



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**BULANIK MANTIK ESASLI KARAR
DESTEK SİSTEMİ İLE ROBOT ELİN
KUVVET KONTROLÜ**

Aslıhan KARACA

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2019



**BULANIK MANTIK ESASLI KARAR DESTEK SİSTEMİ İLE ROBOT
ELİN KUVVET KONTROLÜ**

Aslıhan KARACA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Aslıhan KARACA tarafından hazırlanan “BULANIK MANTIK ESASLI KARAR DESTEK SİSTEMİ İLE ROBOT ELİN KUVVET KONTROLÜ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.



Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Ali KILIÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gaziantep Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Turan ARAT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

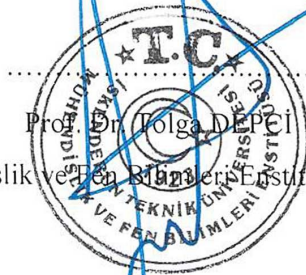
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.



Tez Savunma Tarihi: 10 / 06 / 2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Tolga DEPEÇİ
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



İmza

Aslıhan KARACA

10/06/2019

BULANIK MANTIK ESASLI KARAR DESTEK SİSTEMİ İLE ROBOT ELİN KUVVET
KONTROLÜ
(Yüksek Lisans Tezi)

Aslıhan KARACA

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Son yıllarda gelişen teknoloji ile robotik sistemler üzerine yapılan çalışmalar ciddi oranda artmıştır. Robotik sistemlerden biri olan robot ellerin kullanım alanlarına yönelik geliştirme çalışmaları önem kazanmıştır. Robot el uygulamalarında karşılaşılan kuvvet kontrolü problemi ve his geri bildirim eksikliği önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorunun çözümü için sisteme bir kontrolcü eklenmeli ve his geri bildirim eksikliği giderilmelidir. Dokunsal bildirim insan-makine etkileşimine entegre edilmesiyle makinelerin kontrolünde hassasiyet ve verimlilik artmıştır. Bu doğrultuda insan-makine etkileşimlerinden biri olan robot ellerde dokunsal bildirim hassaslaştırılması, kullanıcı deneyimini (tutma, kavrama hissi) arttıracak ve kullanıcının sistemi daha hassas kontrol etmesini sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında insan düşünce yapısına yakın olması sebebiyle bulanık mantık kullanılarak bir karar destek sistemi (bulanık mantık kontrolcü) oluşturulmuştur. Karar destek sistemi ile kullanıcı komutu doğrultusunda 5 parmaklı robot elin kuvvet kontrolü gerçekleştirilmiştir. His geri bildirim eksikliğinin giderilmesi için ise haptik geri bildirim sistemi tasarlanmıştır. Haptik geri bildirim sisteminin kontrolünde bulanık mantık kullanılarak bir kontrolcü geliştirilmiş ve sisteme uygulanmıştır. Karar destek sistemine kullanıcı; tut, sık, bırak gibi komutlar göndermektedir. Karar destek sistemi kullanıcı komutunu referans alarak kavrama kuvvetini belirlemektedir ve durumu değerlendirerek robot ele uygun kontrol sinyalini göndermektedir. Kontrol sinyali doğrultusunda robot el nesnelere uygun kuvvet aralığında kavramaktadır. Sistem test edilmiş ve robot el kullanıcı komutu doğrultusunda nesnelere uygun kuvvet aralığında kavramıştır. Haptik geri bildirim sistemi vasıtasıyla kullanıcıya kavrama kuvveti hissettirilmiştir. Böylelikle kullanıcı deneyimi artmıştır. Kullanıcı deneyiminin artmasıyla, kullanıcı robot elin nesneye uyguladığı kuvveti daha başarılı bir şekilde kontrol edebilmektedir.

Anahtar Kelimeler : Robot el, kuvvet kontrolü, haptik, bulanık mantık

Sayfa Adedi : 135

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER

FUZZY LOGIC BASED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR FORCE CONTROL OF
ROBOT HAND
(M. Sc. Thesis)

Aslihan KARACA

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

June 2019

ABSTRACT

In recent years with developing technology the studies on robotic systems have increased significantly. Robot hands, which are one of the robotic systems, has gained importance in the development studies of the application areas. The problem of force control and lack of haptic feedback in robotic hand applications poses a major problem. In order to solve this problem, a controller should be added to the system and the lack of haptic feedback should be eliminated. By integrating haptic feedback into human-machine interaction, precision and efficiency in machine control have increased. In this respect the sensitization of tactile notification in robotic hands which is one of the human-machine interactions will increase the user experience (keep, grip feeling) and allow the user to control the system more precisely. In this thesis, a decision support system (fuzzy logic controller) has been formed by using fuzzy logic due to its close to human thought structure. With the decision support system, the force control of the 5 finger robot hand has carried out according to the user command. A haptic feedback system has been designed to eliminate the lack of sensation feedback. By using fuzzy logic in the control of the haptic feedback system a controller has been developed and applied to the system. The user sends commands to the decision support system such as grip, tight grip, drop. The decision support system determines the grip force by reference from the user command and evaluates the situation, then sends the appropriate control signal to the robot hand. According to the control signal, the robot hand grasps the objects in the appropriate force range. The system has been tested and the robotic hand grasped the objects in the appropriate force range according to the user command. By means of haptic feedback system, the user felt the grip force. Thus, the user experience has been increased. With the increased user experience, the user can control the force more successfully, which is applied by the robot hand to the object.

Key Words : Robot hand, force control, haptic, fuzzy logic
Page Number : 135
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Çağlar CONKER

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her safhasında yakın ilgi ve önerileri ile beni yönlendiren, yoğun temposuna rağmen zaman ayırarak yardımlarını esirgemeyen, bu tezin tamamlanmasında bana her zaman anlayıő gösteren, akademik bilgi ve tecrübelerini örnek aldığım kıymetli danışmanım, sayın Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması sürecinde akademik birikimlerini paylaşarak karşılaőtığım problemlerin çözümüne katkı sunan sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ'e teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Halil KARACA ve annem Sultan KARACA'ya teşekkürü borç bilirim. Çalışmalarım sırasında her daim desteğini sunan ablam Neslihan KARACA, abim Veli KARACA, Mehmet KARACA'ya ve kardeşlerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	vii
RESİMLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	9
2.1. Robot Eller Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....	9
2.2. Haptik Bildirim Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	22
2.3. Robot El Sistemlerinin Kullanım Alanları.....	28
3. METERYAL VE YÖNTEM.....	29
3.1. Kontrol Sistemleri.....	29
3.1.1. Açık-çevrim kontrol sitemi	29
3.1.2. Kapalı-çevrim kontrol sistemi.....	30
3.2. Yapay Zeka	31
3.2.1. Bulanık mantık.....	31
3.3. Robot El Sistemi ve Sistemde Kullanılan Materyal	37
3.3.1. Kontrol sistemi (mikrodenetleyici)	37
3.3.2. Hobi servo motor	38
3.3.3. Titreşim motoru.....	39

	Sayfa
3.3.4. Kuvvet sensörü.....	40
3.3.5. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi	42
3.3.6. Robot elin elektronik donanım yapısı	43
3.3.7. Robot elin mekanik yapısı.....	44
3.4. Robot El ve Haptik Geri Bildirim Sisteminin Kontrol Yapısı	47
3.4.1. Robot el sisteminin kuvvet kontrol yapısı.....	47
3.4.2. Haptik geri bildirim sisteminin kontrol yapısı	62
3.5. Robot Elin Matematiksel Analizi.....	70
3.5.1. Kinematik analiz	70
3.5.2. Ters kinematik.....	81
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	84
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	98
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	134

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Önceki çalışmalar bölümde incelenen bazı robot kavrayıcıların görselleri	20
Çizelge 2.1. (devam) Önceki çalışmalar bölümde incelenen bazı robot kavrayıcıların görselleri	21
Çizelge 2.1. (devam) Önceki çalışmalar bölümde incelenen bazı robot kavrayıcıların görselleri	22
Çizelge 2.2. Önceki çalışmalar bölümde incelenen bazı haptik bildirim sistemlerinin görselleri	26
Çizelge 2.2. (devam) Önceki çalışmalar bölümde incelenen bazı haptik bildirim sistemlerinin görselleri	27
Çizelge 3.1. Arduino-Mega teknik özellikleri	38
Çizelge 3.2. Tower-Pro MG996R servo motor teknik özellikleri	39
Çizelge 3.3. Mini titreşim motoru teknik özellikleri.....	39
Çizelge 3.4. Kuvvet ve sensör değerleri	40
Çizelge 3.5. Bulanık mantık kural tablosu 1	49
Çizelge 3.6. Bulanık mantık kural tablosu 2.....	50
Çizelge 3.7. Parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörlerinin üyelik kümesi parametreleri	50
Çizelge 3.8. Kullanıcı kontrol sinyalinin girdi üyelik kümesi parametreleri.....	51
Çizelge 3.9. Servo motorun çıktı üyelik kümesi parametreleri	51
Çizelge 3.10. Bulanıklaştırma işlemi	61
Çizelge 3.11. Bulanık mantık kural tablosu.....	64
Çizelge 3.12. Titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalinin üyelik kümesi parametreleri.....	65
Çizelge 3.13. Bulanıklaştırma işlemi	68
Çizelge 3.14. Denavit-Hartenberg Parametreleri.....	71
Çizelge 3.15. Robot elin işaret, yüzük, orta ve serçe parmağının Denavit-Hartenberg parametreleri.....	73
Çizelge 3.16. Başparmağın Denavit-Hartenberg parametreleri.....	78

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Robot el konusunda yapılan yayınların yıllara göre dağılımı (ScienceDirect).....	1
Şekil 1.2. Robot el konusunda yapılan yayınların yıllara göre dağılımı (IEEE Xplore Dijital Kütüphane).....	2
Şekil 1.3. Robot elin 1 parmağının tendon temelli hareket ve güç iletim sistem yapısı.	4
Şekil 1.4. Robot elin 1 parmağının kuvvet geri beslemeli kontrol yapısının blok diyagramı ile gösterimi.....	4
Şekil 1.5. Haptik geri bildirim sisteminin blok diyagramı.....	5
Şekil 1.6. Haptik geri bildirimde sahip robot elin kontrol yapısının blok diyagramı	6
Şekil 3.1. Açık-çevrim kontrol sistemi blok diyagramı ile gösterimi.....	29
Şekil 3.2. Kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı ile gösterimi	30
Şekil 3.3. Klasik küme	32
Şekil 3.4. Bulanık küme.....	32
Şekil 3.5. Üçgen üyelik fonksiyonu	33
Şekil 3.6. Bulanık kümelerde birleşme işlemi	34
Şekil 3.7. Bulanık kümelerde kesişim işlemi.....	34
Şekil 3.8. Genel bulanık kontrolör yapısının blok diyagramı ile gösterimi (Yılmaz, 2017).....	36
Şekil 3.9. Ağırlık merkezi yöntemi.....	37
Şekil 3.10. Gerilim bölücü devre	41
Şekil 3.11. Kuvvet sensörü kuvvet-direnç değişim grafiği.....	41
Şekil 3.12. Eğri uydurma yöntemi ile elde edilen değerlerin ve kuvvet sensöründen elde edilen değerlerin grafiği	42
Şekil 3.13. Robot elin elektronik donanım bağlantısı.....	44
Şekil 3.14. Robot elin boyutu	45
Şekil 3.15. Robot elin parmakları için oluşturulan kontrol sisteminin blok diyagramı..	48
Şekil 3.16. Parmak ucundaki kuvvet sensörünün üyelik fonksiyonu	52

Şekil	Sayfa
Şekil 3.17. Avuç içinde bulunan kuvvet sensörünün üyelik fonksiyonu.....	52
Şekil 3.18. Kullanıcıdan gelen kontrol sinyalinin üyelik fonksiyonu.....	53
Şekil 3.19 Servo motorun hareket miktarının üyelik fonksiyonu	53
Şekil 3.20. Avuç içerisinde ve parmakta bulunan kuvvet sensörünün değeri ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği	58
Şekil 3.21. Kullanıcı tarafından gönderilen kontrol sinyali, parmakta bulunan kuvvet sensörünün değeri ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği	58
Şekil 3.22. Avuç içerisinde bulunan kuvvet sensörünün değeri, kullanıcı tarafından gönderilen kontrol sinyali ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği	59
Şekil 3.23. Bulanık çıktı.....	62
Şekil 3.24. Haptik geri bildirim sistemin blok diyagramı.....	63
Şekil 3.25. Titreşim motoru için oluşturulan çıktı üyelik kümeleri.....	65
Şekil 3.26. Avuç içerisinde bulunan kuvvet sensörü, parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü değeri ve titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalinin bulanık mantık yüzey grafiği	67
Şekil 3.27. Bulanık çıktı.....	69
Şekil 3.28. Robot elin bir parmağının değişkenleri	70
Şekil 3.29. Robot elin işaret, orta, yüzük ve serçe parmağının teknik resimleri.	72
Şekil 3.30. Başparmağın x-z eksenleri arasındaki hareketi	77
Şekil 3.31. Başparmağın teknik resmi	77
Şekil 4.1. Robot el ve haptik geri bildirim sistemi kontrol yapısı	85
Şekil 4.2. Rampa girdisi.....	87
Şekil 4.3. Robot elin başparmağı için sistem cevabı	88
Şekil 4.4. Robot elin işaret parmağı için sistem cevabı	88
Şekil 4.5. Robot elin orta parmağı için sistem cevabı.....	89
Şekil 4.6. Robot elin yüzük parmağı için sistem cevabı	89
Şekil 4.7. Robot elin serçe parmağı için sistem cevabı.....	89

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Başparmağın titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri.....	90
Şekil 4.9. İşaret parmağının titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri	91
Şekil 4.10. Orta parmağın titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri	91
Şekil 4.11. Yüzük parmağının titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri	92
Şekil 4.12. Serçe parmağın titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri.....	92
Şekil 4.13. Kullanıcının göndermiş olduğu kontrol sinyali	94
Şekil 4.14. Kullanıcı komutu doğrultusunda robot elin başparmağının objeye uyguladığı kuvvet ve servo motorun konumu	94
Şekil 4.15. Kullanıcı komutu doğrultusunda robot elin işaret parmağının objeye uyguladığı kuvvet ve servo motorun konumu	95
Şekil 4.16. Kullanıcı komutu doğrultusunda robot elin orta parmağının objeye uyguladığı kuvvet ve servo motorun konumu	95
Şekil 4.17. Başparmağın titreşim motoruna, hafif-tut komutu uygulandığında (a) ve tut komutu uygulandığında (b) gönderilen PWM sinyalleri	96
Şekil 4.18. İşaret parmağının titreşim motoruna, hafif-tut komutu uygulandığında (a) ve tut komutu uygulandığında (b) gönderilen PWM sinyalleri	96
Şekil 4.19. Orta parmağın titreşim motoruna, hafif-tut komutu uygulandığında (a) ve tut komutu uygulandığında (b) gönderilen PWM sinyalleri	96

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. İlk uzaktan kontrollü mekanik manipülatör (Goertz, 1949).....	20
Resim 2.2. İlk endüstriyel robot (Devol ve Engelberger, 1959).....	20
Resim 2.3. Yumuşak tutucu (Hirose ve Umeten, 1978).	20
Resim 2.4. UTAH/MIT eli (Jacobsen ve diğerleri, 1986).	20
Resim 2.5. Belgrade/USC eli (Bekey ve diğerleri, 1990).....	20
Resim 2.6. NTU eli (Lin ve Huang, 1998).	20
Resim 2.7. TUAT/Karlsruhe eli (Fukaya ve diğerleri, 2000).....	20
Resim 2.8. DLR II eli (Butterfab ve diğerleri, 2001).....	20
Resim 2.9. Gifu eli (Kawasaki ve diğerleri, 2002).	20
Resim 2.10. Spring Eli (Carrozza ve diğerleri, 2004).....	20
Resim 2.11. LOWA eli (Yang ve diğerleri, 2004).....	20
Resim 2.12. Manus eli (Pons ve diğerleri, 2004).....	20
Resim 2.13. Beş parmaklı robot el (Yamano ve Maeno, 2005).....	21
Resim 2.14. Üç parmaklı robot el (Zollo ve diğerleri, 2007).	21
Resim 2.15. DLR-HIT eli (Liu ve diğerleri, 2007).....	21
Resim 2.16. Beş parmaklı protez el (Sedef, 2009).	21
Resim 2.17. KH robot eli (Mishima ve diğerleri, 2009).....	21
Resim 2.18. Beş parmaklı robot el (Kuo ve Chen, 2010).....	21
Resim 2.19. NAIST eli (Ueda ve diğerleri, 2010).	21
Resim 2.20. Beş parmaklı robot el (Kurita ve diğerleri, 2011).....	21
Resim 2.21. İ-HY eli (Odhner ve diğerleri, 2013).....	21
Resim 2.22. Pupin eli (Rodić ve diğerleri, 2013).	21
Resim 2.23. UB eli (Ficuciello ve diğerleri, 2014).....	21
Resim 2.24. Beş parmaklı robotik el (Savić ve diğerleri, 2016).....	21
Resim 2.25. X-Eli (Chen ve Xiong, 2016).....	22

Resim	Sayfa
Resim 2.26. Shadow El (Shadow Robot Şirketi, 2016).....	22
Resim 2.27. SHU-II eli (Xu ve diğerleri, 2018).	22
Resim 2.28. Robotik el TALOS (Fasoulasa ve diğerleri, 2017).....	22
Resim 2.29. Beş parmaklı robot el (Zhang ve diğerleri, 2018).....	22
Resim 2.30. ROBOSS el (Vulliez ve diğerleri, 2018).....	22
Resim 2.31. Tendon sürücülü haptik sistem (Turner ve diğerleri, 1998).	26
Resim 2.32. Pimli haptik bildirim sitemi (Kontarinis ve diğerleri, 1995).	26
Resim 2.33. Haptik bildirim sistemleri (Shen ve diğerleri, 2003).....	26
Resim 2.34. Phantom haptik cihaz (Song ve diğerleri, 2006).	26
Resim 2.35. Pnömatik haptik bildirim sistemi (Fan ve diğerleri, 2008).....	26
Resim 2.36. Haptik bildirim arayüz robotu (Mishima ve diğerleri, 2009).	26
Resim 2.37. Haptik arayüz robotu (Yoshikawa ve diğerleri, 2009).	27
Resim 2.38. Haptik eldiven (Ma ve Ben-Tzvi, 2013).....	27
Resim 2.39. ExoPhalanx isimli haptik eldiven (Fujimoto ve diğerleri, 2013).	27
Resim 2.40. Haptik cihaz (Casini ve diğerleri, 2015).....	27
Resim 2.41. Giyilebilir haptik cihaz (Hussain ve diğerleri, 2015).	27
Resim 2.42. Haptik dirsek (Lovaszt ve diğerleri, 2017).....	27
Resim 2.43. Haptik cihaz (Rossi ve diğerleri, 2018).	27
Resim 2.44. Haptik cihaz (Colella ve diğerleri, 2019).	27
Resim 3.1. Arduino-Mega.....	38
Resim 3.2. Mini titreşim motoru.....	39
Resim 3.3. (a) Robot elin ön kol ve (b) parmaklarının montajı.....	45
Resim 3.4. Robot elin ön kolda bulunan servo motorlar ile parmaklarına ait tendonların montaj edilmiş hali.....	46
Resim 3.5. Robot elin parmak uçlarının montaj yapılmış hali	46
Resim 3.6. Robot ele kuvvet sensörlerinin yerleştirilmesi	46
Resim 3.7. Robot elin montajının bitmiş hali	46

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Robot el.....	84
Resim 4.2. Haptik geri bildirim sistemi	84
Resim 4.3. Robot el ve kavranan obje	86
Resim 4.4. Robot el, hafif-tut (a) ve tut komutunu (b) uygulandığında robot el ve karton bardağın durumu	97



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Ψ	Eklem açısı (y eksenini etrafında dönme durumunda)
A_n	Dönüşüm matrisi
l_i	i. uzuv uzunluğu
x^*	x ekseninde ağırlık merkezi
$\mu(x)$	x'in üyelik fonksiyonu
Fa	Aktüatörden iletilen güç
k Ω	Kiloohm
k	Esneklik katsayısı
R	Direnç
V	Volt
α	İki mafsala arasındaki dönme açısı
θ	Eklem açısı (z eksenini etrafında dönme durumunda)

Kısaltmalar

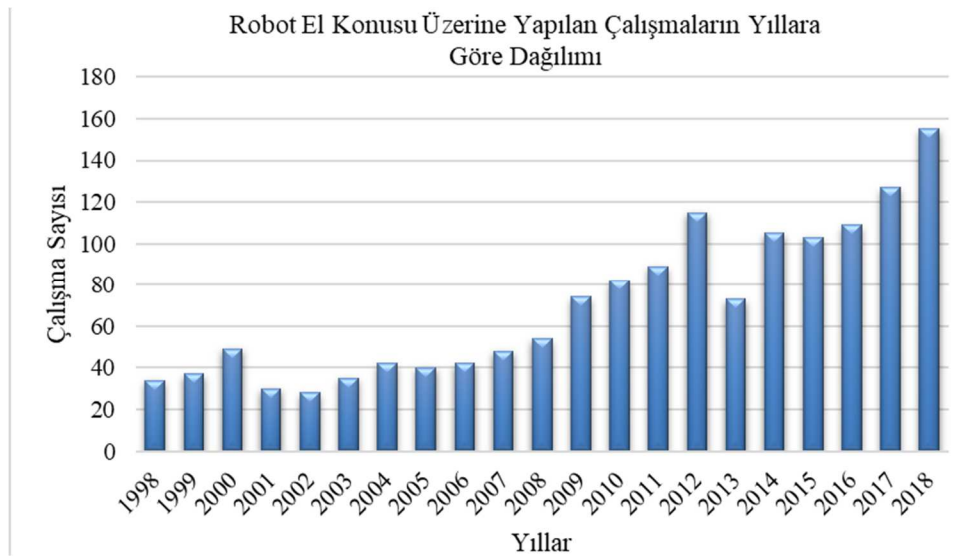
Açıklamalar

P_x	Parmak uçununun x ekseninde konumu
P_y	Parmak uçununun y ekseninde konumu
P_z	Parmak uçununun z ekseninde konumu
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ADC	Analog-Dijital Dönüştürücü
cm	Santimetre
cN	Santinevton
DAC	Dijital-Analog Dönüştürücü
DC	Doğru Akım
EEG	Elektroensefalografi
EMG	Elektromiyografi

