

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**

**ÇOK PARMAKLI ROBOTİK EL MEKANİZMALARINDA  
PARMAK KOORDİNASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAHYA KEMAL ESKİN**

**DENİZLİ, ARALIK - 2022**

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM**  
**DALI**



**ÇOK PARMAKLI ROBOTİK EL MEKANİZMALARINDA**  
**PARMAK KOORDİNASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAHYA KEMAL ESKİN**

**DENİZLİ, ARALIK - 2022**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**YAHYA KEMAL ESKİN**

## ÖZET

**ÇOK PARMAKLI ROBOTİK EL MEKANİZMALARINDA  
PARMAK KOORDİNASYONU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
YAHYA KEMAL ESKİN  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. Ü. H. HİLAL EZERCAN KAYIR)**

**DENİZLİ, ARALIK - 2022**

Robotik alanında yeni çalışma alanlarından biri, çok parmaklı robotik ellerde parmak ayarlamasının yapılması ile koordinasyonlu kavrama işlemidir. Son yirmi yılda, parmakların koordinasyonlu kavrama yapılması üzerine çalışmalar yapılsa da, günümüzde hala karmaşık bir yapıda karşımıza çıkmaktadır. Robot eldeki parmakların nesnelere göre ayarlanması; özellikle farklı yapılardaki, şekillerdeki ve ağırlıklardaki nesnelere kavranması ve manipülasyonu analizi oldukça zorlayıcı yapıdadır. Çünkü; nesnenin inceliği ya da ağırlığından dolayı kavrama ve manipülasyon işlemi sırasında nesnenin elden kayarak düşme veya nesnenin yapısının bozulması gibi problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu tip problemler için Bulanık Mantık ile çıkarım yapılarak, parmak ayarlamaları yapılabilir. Bulanık Mantık, bize içinden çıkamadığımız doğrusal olmayan problemlerin çözümünde, elimizdeki sayısal verilerden problem çözümü için çıkarım yapmamızda bize kolaylık sağlamaktadır. İnsanın kendi oluşturduğu kurallara göre çalışan Bulanık Mantık, insanın kendi düşünce tarzına göre çıkarım yapmaktadır. Yapılan çalışmada; ilk olarak kavraması yapılacak nesneyi, sistemin tanınması, kavrama görevi seçimi ve ilk kavrama hareketinin planlanması için MATLAB üzerinden görüntü işleme yapısı oluşturuldu ve kavramada kaç parmaklı kavrama yapılacağı bilgisi kullanıcıdan alındı. Daha sonra, robot eldeki üç parmağa monte edilen basınç sensörlerinden okunan değerlere göre, MATLAB’de bulunan Bulanık Mantık araç kutusu üzerinden üyelik fonksiyonları ve üyelik dereceleri atandı. Sugeno çıkarım yapısı ve oluşturulan Bulanık kurallar ile servo motorların kontrolü, yani parmakların hareketlerinin ayarlanması yapılmıştır. Servo motorların kontrolü, MATLAB’de oluşturulan Bulanık Mantık Kontrolör aracılığı ile Arduino mikrodenetleyicisi tarafından yapılmıştır. Bu hareket yönlendirmeleri, servo motorların nesnelere kavraması için açılarını Negatif Büyük ( $-10^\circ$ ), Negatif Küçük ( $-5^\circ$ ) ve Sıfır ( $0^\circ$ ) gibi açısal yönlendirmeler olmuştur. Oluşturulan bu sistem birçok kez denendi ve oldukça başarılı kavrama işlemleri gerçekleştirmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Robotik El, Bulanık Mantık, Görüntü İşleme, Matlab, Arduino, Servo Motor

# ABSTRACT

## FINGER COORDINATION in MULTI-FINGERED ROBOTIC HAND MECHANISMS

MSC THESIS

YAHYA KEMAL ESKİN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING  
(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. H. HİLAL EZERCAN KAYIR)

DENİZLİ, DECEMBER - 2022

One of the new fields of study in robotics is the coordinated grasping with multi-fingered robotic hands. Although studies have been carried out on the coordination of fingers in the last two decades, it still appears in a complex structure today. Adjusting the fingers on the robot hand to objects, especially grasping and manipulating objects of different structures, shapes and weights, analysis is quite challenging. Because, due to the thinness or weight of the object, problems such as slipping from the hand or deterioration of the structure of the object may occur during the gripping and manipulation process. Finger adjustments can be made for these types of problems by inferring with Fuzzy Logic. Fuzzy Logic, in the solution of non-linear problems that we can't get out of, it facilitates us in making inferences for problem solving from the numerical data we have. Fuzzy Logic, which works according to the rules created by the human, makes inferences according to the way of thinking of the human. In the study; Firstly, the image processing structure was created via MATLAB for the system to recognize the object to be grasped, the system to recognize the first grasping movement, and the information about how many finger grips will be obtained from the user. Then, Fuzzy Logic membership functions and membership degrees were assigned through the Fuzzy Logic Toolbox in MATLAB, according to the values read from the pressure sensors mounted on the three fingers of the robot hand. With the Sugeno inference structure and the Fuzzy rules created, the control of the servo motors, that is, the adjustment of the movements of the fingers has been made. Servo motors are controlled by Arduino microcontroller via Fuzzy Logic Controller created in MATLAB. These motion directions have been angular directions such as Negative Big ( $-10^\circ$ ), Negative Small ( $-5^\circ$ ) and Zero ( $0^\circ$ ) angles for servo motors to grasp objects. This created system has been tried many times and has performed very successful gripping operations.

**KEYWORDS:** Robotic Hand, Fuzzy Logic, Image Processing, Matlab, Arduino, Servo Motor

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> . . . . .	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> . . . . .	<b>x</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>ÖNSÖZ</b> . . . . .	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2. MEVCUT ÇALIŞMALAR</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>3. ROBOTİK EL</b> . . . . .	<b>22</b>
3.1 Robotik Tanımı . . . . .	22
3.2 Robotik El Tanımı ve Kullanım Alanları . . . . .	22
3.3 Robot Kinematiği . . . . .	23
3.3.1 DH Çözüm Yöntemi . . . . .	24
3.3.2 İleri Kinematik . . . . .	25
3.3.2.1 Matematiksel Yaklaşım İleri Kinematik Çözümü . . . . .	25
3.3.2.2 Geometrik Yaklaşım İleri Kinematik Çözümü . . . . .	27
3.3.3 Ters Kinematik . . . . .	28
3.3.3.1 Geometrik Yöntem ile Ters Kinematik Çözümü . . . . .	28
3.3.3.2 Analitik Yöntem ile Ters Kinematik Çözümü . . . . .	30
3.4 Robotik El Kavrama Durumları . . . . .	34
3.4.1 Kavrama Aşamaları . . . . .	35
3.4.2 Kavrama Sınıflandırması . . . . .	36
3.4.3 Kavrama Görevleri . . . . .	39
3.5 Kararlı Kavrama Koşulları . . . . .	40

3.5.1 Parmak Ucu Temas Modelleri . . . . .	41
3.5.2 Form Closure . . . . .	42
3.5.3 Force Closure . . . . .	42
3.5.4 İç Kuvvet . . . . .	43
<b>4. BULANIK MANTIK . . . . .</b>	<b>44</b>
4.1 Bulanık Küme ve Klasik Küme Kavramı . . . . .	45
4.2 Üyelik Fonksiyonları . . . . .	45
4.2.1 Üçgen Üyelik Fonksiyonu . . . . .	46
4.2.2 Yamuk Üyelik Fonksiyonu . . . . .	47
4.2.3 Gauss Üyelik Fonksiyonu . . . . .	47
4.2.4 Genelleştirilmiş Bell Üyelik Fonksiyonu . . . . .	48
4.2.5 Sigmoidal Üyelik Fonksiyonu . . . . .	48
4.3 Bulanık Çıkarım Sistemi . . . . .	49
4.3.1 Mamdani Çıkarım Metodu . . . . .	50
4.3.2 Sugeno Çıkarım Metodu . . . . .	51
4.3.3 Tsukamoto Çıkarım Metodu . . . . .	52
4.4 Durulaştırma . . . . .	52
4.4.1 Alan Merkezi Yöntemi . . . . .	52
4.4.2 En Büyüklerin Ortalaması Yöntemi . . . . .	53
4.4.3 En Büyüklerin En Küçüğü ve En Büyüğü . . . . .	53
4.4.4 Ağırlık Merkezi . . . . .	53
4.4.5 Ağırlıklı Ortalama . . . . .	54
<b>5. YÖNTEM . . . . .</b>	<b>55</b>
5.1 Robotik El Kontrol Sistemi . . . . .	56
5.2 Görüntü İşleme ile Nesne Tespiti . . . . .	57
<b>6. UYGULAMA VE BULGULAR . . . . .</b>	<b>59</b>
6.1 Tez Çalışmasında Kullanılan Aksamlar . . . . .	59
6.2 Robotik El Kontrol ve Kontrolcü Tasarımı . . . . .	63
6.3 Tasarlanan Bulanık Mantık Sistemi . . . . .	65
6.3.1 Top Nesnesi için Bulanık Mantık Yapısı . . . . .	65

6.3.2 Silindirik Cisim için Bulanık Mantık Yapısı . . . . .	69
6.3.3 Tahta Kalem için Bulanık Mantık Yapısı . . . . .	71
6.3.4 Karton Bardak için Bulanık Mantık Yapısı . . . . .	73
6.3.5 Köpük Nesnesi için Bulanık Mantık Yapısı . . . . .	74
6.4 Görüntü İşleme ile Nesne Tespiti Uygulaması . . . . .	77
6.5 Bulgular . . . . .	80
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER . . . . .</b>	<b>84</b>
<b>8. KAYNAKLAR . . . . .</b>	<b>87</b>
<b>9. ÖZGEÇMİŞ . . . . .</b>	<b>92</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1:	İki eksenli robot parmağı. . . . . 24
Şekil 3.2:	İki eksenli robot parmağın ters kinematik çözümü. . . . . 29
Şekil 3.3:	Robotik el kavrama adımları. . . . . 36
Şekil 3.4:	Yaygın el kavrama modelleri (Baritz ve diğ. 2013) a)Kavrama Modeli 1 (KM 1), b)KM 2, c)KM 3, d)KM 4, e)KM 5, f)KM 6. . . . . 37
Şekil 3.5:	Cutkosky ve Wright (1986) kavrama sınıflandırması. . . . . 38
Şekil 3.6:	Napier sınıflandırılmasına göre kavrama görevleri. . . . . 39
Şekil 3.7:	Parmak ucu temas modelleri (Ozawa ve diğ. 2017) a)Sürtünmesiz Nokta Temas Modeli, b)Sürtüneli Nokta Temas Modeli, c)Yumuşak Parmak Temas Modeli. . . . . 41
Şekil 3.8:	2D nesne için Form Closure yapısı. . . . . 42
Şekil 3.9:	2D nesne için Force Closure yapısı. . . . . 43
Şekil 4.1:	Üçgen üyelik fonksiyonu. . . . . 46
Şekil 4.2:	Yamuk üyelik fonksiyonu. . . . . 47
Şekil 4.3:	Gauss üyelik fonksiyonu. . . . . 47
Şekil 4.4:	Genelleştirilmiş Bell üyelik fonksiyonu. . . . . 48
Şekil 4.5:	Sigmoidal üyelik fonksiyonu. . . . . 48
Şekil 4.6:	Bulanık Mantık işlem süreçleri. . . . . 49
Şekil 4.7:	Mamdani çıkarım metodu. . . . . 51
Şekil 4.8:	Sugeno çıkarım metodu. . . . . 51
Şekil 4.9:	Tsukamoto çıkarım metodu. . . . . 52
Şekil 5.1:	Robotik el dönme eklemleri ( <a href="https://paintingvalley.com/robot-hand-drawing">https://paintingvalley.com/robot-hand-drawing</a> ). . . . . 56
Şekil 5.2:	BMK sistemi. . . . . 57
Şekil 6.1:	Tez çalışmasında kullanılan robotik el. . . . . 59
Şekil 6.2:	SG 90 Mini Servo Motor. . . . . 60

Şekil 6.3:	Arduino Uno. . . . .	60
Şekil 6.4:	PCA9685 PWM/Servo sürücü kartı. . . . .	61
Şekil 6.5:	Deneyde kullanılan basınç sensörleri a) 7.6mm çapında basınç sensörü, b) 18.3mm çapında basınç sensörü. . . . .	63
Şekil 6.6:	Robotik el kontrol sistemi. . . . .	64
Şekil 6.7:	İki parmaklı top kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	66
Şekil 6.8:	İki parmaklı top kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	66
Şekil 6.9:	Üç parmaklı top kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	67
Şekil 6.10:	Üç parmaklı top kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	67
Şekil 6.11:	Üç parmaklı top kavraması için robotik el orta parmak giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	67
Şekil 6.12:	Üç parmaklı silindirik cisim kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	69
Şekil 6.13:	Üç parmaklı silindirik cisim kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	71
Şekil 6.14:	Üç parmaklı silindirik cisim kavraması için robotik el orta parmak giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	71
Şekil 6.15:	İki parmaklı tahta kalemi kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	71
Şekil 6.16:	İki parmaklı tahta kalemi kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	72
Şekil 6.17:	İki parmaklı karton bardak kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	73
Şekil 6.18:	İki parmaklı karton bardak kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	74
Şekil 6.19:	Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	75
Şekil 6.20:	Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	75

Şekil 6.21:	Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması için robotik el orta parmak giriş üyelik fonksiyonları. . . . .	76
Şekil 6.22:	1. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü. . . . .	78
Şekil 6.23:	2. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü. . . . .	78
Şekil 6.24:	3. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü. . . . .	79
Şekil 6.25:	4. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü. . . . .	79
Şekil 6.26:	5. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü. . . . .	79
Şekil 6.27:	Son olarak, bilgisayarın karton bardağı tanınması sonucunda elde edilen görüntü. . . . .	79
Şekil 6.28:	Robotik el ile yapılan karton bardak kavramaları. . . . .	80
Şekil 6.29:	Robotik el ile yapılan top kavramaları a)İki parmaklı top kavraması, b)Üç parmaklı top kavraması. . . .	81
Şekil 6.30:	Robotik el ile yapılan silindirik cisim kavramaları a)İki parmaklı silindirik cisim kavraması, b)Üç parmaklı silindirik cisim kavraması. . . . .	81
Şekil 6.31:	Robotik el ile yapılan köpük nesnesi kavramaları. . . . .	81

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: İki eksenli robot parmağı için DH parametreleri. . . . .	25
Tablo 3.2: Yaygın el kavrama modellerinin literatürdeki sınıflandırılması. . .	38
Tablo 5.1: Görüntü işleme ile nesne tespiti algoritması . . . . .	58
Tablo 6.1: SG 90 Servo Motor teknik özellikleri. . . . .	60
Tablo 6.2: Arduino Uno teknik özellikleri. . . . .	61
Tablo 6.3: İki parmaklı top kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler. . . . .	66
Tablo 6.4: İki parmaklı top kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları. . . . .	66
Tablo 6.5: Üç parmaklı top kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler. . . . .	67
Tablo 6.6: Üç parmaklı top kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları. . . . .	68
Tablo 6.7: Üç parmaklı silindirik cisim kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler. . . . .	69
Tablo 6.8: Üç parmaklı silindirik kavrama için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları. . . . .	70
Tablo 6.9: İki parmaklı tahta kalemi kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler. . . . .	72
Tablo 6.10: İki parmaklı tahta kalemi kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları. . . . .	72
Tablo 6.11: İki parmaklı karton bardak kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler. . . . .	73
Tablo 6.12: İki parmaklı karton bardak kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları. . . . .	74
Tablo 6.13: Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler. . . . .	75
Tablo 6.14: Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları. . . . .	76

## SEMBOL LİSTESİ

$x_i, y_i$	: i'nci eklem koordinat sistemi
$l_1$	: Robot parmağındaki birinci falanksın uzunluğu
$l_2$	: Robot parmağındaki ikinci falanksın uzunluğu
$a_{i-1}$	: Robot parmağındaki eksenleri arası falanks uzunluğu
$\alpha_{i-1}$	: Robot parmağındaki iki komşu eksen arasındaki eksen açısı
$d_i$	: Üst üste çakışan falankslar arasındaki eklem kayması
$\theta_i$	: Robot parmağın i'nci eklem dönme açısı
${}^n_{n-1}T$	: n serbest dereceli robot parmağın genel dönüşüm matrisi
${}^n_{n-1}R$	: n serbest dereceli robot parmağın dönme matrisi
$p_x$	: n serbest dereceli robot parmağın uç işlevci x eksen konumu
$p_y$	: n serbest dereceli robot parmağın uç işlevci y eksen konumu
${}^n_{n-1}P$	: n serbest dereceli robot parmağın uç işlevci konum vektörü
$x$	: Bulanık küme elemanı
$\mu(x)$	: Bulanık Mantık Üyelik Fonksiyonu
$c$	: Üyelik fonksiyonları merkezi
$\alpha$	: Sigmoidal üyelik fonksiyonu geçiş noktasındaki eğim
$\sigma$	: Gauss üyelik fonksiyonu genişliği
$exp$	: $e^x$ üstel
$y_{durulastirma}$	: Bulanık değer durulaştırma işlemi sonucu elde edilen keskin çıkış değeri
$y_{merkez}$	: Bulanık değer durulaştırma işlemi ağırlık merkezi yöntemi sonucu elde edilen keskin çıkış değeri
$y_{alan}$	: Bulanık çıkış değerlerinin çıkış kümesinde kestiği alan
$\sum_{i=1}^n \mu(y_i)$	: 1'den n'e kadar bulanık üyelik derecelerinin toplamı
$\sum_{i=1}^n \mu(y_i)y_i$	: 1'den n'e kadar bulanık değerler ile bulanık üyelik derecelerinin çarpımlarının toplamı
$z$	: Bulanık maksimum çıkış üyelik değerlerinin ortalaması
$\int \mu(y_i)y dy$	: Bulanık kurallardan elde edilen üyelik değerlerinin çıkış kümesini kestiği alanlar toplamı
$\int \mu(y)dy$	: Bulanık kurallardan elde edilen üyelik değerlerinin toplamı
$P$	: Basınç
$F$	: Kuvvet
$S$	: Yüzey alanı

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>ABS</b>	: Amniyotik Bant Sendromu
<b>ANFIS</b>	: Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi
<b>BM</b>	: Bulanık Mantık
<b>BMK</b>	: Bulanık Mantık Kontrolör
<b>cm</b>	: santimetre
<b>DH</b>	: Denavit-Hartenberg
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>DIP</b>	: Distal Interphalangeal
<b>DOF</b>	: Serbestlik Derecesi
<b>EMG</b>	: Elektromiyografi
<b>exp</b>	: eksponansiyel
<b>FSR</b>	: Kuvvete Duyarlı Direnç
<b>g</b>	: gram
<b>KB</b>	: kilobayt
<b>kg</b>	: kilogram
<b>mA</b>	: miliamper
<b>mm</b>	: milimetre
$\mu s$	: mikrosaniye
<b>MHz</b>	: megahertz
<b>MP</b>	: Metacarpal Phalangeal
<b>MCP</b>	: Metacarpophalangeal
<b>P</b>	: Oransal Kontrol
<b>PI</b>	: Oransal İntegral Kontrol
<b>PD</b>	: Oransal Türevsel Kontrol
<b>PID</b>	: Oransal İntegral Türevsel Kontrol
<b>PIP</b>	: Proximal Interphalangeal
<b>PWM</b>	: Darbe Genişlik Modülasyonu
<b>RRT</b>	: Hızlı Keşfeden Rastgele Ağaç Algoritması
<b>sn</b>	: saniye
<b>V</b>	: volt
<b>2D</b>	: İki Boyutlu
<b>3D</b>	: Üç Boyutlu

## ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bana desteklerini, bilgilerini, tecrübelerini esirgemeyen ve bana yol gösteren değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Ü. Hatice Hilal EZERCAN KAYIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bana tüm hayatım ve eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ebeveynlerim, babam Asım ESKİN'e ve annem Ayşe ESKİN'e çok minnettarım.

# 1. GİRİŞ

İnsanoğlu tarih boyunca kendine benzer ve kendine yardımcı olacak araçlar geliştirme amacı gütmüştür. Özellikle, son iki yüzyıldır; elektronik alanında, yazılım sektöründe ve yapay zekâ alanında görülen gelişmeler vesilesi ile robotik alanının ilerlemesine oldukça fayda sağlamıştır. Robotik alanının en çok kullanıldığı yerler, insanları fiziksel olarak zorlayan yerler olan fabrika, sanayi ve endüstri alanlarıdır. Günümüzde ise sağlık sektöründe ameliyat yapma, endüstrilerde ve fabrikalarda ince işçilik gerektiren yerlerde kullanımı söz konusudur. Bu tip işlerde, insan elinden ziyade robotik eller popülerleşmeye başlamıştır ve gelecekte daha çok yaygınlaşacaktır.

Robotik alanında şimdiye kadar yapılan kavrama ve manipülasyon işlemlerinde genellikle, önceden planlanmış ve belirli bir görev ya da görevleri gerçekleştirme amacı vardır. Böylelikle sorunsuz bir nesne kavraması yapılabilmektedir. Ancak, önceden planlanmamış görev ya da nesnenin ne olduğu ve şeklinin bilinmediği bir ortamda robot eliyle nesne kavraması yapmak oldukça zor bir işlemdir. Bu yüzden, günümüzde bu sorunu çözmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında, kavranacak olan nesnenin tanınması için görüntü işleme ile nesnenin tespitinin yapılması, yapılacak olan nesne kavrama tiplerinin sınıflandırılması ve bu kavrama türleri için gerekli parmak ayarlamalarının yapılması önerilmiştir. Böylelikle, kavranan nesnenin tanınması ve nesnenin geometrik belirsizliği gibi problemlerin üstesinden gelinmiştir.

Parmak ile nesne arasındaki karmaşık yapıya sahip ilişkilerin belirlenmesi de gerekmektedir. Çünkü, parmağın nesneyi kavrarken fazla kuvvet uygulaması sonucu yapısının bozulmasına neden olabilir veya az kuvvet uygulanması sonucu nesnenin el içinden düşüp kaymasına sebep olabilir. Bu çalışmada, nesnelerin ideal kuvvet ile kavranması ve yapılarının bozulmaması esas alınmıştır. İnsan kavrama işlemi örnek alınırsa, insan elinin nesneyi tutmak için ne kadar sıkacağı, sezgisel olarak doku hislerinden gelen bilgi ile tayin edilmektedir. İnsan el kavrama yapısına benzetilerek parmak ile nesne arasındaki kuvvet ilişkisinin belirlenebilmesi için bu tez çalışmasında, sensör kullanılması önerilmiştir. Böylelikle, parmak ile nesne arasındaki ilişkinin belirsizliği, robotik eldeki parmaklara basınç sensörü



yerleştirilerek giderilmiştir.

Çok parmaklı robot elleri ile koordinasyonlu ve kusursuza yakın kavrama yapmak çok önemli ve gelişmekte olan bir robotik çalışma alanıdır. Çünkü, farklı nesnelerin robot eliyle kavranması için parmak ayarlanmasının iyi yapılması gereklidir. Özellikle, büyük nesnelerin kavranması ve ince işçilikle kavramalar yapılması, zorlu ve karmaşık bir analize ihtiyaç duymaktadır. Nesnenin inceliği, ağırlığı veya yapısından dolayı elden düşmesi ve nesnenin kavranması sırasında zarar görmesi gibi problemlerle karşılaşılmaktadır. Ayrıca, el içinde kavranmış olan nesnenin üzerine harici bir bozulma kuvveti gelmesi sonucunda, nesnelerin elden kayıp düşmesine sebep olabilir. Bu türden sorunlara karşı bir adaptif bir kontrol sistemi gerekmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, ideal kavrama planlaması yapmak, kararlı kavramanın kontrolünü sürekli olarak sürdürebilmek ve nesneyi adaptif olarak kavrama kontrolünü sağlamak oldukça problemlili bir konudur. Bu durumun üstesinden gelinmesi için yeni gelişmekte olan yapay zekânın alt dalı olan makine öğrenmesi tekniklerine başvurmanın daha sağlıklı olduğu görülmektedir. Özellikle, makine öğrenmesinin içinde bulunan ve bir kontrol yapısı sunan Bulanık Mantık stratejisi, bilinmeyen bir nesnenin dinamiği ve robotik eldeki parmakların kinematik analizi gibi birçok karmaşık hesaplamayı göz ardı edebilir ve insan düşünce tarzına yakın olduğu için de kolaylıkla kontrol işlemini sağlayabilmektedir. Bu yüzden, yapılan çalışmada parmakların ayarlamaları için Bulanık Mantık Kontrolör (BMK) yapısı basınç sensörleri yardımıyla sezgisel çıkarım yapılarak oluşturulmuştur ve kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada ilk olarak, robot elindeki üç parmağa basınç sensörleri yerleştirildi, daha sonra basınç sensöründen elde edilen veriler analiz edildi. Bulanık Mantık üyelik dereceleri ve değerleri, sensörlerden elde edilen verilere göre atandı. Sensör verilerinden faydalanılarak, sezgisel çıkarımlar yapıldı ve Bulanık Mantık üyelik fonksiyonları ve Bulanık kurallar oluşturuldu. Böylelikle, Bulanık Mantık Denetleyici ile geometrik özellikleri farklı türden olan nesnelerin kavranması ve kavrama öncesinde yapısı, yüzeyi, şekli ve ağırlığı bilinmeyen nesnelerin; bu türden belirsizliklerine çözüm getirilmiştir. Robotik el ile kavrama görevini planlayabilmek

için; kavrama görevi seçimi ve ilk kavrama hareketinin planlanması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, görev seçimi ve ilk hareket planlamasını adımlarında; robot elinin kavrama yapacağı nesnenin, bilgisayar tarafından tanınması ile yapıldı. Her bir nesne için tasarlanan farklı Bulanık Mantık Kontrol yapısı, görüntü işleme ile nesne tespiti yapılarak, hangi nesne için kavrama görevi yapılacağı seçilmiştir. Kavranacak nesnenin tespiti yapıldıktan sonra, robot eli ile kavramada kullanılacak olan parmak sayısı, kullanıcı tarafından seçilir ve kavrama işlemi başlar. Kavrama işleminin devamlılığı ve kontrolü, BMK tarafından yürütülür.

Tez kapsamında, yapılan tez çalışması için ön bilgi sunan önceki çalışmalar hakkındaki bilgiler, Bölüm 2’de Mevcut Çalışmalar kısmında verilmiştir. Bölüm 3’te robotik el konusu ile alakalı tanımı, kullanım alanları ve robotik el ile kavrama için gereken teknik bilgiler sunulmuştur. Bulanık Mantık ile ilgili teorik bilgiler, Bölüm 4’te incelenmiştir. Tez deneyi için hazırlanan Bulanık Mantık Kontrolör yapısı ve ilk kavrama hareketinin planlanması için nesneyi şekilsel olarak tanıyan görüntü işleme yöntemleri, Bölüm 5’te gösterilmiştir. Yapılan tez çalışması ile ilgili kullanılan materyaller ve bu materyallerin özellikleri; deney çalışmasında elde edilen veriler ve sonuçlar, Bölüm 6’da anlatılmıştır. Deney kapsamında elde edilen sonuçlar ve ileriki çalışmalar ile ilgili öneriler, Bölüm 7’de açıklanmıştır.

## 2. MEVCUT ÇALIŞMALAR

Son 60 yıldır, çok parmaklı robotik eller ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. İlk olarak, robotik ellerin mekanizmaları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Daha sonraları, bilgisayar destekli robotik el kontrolü üzerinde gelişmeler görülmüş ve mekanik ellerin kontrolünü oldukça kolaylaştırmıştır.

