., 1990, Invariant Image Recognition by Zernike Moment, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12, 5, 489-497.
52. Liao, S. X. and Pawlak, M., 1998, On the accuracy of Zernike moments for image analysis, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20, 12, 1358-1364
53. <http://www.sundance.com/docs/SMT339%20User%20Guide.pdf>
54. Intelitek, 1996, Scorbot-er 5Plus User Manuel, 144 s.
55. 2007, Diamond User Guide Sundance Edition V3.1, 353s
56. Arnaud, J.P., 2007, Sundance Multiprocessor Technology Limited Application Note for FPGA video library, 14s.
57. www.intersil.com/data/an/an9728.pdf
58. http://www.electromate.com/db_support/downloads/CSuppliersPittman.pdf
59. http://www.alliedelec.com/Images/Products/Datasheets/BM/AMETEK_PITTMAN/388-0015.PDF
60. Mann, G. K. I. and Gosine, R. G., Three-dimensional min-max-gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning, Fuzzy Sets Syst., vol.156, pp. 300-323, 2005.
61. Du Fuyin, D. and Weifeng, D., 2009, Design of a three-input fuzzy logic controller and the method of its rules reduction, Proc. of the 2009 International Symposium on Information Processing (ISIP'09), Huangshan, P. R. China, pp. 051-053

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Muhammet Ali ARSERİM

Doğum Tarihi: 08.01.1975

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm	Üniversite	Yıl
Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Çukurova Üniversitesi	1993–1997
Yüksek L.	Fen Bil.Enst.Elk.Eln.Müh. A.B.D.	Dicle Üniversitesi	1998–2001
Doktora	Fen Bil.Enst.Elk.Eln.Müh. A.B.D	Fırat Üniversitesi	2003–2009

Yüksek Lisans Tez Başlığı ve Tez Danışmanı:

Beyin Sinyallerinin Modern Spektral Analiz Yöntemleri İle Kestirimi

Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKIN

Görevler:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Arş. Gör.,	Dicle Üniversitesi, Elk.-Eln.Müh.Böl.	Eylül 1998- Ocak 2007
Arş. Gör.,	Fırat Üniversitesi, Elk.-Eln.Müh.Böl.	Ocak 2007----