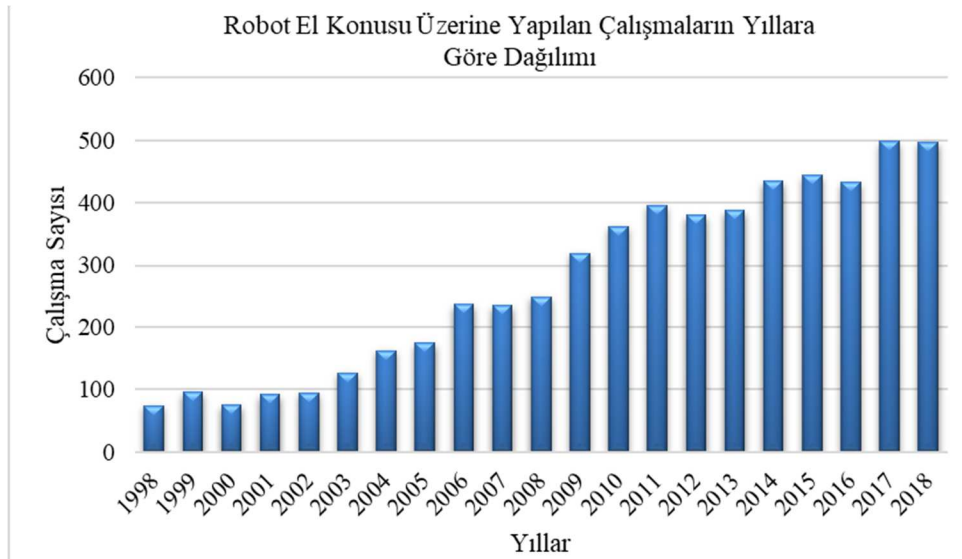
Kısaltmalar	Açıklamalar
FIS	Bulanık Çıkarım Sistemi
FSR	Kuvvete Duyarlı Direnç
g	Gram
kb	Kilobayt
kg	Kilogram
km	Kilometre
LVQ	Öğrenme Vektör İncelemesi
LWPR	İstatiksel Öğrenme Algoritması
m	Metre
mA	Miliamper
MHz	Megahertz
MIMO	Çok Girdili ve Çok Çıktılı Sistem
mm	Milimetre
PD	Oransal-Türevsel Kontrol
PI	Oransal-İntegral Kontrol
PID	Oransal-İntegral-Türevsel Denetleyici
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
rpm	dakikadaki devir sayısı
RVS	Robotik Görsel Servolama
s	Saniye
sEMG	Yüzey Elektromiyografi
Vçıkan	Sistemden çıkan gerilim
Vgiren	Sisteme giren gerilim
YSA	Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Günümüzde robotik sistemlerin kullanımıyla birlikte, üretimde oluşabilecek insan hata payı ve kaza oranının düşürülmesi sağlanmaktadır (Üzgün, 2015). Doğa insanların karşılaşmış olduğu birçok problemin çözümünü içinde barındırdığı için mühendisler robotik sistemlerin geliştirilmesinde doğada bulunan yapılardan esinlenmektedir. Doğada bulunan sistemlerden yola çıkılarak geliştirilen endüstriyel yapıdaki robotların kullanılması ile üretimde: kalite, verimlilik ve robotların çalışma performansı artmıştır (Bar-Cohen, 2005: 28). Bu doğrultuda robot manipülatörlerin insan eli yapısına olan benzerliklerinin arttığı ve bu konu üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı gözlemlenmektedir (Michalec, 2016; Wiste ve Goldfarb, 2017). Yapılan çalışmalar, elektronik/mekanik tasarımların iyileştirilmesini, hassas hareket ve kuvvet kontrollerinin yapılmasını veya mevcut yapıların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır (Karaçizmeli, Çakır, Tükel, 2014). Robot manipülatör çeşitlerinden birisi olan robot eller; üretimden araştırmaya, askeri alandan protez olarak kullanıma kadar çok geniş kullanım alanına sahiptir (Michalec, 2016). Bu nedenle robot el konusu farklı ihtiyaçlar doğrultusunda farklı kullanım alanlarına yönelik gelişmeye en açık çalışma konularından birisidir. Son 20 yılda robot eller konusunda yapılan yayınlar iki farklı veri tabanında (ScienceDirect ve IEEE Xplore Dijital Kütüphane) araştırılmış ve yıllara göre sayıları Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de grafikler halinde sunulmuştur. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de de görüldüğü üzere robot eller üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları artarak devam etmektedir.



Şekil 1.1. Robot el konusunda yapılan yayınların yıllara göre dağılımı (ScienceDirect)



Şekil 1.2. Robot el konusunda yapılan yayınların yıllara göre dağılımı (IEEE Xplore Dijital Kütüphane)

Robot ellerin nesneye uyguladıkları kuvvetin hassas kontrol edilememesi sebebiyle kavranan nesnenin zarar görmesi, çözülmesi gereken önemli bir problemdir (Sommer ve Billard, 2016). Bugüne kadar robot ellerde kuvvet kontrolüne ve nesnelere en uygun biçimde kavranmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Liu, Namiki, Teshigawra ve Tobita, 2017). Ayrıca robot ellerin kontrolünün hassaslaştırılmasına yönelik çalışmalara devam edilmektedir. Robot eller çok girdili ve çok çıktılı yapıya sahip sistemlerdir. Bu tip sistemlerin doğrusal bir modeli oluşturularak kontrol edilmesi oldukça güçtür (Boughdiri ve diğerleri, 2012; Katibeha, Eghtesadb ve Bazargan-Laric, 2016). Robot el sistemleri; nesnelere dokunmak, nesnelere tutmak, nesnelere deforme olmasını göz ardı ederek kavrama gibi işlevlerin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. Ancak bu işlevlerin gerçekleştirilmesi için uygun hareket formlarının oluşturulması, nesnelere kavranma kuvvetinin kontrolünün sağlanması ve matematiksel modellemeler kullanılarak bu çok girdili sistemlerin kontrolü oldukça karmaşık bir konudur (Katibeha ve diğerleri, 2016; Lin ve Huang, 1996; Yang, Zhang, Xu, H. Hu ve J. Hu, 2017). Robot el sistemleri için doğrusal model oluşturmanın güç olması sebebiyle mevcut olan sistemlerdeki kuvvet geri besleme sorununa yönelik geliştirilen çözüm yolları karmaşık ve kontrol stratejisinin geliştirilmesi zordur (Boughdiri ve diğerleri, 2012; Khakpour ve Birglen, 2013). Robot elin nesnelere uyguladığı kuvvetin kontrolünün karmaşıklığı ve hassasiyeti çözülmesi gereken önemli bir problemdir. Ayrıca robot el sistemleri kullanılırken robot elin nesneye uyguladığı kuvvetin kullanıcıya geri bildirim yapmaması ve bunun sonucunda kullanıcının robot el ile nesneye zarar verme durumu da önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorunun

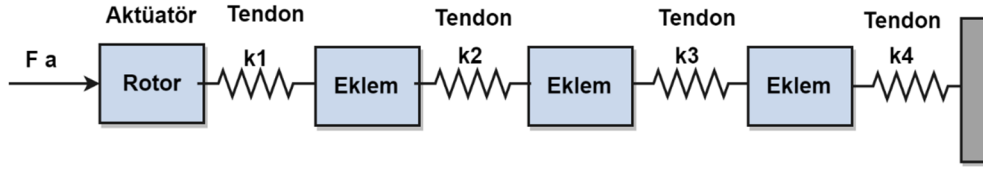
çözümü için haptik geri bildirim sistemi kullanılabilir. Haptik geri bildirim insanlara dokunsal geri bildirim sağlamayı amaçlayan çalışmaları kapsamaktadır (Üstünel, 2014). Tarihi 20. yüzyıla dayanan haptik teknolojisinin geliştirilmesi ve insan-makine etkileşimlerinden biri olan robot ellerde kullanılması, robot el sistemlerinin kontrol verimliliğini arttırmaktadır (Salisbury, Conti ve Barbagli, 2004; Pacchierotti, Meli, Chinello, Malvezzi ve Prattichizzo, 2015). Robot ellerin kontrolü sırasında kullanıcıya haptik geri bildirim sağlanması ile kullanıcının robot elleri kontrolü daha verimli bir şekilde sağlanmış ve kullanıcının kontrol sırasında yapmış olduğu hata payı azalmıştır (Stone, 2000; Mouri, Kawasaki ve Ueki, 2017). Bu sebeple insanların en temel duyularından biri olan dokunma duyusunun, insan ve robotların etkileşimleri için kullanılmasına yönelik çalışmalar artmıştır (Tiwana, Redmond ve Lovell, 2012; Çağlar, Orhan, Özen ve İnce, 2017). Haptik geri bildirim sistemleri; cerrahiden tele-operasyon sistemlerine, eğlenceden eğitime kadar pek çok alanda kullanılmakta ve kullanıldığı alanlara yönelik; hassaslaştırma ve geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir (Salisbury ve diğerleri, 2004; Üstünel, 2014; Abiri ve diğerleri, 2019).

Yapılan literatür çalışması neticesinde robot el sistemlerinin kontrolünde kullanıcı deneyimini arttırmaya yönelik kuvvet geri beslemesi ile kullanıcıya haptik geri bildirim hassas kontrolünde eksiklik tespit edilmiştir. Ayrıca robot elin kuvvet kontrolünün hassaslaştırılmasına yönelik çalışmaların çoğunluğunda, robot el sisteminin kullanıcıya haptik geri bildirim yapabilmesinin göz ardı edildiği belirlenmiştir. Haptik geri bildirim sisteminin hassas kontrol edilmesi; robot elin kullanıcı tarafından gönderilen görevleri başarı ile yerine getirmesinde ve kullanıcının robot el sistemini daha verimli kullanabilmesinde önem arz etmektedir. Sunulan bu tezde hem haptik geri bildirim sisteminin kontrolü hem de 5 parmaklı robot elin kuvvet kontrolünün hassaslaştırılması için bulanık mantık kontrolcü ile çalışmalar yapılmıştır.

Tezin amaç ve kapsamı

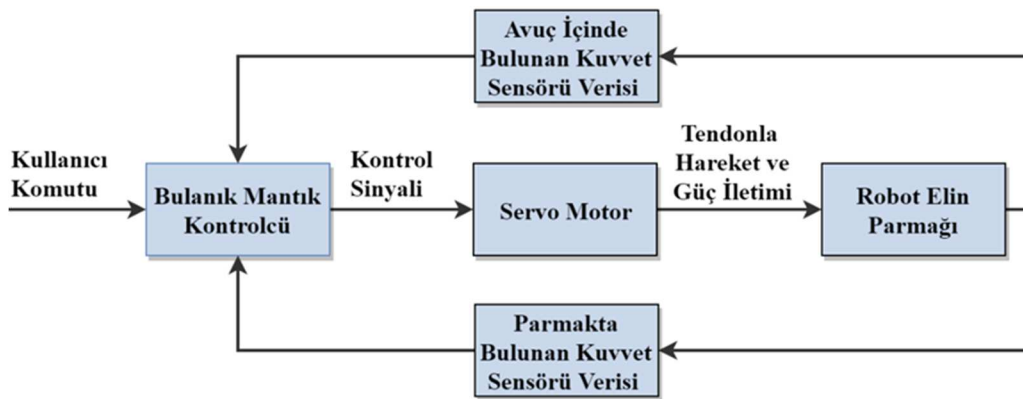
Bu tez kapsamında, 5 parmaklı robot el 3 boyutlu yazıcı ile basılmış, gerekli elektronik ve elektromekanik donanımları yerleştirilerek montajı yapılmıştır. Robot el servo motorlar ile sürülmekte olup, her parmak 1 motorla kontrol edilmektedir. Robot elde motorlardan parmaklara güç ve hareket iletimi tendonlar ile sağlanmaktadır. Robot elin 1 parmağının tendon temelli hareket ve güç iletim sistem yapısı Şekil 1.3'te sunulmuştur. Şekil 1.3'te Fa;

aktüatörden iletilen güç, k ; esneklik katsayısıdır.



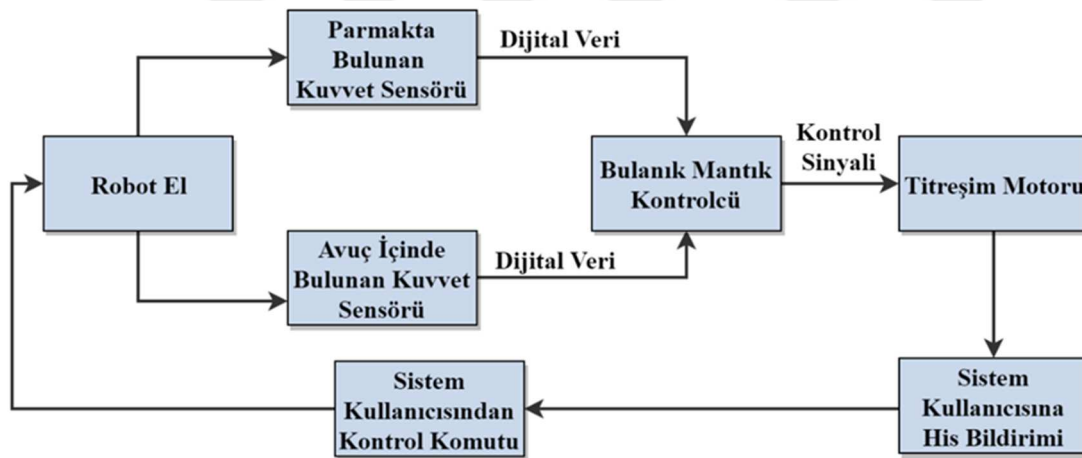
Şekil 1.3. Robot elin 1 parmağının tendon temelli hareket ve güç iletim sistemi yapısı

Tez çalışması kapsamında 5 parmaklı robot elin kuvvet geri besleme sorunu üzerinde durulmuş, bu sorunun olabildiğince basit ve hassas bir şekilde çözüme kavuşturulması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda kuvvet kontrolünde matematiksel ifadeleri, dilsel ifadelerle temsil etmesi ve sezgisel uygulamalarda iyi sonuçlar vermesi sebebiyle yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık yöntemi kullanılarak bir kontrolcü geliştirilmiştir. Robot elin nesnelere uyguladığı kuvvet, kuvvet sensörleri vasıtasıyla ölçülmektedir. Bu sensörlerden elde edilen veriler bulanık mantık kontrolcü için kuvvet geri beslemesi olarak kullanılmaktadır. Bulanık mantık kontrol sisteminin robot eli kontrolü sırasında değerlendirmede kullanacağı referans değer ise kullanıcı tarafından bir potansiyometre aracılığıyla gönderilmektedir. Bu sayede geliştirilen kontrol sistemi ile kullanıcı temelli hassas kuvvet kontrolü yapılabilmektedir. Kontrol sistemi robot elde test edilmiş ve kullanıcının istediği kavrama kuvvetinin kontrolü sağlanmıştır. Robot elin her bir parmağı, kullanıcı tarafından gönderilen tek bir kontrol sinyaline göre nesneye uyguladığı kuvveti birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol etmektedir. Bu sayede robot elin parmakları kavranan nesnenin şekline göre hareket edebilmektedir. Robot elin bir parmağı için oluşturulan kapalı çevrim kontrol yapısının blok diyagramı Şekil 1.4'te verilmiştir.



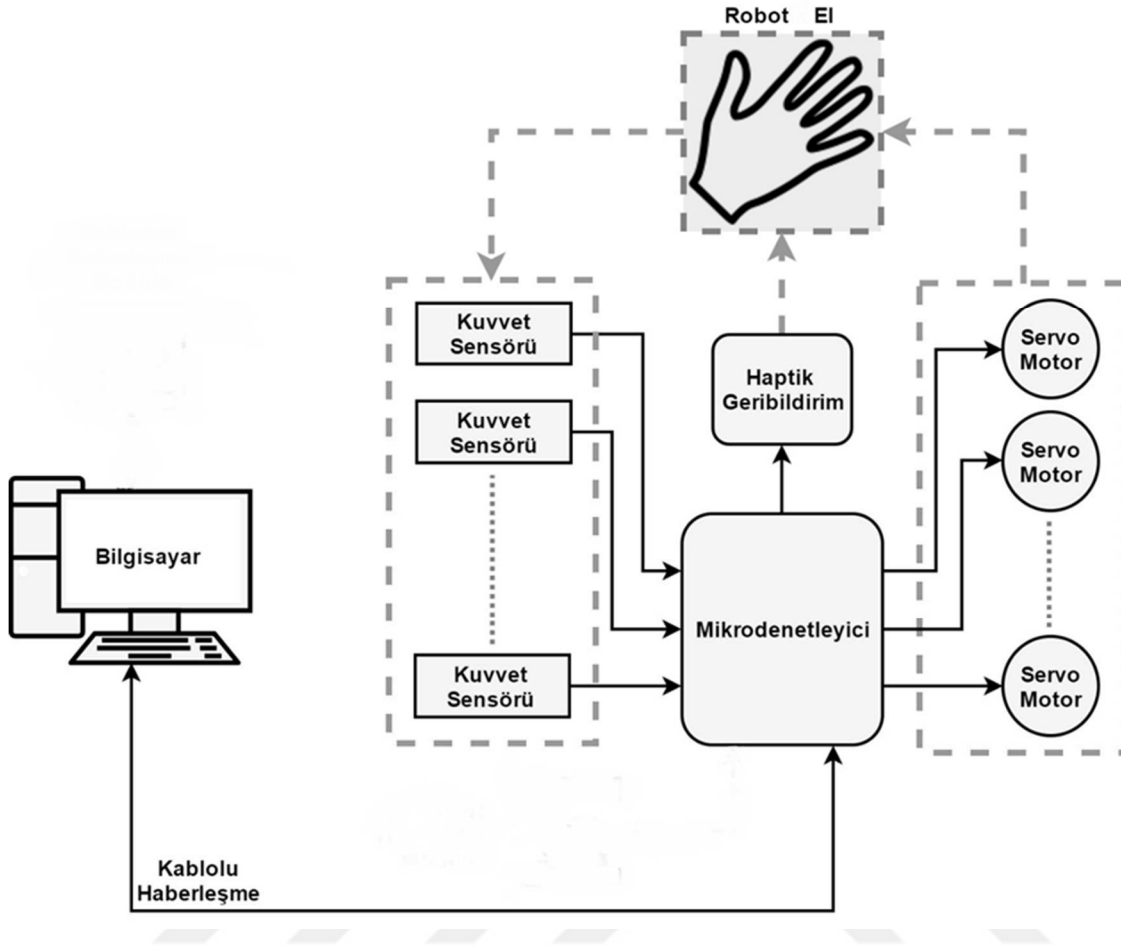
Şekil 1.4. Robot elin 1 parmağının kuvvet geri beslemeli kontrol yapısının blok diyagramı ile gösterimi

Kullanıcının kavrama kuvvetinin şiddetini algılayabilmesi için ise haptik geri bildirim sistemi oluşturulmuştur. Çalışmada haptik geri bildirim için titreşim motoru kullanılmış olup bu sayede kullanıcıya hareket kısıtlaması olmaksızın dokunsal geri bildirim sağlanması amaçlanmıştır. Haptik geri bildirim hassaslaştırılması için sistemden gelen sensör verileri uygun bir şekilde işlenmeli ve uygun kontrol sinyali üretilmelidir. Doğrusal olmayan sistemlere ve karmaşık problemlere rahatlıkla uygulanabilmesi sebebiyle sensör verilerinin işlenmesinde bulanık mantık kullanılmıştır. Sistem çok girdili bir yapıda olup, önerilen kontrol sistemi ile sistem üzerinde bulunan kuvvet sensörü verileri bulanık mantık kontrolör ile değerlendirilmekte ve uygun kontrol sinyali titreşim motoruna gönderilmektedir. Bu sayede kullanıcı nesneye uyguladığı kuvveti, kuvvete göre değişen titreşim miktarıyla nesneyi ne kadar sıkı tuttuğunu herhangi bir hareket kısıtlaması olmadan hissedebilecektir. Bulanık mantık kontrolör vasıtasıyla haptik geri bildirim hassaslaştırılmıştır. Ayrıca her bir parmak için ayrı ayrı haptik geri bildirim yapabilen bir sistem geliştirilmiştir. Haptik geri bildirim sistemi blok diyagramı ile Şekil 1.5'te sunulmaktadır.



Şekil 1.5. Haptik geri bildirim sisteminin blok diyagramı

Oluşturulan sistem ve kontrol yapısı ile kullanıcı nesnelere kavrama kuvvetinin kontrolünü daha verimli bir şekilde gerçekleştirebilecektir. Haptik geri bildirim için robot elin genel kontrol yapısının blok diyagramı Şekil 1.6'da sunulmuştur. Tez kapsamında geliştirilen kuvvet, hareket kontrolü ve haptik geri bildirim sistem kontrolü test edilmiş, deney sonuçları sunulmuştur.



Şekil 1.6. Haptik geri bildirimle sahip robot elin kontrol blok diyagramı

Tezin katkısı

Çalışmalar kapsamında robot ellerde kuvvet ve hareket kontrolünün hassaslaştırılması ve kullanıcı deneyiminin artırılması hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda çalışmalar yapılmış, benzetim ve deneysel sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarının katkıları aşağıda listelenmiştir.

- Literatür incelemeleri robot el ve haptik bildirim sistemleri için ayrı ayrı yapılmış, detaylı bir literatür taraması sunulmuştur.
- Sistemde kullanılan kuvvet sensörü farklı kuvvet değerlerinde test edilmiş, eğri uydurma yöntemi ile sensörün kuvvet-okunan dijital değer değişiminin matematiksel denklemi elde edilmiştir.

- Robot el sistemi için kuvvet geri besleme verileri bulanık mantıkla işlenerek, akıllı bir karar verme yapısı oluşturulmuştur. Geliştirilen kontrolcü ile robot el, kullanıcı sinyali doğrultusunda nesnelerin kavrama kuvvetine daha hassas bir şekilde karar verebilmektedir.
- Oluşturulan kontrol sistemi, lineer olmayan sensör verilerini değerlendirmiş ve değerlendirme sonucunda elde edilen uygun kontrol sinyali titreşim motorlarına gönderilerek haptik geri bildirim sistemi hassaslaştırılmıştır. Haptik geri bildirim sisteminin hassaslaştırılmasıyla kullanıcı deneyiminin (tutma, kavrama hissi) artırılması sağlanacaktır. Robot elin kullanım performansı artacaktır.
- Oluşturulan haptik geri bildirim yapısı ve robot elin kontrol yapısı farklı serbestlik derecesine ve farklı parmak sayısındaki kavrayıcılara uygulanabilir yapıda olup, kullanım alanı geniştir.

Tezin birinci bölümünde (giriş bölümü)

Robot el konusuna kısa bir giriş yapılmış. Robot el üzerine yapılan çalışma sayıları yıllara göre, grafikler ile sunulmuş, robot el sistemlerinde karşılaşılan ve çözülmesi gereken sorunlar belirlenmiştir. Ardından tez kapsamında yapılan çalışmalar ve önerilen çözüm yollarından bahsedilmiştir. Robot el sisteminin kontrol yapısı ve haptik geri bildirim sisteminin kontrol yapısının blok diyagramları sunulmuştur. Daha sonra tez çalışmasının katkıları listelenmiştir. Bu bölümün en sonunda ise tez yapısı hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin 2. bölümünde (önceki çalışmalar bölümü)

Detaylı bir literatür taraması yapılmış, geçmişten bugüne yapılan ve önemli olduğu düşünülen çalışmalar listelenmiştir. Literatür çalışmaları 2 bölümde incelenmiştir. İlk olarak robot eller üzerine yapılan çalışmalar sunulmuş. Ardından haptik bildirim sistemleri üzerine yapılan çalışmalar listelenmiştir. Bu bölümde son olarak da robot el sistemlerinin kullanım alanlarına değinilmiştir.