Roth 1975 yılında, manipülatör mekaniği ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Sonraki yıllarda robotik el ile ilgili Hollerbach, Salisbury, Holzmann ve McCarthy'in yaptığı çalışmalar olmuştur. Daha sonrasında, Kerr ve Roth, robotik eldeki parmakların, nesneyi ne kadar sıkıştıracağını, nesnenin hareketini sağlamak amacıyla parmak-eklem ilişkilerini ve elin çalışma alanını belirtmişlerdir. Parmağın ne kadar sıkıştırılacağını, parmak ucunun nesne üzerine uyguladığı iç kuvvet uygulaması ile çözüme kavuşturmuşlardır. İç kuvvet ile ilgili Salisbury, Craig ve Ohwovoriolenin yapmış olduğu çalışmalardan esinlenilmiştir. Gerekli parmak-eklem hareketi problemi, parmak ucu ile nesne arasındaki saf yuvarlanma ilişkisi diferansiyel denklem ile belirlenerek, çözüm getirilmiştir. Son olarak, elin çalışma alanı sınırlı bir aralıkta tanımlanmıştır. Parmak ile nesne arasında sürtünme temas noktası kabul edilirse, parmak hareketlerini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, parmakların ters kinematik hesabı biliniyorsa, parmak-eklem hareketlerini kontrol etmek kolaylaşmaktadır (Kerr ve Roth 1986).

1979 yılında Okada Hand, 1981 yılında Stanford/JPL Hand ve 1984 yılında Utah/MIT Hand elleri, üç parmaklı olarak üretilmiştir. Bu ellerin parmak hareketlerini sağlayan tahrik motorları ayrı bir kutuya yerleştirilmiş ve uzun tendon kabloları yardımıyla hareketi sağlanmıştır. 1990'ların sonu ve 2000'lerde, daha gelişmiş robotik eller ile karşılaşılacaktır. 1999 yılında Robonaut Hand, 2000 yılında geliştirilen DLR Hand dört parmaklı robotik el olarak yapılmışken; 2002 yılında Gifu Hand beş parmaklı robotik el olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu ellerin tahrik mekanizmaları, robotik elin içinde yer almaktadır. 2005'ten sonra, insan eline benzer yapıda robotik eller yapılmaya başlanmıştır. Ayrıca, yakın zamanda robotik elleri, yumuşak bir doku entegre edilerek insan yapısına daha da yakınlaştırılmıştır (Yoshikawa 2010).

Başka bir makalede, “NAIST Hand” isimli bir çok parmaklı robotik el tasarımı yapılmıştır. Robotik elde, bir tane başparmak olmak üzere toplam 4 parmağa sahip ve her bir parmak 3 serbestlik derecesine (DOF) sahiptir. Metacarpal Phalangeal (MP) eklemi 2-DOF, Proximal Interphalangeal (PIP) eklemi ise Distal Interphalangeal (DIP) ile birleşiktir ve 1-DOF’a sahiptir. Üç elektrik motoru, parmak eklemlerinin hareketini tendon kullanılmadan sağlamaktadır. Tahrik mekanizması olan elektrik motorları, avuç içine yerleştirilerek daha az yer kaplamasını ve parmakların kuvvet uygulamasındaki yükünü azaltmaktadır. “NAIST Hand” ile parmak ucu-nesne temas noktalarına dayanan öğretim işlemi yapılarak kusursuza yakın kavrama işlemi gerçekleştirilmiştir (Ueda ve diğ. 2010).

Yapılan bir tez çalışmasında, Doğan (2010) iki ve dört parmaklı robotik tutucu tasarlamış ve üretmiştir. Her iki tutucu için bilgisayar ortamında kontrolü için gereken donanım ve yazılım araçları geliştirilmiştir. İki parmaklı tutucu, belirli bir görev için tasarlanırken, dört parmaklı tutucu ise genel amaçlı tasarlanmıştır. İki parmaklı tutucu, silindirik nesne kavraması için geliştirilmiş ve güç üretimi için pnömatik tahrik elemanı, güç iletimi için mekanik sistem geliştirilmiştir. Dört parmaklı tutucu da 1 tane başparmak, toplamda 4 parmağa sahiptir ve her bir parmakta 1-DOF vardır. Dört parmaklı tutucu için, pnömatik tahrik elemanı, güç iletimi için ise ip ve makara sistemi kurulmuştur. Her iki tutucu 5083 serisi alüminyumdan yapılmıştır. Tutma kuvveti kontrolü, iki tutucu için de basınç regülatörü aracılığıyla sağlanmıştır. Parmakların açma-kapama hareketleri, bilgisayar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Pnömatik valfleri kontrol etmek için hareket kontrol kartı tasarlanmıştır. Pnömatik aktüatörlerin konum kontrolünün zor olduğu belirtilmiştir. Kuvvet kontrolünün, konum kontrolünden daha kolay olduğu söylenmiştir. Bu çalışmadaki en büyük sorun, geri bildirim sisteminin olmaması olarak görülür. Tutucularda sensör eksikliğinden dolayı, bilgisayar yazılımı yalnızca gereken verileri hareket kontrol kartına göndermekte ve geri bildirim olmadığından dolayı yapılan eylemin tamamlandığını varsayar. Bu geri bildirimsiz sistem, açık döngüye sahiptir. Kapalı döngü, daha kompleks ve daha maliyetlidir. Bu yüzden, geri besleme için sensör kullanılmamıştır. Parmakları hareket ettirmek için elektrik motoru kullanılması durumunda, kuvvet sensörüne ihtiyaç duyulacaktı. Çünkü, sensör bilgisi olmaksızın elektrik motoru çok fazla kuvvet uygulamak

durumunda kalacaktı. Fakat, pnömatik eyleyiciler basınç sistemi sayesinde, önceden ayarlanabilmektedir, böylece kuvvet kontrolü sağlanmış olmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda, iki parmaklı tutucu, dört parmaklı tutucuya göre daha fazla kavrama kuvveti uygulamıştır. Dört parmaklı tutucu, iki parmaklı tutucuya göre daha karmaşık yapıdadır ama karmaşık yapıdaki nesnelere tutma konusunda oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, dört parmaklı tutucu, iki parmaklı tutucuya göre daha geniş aralıkta kavrama yapmakta ve kağıt gibi ince nesnelere kavranmasında başarılı olmuştur.

Ozawa ve arkadaşları, aktif ve pasif tendonlara sahip üç parmaklı robot el tasarımı geliştirmiştir. Bu elde başparmak, işaret ve orta parmaklar bulunmaktadır. İşaret ve orta parmak, aktif ve pasif tendonların birleşmesi ile underactuated hareket ettirilirken, başparmağın hareketi bağımsız gerçekleşir. Geliştirilen bu el, farklı nesnelere kavranması operasyonunu başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir (Ozawa ve diğ. 2014).

Li ve arkadaşları, üç parmaklı robotik el tasarımı sunmuşlardır. Parmakta üç eklem mevcuttur: iki eklem servo motor ile sürülürken, diğer eklem parmak tabanında Doğru Akım (DA) motor ile parmağın dönmesini sağlar. Motorlarda potansiyometre yer almaktadır, böylece farklı şekilli nesnelere kavranması için gereken ayarları, parmağın dönme açılarını tespit ederek kolaylık sunmaktadır. Fabrikalardaki görevleri gerçekleştirmek için geliştirilen bu tutucuya, kuvvet sensörü gibi sensörlerin eklenmesi ile ilgili gelecekte çalışmalar yapılacaktır (G. Li ve diğ. 2015).

Bir çalışmada, “KITECH Hand” isminde insan eline benzer bir robotik el tasarımı gerçekleştirilmiştir. Özellikle, parmağın metacarpophalangeal (MCP) eklemlerinin yapısından esinlenilerek üretilmiştir. Geleneksel “yaw-pitch” el yapılarının yerini alabilecek, “roll-pitch” tipi robotik el yapısı oluşturulmuştur. Mekanik yapısının basitliği ve maliyetinin ucuz olması büyük bir avantaj sağlamaktadır. Geliştirilen bu el ile Cutkosky kavrama sınıfları testi yapılmış ve oldukça başarılı kavramalar yapmıştır. Şimdilerde piyasada “Allegro Hand” olarak yer almaktadır (Lee ve diğ. 2016).

Farklı bir makalede, 3 boyutlu (3D) yazıcı ile insan eline yakın robotik el dizaynı yapılmıştır. Beş parmakta toplam 15-DOF ve başparmağın tabanında dönme eklemleri vardır. Avuç içine yerleştirilmiş 5 DA motor ile underactuated robotik el tasarlanmıştır. Küçük ve yüzük parmağının uzama ve bükülme hareketleri tek bir motorla yapılırken, orta ve işaret parmağının uzama ve bükülme hareketleri ayrı ayrı iki motorla yapılmıştır. Diğer motorlar ise, başparmağın dönmesini ve uzama-bükülme hareketlerini gerçekleştirir (Savić ve diğ. 2016).

Çok parmaklı robotik eller ile kusursuza yakın kavrama yapmak ve kavranan nesnenin manipülasyonu operasyonu analizi oldukça karmaşık yapıdadır. Bu yüzden, son zamanlarda robotik eller ile ilgili en çok çalışma yapılan alanlardan biri olmuştur. Kavrama ve manipülasyon işlemi, robotik el mekanizması ile nesne arasındaki ilişkiyi iyi tahlil ederek nesnenin elden kayıp düşmeme, elin insan koluna benzer bir ek araç ile nesnenin elden düşürülmeden ve nesnenin eldeki duruşunu bozmadan hareket ettirilmesi işlemi içermektedir. Bu görev için genellikle, parmak ile nesne arasındaki kuvvetin kontrolü veya form/force closure gibi nesne ile parmak ucu arasındaki temas durumlarının incelenmesi yapılmış ve formülize edilmiştir. Ayrıca, nesnenin şeklinin, ağırlığının ve deforme olup olmadığının bilinmediği durumlar için adaptif kavrama kontrol yapıları sunulmuştur.

1980'li yıllarda literatürde robotik eller ile ilgili çok karşılaşılan konular: ellerin kinematik tasarımı, kararlı ve kusursuza yakın kavramanın otomatik olarak ayarlanması ve seçilen kavrama işleminin gerçekleşmesidir. Salisbury, Kerr, Kobayashi, Cutkosky, Nguyen, Li ve Sastry'in çalışmaları göze çarpmaktadır. Robotik elin parmak ayarlanması ve hareketini sağlamak amacı ile kontrol sistemleri tasarlanmıştır. En gelişmiş yöntem, master-slave yöntemidir. Bu yöntem, iki parmaklı manipülatörlere uygulanmıştır. Bu manipülatörlerin en büyük sıkıntısı, parmakların nesneye çok fazla kuvvet uygulaması ve geri bildirim olmaksızın kavrama yapmasıydı. Çünkü, nesne ve parmak arasında uygun temas modeli dikkate alınmamaktaydı. Nakamura, Nagai ve Yoshikawa'nın 1987 yılında kavrama kuvvet değerine bağlı olarak, iç kuvvet kavrama ayarlaması önermiştir. Cole, Hauser ve Sastry'in nesne ve parmak ucu arasındaki yuvarlanma faktörü ile ilgili 1988 yılında çalışmaları vardır. Li ve Sastry, 1988 yılında bir eliptik nesne için görev modeli tanımlamıştır.

Ayrıca, 1986 yılında Montana'nın nesne ile parmak ucu arasındaki temas parametrelerini ters kinematik ile geliştirmiş ve nesnenin el içinde kaymasını engellemeye çalışmıştır. 1980'lerin sonlarına doğru, kusursuza yakın kavrama ve manipülasyon işlemi robotik el alanında, yeni gelişmekte olan bir çalışma olarak görülmektedir. 1989 yılında yapılan bir çalışmada, ideal kavrama planlamasının yapılmasının ve nokta temas modeli ile parmakların koordineli bir şekilde kontrolünün bir sorun olduğunu söylemektedir. Bu sorunların çözümü için ilk olarak, görev modellemesi önerilmiş ve kavrama planlanması için çözüm sunulmuştur. Sonra, el ve nesne dinamiklerini dikkate alan hesaplanmış tork algoritması sunulmuştur. Böylelikle, iç kavrama kuvveti için ve nesnenin pozisyonlarının değerleri formülize edilmiştir, bu formül parmak ucu ve nesne arasındaki kayma ve yuvarlanma durumları için de uyarlanabilir (Z. Li ve diğ. 1989).

Parmak ucunun, nesneye uyguladığı kuvvet kontrolü için birden fazla algoritma oluşturulmuştur. Ancak, kararlı ve istenilen kavrama kuvveti kontrolü tanımlanamamıştır. 1991 yılında Yoshikawa ve Nagai'nın yayınladığı makalede, yeni bir kavrama kuvveti tahlili yapılmıştır. Robotik elin doğrusal hareketiyle kavrama kuvveti sunulmuş, daha sonra statik sürtünme kısıtlamasına uygun iç kuvvet tanımı geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada, iki parmaklı için yöntemler geliştirilmiştir ama dört parmaklı robotik el için de uygulanabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, iki parmaklı tutucu ile silindirik nesne kavrama problemi tartışılmıştır. Çeşitli nesnelerin işlemi başarıyla gerçekleşmiş olup kararlı kavrama işlemi başarıyla gerçekleşmiştir. Bu işlemin, gerçek dünyada hesaplanması işlemi oldukça uzun ve yüklü olmaktadır (Yoshikawa ve Nagai 1991).

Robotik el parmak ucu ile nesne yüzeyi arasında temas modelleri önerilmiştir. Eğer nesne temas yüzeyi, sürtünmeli ise sürtünme temas modeli oluşturulur. Böylece, parmak ucu ile sürtünme kuvveti sayesinde nesne, el içinde dengede durabilmektedir. Bu türden kavramalar, "force closure" olarak adlandırılmaktadır. Bir makalede, üç parmaklı robotik el ile çokgen şekillerin "ideal force closure"ları bulunmuştur. "İdeal force closure" için, ilk önce nesnenin kenar ve köşeleri analiz edilmiştir. Daha sonra, iki parmak için uygun temas noktaları ile kavrama testleri yapılmıştır. Test sonucunda, başarılı ve hızlı bir şekilde kavrama operasyonları uygulanmıştır (Park ve diğ. 1992).

Bir başka çalışmada, hassas kavrama ve manipülasyon için önemli bilgiler içermektedir, bunun için bir dizi görev tanımı yapılmıştır. Bu bir dizi görev, kavrama ve manipülasyon öncesi bilgiler içererek oluşturulmuştur. Farklı kavrama durumları, çok sayıda hesaplama içerir. İlk olarak, istenen nesne hareketi bilgisinden temas noktalarının yörüngeleri çıkartılmıştır. İkincisi, parmakların eş zamanlı çalışma alanında kavrama ve manipülasyonunu belirlemek için çalışma alanı analizi yapıldı. Üçüncüsü, nesne üzerindeki kuvvetin kontrolü, temas noktası analizi ile sağlanır. Böylelikle, bu çalışma kavrama ve manipülasyon öncesi kompleks yapıdaki görevlerin nasıl birleştirildiğini göstermektedir. Çalışmanın deneyinde, bir "UTAH/MIT robotik el" kullanılarak çocuk kilidine sahip olan şişe kapağının döndürülmesi ve açılması işlemi yaptırılmıştır. Bu sistemin tek dezavantajı, açık döngüye sahip olmasıdır, bu yüzden kavrama hatalarının kontrolü sağlanamamaktadır. İleriki çalışmalarda, sensör eklenerek geri bildirim sağlanacak ve kapalı döngülü sistem tasarlanacaktır (Michelman 1998).

Robotik elin kavranması ve pozisyon kontrolü üzerindeki çoğu araştırma, eklem uzayından görev uzayına kadar Jacobian matrislerinin bilindiğini varsaymaktadır. Yani, elin kinematiğinin, parmak-nesne temas noktasının ve nesnenin geometrisinin bilindiğini söylemektedir. Yapılan bir uygulamada, belirsiz Jacobian matrisine sahip elin kontrol sorunu çözülmüştür ve kararlılığı test edilmiştir. Elin kinematiğindeki belirsizlikler ve konum hatası belirsizliği sınırlandırılmıştır. Bu belirsizlik, adaptif PD kontrolü ile giderilmiştir (H. Y. Han ve diğ. 1998).

Çoğu robotik elde kararlı kavramayı korumak için, kavranan nesnenin büyük ölçekli hareketini inceler. Bunun için, hem el içinde nesnenin hareketini hem de parmaklar ile nesne arasındaki temas bölgeleri incelenmelidir. Robotik el ile kusursuza yakın kavrama yapmak için parmak ile nesne arasındaki temas kinematiği, kontrol edilen DOF sayısı az olan hareketi planlama, koordine edilen nesne kavraması, kavramanın kararlılığı ve parmağın nesneyi koordineli olarak ayarlanması gibi teoriler üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma, üç parmak ile bir kürenin kavranması üzerine olmuştur ve sonuçlar elde edilmiştir (L. Han ve Trinkle 1998).



Ueki ve diğ. (2006), yuvarlanan temas ile bir nesneyi kavramak ve manipüle etmek için adaptif kontrol yöntemi sunmuşlardır. Önerilen kontrolörde hem nesne hem de parmakların dinamik parametreleri uyarlamalı olarak tahmin edilmektedir. Nesnenin tahmini bir referans modeli ile robot elin parmaklarının hareketi sağlanır. Nesnenin hareketinin ve parmak ile nesne arasındaki temas kuvvetinin asimptotik yakınsaması, Lyapunov benzeri Lemma ile kanıtlanmıştır. Bu önerilen kontrol, dört veya daha fazla DOF'a sahip eller üzerinde uygulanması amaçlanmıştır. Kontrol işlemi güzel sonuçlar içermektedir.

Çok parmaklı robotik elin kavrama işleminde, parmakların yeniden ayarlanması gerekebilmektedir. Bunun için parmakların, yeniden konfigüre edilmesi gerekmektedir. Bu parmak ayarlaması için, RRT adlı rastgele planlama algoritması sunan bir çalışma mevcuttur. Bir parmağın kinematik modeli, hibrit otomasyon ile formülize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, başarılı olmuştur (Xu ve diğ. 2007).

Özellikle, robot elin dinamik parametrelerinin bilinmediği durumlarda adaptif kontrol yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Robotik elin parmak ucu ile sert cisimlerin arasındaki yuvarlanma temaslı bir adaptif kontrol tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan kontrolör, "Gifu Hand III" üzerinde test edilmiştir ve deney sonuçlarında başarı sağlanmıştır. Ancak, iç kuvvete karşılık gelen temas kuvveti yakınsama hızında bir problem olmuştur. Gelecek çalışmada, bu sorunun üstesinden gelinmeye çalışılacaktır (Ueki ve diğ. 2009).

Günümüzde, insanlar özellikle ev ortamında kendilerine yardımcı robotlara ihtiyaç duymaktadır. Sugaiwa ve diğ. (2009), uygun şekilde ayarlanmış el ve kol hareketini amaçlayan bir hareket kontrol yapısı sunmaktadır. Bu tasarım için insanların vücutlarının, çevre ile teması baz alınmıştır. Masaya bardak koyma ve çekmece açma gibi görevlerde, bu kontrol yapısı uygulandı. Deney, "TWENDY-ONE" adı verilen robot ile uygulanmıştır. Sonuç olarak, uygun kontroller gerçekleştirilmiştir ve gelecekte daha fazla işlevler kazandırılması hedeflenmiştir.

Yoshikawa (2010)'nın yazdığı bir makalede, çok parmaklı robotik el ile kavrama ve manipülasyon işlemi kontrolü hakkında yapılan çalışmaları incelemiştir. Robotik el mekanizmasının donanımından, elin kontrolü hakkında yapılan çalışmalara kadar değinilmiştir. Kavramadaki "form/force closure" ve "aktif/pasif closure"lar analiz edilip açıklanmıştır. Kavrama optimizasyonu için çeşitli ölçümler tahlil edilmiştir. Ayrıca, "empedans ve hibrit pozisyon/kuvvet kontrolörleri" de gösterilmiştir. Yumuşak parmaklı el yapısı da incelenmiştir. Sonuç olarak, robot elinin insan eline benzetimi hedeflenmektedir. Bu mekanizmada sensör kullanımı önerilmiş ve daha etkili hale getirileceğine değinilmiştir. Ayrıca, yumuşak robot eli kullanımının, kavrama ve manipülasyon için daha uygun olduğu değinilmiştir.

Robot el kavrama ve hareketleri işlemlerinde, konum veya kuvvet hatalarını telafi etmek için geri bildirim ihtiyacı duyulmaktadır. Yapılan bir çalışmada, sensör geri bildirimine ihtiyaç duyulmadan kavrama ve manipülasyon işlemi yapmak hedeflenmiştir. Sensör kullanımı genelde maliyetli ve güvenilirliği bazı zamanlarda düşürebileceği söylenmiştir. Elektrik motor tahrikli el sistemi için sensörsüz kontrol sunulmuş. Tasarlanan kontrol sistemi hedefleri karşılamıştır (Shimada ve diğ. 2011).

Choi ve diğ. (2011) yeni tasarlanan robotik el için pozisyon tabanlı empedans kontrolör ile bir hareket planlaması sunmuştur. Bu kontrol için gerekli denklemler sunulmuş ve gerekli ters kinematik hesabı pseudo-inverse yöntemi ile yapıldı. Son olarak, şişe kapağı açma için hareket planlaması önerildi. Simülasyonda, basit bir manipülasyon operasyonu başarıyla tamamlanmıştır.

Raheja ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada, kamera karşısında gösterdikleri el işaretleri ile robot elin kontrolünü sağlamayı hedeflemişlerdir. Oluşturulan bu modül dört bölümden oluşmaktadır: "1) Gerçek zamanlı el işaretini kameraya gösterme ve kameranın işareti yakalaması", "2) Yakalanan işaretin özelliğinin çıkarılması", "3) İşaret tanınması için veri tabanındaki model ile eşleştirme" ve "4) Bu model eşleşmesini robotik sistem ile eyleme geçirme". Kamera, el işaretini 1 sn'de yakalamaktadır. Kullanılan bu yöntem hızlı ve başarılıdır. Bu metot, gelecekte robot elin daha hassas ve karmaşık hareket görevlerine odaklanacağı belirtilmiştir.

Boughdiri ve diğ. (2012), geometrik özellikleri bilinen nesnenin kavranması ile ilgili model tabanlı kontrol problemini ele almıştır. İki önemli durumdan bahsedilmiştir. Durumlardan ilki, 20-DOF'a sahip robot el tasarlanmış ve bu elin dinamiklerinin matematiksel modeli çıkarılmıştır. İkincisi, önceki çalışmada sunulmuş olan Lagrange formülüne dayanan yöntem ile, el ve nesne dinamik modellerinin parametreleri tanımlanmıştır. Oluşturulmuş olan bu yapı, robotik elin model tabanlı kontrolörlerin simülasyonu için kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar başarılı ve geçerli bir çözüm sunmaktadır. İleride yapılacak olan çalışmada, kavrama için akıllı yöntemlere dayalı kontrolör tasarımı yapılacaktır.

Çok parmaklı robotik el için insan kavrama becerilerini taklit etme ve geliştirilmesi için Amor ve diğ. (2012), yeni bir yaklaşım metodu sunmuşlardır. Yaklaşım tamamen veriye dayalı ve insan el gösteriminden öğrenmektedir. Bilinen bir nesnenin temas noktalarını, yeni bir nesne üzerinde uygulanması için teknik işlenmektedir. Ayrıca, parmağın uzanma ve kapanması hareketlerinin parametre tahmini için düşük boyutlu kavrama alanından yararlanan optimizasyon şeması sunulmuştur. Üç parmakla ruj tutuşu, ampülün silindirik bir şekilde tutulması ve yanal tutuş kavrama hareketleri, "Justin Robot" üzerinde test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Chen ve Naidu (2013), 14-DOF'a sahip beş parmaklı bir robotik el için Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS), Bulanık Mantık (BM) ve PD Kontrol için melez bir kontrolör tasarımı yapmışlardır. ANFIS ile üç falanksa sahip parmakların ters kinematiği çıkarılmıştır. BM için yedi tane üçgen üyelik fonksiyonu ve 49 kural oluşturularak, hata ve hatanın türevini içeren PD parametre girişlerini ayarlamak için kullanıldı. Bu tasarımı yapılan melez kontrol tasarımı, tek başına kullanılan PD, PID ve BM kontrolörlere göre daha başarılı sonuçlar sergilediği belirtilmiştir. Bu yöntemi daha da geliştirmek için çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

Salvietti ve diğ. (2014) yaptıkları bir çalışmada, bir sanal nesne için bir şekil tanımlamasının üstesinden gelen nesne tabanlı haritalama sunmuşlardır. İnsan elindeki referans noktaları dizisi örnek alınarak, el hareketlerinin nasıl değiştirdiğine

dair homojen dönüşüm matrisi ile tahminleme yapılmıştır. Bu dönüşüm işlemi, eklem değişkenlerine uygulanmıştır. Deneyde, üç parmaklı robotik el ile çalışılmıştır. Ellerin ayarlanmasına ve diğer haritalama yöntemleri ile karşılaştırılmasına gerekli olduğu belirtilmiştir.

Karaçizmeli ve diğ. (2014) yayınladığı bir makalede, eldivene yerleştirilen esneklik sensörü ile insan elinden alınan konum bilgilerini kullanarak elin kontrolünü sağlamıştır. İnsan elinin parmakları hareket ettikçe, esneklik sensörü değeri Arduino Uno adlı mikrodenetleyiciye gönderir ve mikrodenetleyici, bu değerleri değerlendirerek servo motorları hareket ettirir. Böylece, robot elin hareketi sağlanmış olur. Yapılan testlerin başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Deneylerde, insan eli ile robot elinin parmak açıları az farklar olduğu görülmüş ve bu farkların nedeninin sensör, direnç değişimini voltaj bölücü tekniğiyle okuduğu için olduğu ve çözümünün ise enstrümental yükseltici ile her parmağa iki adet sensör eklenmesi ile sistem performansının arttırılacağına değinilmiştir. Diğer karşılaşılan sorun ise, servo motorlar ilk çalışması sırasında yüksek akım çekmekte olduğundan titreme yapabilmektedir.

Miao ve diğ. (2015), ideal kavrama planlaması yapmışlardır. Kararlı ve güvenli kavramayı analiz etmek amacıyla yaygın kullanılan temas modellerini göstermişlerdir. "Form ve force closure"lar incelenerek, kararlı kavrama koşulları oluşturulmuştur. Bilgi kuraları, geometrik analiz ve optimizasyona dayanan kavrama noktası sunulmuştur. Kavrama kuvveti planlaması, temas kuvveti ve eklem-tork uzayında optimizasyon olarak ayrıldı ve parmak ayarlamaları da incelendi. Son olarak, karşılaşılan zorluklar tartışılmıştır. İnsan elinin kavramasının, robotik ele ayarlanmasının zorluğundan bahsedildi. Ayrıca, çalışma ortamının ve nesnenin yapısının bilinmediği durumlarda yeni çalışmalara ihtiyaç olduğu tespit edildi. Şimdilerdeki yapılan kavrama planı ile ilgili çoğu çalışmanın genelden ziyade özel olduğunu ve daha verimli, kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulur. Özellikle, geometrik analiz ve makine öğrenmesi tekniklerinin daha genelleştirilmesi gereklidir.

Kappassov ve diğ. (2015), otonom kusursuza yakın kavrama yapan robot eli için doku hissinin önemli olduğunu vurgulamıştır. Parmak ile nesne arasında temas noktalarındaki iç kuvvet ve temas kuvveti, nesne-parmak yüzey özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu çalışma ile dokunma hissi içeren kavramalar hakkında yapılan çalışmalar ve şimdiki teknoloji hakkında bilgi aktarımı amaçlanmıştır.