EK-1

;;=Hazır Sürücü ile Kontrol Edilen İki
Eksende Hareket Eden Step
Motor=====

```
LIST P=16F877A
INCLUDE "P16F877A.INC"
sayac1 equ h'20'
sayac2 equ h'21'
sayac3 equ h'22'
sayac4 equ h'23'
sayac5 equ h'24'
sayac6 equ h'25'
sayac7 equ h'26'
sayac8 equ h'27'
adim1 equ h'28'
adim2 equ h'2A'
adim3 equ h'2B'
adim4 equ h'2C'
kay equ h'2D'
kay2 equ h'2E'
sayac9 equ h'2F'
adim5 equ h'30'
ORG h'00'
clrf PORTA
clrf PORTB
clrf PORTC
clrf PORTD
clrf sayac1
clrf sayac2
clrf sayac3
clrf sayac4
clrf sayac5
clrf sayac6
clrf adim1
clrf adim2
clrf adim3
clrf adim4
clrf adim5
clrf kay
clrf kay2
bcf STATUS,6
bsf STATUS,5
movlw h'06'
movwf ADCON1
movlw h'07'
movwf TRISA
```

```
clrf TRISB
clrf TRISC
clrf TRISD
bcf STATUS,5
movlw h'01'
movwf kay
movlw h'0ff'
movwf adim1
movwf adim2
movwf adim3
movwf adim4
movwf adim5
movlw h'87'
movwf sayac4
test1
btfss PORTA,0
goto dng1
test2
movlw h'0F'
subwf sayac4,W
btfsc STATUS,2
goto test4
btfsc PORTA,1
goto test4
movlw h'0F'
subwf sayac4,F
movf kay,W
movwf kay2
movwf PORTD
rlf kay,F
movf kay,W
iorwf kay,F
test3
btfss PORTA,1
goto test3
test4
movlw h'0A5'
subwf sayac4,W
btfsc STATUS,2
goto test1
btfsc PORTA,2
goto test1
movlw h'0F'
addwf sayac4,F
rrf kay2,F
movf kay2,W
andwf kay,W
```



```

    movf adim2,W
    sublw h'01B'
    btfss STATUS,2
    goto dng2
bcf PORTB,4
    call gecikme2
    movlw h'0ff'
    movwf adim1
    movwf adim2
incf adim5,F
    movf adim5,W
    sublw h'05'
    btfsc STATUS,2
    goto ali
dng3
    incf adim4,F
    incf adim3,F
    bsf PORTB,5
    bsf PORTB,1
    bcf PORTB,3
    movf sayac4,W
    movwf sayac5
    movlw h'01'
    movwf sayac1
    call gecikme
    bcf PORTB,1
    movf sayac4,W
    movwf sayac5
    movlw h'01'
    movwf sayac1
    call gecikme
    movf adim3,W
    sublw h'0D'
    btfss STATUS,2
    goto dng3
    call hizkon
    bcf PORTB,5
    bsf PORTA,5
    call gecikme2
    bcf PORTA,5
    movlw h'0ff'
    movwf sayac5
    movlw h'05'
    movwf sayac1
    call gecikme
    movlw h'0ff'
    movwf adim3
    goto dng1
    ali
    call hizkon
    bsf PORTB,6
    call gecikme2
    bcf PORTB,6
    movlw h'0ff'
    movwf adim4
dng4
    incf adim4,F
    movf adim4,W
    bsf PORTB,5
    bsf PORTB,1
    bsf PORTB,3
    movlw h'08'
    movwf sayac5
    movlw h'01'
    movwf sayac1
    call gecikme
    bcf PORTB,1
    movlw h'08'
    movwf sayac5
    movlw h'01'
    movwf sayac1
    call gecikme
    movf adim4,W
    sublw h'045'
    btfss STATUS,2
    goto dng4
    bcf PORTB,5
    call gecikme2
    movlw h'0ff'
    movwf adim3
    movwf adim4
    movwf adim5
    goto dng1
    gecikme
    movf sayac5,W
    movwf sayac2
dng6
    movlw h'0ff'
    movwf sayac3
dng5
    decfsz sayac3,F
    goto dng5
    decfsz sayac2,F
    goto dng6
    decfsz sayac1,F
    goto gecikme
    return

```

```

gecikme2
    movlw h'6' ; 1.17s
    movwf sayac9

```

```

dng9
    movlw h'0ff'
    movwf sayac7

```

```

dng8
    movlw h'0ff'
    movwf sayac6

```

```

dng7
    decfsz sayac6,F
    goto dng7
    decfsz sayac7,F
    goto dng8
    decfsz sayac9,F
    goto dng9
    return

```

```

; yeni gecikme
gecikme3
    movlw h'30' ; 9.36s
    movwf sayac9

```

```

dngy9
    movlw h'0ff'
    movwf sayac7

```

```

dngy8
    movlw h'0ff'
    movwf sayac6

```

```

dngy7
    decfsz sayac6,F
    goto dngy7
    decfsz sayac7,F
    goto dngy8
    decfsz sayac9,F
    goto dngy9
    return

```

```

; yeni gecikme
gecikme4
    movlw h'1' ; 0.195s
    movwf sayac9

```

```

dngyy9
    movlw h'0ff'
    movwf sayac7

```

```

dngyy8
    movlw h'0ff'
    movwf sayac6

```

```

dngyy7

```

```

    decfsz sayac6,F
    goto dngyy7
    decfsz sayac7,F
    goto dngyy8
    decfsz sayac9,F
    goto dngyy9
    return

```

```

.....
hizkon
    movlw h'0F'
    subwf sayac4,W
    btfsc STATUS,2
    goto hizkon4
    btfsc PORTA,1
    goto hizkon4
    movlw h'0F'
    subwf sayac4,F
    movf kay,W
    movwf kay2
    movwf PORTC
    rlf kay,F
    movf kay,W
    iorwf kay,F