Tezin 3. bölümünde (materyal ve yöntem bölümü)

Açık ve kapalı kontrol çevrimleri anlatılmış. Yapay zeka hakkında kısa bir bilgi verilmiştir. Tez kapsamında kullanılan bulanık mantık ise detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Daha sonra sistemde kullanılan elektronik, elektromekanik ve mekanik; cihazlar ve komponentler hakkında bilgi verilmiştir. Ardından tez kapsamında kullanılan 5 parmaklı robot elin mekanik yapısı ve elektronik donanımı sunulmuştur. Robot elin parmaklarının kinematik ve ters kinematik denklemleri elde edilmiştir. Bu bölümde son olarak robot el sisteminin ve haptik geri bildirim sisteminin kontrol yapısı anlatılmıştır.

Tezin 4. bölümünde (araştırma bulguları ve tartışma bölümünde)

Önerilen bulanık mantık kontrol yapısı detaylı bir şekilde açıklanmış. Bulanık mantık kontrol yapısı robot el üzerinde ve haptik geri bildirim sistemi üzerinde test edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar grafikler halinde sunulmuş ve gerekli açıklamalar yapılmıştır.

Tezin 5. bölümünde (sonuç ve öneriler bölümü)

Tez kapsamında tartışılan, incelenen ve önerilen yöntemler için kısa bir değerlendirme yapılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bundan sonraki çalışmaların daha da ilerletilmesi için yapılabilecek çalışmalar hakkında kısa bir değerlendirme yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Son yıllarda gelişen teknoloji ile robotlar üzerine yapılan çalışmaların ciddi oranda arttığı gözlenmektedir (Fukaya, Ogasawara, 2017; Jeong, K. Kim ve S. Kim, 2017). Robotik sistemlerde robot el konusu, farklı ihtiyaçlar doğrultusunda farklı kullanım alanlarına yönelik olarak gelişmeye en açık çalışma alanlarından birisidir (Kobayashi, Kitabayashi, Shimizu, Nakamoto ve Kojima, 2016; Fu, Yang, Song ve Zhang, 2017; Lee, J. Park, S.Park, Baeg ve Bae, 2017). Bu doğrultuda yapılan çalışmalar, elektronik/mekanik tasarımların iyileştirilmesini, hassas hareket ve kuvvet kontrollerinin yapılmasını ve haptik teknolojinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Haptik teknolojisi; uzaktan kontrollü sistemlerde ya da sanal gerçeklik uygulamalarında geniş kullanım alanı bulan, kullanıcıya tepkisel geri bildirim vererek his geri bildirimini yapmayı amaçlayan çalışmaları içermektedir (Hatzfeld, Kern, 2016; Karaca ve Conker, 2018). Tezin bu bölümünde önce robot eller üzerine yapılan ve önemli olduğu düşünülen çalışmalar tanıtılacak, daha sonra ise haptik sistemler üzerine yapılan çalışmalar incelenecektir. Bölümün sonunda ise bazı robot el sistemlerinin kullanım alanları anlatılacaktır.

2.1. Robot Eller Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Robot el (manipülator) sistemleri 20.yüzyıl itibariyle gelişmeye başlayan sistemlerdir ve bu sistemler üzerine yapılan çalışmalar hızla devam etmektedir.

Goertz (1949) Argonne Milli Laboratuvarında radyoaktif malzemeleri işlemek için, ilk uzaktan kontrollü mekanik manipülatorü geliştirmiştir. Geliştirilen sistem, ana-uydu (master-slave) tipindedir. Ana manipülatöre kullanıcı tarafından bir dizi hareket verilmekte uydu olansa bu hareketleri mümkün olduğu kadar hızlı takip etmektedir. Kavrama işlemini çubuk mekanizmaları ile, yarı universal eklemler ve pençe benzeri el yardımıyla sağlamışlardır. Devol (1954), bir cihaz geliştirmiş ve adını “programlanabilir eklemlerli transfer cihazı” koymuştur. Devol tarafından geliştirilen bu cihaz; bir dizi hareket adımlarından oluşan işlemleri (belirli bir konumda bulunan bir nesneyi kavrayıp, belirlenen başka konuma bırakmak gibi) program içerisindeki komutlar tarafından gerçekleştirmektedir. Bu cihaz, tarihte geliştirilen ilk programlanabilir elektromekanik manipülator olarak kabul edilmektedir. Devol ve Engelberger (1959), ilk endüstriyel robotlara öncülük etmişlerdir. Bu cihazın özelliği bir manipülatorle bir bilgisayarın uyumlu

çalışması sonucu ortaya çıkan birçok farklı görevi otomatik olarak gerçekleştirebilen bir makine olmasıdır. Hirose ve Umeteni (1978), mekanik yapısı sayesinde nesneyi şekline göre adaptif şekilde kavrayabilen yumuşak tutucuyu geliştirmişlerdir. Tutucu üzerinde bulunan dokunma sensörlerinin verileri, birbirinden bağımsız olarak iletilmektedir. Bir motor ile kontrol edilen bu prototip, bağlantı kasnakları vasıtasıyla kuvvetleri dağıtmaktadır. Geliştirdikleri sistemin üniform basınç ile her şekildeki nesneyi tutabildiğini sunmuşlardır. Jacobsen, Iversen, Knutti, Johnson ve Biggers (1986), UTAH/MIT elini geliştirmiştir. El 4 parmaklı ve 16 serbestlik derecesine sahiptir. Parmaklara pnömomatik motorlardan hareket iletimini tendonlarla sağlamışlardır. Bekey, Tomovic ve Zeljkovic (1990) yaptıkları çalışmada; Belgrade 5 parmaklı tutucuyu geliştirmişlerdir. Kavrama işlemi için ise algoritma geliştirmişlerdir. Belgrade el kavramadan önce hedef nesnenin konumunu, yönünü ve geometrisini görüş sisteminden alınan veriler ile birleştirmektedir. Geliştirilen kontrol algoritması; görev bilgisi ile istenilen kavrama modunu üretmekte ve el hedef kuvvete gelinceye kadar parmaklarını kapatmaktadır. Bu sayede insan eline benzer adaptif kavrama sağlamışlardır. Yan, El-Baradie ve Hashmi (1992) yaptıkları çalışmada, 2 parmaklı tutucu tasarlamışlardır. Tutucuya kuvvet sensörleri yerleştirilmiştir. Bu sensörlerden gelen veriler geri beslemede kullanılarak robot kol ve elin; pozisyon ve kuvvet uyum kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrol sistemiyle; robot kolun kinematik denklemleri ile kolun pozisyon uyum planlaması ve elin kuvvet uyum planlamasını sağlamışlardır. Jimenez ve diğerleri (1997) yapmış oldukları çalışmada, parmaklarına dokunma sensörleri yerleştirilen 2 parmaklı tutucuyu oluşturmuşlardır. Tutucunun nesneyi en iyi şekilde kavraması ve tutması için dokunma sensörlerinden gelen veriler doğrultusunda, bir öğrenme vektör incelemesi ağı (LVQ Network) uygulanarak nesnelere şekil sınıflandırılması yapılmıştır. Tutucunun nesnelere temasındaki basınç dağılımını, dokunsal görüntüler ile temsil etmişlerdir. Dokunsal görüntüleri LVQ network ile işlemiş ve 4 grup için (yassı, köşeli, silindir, küresel) şekil sınıflandırması ile test etmişlerdir. Şekil sınıflandırmasının %93 başarı oranına sahip olduğunu sunmuşlardır. Lin ve Huang (1998), 17 serbestlik derecesine sahip beş parmaklı robot el tasarlamışlardır. 17 serbestlik derecesine sahip elin her bir eklemi ayrı ayrı kontrol edilebilmekte ve tasarımı ile bütün elektronik ve elektromekanik cihazlar, devreler elin içinde yer almaktadır. Bu sayede protez olarak kullanımında kolaylık sağlamışlardır. Geliştirdikleri algoritma ile simülasyonda çokgen ve silindir şeklindeki nesnelere en uygun pozisyon için temas noktalarının seçilmesini sağlamış olduklarını sunmuşlardır. Fukaya, Toyama, Asfour ve Dillmann (2000), 20 serbestlik derecesine sahip

5 parmaklı tek bir motorla kontrol edilebilen bir el tasarlamışlardır. Bütün parmakları aynı kuvveti uygulayabilmekte ve 6 temel tutma işlevini yerine getirebilmekte olduğunu ve çalışmalarında robot elin 1 motorla kontrol edilmesi sebebiyle kontrol karmaşıklığını giderdiklerini savunmuşlardır. Zsiros, Baranyi, Kovari ve Korondi (2000) yapmış oldukları çalışmada, 20 serbestlik derecesine sahip, SMA (biçim bellekli alaşımlar) ile hareket ettirilen el için, doğrusal olmayan özelliklerini öğrenebilen yapay sinir ağı geliştirmiştir. Bir kamera kullanılarak eklem pozisyonlarını tespit ederek SMA akülatörlerinin kontrol problemi için genelleştirilmiş yapay sinir ağı ile çözüm önermişlerdir. Operatör verileri, kamera verileri ve motor pozisyonu yapay sinir ağı ile değerlendirilerek aküatörlerin kontrolü ile elin kontrolünü sağlamışlardır. ButterfaB, Grebenstein, Liu ve Hirzinger (2001) yapmış oldukları çalışmada, manipülatör harici bir bilgisayar ile seri haberleşme yaparak kontrol edilmektedir. Sensörlerden gelen veriler ve bilgisayardan gelen veriler doğrultusunda nesneye uygun kavrama sağlayabilmektedir. Parmakların kartezyen empedans kontrolü yapılmıştır. Empedans kontrolünde hatayı düşürmek için PI kontrol uygulamışlardır. Coelho, Piater ve Grupen (2001) yapmış oldukları çalışmada, yeni bir kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Kontrol yöntemini çevrimiçi, artımlı öğrenme görevleri sırasında güvensiz kontrol kombinasyonlarını ortadan kaldırmak için tasarlamışlardır. Yapılan çalışmada ilk önce kapalı döngü haptik kontrol modelleri edinilmiş ardından görsel verilerle güçlendirilmiştir. Haptik ve görsel öğrenme ardışık olarak sınıflandırılmıştır. Öğrenme sonrası elde edilen veriler ile insan tutma davranışına çok yakın sonuçlar elde ettiklerini sunmuşlardır. Geliştirilen kontrol yöntemi sonucu; artarak edinilen ulaşma ve kavrama becerisi kazandırmışlardır. Kawasaki, Komatsu ve Uchiyama (2002) yapmış oldukları çalışmada, 20 eklem ve 16 serbestlik derecesine sahip elin güç iletimi dişliler ile sağlanmıştır. El bilgisayar tabanlı robot el kumandası ile kontrol edilmiştir. Eklem, bağlantı pozisyonu ve temas kuvveti ile hibrit bir kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Temas olmadığı durumda PID kontrol eklem pozisyon kontrolüne uygulanmış ve temas durumunda pozisyon ve kuvvetin hibrit kontrolü gerçekleştirilmiştir. Geniş bant genişliği ile insan elinden daha hızlı tepki verebildiği yaptıkları çalışmada sunulmuştur. Carrozza ve diğerlerinin (2004) yapmış oldukları çalışmada, EMG sinyalleriyle kontrol edilen üç parmaklı sekiz serbestlik derecesine sahip el tasarımı yapılmıştır. Her parmak falanksı arasına yay yerleştirilerek düzensiz nesnelere kavranması sağlanmıştır. Kavrama gücü sürtünme katsayısına dayanan yeni bir yöntemle ölçülmüştür. Kavramada kuvvet kontrolü için kapalı döngü kontrol uygulamışlardır. Yang, Pitarch, Abdel-Malek, Patrick ve Lindkvist (2004) yapmış oldukları çalışmada, beş parmaklı

LOWA elini tasarlamışlardır. Tasarlanan elin parmaklarının yay kullanılarak oluşturulması, parmak hareketinin parmakların içine yer alan kablo kanal sistemi ile gerçekleştirilmesi ve kavrama sırasında parmakların kendilerine özgü uyumluluğunu koruması sağlanmıştır. Tasarlanan elin parmakları hem aksenel hem de çapraz yönde sıkışmaya izin veren yapıya sahip olduğunu çalışmalarında sunmuşlardır. Pons ve diğerlerinin (2004) yapmış oldukları çalışmada, 10 serbestlik derecesine sahip beş parmaklı el tasarımı yapılmıştır. Yapılan çalışmada kullanıcı; parmak hareketlerini EMG sensörü ile kontrol etmektedir. PID kontrolle konum ve kuvvet sensörlerinden gelen veriler işlenip parmağın uyguladığı tork ayarlanmaktadır. Başparmakta bulunan genova mekanizması ile 2 eksenli mafsalsın hareketlerinin yönlendirilmesini bir motorla yapmışlardır. Osswald ve diğerlerinin (2004) yapmış oldukları çalışmada; üst kol ile elin birlikte kontrol edilmesi sayesinde güvenli ve stabil eklem açısı, tork kontrolü ve parmak koordinasyonu sağlanmıştır. Çevredeki nesnelere dayanarak, gereken kavrama kalıplarını tanımlamak için kullanılacak bir kavrama sınıflandırması (taksonomisi) geliştirilmiştir. Önerdikleri sistem ile nesnelere bağlı olarak kavrama becerileri ve hareket koordinasyonu sağlanmıştır. İlk olarak dokunma sensöründen elde edilen veri ile nesnenin şekli belirlenir ve bir model elde edilir. Modeli referans modelle karşılaştırarak kavramayı optimize etmişlerdir. Yamano ve Maeno (2005) yapmış oldukları çalışmada, 20 serbestlik derecesine sahip 5 parmaklı el tasarlamışlardır. El ultrasonik motorlar ve eklemler arasına yerleştirilen elastik elamanlar kullanılarak yönlendirilmektedir. Eklemlerin elastikiyeti yayların katsayıları ile ayarlanabilmektedir. Motorların dönme açısı ile eklemlerin açısına bakılarak nesneye uygulanan kuvveti hesaplamışlardır. Motor gücü kapalı olsa dahi elastik elamanların gerinim enerjisi sayesinde tutarlı tutuş sağlayabildiğini savunmuşlardır. Çalışma 16 kavrama biçimi için test edilmiş ve kavrama işlemlerini başarı ile gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Zollo, Roccella, Guglielmelli, Corrozza ve Dario (2007) yapmış oldukları çalışmada; yapay elin mekanik tasarımını, el kontrol sisteminin tasarımı ile uyumlu hale getirmek ve insan elinin kinematik ve dinamik yapısına benzer el tasarımı yapılabilmesi için biyomekatronik yaklaşımla elin tasarımının ve kontrol sisteminin optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Tasarımın robotik el uygulamaların da kullanılabilmesi için mekanik yapı, motor sayısı ile serbestlik derecesi arasındaki oran optimize edilmiştir. Çalışmada elde edilen verileri 1 parmak için simüle etmişlerdir. Parmakların eklem açısı, tendon gerginliği/motor hareketini PD kontrol ile kontrol etmişlerdir. Adıgüzel'in (2007) yaptığı çalışmada, doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol edici bloklarının bir arada tasarlanabilmesi için yeni bir yaklaşım önermiştir. Önerilen

kontrol yaklaşımı ile robot manipülatörlerin davranışının sadece takip hatası bilgisi kullanılarak ne düzeyde doğrusal yapılabileceği incelenmiştir. Robot manipülatör sisteminin kontrol düzeneğinde önerilen yaklaşık geri beslemeli doğrusallaştırma metodunun kullanılması ile daha önce ortaya çıkan konum hatalarını etkin bir şekilde giderebildiklerini savunmuşlardır. Liu ve diğerleri (2007) yaptıkları çalışmada, 4 parmaklı, 13 serbestlik derecesine ve çok sensörlü yapıya sahip (DLR/HIT) el üzerinde 5 aşamalı modüler kontrol sistemi geliştirmiş ve uygulamıştır. Kontrol sistemi; düşük seviyeli kontrol aşaması, parmaktaki dataların işlemesi, eldeki dataların işlemesi, yüksek seviyeli kontrol ve dış kumanda aşamasından oluşmaktadır. Sistem test edilerek kendi kendine kavramada ve tele-operasyon denemelerinde kontrol mimarisinin elin kontrolünde başarılı olduğu gösterilmiştir. Gosselin, Pelletier ve Laliberte (2008) yapmış oldukları çalışmada, 15 serbestlik derecesine sahip bir robot el tasarlanmıştır. Yaptıkları çalışmada tek bir tendondan yapılan tahrik ile beş parmağın kavrama hareketi gerçekleştirebildiğini sunmuşlardır. Takahashi ve diğerlerinin (2008) yapmış oldukları çalışmada, 12 serbestlik derecesine sahip 3 parmaklı el kullanılmıştır. Her parmakta enkoder, dokunma sensörü ve kuvvet sensörü kullanılmıştır. Niteliği bilinmeyen cisimlerin adaptif kavranması ve uygun kuvvetin uygulanması için gürbüz kuvvet ve pozisyon kontrol metodu ile yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Gürbüz kontrol ile parmaklarda bulunan servo motorların akım kontrolü gerçekleştirilerek konum ve kuvvet kontrolü sağlanmıştır. Geliştirilen algoritmanın hızlı ve sorunsuz kontrol gerçekleştirdiğini sunmuşlardır. Sedef'in (2009) yılında yapmış olduğu çalışmada, yeni bir protez el tasarımı yapılmıştır. Baş parmak iki, diğer parmaklar üçer serbestlik derecesine sahiptir. Orta, yüzük ve serçe parmak birbirine bağlı olup, ortak hareket etmektedir. Eklemler arası hareket iletimi hareket itme çubuğu ile sağlanmıştır. Berselli ve diğerlerinin (2009) yapmış oldukları çalışmada, parmağa entegre edilmiş dokunma sensörleri, optik gerilim sensörü ve minyatür yük sensörü ile yenilikçi bir parmak tasarlanmıştır. Sensörlerle, parmakların mekanik yapısı uyumlu yaklaşım sergilemiştir. Parmakların hareketi tendonlar ile sağlanmakta olup, tendonlar bir dizi kayar yol içerisinde hareket etmektedir, bu sebeple tendon elastikiyeti ve sürtünmenin kombine etkisi düzeltilebilmesine yönelik uygun kontrol stratejisi uygulanarak eklem açıları ve nesneye uygulanan kuvveti kontrol etmişlerdir. Mishima, Kawasaki, Mouri, ve Endo (2009) yapmış oldukları çalışmada, ana-uydu elleri arası iletişim ve kontrol sağlamışlardır. Yapılan çalışmada 20 eklemlili 15 serbestlik derecesine sahip, 5 parmaklı robot el (KH el) uydu eli olarak kullanılmıştır. Çok parmaklı haptik arayüz robotu Hiro III ana sistem olarak kullanılmıştır. Ana kolundan gönderilen komutlar uydu eli tarafından başarı ile

gerçekleştirilmiş ve de kullanıcıya 3 boyutlu kuvvet sensörü verileri, kuvvet geri bildirimini Hiro III haptik arayüz eli sayesinde hissettirilmiştir. Ana elin kuvvet kontrolü uydu elinden gelen komutlar doğrultusunda PI kontrol ile kontrol edilmiştir. Uydu elinin konum kontrolü ana elinden gelen veriler doğrultusunda PID kontrolör ile kontrol edilmiştir. Sunulan çalışma ile 3 boyutlu manipülasyonunun başarılı olduğu gösterilmiştir. Kuo ve Chen'nin (2010) yapmış oldukları çalışmada, 5 parmaklı ve 16 eklemde oluşan, hareket iletimi tendonlarla yapılan el tasarlanmıştır. Bu el üzerinde dokunmaya dayalı kavrama hareketi planlama sistemi geliştirilmiştir. Kuvvet geri beslemeli kontrol uygulanmıştır. Parmak uçlarına yerleştirilen kuvvet sensörleri ile izin verilen maksimum kuvvete kadar kuvvet uygulayabilmekte ve daha önce tanımlanan ve hafızada bulunan kavrama hareketlerinin seçilmesi ile o kavrama hareketini yapabilmektedir. Tüm eklem açılarının değişimini, kavrama hareketi için gerekli zamana göre hesaplamışlardır. Parmak nesneye temas ettiğinde kuvvet sensörü verilerine göre izin verilen maksimum kuvvete kadar harekete devam etmektedir. Geçen zamana göre eklem açıları hesaplanmaktadır. Sistemin bütün parmaklardan kuvvet verisi alınana kadar kavrama işlemine devam eden bir sistem geliştirmişlerdir. Luo, Carbone, Ceccarelli ve Zhao (2010) yapmış oldukları çalışmada, 3 parmaklı elin parmaklarını hareket ettirmek ve döndürmek için yeni bir mekanizma tasarımı yapılmıştır. Planet dişli mekanizması ile konumlanan 2 parmak, kendi çevrelerinde ve eksenlerinde tek motor sayesinde dönebilmektedir. Bu sayede parmakların pozisyonları değiştirilerek daha iyi kavrama sağlanmıştır. Tasarlanan sistemi ADAMS ortamında simüle ederek, kinematik ve dinamik performansını değerlendirmişlerdir. Ueda, Kondo ve Ogasawara (2010) yapmış oldukları çalışmada, dört parmaklı toplamda on iki serbestlik derecesine sahip ve güç iletimi dişli mekanizmasıyla sağlanan bir el tasarlamışlardır. Tasarlanan sistem için tanıma algoritması kullanılmıştır. Algoritma ile basınç dağılım sensörü tarafında elde edilen zaman serisi verileri işlenerek her temas noktasının hareket yönü tespit edilmiştir. Temas noktasının baş parmak ve serçe parmağa karşılık gelen noktaları için ortalama yön hesaplamışlardır. Hesaplanan hareket yönü ile basit performans karakterini temsil etmişlerdir. Performans testi için eklem açısı kontrolünde PID kontrolcü kullanmışlardır. Kroemer, Detry, Piater ve Peters (2010) yapmış oldukları çalışmada, çeşitli makine öğrenmesi metotları kullanılarak kavrama işlemi için hiyerarşik yapıda aşamalı hibrit denetleme sunulmuştur. Yüksek seviye kontrolör; obje kavramalarında takviyeli öğrenme kullanarak nereden kavrayacağına karar verirken, düşük seviyeli kontrolörde taklit öğrenme ve görme temelli reaktif kontrolör sayesinde uygun kavrayış hareketlerini seçmektedir. Oluşturulan sistem ile yeni bir nesnenin kavranması