Şimdiye kadar geliştirilen robotik el mekanizmalarının, bilgisayar ile kontrolü genellikle kablolu iletişimle sağlanmaktadır. Bu kablolar, robot elinin hareketini biraz zorlaştırabilmektedir. Bunun önüne geçmek için Kızıltaş ve diğ. (2016), kablosuz haberleşme protokolü önermiştir. İnsan eline benzer sınırlı serbestlik dereceli robotik el tasarlanmıştır. Bilenen kablosuz iletişim türleri karşılaştırılmıştır. Elin kontrolü Arduino ve XBee modülleri ile gerçekleştirilmiştir. İleride, kablosuz gerçek kavrama testleri ve nesnelerin interneti ile robot elinin kontrolü hedeflenmektedir. Ayrıca, robot kol uzvunun eklenmesi de yapılacak planlar dahilinde olduğu belirtilmiştir.

Savić ve diğ. (2016) tasarladığı robotik el ile silindirik, parmak ucu, çanta tutuşu, avuç içi, küresel ve yanal tutuş gibi kavrama işlemleri yapılmıştır ve başarıyla gerçekleşmiştir. Gelecek çalışmalarında, el dinamiklerini öğrenmek için makine öğrenmesi teknikleri ve görsel sistemden gelen bilgiler ile kavrama yapılması hedeflenmiştir.

İnsan el hareketlerinden öğrenen ve robotik ele aktaran bir yaklaşım mevcuttur. Gupta ve diğ. (2016) bu çalışma üzerine çalışmış ve bir yöntem önermiştir. Yöntem, insanın kavranmış nesne için gereken hareketi gösterdiği ve robotun Pekiştirmeli Öğrenme ile taklit edip öğrenmesidir. "RBO Hand 2" ile abaküs manipülasyonu, valf çevirme ve şişe kavrama gibi işlemler gerçekleşmiştir.

Ha ve diğ. (2016), "full-falanks" ve "full'den az falanks" kavramalar için "underactuated" parmağın temas kuvvetlerinin matematiksel tahlilini sunar. Mekanik kısıtlamalara sahip ve serbestlik derecesinden az sayıda aktüatör elin, karmaşık yapıdaki kontrolünü ve sensörsüz olarak farklı şekilli nesnelere göre adapte olan kavramayı sağlar. 3-DOF'a sahip parmağın, ADAMS modeline göre simülasyonu uygulanmış ve etkili sonuçlar alınmış. Simülasyon sonucunda, elde edilen değerler kararlılık ve yakınsama açısından karşılaştırılmıştır.

Büyük ölçekli manipülasyonlarda, robot elin çalışma uzayı sınırı ve kararlı kavrama yapma problemi mevcuttur. Bu sorunu çözmek için, parmak ayarlaması yapılarak çözülebilir. Fakat, nesne dinamiklerinin hesabı oldukça karmaşık yapıdadır. Fan ve diğ. (2017), bu probleme çözüm getirmeye çalışmıştır. Bu sorun için iki tane kontrolör önerilmiştir. İlki, parmağın hızının ayarlanmasıdır. Bu metot, üç boyutlu model kullanmadan oluşturulmuş. Çünkü, üç boyutlu nesne yüzeyi modellemesi yapmak oldukça zordur. Diğer kontrolör, nesne dinamik belirsizlikleri ve harici bozulmalara karşı dayanıklı kontrolör tasarımıdır. Böylece, nesnenin elden düşüp kaymasının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Bu operasyonu sağlarken, hız ölçümü yapılmamış ve doku sensörü kullanılmamıştır.

Delgado ve diğ. (2017), deforme olabilen nesnelere için adaptif manipülasyon kontrol yapısı sunmuştur. El içindeki nesnenin özelliklerinin çıkarımı ve parmak ile nesne arasındaki etkileşimi doku sensörüne dayalı kontrol yapısı çıkarımı yapıldı. Bu yapı, insan el kinematiği ve parmak ucu basınç sensörü bilgisi kullanılmaktadır, yumuşak ve sert nesnelere kavraması ve manipülasyonu işlemi gerçekleştirmeyi sağlamaktadır. Gelecek çalışmalarda, daha karmaşık deforme yapısına sahip nesnelere için görsel sistem kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Kavrama ve manipülasyonun uzun bir geçmişi olsa da, çok parmaklı robotik el teknolojisi halen gelişme aşamasındadır. Ozawa ve Tahara (2017), robotik ellerle kavrama ve manipülasyon kontrol yapıları üzerine geçmiş tüm çalışmalarını incelemişlerdir. Güvenli ve kararlı kavrama ve manipülasyonun neden ihtiyaç duyulduğu, güvenli kavramanın ne olduğunun sorusunu sorup cevap vermektedirler. Daha sonra, robotik el ile kararlı kavrama ve manipülasyon için dört önemli sorunu incelemişler ve cevap aramışlardır: “Sorun 1) Kararlı bir nesne kavraması için denge noktası var mıdır?”, “Sorun 2) Manipülasyon sırasında kararlı denge noktalarını birleştiren sürekli bir yörünge var mı?”, “Sorun 3) Nesnedeki ideal temas noktaları, manipülasyon sırasında harici bozulma kuvvetine karşı korunabilir mi?”, “Sorun 4) Harici bozulma kuvvetinden dolayı denge noktası bozulan nesnenin, denge noktasına tekrar geri dönebilir mi?”. Sorun 1’in çözümünü ilk kavrama noktalarını belirleyerek, "force closure" ile çözüme ulaştırılmıştır. Sorun 2, yörünge planlaması yaparak çözüme kavuşturulmuş. Sorun 3 ise iç kuvvet durumu ile ve Sorun 4 de gerekli

olan kontrolör yapısı tasarlanarak sonuca ulaştırılacağı belirtilmiştir. Ayrıca, kavrama ve manipülasyon için kavrama sınıflandırılması hakkında yapılan çalışmalar ile ilgili detaylı bilgiler de verilmiştir.

Sadun ve diğ. (2016), üç parmaklı robotik el için, PID ile kuvvet ve konum kontrolü önermiştir. Kavrama sırasında temas kuvveti ölçüm değeri, Kuvvete Duyarlı Direnç (FSR) kuvvet sensörü ile elde edilmiştir. Yapılan deneyde, bir dizi kavrama testi yapılmıştır. PID, tatmin edici kontrol sağlamıştır. Ancak, düşük maliyetli FSR sensörü dalgalı sinyal üretse de yapılan çalışmada yeterli görülmüştür. FSR performansını arttırmak için plastik kapak geliştirildi ve parmak temas yüzeyine takılmıştır. Gelecek çalışmalarda, kullanılacak sensörün daha esnek ve daha hassas olmasına dikkat edilecektir.

VanHuy ve diğ. (2017), ilk olarak Solidworks programı üzerinden protez el tasarlamışlardır. Daha sonra, esneklik sensörü monte edilmiş eldiven ile robotik elin parmaklarının hareketini sağlayan servo motorların kontrolü sağlanmıştır. Gelecekte, uzaktan kontrol edilebilen bir sistem üzerinde çalışılacaktır.

Hua ve diğ (2017), kavrama planlama problemini geometrik olarak yorumlar, robot parmaklarının çalışma alanları konveks kümeler kullanılarak tarif etmişlerdir. Q+ mesafe kavramına dayalı el konfigürasyonu dikkate alan farklı nesnelere için etkili kavrama sağlayan algoritma önermişlerdir. Bu oluşturulan algoritma, dört parmaklı robot eli için uygulandı ve simülasyonda, 1 sn'de el ile nesne arasında kavrama için eklem ve el ayarlamaları yapıldığı görülmüştür.

Nesne geometrisinin bilinmesi, kolaylıkla kavrama yapılmasını sağlar. Ancak, gerçek dünyada çoğu durumda nesne geometri bilgisine sahip olmak pek mümkün olmamaktadır. Ayrıca, nesne kavranması esnasında, nesnenin el içindeki duruşunun belirsizliği kararlı kavrama durumu için çok önemlidir. S. Fan ve diğ. (2018), nesne duruşundaki belirsizliği çözmek amacıyla adaptif kavrama yöntemi geliştirmişlerdir. Bu metod, nesnenin ön kavrama kararlılığı için kavrama kuvveti uygulamasını ve parmak ile nesne temasını sağlamak amacıyla, Switch Kontrolü (Empedans-kuvvet kontrolü) metoduna dayanmaktadır. Bu strateji, el içindeki nesne duruşunu ayarlama başarı elde edilmiştir.

Zhang ve diğ. (2018) hasat zamanı domates toplamak için iki parmaklı bir tutucunun, domates yapısının deforme olmasına sebep olması ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Domatesin erken ve orta kırmızı olgunlaşma aşamalarında, domatesin tersinir viskoelastik davranış ve deformasyon karakteristiklerini ifade etmek için "Burger Modeli" kullanılmıştır. Ayrıca, bu model ile viskoelastik parametrelerini elde etmek için kayma testleri yapılmıştır. Domatese en az zarar veren üç kavrama modeli üzerinde durulmuştur. Bu çalışma, tarımda kullanılan robotların optimal kavrama işlemi için bir temel sağlamaktadır.

İnsan ellerinin yerini artık robot eller almaya başlamıştır. Özellikle, el rehabilitasyon sistemleri, dokunsal arayüz, elektromiyografi protez el arayüzü, uzaktan robotik ele direktif vererek ameliyat etme, muayene etme ve bomba imha etme gibi bir çok zorlu çalışma alanlarında yavaş yavaş robot eller üstünlüğü ele geçirmeye başlamıştır. Bu tür görevler için robotik el araştırmaları ve gelişmeleri hakkında, Kawasaki ve Mouri (2019) bir makale yayınlamıştır.

Piyasada yer alan çoğu robotik tutucular, sert bir yapıya sahiptir. Bu yüzden, düzgün yapıya sahip olmayan nesnelerin hassas ve deforme olmadan kavranması işlemini zorlaştırmaktadır. Bu problemi gidermek amacı ile yumuşak yapıda robotik tutucu kullanılması önerilmiştir. Ancak, bu tutucu, nesneyi tutup kaldırma ve herhangi bir yere bırakma işleminde bilgi eksikliğinden dolayı, kısıtlı kavrama ve manipülasyon yapmaktadır. Bu sorun için, sensör kullanılması önerilmiştir. Son olarak, nesne ile el arasındaki kavramanın sürdürülmesi için kontrol yapısı geliştirilmiştir ve böylelikle, deforme olabilen nesnelerin kavraması işlemi başarılı test sonucu vermiştir (Le 2019).

Dokunsal sensörler ile bir robotik elin şekil, ağırlık ve kütle merkezi bilinmeyen nesnelere kavraması ve manipüle etmesi amacıyla Montaña ve Suárez (2019) yeni bir strateji sunar. Bu operasyonu gerçekleştirmek için gereken el ayarlamaları, sadece dokunsal ve kinematik bilgiler kullanılarak yapılır. Parmak uçlarının istenen ve gerçekte yaptığı hareketler hakkında bir akıl yürütme işlemi yapılır. Bunu, nesnenin iç kısmındaki sanal temas noktaları belirleyerek gerçekleştirmektedir. Yapılan test çalışmalarında, "Allegro Hand" ve parmak ucunda dokunsal sensörler kullanılarak elin içinde yer alan nesnelerin, saat yönünde ve



saat yönü tersinde döndürme işlemleri yapılmıştır. Parmak ucu temas kuvveti, sensörlerle temas noktası pozisyonları ve eklem değerleri ölçülmüş ve grafiksel sonuçları gösterilmiştir. Kurgulanan bu plan başarılı olmuştur.

Neha ve diğ. (2020), dört parmaklı robotik el ile farklı nesnelere kavranması ve kusursuza yakın kavrama, manipülasyon işlemi yapmak istemişlerdir. Bu yüzden, robot elin kontrolü için SimMechanics araç kutusu kullanılarak MATLAB programı ortamında, elin kontrol edilmesi işlemini yaptılar. Elin kinematik ve dinamik çalışmaları, Solidworks tasarım programı ile yapılmış olup SimMechanics'e aktarılmıştır. Deneylede, farklı çaplara sahip üç silindirik cisim ve bir küre kullanılmıştır. Kavrama için farklı açısız hareket, eklem hızları, ivmeler ve torklar elde edildi ve ilgili sonuçlar değerlendirilmiştir. Farklı nesnelere için kusursuza yakın kavrama işlemi gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmada, elin parmak ucu ile farklı temas noktaları belirlenecek ve MATLAB ortamında kinematik olarak doğruluğu test edilecektir.

Sun ve diğ. (2020) yaptığı çalışmada, farklı kavramalar için adaptif esnek robotik el tanımlamıştır. İlk olarak, Yeoh Gerilme Enerji fonksiyonu ve matematiksel model oluşturuldu. Bu süreç, yumuşak parmak deformasyon özelliklerini analiz etmek için yapılmıştır. Esnek kavrama için değiştirilebilir avuç içi sunulmuştur. Daha sonra, el kinematiği oluşturuldu ve Monte-Carlo Simülasyonu ile optimizasyon problemi analizi yapılmıştır. Avuç içi değişkenlik, yumuşak ve düzgün olmayan şekillerin kavranmasındaki sınırları ortadan kaldırmıştır. Bu el ile kivi, küp, top ve kalemtraş kavrama testlerine tabi tutulmuş ve başarılı neticeler elde edilmiştir. 6-DOF'a sahip avuç içi içeren el için 6 motor kullanılmıştır ama bu durum kompleks yapıda ve maliyetli olmuştur. Bu problemi çözmek için en fazla 2 veya 3 motor kullanımı düşünülmektedir.

Çok parmaklı robotik ellerin kavrama kontrolü ve kavramaların ayarlanması işlemi oldukça karmaşık ve zorlu bir süreçtir. Bu durumun üstesinden gelmek amacıyla günümüzde akıllı yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Makine Öğrenmesi, Bulanık Mantık gibi yapay zekâya dayalı çalışmalar üzerinde gün geçtikçe artan çalışmalar görülmektedir. Özellikle, Bulanık Mantık gibi insan zekasına yakın düşünme tarzı

sunan kontrolör tasarımı ile ilgili yakın zamanda yapılan çalışmalar literatürde göze çarpmaktadır.

Kavrama öncesi süreçte, kavrama için eldeki parmakların ayarlanması; nesne şekline, fiziksel özelliklerine ve hangi tür kavrama yapılacağına bağlıdır. Aydın (1995), bu sorun için bir Bulanık Mantık (BM) ile ön kavrama algoritma yapısı sunulmuştur. Nesnenin yüzey alanı, boyutu ve eğriliği; hedeflenen görev için ne kadar kararlılık, manipüle edilebilirlik ve tork uygulanabilirliği sağlanacak şekilde analiz edildi. Ayrıca, kavrama türleri için gerekli üyelik değerleri tayin edilerek üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur. Deney, bir "Anthrobot Robot Hand" üzerinde test edilmiş ve uygun ön kavrama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Cam, meyve veya sebze gibi deforme olabilen objeler, robotik el içinde hassas kavramaya ihtiyaç duymaktadırlar. Glossas ve Aspragathos (2001) yayınladıkları makalede, iki parmaklı tutucu için güvenli kontrol yapısı sunmaktadırlar. Önerilen bu yapı, doku geri bildirimini kullanarak tutucunun minimal kuvvet ile nesneyi kavramasını sağlamaktadır. Böylelikle, kavranan nesnenin şekil, kütle, boyut ve yüzey özellikleri gibi bilgiler içeren bir veri tabanına ihtiyaç duyulmamasını sağlar ve güçlü bir kavrama kontrolü işlemi gerçekleştirir. Uygulanan testler sonucunda, Bulanık Mantık Kontrolör (BMK) ile PID tasarımı karşılaştırılması yapılmıştır. BMK, PID'e göre istenen kavrama için daha az kuvvet uygulamakta ve yapılan işleme tepki süresi bakımından, PID'e göre daha az sürede yapmaktadır. Her yeni kavramada PID, yeni kazanç ayarlaması yapılmasına ihtiyaç duymaktadır. Fakat, BMK'da bu durum söz konusu değildir. Bu açıdan bakılırsa, BMK'nın PID yapısına göre daha hızlı çıkartım yaptığı saptanmıştır. Deneylerde, deforme olabilen nesnelerin kavramaları başarıyla yürütülmüştür.

Ataei ve diğ. (2011) genetik algoritmaya dayanan BMK tasarımı gerçekleştirmişlerdir. BMK'nın hem az maliyet hem de az unsur gerektirdiği ve uygulanmasının kolay olduğuna vurgu yapmışlardır. Fonksiyon üyeliklerinin az boyut kapladığından dolayı, ANFIS kullanımını geliştirilebileceğinden bahsedilmiştir.

Otonom manipülasyon, robotik araştırmalarında zorlu alanlardan biridir. Nesne tanıma, nesne izleme, manipülatör ve kavrama pozisyonunu ayarlama gibi türlü işlemler gerektirmektedir. Bu sorunun üstesinden gelinmesi amacı ile Ciobanu ve Popescu (2015) tarafından, BM tabanlı bir doku kontrolör önerilmiştir. BMK ile sensörden gelen bilgilerin lineer olmaması, nesne hakkında fiziksel bilgilerin bilinmemesi gibi belirsizlikler çözüme kavuşturulur. Bu tasarlanan model ile farklı nesnelerin kavranması için çeşitli görevler gerçekleştirilebileceğinden bahsedilmiştir. Ayrıca, doku kontrolörünün parmak-nesne temas bilgisi eklenerek daha da geniş bir konu haline getirilebileceğinden de bahsedilmiştir.

Anil ve diğ. (2018), insana benzer robot "MARKO" için "FTN Robot Hand" tasarımı sunmakta ve elde yer alan parmakları harekete geçiren fırçalı DA motorlarını kontrol etmek için BMK kullanmışlardır. Denetleyicinin performansı, Ziegler-Nichols ile ayarlanan PID performansı ile karşılaştırılmıştır. Matlab/Simulink üzerinde simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda, BMK ile yapılan işlem süresi biraz daha fazla olduğu görülmüştür, ancak BMK daha iyi yükselme zamanı ve yerleşme zamanı göstermiştir. Bu sorunun sebebinin, fazla üyelik fonksiyonunun kullanılması olarak gösterilmiştir. Fazla üyelik fonksiyonu kullanımı daha iyi kontrol sağlar, ama işlem süresini uzatmaktadır. BMK'nın, özellikle doğrusal olmayan sistemlerde kullanımının yararlı olacağı belirtilmiştir. Çünkü, BMK'de matematiksel hesaplamalar yapmaya gerek duyulmamaktadır. Böylece, non-lineer sistemlerde PID'nin bir alternatifi olabilmektedir.

Conker ve Karaca (2019) robotik el çalışmalarında en büyük sorunun, kuvvet kontrolü olduğunu saptamışlardır. Parmağın cisimleri ezmesi ya da el içinde kavranan cisimlerin elden kayıp düşmesi gibi problemler için kuvvet kontrolü sorunu çözümlenmelidir. Yapılan çalışmada, BMK tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan robotik elin avucunun içerisinde ve parmaklarda yer alan sensörler vasıtasıyla kuvvet ölçümü yapılıyor ve geri besleme ile kuvvet ayarlaması yapılmaktadır. Sensör geri bildirimlerinin yanı sıra, kullanıcıdan parmağın nesneye ne kadar kuvvet uygulayacağı bilgisi de alınmaktadır. Tasarlanan bu yapı ile hassas ve kararlı kavrama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Nesne kavranmasında insan yeteneklerini, robotik ele aktarmak ve kavrama için ideal kuvvet kontrolünü ayarlamak oldukça zor bir işlemdir. İşlek (2021) yaptığı tez çalışmasında, bu sorunu çözmek için BM kullanımını önermiştir. İnsanlar nesneyi kavrarırken, kavrama kuvvetinin minimum sınır değerinin üzerine güvenlik için fazladan kuvvet uyguladığı görülmüş ve bunu robotik ele uygulanması düşünülmüştür. Bu fazladan kuvvetin literatürdeki adının “Güvenlik Marjı” olduğu belirtilmiştir. Bu kuvvet ile ilgili testler yapılmış ve ideal güvenlik marjı verileri ile Bulanık güvenlik marjı yapısı tasarlanmıştır. Hassas kavramalarda, kavrama kuvveti işlemleri gerçekleştirilmiştir.

### **3. ROBOTİK EL**

#### **3.1 Robotik Tanımı**

Teknolojinin ilerlemesi ile robotik alanında, son birkaç yüzyıldır ciddi gelişmeler görülmüştür. Robotik, kendi kendine karar verebilen ya da bir insan tarafından yönetilebilen, algılayıcı varsa algılayıcı ile gelen bilginin algılanarak kontrol sistemi tarafından alınan bu bilginin değerlendirilmesi ve robotu bu bilgi çerçevesinde belli bir hedef için eylemsel anlamda yönlendirebilmesi gibi süreçleri gerçekleştirebilen yapay bir sistemdir. Algılayıcı olmaksızın, sadece kontrol mekanizmaları ile de yönlendirilebilirler. Kontrol mekanizması, robotun akıllı yöntemler ile kendi kendine yapacağı işi öğrenerek karar alıp yönetilebilmesini ya da insan tarafından istenilen hedef doğrultusunda hareket direktifleri verilerek de yönetilebilmesini sağlamaktadır (Çamoğlu 2015). Ayrıca, robotik alanına robotların tasarımı ve üretimi süreci de dâhil edilebilir.

#### **3.2 Robotik El Tanımı ve Kullanım Alanları**

Robotların eylemleri içerisinde, nesne kavrama, kavranan nesneyi bırakma, nesneyi bir yerden tutup başka bir yere taşıma ve bırakma gibi süreçler görülmektedir. Bu türden eylemleri gerçekleştirmek amacıyla insan eline benzer şekil ve hareket yapısına sahip robot mekanizmalarına robotik el denir. Robotik el alanı, son yirmi yıldır önemli bir çalışma alanı olmuştur. Robotik ellerin kullanılmasındaki temel hedef, insan ellerinin zorlandığı yerlerde insanlara yardımcı olarak kullanılması olarak görülmektedir. Örneğin; endüstri ve fabrikalarda insanların yapmakta zorlandığı işlerde, askeri alanda bomba imhasında ve hastanelerde doktorların direktifleriyle ameliyat yapma veya muayene etme gibi birçok alanda, farklı meslek grubuna mensup kişilerin işlerini oldukça kolaylaştırmaktadır (Kawasaki ve Mouri 2019).

Fizik tedavide, ampute insanların EMG sinyalleri ile çalıştırılan protez el kullanması ve ABS hastalığına sahip olan insanların protez el kullanması önemli bir yer tutar. Dünyadaki protez ellerin çoğu, insan eline benzer fiziksel yapıda oluşturulmasına daha çok dikkat edilmektedir ve bu yüzden önemli hareket kabiliyetleri gerçekleştirmek için protez eller eksik kalabilmektedir. Protez ellerin maliyetli olması da, düşük ve orta seviyeli bütçeye sahip insanlar için bir problem teşkil etmektedir. Protez ellerin yerine, çok parmaklı kusursuzca yakın kavrama yapan robotik eller kullanılması hem daha ucuz hem de daha kullanışlı olabilmektedir.

### 3.3 Robot Kinematiği

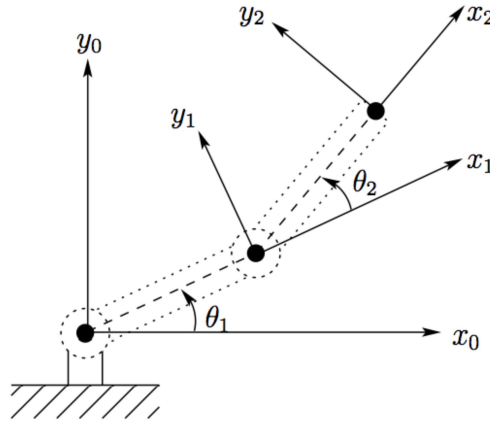
Bir veya birden fazla serbestlik derecesine (DOF) sahip bir mekanizmanın yapısını ve hareketini inceleyen bilim dalına "kinematik" tanımlaması yapılmaktadır. Bu mekanizma hareketleri, dönme şeklinde olacağı gibi öteleme şeklinde de olabilmektedir. "Robot Kinematiği" ise, robot mekanizmaların hareketini incelemektedir. Özellikle, mekanizmanın hareket kontrolü ve planlaması; aktüatörün robot linklerine, uç işlevciye uygulayacağı kuvveti ve torku belirleme gibi amaçlar için robotik sistemin hız, konum ve ivme arasındaki ilişkiyi araştırmaktadır.

Robotikte, kinematik bilimi iki farklı açıdan ele alınmaktadır. Bunlar, ileri ve ters kinematiktir. İleri kinematik, robot linkleri arasındaki eklem parametreleri ilişkilerinden, uç işlevcinin konum ve yönelimini tayin eder. Ters kinematik ise uç işlevcinin konum parametrelerinden, robot linklerinin arasındaki eklem parametrelerinin tayin edilmesini sağlamaktadır. İki komşu eklem arasındaki ilişkiler ve uç işlevci ile son eklem arasındaki ilişki, dönüşüm matrisi ile ifade edilmektedir.

Robot eklemlerinin değişkenlerini belirlemek için birden fazla kinematik yöntem bulunmaktadır. Kartezyen üç boyutlu ve Kartonyum dört boyutlu uzayda, kinematik çözümler yapılmıştır. Kartezyen uzayda üstel yöntem ve Pieper-Roth çözüm yöntemleri başvurulan yöntemlerden birkaçı olmasına karşın, en çok kullanılan yöntemin Denavit-Hartenberg (DH) çözüm yöntemi olduğu görülür (Bingül ve Küçük 2019).

### 3.3.1 DH Çözüm Yöntemi

DH yönteminde, dört tane ana parametreye bağlı olarak kinematik analiz yapılmaktadır. Bunlar: koordinat sistemi tayin edilen iki komşu eksen arasındaki link uzunluğu ( $a_{i-1}$ ), iki komşu eksen arasındaki eksen açısı ( $\alpha_{i-1}$ ), üst üste çakışan linkler arasındaki eklemlerin kayması ( $d_i$ ) ve iki komşu link arasındaki eklem açısı ( $\theta_i$ ) gibi parametrelerdir. Bu analizin yapılması için ilk olarak, robotun eklemlerine bir koordinat sistemi yerleştirilmelidir. Daha sonra, eklemlerdeki koordinat sistemlerine göre DH parametrelerinin çıkarımı yapılmaktadır. Yapılan tez çalışmasında kullanılan çok parmaklı robotik eldeki parmaklar, iki serbest dönme dereceliğe sahiptir. Aşağıda yapılacak olan hesaplamalar ve örneklemler, 2-DOF parmak baz alınarak yapıldı. Şekil 3.1’de, iki eksenli robot parmağın gösterimi yapılmıştır.



Şekil 3.1: İki eksenli robot parmağı.

Şekil 3.1’de yer alan gösterimde, robot parmağının baz noktasında 1’inci koordinat eksenleri  $(x_0, y_0)$ , parmağın 1’inci falanksı ile 2’nci falanksı arasında yer alan ekleme 2’nci koordinat eksenleri  $(x_1, y_1)$  ve uç işlevcinin yer aldığı noktaya 3’üncü koordinat eksenleri yerleştirilmiştir  $(x_2, y_2)$ . Parmak falanks uzunlukları, 1’inci dönme ekseninden 2’nci dönme eksenine kadar  $l_1$  ve 2’nci dönme ekseninden 3’üncü dönme eksenine kadar, başka bir deyişle uç işlevciye kadar  $l_2$  olarak kabul edilerek DH parametresi tablosu, Tablo 3.1’de oluşturulmuştur. Tablo 3.1’deki DH parametrelerinde linklere bağlı hesaplamalar, 2-DOF parmaktaki eksenler arasındaki parmak falanksları baz alınarak hesaplandı.