```

```

hizkon3
    btfss PORTA,1
    goto hizkon3

```

```

hizkon4
    movlw h'0A5'
    subwf sayac4,W
    btfsc STATUS,2
    return
    btfsc PORTA,2
    return
    movlw h'0F'
    addwf sayac4,F
    rrf kay2,F
    movf kay2,W
    andwf kay,W
    movwf PORTC
    rlf kay2,W
    movwf kay

```

```

hizkon5
    btfss PORTA,2
    goto hizkon5
    return
    end

```

EK-2

Nesne No	Zernike Moment Katsayıları																						
	Z ₂₀	Z ₂₂	Z ₃₁	Z ₃₃	Z ₄₀	Z ₄₂	Z ₄₄	Z ₅₁	Z ₅₃	Z ₅₅	Z ₆₀	Z ₆₂	Z ₆₄	Z ₆₆	Z ₇₁	Z ₇₃	Z ₇₅	Z ₇₇	Z ₈₀	Z ₈₂	Z ₈₄	Z ₈₆	Z ₈₈
1	0.920	0.005	0.001	0.001	1.422	0.025	0.000	0.004	0.007	0.000	1.773	0.066	0.000	0.000	0.011	0.023	0.000	0.000	1.941	0.127	0.002	0.000	0.000
1	0.919	0.006	0.001	0.001	1.419	0.026	0.000	0.004	0.007	0.000	1.764	0.069	0.001	0.000	0.011	0.022	0.000	0.000	1.923	0.132	0.002	0.000	0.000
1	0.918	0.006	0.001	0.001	1.410	0.028	0.000	0.004	0.008	0.000	1.742	0.071	0.000	0.000	0.012	0.025	0.000	0.000	1.881	0.137	0.001	0.000	0.000
1	0.916	0.006	0.001	0.002	1.401	0.028	0.000	0.004	0.008	0.000	1.719	0.072	0.000	0.000	0.012	0.026	0.000	0.000	1.837	0.138	0.001	0.000	0.000
1	0.915	0.006	0.001	0.002	1.396	0.028	0.000	0.004	0.009	0.000	1.705	0.073	0.000	0.000	0.011	0.027	0.000	0.000	1.811	0.139	0.002	0.000	0.000
2	0.923	0.001	0.000	0.000	1.437	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	1.810	0.018	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	2.009	0.034	0.000	0.000	0.000
2	0.922	0.001	0.000	0.000	1.431	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	1.793	0.014	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	1.975	0.026	0.000	0.000	0.000
2	0.924	0.002	0.000	0.000	1.439	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	1.816	0.022	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	2.021	0.044	0.001	0.000	0.000
2	0.923	0.002	0.000	0.000	1.437	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	1.809	0.025	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	2.007	0.049	0.002	0.000	0.000
2	0.923	0.002	0.000	0.000	1.436	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	1.806	0.025	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	2.001	0.049	0.001	0.000	0.000
3	0.933	0.002	0.000	0.000	1.483	0.011	0.000	0.001	0.001	0.000	1.930	0.028	0.001	0.000	0.003	0.004	0.000	0.000	2.247	0.057	0.002	0.000	0.000
3	0.932	0.002	0.000	0.000	1.480	0.011	0.000	0.000	0.001	0.000	1.923	0.030	0.001	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000	2.232	0.061	0.002	0.000	0.000
3	0.934	0.003	0.000	0.000	1.491	0.012	0.000	0.001	0.001	0.000	1.952	0.033	0.000	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000	2.292	0.067	0.002	0.000	0.000
3	0.933	0.003	0.000	0.000	1.486	0.013	0.000	0.001	0.001	0.000	1.939	0.035	0.001	0.000	0.003	0.004	0.000	0.000	2.265	0.071	0.002	0.000	0.000
3	0.934	0.002	0.000	0.000	1.488	0.012	0.000	0.001	0.001	0.000	1.946	0.033	0.000	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000	2.278	0.066	0.002	0.000	0.000