hızlı bir şekilde öğrenebildiğini sunmuşlardır. Kurita, Ono, Ikeda ve Ogasawara (2011) yapmış oldukları çalışmada, 20 serbestlik derecesine sahip bir el tasarlanmıştır. Elin her eklemi birbirinden bağımsız hareket edebilmektedir. Bu çalışmanın yeniliği sistemin sökülebilmesi ve tendonlara hareket iletiminin bilekte bulunan dişli takımı ile iletilmesidir. Eklem açısı hatasını düşürmek için oransal kontrol uygulamışlardır. Touvet ve diğerlerinin (2011) yapmış oldukları çalışmada, doğaya benzetim alanında bir robotik elin nesneye bağlı akıllıca erişmesi ve kavrama yeteneği kazandırılması için istatistiksel öğrenme algoritması (LWPR) tarafından eğitilmiş çoklu eşleştirme birimi kullanılmıştır. Birden çok eşleştirme ünitesinin temsili ağı, nesneye bağlı 5 parmaklı elin kavrama şekillendirmeleri ile uç noktalarının konumsal hatalarının birkaç milimetre seviyesinde tahminini sağlamış olduğu sunulmuştur. Tahminler hareket kinematiğinin kontrolünde uygulanmış ve kavrama, kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ergin'in (2012) yapmış olduğu çalışmada, her parmak iki serbestlik derecesine sahip olmak üzere, beş parmaklı robotik el tasarımı yapılmıştır. Yapısındaki lineer yaylar sayesinde iki eklem bir adet tahrik elamanı ile kontrol edilebilmiştir. Sunulan robotik elde sabit giriş torku uygulanmıştır. Sun ve Zhang'ın (2012) yapmış oldukları çalışmada, farklı nesne boyut ve şekillerine uyarlanabilir parmak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tutulan nesneye göre adaptasyon sağlayabilmesi için parmaklardaki orta falankslara kayar üst kapak sistemi geliştirilmiştir. Çalışmada eklemlerdeki kayar dişli sistemi ile eklemler nesneye temas edene kadar aynı miktarda ve eş zamanlı kapanmaktadır. Nesneye temas ettiğinde nesneye uyumlu kapanma işlemi gerçekleştirilebildiğini sunmuşlardır. Shauri, Saiki, Toritani ve Nomani (2012) yapmış oldukları çalışmada, 3 parmaklı çift kollu robot kullanılmıştır. Bu çalışmada nesnenin bir kamera tarafından tanınması, robotun uç efektörünün hedefe göre pozisyonunu kontrol etmesi ve kol pozisyonunu kontrol etmek için nesnelere göre pozisyon tahmini sağlayan bir robotik görsel servolama (RVS) yapısı uygulanmıştır. Ayrıca robotun parmaklarının kuvvet kontrolü ve uyumluluğu için empedans kontrolü uygulanmıştır. Görüntü ve kuvvet sensörleri sırayla çalışır; böylece görüntü ile ilk ölçümler sağlanır, manipülatör gelen veriler doğrultusunda yörünge planlaması yapar ve nesneye ulaşır, parmaklar hedefe temas ettikten sonra kuvvet sensörü verilerine göre kavrama işlemi gerçekleşmektedir. Bu çalışmada nesne veya ortam üzerindeki ölçülen verileri, robotun gerçek zamanlı çalışma sırasında yörüngesini oluşturmak ve robotun güvenliğini sağlamak için kullandıklarını sunmuşlardır. Saut ve Sidobre'nin (2012) yapmış oldukları çalışmada, kavrama planlama yöntemi için algoritma geliştirilmişlerdir. Çalışmada kavrama planlama, sadece robot elin ve kavranacak nesnenin dikkate alınması için algoritma oluşturulmuştur. Oluşturulan



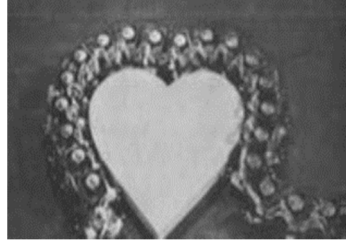
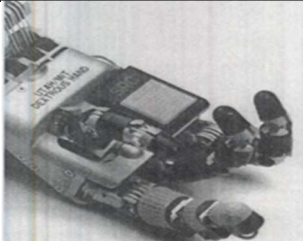
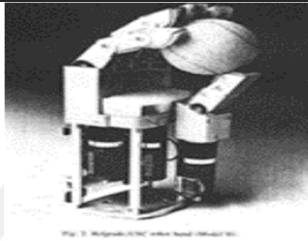
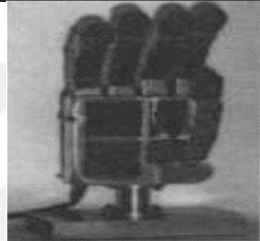
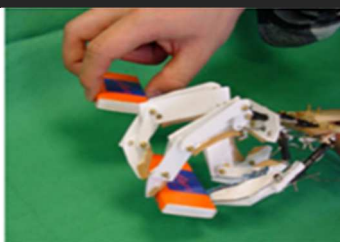


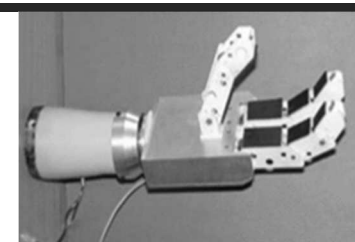
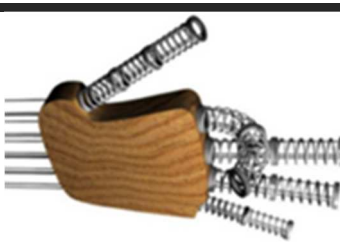
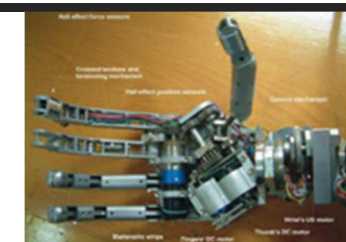
algoritma ile farklı nesnelere kavranması için kavrama şekilleri hesaplanır. Kavrama parmak çalışma hacmi ile nesnenin yüzey alanının kombinasyonuna dayanarak göreceli olarak değerlendirilir ve kavrama kalite kriterine göre sıralanmaktadır. Robot belirli bir durum için uygun kavramayı bulana kadar en iyi kavramadan en kötü kavramaya kadar durumu değerlendirmektedir. Böylece en uygun kavrama biçimini seçebilmektedir. Odhner ve diğerleri (2013) yapmış oldukları çalışmada, 5 motorla hareket ettirilen, 3 parmaklı oluşan İ-HY isimli eli tasarlamışlardır. Başparmağın düzlemdeki hareketi için 2 motor kullanılmaktadır. Sensörlerle donatılan elde, parmak ucuyla kavrama yeteneği geliştirilmiştir. Pasif parmak mekaniği kullanılarak kavranan nesnelere uygulanan kuvvetin ayarlanması sağlanmıştır. Kavrama esnasında nesneye temas edildiğinde parmakların her eklemi için moment ile orantılı, her parmak eklemine orantısız olarak uygun tork iletimi yapılmakta olduğu sunulmuştur. Rodić, Miloradovic, Popic ve Krsenkovic (2013) yapmış oldukları çalışmada, 23 serbestlik derecesine sahip tendonlarla sürülen modüler bir el geliştirmiştir. Her eklemden kasnaklar bulunan el servo motorlarla sürülmektedir. Chaudhary ve Raheja'nın (2013) yapmış oldukları çalışmada, doğal insan elini kullanarak robot eli yönlendirmek için yeni bir yaklaşım öne sürmüşlerdir. El hareketinden parmakların eklemlerinin yaptığı açıları gerçek zamanlı tespit ve ilgili robot elin kontrolünde gerçek zamanlı kullanılabilmesi için yapay sinir ağlarını kullanmışlardır. Çıplak el hareketlerinin algılanması bir kamera ile gerçekleştirilmiş, cilt filtresi uygulanarak işlem alanı tespit edilip kırılmıştır. Bu sayede parmak uçları ve avuç içi tespit edilerek mesafeler hesaplanmıştır ve YSA (yapay sinir ağları) ile sıralanmıştır. Algoritma hızlı hale getirilmiştir ve geliştirilen yöntem sanal ortamda test edilmiştir. Teng, Tsai ve Hsiao (2013) yapmış oldukları çalışmada, 4 serbestlik derecesine sahip 5 parmaklı el ve 6 serbestlik derecesine sahip bir kol tasarımı yapılmıştır. Yapılan çalışma ile hafif ve hızlı hareket kabiliyetine sahip manipülatör geliştirilmiştir. Robot manipülatörün kontrolünün ilk adımı mekanik sınırlamaları bulmak için her eklem bir doğrultu boyunca çalıştırılır. Eklem mekanik sınırlamaya ulaştığında aşırı akım sinyali oluşur ve kontrol programı son enkoder bilgilerini ana konum için referans olarak kaydeder. İstenen hareketi gerçekleştirmek için ise ters kinematik ve referans konum kullanılarak robot manipülatör kontrol edilebilmektedir. Yapılan bu çalışmada hareket kontrolü ve görsel özelliklerin tanınması ile nesne manipülasyonunu sağlamışlardır. Yesmunt (2014) yapmış olduğu çalışmada, her parmağı üçer serbestlik derecesine sahip 5 parmaklı el tasarımı yapmıştır. Modelin kinematik yaklaşımı geliştirilmesiyle kontrol algoritması oluşturulmuştur. Kontrol algoritmasıyla eklem istenilen pozisyonu alması sağlanmıştır. Motorun parametrelerinin

ayarlanması için PD kontrol uygulanmıştır. Hocaoglu'nun (2014) yapmış olduğu çalışmada, beş parmaklı on beş serbestlik derecesine sahip, eklemleri esnek malzemeden oluşturulan protez el tasarımı yapılmıştır. Çalışmada değişken rijitliğe sahip protez el ve tele-empedans kontrolü için yüzey elektromiyografi (sEMG) insan-makine ara yüzü geliştirmiştir. Elin istenen konumu ve rijitliği sEMG sinyalleri ile tahmin edilmektedir ve bu tahminler değişken rijitliğin aktivasyonunu sağlayarak el protezini kontrol etmektedir. Protez elin konum ve rijitliğini motor konumunu değiştirerek gerçekleştirmiştir. Çalışmada sunulan deneysel sonuçlar ile; hem pozisyonun hem de rijitliğin sEMG sinyalleri kullanılarak uygun şekilde tahmin edilebildiği sunulmuştur. Ficuciello, Palli, Melchiorri ve Siciliano (2014), beş parmaklı UB isimli el ile insan elinin kavrama şekillerini örnek alarak üç farklı baskın kavrama yeteneğini deneysel olarak değerlendirmiştir. 36 kavrama şeklinin kinematik kalıpları tanımlanmıştır ve basit bir kavrama yeteneği temelli kavrama yöntemi planlaması geliştirilmiştir. Bu çalışmada elle tutuşların referans durumları göz önüne alınarak parmaklarda konumsal kavrama yeteneği gerçekleştirilebildiği sunulmuştur. Bezak, Bozek ve Nikitin (2014) yapmış oldukları çalışmada, 3 parmaklı robotik elin; nesne algılama, nesne tanıma ve robotik el konum tahmini, derin öğrenme yöntemi ile sağlanmıştır. Yöntem sayesinde nesneye uygulanan kuvvetler belirlenebilmektedir. Çalışmada kavranacak nesnenin özellikleri bilindiği varsayılmaktadır. Ve 3 parmaklı robot el için Matlab SimMechanics üzerinden test yapılmıştır. Nesne kavrama 2 aşamalıdır: önce kamera tarafından nesne tespit edilir, el istenen yere ulaşır ve daha sonra nesne ile temas kurar. İkinci aşamada; herhangi bir kayma olmadan kavramak için, nesnenin sertlik derecesine bağlı olarak nesneye uygulanacak ideal bir kuvvetin belirlendiğini ve nesnenin güvenli bir şekilde kavranabildiğini savunmuşlardır. Grossard (2015) yapmış olduğu çalışmada, 24 serbestlik derecesine sahip 5 parmaklı elin kontrol edilmesine odaklanmıştır. Yalnızca bir dijital sinyal işleme bordu (dsp) ile bir parmağın esneklik, uzama, hareket için geri bildirim ve ileri beslemeye yönelik veriler eklemlerde bulunan gömülü dc motora uygulanmıştır. Bu çalışmada yüksek girdi ve çıktı sayısı sebebiyle hassas kontrol için karmaşık kontrol tasarımı geliştirilmiştir. Shadow Robot şirketi tarafından (2015) geliştirilen 5 parmaklı robot el tasarımı, 20 serbestlik derecesi ve 24 ekleme sahiptir. Her eklemin pnömomatik ve elektrik motorlarıyla hassas kontrol edilebildiği sunulmuştur. Savic ve diğerlerinin (2016) yaptıkları çalışmada, 16 serbestlik derecesine sahip, güç ve kontrol elektronikleri, motorları avuç içinde bulunan robot el geliştirilmiştir. Robot elde parmakların ucunda ve tabanlarında 3 eksenli kuvvet sensörü kullanılarak farklı mekanik özellikteki nesnelerin hassas kavranması sağlanmıştır. Tasarımsal yenilik yapılmıştır.








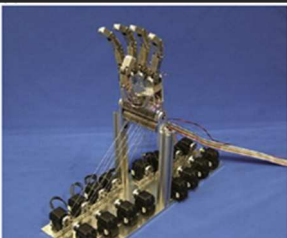


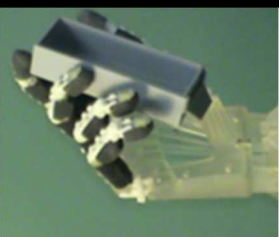

Eklemlerdeki yay sayesinde pasif tutuş adaptasyonu sağlamışlardır. Arı'nın (2016) geliştirmiş olduğu sistemde, 5 parmaklı robotik ele kuvvet sensörleri yerleştirilerek öncelikle nesneye uygulanması gerekli olan kuvvet ölçülmüş, daha sonra bu kuvvet sabit olarak nesneye uygulanmıştır. Yuden ve diğerleri (2016), 5 parmaklı robotik el tasarlamışlardır. Çalışmada robotik ele PID denetleyicisi tasarlanarak parmakların düşük hata payı ile hassas ve kararlı şekilde istenen pozisyona gitmesi sağlanmıştır. Elin istenmeyen hareketinde geri besleme ile doğru konuma gitmesini sağlayan bir kontrol yapısı oluşturmuşlardır. Chen and Xiong'un (2016) yapmış oldukları çalışmada, 16 eklemlilik 5 parmağa sahip robot el tasarlanmıştır. Çalışmada konum ve kuvvetin değişimine dayanarak adaptif kavrama için yeni bir yöntem sunulmuştur. Hareket ve kuvvetin gelişimine dayanarak elin kavrama süreci; ilk temas hali, uç durumu, yörünge ve ilerleme oranını içeren dört yönde ayrılmıştır. Hareket kuvvetlerinin gelişimi incelenerek bir analiz yöntemi geliştirilmiştir. Sunulan çalışmada elin kavrama sürecinin dört özelliğine göre, adım adım parametre kombinasyonlarının optimizasyonu ile aşamalı bir parametre tasarım metodu sunulmuştur. Sommer ve Billard'ın (2016) önerdikleri yeni algoritma sayesinde, 16 serbestlik derecesine sahip robot elin nesneye çoklu teması ile parmakları nesneye göre uyarlanmaktadır. Dokunma sensörü verileri kullanılarak keşif stratejisi ve çoklu temas noktası kombinasyonu ile hızlı keşif ve kompleks şekillerde iyi ve stabil kavrama sağlanmaktadır. Düşük temas kuvveti ile farklı şekillerdeki nesnelerin kavranmasında gürbüzlük sağlamışlardır. Fasoulasa, Sfakiotakisb, Konstantoudakis ve Kritsotakis (2017) yapmış oldukları çalışmada, başparmağı 4 diğer parmaklar 3 olmak üzere 16 serbestlik derecesine sahip el tasarlamışlardır. Her bir eklemdaki hareket; eklemlere yerleştirilmiş olan motorlarla birbirinden bağımsız olarak sağlanmıştır. Bütün elektromekanik ve elektronik parçalar elin üzerinde yer almaktadır. Delgado, Jara ve Torres (2017) yapmış oldukları çalışmada, 20 serbestlik derecesine sahip Shadow Robot Şirketi tarafından geliştirilen shadow eli kullanmıştır. Her parmak için uyarlanabilir dokunsal-servo kontrol şeması sunulmuştur. Deformasyona uğrayan malzemeleri kavramak için keşif, modelleme, kontrol aşamalarından oluşan 3 aşamalı bir kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Uygulanan kuvvet değerinin hatasını minimumda tutmak için PID kontrolcü kullanılmıştır. Konum ve kuvvet sensörü verileri ile boyut ve yumuşaklık keşfi yapılması sağlanarak uygun kavrayış elde ettiklerini sunmuşlardır. Beschi, Villagrossi, Tosatti ve Surdilovic (2017) yapmış oldukları çalışmada, 3 parmaklı tutucu tasarlanmıştır ve kavrama kontrol stratejisi sunulmuştur. Basit bir eklem empedansı ile nesne tespiti gerçekleştirilmektedir. Parmağın kinematik yapısı, olasılıkçı yaklaşıma dayalı bir durum

gözlemcisinden elde edilmiştir. Parmakları hareket ettiren motorların konumu ve akım ölçümleri ile uyarlanabilir davranış sağladıklarını savunmuşlardır. Zaidi, Corrales, Bouzgarrou, Mezouar ve Sabourin (2017) yapmış oldukları çalışmada, 20 serbestlik derecesine sahip, Shadow Robot Şirketi tarafından üretilen shadow el kullanılmıştır. Bu çalışmada deforme olan cisimleri kavrayabilmek için model tabanlı bir strateji geliştirilmiştir. Deforme olan nesne kavranmaya başladığında fark edilerek, nesne-parmak deforme hesabı yapılmıştır. Çalışmada kuvvet kontrolü ile nesneye zarar vermeden kavrama sağlanabildiği sunulmuştur. Vásquez ve Perdereau'nun (2017) yaptıkları çalışmada, 5 parmaklı shadow el kullanılmıştır. Çalışmada eklem açıları ya da tork değerleri öğrenme algoritmalarını eğitmek için kullanılmıştır. Geliştirilen öğrenme algoritmaları nesnenin konumunu ve boyutunu tahmin etmeyi sağlamıştır. Sadece robot elin eklem açılarına dayalı bir yaklaşım ile nesnenin fiziksel özelliklerini tanımlamada %94 doğruluk oranı sunduğu belirtilmiştir. Yöntemi hem simülasyon hem de gerçek bir elde test etmiş ve benzer şekilde çalıştığını tespit etmişlerdir. S. Xu, Y. Xu ve X. Xu (2018) 5 parmaklı ve 16 serbestlik derecesine sahip, tendonlar ile sürülen ve farklı robot platformlarına uyarlanabilir bir robot el tasarlamıştır. Parmak ucunun pozisyonunu elde etmek için bir kinematik model oluşturulmuş ve robot elinin hareket yörüngesi ve kavrama alanı çözülmüştür. Sisteme farklı robot platformlarında farklı görevler verilmiştir. Sistem yapılan deneylerde yaklaşık 10 farklı kavrama görevini gerçekleştirebilmiş, farklı robot platformlarında uyumlu bir şekilde çalışabildiği gösterilmiştir. Zhang, Jiang ve Liu (2018) EMG sensörü ile kontrol edilen, 5 parmaklı ve 6 serbestlik derecesine sahip robot eli geliştirmişlerdir. Geliştirilen elin parmak ucuna 3 eksenli kuvvet değişimini algılayabilen sensör yerleştirilmiştir. Sunulan çalışmada sensör verilerine göre elin kavrama yapması esnasında nesnelerin kayıp kaymamasına göre kavrama kuvveti ayarlanmaktadır. Vulliez, Gazeau, Laguillanmie, Mnyusiwalla ve Seguin (2018), tendonlarla sürülen insan eli boyutuna ve yeteneğine sahip 4 parmaklı robotik eli geliştirmişlerdir. Her parmağı 4 serbestlik derecesine sahip ve her parmağı 4 dc motorla sürülmektedir. Bu çalışmada eklemlere kasnak ve rulman yerleştirilerek sürtünme azaltılmış, bu sayede tendonlardaki aşınmada azaltılmıştır. Çalışmada pozisyon geri beslemesi ve PI kontrolcü ile eklem pozisyon kontrolü sağlanmıştır. Bu çalışmada her parmağın gerçek zamanlı hibrit kuvvet/pozisyon kontrolü yapabilme yeteneğine sahip olduğu sunulmuştur.







Çizelge 2.1. Önceki çalışmalar bölümde incelenen bazı robot kavrayıcıların görselleri

		
<p>Resim 2.1. İlk uzaktan kontrollü mekanik manipülör (Goertz, 1949).</p>	<p>Resim 2.2. İlk endüstriyel robot (Devol ve Engelberger, 1959).</p>	<p>Resim 2.3. Yumuşak tutucu (Hirose ve Umetani, 1978).</p>
		
<p>Resim 2.4. UTAH/MIT eli (Jacobsen ve diğerleri, 1986).</p>	<p>Resim 2.5. Belgrade/USC eli (Bekey ve diğerleri, 1990).</p>	<p>Resim 2.6. NTU eli (Lin ve Huang, 1998).</p>
		
<p>Resim 2.7. TUAT/Karlsruhe eli (Fukaya ve diğerleri, 2000).</p>	<p>Resim 2.8. DLR II eli (Butterfab ve diğerleri, 2001).</p>	<p>Resim 2.9. Gifu eli (Kawasaki ve diğerleri, 2002).</p>
		
<p>Resim 2.10. Spring Eli (Carrozza ve diğerleri, 2004).</p>	<p>Resim 2.11. LOWA eli (Yang ve diğerleri, 2004).</p>	<p>Resim 2.12. Manus eli (Pons ve diğerleri, 2004).</p>

Çizelge 2.1. (devam) Önceki çalışmalar bölümde incelenen bazı robot kavrayıcıların görselleri

		
<p>Resim 2.13. Beş parmaklı robot el (Yamano ve Maeno, 2005).</p>	<p>Resim 2.14. Üç parmaklı robot el (Zollo ve diğerleri, 2007).</p>	<p>Resim 2.15. DLR-HIT eli (Liu ve diğerleri, 2007).</p>
		
<p>Resim 2.16. Beş parmaklı protez el (Sedef, 2009).</p>	<p>Resim 2.17. KH robot eli (Mishima ve diğerleri, 2009).</p>	<p>Resim 2.18. Beş parmaklı robot el (Kuo ve Chen, 2010).</p>
		
<p>Resim 2.19. NAIST eli (Ueda ve diğerleri, 2010).</p>	<p>Resim 2.20. Beş parmaklı robot el (Kurita ve diğerleri, 2011).</p>	<p>Resim 2.21. İ-HY eli (Odhner ve diğerleri, 2013).</p>
		
<p>Resim 2.22. Pupin eli (Rodić ve diğerleri, 2013).</p>	<p>Resim 2.23. UB eli (Ficuciello ve diğerleri, 2014).</p>	<p>Resim 2.24. Beş parmaklı robotik el (Savić ve diğerleri, 2016).</p>

Çizelge 2.1. (devam) Önceki çalışmalar bölümde incelenen bazı robot kavrayıcıların görselleri

 <p>Resim 2.25. X-Eli (Chen ve Xiong, 2016).</p>	 <p>Resim 2.26. Shadow El (Shadow Robot Şirketi, 2016).</p>	 <p>Resim 2.27. SHU-II eli (Xu ve diğerleri, 2018).</p>
 <p>Resim 2.28. Robotik el TALOS (Fasoulas ve diğerleri, 2017).</p>	 <p>Resim 2.29. Beş parmaklı robot el (Zhang ve diğerleri, 2018).</p>	 <p>Resim 2.30. ROBIOSS el (Vulliez ve diğerleri, 2018).</p>

2.2. Haptik Bildirim Üzerine Yapılan Çalışmalar

Dokunma yoluyla hissetme olarak tanımlanan haptik; 20. yüzyılın ilk yarısında sadece psikologlar tarafından kullanılan bir terimken, 1980'lerden sonra bilişim teknolojilerindeki gelişmeler ışığında tanımı daha da genişletilmiştir (Üstünel, 2014). Sensör teknolojilerinin gelişimi ile haptik teknolojisinin uygulama alanları genişlemiş, haptik sistemler üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır (Salisbury ve diğerleri, 2004; Ahmad, Haq, Akram, 2016). Tezin bu bölümünde haptik sistemler üzerine yapılan bazı çalışmalar kronolojik olarak sunulmaktadır. Bu bölümün sonunda ise seçilen bazı çalışmaların görselleri tablo halinde verilmiştir.