**Tablo 3.1:** İki eksenli robot parmağı için DH parametreleri.

i'nci eksen	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	$l_1$	0	0	$\theta_2$
3	$l_2$	0	0	0

### 3.3.2 İleri Kinematik

İleri kinematik, referans koordinat sistemindeki parametre değişkenlerinden başlanarak sırasıyla diğer koordinat eksenleri parametre değişkenlerinin hesaplanması ile, uç işlevcinin konum ve yönelimini hesaplama işlemidir. İleri kinematik hesaplamalarında, geometrik ve matematiksel çözüm metotları olmak üzere iki yöntem vardır. Geometrik yöntemde, falanksların duruşunu referans koordinat sistemine göre açılarla trigonometrik çözüm sunar iken; matematiksel yöntemde, eklem parametre değişkenlerinin dönüşüm matrisleri oluşturulur ve bu dönüşüm matrislerinin çarpılmasıyla çözüme ulaşılr.

#### 3.3.2.1 Matematiksel Yaklaşımla İleri Kinematik Çözümü

Matematiksel yaklaşımla ileri kinematik çözümü için Tablo 3.1'de oluşturulan DH parametrelerinden yararlanılarak denklem (3.1)'deki dönüşüm matrisi, her bir eklem için oluşturulur. Her bir eklem için dönüşüm matrisleri oluşturulduktan sonra, referans koordinat sisteminden uç işlevciye kadar oluşturulan dönüşüm matrisleri çarpılarak ileri kinematik genel dönüşüm matrisi elde edilir, denklem (3.2)'de gösterimi yapılmıştır.

$${}_{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^0T = [{}^0T] \cdot [{}^1T] \cdot \dots \cdot [{}^{n-1}T] \quad (3.2)$$



2-DOF robot parmağının her bir eklemi için dönüşüm matrisleri, denklem (3.3), denklem (3.4) ve denklem (3.5)'te oluşturulmuştur.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Her bir eklem için oluşturulan dönüşüm matrislerinin çarpılması ile uç işlevcinin konum ve yönelim bilgilerini içeren bir genel dönüşüm matrisi elde edilir, denklem (3.6)'da gösterilmiştir.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1\cos\theta_1 + l_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1\sin\theta_1 + l_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da elde edilen dönüşüm matrisinin son satırı haricinde 3'üncü sütununda yer alan matris elemanları, uç işlevcinin referans koordinat sistemine göre konumunu belirtmektedir ve diğer matris elemanları dönme elemanları olarak kabul edilir. Uç işlevci dönme matrisi denklem (3.7)'de ve uç işlevci konum vektörü denklem (3.8)'de gösterilmiştir.

$${}^0_3R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$${}^0_3P = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

### 3.3.2.2 Geometrik Yaklaşımla İleri Kinematik Çözümü

Geometrik yaklaşımla çözüm yöntemi, ileri kinematik çözümünde kullanılabilir. Bu yöntemde, robot parmağındaki falankların referans koordinat sistemine göre oluşturduğu açılar ve falanks uzunlukları dikkate alınmaktadır. Şekil 3.1’de iki eksenli robot parmağın geometrik yaklaşımla ileri kinematik analizi yapılmıştır. Geometrik model ile elde edilen uç işlevci konumu; x eksenine göre denklem (3.9)’da  $p_x$  olarak, y eksenine göre denklem (3.10)’da  $p_y$  olarak gösterilmiştir.

$$p_x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.9)$$

$$p_y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.10)$$

Matematiksel yaklaşımla denklem (3.8)’de elde edilen uç işlevcinin konum matrisinin 1’inci satırındaki ifade, uç işlevcinin x eksenine göre konumu verir ve geometrik yaklaşımla elde edilen uç işlevcinin x eksenine göre ifadesini veren (3.9)’daki denklemin birbiriyle aynı sonucu verdiği görülür. Aynı şekilde, matematiksel yaklaşımla denklem (3.8)’de elde edilen uç işlevcinin konum matrisinin 2’nci satırındaki ifade, uç işlevcinin y eksenine göre konumu verir ve geometrik yaklaşımla elde edilen uç işlevcinin y eksenine göre ifadesini veren (3.10)’daki denklemin birbiriyle aynı sonucu verdiği görülür.

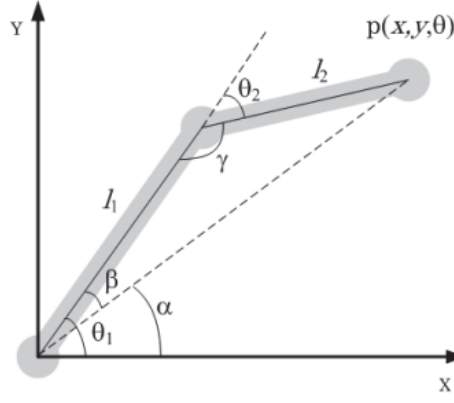
### 3.3.3 Ters Kinematik

Robotikte ters kinematik, adından da anlaşıldığı üzere ileri kinematikte yapılan işlemin tam tersidir. Yani, uç işlevcinin konum ve yöneliminden yola çıkarak eklem parametre değerlerinin bulunması işlemidir. Ters kinematik problem çözümü, ileri kinematik problem çözümlerine göre oldukça karmaşık yapıda ve lineer olmayan yapıda denklemlere sahiptir. Ayrıca, robotta dönme eksenleri sayısı arttıkça da ters kinematik çözüm işlemi zorlaşmaktadır. Çünkü, robot manipülatörü üç boyutlu uzayda çok fazla noktaya ulaşabilmektedir. Ters kinematik çözümde her zaman matematiksel çözüm, fiziksel çözümü temsil etmeyebilmektedir. Uç işlevcinin herhangi bir yerdeki konumunu temsil eden parametre değişkenleri çok olmaktadır, bu durum da ters kinematik işlemini zorlaştırmaktadır.

Ters kinematik çözümünde, analitik, sayısal ve geometrik çözüm yöntemleri vardır. Gerçek zamanlı robot uygulamalarında, robotlara ait ters kinematik çözümünde analitik çözüm yöntemi tercih edilmektedir, bu yüzden endüstride kullanılan robotlar analitik çözümü gerçekleştirirler. Bazen, analitik çözüm yeterli olmayabilmektedir, bundan dolayı sayısal çözüm metoduna başvurulabilmektedir. Sayısal çözüm yöntemi, analitik çözüme göre bilgisayar ortamında yavaş çalışmaktadır ve ayrıca sayısal çözüm yönteminde karşılaşılan en büyük problem, Jacobian matrisinin tekil olduğu durumlarda çözüm üretememesidir. Geometrik metot ise serbest dereceliği az olan robotik kol ve parmak uygulamalarında kolaylığı ve basitliği sebebiyle kullanılabilir. Bu çalışmada, hem analitik yöntem hem de geometrik yöntem ile ters kinematik hesaplanması yapılacaktır.

#### 3.3.3.1 Geometrik Yöntem ile Ters Kinematik Çözümü

Şekil 3.2'deki gösterimde, Pisagor ve Kosinüs Teoremi'nden yararlanılarak denklem (3.11) oluşturuldu ve (3.11)'de,  $\cos(180 - \theta) = -\cos(\theta)$ 'e göre kosinüs düzenlenerek denklem (3.12) ve denklem (3.13) elde edildi.



Şekil 3.2: İki eksenli robot parmağın ters kinematik çözümü.

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2\cos(180 - \theta_2) \quad (3.11)$$

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2\cos(\theta_2) \quad (3.12)$$

$$\cos(\theta_2) = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (3.13)$$

(3.13)'teki  $\theta_2$  değeri yalnız bırakılarak  $\theta_2$ , yani parmağın ikinci eklemının açılal değeri, denklem (3.14) ile bulunur ve ters kinematiğın ilk adımı tamamlanır.

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (3.14)$$

Şekil 3.2'deki gösterimde, bu sefer Sinüs Teoremi uygulandı ve denklem (3.15)'de gösterildi.

$$\frac{\sin\beta}{l_2} = \frac{\sin\gamma}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (3.15)$$

$\sin\gamma = \sin(180 - \theta_2)$  eşitliğinden,  $\sin\gamma = \sin\theta_2$  eşitliğini elde ederiz ve (3.15) denkleminde yerine koyarsak denklem (3.16) elde edilir.

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{l_2\sin\theta_2}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (3.16)$$

Şekil 3.2'deki gösterime göre,  $\theta_1 = \beta + \alpha$  olduğuna göre ve  $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$  ise, robot parmağın ilk eklem parametresi olan  $\theta_1$  açısı, denklem (3.17)'de bulunur.

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{l_2 \sin \theta_2}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.17)$$

### 3.3.3.2 Analitik Yöntem ile Ters Kinematik Çözümü

İki serbest dereceli robot parmağının, denklem (3.2)'ye göre oluşan matris çarpımı, denklem (3.18) gibi olur.

$${}^0_3T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (3.18)$$

(3.18)'de, her iki tarafı  ${}^0_1T^{-1}$  ile çarpılır ve denklem (3.19) elde edilir.

$$\left({}^0_1T\right)^{-1} \cdot {}^0_3T = \left({}^0_1T\right)^{-1} \cdot {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (3.19)$$

(3.19)'daki eşitliğin sağ tarafındaki,  $\left({}^0_1T\right)^{-1} \cdot {}^0_1T = I$  ise, yani birim matris olduğuna göre, (3.20) elde edilir.

$$\left({}^0_1T\right)^{-1} \cdot {}^0_3T = {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (3.20)$$

(3.3) denklemine göre, baz koordinat sisteminden ilk eklem parametresine kadar olan dönüşüm matrisini elde etmiştik. Bu denklemdeki dönme matrisi denklem (3.21)'de, konum vektörü ise (3.22)'deki gibi olmaktadır.

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$${}^0_1P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Baz koordinat sisteminden ilk eklem parametresine kadar olan dönme matrisinin tersi, dönme matrisinin transpozuna eşittir ( ${}^0R^{-1} = {}^0R^T$ ) ve dönme matrisinin transpozu (3.23)'te elde edilir.

$${}^0R^T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Baz koordinat sisteminden ilk eklem parametresine kadar olan dönüşüm matrisinin tersi, (3.24)'te yer alan matrise göre oluşturulmaktadır.

$$[{}^0T]^{-1} = \begin{bmatrix} {}^0R^T & -({}^0R^T) \cdot ({}^0P) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

(3.22)'deki konum vektörü sıfır olduğuna göre,  $-({}^0R^T) \cdot ({}^0P) = 0$ 'dır. (3.22)'deki konum vektörü ile (3.23)'te elde edilen matris, (3.24)'te yerine koyulursa, (3.25)'teki matris elde edilir.

$${}^0T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

${}^0T$  matrisini, (3.26)'daki gibi tanımlanarak ( $[{}^0T]^{-1}) \cdot {}^0T$  çarpımı (3.27)'de yapıldı. Daha sonra,  ${}^1T \cdot {}^2T$  çarpımı için (3.4) ve (3.5)'teki matrislerden yararlanıldı ve (3.28)'de gösterildi. Elde edilen iki matris birbirine eşitlenir.

$${}^0T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$({}_1^0T)^{-1} \cdot {}_3^0T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$a_{11} = \cos\theta_1 r_{11} + \sin\theta_1 r_{21}$$

$$a_{12} = \cos\theta_1 r_{12} + \sin\theta_1 r_{22}$$

$$a_{13} = \cos\theta_1 r_{13} + \sin\theta_1 r_{23}$$

$$a_{14} = \cos\theta_1 p_x + \sin\theta_1 p_y$$

$$a_{21} = -\sin\theta_1 r_{11} + \cos\theta_1 r_{21}$$

$$a_{22} = -\sin\theta_1 r_{12} + \cos\theta_1 r_{22}$$

$$a_{23} = -\sin\theta_1 r_{13} + \cos\theta_1 r_{23}$$

$$a_{24} = -\sin\theta_1 p_x + \cos\theta_1 p_y$$

$${}_2^1T \cdot {}_3^2T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_1 + l_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

(3.27) ile (3.28) denklemleri birbirine eşitlendikten sonra, 12 tane birbirinden ayrı denklemler elde edilir.

$$\cos\theta_1 r_{11} + \sin\theta_1 r_{21} = \cos\theta_2 \quad (3.29)$$

$$\sin\theta_1 r_{11} + \cos\theta_1 r_{21} = \sin\theta_2 \quad (3.30)$$

$$r_{31} = 0 \quad (3.31)$$

$$\cos\theta_1 r_{12} + \sin\theta_1 r_{22} = -\sin\theta_2 \quad (3.32)$$

$$\sin\theta_1 r_{12} + \cos\theta_1 r_{22} = \cos\theta_2 \quad (3.33)$$

$$r_{32} = 0 \quad (3.34)$$

$$\cos\theta_1 r_{13} + \sin\theta_1 r_{23} = 0 \quad (3.35)$$

$$\sin\theta_1 r_{13} + \cos\theta_1 r_{23} = 0 \quad (3.36)$$

$$r_{33} = 1 \quad (3.37)$$

$$\cos\theta_1 p_x + \sin\theta_1 p_y = l_1 + l_2 \cos\theta_2 \quad (3.38)$$

$$\sin\theta_1 p_x + \cos\theta_1 p_y = l_2 \sin\theta_2 \quad (3.39)$$

$$p_z = 0 \quad (3.40)$$

Ters kinematik çözüm ile eklem değişkenlerinin konum ifadelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden,  $p_x, p_y, p_z$  cinsinden denklem ifadelerine ihtiyaç duyulur ve (3.38), (3.39) denklemlerinden faydalanılır. Bu denklemlerin kareleri alınır, (3.41) ve (3.42) denklemleri elde edilmektedir.

$$\cos^2\theta_1 p_x^2 + \sin^2\theta_1 p_y^2 + 2p_x p_y \cos\theta_1 \sin\theta_1 = l_1^2 + l_2^2 \cos^2\theta_2 + 2l_1 l_2 \cos\theta_2 \quad (3.41)$$

$$\sin^2\theta_1 p_x^2 + \cos^2\theta_1 p_y^2 - 2p_x p_y \cos\theta_1 \sin\theta_1 = l_2^2 \sin^2\theta_2 \quad (3.42)$$

(3.41) ve (3.42) denklemleri toplanıp  $p_x^2, p_y^2, l_2^2$  parantezi alınır, (3.43)'teki denklem elde edilir.

$$p_x^2 (c^2\theta_1 + s^2\theta_1) + p_y^2 (s^2\theta_1 + c^2\theta_1) = l_2^2 (c^2\theta_2 + s^2\theta_2) + 2l_1 l_2 c\theta_2 + l_1^2 \quad (3.43)$$

$\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$  olduğuna göre, (3.43) denklemi düzenlenirse, (3.44)'teki denklem bulunur.

$$p_x^2 + p_y^2 = 2l_1 l_2 \cos\theta_2 + l_1^2 \quad (3.44)$$

(3.44) denkleminde,  $\cos\theta_2$  ifadesi çekilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\cos\theta_2 = \frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (3.45)$$



(3.45)'te bulunan ifade  $\cos\theta = a$  ise,  $\theta = \text{Atan2}(\pm\sqrt{1-a^2}, a)$  ifadesine benzemektedir ve böylece  $\theta_2$  aşağıdaki gibi bulunur:

$$\theta_2 = \text{Atan2}\left(\pm\sqrt{1 - \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)^2}, \frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (3.46)$$

(3.38) denklemini,  $a\sin\theta + b\cos\theta = c$  ifadesine benzemektedir. Öyleyse,  $\theta = \text{Atan2}(a, b) \pm \text{Atan2}(\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c)$  ifadesinde  $p_x = b$ ,  $p_y = a$  ve  $l_1 + l_2\cos\theta_2 = c$  şeklinde yerleştirilirse,  $\theta_1$  değeri (3.47)'deki gibi bulunur.

$$\theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x) \pm \text{Atan2}\left(\sqrt{p_y^2 + p_x^2 - (l_1 + l_2\cos\theta_2)^2}, l_1 + l_2\cos\theta_2\right) \quad (3.47)$$

### 3.4 Robotik El Kavrama Durumları

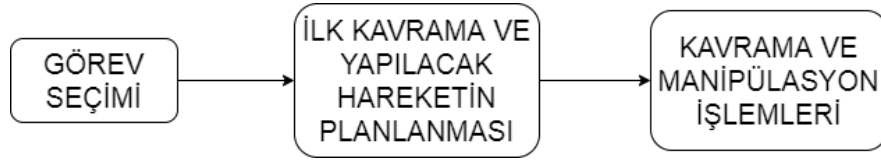
Robotik elde bulunan ve kavrama işlemini yapacak olan parmaklar ile kavranacak nesne arasındaki temas ve kuvvet dengesi sağlanarak, nesnenin el içinde sıkı ve dengeli bir şekilde durması işlemine kavrama denmektedir. Mekanizma açısından kavrama ise, robotik elin yüksüz yani nesnenin kavranmadığı durumdan yüklü yani nesnenin el içinde yer aldığı durum olarak adlandırılabilir (Miao ve diğ. 2015).

Literatürde, geçmişten günümüze kadar robotik el ile ilgili çalışmalarda, insan elinin kavrama durumları incelenerek robotik el üzerinde uygulanmaya çalışılmıştır. Fakat, bu uygulama günümüzde yeni bir şekilde çözüme kavuşturulmaya başlanmıştır. Geçmişte, robotik eller daha çok endüstri ve fabrikalarda insanların yapmakta zorlandığı, sürekli tekrarlanan ve insanlar için risk teşkil eden çalışmalarda kullanıldığı göze çarpar, ancak günümüzde bu tür amaçların yanı sıra daha esnek, kavrama yeteneği yüksek ve kolay uyarlanabilen robotik eller üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Endüstri ve fabrikalarda kullanılan robotik ellerin iki parmaklı tutucular olması ve hangi tür kavrama yapılacağıının bilinmesi, kavranacak nesnenin geometrik yapısının ve şeklinin nasıl olduğunun önceden bilinmesi göze çarpmaktadır. Günümüzde, yavaş yavaş bu kalıplar daha da genişletilerek kavramalarda insan eline yakın daha fazla parmak kullanılması, farklı yapıdaki bilinmeyen nesnelere kavramasının nasıl yapılacağı ve yapılacak kavramanın çeşitleri üzerinde daha çok durulmaktadır. Çünkü, bu türden kavrama operasyonları fazla meşakkatli ve kompleks bir işlem yapısına sahiptir.

### **3.4.1 Kavrama Aşamaları**

Bir robotik el ile kavrama ve manipülasyon işlemi gerçekleştirmek için, robotik elin kontrolünün sağlanması gereklidir. Bu kontrol süreci, üç adımdan oluşmaktadır. Bunlar: görev seçimi, ilk kavrama hareketinin planlanması ve hareketin kontrolünün sürekliliğinin sağlandığı adım olan kavrama ve manipülasyon işlemleri gibi başlıklar içermektedir, blok gösterimi Şekil 3.3'te sunulmuştur. Görev seçiminde, hangi tür kavramanın yapılacağını ve elin kavrama için nasıl şekil alacağını belirlemek işlemi yapılır. Sonra, seçilen kavrama görevine göre ilk kavrama noktalarının, yani kavramada kullanılacak parmakların yapılacak kavrama görevine göre ayarlanmasının yapılacağı süreç, hareket planlamasında olur. Son olarak, nesnenin parmaklar arasında hareketini kısıtlanması sağlanarak kavrama işlemi yapılmış olur. Bahsedilen aşamalardan herhangi birinin eksik veya düzgün işlem yapmaması durumunda, kavrama işlemi sekteye uğrayabilmektedir. Kavrama işleminde, parmakların nesnenin yapısının bozulmasına sebep olacak kadar fazla kuvvet uygulaması veya parmakların nesne üzerinde az kuvvet uygulaması sonucu nesnenin elden kayarak düşmesi gibi durumlarla karşılaşmayı engellemek için kararlı kavrama ve manipülasyon sürecinin sürdürülmesi için önemlidir. Bu yüzden, kontrolör kullanılması, kavramalarda kararlılığı ve sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla gerekli bir unsurdur. Kullanılan kontrolörün, nesnenin yapısını bozmayacak şekilde kontrol yapısı sağlaması gereklidir.



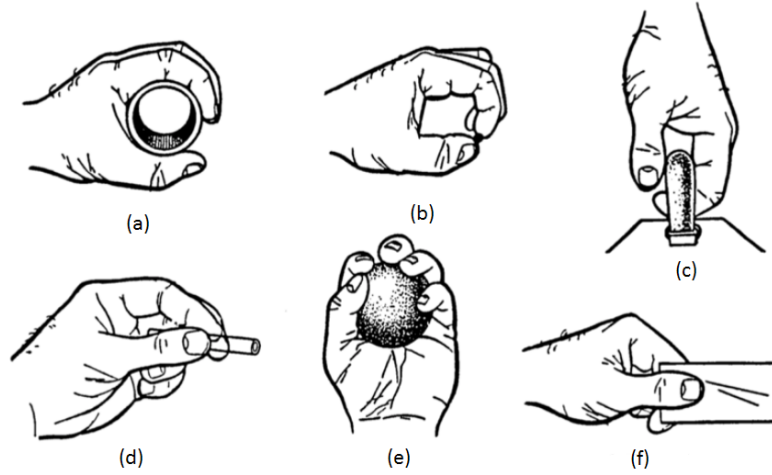
Şekil 3.3: Robotik el kavrama adımları.

### 3.4.2 Kavrama Sınıflandırması

Robotik el ile yapılan kavramaların sınıflandırılması, kavrama aşamalarının ilk adımı olan görev seçimi için çok önemlidir. Şimdiye kadar yapılan akademik araştırmalarda, kavrama tiplerinin belirlenmesi için insan el yapısının özellikleri ve hareketleri incelenmiştir. İnsanların günlük hayatında yaptığı parmak hareketleri, nesnelere nasıl tuttuğu ve elin fizyolojik yapısı gibi konular hakkında detaylı araştırmalar yapılmıştır. İnsan elinin kavrama süreci de araştırılmıştır. Bu süreç hakkında, hareketlerin aşamaları belirlenmiştir. Nesneye yaklaşma ve parmakların ayarlanması aşaması, kavrama işleminin gerçekleşme aşaması ve manipülasyon işlemi aşaması olarak hareket aşamaları belirlenmiştir (Ozawa ve diğ. 2017). Bu insan hareketlerinin aşamaları, robotik el üzerinde düşünülerek kavrama sınıflandırması üzerinde anlamlandırılma ve sınıflandırılma işleminin yapılmasına yardımcı olmuştur. Kavrama sınıflandırması işlemi yapılmazsa, robot parmakları, nesneyi gelişigüzel bir şekilde kavrama yapmasına neden olur, bu yüzden kavrama işleminin belirsizliği artmış olur. Kavrama işleminde, parmak durumlarını ve hareketlerini belirsizlikten kurtarmak için kavrama sınıflandırması yapmak önemli bir konu haline getirmektedir.

İnsanoğlunun günlük yaşantısında, 5 veya 6 farklı hareket yapısının yeterli olduğu düşünülmektedir, bu 6 kavrama modeli (KM) Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Literatürde yer alan çoğu çalışmada, bu hareket yapılarından esinlenilerek kavrama işlemleri yürütülmüştür. Schlesinger, kavranan nesnenin şekline ve geometrisine dayanan altı farklı kavrama sınıflandırması yapmıştır. Napier ise nesne geometrisinden ziyade yapılacak görevlere göre sınıflandırma yapısı önermiştir. Ancak, Napier çanta tutuşunu tartışmış ama sınıflandırmasından bahsetmemiştir. Landsmeer, hassas kavrama yerine hassas tutma terimlerinden bahsetmiştir. Kamakura, 14 adet modeli, dört kategoride incelemiştir ve nesnenin şekline bakmaksızın parmak ve temas pozisyonlarına göre sınıflandırma işlemi gerçekleştirmiştir.

Arbib ve Iberall ise sınıflandırma için “Sanal Parmak” kavramını geliştirmiştir. “Sanal Parmak” terimi, karşıt parmakların oluşturduğu temas kuvvetine karşı temas kuvveti oluşturan bir parmak grubu olarak tanımlanmış. Bu terimi, üç farklı grupta incelemişlerdir. Bunlar: pad karşıtlık, yanal karşıtlık ve avuç içi karşıtlığıdır. Pad karşıtlık: başparmak ile diğer dört parmaktan herhangi bir parmağın parmak ucu ile yapılan kavramadır, başparmak avuç içine doğru bakmaktadır. Yanal karşıtlık: Başparmak ile diğer dört parmaktan herhangi bir parmağının yan tarafı ile yapılan kavramadır. Avuç içi karşıtlığı: Tüm parmakların avuç içine doğru baktığı kavramadır, güç gerektiren bir kavrama olmaktadır.



**Şekil 3.4:** Yaygın el kavrama modelleri (Baritz ve diğ. 2013)

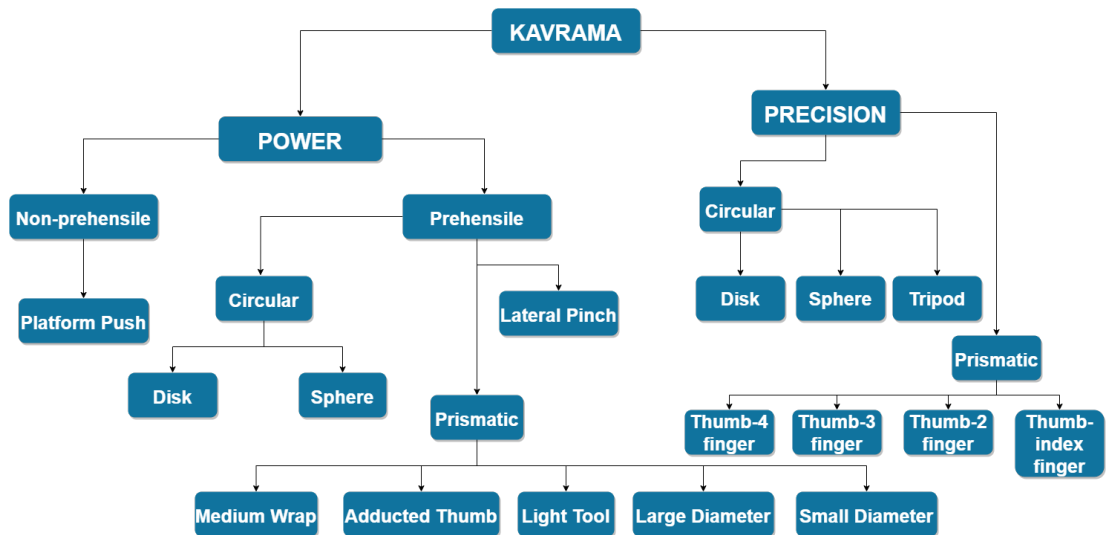
a)Kavrama Modeli 1 (KM 1), b)KM 2, c)KM 3, d)KM 4, e)KM 5, f)KM 6.

Şekil 3.4’te literatürde en yaygın bulunan kavrama modellerinin gösterimi yapıldı. Yukarıda gösterimi yapılan bu kavrama modellerinin, literatürde sınıflandırmasını yapmış olan kişiler ile ilişkisini ve bu kişilerin, bu kavrama modellerine vermiş olduğu isimleri belirten tablo, aşağıda yer alan Tablo 3.2’de gösterildi.