Kontarinis, Son, Peine ve Howe (1995) yaptıkları çalışmada, uzakta çalışan bir manipülatörün parmak uçlarından dokunsal bildirim, insan tele-operatörün parmak uçlarına aktarılması için bir sistem geliştirmiştir. Sistem parmak arasına sığabilecek nesnelere için kullanılmıştır. Sıralı dokunsal sensörler; robot el ile kavranan nesne

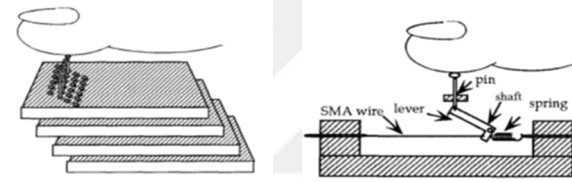

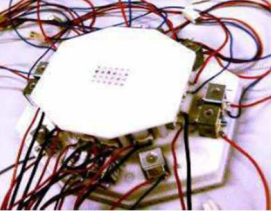

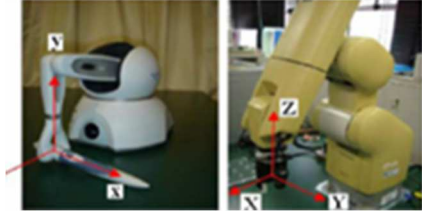
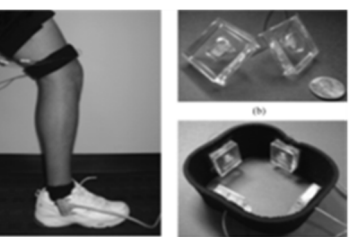

arasındaki basınç dağılımını ölçmektedir. Bir bilgisayar bu basınç sinyalinin örnekleyerek, sinyal işleme algoritmalarını uygulamaktadır. Ortaya çıkan sinyal ana manipülatörde bir şekil göstergesi cihazını tahrik etmektedir. Bu cihaz nesnenin şeklini yeniden oluşturmak için operatörün parmak ucuna karşı bir dizi pim yükseltmektedir. Pimlerin pozisyon kontrolü için PD kontrol uygulamışlardır. Turner, Gomez, Tremblay ve Cutkosky (1998), yaptıkları çalışma ile 2 parmaklı bir robot tutucunun kontrolü için haptik eldiven geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistem tendon sürücülü dış iskelet yapısıdır. Dış iskeleti kullanıcının kullanabilmesi için ele giymesi gerekmektedir. Sunulan sistem; kuvvet geri beslemesi verileri ile kullanıcının parmak hareketlerini kısıtlayarak haptik geri bildirim sağlamıştır. Shen, Liu ve Li (2000), yüksek kararlılıkta ve çözünürlükte olan elektro dokunsal eldiven geliştirmiştir. Bu çalışmada uzaktan kontrol edilen robot elin dokunma geri bildirimini ile kullanıcıya dokunma hissini elektriksel sinyaller ile sağlamışlardır. Shen, Lo, Liu ve Li (2003) yaptıkları çalışmada, bir operatörün 5 parmaklı eli kontrolü sırasında dokunsal bildirim ile kontrolün artırılması için haptik sistem geliştirmişlerdir. Operatöre dokunsal geri bildirim için elektro-dokunsal eldiven ve DC selenoidlerle kontrol edilen 24 pinli haptik ekran geliştirmişlerdir. Robot elin parmak uçlarında bulunan sensörlerden gelen veriler doğrultusunda operatöre elektro-dokunsal eldivenle his bildirimini sağlanmaktadır. Ayrıca haptik ekran ile temas görüntüsü elde edilebildiğini sunmuşlardır. Song, Guo ve Wang (2006) yapmış oldukları çalışmada, phantom isimli haptik cihazı kullanmışlardır. Bu cihazın kullanıcı tarafından kontrol edilebilen kalem benzeri yapısı mevcuttur. Kuvvet geri beslemesinden gelen sinyallere göre kalemin hareket kabiliyeti kısıtlanmaktadır. Bu sistemde de kullanım alanı kısıtlı olup kullanıcının sistemi bir eli ile kontrol etmesi gerekmektedir ancak bu şekilde his bildirimini sağlanmaktadır. Al-Ali, Jarrah ve Dhaouadi (2007) yaptıkları çalışmada, her parmağı tendon ve tendona bağlı motor ile sürülen haptik eldiven geliştirmişlerdir. Robot eldeki kuvvet sensöründen gelen sinyal ile motor akım değeri karşılaştırılarak hata sinyali elde edilmektedir. Bu hata sinyali ile haptik eldiven de bulunan DC motora uygun PWM (darbe genişlik modülasyonu) sinyali gönderilerek tendonlar sürülmektedir. Geliştirilen bu haptik bildirim sisteminde kullanıcının sistemi eline takması gerekmekte olup, yalnızca ele takıldığında işe yaramaktadır bu da kullanım alanını kısıtlamaktadır. Fan ve diğerlerinin (2008) yapmış oldukları çalışmada, alt ekstremite protezleri (bacak protezi, ayak protezi gibi) kullanılırken kullanıcının yürüyüş sırasında dengesini sağlayabilmesi için kullanıcının protezin konumunu ve yönünü belirleyebilmesinde pnömatik balon aktüatörü kullanılmıştır. Pnömatik balon aktüatörü kuvvet geri beslemesine göre doğrusal olarak

çalışmaktadır. Chatterjee, Aggarwal, Ramos, Acharya ve Thakor (2008), protez el için görsel ve vibrotaktil (titreşim uyaranlı) geri bildirim kullanarak, protez el kullanıcılarında performans iyileştirme karşılaştırması yapmışlardır. Protez el ile belirlenen görevleri yerine getirmede, yalnızca görsel geri bildirim veren sistemi kullananlara göre hem görsel hem de vibrotaktil geri bildirim veren sistemi kullananların daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Mishima ve diğerleri (2009) yapmış oldukları çalışmada, 5 parmak ve 15 ekleme sahip haptik arayüz robotu tasarlamışlardır. Her ekleme bulunan DC servo motorlara iletilen PWM sinyallerinin değişimi ile eklemlerde bulunan motorların torku değişmekte ve kullanıcıya his geri bildirimi sağlanmaktadır. Kullanıcının parmak uçları haptik arayüze temas etmesi gerekmektedir. Sunulan çalışmada, deney sonuçları ile 3 boyutlu manipülasyonunun başarılı olduğu gösterilmiştir. Yoshikawa, Endo, Maeno ve Kawasaki (2009) yapmış oldukları çalışmada, iki elleri haptik arayüz geliştirmiştir. Haptik arayüz elleri 5 parmaklı ve her parmak 3'er serbestlik derecesine sahiptir. Bilek ve kol kısmı da 6 serbestlik derecesine sahiptir. Haptik arayüz ellerinde üç boyutlu kuvvet sensörü kullanılarak çok boyutlu algılama sağlanmıştır. Sistem bilgisayar ile simülasyon üzerinde denenmiştir. Geliştirilen haptik arayüz eli ile sanal ortamda vida tornalama işlemi gerçekleştirmiş ve kullanıcıya başarı ile his geri bildirimi sağlandığı bildirilmiştir. Endo, Tanimura ve Kawasaki (2011) yapmış oldukları çalışmada, 5 parmaklı 21 serbestlik derecesine sahip haptik arayüz cihazı geliştirilmiş ve bilgisayar ile gerçek zamanlı kontrol edilmiştir. Cihaz tıp-cerrahi alanında kullanılabilirlik için tasarlanmıştır. Eğitimlerde operatöre neşter, şırınga, makas vb. ekipmanları kullanırken his geri bildirimi yapmaktadır. Geliştirilen cihaz ile kullanıcıya bildirilen kuvvette oluşan mutlak kuvvet hatasının ortalama değeri 77% ye düşürüldüğü belirtilmiştir. Witteveen, Droog, Rietman ve Veltink (2012) yaptıkları çalışmada, kullanıcıların protez kontrolünde görsel, elektro dokunsal ve vibrotaktil bildirim ile performanslarını karşılaştırmışlardır. Yapılan deneylerde, elektro dokunsal bildirimün vibrotaktil bildirimine göre daha kullanışsız ve ağırlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Hem görsel hem de vibrotaktil beslemenin birlikte kullanımıyla kavrama işlemlerinin daha başarılı gerçekleştirildiğini bildirmişlerdir. Ma ve Ben-Tzvi'nin (2013) yapmış oldukları çalışmada, operatöre sanal ve 3 boyutlu objelerin, şekillerini ve boyutlarını hissettirebilmek amacıyla tendon tahrikli iki parmaklı bir haptik eldiven geliştirilmiştir. Haptik eldivenin kuvvet kontrolü için, sisteme gelen kuvvet geri bildirimi doğrultusunda parmaklardaki tendonları hareket ettiren motorlara sinyal gönderilerek kontrol edilmesini sağlamışlardır. Brown ve diğerleri (2013), dirseğe uygulanan haptik geri bildirim ile katılımcıların işlevsel kavrama ve yük kaldırmadaki başarısını

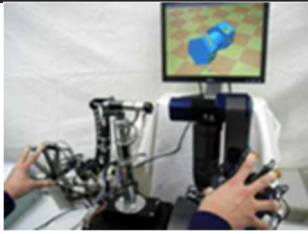
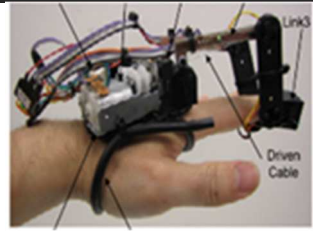
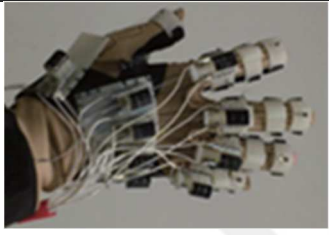
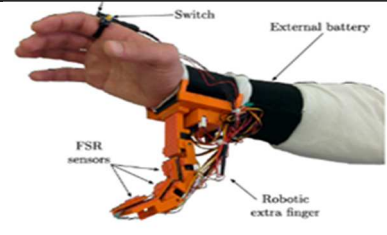



denetlemişlerdir. 11 katılımcı EMG sensörü ile protez eli kontrol etmiştir. Bu kontrol vibrotaktil geri bildirimle ve geri bildirimlessiz olarak test edilmiştir. Vibrotaktil geri bildirim ile kavrama ve kuvvet kontrolünde katılımcıların çok daha başarılı olduğunu tespit etmişlerdir. Fujimoto, Kobayashi, Nakamoto ve Kojima (2013) yapmış oldukları çalışmada, uzakta olan bir robot manipülatörden kavrama esnasında operatöre kuvvet geri bildirimi sağlayan ExoPhalanx adında bir haptik cihaz (eldiven) geliştirmişlerdir. Eldivende, tendon sürücülü bir mekanizma oluşturulmuş olup, kuvvete göre tendonları sıkıştırarak, parmaklarda hareket kısıtlılığı ile kullanıcıya his bildirimi sağlanmaktadır. Haptik sisteminin kontrolü PD kontrol yöntemi ile sağlanmıştır. Bu sayede kullanıcının hareketinin kısıtlanmasıyla kontrol edilen manipülatörün kontrolü daha hassas gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Antfolk ve diğerleri (2013) çalışmalarında, protez elin parmak uçlarına kuvvet sensörleri yerleştirmiştir. Kuvvet sensörü verileri doğrudan titreşim motorlarına gönderilerek kullanıcıya titreşim ile dokunsal geri bildirim sağlamışlardır. Casini ve diğerleri (2015), robot elin kuvvet kontrolünün sağlanması için kullanıcıya giyilebilir haptik cihaz tasarlamışlardır. Bu cihaz kullanıcıya hem cilt gerilmesi hem de cilde kuvvet uygulanması ile his bildirimi yapmaktadır. Sistem temeli elastik bir kayış ve kayışın sarılmasını sağlayan bir dc motordan oluşmaktadır. Sistem farklı sertlikteki süngerlerin kavranmasında test edilmiş, kullanıcının süngerlerin sertliğini sıralaması istenmiştir. Kullanıcının başarı ile sünger sertliklerini ayırt edebildiğini tespit etmişlerdir. Hussain, Meli, Pacchierotti, Salviatti ve Prattichizzo (2015) sunmuş oldukları çalışmada, giyilebilir 3 serbestlik derecesine sahip parmak için haptik bildirim sistemi tasarlamışlardır. Sistemde robot parmağın nesneye uyguladığı kuvvet; halka şeklinde tasarlanan ve parmağa takılan vibrotaktil sistemi ile kullanıcıya haptik bildirim sağlamıştır. Sartori, Fiorini ve Muradore (2016), 3 parmaklı ReFlex isimli robot elin kontrolü sırasında kullanıcıya kuvvet geri bildirimi yapan sistemi geliştirmişlerdir. Sistem ana-uydu sistemlerinden oluşmaktadır. Ana sistem kullanıcı tarafından komutların gönderildiği ve titreşim motorlarının bulunduğu sistemdir. Uydu sistem ise ReFlex elinden oluşmaktadır. ReFlex elinde her parmak falanksında birden çok basınç sensörü bulunmaktadır. Robot elde bulunan basınç sensörlerinden gelen en yüksek veriye göre kullanıcının elinde bulunan titreşim motorları ile his geri bildirimi yapılmaktadır. Gelen basınç değerine göre titreşim motoruna gönderilen voltaj lineer olarak değişmektedir. Lovasz ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada, haptik bildirim için 2 serbestlik derecesine sahip dirsek dış iskeleti tasarımı yapılmıştır. Haptik dirsek hem kumanda olarak kullanılabilen hem kullanıcıya his bildirimi yapabilmektedir. Haptik bildirimde dirsek modülüne voltaj aşamaları ile fren

uygulanmaktadır, bu sayede kullanıcıya kuvvete göre değişen fren aşamalarıyla haptik bildirim sağlanmaktadır. Rossi, Bianchi, Battaglia, Catalano ve Bicchi (2018), myoelektrik protez el için duyuusal geri bildirim vermeyi sağlayan HapPro isimli cihazı geliştirmişlerdir. Geliştirilen haptik cihaz; protez elden gelen enkoder verisine göre ön kola yerleştirilen bir yatak üzerinde kayar bir teker ile kullanıcıya protez elin el açıklığının bildirimini sağlamaktadır. Colella, Bianchi, Grioli, Bicchi ve Catalano (2019), haptik geri bildirim için cilt germe uyarısına dayanan yeni bir cihaz geliştirmişlerdir. Bu cihaz manipülatörün avuç açıklığına göre silindirlerle kullanıcının cildini sıkarak kullanıcıya manipülatörün avuç açıklığının bilgisini verebilmektedir. Sunulan çalışma ile geliştirilen cihazın hem teleoperasyon sistemlerinde hem de protezlerin kontrolünde kullanılabilir yapıda olduğu bildirilmiştir.

Çizelge 2.2. Önceki çalışmalar bölümde incelenen bazı haptik bildirim sistemlerinin görselleri

	
<p>Resim 2.32. Pimli haptik bildirim sistemi (Kontarinis ve diğerleri, 1995).</p>	<p>Resim 2.31. Tendon sürücülü haptik sistem (Turner ve diğerleri, 1998).</p>
 	
<p>Resim 2.33. Haptik bildirim sistemleri (Shen ve diğerleri, 2003).</p>	<p>Resim 2.34. Phantom haptik cihaz (Song ve diğerleri, 2006).</p>
	
<p>Resim 2.35. Pnömatik haptik bildirim sistemi (Fan ve diğerleri, 2008).</p>	<p>Resim 2.36. Haptik bildirim arayüz robotu (Mishima ve diğerleri, 2009).</p>

Çizelge 2.2. (devam) Önceki çalışmalar bölümünde incelenen bazı haptik bildirim sistemlerinin görselleri

 <p>Resim 2.37. Haptik arayüz robotu (Yoshikawa ve diğerleri, 2009).</p>	 <p>Resim 2.38. Haptik eldiven (Ma ve Ben-Tzvi, 2013).</p>
 <p>Resim 2.39. ExoPhalanx isimli haptik eldiven (Fujimoto ve diğerleri, 2013).</p>	 <p>Resim 2.40. Haptik cihaz (Casini ve diğerleri, 2015).</p>
 <p>Resim 2.41. Giyilebilir haptik cihaz (Hussain ve diğerleri, 2015).</p>	 <p>Resim 2.42. Haptik dirsek (Lovaszt ve diğerleri, 2017).</p>
 <p>Resim 2.43. Haptik cihaz (Rossi ve diğerleri, 2018).</p>	 <p>Resim 2.44. Haptik cihaz (Colella ve diğerleri, 2019).</p>

2.3. Robot El Sistemlerinin Kullanım Alanları

Bugüne kadar farklı teknik özelliklere sahip birçok robot el geliştirilmiştir. Ve bu robot el sistemleri, çalışma alanlarına yönelik geliştirilmeye devam edilmektedir. Geliştirilen bazı robot ellerin (kavrayıcıların) çalışma alanlarının bir kısmı aşağıda listelenmiştir.

Askeri Alanda: Bomba imha işlemleri gibi tehlikeli görevlerde kullanılabilir. (Sümbül ve Coşkun, 2011).

Endüstriyel Uygulamalarda: Üretim hatlarında, montaj, imalat, nesne taşıma gibi işlemlerin gerçekleştirilmesinde farklı parmak sayılarına sahip robot eller (kavrayıcılar) endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Inaba, Nakajima, Sakakibara ve Nihei, 1984; Tai, El-Sayed, Shahriari, Biglarbegan ve Mahmud, 2016).

Tıp ve Sağlık Alanında: Cerrahi işlemlerde, uzuv kaybı yaşayan hastalarda protez olarak kullanım gibi vb. amaçlarla kullanılmaktadır (Bekey ve diğerleri, 1990; Lin ve diğerleri, 1998; Pons ve diğerleri, 2004; Tai ve diğerleri, 2016; Piazza, Grioli, Catalano and Bicchi, 2019).

Uzay Araştırmaları Alanında: Uzayda araştırma yapan astronotların kullandıkları yardımcı cihazlarda, uzay keşif işlemlerinde kullanılan otonom robotlarda kavrayıcı olarak vb. amaçlarla kullanılmaktadır (Lovchik, Aldridge ve Driftler, 1999; Controzzi, Ciprani ve Corrozza, 2014).

Tele-operasyon İşlemlerinde: Tele-operasyon robotlarında; arama kurtarma gibi ya da insanlar için tehlikeli olabilecek çalışma alanlarında yapılan keşif çalışmalarında uç efektör olarak kullanılabilir. (Kawasaki ve diğerleri, 2002; Tai ve diğerleri, 2016; Shadow Robot Şirketi, 2019; Piazza ve diğerleri, 2019).

Humanoid Robotlarda: Servis, montaj, imalat işlemlerinde kullanılan insansı robotlarda tutma, kavrama, taşıma vb. işlemleri gerçekleştirmesi için kullanılmaktadır (Fukaya ve diğerleri, 2000; Michalec, 2013; Controzzi ve diğerleri, 2014).

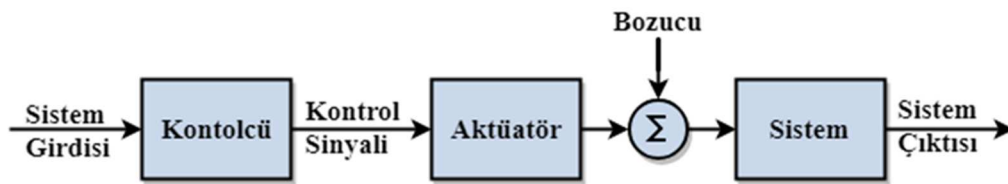
3. METERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemlerinin amacı; kendisini veya başka bir sistemi kumanda etmesi için belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilen makine, süreç ve donanımların otomatik çalışmasını sağlamaktır. Kontrol sistemleri denetim etki açısından iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar: açık-çevrim kontrol sistemi ve kapalı-çevrim kontrol sistemidir (Yüksel, 2006; Balcı, 2015).

3.1.1. Açık-çevrim kontrol sistemi

Açık-çevrim kontrol sistemlerinde kontrol eylemi sistem çıktılarından bağımsızdır. Bu sistemlerde sistem çıktısı verilerinin ölçülmesi ve geri beslemesi yapılmamaktadır. Yani sisteme gönderilecek girdi belirlenirken sistem çıktısı dikkate alınmaz. Bu uygulama genellikle girdi-çıkıtı bağıntısı daha önceden belirli olan sistemlerde veya bozucu etkilere maruz kalmayan sistemlerde kullanılır. Genellikle bu tip sistemlerin tasarımları basit olup, sistem için ek bir ölçüm elemanına ihtiyaç duyulmaz (Yüksel, 2006; Bilgiç, Conker, Yavuz, Şen ve Konya, 2015; Bilgiç, 2018). Şekil 3.1'de açık çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı ile gösterimi sunulmuştur.

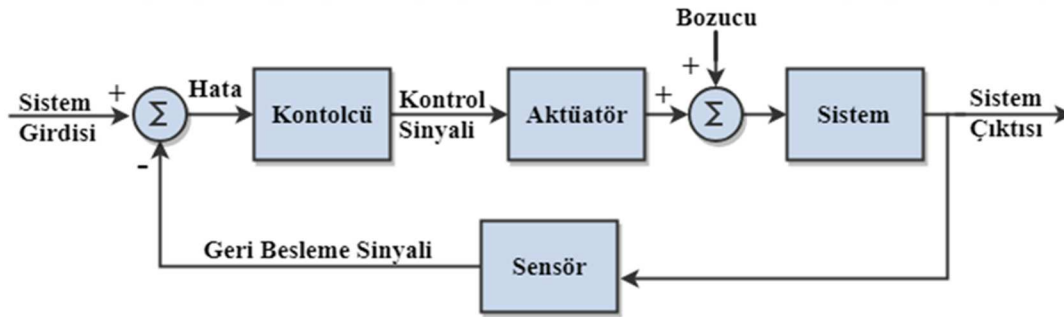


Şekil 3.1. Açık-çevrim kontrol sistemi blok diyagramı ile gösterimi

Şekil 3.1'de sistem girdisi sistem çıktısında elde edilmek istenen durumdur. Kontrolcü; sistem girdisini (belirli bir durum komutu) aktüatör için uygun kontrol sinyaline dönüştürmektedir. Aktüatör; fiziksel sistem için hareket üreten sistem elemanıdır. Sistem ise belirli bir görevi yerine getirmek için bir araya getirilen elemanlar topluluğudur. Bozucu ise sistemin durumunu olumsuz etkileyen dış ortamdan kaynaklı girdilerdir. Bu gösterimde bozucu sisteme etki etmektedir ancak bozucu, kontrol çevrimine her noktada etki edebilir.

3.1.2. Kapalı-çevrim kontrol sistemi

Kapalı çevrim kontrol sisteminde; denetim eylemi sistem çıktısına bağlıdır. Sistem çıktısı bir algılayıcı ile ölçülüp geri beslendikten sonra, sistem girdisi ile karşılaştırılır. Bu sayede sistem girdisi, sistem çıktısına göre değerlendirilerek yeniden üretilebilir. Böylelikle sistem girdisine göre, sistem çıktısının hata oranı düşürülebilir. Bu tip sistemler genellikle, bozucu etkilerin olduğu yapılarda, değişken çalışma koşullarında çalışan sistemlerde veya çalışma hassasiyetinin önem arz ettiği sistemlerde kullanılmaktadır. Sistem çıktısını devamlı ölçerek, kontrol sinyali üreten bu sistem; değişken durumlara ve bozucu girişlerine daha duyarlı bir yapıdadır (Yüksel, 2006; Ağralı, Rüstemli ve Yıldız, 2016). Kontrol performansı açık çevrim kontrol performansına göre daha başarılıdır. Ancak bu tip kontrol sistemlerinin yapısı açık çevrim kontrol sistemlerine göre daha karmaşık yapıdadır. Ek olarak bu tip sistemlerde sistem çıktısının ölçülmesi için algılayıcılara ihtiyaç olup sistem maliyeti daha yüksektir. Bu sistemlerde çıkış değişkenlerinin nasıl değerlendirileceği ve nasıl kontrol edileceği çözülmesi gereken bir problemdir (Yüksel, 2006; Bilgiç, 2018). Şekil 3.2’de Kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı ile gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3.2. Kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı ile gösterimi

Şekil 3.2’de sunulan sistemde, sistem girdisi elde edilmek istenen durum olmaktadır. Kontrolcü; sistem girdisini işleyerek, aktüatör için uygun kontrol sinyalini üretir. Bu sinyal ile aktüatör sistemin istenen görevi yerine getirmesi için belirlenen hareketi üretir. Bozucu ise sistem çıktısını olumsuz yönde etkileyen ortamdaki; titreşim, gürültü vb. girdilerdir. Bozucu sisteme herhangi bir noktadan etki edebilir. Kapalı çevrim kontrol sisteminde sistem çıktısı algılayıcılar ile ölçülüp sistem girdisi ile karşılaştırılarak bir hata değeri elde edilmektedir. Kontrolcü bu hata değerini ortadan kaldırmak için uygun kontrol sinyalini üretir. Sistemde oluşan hata durumuna göre kontrol sinyali yeniden üretilir ve bu çevrim belirlenen aralıklarla tekrar eder.

Bu tez kapsamında sunulan çalışmada değişken uygulama alanlarında, hassas kuvvet kontrolü sağlanması amaçlanmıştır. Bu sebeple kapalı çevrim kontrol sistemi uygulanmış olup, detaylar tezin sonraki bölümlerinde anlatılmıştır.

3.2. Yapay Zeka

Yapay zeka: insan zekasını modelleyebilmek için insan gibi akıl yürütme, düşünme, anlam çıkarma, karar verebilme, öğrenebilme gibi yeteneklerin bir bilgisayar veya makineye kazandırılması olarak tanımlanmaktadır. Yapay sinir ağları, bulanık mantık, genetik algoritma ve uzman sistemler gibi insanların düşünme şekli ile problem çözümü üreten yapay zeka teknikleri geliştirilmiştir (Kovacic ve Bogdan, 2006: 15). Genel olarak yapay zekanın amacının makineleri veya sistemleri daha akıllı hale getirmek olduğu söylenebilir (Yılmaz, 2017). Yapay zeka; hastalık teşhisleri, otonom kontrollü sistemler, üretim ve kontrol sistemleri, bilgisayar oyunları ve robotik sistemler gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Akın, 2017; Köse ve Mühürücü, 2018). Yapay zeka, kullanıldığı sistemlerin performanslarında artış sağlamaktadır (Liu, 2018: 5). Bu tez kapsamında belirlenen problemin çözümü için yapay zeka tekniklerinden bulanık mantık önerilmiş, bulanık mantık ile bir kontrol yapısı oluşturulmuş ve fiziksel sistem üzerinde uygulanmıştır.

3.2.1. Bulanık mantık

Günümüzde Aristo mantığı (ikili mantık; var ya da yok gibi), gerçek dünyanın belirsizliğini betimlemekte yetersiz kalmıştır (Yılmaz, 2017). İnsanların hayatları boyunca karşılarına birçok problem çıkmaktadır. Bazı problemler hemen tanımlanıp çözülebilirken bazı problemler belirsizlik içermekte ve çözümü zorlaşmaktadır. Bilgisayarlar; sıfır-bir dizilerine indirgenmiş kesin gerçekler ve doğru ya da yanlış önermeler kullanarak akıl yürütmektedir (Kubat, 2014). Fakat gerçek dünyada problem çözümü için belirsizlik oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu sebeple ikili mantıktan belirsizliği baz alan bir düşünceye geçiş başlamıştır. Zadeh'in belirsizlik üzerine yaptığı çalışma bu konuda bir dönüm noktası olarak görülmektedir. Zadeh'in (1965) ortaya koyduğu bulanık küme mantığı, Aristo mantığı denilen doğru ya da yanlış şeklindeki ikili mantığa belirsizliği eklemiştir (Kubat, 2014). Yani ya doğru ya da yanlış önermesine kısmen doğru önermesi eklenmiştir. Bulanık mantık; matematiksel olarak muğlaklığın temsil edilmesinde, sözel

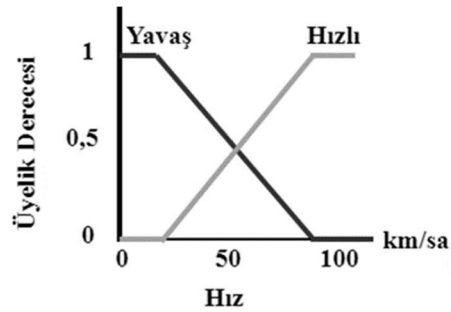
verilerden yararlanmaktadır (Orji ve Wei, 2015; Ebrahimnejad and Verdegay, 2018). Bu nedenle matematiksel olarak modellenemeyen, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemlerde rahatlıkla uygulanabilmektedir (Yılmaz, 2017; Nguyen, Walker and Walker, 2018). Bu tez kapsamında geliştirilen kontrol sistemi, bulanık mantık kullanılarak geliştirilmiştir. Bu sebeple bu bölümde; bulanık küme teorisi, cebirsel işlemler, üyelik kümeleri ve dilsel (sözel) değişkenler hakkında kısa bir giriş sunulacaktır.

Bulanık küme teorisi

Klasik küme teorisinde, herhangi bir nesne veya durum ya o kümeye aittir ya da değildir. Ancak klasik küme teorisi her zaman mevcut durumu ifade etmekte yeterli olamamaktadır. Bu yetersizlik durumu, bulanık küme teorisinin ortaya çıkmasında etkili olmuştur (Yılmaz, 2017). Bulanık küme teorisinde, herhangi bir nesne veya durum üyelik kümelerine kısmen aittir. Klasik küme teorisinde küme içerisindeki elemanlar kümeye ait ise üyelik derecesi 1, ait değil ise üyelik derecesi 0'dır. Bu değerler dışında üyelik derecesi yoktur. Bulanık kümede ise 0 ile 1 arasında değişen üyelik dereceleri vardır (Kovacic ve Bogdan, 2006: 11). Örnek vererek açıklayacak olursak, saatte 100 kilometre hızla giden bir aracın hız durumunu ele alalım. Klasik küme kavramına göre hız durumu ya hızlı ya da yavaştır. Yani 50 km/sa altındaki hız durumu yavaş, diğer durumda ise hızlı olarak nitelenmektedir. Şekil 3.3'te verildiği gibi klasik küme teoreminde üyelik derecesi ya 1'dir ya da 0. Ancak bulanık küme teorisinde hızlı ve yavaş kavramı arasındaki geçiş klasik küme kavramındaki kadar keskin değildir. Şekil 3.4'te verildiği gibi bulanık küme teorisinde hız durumu; hızlı ve yavaş üyelik kümelerine 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecesi ile aittir.



Şekil 3.3. Klasik küme

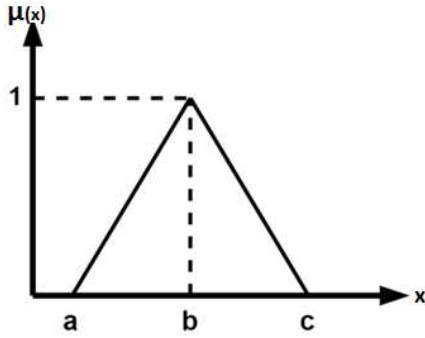


Şekil 3.4. Bulanık küme

Bulanık kümelerin oluşturulmasında kullanılan çok sayıda üyelik fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlar arasında en çok kullanılanlar: üçgen, yamuk, çan eğrisi, gaussian ve sigmoid'dir (Kovacic ve Bogdan, 2006: 11). Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.

Üçgen üyelik fonksiyonu

Üçgen üyelik fonksiyonunda 3 parametre bulunmaktadır. Bunlar Şekil 3.5'te de gösterildiği üzere; başlangıç (a), bitiş (c) ve en çok üyelik derecesine sahip olunan tepe (b) noktasıdır. Burada $\mu(x)$: bir girdi değerinin bir kümeye ne kadar ait olduğunu belirleyen üyelik derecesidir (Yılmaz, 2017).



Şekil 3.5. Üçgen üyelik fonksiyonu

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} a \leq x < b & \rightarrow \frac{(x - a)}{(b - a)} \\ b \leq x \leq c & \rightarrow \frac{(c - x)}{(c - b)} \\ x < a \text{ veya } x > c & \rightarrow 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Üçgen üyelik fonksiyonunun üyelik derecesi Eş. 3.1 ile belirlenir. Burada a, b ve c üyelik kümesi tanımlamasında kullanılan başlangıç noktası, tepe noktası ve bitiş noktasının değerleridir.

Bulanık kümelerde temel işlemler

Bulanık kümeler arası işlemler üyelik kümesinde bulunan elamanların üyelik derecesi ile yapılır. A ve B isimli iki bulanık kümeyi ele alalım. Burada μ_A ve μ_B üyelik derecesi olmak üzere sırasıyla birleşim, kesişim ve tümleyen işlemleri sunulmaktadır. Eş. 3.2'de

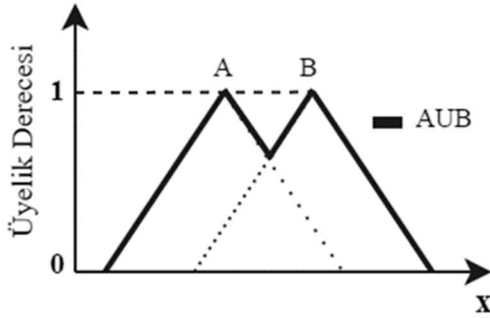
birleşim işlemi, Eş. 3.3'te kesişim işlemi, Eş. 3.4'te ise tümleyen işlemleri verilmiştir (Abduljabar, 2011).

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.2)$$

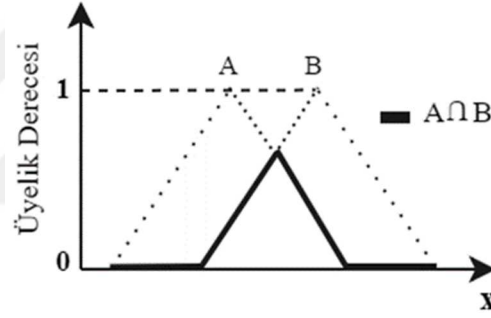
$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.3)$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.4)$$

Eş. 3.4'te görüldüğü üzere bir elemanın A kümesindeki üyelik derecesi 0,3 ise tümleyeninin üyelik derecesi 0,7'dir. Sırasıyla Eş. 3.2 ve Eş. 3.3'te verilen; bulanık kümelerde birleşme işlemi ve bulanık kümelerde kesişim işlemi Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de iki bulanık küme üzerinden sunulmuştur.



Şekil 3.6. Bulanık kümelerde birleşme işlemi



Şekil 3.7. Bulanık kümelerde kesişim işlemi

Sözel (dilsel) değişkenler

Günlük hayatta sıklıkla belirli bir sayısal değer yerine muadili olan sözel tabirler kullanırız. Örneğin: trafikte, araba uzakta derken arabayla bizim aramızda ki mesafenin uzun olduğunu tanımlamak istiyoruz. Araba ile aramızdaki mesafenin 500 metre olduğunu bilsek bile araba uzakta veya yakında demeyi tercih etmekteyiz. Buradan mesafe terimi ile ilgili 2 değere ulaşabiliriz: dilsel (uzak veya yakın), sayısal (500 m). Sayısal değerler yerine kelimeler veya cümleler kullanılıyorsa bunlar dilsel değişkenler olarak adlandırılır (Kovacic ve Bogdan, 2006: 14). Sürücü kesin olmayan dilsel değişkenlere dayanarak yaptığı eylemle ilgili kararlar alır. Bulanık mantıkta sayısal değerleri sözel ifadeler ile tanımlayarak, insan davranışlarına benzer şekilde problemlere çözüm üretebilmektedir (Yılmaz, 2017).

Bulanık kurallar

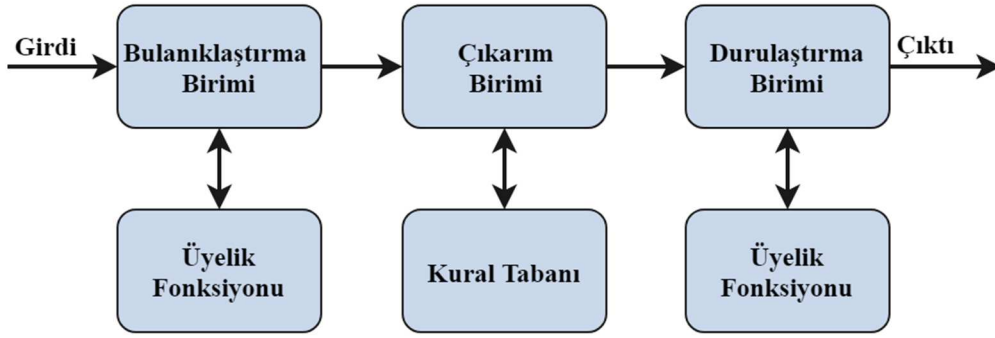
Bulanık sistemlerin çoğunluğu; eğer (if) - o halde (then) kural yapısı ile tanımlanmıştır (Abduljabbar, 2011). Bu kural yapısı giriş biriminden gelen verileri, çıkış değişkenleri ile mantıksal olarak ilişkilendirmeyi sağlamaktadır (Yılmaz, 2017). Bu kurallar girdi ve çıktılar arasında, olabilecek bulanık küme bağlantıları düşünülerek oluşturulur. Oluşturulan bulanık kurallar ile bir kural tabanı elde edilmektedir. Bulanık kural tabanı kontrol sisteminin merkezi bileşenidir ve bulanık kontrol algoritmasında zekayı temsil etmektedir (Kovacic ve Bogdan, 2006: 18). Bu sebeple kontrol sisteminin geliştiricisi; bilgi ve deneyimleri doğru bir şekilde yorumlamalı ve kural tabanına aktarmalıdır.

Bulanık çıkarım sistemleri

Bulanık çıkarım sistemleri tüm sistemin girdiler karşısında nasıl bir çıktı vereceğinin belirlenmesinde kullanılır. Bulanık mantık ile yaygın olarak 2 tip bulanık çıkarım sistemi kullanılmaktadır. Bunlar: Mamdani ve Takagi-Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemleridir. Takagi-Sugeno bulanık çıkarım sisteminde kural çıkışları matematiksel denklemler ile hesaplanmakta ve çıktı kısmında kesin bir fonksiyon elde edilmektedir. Matematiksel analiz ve hesaplama için uygundur. İnsan sezgilerine çok uygun değildir (Yılmaz, 2017). Mamdani tipi bulanık çıkarım sisteminde ise hem giriş hem çıkış değişkenleri için bulanık kümeler oluşturulup, uygun üyelik fonksiyonları tanımlanır. Bulanık kümeler sözel olarak ifade edilmekte ve çıkış fonksiyonu sözel kurallar doğrultusunda belirlenmektedir. Modelleme kolaylığı sebebiyle de kullanımı çok yaygındır. İnsan davranış biçimine yakın bir yapıdadır (Yılmaz, 2017; Doğrul, 2018). Sezgisel uygulamalarda iyi sonuçlar vermesi, modelleme kolaylığı ve insan davranış biçimine yakın olması sebebiyle bu tez kapsamında geliştirilen sistemde Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır.

Bulanık kontrolör genel yapısı

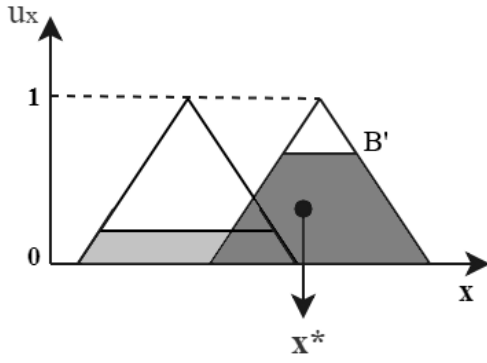
Bulanık bir kontrolör sistemi genel olarak 4 ana bileşenden oluşur (Kovacic ve Bogdan, 2006: 35; Kuzu, 2018). Şekil 3.8'de genel bulanık kontrolör yapısının blok diyagramı ile gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3.8 Genel bulanık kontrolör yapısının blok diyagramı ile gösterimi (Yılmaz, 2017)

Bulanık kontrolör sisteminin 4 ana bileşeninden kısaca bahsedecek olursak:

- ◆ **Bulanıklaştırma Birimi:** sisteme gelen giriş verilerini dilsel verilere dönüştürür. Üyelik fonksiyonlarından yararlanarak giriş verisinin ait olduğu bulanık kümeyi tespit edip, gelen veriye az, çok az gibi dilsel bir değişken atar.
- ◆ **Bilgi Tabanı:** çözülmesi gereken probleme ait giriş değişkenlerinin ve bu değişkenlere ait verilerin bulunduğu veri tabanı ve dilsel denetim kurallarının bulunduğu kural tabanı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Denetim yapılan sistemle ilgili, bulanıklaştırma, bulanık çıkarım ve durulaştırma işlemleri sırasında gerek duyulan üyelik fonksiyonlarına ve kural tablosu verilerine veri tabanından ulaşılmaktadır. Giriş ve çıkışlar arasındaki mantıksal bağlantı ise kural tabanında bulunan kurallar ile sağlanmaktadır.
- ◆ **Çıkarım Birimi:** bu birimde bulanıklaştırma biriminden gelen veriler, kural tabanında bulunan kurallar doğrultusunda işlenerek bulanık sonuçlar üretilir.
- ◆ **Durulaştırma Birimi:** bulanık sonuçları, kontrol edilen sistemde kullanılabilir gerçek sayıya dönüştürme işlemini yapmaktadır. Durulaştırma işlemi sonucunda tek bir sonuca ihtiyaç duyulması sebebiyle, eğer birden çok çıktı varsa bunlar ağırlık merkezi, maksimumların ortalaması, minimumların ortalaması vb. yöntemlerle bulanık olmayan değerlere dönüştürülür. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Ağırlık merkezi yöntemi Şekil 3.9'da sunulmuş ve Eş. 3.5'te ifade edilmiştir.



Şekil 3.9. Ağırlık merkezi yöntemi

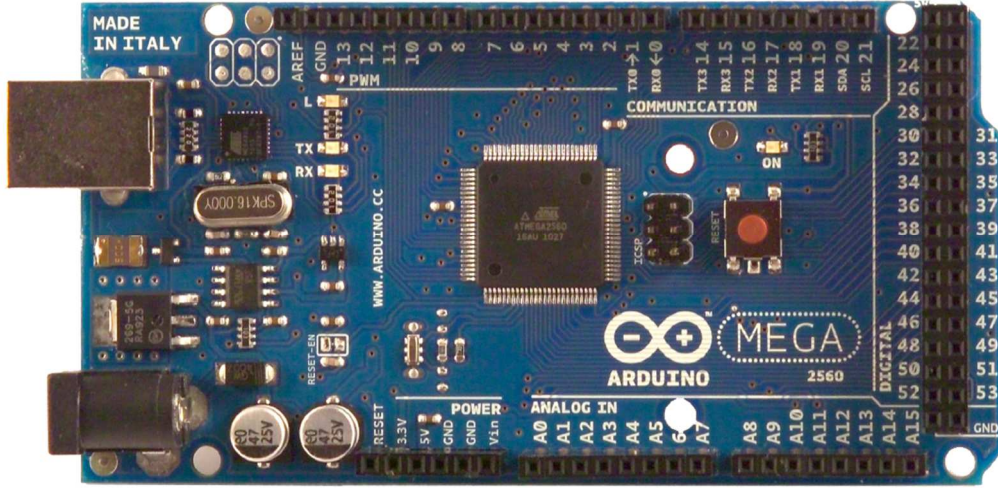
$$x^* = \frac{\int x u_{B'}(x) dx}{\int u_{B'}(x) dx} \quad (3.5)$$

3.3. Robot El Sistemi ve Sistemde Kullanılan Materyal

Tezin bu bölümünde robot el üzerinde bulunan elektronik, elektromekanik sistemler ve bileşenler hakkında kısa bir bilgi verilecektir. Ardından robot elin; mekanik, elektronik ve elektromekanik donanım yapısı açıklanacaktır.