**Tablo 3.2:** Yaygın el kavrama modellerinin literatürdeki sınıflandırılması.

	KM 1	KM 2	KM 3	KM 4	KM 5	KM 6
Schlesinger	Silindirik kavrama	Parmak ucu kavrama	Çanta kavrama	Avuç içi kavrama	Küresel kavrama	Yanal kavrama
Napier	Güç kavrama	Hassas kavrama	Çanta tutuşu	Güç kavrama	Güç kavrama	Hassas kavrama
Landsmeer	Güç kavrama	Hassas tutma	-	Güç kavrama	Güç kavrama	Hassas tutma
Kamakura ve diğ.	Güç kavrama	Hassas kavrama	Güç kavrama	Güç kavrama	Güç kavrama	Orta seviye kavrama
Arbib & Iberall	Avuç içi karşıtlık	Pad karşıtlık	Avuç içi karşıtlık	Avuç içi karşıtlık	Avuç içi karşıtlık	Yanal karşıtlık

Cutkosky ve Wright, kavramayı 16 sınıfa ayırmışlar ve kavrama stratejisini karar veren bir sistem önermişlerdir. Şekil 3.5'te bu sınıflandırma blok diyagramı görülmektedir. Kavramaları güvenlik ve beceri, hassaslık açısından incelemişlerdir. Güvenlik açısından güç kavramasını (power grasp); hassaslık, beceri açısından hassas kavramayı (precision grasp) öne sürmüşlerdir. Güç kavramasında, sıkıştırma işlemi yapmadan yani nesneye kuvvet uygulamadan kavranmasını (non-prehensile) ve nesneyi sıkıştırma işlemi yaparak, yani nesneye kuvvet uygulayarak kavranması (prehensile) bakımından ayrı olarak ele almışlardır.

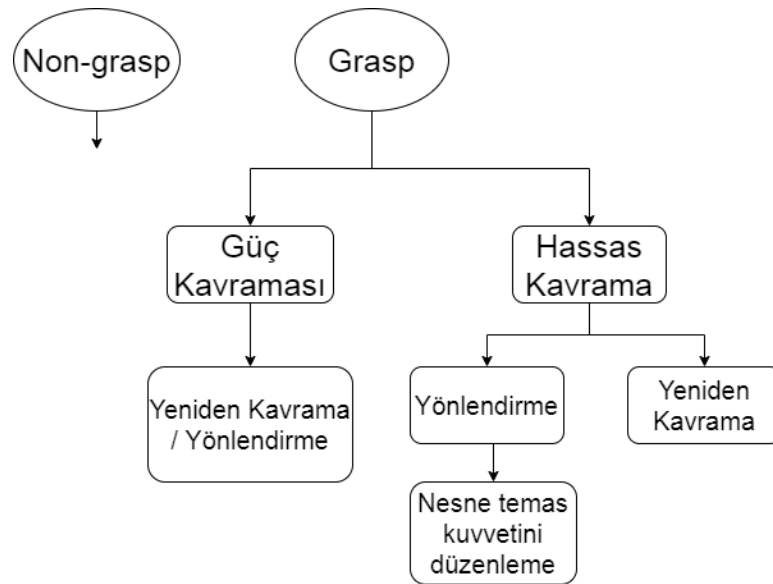


**Şekil 3.5:** Cutkosky ve Wright (1986) kavrama sınıflandırması.

### 3.4.3 Kavrama Görevleri

Robotik el ile kavrama sürecinin ilk adımı görev seçimidir. Kavrama sınıflandırmaları, kavrama görevlerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, kavrama görevleri ile nesneyi kavrayacak olan parmakların koordineli bir şekilde, yapılacak kavrama işlemine göre ayarlanması için önemlidir. Görev seçimi yapıldıktan sonra elin nesneye ilk temasına kadar geçen süreç, kavrama ve manipülasyon işleminin henüz tamamlanmadığı için “non-grasp” olarak adlandırılmıştır. Bu süreçte, ellerin ve parmakların, kavrama görevine göre veya nesne şekline göre duruşlarının ayarlanması yapılır. Nesneye henüz temas olmadığından dolayı, parmakların nesne üzerinde herhangi bir temas ve kuvvet uygulamadığı, sadece parmak eklemlerinde bir değişme olduğu görülmektedir. Kavrama işleminde ise nesne ile parmaklar arasında temas ve kuvvet varlığından söz edilir. Bu kavrama görevine, “grasp” denmektedir. Bu iki başlık, kavrama görevlerinin ana başlığı olarak incelenmektedir.

Napier’e göre kavramalar, güç kavrama ve hassas kavrama olarak ikiye ayrılmıştır (bkz Tablo 3.2). Güç kavraması, parmakların nesneyi sarmalayarak avuç içinde birçok temas noktası oluşturduğu kavrama türüdür. Hassas kavrama ise, parmak uçları ile nesneyi el içinde tutma işlemidir. Napier sınıflandırmasına göre nesnelere kavrama görevleri, Şekil 3.6’daki blok gösteriminde sunulmuştur.



Şekil 3.6: Napier sınıflandırılmasına göre kavrama görevleri.

Şekil 3.6'daki kavrama görevleri, nesnenin el içindeki temas durumlarına göre değişmektedir. Nesneyi yönlendirme işlemi, nesne ile parmak arasındaki temas noktaları değişmeden yapılan, nesnenin el içinde yer değiştirmesidir. Nesneyi yeniden kavrama işlemi, parmak ile nesne temas noktalarının bir sonraki aşamada değiştirilerek, nesnenin el içinde daha iyi bir kavranması için yapılmaktadır, nesnenin el içinde yer değiştirme işlemi olmamaktadır. Bu iki işlem, güç kavramasında aynı çatı altında incelenmektedir. Çünkü, parmaklar ve avuç içi nesneyi sarmaladığından dolayı nesne üzerinde fazla hareket kısıtlaması mevcuttur. Ayrıca, hassas kavramada yönlendirme işlemi kavramı daha da genişletilerek nesne ile çevre arasındaki temas kuvvetini düzenlemek amacıyla sunulmuştur.

### **3.5 Kararlı Kavrama Koşulları**

Robotik eldeki parmakların, nesneyi kavradıktan sonra bu işlemin düzgün bir şekilde ve ideal kavrama kuvveti ile sürdürülmesi gerekmektedir. Bunun için, parmak ile nesne arasındaki temas durumları ele alınmaktadır. Yapısı sert olan nesnelere ve kavranacak nesnenin yapısının önceden bilindiği durumlarda, kararlı kavrama işlemi kolay olmaktadır, ancak yüzey yapısı deforme olabilen yumuşak cisimler, kavranacak nesnenin şeklinin, ağırlığının, modelinin bilinmediği durumlarda ve nesnenin yüzeyinin kaygan olması gibi durumlarda kararlı kavrama işlemi zorlaşmaktadır. Ayrıca, el içinde kavranan nesneye harici kuvvet uygulandığı zaman, nesnenin elden kayıp düşmesi ya da nesnenin el içindeki duruşunun bozulması gibi problemler ile karşılaşmaktadır. Bu türden problemler için kararlı kavrama koşulları incelenmelidir.

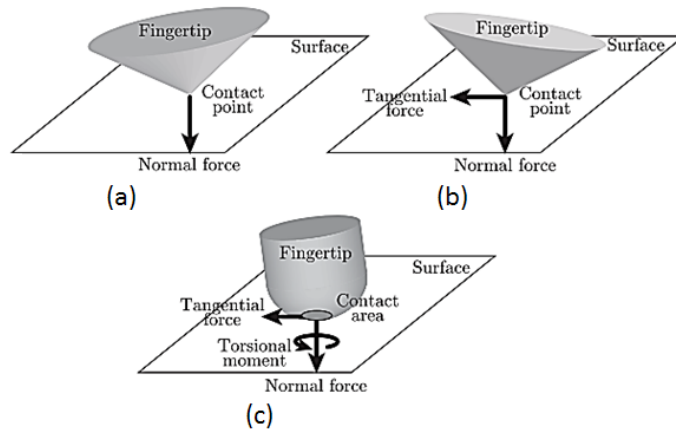
Robot eli ile nesne arasındaki kavramada en önemli şey, parmak-nesne ilişkisinin belirlenmesidir. Özellikle, parmak sayısının artması kavrama ilişkisini daha fazla karmaşıklaştırmaktadır. Bu ilişkinin belirlenebilmesi için sensör kullanımı ihtiyacı doğmaktadır. Sensör ile nesneye uygulanacak kuvveti tespit ederek cismin deforme olması ve yapısının bozulmasını önleme, cismin elden düşmesini önleme gibi fayda sağlamaktadır. Sensör verilerinin değerlendirilip parmakların konumunu ayarlaması için bir kontrolöre ihtiyaç duyulur. Farklı tipteki cisimlerin kontrolü

için sensör verilerini değerlendiren ve adaptif kavrama yapabilen kontrolör gerekli olmaktadır. Yapılan tez çalışmasında, akıllı çıkarım kontrol sistemi ve sensör yapısı kullanılarak parmak ile nesne arasındaki ilişki belirlenmiştir.

Kararlı kavrama koşulları konu başlığı altında; parmak ucu temas modelleri, form closure ve force closure alt başlıkları incelenecektir.

### 3.5.1 Parmak Ucu Temas Modelleri

Parmak ucu ile nesne arasındaki temas modelleri genellikle, üç açıdan ele alınmaktadır. Bunlar: sürtünmeli nokta temas modeli, sürtünmesiz nokta temas modeli ve yumuşak parmak temas modelidir. Sürtünmesiz nokta temas modelinde parmak, nesne yüzeyine dik bir şekilde kuvvet (normal force) uygulamaktadır. Sürtünmeli nokta temas modelinde ise parmak, nesne yüzeyine hem dik bir kuvvet uygulamaktadır hem de sürtünmeden dolayı nesne üzerinde bir teğetsel kuvvet (tangential force) oluşmaktadır. Yumuşak parmak temas modeli, sürtünmeli nokta temas modeli ile birbirine benzemektedir, sürtünmeli nokta temas modelinden farklı olarak cisim yüzeyinde dik bir burulma momenti (torsional moment) oluşmaktadır. Çünkü, parmak yapısı yumuşak olduğu için parmak ucu yapısından içe doğru deforme olması söz konusudur, bu yüzden nesne yüzeyinde dik kuvvet etrafında bir tork oluşturmaktadır. Şekil 3.7’de Parmak ucu temas modellerinin gösterimi yapılmıştır.



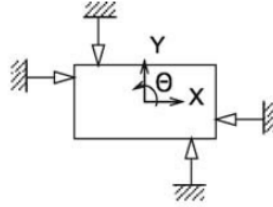
Şekil 3.7: Parmak ucu temas modelleri (Ozawa ve diğ. 2017)

a)Sürtünmesiz Nokta Temas Modeli, b)Sürtünmeli Nokta Temas Modeli, c)Yumuşak Parmak Temas Modeli.



### 3.5.2 Form Closure

Optimal kavrama için, parmaklar arasında yer alan nesnenin esnek bir şekilde durması ve nesne üzerinde uygulanan kuvvetlerin dengesinin sağlanması gereklidir. Bunu sağlamak için “closure” yapısı önerilmiştir. Form Closure, sürtünme olmaksızın nesnenin şekil ve yapısını baz alarak yapılan kavrama durumudur. Reuleaux, 2D nesneler için en az dört temas noktasına dayanarak Form Closure yapısı önermiştir. Lakshminarayana ise, 3D nesneler için en az yedi temas noktalı Form Closure belirleyerek kavranan cismin hareketinin kısıtlandığını öne sürmüştür (Ozawa ve diğ. 2017).



Şekil 3.8: 2D nesne için Form Closure yapısı.

Şekil 3.8’deki Form Closure yapısında, dört tane temas noktası ile cismin x ve y eksenlerinde hareket etmesi engellenmiştir. Ayrıca,  $\theta$  ekseninde dönme hareketi uygulansa bile hareket etmemektedir. Böylelikle, Form Closure harici kuvvetlere karşı kararlı nesne kavramasını sürdürmeye yardımcı olmaktadır.

### 3.5.3 Force Closure

Force Closure yapısı, robot parmağın nesnenin sürtünmeli temas noktalarını göz önünde bulundurarak nesneyi el içinde dengeli tutmasını sağlamaktadır. Force Closure, Form Closure’a göre daha geniş ölçekte kavrama aralığı sağlamaktadır. Force Closure ile az sayıda temas noktası ile kararlı kavrama sağlanabilmektedir. 3D nesneler için Form Closure durumunda, çok fazla temas noktası gerekmektedir. Bu yüzden, 3D nesneler için Force Closure yapısı, Form Closure’a göre daha çok kullanılmaktadır. Böylelikle, kararlı bir nesne kavraması için denge noktasının varlığını, Force Closure sunmaktadır. 2D bir nesne için Force Closure, Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



**Şekil 3.9:** 2D nesne için Force Closure yapısı.

### 3.5.4 İç Kuvvet

Kavrama işleminde el içinde hareketi kısıtlanan nesnenin üzerine harici bir bozulma kuvveti uygulanırsa, nesnenin el içinde kayarak düşmesi ve bu yüzden kavrama işleminin bozulması durumu görülebilir. Bu sorunu yaşamamak için, parmak ile nesne arasındaki kuvvet ilişkisinin, yani iç kuvvet yapısının dengeli bir şekilde ayarlanması gereklidir. İç kuvvet azalırsa nesne elden düşebilir; iç kuvvet artarsa hassas, kırılabilir nesne yapısını bozabilir. Bundan dolayı, yeterli miktarda az ve dengeli bir kuvvet ilişkisi gerekmektedir. Bu iç kuvvet ilişkisini belirleyebilmek için kuvvet veya basınç sensörü kullanımı önerilmektedir. Bu iç kuvvet dengesini sağlayabilmek için literatürde, çok çeşitli kontrolör yapıları sunulmuştur. Ancak, parmak ile nesne ilişkisi, non-lineer bir ilişki olabilmekte ve hesap karışıklığı yaratabilmektedir. Bu yüzden, akıllı kontrol sistemlerini kullanmak parmak ile nesne arasındaki ilişkiyi kolaylaştırabilmektedir.

## 4. BULANIK MANTIK

Bulanık Mantık (BM), Lütü Alasker Zadeh tarafından 1961 yılında önerilen bir matematiksel kuramdır. Adından da anlaşılacağı gibi bir “mantık” türüdür. Mantık basit bir ifade ile, gerçek hayattaki bir problemi çözebilmek amacıyla problemi belirli düşünce yöntemleriyle, sayılar dünyasına nasıl aktarılacağı hakkında bize yardım etmektedir. Günlük hayattaki bu problemleri çözmek için matematik ve mantık yöntemlerinden faydalanılır. BM, bu amaçlar için ve matematiksel olarak modellenemeyen problemleri çözmek için kullanılmaktadır. BM, diğer mantık türlerine göre “insan düşünce sistemine yakınlığı” bakımından ayrılmaktadır. Böylece, sezgisel yaklaşımların kolay ve kesin sonuçlar getirebileceği problemleri çözmek amacı ile de kullanılabilir. BM; yapay zekâ, kontrol, otomasyon ve robotik gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca, otomotiv sektöründe, fotoğraf makinelerinde, klimalar ve beyaz eşya ürünlerinde kontrol işlemleri BM ile yapılabilmektedir.

Bu kısımda, ilk olarak bulanık küme ile klasik küme kavramları tartışılmış ve bu iki küme arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. İkinci başlıkta, BM giriş ve çıkış ifadelerinin, ait olduğu kümeye olan aitliğini belirleyen üyelik derecelerinin belirlenmesi için gerekli olan bulanık üyelik fonksiyonları hakkında bilgiler verildi ve üyelik fonksiyonlarını oluşturmak için yararlanılan yöntemler karşılaştırıldı. Ayrıca, en çok yararlanan 5 tane üyelik fonksiyonundan ayrıntılı bir şekilde bahsedildi. Üçüncü kısımda, BM denetiminin kalbi olarak nitelendirilebilen, BM işlemlerinin yürütüldüğü merkezi yer olan bulanık çıkarım sistemi hakkında genel bir teorik bilgilere değinildi, BM işlem süreçleri anlatıldı. BM çıkarım metotları ve bu metotların birbirleri ile karşılaştırılması, yine bu kısımda ele alınmıştır. Son olarak, BM sistemlerinde elde edilen bulanık değerlerin gerçek hayatta kullanılması için gerekli olan keskin değerlere çevrilme işleminde kullanılan, literatürde en çok adı geçen durulaştırma yöntemlerine değinildi.

## 4.1 Bulanık Küme ve Klasik Küme Kavramı

Klasik kümeler, keskin bir sınıra sahiptir, Aristo Mantığı ile çalışmaktadır. Örnek olarak, 3'den büyük gerçek sayılardan oluşan  $A$  kümesi,  $A = \{x \mid x > 3\}$  olarak gösterilir. Eğer bir sayı 3'den büyükse,  $A$  kümesine aittir ve üyelik derecesi 1 olmaktadır. Ancak, sayı 3'den küçük ise,  $A$  kümesine ait değil ve üyelik derecesi 0 olmaktadır.

Klasik kümelerin aksine bulanık kümeler, keskin bir sınıra sahip değildir. Bir küme elemanının, kümeye olan aitliği üyelik fonksiyonları ile belirlenmektedir. Bu küme aitliği, 0 ile 1 arasında değişmekte ve üyelik fonksiyonlarına göre belirlenen üyelik dereceleri ile bulunur. Bulanık bir kümenin oluşması, uygun bir bilgi evreninin tanımlanmasına ve uygun bir üyelik fonksiyonunun belirlenmesine bağlıdır. Bu nedenle, Bulanık kümelerin öznellik ve rastgele olmaması, olasılık teorisi ile arasındaki temel farktır.

## 4.2 Üyelik Fonksiyonları

$x$ ,  $A$  kümesine ait bir eleman ve  $B$  kümesi de,  $x$ 'in  $A$  kümesine olan aitliğini gösteren bir küme olsun. Küme gösterimi,  $B = \{x, \mu_B(x) \mid x \in A\}$  şeklindedir, üyelik fonksiyonu gösterimi  $\mu_B(x)$  şeklinde olur. Bu üyelik fonksiyonu,  $x$  elemanının  $A$  kümesine ne kadar ait olup olmadığını gösteren üyelik derecesini belirler.

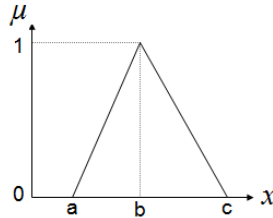
Üyelik fonksiyonlarını oluştururken dört farklı yöntemden faydalanılır: sezgisel yöntem, çıkarımsal yöntem, sıralama yöntemi ve optimizasyon yöntemleri. Sezgisel yöntem, sayısal verilerin yetersiz olduğu durumlarda veya modellenmesi zor durumlarda kullanılır. Örneğin; bir insanın boyunun kısa, orta ve uzun olmasını kişinin tecrübelerine dayanarak sezgisel yaklaşımla üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasıdır. Çıkarımsal yöntem, sezgisel yaklaşımdan ziyade daha gerçekçi bir şekilde oluşturulur. Örnek olarak, bir üçgenin iç açıları toplamının  $180^\circ$  olduğu dünya çapında kanıtlanmış bir bilgidir. Bu bilgiden dik, ikizkenar, eşkenar veya diğer üçgenlerin üyelik fonksiyonlarının oluşturulması. Sıralama yöntemi, gerçek dünyadan alınan verilerden

çıkan sonuçlardan çıkarım yaparak sıralamaya dayalı bir üyelik fonksiyonu oluşturur. İnsanların en çok sevdiği telefon markasının verilerinden; en çok tercih edilen telefon markasından en az tercih edilen telefon markasına kadar sıralamasından, üyelik fonksiyonlarının belirlenmesidir. Şimdiye kadar bahsedilen yöntemlerde, genellikle deneyimli kişilerin tecrübelerinden yararlanarak oluşturulur. Ancak, bazen deneyimli kişiler olmazsa, bu tür durumlarda optimizasyon yöntemlerine başvurulabilir. Bu yöntemler daha çok makine öğrenmesi ve yapay zekaya dayalı üyelik fonksiyonları oluşturmayı içerir.

Literatürde en çok kullanılan beş tane üyelik fonksiyonu mevcuttur. Bunlar: Üçgen, Yamuk, Gauss, Genelleştirilmiş Bell ve Sigmoidal üyelik fonksiyonlarıdır.

#### 4.2.1 Üçgen Üyelik Fonksiyonu

Üçgen üyelik fonksiyonunda üç tane parametre yer almaktadır. Şekil 4.1’de gösterimi yapılmıştır. Üçgen üyelik fonksiyonunun herhangi bir  $x$  değerine göre üyelik derecesi ( $\mu(x)$ ), denklem (4.1)’de belirtilen ifadelerle ifade edilir.

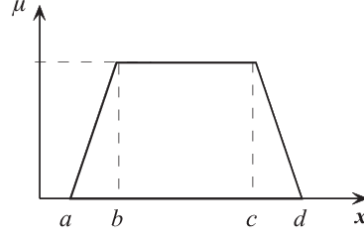


Şekil 4.1: Üçgen üyelik fonksiyonu.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{eğer } x \leq a \text{ ise} \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{eğer } a \leq x \leq b \text{ ise} \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{eğer } b \leq x \leq c \text{ ise} \\ 0, & \text{eğer } x \geq c \text{ ise} \end{cases} \quad (4.1)$$

### 4.2.2 Yamuk Üyelik Fonksiyonu

Yamuk üyelik fonksiyonunda, dört tane parametre bulunmaktadır. Yamuk üyelik fonksiyonunun herhangi bir  $x$  değerine göre üyelik derecesi ( $\mu(x)$ ), denklem (4.2)'de gösterilen ifadelerle ifade edilir.



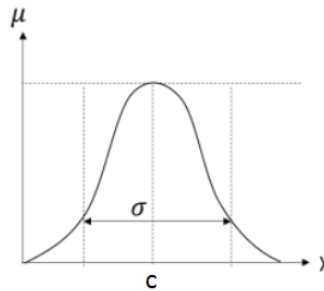
Şekil 4.2: Yamuk üyelik fonksiyonu.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{eğer } x \leq a \text{ ise} \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{eğer } a \leq x \leq b \text{ ise} \\ 1, & \text{eğer } b \leq x \leq c \text{ ise} \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{eğer } c \leq x \leq d \text{ ise} \\ 0, & \text{eğer } x \geq d \text{ ise} \end{cases} \quad (4.2)$$

### 4.2.3 Gauss Üyelik Fonksiyonu

Gauss üyelik fonksiyonunda iki tane parametre yer almaktadır. Gauss üyelik fonksiyonunun herhangi bir  $x$  değerine göre üyelik derecesi ( $\mu(x)$ ), (4.3)'te yer alan denkleme göre bulunur ( $c$ : üyelik fonksiyonunun merkezi,  $\sigma$ : üyelik fonksiyonunun genişliği).

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right] \quad (4.3)$$

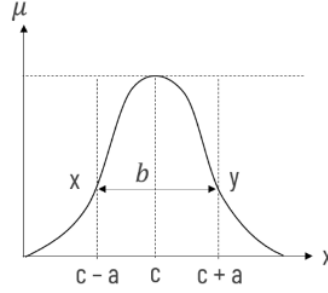


Şekil 4.3: Gauss üyelik fonksiyonu.

#### 4.2.4 Genelleştirilmiş Bell Üyelik Fonksiyonu

Genelleştirilmiş Bell üyelik fonksiyonunda, üç tane parametre vardır. Genelleştirilmiş Bell üyelik fonksiyonunun herhangi bir  $x$  değerine göre üyelik derecesi ( $\mu(x)$ ), (4.4) denkleminde bulunur ( $b$ : genellikle pozitif değer olmaktadır).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \quad (4.4)$$

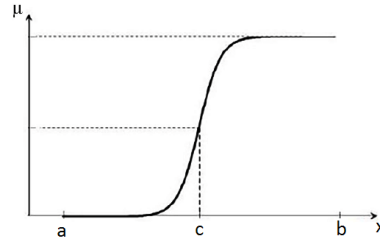


Şekil 4.4: Genelleştirilmiş Bell üyelik fonksiyonu.

#### 4.2.5 Sigmoidal Üyelik Fonksiyonu

Sigmoidal üyelik fonksiyonunda, iki tane parametre vardır. Sigmoidal üyelik fonksiyonunun herhangi bir  $x$  değerine göre üyelik derecesi ( $\mu(x)$ ), (4.5) denkleminde bulunur ( $\alpha$ :  $c$  noktasındaki eğim,  $c$ : geçiş noktası). Sigmoidal üyelik fonksiyonu, yapay sinir ağlarının aktivasyon fonksiyonu olarak yaygın kullanıma sahiptir.

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp[-\alpha(x - c)]} \quad (4.5)$$

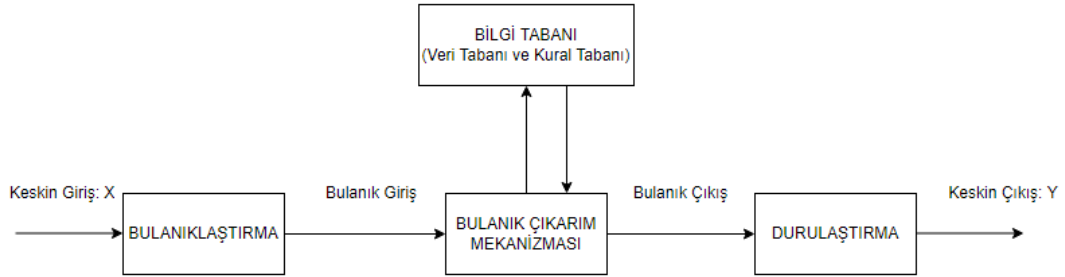


Şekil 4.5: Sigmoidal üyelik fonksiyonu.

### 4.3 Bulanık Çıkarım Sistemi

Bulanık sistemler, bulanık kümeler ve üyelik dereceleri ile oluşturulan kontrol sistemleridir. Her ne kadar yapay zeka ile alakalı olsa da, yapay zekanın bir alt dalı olan makine öğrenmesinden ayrılmaktadır. Makine öğrenmesinde eldeki verilerden makinenin anlamlı sonuçlar elde edip kendisinin bu sonuçlarla çalışması amaçlanmaktadır. Ancak, BM de bu amaçtan ziyade öğrenimi sağlamış makinenin kontrolünü sağlamakta kullanılmaktadır. Yani, BM ile elimizdeki verilerden bir kontrol mekanizması sağlanır.

BM denetiminin kalbi, bulanık çıkarım kısmıdır. Burada, bilgi tabanı ve karar verme mantığı kullanılmaktadır. Bilgi tabanı, veri tabanı ve kural tabanından oluşmaktadır. Veri tabanı: Bulanık kümeler kullanarak giriş ve çıkış değişkenlerinin tanımlanmasını içermektedir. Kural tabanı: Bulanık şart cümlelerini içermektedir. Yani, bulanık kümelerin birbirleri ile olan ilişkileri inceleyen çıkarım yapılacak kuralları içerir. Örnek olarak, EĞER  $a=x$  ve  $b=y$  ise O HALDE  $c=z$ 'dir verilebilir.



Şekil 4.6: Bulanık Mantık işlem süreçleri.

Şekil 4.6'da BM'de yapılan işlemler, blok halinde gösterilmiştir. Burada yapılan her bir adımın detaylı açıklaması, aşağıda yapılmıştır:

**Bulanıklaştırma:** Sisteme giren keskin değerleri (0 veya 1), bulanıklaştırma işlemi yaparak bulanık değerlere dönüştürme işlemi yapılır.