3.3.1. Kontrol sistemi (mikrodenetleyici)

Mikrodenetleyiciler: programlanabilme, bir programı içerisinde depolayıp daha sonra çalıştırabilme özelliklerine sahip, sistemlere özel uygulamalar için geliştirilebilen dijital sistemlerdir (Conker, 2018: 533). Algılayıcılardan gelen verilerin işlenmesi, bu verilerin durumuna göre kararlar alınması ve bu kararlar doğrultusunda elektronik veya elektromekanik sistemlere kontrol sinyali gönderilmesi mikrodenetleyicilerin görevidir. Mikrodenetleyiciye yaptırılmak istenen görevler, programlama dilleri yardımıyla oluşturulan kodlar ile tanımlanır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada: robot elde sensörlerden gelen verilerin işlenmesi, servo motorların kontrol işlemleri, bilgisayar ile haberleşmenin gerçekleştirilmesi için mikrodenetleyici kullanılmıştır. Mikrodenetleyici olarak Arduino-Mega kullanılmıştır. Arduino-Mega Resim 3.1'de sunulmuştur. Arduino-Mega'nın teknik özellikleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir. Arduino; açık kaynak kodlu basit bir mikrodenetleyici devresi ve bu devreyi programlayabilmeyi sağlayan bir derleyiciden (Integrated Development Environment) oluşmaktadır (Arı, 2016).



Resim 3.1. Arduino-Mega

Çizelge 3.1 Arduino-Mega teknik özellikleri

<i>Mikrodenetleyici</i>	ATmega2560
<i>Gerilim Aralığı</i>	6- 20 V
<i>Giriş/Çıkış Pin Sayısı</i>	54 (15 tanesi PWM pini)
<i>Analog Giriş Pin Sayısı</i>	16
<i>Program Belleği</i>	256 KB
<i>EEPROM</i>	4 KB
<i>CPU Çalışma Hızı</i>	16 MHz

3.3.2. Hobi servo motor

Robotlarda uzuvları hareket ettirmek için çeşitli motorlar kullanılmaktadır. Yaygın kullanılan motor çeşitleri: hidrolik, pnömatik ve elektrik motorlarıdır. Motorlar kendilerine aktarılan belirli bir enerji türünü mekanik hareket enerjisine dönüştüren sistemlerdir (Akkuş ve Yavuz, 2018: 368). Bu tez kapsamında yapılan çalışmada parmakları hareket ettirmek için bir elektrik motoru çeşidi olan hobi servo motor kullanılmıştır. Hobi servo motor: hassas hareket ve konum kontrolü yapabilmesi sebebiyle tercih edilmiştir. Hobi servo motorlar genellikle: DC motor, dişli takımı, potansiyometre ve kontrol devresinden meydana gelir. Hobi servo motorlar kapalı döngü prensibine göre çalışmaktadırlar. Hobi servo motora kontrol sinyali gönderildikten sonra, içindeki potansiyometre sayesinde mevcut pozisyonunu tespit eder ve gitmesi gereken doğru pozisyona yönelir. Standart bir hobi servo motorun 3 kablosu vardır. Bunlar toprak (-), güç (+) ve data kablosudur. Servo

motor data kablosundan gönderilen PWM (darbe genişlik modülasyonu) sinyali ile kontrol edilmektedir. Bu çalışmada, Tower-Pro MG996R servo motor kullanılmış olup teknik özellikleri Çizelge 3.2’ verilmiştir.

Çizelge 3.2. Tower-Pro MG996R servo motor teknik özellikleri

<i>Zorlanma (Stall) Tork</i>	9,4 kg-cm
<i>Çalışma Hızı</i>	0.17 s/60°
<i>Çalışma Voltajı</i>	4,8 V - 7,2 V
<i>Akım</i>	500 mA - 900 mA
<i>Ağırlık</i>	55 g

3.3.3. Titreşim motoru

Robot elin nesneye uyguladığı kuvveti kullanıcıya haptik (dokunsal) geri bildirim yapabilmesi amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında kullanıcıya dokunsal bildirim titreşim ile sağlanması önerilmiş ve uygulanmıştır. Bunun için haptik geri bildirim sisteminde mini titreşim motorları kullanılmıştır. Titreşim motoru Resim 3.2’de, teknik özellikleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.



Resim 3.2. Mini titreşim motoru

Çizelge 3.3. Mini titreşim motoru teknik özellikleri

<i>Titreşim hızı</i>	12200 rpm
<i>Çalışma Voltajı</i>	3V – 5V
<i>Akım</i>	58 mA
<i>Çapı</i>	10 mm
<i>Ağırlık</i>	1,3 g

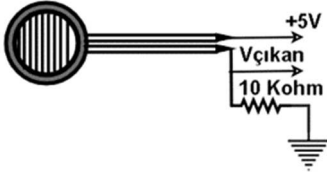
3.3.4. Kuvvet sensörü

FSR (kuvvete duyarlı direnç) kuvvet sensörü; aktif yüzeyine uygulanan kuvvetin artması ile dirençte azalma gösteren polimer kalın film elektronik bileşendir. Kuvvet sensörü üzerine kuvvet uygulanarak kuvvet-gerilim değişimi test edilmiştir. Elde edilen değerler Çizelge 3.4’te sunulmaktadır.

Çizelge 3.4. Kuvvet ve sensör değerleri

No	Kuvvet Degeri (cN)	Okunan Deger	No	Kuvvet Degeri (cN)	Okunan Deger	No	Kuvvet Degeri (cN)	Okunan Deger	No	Kuvvet Degeri (cN)	Okunan Deger
1	58,86	0	8	196,20	721	15	333,54	816	22	470,88	856
2	74,48	193	9	215,82	753	16	353,16	827	23	490,50	861
3	98,1	305	10	235,44	765	17	372,78	834	24	510,12	867
4	117,72	421	11	255,06	780	18	392,40	840	25	529,74	870
5	137,34	502	12	274,68	790	19	412,02	847	26	549,36	873
6	156,96	619	13	294,30	800	20	431,64	851	27	568,98	876
7	176,58	701	14	313,92	809	21	451,26	853	28	588,60	880

Kuvvet sensörüne uygulanan kuvvet miktarına göre üzerinden geçen gerilim miktarı, mikrodenetleyici ile ölçülmüştür. Sensörde üretilen değerler 0-5000 mili volt aralığındadır. Ancak mikrodenetleyici 10 bitlik analog-dijital dönüştürücüye sahip olduğu için 0-5000 mili volt aralığıyla orantılı 0-1023 aralığında sayısal değerler elde edilmektedir (Karaca ve Conker, 2018). Sensör ve direnç yardımıyla gerilim bölücü devre oluşturulmuş olup, oluşturulan devre ile kuvvet ölçümü yapılmıştır. Sensörün üzerine gelen kuvvete göre, direnç değişimi Eş. 3.6’da verilen matematiksel ifade ile hesaplanmıştır, devre ise Şekil 3.10’da sunulmuştur. Elde edilen kuvvete göre direnç değişiminin grafiği Şekil 3.11’de verilmiştir.

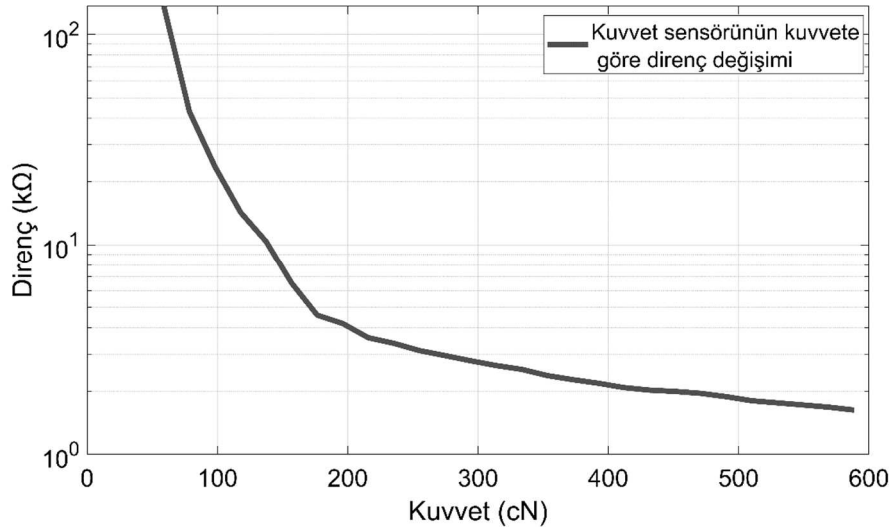


Şekil 3.10. Gerilim bölücü devre

$$R1 = R2 \times (V_{giren} - V_{çıkan}) \div V_{çıkan} \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6'da: R1; kuvvet sensörü direnç değeri, R2 devrede kullanılan 2. direnç değeri (10 kΩ), Vgiren; sensöre verilen gerilim miktarı (5V), Vçıkan; sensörden çıkan gerilim miktarıdır.

Şekil 3.11'de kuvvet sensörü üzerine kuvvet uygulandığında başlangıçta direnç değişiminin çok yüksek olduğu daha sonra direnç değişiminin azalarak, direncinin düştüğü görülmektedir. Şekil 3.11'de sunulan grafikte direnç değişimi logaritmik olarak, kuvvet değişim miktarı ise lineer olarak verilmiştir.

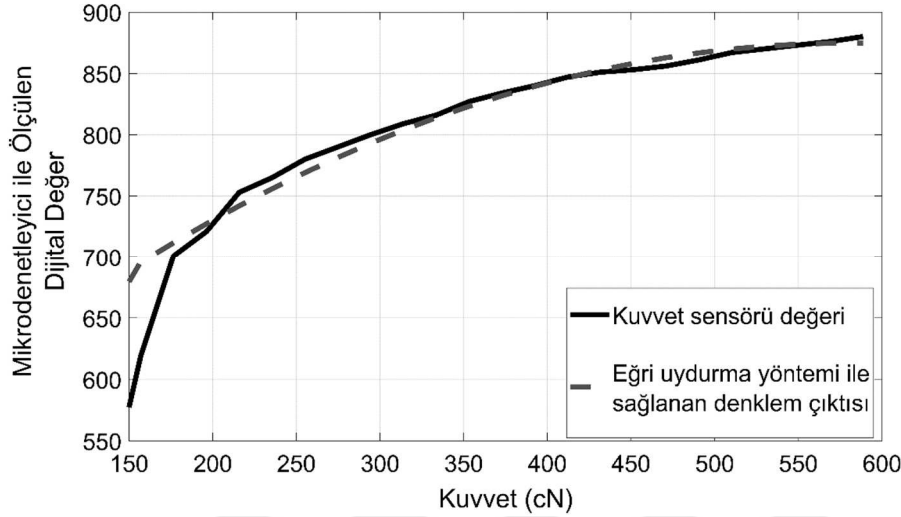


Şekil 3.11. Kuvvet sensörü kuvvet-direnç değişim grafiği

Kuvvet sensörüne yapılan test sonuçları mikrodenetleyici tarafından okunmuş ve elde edilen sayısal değerler eğri uydurma yöntemi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen kuvvet eğrisinin denklemi Eş. 3.7'de verilmiştir. Eğri uydurma yönteminde denklem elde edilirken sensörün başlangıçta duyarsız olduğu değerler ihmal edilmiştir. Eğri uydurma yöntem çıktısı ile ölçüm sonuçları Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Elde edilen denklemin, kuvvet sensörü değerlerinin değişimi ile tutarlılığa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

$$P = (-0.0010 \times n^2) + (1.1602 \times n) + 538.19 \quad (3.7)$$

Eş. 3.7’de: n; kuvvet miktarıdır (cN).



Şekil 3.12. Eğri uydurma yöntemi ile elde edilen değerlerin ve kuvvet sensöründen elde edilen değerlerin grafiği

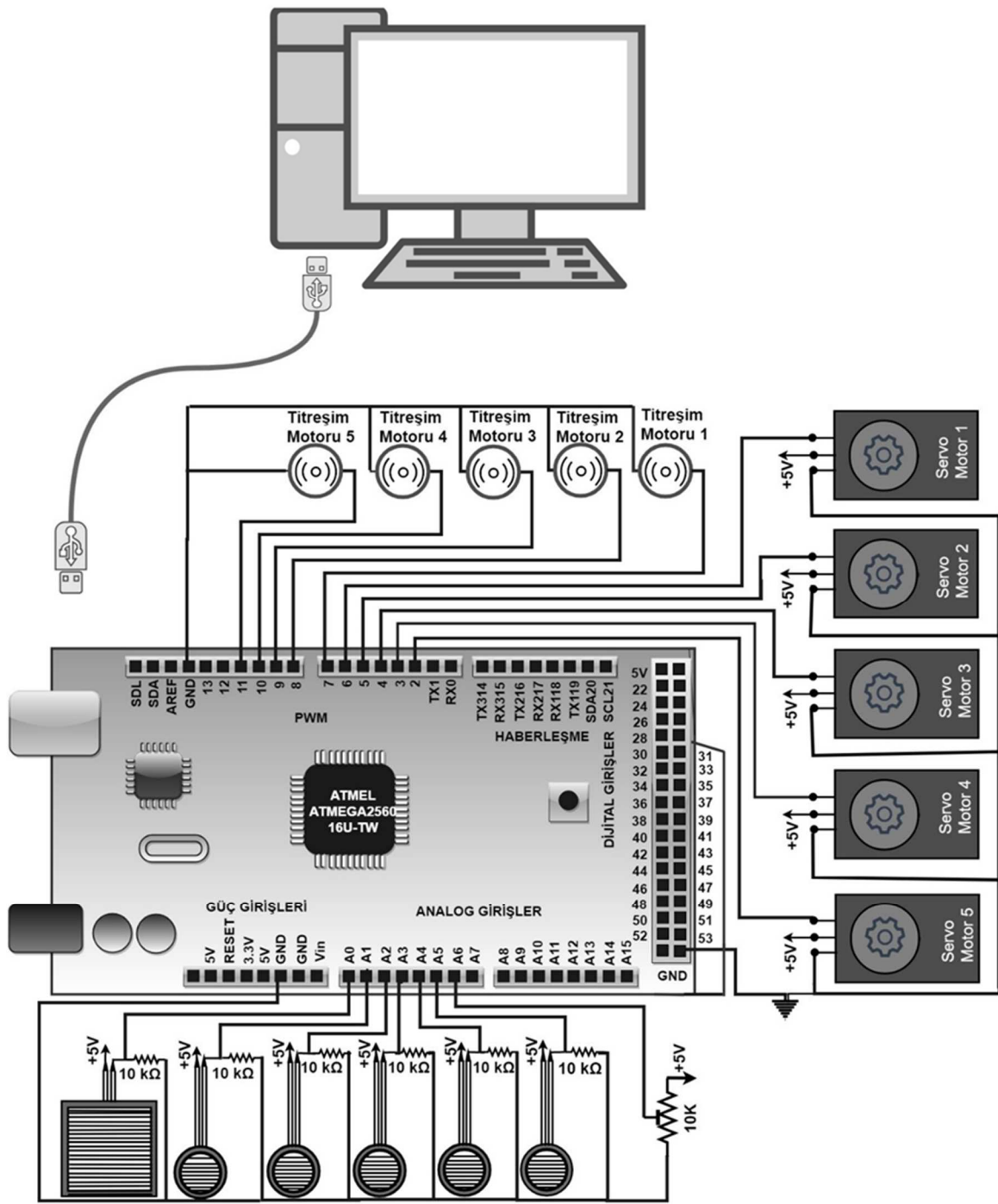
3.3.5. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi

3 boyutlu baskı, bilgisayar ortamında oluşturulan 3 boyutlu modelin katı formda çıktısının alındığı işlemdir (Aydın ve Küçük, 2016). 3 boyutlu yazıcı ise 3 boyutlu olarak tasarlanmış modelleri; ekstra bir kalıp ya da fikstüre ihtiyaç duymadan kat kat malzeme ekleyerek 3 boyutlu obje haline getiren sistemlerdir (Yıldırım, 2016). 3 boyutlu yazıcı ile obje üretiminde birçok farklı malzeme türü kullanılmaktadır, ancak günümüzde yaygın olarak kullanılan malzemelere bakıldığında genellikle ABS (Akronitil Butadin Stiren) tercih edildiği görülmüştür (Uraz ve Macit, 2018). ABS plastiğin yaygın olarak kullanılmasının sebepleri; mekanik aygıt, implant gibi ürünlerin üretiminde rahatlıkla kullanılabilir olmasının yanı sıra düşük maliyet, dayanıklılık ve hafiflik gibi özelliklere sahip olmasıdır (Demir ve diğerleri, 2016). 3 boyutlu yazıcı, 3 boyutlu modeli basmak için obje oluşturmada kullanılacak filament formundaki malzeme, yüksek sıcaklığa sahip bir nozul yardımı ile eritilir (Baş ve Yapıcı, 2015). Bu nozul bilgisayar tarafından kontrol edilerek parça geometrisini simüle edecek şekilde hareket ettirilir ve eriyen malzemenin yığılması ile obje oluşturulur. Bu tez çalışmasında kullanılan robot el 3 boyutlu yazıcı kullanılarak ABS malzeme ile basılmıştır. Böylelikle düşük maliyetli ve hafif bir el prototipi elde edilmiştir.

3.3.6. Robot elin elektronik donanım yapısı

Robot elin parmaklarını hareket ettirebilmek için parmaklarda bulunan misinaların sürülmesi, eyleyiciler ile sağlanmıştır. Eyleyici olarak her bir parmak için bir adet olmak üzere toplam 5 adet servo motor kullanılmıştır. Robot elin objeleri kavraması esnasında objeye uygulanan kuvvetin ölçülebilmesi için parmak uçlarına ve avuç içine kuvvet sensörleri yerleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanıcı tarafından kontrol sinyalinin gönderimi için ise potansiyometre kullanılmıştır. Ancak sistem, potansiyometre yerine EEG veya EMG gibi sensörlere de uyarlanabilir yapıdadır. Kullanıcı potansiyometre ile robot ele farklı kavrama komutları gönderebilmektedir. Kullanıcıya haptik geri bildirim yapılabilmesi için ise mini titreşim motorları kullanılmıştır. Kuvvet sensörü verilerinin okunması, parmakların hareketi için servo motorların konum kontrolü, titreşim motorlarına uygun PWM (darbe genişlik modülasyonu) sinyalinin gönderilmesi, bilgisayar ile haberleşmenin gerçekleştirilmesi mikrodenetleyici ile sağlanmaktadır. Robot elde mikrodenetleyici olarak arduino mega tercih edilmiştir. Robot el üzerinde bulunan elektronik donanımlar ve donanımların bağlantı şeması Şekil 3.13'te verilmiştir.

Servo motorlar ve titreşim motorları PWM sinyali ile kontrol edilmektedir. Bu sebeple motorların data kabloları arduinonun PWM pinlerine bağlanmıştır. PWM pinlerinde; belirli zaman aralıklarıyla (periyotta) sisteme gönderilen gerilim açılıp kapatılarak ortalama gerilim miktarı ayarlanmaktadır. Böylelikle sisteme analog gerilim istenen değerde gönderilebilmektedir. Bir periyotta gerilim gönderilme aralığı duty cycle (görev döngüsü) olarak adlandırılmaktadır. Görev döngüsünün değişmesiyle ortalama gerilim miktarı değişmektedir. Örneğin: maksimum 5 volt gerilim ile sürülen bir motoru arduino ile sürecektek olursak, arduinonun PWM pinlerinde bulunan dijital analog dönüştürücü (DAC) 8 bitlik olduğu için 0-255 aralığında değişen değerlerle motor sürülebilecektir. Arduinodan motora; 0 gönderildiğinde 0 volt, 102 gönderildiğinde 2 volt, 255 gönderildiğinde ise 5 volt gönderilecektir. Kuvvet sensörleri ise analog veri üretmektedir. Bu sebeple kuvvet sensörlerinden gelen veriler arduinonun analog pinlerine bağlanmıştır. Arduinonun analog pinlerinde bulunan analog dijital dönüştürücünün (ADC) 10 bitlik olması sebebiyle, kuvvet sensörlerinden 0-1023 aralığında değişen değerler elde edilmektedir.

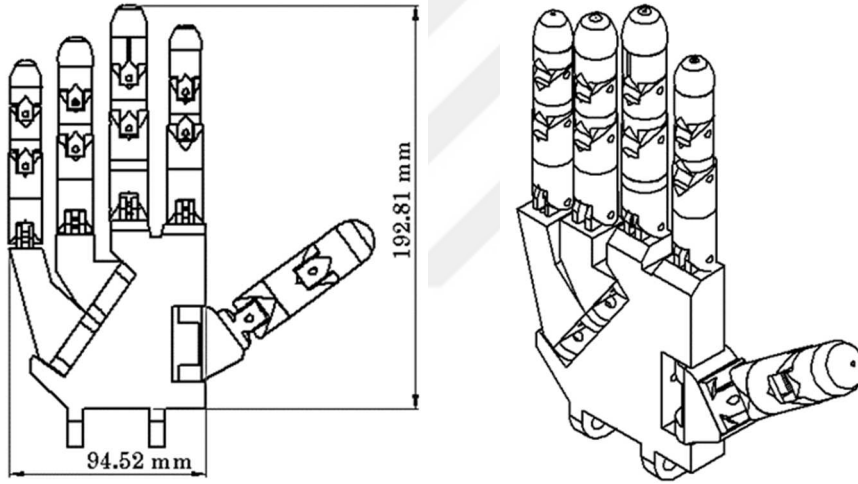


Şekil 3.13. Robot elin elektronik donanım bağlantısı

3.3.7. Robot elin mekanik yapısı

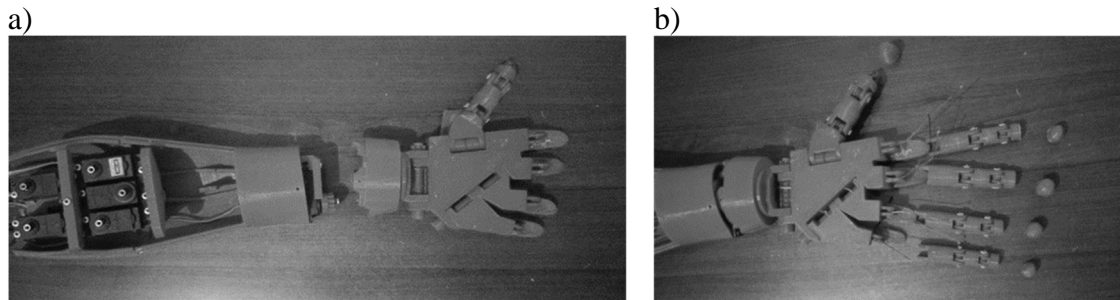
Tez kapsamında yapılan çalışmada, 5 parmaklı ve mekanizma olarak 17 serbestlik derecesine sahip robot el kullanılmıştır (Langevin, 2016). Baş, işaret ve orta parmağı 3'er serbestlik derecesine sahiptir. Yüzük ve serçe parmağı ise avuç içinde kısmen hareket yapabilmelerini sağlayan eklemlerle 4'er serbestlik derecesine sahiptir. Ancak avuç içinde

bulunan eklemlerin hareketli olması durumunda orta parmak ile yüzük parmağı kapanırken çakışmaktadır. Bu sebeple bu tez çalışması kapsamında yüzük ve serçe parmağın 4. eklemleri sabitlenmiştir. Robot elin yüzük ve serçe parmağının serbestlik dereceleri 3 olmuştur. Dolayısıyla robot el mekanizmasının serbestlik derecesi 15 olmuştur. Sistem eksik tahrikli yapıda olup her bir parmak 1 adet servo motor ile kontrol edilmektedir. Eklemler birbirine mafsallarla bağlanmıştır. Parmaklara hareket ve kuvvet iletimi tendonlarla sağlanmaktadır. Tendon kullanımı ile parmak eklemlerinin nesneye göre adaptif şekil alması sağlanmıştır. Tendonların hareketini sağlayan eyleyiciler ön kolda yer almaktadır. Ayrıca bilek tek serbestlik derecesine sahiptir ve hareket iletimi dişlilerle sağlanmaktadır. Elin boyutu ve yapısı, insan eli ile benzer yapıdadır. SolidWorks'de tasarlanan el Şekil 3.14'te sunulmuştur.