**Bulanık Çıkarım Mekanizması:** Bu kısımda, bilgi tabanına bağlı olarak bulanık değerlerden bir sonuç elde edilir.



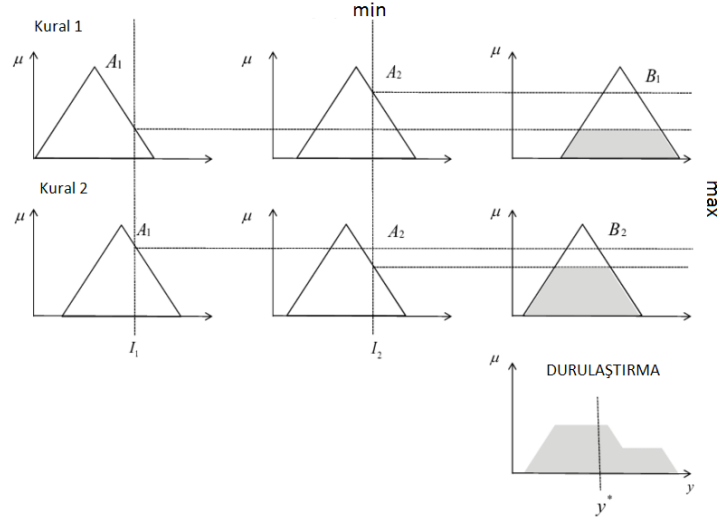
**Bilgi Tabanı:** Veri tabanı ve kural tabanı içerir. Bulanık kümeler arasındaki ilişkiler tayin edilir. Bir nevi, BM sisteminin anayasası olarak düşünülebilir.

**Durulaştırma:** Durulaştırma işlemine kadar elde edilen değerler, bulanık değerlerdir. Bu bulanık değerleri, gerçek dünyada kullanabilmek amacıyla keskin değer elde edilme işlemi bu kısımda yapılır.

BM'de birden çok çıkarım metodu vardır. Bu metotların hepsi oluşturulmuş olan kurallara göre bilgiler çıkarmaktadır. Verimlilik, çıkarım süresi uzunluğu gibi bazı kriterlerden dolayı birbirinden ayrılabilir. Literatürde; Mamdani, Sugeno, Tsukamoto ve Larsen çıkarım metotları vardır. Bunlardan, Mamdani ve Sugeno çıkarım metotları literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

#### **4.3.1 Mamdani Çıkarım Metodu**

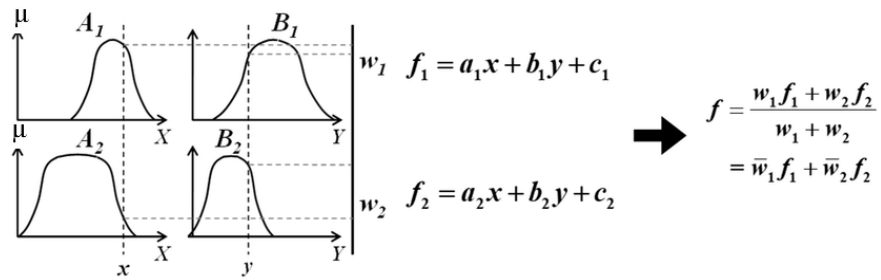
Literatürde en çok kullanılan bir bulanık çıkarım yöntemidir. Özellikle, insan düşünce yapısına yakın olması, yorumlanabilirliğinin fazla olması ve tasarımının kolay olması bu metodu özel kılmaktadır. 1975 yılında matematikçi ve bilgisayar bilimcisi İbrahim Mamdani tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde giriş değerlerinin, bulanık üyelik fonksiyonlarına ve bulanık kurallara göre hesaplanması yapılır. Sonra, max-min (ve-veya) operatörü yardımıyla bir sonuç çıkarımı yapılır ve elde edilen sonuç bulanıktır. Bu bulanık sonuca, durulaştırma yöntemlerinden biri uygulanarak keskin bir değer elde edilmektedir. Mamdani çıkarım metodundaki max-min operatörü yerine max-product (ve-çarpım) operatörü kullanılırsa, Larsen çıkarım yöntemi uygulanmış olmaktadır.



Şekil 4.7: Mamdani çıkarım metodu.

### 4.3.2 Sugeno Çıkarım Metodu

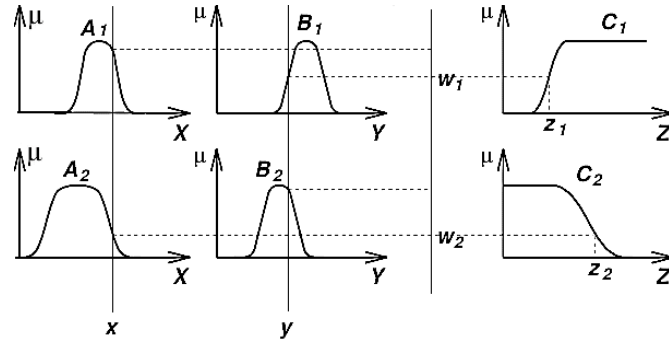
Sugeno çıkarım yöntemi, kontrol uygulamalarında fazla kullanıma sahiptir. Mamdani çıkarım yönteminde, çıkış değerleri bulanık değer olmaktadır. Sugeno çıkarım yönteminde ise, çıkış değerleri sıfıncı dereceden polinom, yani sabit bir değer olmakta veya bir/birden fazla dereceden polinom şeklinde olmaktadır. Bu çıkış değeri, ağırlıklı ortalama yöntemi ile edilmektedir. Bu yüzden, hızlı sonuç elde etme hedeflenen problemlerde ve kontrol uygulamalarında tercih edilmektedir.



Şekil 4.8: Sugeno çıkarım metodu.

### 4.3.3 Tsukamoto Çıkarım Metodu

Mamdani ve Sugeno çıkarım metodlarında bulunan çıkış değer elde etme işlemleri, bu çıkarım metodunda yoktur. Çıkışta direkt olarak, keskin bir değer elde edilmektedir. Bu keskin değerler, monoton artan veya azalan üyelik fonksiyonları ile hesaplanmaktadır. Durulaştırma işleminin istenmediği durumlarda, Tsukamoto çıkarım yöntemi tercih edilebilmektedir.



Şekil 4.9: Tsukamoto çıkarım metodu.

## 4.4 Durulaştırma

Bulanık sistemde yer alan bulanık çıkarım mekanizmasından çıkan değer, bulanık değerdir. Bu değerın istenilen ölçekte, keskin bir değer şeklinde olması gerekmektedir. Bulanık değeri istenilen ölçekteki değere, keskin değere çevrilmesi işlemine durulaştırma denir. Literatürde, çok farklı durulaştırma yöntemi yer almaktadır. Bu durulaştırma yöntemlerinden en çok kullanılanlara değinilecektir.

### 4.4.1 Alan Merkezi Yöntemi

Bulanık çıkış kümeleri üzerinde kesilen alanlarda, en büyük üyelik değerlerini veren çıkış değerleri için aşağıda yer alan (4.6)'daki formül uygulanır. Ortaya çıkan değerlere, alan merkezi denir. Bu yöntem, ağırlıklı ortalamaya benzerdir, fakat alan hesaplamaya gerek kalmaz.

$$y_{durulastirma} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(y_i) y_i}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \quad (4.6)$$

#### 4.4.2 En Büyüklerin Ortalaması Yöntemi

En büyük üyelik değerlerini veren çıkış değerlerinin ortalaması hesaplanır. Maksimumları veren değerler,  $z_1$  ve  $z_2$  olsun. Denklem (4.7)'ye göre, en büyüklerin ortalaması bulunur.

$$z = \frac{z_1 + z_2}{2} \quad (4.7)$$

#### 4.4.3 En Büyüklerin En Küçüğü ve En Büyüğü

Bu yöntemde, en büyük üyelik değerlerini veren çıkış değerleri içinde, en büyüklerin en küçüğü ve en büyüğü seçilir. Doğrudan değer seçimi yapıldığı için, matematik işlemine ihtiyaç duymaz.

#### 4.4.4 Ağırlık Merkezi

Tetiklenen kurallara göre çıkarım yapılan üyelik değerlerinin bulanık çıkış kümeleri üzerinde kestiği alanlar toplanır, daha sonra bu alanların geometrik olarak ağırlık merkezi bulunur ve ağırlık merkezine göre keskin değer elde edilir.

$$y_{merkez} = \frac{\int \mu(y_i) y dy}{\int \mu(y) dy} \quad (4.8)$$

#### 4.4.5 Ağırlıklı Ortalama

Her bir kuraldan alınan üyelik değeri, bu değerın çıkış kümesi üzerinde kestiği alanla çarpılır, daha sonra çarpımlar toplanır ve tüm kurallardan gelen üyelik değeriinin toplamına bölünür. Böylelikle, ağırlıklı ortalama elde edilmiş olur.

$$y_{durulastirma} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(y_i) y_{alan}}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \quad (4.9)$$

## 5. YÖNTEM

Robotik alanında yeni gelişme gösteren çalışma alanlarından biri, çok parmaklı robotik eller ile parmakların birbiri ile koordineli çalışarak kusursuza yakın kavrama yapılması işlemidir. Son yıllarda bu alanda her ne kadar gelişmeler olduysa da, henüz tatmin edici bir şekilde kavrama işlemi gerçekleştirme oranı yeteri seviyede değildir. Çünkü, farklı yapılardaki, şekillerdeki ve ağırlıktaki nesnelerin, ön bilgi olmaksızın kontrolör tarafından adaptif olarak kavrama işlemi gereklidir. Günümüzde, evlerde, fabrikalarda, kısaca hayatımızın her alanında adaptif bir şekilde nesne kavramalarına ihtiyaç duyulduğu görülmekte olup günümüze nazaran gelecekte daha fazla ihtiyaç görüleceği tahmin edilebilmektedir. Özellikle, tıp alanında hastaları uzaktan muayene etme veya ameliyat etme gibi operasyonlarda, robotik ellerin kullanımı artacaktır. Bu robotik ellerin, hassas bir şekilde operasyonları yürütmesi gereklidir. Bu yüzden, hassas ve kararlı kavramalar konusu çok önemlidir. Bu yapılan tez çalışması ile bu türden problemlerin üstesinden gelinmeye çalışıldı.

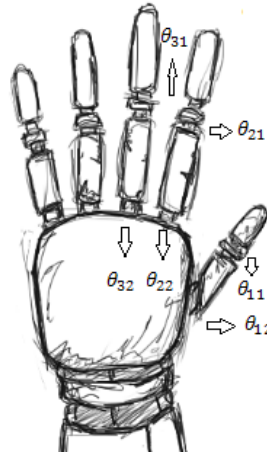
Hassas ve kararlı kavrama işlemleri için hem parmakların koordineli bir şekilde çalışması hem de akıllı çıkarım yöntemine sahip ve güvenli bir kontrolör yapısı gereklidir. Literatür taramalarına göre, hassas ve güvenli kavrama işlemleri ile ilgi kaynak eksikliği göze çarpmaktadır. Ayrıca, robot parmaklarının çok olması ve bu parmakların yaptığı hareketlerde çok karmaşık kinematik ve dinamik modele sahip olması, kontrol işlemini zorlaştırmaktadır. Bu karmaşık parametrelerin üstesinden gelmenin kolay yolu, akıllı çıkarım kontrol sistemlerinden birini kullanmaktır. Yapay zeka, makine öğrenmesi gibi akıllı çıkarım yapıları kontrol işlemlerinde oldukça popüler hale gelmektedir. Bu yapılar her ne kadar kararlı, hassas ve güvenli bir kontrol işlemleri gerçekleştirirse de; farklı yapılardaki nesnelerin kontrolü işlemlerinde, fazla kontrol parametresi içermesinden ve makinenin yaptığı işlemleri öğrenmesinden dolayı yavaş çalışabilmektedir. Benzer şekilde geleneksel kontrol yapılarından olan P, PI, PD, PID'ler de parametre fazlalığı ve karmaşıklığı sebebiyle yavaş çalışabilmektedir. Bu karmaşık yapılardan ziyade daha basit bir kontrol yapısı sunan ve güvenli kavrama işlemi gerçekleştirmesi nedeniyle, insan düşünme sistemine yakın bir çıkarım yöntemi olan BM kullanılabilir.

Ayrıca, literatürde BM alanının, kontrol yapılarında pek tercih edilmediği görüldü. Bu tez çalışmasıyla kolay, hassas, koordinasyonlu ve güvenli kavrama alanında ve BM alanında tezahür eden literatürdeki kaynak eksikliğini azaltmak ve bu alanlarla ilgili yeni yapılacak çalışmalara örnek olan önemli bir kaynak olunması amaçlanmaktadır.

## 5.1 Robotik El Kontrol Sistemi

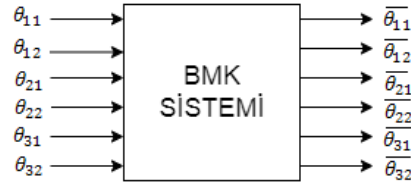
Tez çalışmasında, robotik elin parmaklarının, kavrama operasyonu için hareketini sağlayan kontrolcü olan BMK yapısı giriş ve çıkış tanımlamalarına ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada, kavrama hareketleri için yeterli olması sebebiyle ve basınç sensörlerinin maliyetinin pahalı olması nedeniyle, 3 parmakta toplam 6 eklem hareket yapısı üzerinde durulmuştur. Bu kısımda, robotik el parmaklarının hareketini sağlayan dönme eklem açıları tanımlanması ve BMK hakkında teorik bilgiler verilecektir.

Hareket kontrolü yapılacak parmak dönme eklem açıları sırasıyla: Başparmak için  $\theta_{11}$ ,  $\theta_{12}$ ; işaret parmağı için  $\theta_{21}$ ,  $\theta_{22}$ ; orta parmak için  $\theta_{31}$ ,  $\theta_{32}$  olarak tanımlansın. Her bir adımda yapılan hareket sonucu elde edilen parmak dönme eklem açıları ise sırasıyla: Başparmak için  $\overline{\theta}_{11}$ ,  $\overline{\theta}_{12}$ ; işaret parmağı için  $\overline{\theta}_{21}$ ,  $\overline{\theta}_{22}$ ; orta parmak için  $\overline{\theta}_{31}$ ,  $\overline{\theta}_{32}$  olarak tanımlansın. Bu eklem açılarının başlangıç durumunda 180 derecede olduğu ve parmakların dik konumda bulunduğu varsayılır. Şekil 5.1'de robotik el üzerinde dönme eklemlerinin bulunduğu yerler belirtilmiştir.



Şekil 5.1: Robotik el dönme eklemleri  
(<https://paintingvalley.com/robot-hand-drawing>).

Tasarımı yapılan kontrolcü, BMK yapısında tanımlanan giriş ve çıkış üyelik dereceleri, fonksiyonları ile robot parmağındaki eklemlerin kaç derece hareket ettirileceğini kontrolünü sağlar. BMK giriş üyelik fonksiyonları, basınç sensöründen gelen veriler yardımıyla parmaklardaki eklem açılarının kontrolünü sağlamaktadır. BMK çıkış üyelik fonksiyonları ise, BMK’da oluşturulan kurallar yardımı ile çıkarım yaparak kullanılacak parmakların eklem açılarının hareketlerinin kontrolünü ayarlar.



Şekil 5.2: BMK sistemi.

Şekil 5.2’deki blok yapısına göre, BMK parmağın eklem açılarını önceki durumuna göre kaç derece hareket ettirileceğini karar vermektedir. Bu eklem açıları, 180 dereceden 0 dereceye doğru olur, böylelikle parmakların kapanması sağlanır. Bu kapanmalar, her iterasyonda bir önceki eklem açısına göre beş derece azaltma veya on derece azaltma şeklinde olmaktadır. Kavranacak nesneye göre, ideal eklem açıları sağlanana kadar bu işlemler tekrarlanır ve ideal noktalarda eklem açıları, sabit eklem açısında kalması sağlanır.

## 5.2 Görüntü İşleme ile Nesne Tespiti

Robot eli ile nesne kavraması operasyonu yapılması için ilk adım olarak hangi nesnenin kavranacağıın bilinmesi gereklidir. Çünkü, her bir nesne; farklı Bulanık Mantık üyelik dereceleri, üyelik fonksiyonları ve bulanık kurallara sahiptir. Bu duruma, cisimlerin şekil ve yapısındaki farklılıklar sebep olmaktadır. Bu yüzden, kavraması yapılacak olan nesnelerin, bilgisayar tarafından tanınması gerekmektedir. Bu sorunu çözmek için, tez çalışmasında görüntü işleme kullanılmasına karar verilmiştir. Yapılan görüntü işleme ile nesne tespiti işlemi, MATLAB adlı program ile yapılmıştır. Tablo 5.1’de, görüntü işleme algoritması gösterilmiştir.



**Tablo 5.1:** Görüntü işleme ile nesne tespiti algoritması

---

**ALGORİTMA : Görüntü işleme ile nesne şekil tespiti**

---

- 1: Kamera çalıştırılır.
  - 2: Anlık video görüntüsü yakalanır ve resim elde edilir.
  - 3: Elde edilen renkli resim, gri tonlu resime çevrilir.
  - 4: Griye çevrilen resmin parlaklık eşiği ayarlanır ve resim siyah-beyaz bir hale getirilir.
  - 5: Resimde daha temiz bir görüntü elde etmek için morfolojik işlemler yapılır.
  - 6: Yapısal element yardımıyla resimde iç kısımda boşluklar kaybolur ve resimdeki çukur bölgeler doldurulur.
  - 7: Resimdeki yer alan nesne veya nesnelerin sınırları çizdirilir.
  - 8: Bir metric algoritması oluşturulur ve nesne tespiti yapılır.
-

## 6. UYGULAMA VE BULGULAR

### 6.1 Tez Çalışmasında Kullanılan Aksamlar

Yapılan bu tez çalışmasında, üç boyutlu yazıcıdan üretilmiş olan beş parmağa sahip robotik elin mekaniki olarak montajı yapıldı ve parmakların eklemlerle bağlantısı yapıldı. Bu parmakların hareketini sağlayan servo motorların, parmak eklem bölgelerine bağlantısı yapıldı ve yerleştirildi. Şekil 6.1’de, tez çalışmasında kullanılan robotik elin gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.1: Tez çalışmasında kullanılan robotik el.

İki serbest dereceliğe sahip bir parmağın hareketini, iki eklem bölgesinde yer alan iki servo motor sağlamaktadır. 10 tane servo motor, iki eklemlili parmakların hareketini sağlarken, ayrıca başparmağın bilek etrafında dönmesini sağlayan bir tane daha servo motor bağlantısı ve montajı yapıldı. Tez çalışmasında kullanılan ve robotik ele monte edilen motorlar, TOWER PRO Mini RC SG90 Servo Motorlardır. Bu motorlar ile robot parmaklarının, 180° eklem dönme hareketi sağlanmıştır. Motor ile ilgili teknik özellikler aşağıda yer alan Tablo 6.1’de verilmiştir. Şekil 6.2’de tez çalışmasında kullanılan servo motorun resmi yer almaktadır.

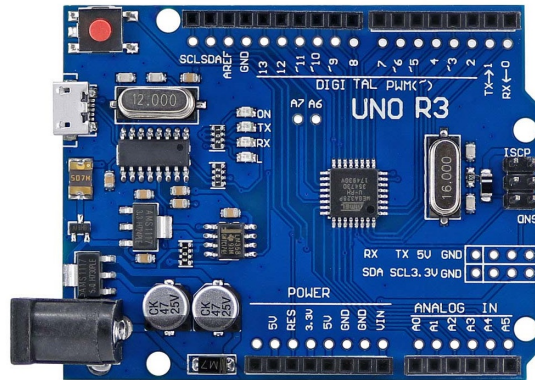
**Tablo 6.1:** SG 90 Servo Motor teknik özellikleri.

Boyutları:	23.1x12.2x29mm
Ağırlık:	9 gram
Çalışma Gerilimi:	4.8-6V DC
Hız(4.8V'da iken):	0.1 sn/60°
Zorlanma Torku(6V iken):	1.8 kg.cm
Dişli Kutusu:	Plastik
Dönüş Açısı:	180°
Çalışma PWM Sinyali:	500-2400 µs
Kablo Uzunluğu:	15 cm



**Şekil 6.2:** SG 90 Mini Servo Motor.

Çalışmada kullanılan servo motorların, kontrollü bir şekilde hareketini sağlamak için Arduino Uno adlı mikrodenetleyici kullanıldı. Böylece, parmakların hareket kontrolü Arduino ile sağlanmıştır. Tablo 6.2'de Arduino Uno'nun teknik özellikleri ve Şekil 6.3'te resmi gösterilmiştir.



**Şekil 6.3:** Arduino Uno.

**Tablo 6.2:** Arduino Uno teknik özellikleri.

Mikrodenetçi:	ATmega328P
Çalışma voltajı:	5V
Giriş voltajı (önerilen):	7-12V
Giriş voltajı (limit değerler):	6-20V
Dijital I / O Pinleri	14
PWM Dijital I/O Pinleri:	6
Analog Giriş Pinleri:	6
I/O Pin Başına DC akım:	20 mA
3.3V Pin DC akımı:	50 mA
Flash Bellek	32 KB (ATmega328P)
SRAM:	2 KB (ATmega328P)
EEPROM:	1 KB (ATmega328P)
Saat Hızı:	16 MHz
Uzunluk:	68.6 mm
Genişlik:	53.4 mm
Ağırlık:	25 g

Robotik eldeki parmakların hareketini sağlayan servo motorları sürmek için PCA9685 adlı PWM sürücü kartı kullanılmıştır. Çünkü; Arduino ile bir tane servo motoru sürbilmek için Arduino'dan 200mA akım çekilmektedir. Bu yüzden, Arduino'dan 2 veya en fazla 3 tane servo motor sürülebilecek kadar akım desteği sağlanabilmektedir. Böylece, robotik eldeki 11 tane servo motoru çalıştırabilmek için Şekil 6.4'te gösterimi yapılan, servo sürücü kartı kullanılmıştır.

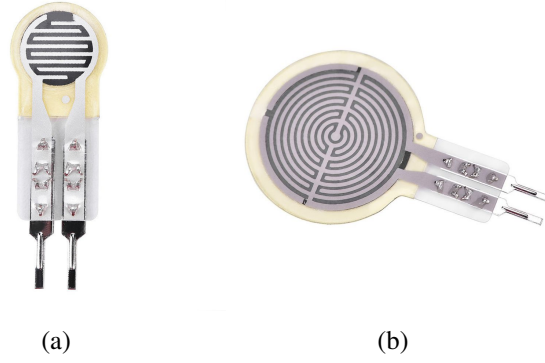


**Şekil 6.4:** PCA9685 PWM/Servo sürücü kartı.

Robotik el ile nesne kavraması yaparken parmakların, kavranacak nesneye göre ayarlanması gerekmektedir. Bu ayarlama için, nesne ile parmak arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi gerekmektedir. Parmak ile nesne arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için bu tez kapsamında, sensör kullanılması öngörülmüştür. Parmağın nesneyi ne kadar sıkacağına belirleyebilmek için ise, parmağın nesneye uyguladığı kuvvet hesabı gerekmektedir. Deney çalışmasında, bu kuvvet hesabını tayin edebilmek amacı ile basınç sensörü kullanılmasına karar verildi. Basınç sensörünün maliyet olarak, kuvvet sensöründen daha ucuz olması ve parmak ayarlaması için gereken bilgiyi sağlama konusunda yeterli olmasından dolayı, kuvvet sensörü kullanımından ziyade basınç sensörü kullanımı tercih edilmiştir.

Basınç sensörlerinin, üzerine düşen basınçla orantılı olarak fiziki yapılarında bir değişim meydana gelir. Bu değişimler neticesinde basınç sensörleri, oluşan basınç değişim seviyesini elektriksel işarete dönüştürürler. Tez kapsamında, üç tane parmağın hareketini sağlamak için üç tane basınç sensörü kullanımı önerilmiştir ve kullanılan sensörler, Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Başparmakta kullanılan basınç sensörünün çapı, diğer iki parmakta kullanılan aynı büyüklükteki sensörlere göre daha büyüktür. Tüm sensörler, çalışma prensibi bakımından aynıdır. Sensörlerin üst katmanında, ince film ve basınca duyarlı katman yer almaktadır; sensörlerin alt katmanında ise ince film ve iletken devre vardır. Bu iki tabaka, çift taraflı olarak birbirine yapıştırılmıştır. Aktif alana dış basınç uygulandığında alt katmanın ayrık devresi, üst katmanın basınca duyarlı katından bağlanır ve böylece basıncı dayanıma dönüştürür. Basınç arttıkça, çıkış direnci düşmektedir. Ayrıca, basıncın (P), kuvvet (F) ile alan (S) arasındaki ilişki denklemi, (6.1)'de verilmiştir.

$$P = \frac{F}{S} \quad (6.1)$$



**Şekil 6.5:** Deneyde kullanılan basınç sensörleri  
a) 7.6mm çapında basınç sensörü, b) 18.3mm çapında basınç sensörü.

## 6.2 Robotik El Kontrol ve Kontrolcü Tasarımı

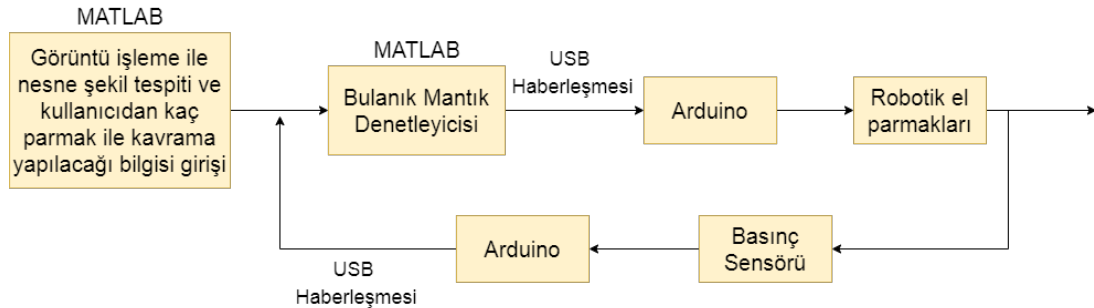
Çok parmaklı robotik ellerde, parmakların koordineli bir şekilde ayarlanması oldukça meşakkatli bir işlemdir. Kavranmış olan nesnenin elden kayıp düşmemesinin sürdürülmesi, kırılğan yapıya sahip nesnelerin çok fazla kuvvet uygulanması sonucu yapısının deforme olmaması gerekmektedir. Bu türden sorunlar için uygun bir kontrolör yapısı gereklidir. Genellikle, bu tip sorunlar için parmağın kinematik, dinamik özellikleri ve nesnenin dinamik özellikleri hesaba katılması gerekir. Bu durumda, kinematik analiz ve dinamik analiz problemlerinin çözülmesi gerekmektedir ve doğrusal olmayan problemler içerir. Bu yüzden, tasarlanan deney yapısında insan düşünce yapısına benzeyen ve doğrusal olmayan kontrol yapılarının üstesinden kolaylıkla gelen BMK yapısı uygulanmıştır. Basınç sensöründen gelen verilerden, parmakların nesneye uygun ve yeterli kuvvet uygulanması ile parmakların düzgün ve adaptif bir şekilde ayarlanarak nesneyi el içinde tutma işlemi gerçekleştirildi. Kullanıcıdan, kavrama işlemi için kaç tane parmağın kullanılacağı sorusuna cevap alınarak, kavrama işleminde 2 parmak mı yoksa 3 parmak mı kullanılacağı belirlendi. 2 parmak ile yapılan kavramada başparmak ve işaret parmağı, 3 parmak kavramada ise başparmak, işaret parmağı ve orta parmağın hareketi sağlandı.

Kavrama işleminde kullanılacak olan cismin kütlesi, ağırlığı ve kırılğan yapıda olup olmadığı gibi bir sürü bilinmezlikler içermektedir. Bundan dolayı, ilk kavrama hareketinin planlanması oldukça önem arz etmektedir. Deney sırasında kullanılacak olan cisimler ile ilgili verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Ayrıca, BMK için kavrama hareketinin kararlı ve düzgün bir şekilde sürdürülmesi gerekmektedir. Verilerden elde edilen çıkarımlar ile BMK sistemi oluşturuldu.

Deneyde, ilk olarak hangi cisimlerin kullanılacağı belirlendi ve kavrama tiplerinin nasıl olacağına karar verildi. Sistemde kullanılacak olan BMK tasarlamak amacıyla, önceden elde edilmiş basınç sensörlerinden gelen verilerin olması gerekmektedir. Bunun için, bilgisayar ortamında C# adlı programlama dili ile parmaklardaki servo motorlar hareket ettirilerek, kavramada kullanılacak olan cisimlerin ideal kavrama noktaları belirlendi ve bu ideal kavrama noktalarında elde edilen basınç sensörleri verileri alındı. Sonra, bu veriler insan düşünce tarzına göre sezgisel bir şekilde değerlendirildi ve az/orta/çok kuvvet olarak gruplara ayrıldı. Bu gruplama işlemi ile kuvvet mantığı sezgisel bir şekilde oluşturulmuş oldu. BM ile, gelen veriler değerlendirilip sezgisel çıkarımı yapıldıktan sonra, servo motorların, yani parmakların kavrama işleminde kaç derece hareket ettirileceği ayarlanmıştır.

Deney çalışmasında, 5 farklı cisim kullanıldı. Bu cisimler: top nesnesi, silindirik bir cisim, tahta kalemi, karton bardak ve köpük nesnesi olmuştur. 5 farklı cisim ile toplam 12 tane farklı kavrama tipi belirlendi. Bu cisimler ve kavrama tipleri ile elde edilen sensör verileri, BMK tarafından değerlendirilir ve kavrama hareketi planlanır. İlk kavrama hareketinin planlanması için kavrama görev seçimine ihtiyaç duyulur. Bu görev seçimi, MATLAB ortamında görüntü işleme ile kavranacak cisim tespit edilir ve kullanıcıdan kaç parmak ile kavrama yapılacağı bilgisi istenir. Bu işlemlerden sonra, kavrama hareketi planlanır ve kavrama işlemi başarılı bir şekilde sürdürülür. Sistemin kontrol blok diyagramı, Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6: Robotik el kontrol sistemi.

### 6.3 Tasarlanan Bulanık Mantık Sistemi

Deney için oluşturulan BM yapısı için, ilk olarak kavranan nesne için ideal kuvvet noktaları belirlendi ve bu noktalarda basınç sensöründen elde edilen veriler gözlemlendi. İki parmaklı kavramalar için başparmak ve işaret parmağı basınç sensörü verileri değerlendirilirken; üç parmak kavramaları için başparmak, işaret ve orta parmağın üçünden gelen basınç sensörü verileri dikkate alındı. Bu gözlemler neticesinde, BM için elimizdeki veriler az kuvvet, orta kuvvet ve çok kuvvet olarak gruplandırıldı ve üyelik fonksiyonları ve dereceleri atandı. Tüm nesnelerin yapısının farklı olmasından dolayı, her bir nesne için farklı basınç sensörü verisi mevcuttur. Bu yüzden, her bir nesne için ayrı bir BMK tasarlandı.

Giriş üyelik fonksiyonlarında, az ve orta kuvvet için üçgen üyelik fonksiyonu tercih edilirken; çok kuvvet için yamuk üyelik fonksiyonu tercih edildi. Çıkış üyelik fonksiyonlarında ise, üç tane üyelik fonksiyonu belirlendi. Bunlar, parmağın hareketini sağlayan servo motorların açısız olarak ne kadar döneceğini tayin eder. Sıfır (S), Negatif Küçük (NK) ve Negatif Büyük (NB) olmak üzere üç tane çıkış üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Bulanık çıkarım sistemi için ise, kontrol yapılarında çok tercih edilmesi ve Mamdani çıkarım sistemine göre daha hızlı karar vermesinden dolayı, Sugeno çıkarım sistemi kullanılması uygun görülmüştür.

#### 6.3.1 Top Nesnesi için Bulanık Mantık Yapısı

Top nesnesi için hem iki parmaklı hem de üç parmaklı kavrama planlaması yapılmıştır. Top nesnesi için basınç sensöründen elde edilen değerler, Tablo 6.3 ve 6.5'te verilmiştir. Şekil 6.7 ve 6.8'de, iki parmaklı top kavraması için giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11'de, üç parmaklı top kavraması için giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonları her parmak için, S:Sıfır ( $0^\circ$ ), NK:Negatif Küçük ( $-5^\circ$ ), NB:Negatif Büyük ( $-10^\circ$ ) olarak sabit açı değerleri tanımlanmıştır. Bu çıkış üyelik fonksiyonları ile robot parmaklarının hareket açı değerleri belirlenip parmağın açısız hareketi sağlanır. Ayrıca, bu kavrama planlaması için oluşturulan bulanık kurallar, Tablo 6.4 ve 6.6'da verilmiştir.

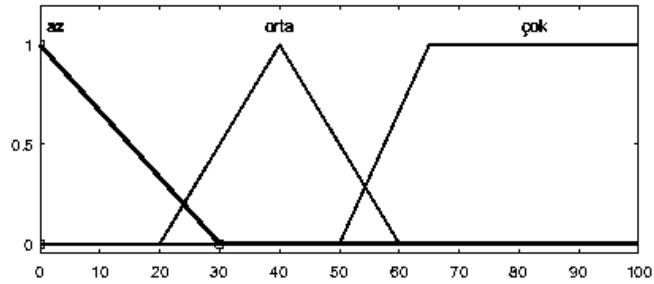


**Tablo 6.3:** İki parmaklı top kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler.

başparmak	işaret parmağı
20	80
17	100
70	60
40	70
20	91
26	85
32	68



**Şekil 6.7:** İki parmaklı top kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları.



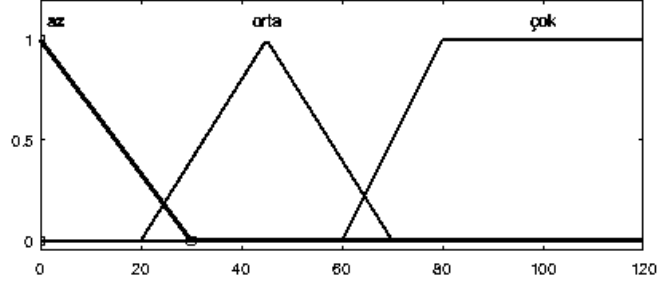
**Şekil 6.8:** İki parmaklı top kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları.

**Tablo 6.4:** İki parmaklı top kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları.

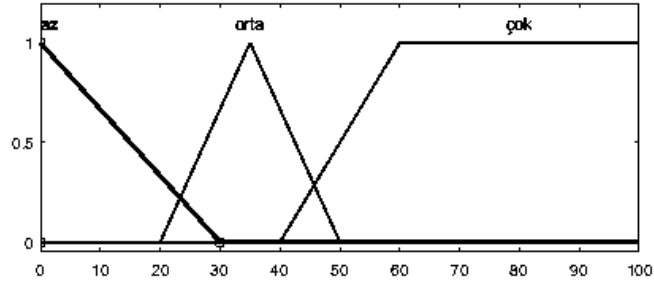
başparmak	işaret parmağı	başpamak servo	işaret servo
az	az	NB	NB
az	orta	NK	NK
az	çok	NK	S
orta	az	S	NK
orta	orta	S	S
orta	çok	S	S
çok	az	S	NK
çok	orta	S	S
çok	çok	S	S

**Tablo 6.5:** Üç parmaklı top kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler.

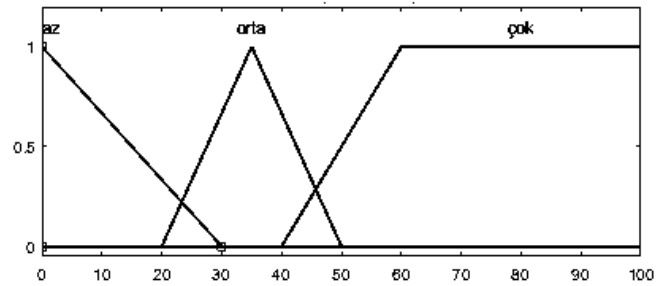
başparmak	işaret parmağı	orta parmak
148	56	59
140	26	27
117	29	28
45	47	60
51	29	28
54	30	20
153	20	21
58	24	31
115	23	29
118	40	16
65	0	51
59	0	50
65	32	0
48	26	19



**Şekil 6.9:** Üç parmaklı top kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları.



**Şekil 6.10:** Üç parmaklı top kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları.



**Şekil 6.11:** Üç parmaklı top kavraması için robotik el orta parmak giriş üyelik fonksiyonları.

**Tablo 6.6:** Üç parmaklı top kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları.

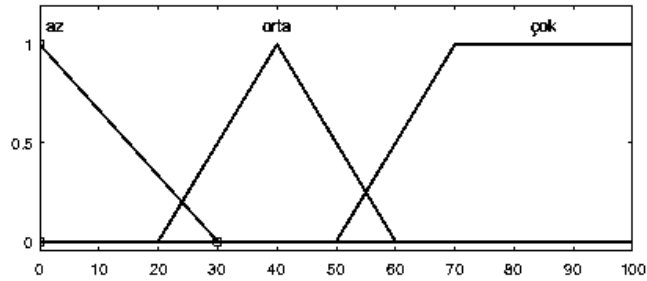
başparmak	işaret parmağı	orta parmak	başparmak servo	işaret servo	orta servo
az	az	az	NB	NB	NB
az	az	orta	-	NB	NK
az	az	çok	-	NB	S
az	orta	az	-	S	NB
az	orta	orta	-	NK	NK
az	orta	çok	-	NK	S
az	çok	az	-	S	NB
az	çok	orta	-	S	NK
az	çok	çok	-	S	S
orta	az	az	NK	NK	NK
orta	az	orta	-	NK	S
orta	az	çok	-	NK	S
orta	orta	az	-	S	NK
orta	orta	orta	-	S	S
orta	orta	çok	-	S	S
orta	çok	az	-	S	NK
orta	çok	orta	-	S	S
orta	çok	çok	-	S	S
çok	az	az	S	NK	NK
çok	az	orta	-	NK	S
çok	az	çok	-	S	S
çok	orta	az	-	S	S
çok	orta	orta	-	S	S
çok	orta	çok	-	S	S
çok	çok	az	-	S	S
çok	çok	orta	-	S	S
çok	çok	çok	-	S	S

### 6.3.2 Silindirik Cisim için Bulanık Mantık Yapısı

Silindirik bir cisim için üç parmaklı kavrama planlanması tasarlanmıştır. Bu cisim için basınç sensöründen elde edilen değerler, Tablo 6.7’de verilmiştir. Şekil 6.12, 6.13 ve 6.14’te, üç parmaklı top kavraması için giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonları her parmak için, S:Sıfır ( $0^\circ$ ), NK:Negatif Küçük ( $-5^\circ$ ), NB:Negatif Büyük ( $-10^\circ$ ) olarak her biri için sabit açı değerleri atanmıştır. Bu çıkış üyelik fonksiyonları ile robot parmaklarının hareket açı değerleri belirlenip parmağın açısız hareketi sağlanır. Ayrıca, bu kavrama planlaması için oluşturulan bulanık kurallar, Tablo 6.8’de verilmiştir.

**Tablo 6.7:** Üç parmaklı silindirik cisim kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler.

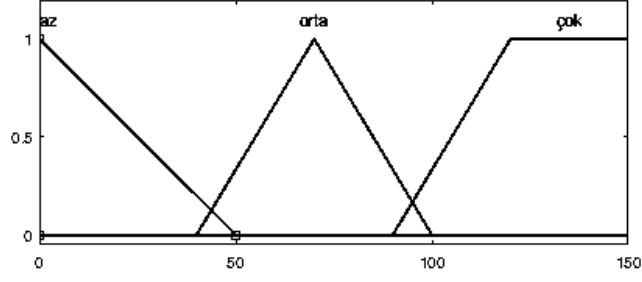
başparmak	işaret parmağı	orta parmak
24	155	0
26	136	0
50	156	0
28	159	36
32	159	37
107	55	98
108	55	93
67	128	9
80	129	21
83	110	105
85	111	105



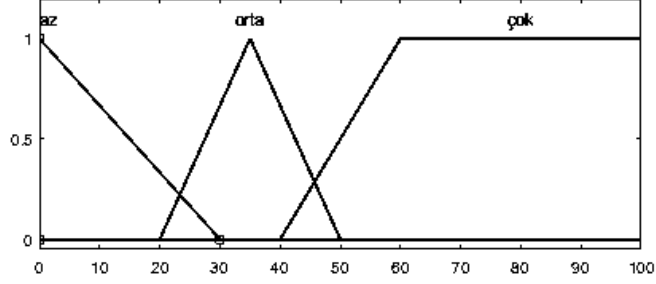
**Şekil 6.12:** Üç parmaklı silindirik cisim kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları.

**Tablo 6.8:** Üç parmaklı silindirik kavrama için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları.

başparmak	işaret parmağı	orta parmak	başparmak servo	işaret servo	orta servo
az	az	az	NB	NB	NB
az	az	orta	-	NB	NK
az	az	çok	-	NB	S
az	orta	az	-	NK	NB
az	orta	orta	-	NK	NK
az	orta	çok	-	NK	S
az	çok	az	-	S	NB
az	çok	orta	-	S	S
az	çok	çok	-	S	S
orta	az	az	S	NB	NB
orta	az	orta	-	NB	NK
orta	az	çok	-	NB	S
orta	orta	az	-	NK	NB
orta	orta	orta	-	NK	NK
orta	orta	çok	-	NK	S
orta	çok	az	-	S	NK
orta	çok	orta	-	S	S
orta	çok	çok	-	S	S
çok	az	az	S	NK	NK
çok	az	orta	-	NK	NK
çok	az	çok	-	NK	S
çok	orta	az	-	NK	NK
çok	orta	orta	-	S	S
çok	orta	çok	-	S	S
çok	çok	az	-	S	S
çok	çok	orta	-	S	S
çok	çok	çok	-	S	S



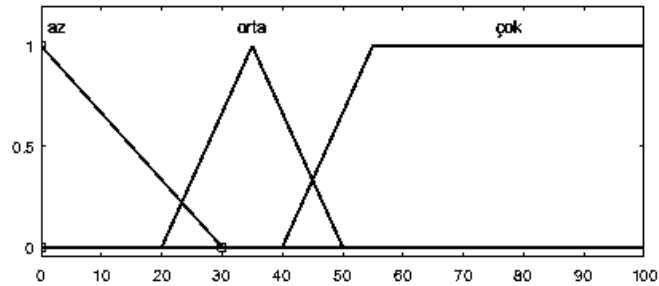
Şekil 6.13: Üç parmaklı silindirik cisim kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları.



Şekil 6.14: Üç parmaklı silindirik cisim kavraması için robotik el orta parmak giriş üyelik fonksiyonları.

### 6.3.3 Tahta Kalem için Bulanık Mantık Yapısı

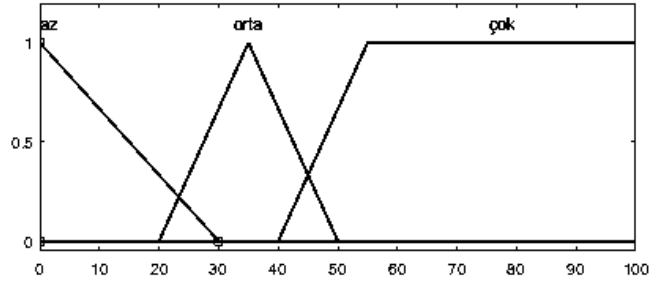
Tahta kalem için iki parmaklı kavrama planlanması tasarlanmıştır. Bu cisim için basınç sensöründen elde edilen değerler, Tablo 6.9'da verilmiştir. Şekil 6.15 ve 6.16'da, iki parmaklı tahta kalem kavraması için giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonları her parmak için, S:Sıfır ( $0^\circ$ ), NK:Negatif Küçük ( $-5^\circ$ ), NB:Negatif Büyük ( $-10^\circ$ ) olarak her biri için sabit açı değerleri atanmıştır. Bu çıkış üyelik fonksiyonları ile robot parmaklarının hareket açı değerleri belirlenip parmağın açısız hareketi sağlanır. Ayrıca, bu kavrama planlaması için oluşturulan bulanık kurallar, Tablo 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.15: İki parmaklı tahta kalem kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları.

**Tablo 6.9:** İki parmaklı tahta kalemi kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler.

başparmak	işaret parmağı
20	144
19	145
23	148
32	147
28	0
45	0
0	52
0	51



**Şekil 6.16:** İki parmaklı tahta kalemi kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları.

**Tablo 6.10:** İki parmaklı tahta kalemi kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları.

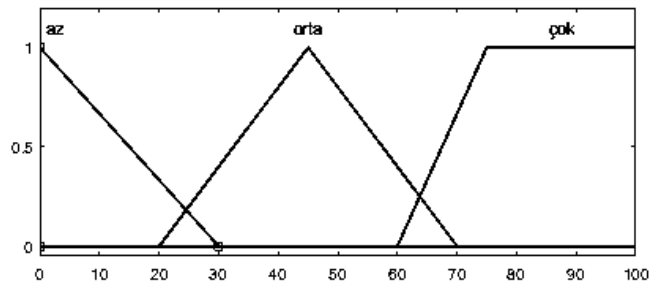
başparmak	işaret parmağı	başpamak servo	işaret servo
az	az	NB	NB
az	orta	NK	S
az	çok	S	S
orta	az	S	NK
orta	orta	S	S
orta	çok	S	S
çok	az	S	S
çok	orta	S	S
çok	çok	S	S

### 6.3.4 Karton Bardak için Bulanık Mantık Yapısı

Karton bardak için iki parmaklı kavrama planlanması tasarlanmıştır. Bu cisim için basınç sensöründen elde edilen değerler, Tablo 6.11’de verilmiştir. Şekil 6.17 ve 6.18’de, iki parmaklı karton bardak kavraması için giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonları her parmak için, S:Sıfır ( $0^\circ$ ), NK:Negatif Küçük ( $-5^\circ$ ), NB:Negatif Büyük ( $-10^\circ$ ) olarak her biri için sabit açı değerleri atanmıştır. Bu çıkış üyelik fonksiyonları ile robot parmaklarının hareket açı değerleri belirlenip parmağın açısız hareketi sağlanır. Ayrıca, bu kavrama planlaması için oluşturulan bulanık kurallar, Tablo 6.12’de verilmiştir.

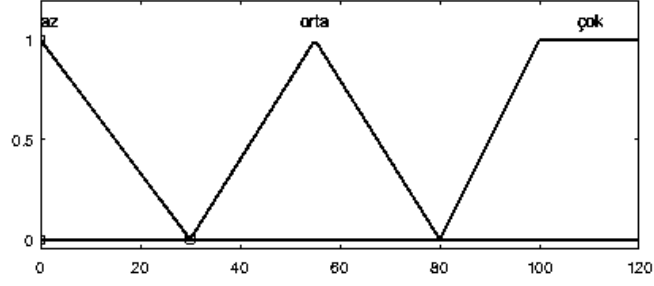
**Tablo 6.11:** İki parmaklı karton bardak kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler.

başparmak	işaret parmağı
20	38
23	37
21	41
31	106
32	108
49	48
49	49
19	179
24	97
26	118
22	81
22	92



**Şekil 6.17:** İki parmaklı karton bardak kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları.





**Şekil 6.18:** İki parmaklı karton bardak kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları.

**Tablo 6.12:** İki parmaklı karton bardak kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları.

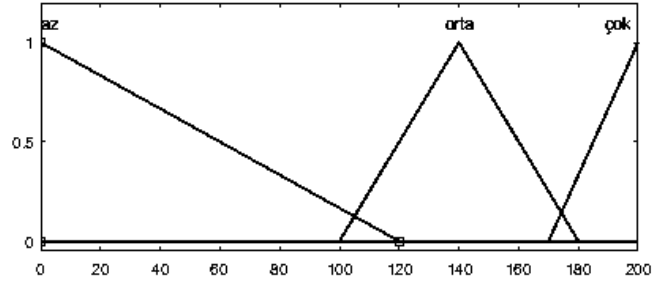
başparmak	işaret parmağı	başpamak servo	işaret servo
az	az	NB	NB
az	orta	NB	NK
az	çok	S	S
orta	az	S	NB
orta	orta	S	NK
orta	çok	S	S
çok	az	S	NK
çok	orta	S	S
çok	çok	S	S

### 6.3.5 Köpük Nesnesi için Bulanık Mantık Yapısı

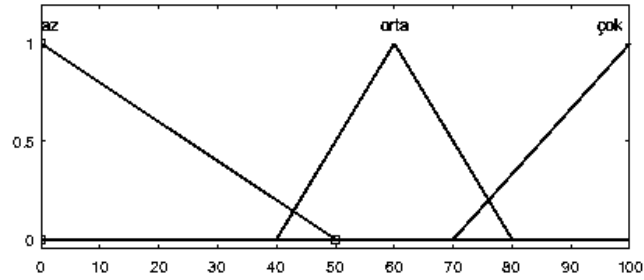
Köpük nesnesi için üç parmaklı kavrama planlanması tasarlanmıştır. Bu cisim için basınç sensöründen elde edilen değerler, Tablo 6.13'te verilmiştir. Şekil 6.19, 6.20 ve 6.21'de, üç parmaklı köpük nesnesi kavraması için giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonları her parmak için, S:Sıfır ( $0^\circ$ ), NK:Negatif Küçük ( $-5^\circ$ ), NB:Negatif Büyük ( $-10^\circ$ ) olarak her biri için sabit açı değerleri atanmıştır. Bu çıkış üyelik fonksiyonları ile robot parmaklarının hareket açı değerleri belirlenip parmağın açılma hareketi sağlanır. Ayrıca, bu kavrama planlaması için oluşturulan bulanık kurallar, Tablo 6.14'te verilmiştir.

**Tablo 6.13:** Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması planlamak için basınç sensörlerinden alınan ilk değerler.

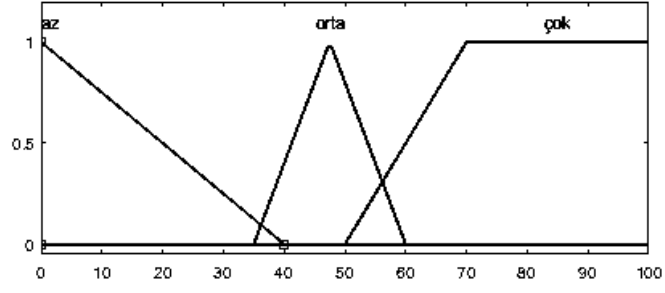
başparmak	işaret parmağı	orta parmak
185	22	53
187	24	49
220	118	90
123	38	25
134	38	25
143	74	60
130	46	15
185	25	65
203	51	36
223	46	80
90	25	46
114	48	128
101	35	59
140	22	18
155	13	53
144	27	27
176	57	74



**Şekil 6.19:** Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması için robotik el başparmak giriş üyelik fonksiyonları.



**Şekil 6.20:** Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması için robotik el işaret parmağı giriş üyelik fonksiyonları.



Şekil 6.21: Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması için robotik el orta parmak giriş üyelik fonksiyonları.

Tablo 6.14: Üç parmaklı köpük nesnesi kavraması için oluşturulmuş olan Bulanık Mantık kuralları.

başparmak	işaret parmağı	orta parmak	başparmak servo	işaret servo	orta servo
az	az	az	NB	NB	NB
az	az	orta	-	NB	NK
az	az	çok	-	NB	S
az	orta	az	-	NK	NB
az	orta	orta	-	NK	NK
az	orta	çok	-	NK	S
az	çok	az	-	S	NB
az	çok	orta	-	S	NK
az	çok	çok	-	S	S
orta	az	az	S	NB	NB
orta	az	orta	-	NB	NK
orta	az	çok	-	NB	S
orta	orta	az	-	NK	NB
orta	orta	orta	-	NK	NK
orta	orta	çok	-	S	S
orta	çok	az	-	S	NB
orta	çok	orta	-	S	S
orta	çok	çok	-	S	S
çok	az	az	S	NB	NB
çok	az	orta	-	NB	NK
çok	az	çok	-	NK	S
çok	orta	az	-	S	NK
çok	orta	orta	-	S	S
çok	orta	çok	-	S	S
çok	çok	az	-	S	NK
çok	çok	orta	-	S	S
çok	çok	çok	-	S	S

## 6.4 Görüntü İşleme ile Nesne Tespiti Uygulaması

Bu kısımda, görüntü işleme için yapılan işlemler adım adım detaylı olarak anlatılacaktır. Bu adımlarda karton bardak için, yapılan işlem sonucu elde edilen fotoğraflar örneklendirilecektir.

- 1) İlk adımda, anlık video görüntüsü yakalanır ve resim elde edilir. Şekil 6.22’de gösterildi.
- 2) Elde edilen renkli 3 boyutlu(RGB) resim, gri tona çevrilir. Şekil 6.23’te gösterildi.
- 3) Griye çevrilen resmin parlaklık eşiği otomatik olarak MATLAB tarafından belirlendikten sonra, resim siyah ve beyaz olacak şekilde 2 boyutlu hale getirilir. Şekil 6.24’te gösterildi.
- 4) Resimde daha temiz bir görüntü elde etmek için morfolojik işlemler yapıldı. 50 pikselin altındaki pikseller kaldırıldı. Şekil 6.25’te gösterildi.
- 5) Yapısal element yardımıyla resimde iç kısımda boşluklar kayboldu. Daha sonra, resimdeki nesnelerin sınırlarını belirleyebilmeyi yardımcı olması için resimdeki çukur bölgeler doldurulur. Şekil 6.26’da gösterildi.
- 6) Resimdeki yer alan nesne veya nesnelerin sınırları MATLAB ile bulduruldu. Bulunan nesnelerin sınırları çizdirildi.
- 7) Sınırları çizilen nesne veya nesnelerin şeklinden hangi nesne olduğunu çıkartabilmek için, bir algoritma geliştirildi, (6.2)’de gösterildi. Bu formüle göre, 1 veya 1’e yakın değerlerdeki nesneler yuvarlak; yuvarlak olmayan nesneler daha düşük değerler verecektir.

$$x = \frac{4\pi(alan)}{cevre^2} \quad (6.2)$$

$$alan = \pi r^2$$

$$cevre = 2\pi r$$

8) (6.2) formülüne göre, deneme yanılma yolu ile kavrama işlemi yapılması planlanan nesnelerin  $x$  değerleri elde edildi. Yapılan hesaplamalar sonucunda;

silindirik cisim için:  $x > 0.8$ ;

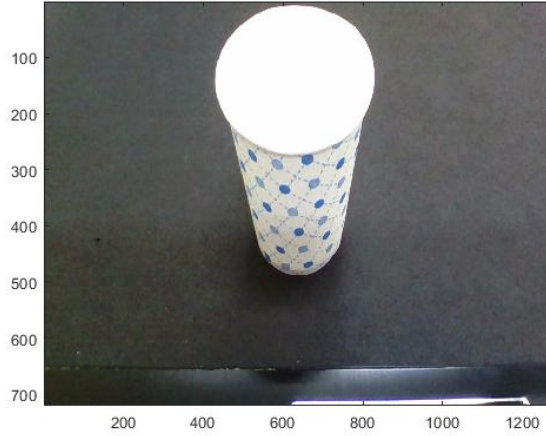
karton bardak için:  $0.8 \geq x \geq 0.75$ ;

köpük için:  $0.65 \geq x \geq 0.55$ ;

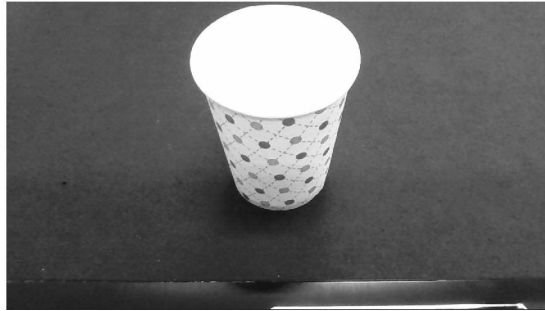
top için:  $0.5 \geq x \geq 0.45$ ;

kalem için:  $0.3 \geq x \geq 0.2$  olarak belirlenmiştir.

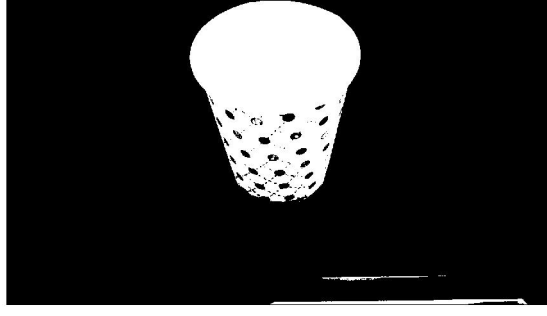
Böylece, bilgisayardan 0.78 çıktısı alındı ve karton bardak cisminin bilgisayar tarafından tanınması sağlandı ve kavrama işlemi karton bardak için başlatılmıştır.



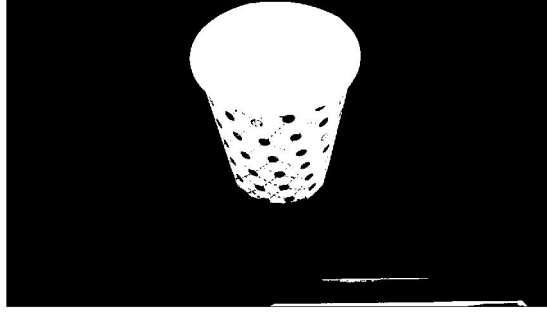
**Şekil 6.22:** 1. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü.



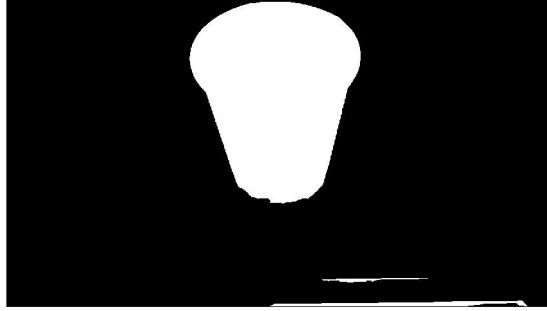
**Şekil 6.23:** 2. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü.



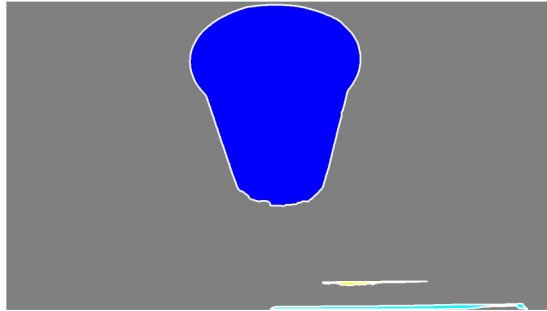
**Şekil 6.24:** 3. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü.



**Şekil 6.25:** 4. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü.



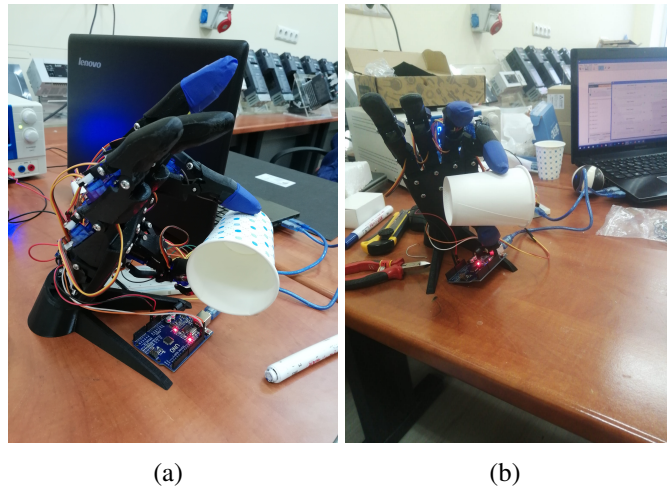
**Şekil 6.26:** 5. adım sonucu elde edilen karton bardak görüntüsü.



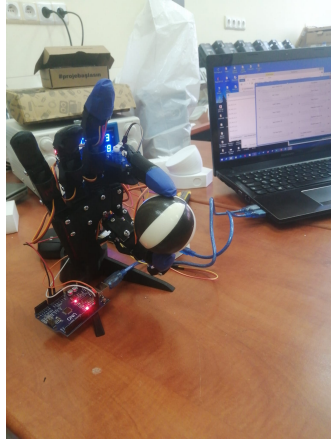
**Şekil 6.27:** Son olarak, bilgisayarın karton bardağı tanıması sonucunda elde edilen görüntü.

## 6.5 Bulgular

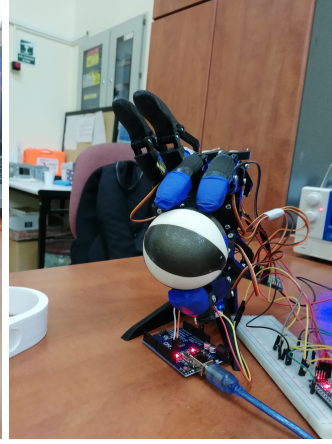
Günlük hayatta yer alan çoğu robotik tutucu, 2 veya 3 parmağa sahiptir. Ayrıca, basınç sensörlerinin maliyetli olması sebebi ile de yapılan tez çalışmasında, üç parmaklı robotik el ile kavrama işleminin yaptırılması yeterli görülmüştür. Özellikle, endüstride kullanılan tutucuların görevleri, belirli ve önceden bilinen işleri yapmak üzerinedir. Bunun için, önceden yapılacak görev tanımları yapılır. Fakat, günlük hayatta karşılaşılan bilinmeyen görevleri yapmak robotik tutucuların işlerini düzgün bir şekilde yapmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, nesne dinamiğinin bilinmemesi de ayrı bir problem olarak zuhur eder. Bu yapılan tez çalışmasında, bu iki problem ele alındı ve başarılı sonuçlar elde edildi. Özellikle, nesne dinamiğinin hesaplanmasının karmaşık olması ve parmak ile nesne arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi belirlemek meşakkatli olmaktadır. Çalışmada, tasarlanan BMK ile parmak kinematik analizi, nesne dinamik modelinin bilinmemesi gibi sorunlar elimine edildi. Ayrıca, parmak ve nesne arasındaki ilişki belirleme gibi sorunlar da, basınç sensörü kullanımı ile ortadan kalkmıştır. Önceden elde edilmiş olan basınç sensörü verilerine göre, oluşturulan BM yapısı makul bir kontrol yapısı sunmuştur. Böylelikle, basit ve insan mantığına yakın bir kontrolcü tasarımı oluşturuldu. Yöntem kısmında tasarlanan BMK yapısı ile yapılan kavrama resimleri Şekil 6.28, Şekil 6.29, Şekil 6.30 ve Şekil 6.31'de gösterilmiştir.



Şekil 6.28: Robotik el ile yapılan karton bardak kavramaları.



(a)

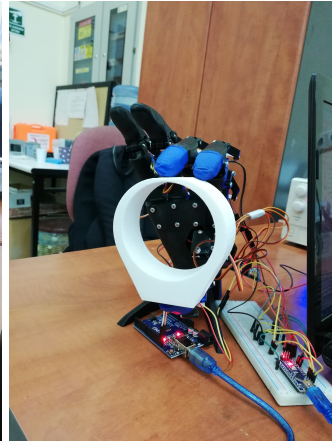


(b)

**Şekil 6.29:** Robotik el ile yapılan top kavramaları  
a)İki parmaklı top kavraması, b)Üç parmaklı top kavraması.

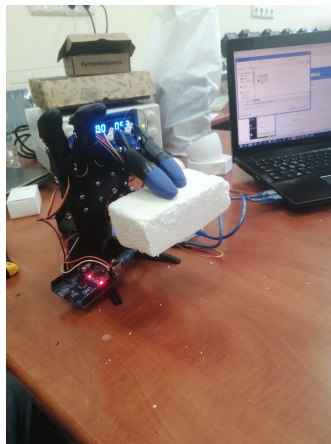


(a)

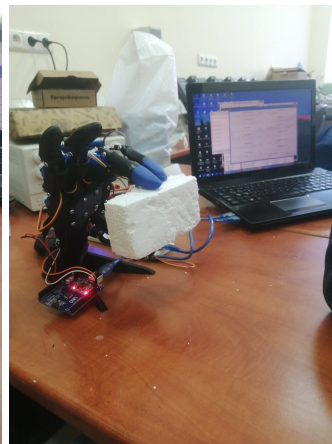


(b)

**Şekil 6.30:** Robotik el ile yapılan silindirik cisim kavramaları  
a)İki parmaklı silindirik cisim kavraması, b)Üç parmaklı silindirik cisim kavraması.



(a)



(b)

**Şekil 6.31:** Robotik el ile yapılan köpük nesnesi kavramaları.



Deneylerde top nesnesi, karton bardak, silindirik cisim, tahta kalemi ve köpük nesnesi gibi hafif nesnelerin kavramaları yaptırıldı. Daha ağır nesnelere olan, elma, portakal gibi nesnelerin kavramaları da yaptırıldı, ancak kullanılan servo motorların torku, bu meyveleri kaldırmak için yetersiz geldiği görüldü ve ayrıca, bazı servo motorların bozulmasına yol açmıştır. Çok fazla servo motor kullanılması ve bir servo motor fiyatının maliyetli olması sebebiyle hafif nesnelerin kavranması, bu çalışma için yeterli görülmüştür. Ayrıca, kavrama operasyonunda kullanılan tahta kalemi nesnesi için istenilen kavrama işlemi gerçekleşmemiştir. Tahta kaleminin yüzeyinin kaygan olması ve boyutunun küçük olması sebebiyle, el içinde parmakların arasından kayıp düşmekte olduğu gözlemlenmiştir.

Kavrama operasyonunda üç parmağın ucuna monte edilen basınç sensörleri, parmak ile nesne arasındaki ilişkiyi belirlemek hedefinde yeterli sonuçlar vermiştir. Özellikle, yüzey yapısı yumuşak nesnelerin kavrama operasyonunda bazı durumlarda, sensörden veri okunmama gibi sorunlar ile karşılaşıldı. Çünkü, çalışmada kullanılan sensörlerin, belirli bir eşikten sonra düzgün bir şekilde değer okuduğu görülmüştür. Bu yüzden, yumuşak nesnelere biraz daha fazla kuvvet uygulanarak ideal kavrama için gereken değerler elde edildi. Planlanan bu yumuşak nesne kavraması, deney sonucunda oldukça yüksek bir başarı vermiştir. Yüzey yapısı sert olan cisimlerin kavranmasında, bu tip sorunlar ile karşılaşılmadı. Yüzeylerinin sert olmasından dolayı, bu tip nesnelere uygulanan az kuvvette dahi basınç sensörlerinden değerler okuduğu görüldü. Böylece, hafif ve optimal kuvvet ile nesnelerin el içinde tutulması hedefine varılmıştır. Ayrıca, bazı durumlarda, basınç sensörleri ile nesne arasında temas olduğu zaman, basınç sensörlerinin Arduino ile haberleşmesini sağlayan kabloların bağlantısının sağlandığı noktada, parmakların hareket etmesiyle birlikte sensör ile kablolar arasında temassızlık durumu karşılaşıldı ve bu durum, kavrama için gerekli olan sensör verisinin Arduino tarafından okunmasını engellemiştir.

Sonuç olarak, deneyde istenilen kavrama işlemleri amacına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan BMK sistemiyle, gerekli parmak ayarlamaları yaptırılarak parmakların nesne üzerine uyguladığı kuvvetin optimal ve ideal kuvvet aralıklarında olması sağlandı. MATLAB programı üzerinde tasarlanan BMK ile sensörlerin değer okumadığı zamanlarda, yumuşak nesnelere biraz fazla kuvvet uygulanmasına sebep oldu. Ancak, nesnenin yapısı deforme olmadığından dolayı tez çalışması için herhangi bir sakınca teşkil etmedi. Nesne üzerinde fazla kuvvet uygulandığı zamanlarda ise, tasarlanan BM kurallarına göre servo motorun hareketinin durması, "Sıfır (S)" çıkış üyelik fonksiyonu yardımıyla sağlanmıştır. Kavrama işlemi sırasında basınç sensörlerinden okunan değerler, kontrol sisteminin tasarlanması için önceden elde edilmiş olan basınç sensörleri değerlerine yakın değerler verdiği gözlemlendi. Ayrıca, kavrama sınıflandırmasının yapılması ve her bir parmak için BMK sisteminin oluşturulması, daha iyi bir kontrol sistemi yapısı sağladığı da deney sırasında gözlemlenmiştir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son zamanlarda en popüler alanlardan birisi, robotik alanıdır. Özellikle, günlük hayatın insanların yaşamlarını zorlaştıran yerlerde ve insanların zorlandığı çalışma alanlarında, hayatı ve işçiliği kolaylaştırma amacıyla insan benzeri hareket eden mekanizmalar kullanılması hedeflenmektedir. Geçmişten günümüze kadar insan benzeri robotlar ve fabrikalarda robot kollar üzerinde oldukça yoğun bir çalışmalar mevcuttur, fakat son zamanlarda insan benzeri el mekanizmaları üzerinde ciddi bir araştırma yoğunluğu olmuştur. Endüstride, insan eli kullanımı gerektiren yerlerde insan eli yapısına benzer robotik el kullanılması, artık popüler hale gelmiştir ve daha da popüler hale gelecektir. Endüstri ve fabrikalar haricinde, sağlık sektöründe hastayı muayene etme ve doktorların uzaktan robotik el vasıtası ile ameliyat yapma gibi alanlarda popülerleşme görülmektedir.

Şimdiye kadar kullanılan çoğu robotik el, endüstride önceden belirlenmiş olan kısıtlı iş kapasitesini ve önceden belirlenmiş görevleri yerine getirmek amacıyla kullanılmıştır; ancak, günümüzde bu iş tanımı daha da genişlemektedir. Sanayide daha fazla iş alanında, günlük hayatta evlerde dahil insanlara yardımcı olması amaçlanmaktadır. Bu yüzden, önceden bilinmeyen görevleri yerine getirme ve dinamik özellikleri bilinmeyen nesnelere kavrama gibi birçok belirsizliklerle karşılaşmaktadır. Bu türden sorunların çözümünde, adaptif bir şekilde kontrol yapısı gereklidir. Adaptif bir şekilde kavramanın gerçekleşmesi için insan benzeri doku hissine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doku hissi ile nesne yüzeyi ve yapısı hakkında bilgi sahibi olunur ve kavramada kullanılacak parmakların nesneyi ne kadar sıkacağı hakkında insan, bir sezgisel çıkarım yapabilmektedir. Bu kuvvet ölçümünü belirleyebilmek için parmak ile nesne arasındaki kuvvet hesabı yapan bir kuvvet geri bildirim kontrol yapısı gereklidir. Bu kontrol yapısı ile nesnelerin deforme olmadan ve el içinde düşmeden kavranması sağlanabilir. Yapılan tez çalışması kapsamında, parmak ile nesne arasındaki kuvvet ilişkisi, basınç sensörleri aracılığı ile belirlenmiştir.

Robotik el ile kusursuz ve parmakların koordineli bir şekilde ayarlanması süreçleri oldukça zorlayıcı bir yapıdadır. Ayrıca, robotik eldeki parmak sayısının artması, parmaklar ile nesne arasındaki ilişkilerin belirlenmesini kompleks bir hale getirir. Bu kompleks ilişkilerin, parmak ile nesne arasındaki kinematik ilişkinin ve sensörlerden elde edilen verilerin, doğrusal olmaması gibi problemler için bir akıllı çıkarım sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. El içinde kavranan nesnenin kaymaması da gerekmektedir. Böylece, kararlı ve kusursuza yakın bir kavrama işlemi gerçekleşmesi gereklidir. Eğer kararlı ve kusursuza yakın bir kavrama operasyonu sağlanmaz ise, nesnenin el içinde yapısının bozulması veya kayıp düşmesi gibi sorunlar görülür. Ayrıca, el içinde dengede duran nesne üzerinde herhangi bir harici kuvvet uygulansa bile, nesnenin el içindeki duruşu bozulmamalıdır. Bu türden problemler için akıllı çıkarım yapısına sahip bir kontrolör sistemi sunan, Bulanık Mantık Denetleyicisi çözüm olabilmektedir. Bulanık Mantık sistemi ile insan düşünce tarzı yaklaşımı, kontrol sistemlerinde karşılaşılan problemleri basite indirgeyebilmeye yardımcı olabilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, robot eldeki üç parmak ucuna monte edilen basınç sensörleri aracılığıyla okunan basınç değerleri, insan sezgisel çıkarım yöntemi ile değerlendirildi. Bu değerlendirmeler neticesinde, Bulanık Mantık Kontrolör yapısı oluşturuldu. MATLAB programında görüntü işleme yardımıyla nesnenin şekil olarak tespit edilmesi işlemi ve kullanıcıdan kaç parmaklı kavrama yapılacağı bilgisi istenmesi işlemi ile kavrama işleminde ilk hareketin planlanması ve görev seçimi adımları belirlenmiştir. Daha sonra, kavrama işleminin gerçekleşmesi Bulanık Mantık Kontrolör yardımıyla, basınç sensöründen gelen veriler değerlendirilerek parmakların hareketini sağlayan servo motorların kontrolü sağlandı ve son olarak, kavrama işlemi başarıyla gerçekleşmiştir. Böylelikle, insan benzeri bir robotik el ile kavrama operasyonu sağlanmış oldu.

İleride yapılacak çalışmalarda, ilk hareketin planlanması ve görev seçimi için faydalanılan görüntü işleme için yapay zekâ tekniklerinden yararlanılarak, nesne tespitinin yapılması işlemleri daha da geliştirilebilir. Basınç sensörlerinin yerine daha sağlıklı sonuçlar veren pahalı sensörler veya görüntü işleme ile nesnelerin el içinde kavranıp kavranmadığını tespit eden ve robotik eli sürekli bir şekilde görsel olarak izleyen, takip eden sistemler kullanılabilir. Böylelikle, kararlı kavrama süreci daha sağlıklı bir şekilde yürütülebilir.

## 8. KAYNAKLAR

- Amor, H. B., Kroemer, O., Hillenbrand, U., Neumann, G., Peters, J., "Generalization of human grasping for multi-fingered robot hands", *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2043-2050, (2012).
- Ataei, E., Afshari, R., Pourmina, M. A., "Fuzzy logic control of a multifingered hand robot using genetic algorithm based on DSP", *International Review of Automatic Control*, 4 (6), 963-968, (2011).
- Aydin, K. K., "Fuzzy logic, grasp preshaping for robot hands", *Proceedings of 3rd International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis and Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society*, 520-523, (1995).
- Badoniya, P., George, J., "Two link planar robot manipulator mechanism analysis with MATLAB", *International Journal for Research in Applied Science Engineering Technology*, 6 (7), 778-788, (2018).
- Baritz, M. I., Cotoros, D. L., Singer, C., "Thermographic analysis of hand structure when subjected to controlled effort", *2013 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)*, 1-4, (2013).
- Bingül, Z. ve Küçük, S., *Robot Kinematığı*, Kocaeli : Umuttepe Yayınları, 104-186, (2019).
- Boughdiri, R., Nasser, H., Bezine, H., M'Sirdi, N. K., Alimi, A. M., Naamane, A., "Dynamic modeling and control of a multi-fingered robot hand for grasping task", *Procedia Engineering*, 41, 923-931 (2012).
- Cheah, C. C., Han, H. Y., Kawamura, S., Arimoto, S., "Grasping and position control for multi-fingered robot hands with uncertain Jacobian matrices", *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3, 2403-2408, (1998).
- Chen, C. H., Naidu, D. S., "Hybrid control strategies for a five-finger robotic hand", *Biomedical Signal Processing and Control*, 8 (4), 382-390, (2013).
- Choi, D., Shin, S., Lee, K., Koo, J. C., Choi, H. R., Moon, H., "Motion planning of multifingered robotic hand for turning the cap", *2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 451-454, (2011).
- Ciobanu, V., Popescu, N., "Tactile controller using fuzzy logic for robot inhand manipulation", *2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 435-440, (2015).
- Conker, Ç., Karaca, A., "Bulanık Mantık Esaslı Karar Destek Sistemi ile Robot Elin Kuvvet Kontrolünün Sağlanması", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21 (62), 433-447, (2019).

Çamoğlu, D., *Bilgisayar Kontrollü Robotik*, İstanbul : Dikeyksen Yayıncılık, 21, (2015).

Delgado, A., Jara, C. A., Torres, F., "Adaptive tactile control for in-hand manipulation tasks of deformable objects", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91 (9), 4127-4140, (2017).

Doğan, B., "Development of a two-fingered and a four-fingered robotic gripper ", Yüksek Lisans Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, (2010).

Fan, S., Gu, H., Zhang, Y., Jin, M., Liu, H., "Research on adaptive grasping with object pose uncertainty by multi-fingered robot hand", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15 (2), (2018).

Fan, Y., Tang, T., Lin, H. C., Zhao, Y., Tomizuka, M., "Real-time robust finger gaits planning under object shape and dynamics uncertainties", *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1267-1273, (2017).

Glossas, N. I., Aspragathos, N. A., "Fuzzy logic grasp control using tactile sensors", *Mechatronics*, 11 (7), 899-920, (2001).

Gupta, A., Eppner, C., Levine, S., Abbeel, P., "Learning dexterous manipulation for a soft robotic hand from human demonstrations", *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 3786-3793, (2016).

Ha, X. V., Ha, C., Nguyen, D. K., "A general contact force analysis of an under-actuated finger in robot hand grasping", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13 (1), 14, (2016).

Han, L., Trinkle, J. C., "Dexterous manipulation by rolling and finger gaiting", *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1, 730-735, (1998).

Hua, L., Sheng, X., Zhu, X., "An efficient grasp planning algorithm for 3-D objects considering hand configuration", *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, 1-6, (2017).

İşlek, C., "Robot Elin Hassas Kavrama Görevi için Bulanık Mantık ile Kavrama Kuvvetinin Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, (2021).

Kappasov, Z., Corrales, J. A., Perdereau, V., "Tactile sensing in dexterous robot hands", *Robotics and Autonomous Systems*, 74, 195-220, (2015).

Karaçizmeli, C., Çakır, G., Tükel, D., "Robotic hand project", *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 473-476, (2014).

- Kawasaki, H., Mouri, T., "Humanoid robot hand and its applied research", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 31 (1), 16-26, (2019).
- Kerr, J., Roth, B., "Analysis of multifingered hands", *The International Journal of Robotics Research*, 4 (4), 3-17, (1986).
- Kızıldağ, F. S., Can, F. C., Gezgin, E., "Kablosuz Kontrol Edilebilen Robotik El Tasarımı", (2016).
- Lee, D. H., Park, J. H., Park, S. W., Baeg, M. H., Bae, J. H., "KITECH-hand: A highly dexterous and modularized robotic hand", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22 (2), 876-887, (2016).
- Li, G., Fu, C., Zhang, F., Wang, S., "A reconfigurable three-finger robotic gripper", *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, 1556-1561, (2015).
- Li, Z., Hsu, P., Sastry, S., "Grasping and coordinated manipulation by a multifingered robot hand", *The International Journal of Robotics Research*, 8 (4), 33-50, (1989).
- Miao, W., Li, G., Jiang, G., Fang, Y., Ju, Z. J., Liu, H. H., "Optimal grasp planning of multi-fingered robotic hands: a review", *Appl. Comput. Math*, 14 (3), 238-247, (2015).
- Michelman, P., "Precision object manipulation with a multifingered robot hand", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14 (1), 105-113, (1998).
- Montaño, A., Suárez, R., "Dexterous manipulation of unknown objects using virtual contact points", *Robotics*, 8 (4), 86, (2019).
- Neha, E., Suhaib, M., Asthana, S., Mukherjee, S., "Grasp analysis of a four-fingered robotic hand based on matlab simmechanics", *Journal of Computational Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, 9 (2), 169-182, (2020).
- Nguyen Le, T., "Force control for soft robotic hands applied to grasping", Master's thesis, Tampere University Faculty of Engineering and Natural Sciences (ENS), (2019).
- Ozawa, R., Hashirii, K., Yoshimura, Y., Moriya, M., Kobayashi, H., "Design and control of a three-fingered tendon-driven robotic hand with active and passive tendons", *Autonomous Robots*, 36 (1), 67-78 (2014).
- Ozawa, R., Tahara, K., "Grasp and dexterous manipulation of multi-fingered robotic hands: a review from a control view point", *Advanced Robotics*, 31 (19-20), 1030-1050, (2017).
- Park, Y. C., Starr, G. P., "Grasp synthesis of polygonal objects using a three-fingered robot hand", *The International journal of robotics research*, 11 (3), 163-184, (1992).



- Raheja, J. L., Shyam, R., Rajsekhar, G. A., Prasad, P. B., "Real-time robotic hand control using hand gestures", *Robotic Systems–Applications, Control and Programming*, 413-428, (2012).
- Raković, M., Anil, G., Mihajlović, Ž., Savić, S., Naik, S., Borovac, B., Gottscheber, A., "Fuzzy position-velocity control of underactuated finger of FTN robot hand", *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, 34 (4), 2723-2736, (2018).
- Rehiara, A. B., "Kinematics of adept three robot arm", *Robot Arms*, 2, 21-38, (2011).
- Sadun, A. S., Jalani, J., Sukor, J. A., Jamil, F., "Force control for a 3-finger adaptive robot gripper by using PID controller", *2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*, 1-6, (2016).
- Salvietti, G., Malvezzi, M., Gioioso, G., Prattichizzo, D., "On the use of homogeneous transformations to map human hand movements onto robotic hands", *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5352-5357, (2014).
- Savić, S., Raković, M., Penčić, M., Nikolić, M., Dudić, S., Borovac, B., "Design of an underactuated adaptive robotic hand with force sensing", *International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN, Zlatibor*, (2016).
- Shimada, A., Sonoda, K., Unuma, S., "An approach to sensor-less grasping and movement control on two-fingered robot hands. *SICE Annual Conference 2011*, 917-918, (2011).
- Sugaiwa, T., Iwata, H., Sugano, S., "A motion control for dexterous manipulation with human mimetic hand-arm system", *2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 653-659, (2009).
- Sun, Y., Zhang, Q., Chen, X., "Design and analysis of a flexible robotic hand with soft fingers and a changeable palm", *Advanced Robotics*, 34 (16), 1041-1054, (2020).
- Ueda, J., Kondo, M., Ogasawara, T., "The multifingered NAIST hand system for robot in-hand manipulation", *Mechanism and Machine Theory*, 45 (2), 224-238, (2010).
- Ueki, S., Kawasaki, H., Mouri, T., "Adaptive coordinated control of multi-fingered hands with sliding contact", *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, 5893-5898, (2006).
- Ueki, S., Kawasaki, H., Mouri, T., "Adaptive coordinated control of multi-fingered robot hand", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 21 (1), 36, (2009).
- VanHuy, T., Minh, D. T., Kien, N. P., Vu, T. A., "Simple robotic hand in motion using arduino controlled servos", *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 6 (3), 972-975, (2017).
- Xu, J., Koo, T. J., Li, Z., "Finger gaits planning for multifingered manipulation", *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2932-2937, (2007).

Yoshikawa, T., "Multifingered robot hands: Control for grasping and manipulation", *Annual Reviews in Control*, 34 (2), 199-208, (2010).

Yoshikawa, T., Nagai, K., "Manipulating and grasping forces in manipulation by multifingered robot hands", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7 (1), 67-77, (1991).

Zhang, B., Zhou, J., Meng, Y., Zhang, N., Gu, B., Yan, Z., Idris, S. I., "Comparative study of mechanical damage caused by a two-finger tomato gripper with different robotic grasping patterns for harvesting robots", *Biosystems engineering*, 171, 245-257, (2018).