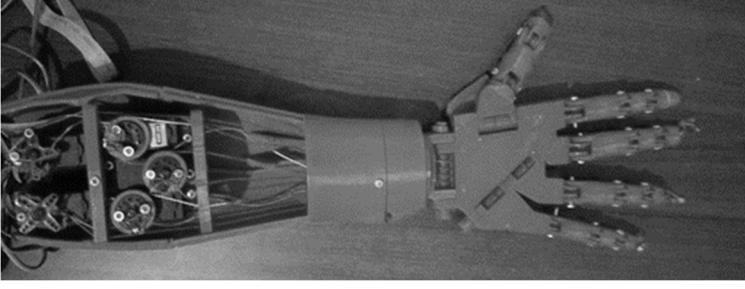


Şekil 3.14. Robot elin boyutu

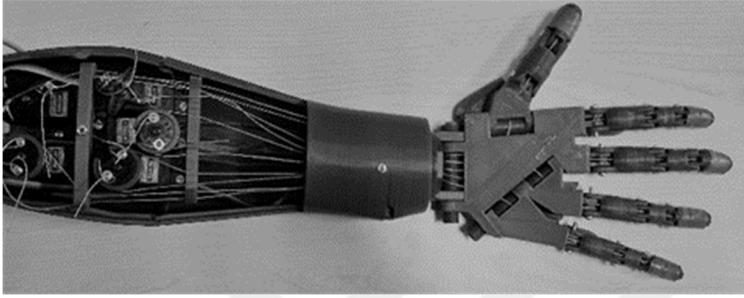
Robot elin 3 boyutlu yazıcı ile basılmış ve aşamalı olarak montaj resimleri: Resim 3.3, Resim 3.4, Resim 3.5, Resim 3.6, Resim 3.7'de verilmiştir.



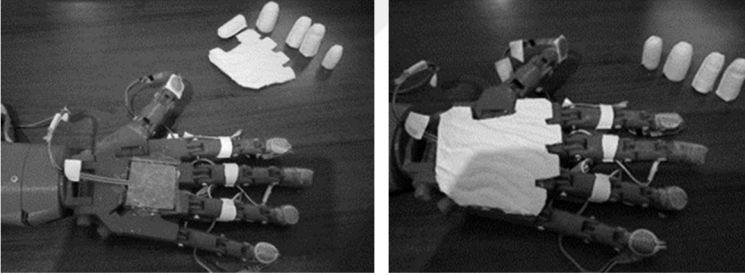
Resim 3.3. (a) Robot elin ön kol ve (b) parmaklarının montajı



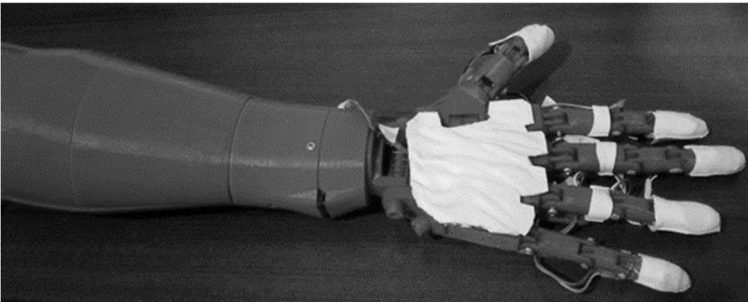
Resim 3.4. Robot elin ön kolda bulunan servo motorlar ile parmaklarına ait tendonların montaj edilmiş hali



Resim 3.5. Robot elin parmak uçlarının montaj yapılmış hali



Resim 3.6. Robot ele kuvvet sensörlerinin yerleştirilmesi



Resim 3.7. Robot elin montajının bitmiş hali

3.4. Robot El ve Haptik Geri Bildirim Sisteminin Kontrol Yapısı

Tezin bu bölümünde haptik geri bildirim sisteminin kontrolü ve robot elin kuvvet kontrolü hakkında bilgi verilecektir. Robot el ve haptik geri bildirim sistemi, MIMO (çok girdili ve çok çıktılı) yapıya sahiptir. MIMO sistemler için doğrusal bir model oluşturularak, sistemlerin kontrolünü gerçekleştirmek oldukça zordur. Doğrusal modeli oluşturulamayan sistemlerde iyi sonuçlar vermesi sebebiyle, bu sistemlerin kontrolünde bulanık mantık kullanılarak kontrol yapısı oluşturulmuştur.

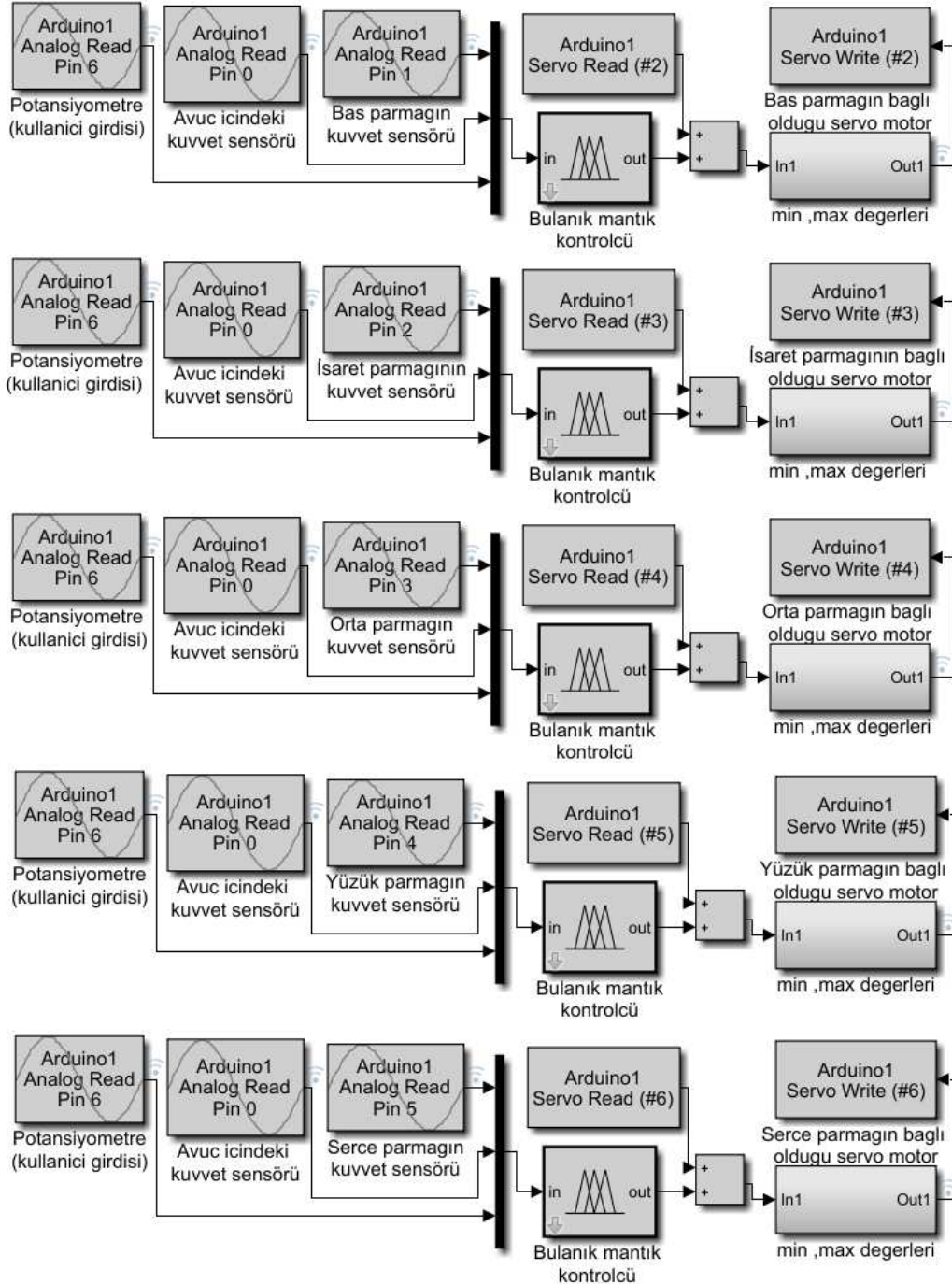
3.4.1. Robot el sisteminin kuvvet kontrol yapısı

Robot el ile farklı geometrik özelliklere sahip nesnelerin, farklı kuvvet aralıklarında kavranması ve kavrama işlemi için uygun hareket formlarının oluşturulması oldukça karmaşık ve uzmanlık gerektiren bir konudur. Bulanık mantık; sisteme özel, belirli uygulamalar için oldukça iyi performans sağlamaktadır (Kubat, 2014). Bu sebeple sistem kontrolünde bulanık mantık tabanlı kontrolcü geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Tasarlanan bulanık mantık kontrol sistemi; kullanıcı komutu doğrultusunda, kuvvet geri beslemesi ile kendi kendine kavrama işlemi için parmakların konumuna karar verebilme yeteneğine sahiptir. Bu kontrol sisteminde; robot el nesneyi kavramaya başladığında kuvvet sensörü verileri mikrodenetleyiciye gönderilmektedir, ayrıca kullanıcıdan da potansiyometre aracılığıyla bir kontrol işareti alınmaktadır. Sisteme gelen veriler bulanık mantık kontrolör ile değerlendirilmektedir. Değerlendirme sonucunda servo motorlara uygun kontrol sinyali gönderilerek nesnenin kullanıcının istediği kuvvette kavranması sağlanmaktadır.

Bulanık mantık karar yapısı

Robot el sisteminin hareket kontrolü servo motorlarla yapılmakta olup, parmak falanklarına ve avuç içine kuvvet sensörleri yerleştirilerek, kavranan nesneye uygulanan kuvvetin ölçülmesi sağlanmaktadır. Kullanıcı tarafından farklı kavrama komutları ise potansiyometre ile gönderilmektedir. Potansiyometreden gönderilen sinyal referans kuvveti belirtmekte olup sistem kavrama kuvvetini bu sinyal doğrultusunda belirlemektedir. Her parmak için potansiyometre verisi ve kuvvet sensörü verileri bulanık mantıkla işlenerek, kuvvet geri beslemeli kontrolcü geliştirilmiştir. Bu sistemde kuvvet sensörü verileri ve potansiyometreden gelen veri doğrultusunda parmakların açılması veya

kapanması için servo motorlara uygun PWM (darbe genişlik modülasyonu) sinyali gönderilerek aç kontrolü yapılmaktadır. Gönderilecek olan PWM sinyaline bulanık mantık kontrolör ile karar verilmektedir. Şekil 3.15'te robot el için oluşturulan bulanık mantık kontrol sisteminin blok diyagramı ile gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3.15. Robot elin parmakları için oluşturulan kontrol sisteminin blok diyagramı

Bulanık mantık kontrolcünün özellikleri ve yapısı

Oluşturulan bulanık mantık kontrolcü her bir parmak için avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verileri, parmakta bulunan sensörlerden gelen veriler ve potansiyometreden gelen veriler olmak üzere 3 girdiye göre karar vermektedir. Kontrolcü bu 3 girdiye göre parmakların konumunu ayarlayan servo motora gönderilecek kontrol sinyaline karar vermektedir. Parmakların açılması veya kapanmasıyla nesneye uygulanan kuvvet değişmektedir. Servo motorların açı kontrolü ile parmakların konum kontrolü yani nesneye uygulanan kuvvetin kontrolü sağlanmaktadır. Çizelge 3.5'te ve Çizelge 3.6'da bulanık mantık kontrolcü için oluşturulan dilsel kural tabloları verilmiştir. Dilsel kural tabloları doğrultusunda (5x5x5)125 kural tanımlaması yapılmıştır. Okunan sensör değerleri bulanık mantık kural tablosunda: az, az-orta, orta, çok-orta ve çok olmak üzere 5 girdi üyelik kümesinde tanımlanmıştır. Çizelge 3.5'te sunulan kural tablosunda: parmak ucundaki sensör ve avuç içerisindeki sensör üyelik kümesi değerlerine göre sırasıyla D1; az ve az, az ve az-orta durumunu D2; az ve orta, az-orta ve az-orta, az-orta ve orta, çok-orta ve az durumunu, D3; az-orta ve çok-orta, orta ve orta, çok ve az durumunu, D4: çok ve az-orta, çok-orta ve orta, orta ve çok, çok-orta ve çok-orta durumunu, D5: çok ve çok-orta, çok ve çok durumunu temsil etmektedir. Çizelge 3.6'da sunulan girdilere göre çıktı üyelik kümeleri dilsel olarak: NB; negatif-büyük, NO; negatif orta, NK; negatif-küçük, S; sıfır, PK; pozitif-küçük, PO; pozitif-orta, PB; pozitif-büyük şeklinde tanımlanmıştır.

Çizelge 3.5. Bulanık mantık kural tablosu 1

Parmak ucunda bulunan kuvvet (FSR) sensörü	Avuç içinde bulunan kuvvet (FSR) sensörü					
		Az	Az-Orta	Orta	Çok-Orta	Çok
	Az	D1	D1	D2	D2	D3
	Az-Orta	D1	D2	D2	D3	D4
	Orta	D2	D2	D3	D4	D4
	Çok-Orta	D2	D3	D4	D4	D5
	Çok	D3	D4	D4	D5	D5

Çizelge 3.6. Bulanık mantık kural tablosu 2

1. Kural tablosu değerleri	Kullanıcıdan gelen komut					
		Bırak	Hafif-Tut	Tut	Hafif-Sık	Sık
	D1	NK	PK	PO	PB	PB
	D2	NK	S	PK	PO	PB
	D3	NO	NK	S	PK	PO
	D4	NB	NO	NK	S	PK
	D5	NB	NB	NO	NK	S

Bulanık mantık kontrol sisteminde Mamdani bulanık çıkarım sistemi (FIS) tanımlanmıştır. FIS sistemi 3 girdi ve 1 çıktı üyelik fonksiyonundan oluşmaktadır. Girdi ve çıktı üyelik fonksiyonları Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da sunulmuştur. Kuvvet sensörü üzerine kuvvet uygulanarak test edilmiştir. Bu test sonucunda 0-588,6 cN kuvvet aralığına karşılık mikrodenetleyici tarafından 0-880 aralığında sayısal değerler elde edilmiştir. Elde edilen sayısal değerler bulanık mantık girdi üyelik kümelerinin parametrelerinin tanımlanmasında kullanılmıştır. Bu parametreler ve kuvvet karşılıkları Çizelge 3.7’de sunulmuştur.

Çizelge 3.7. Parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörlerinin üyelik kümesi parametreleri

Parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörünün girdi üyelik küme isimleri	Okunan dijital değerlere karşılık gelen kuvvet (cN)	Okunan dijital değere göre üyelik kümesi parametreleri [0-1023]
Az	[0 0 147,5]	[0 0 537]
Az-Orta	[0 147,5 294,3]	[0 537 800]
Orta	[147,5 294,3 441,45]	[537 800 852]
Çok-Orta	[294,3 441,45 588,60]	[800 852 880]
Çok	[441,45 588,60 588,60]	[852 880 880]

Kullanıcı tarafından gönderilen kontrol sinyalinin girdi üyelik kümesi parametreleri Çizelge 3.8’de, bulanık mantık çıktı üyelik kümesi parametreleri Çizelge 3.9’da sunulmuştur. Çizelge 3.8’de bulunan kullanıcı kontrol sinyali girdi üyelik kümesi parametreleri bir potansiyometreden elde edilen dijital değerler doğrultusunda tanımlanmıştır. Potansiyometreden 0 ile 1023 arasında lineer bir şekilde değişen dijital değerler elde edilmekte ve Çizelge 3.8’de bulunan parametrelerin tanımlanmasında, elde edilen bu dijital değer aralığı, eşit değer aralıklarıyla kullanılmıştır.

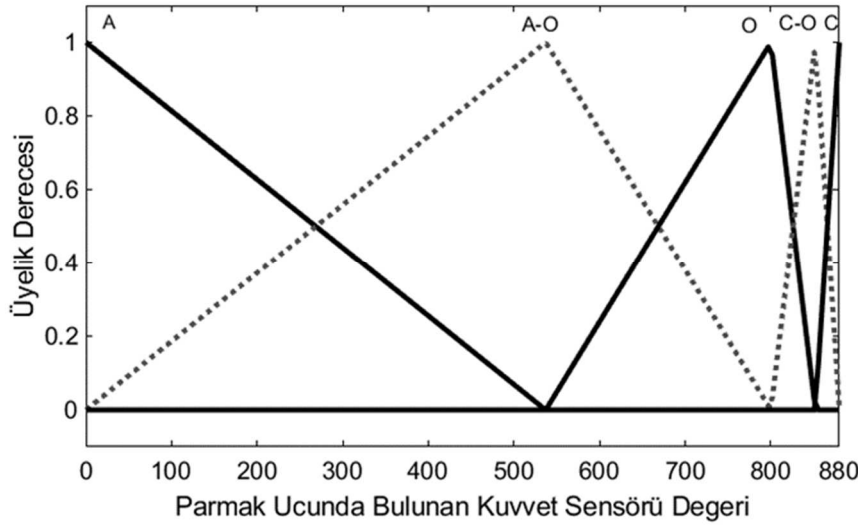
Çizelge 3.8. Kullanıcı kontrol sinyalinin girdi üyelik kümesi parametreleri

Kontrol sinyalinin girdi üyelik kümesi isimleri	Tanımlanan girdi üyelik kümesi parametreleri
Bırak	[0 0 256]
Hafif Tut	[0 256 512]
Tut	[256 512 768]
Hafif Sık	[512 768 1023]
Sık	[768 1023 1023]

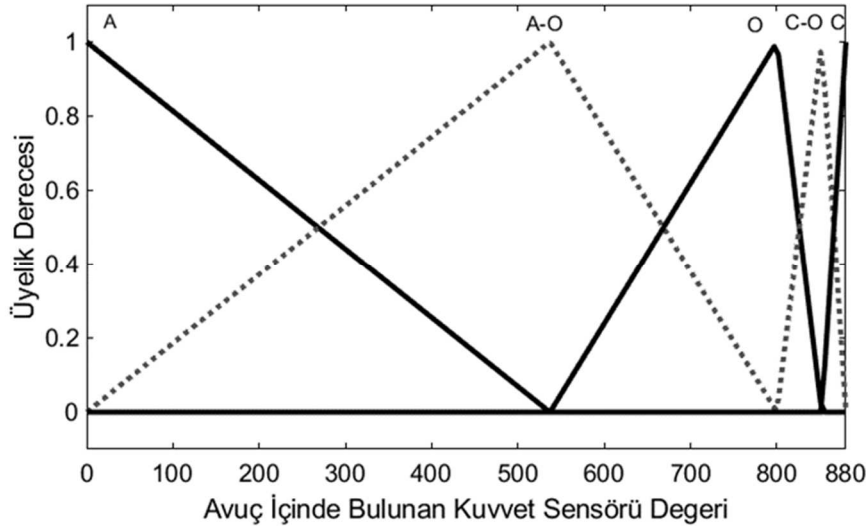
Çizelge 3.9. Servo motorun çıktı üyelik kümesi parametreleri

Servo Motorun Çıktı Üyelik Küme İsimleri	Tanımlanan Çıktı Üyelik Küme Parametreleri
Negatif Büyük (NB)	[-6 -6 -4]
Negatif Orta (NO)	[-6 -4 -2]
Negatif Küçük (NK)	[-4 -2 0]
Sıfır (S)	[-2 0 2]
Pozitif Küçük (PK)	[0 2 4]
Pozitif Orta (PO)	[2 4 6]
Pozitif Büyük (PB)	[4 6 6]

Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterilen girdi üyelik fonksiyonlarının sınırları robot el üzerinde kullanılan kuvvet sensörleri tarafından ölçülen ve mikrodenetleyici tarafından elde edilen dijital değerler doğrultusunda tanımlanmıştır. Kuvvete göre kuvvet sensöründen elde edilen dijital değerlerin lineer olmaması sebebiyle üyelik fonksiyonlarının parametre aralıkları eşit değildir.



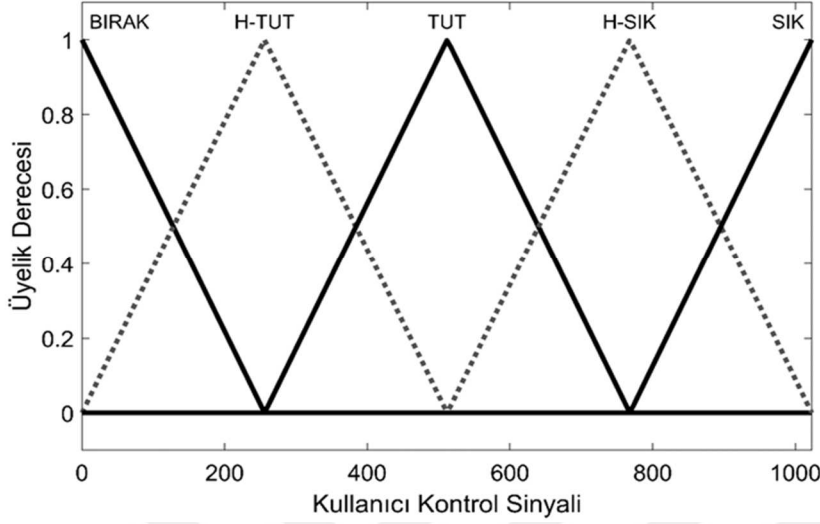
Şekil 3.16. Parmak ucundaki kuvvet sensörünün üyelik fonksiyonu



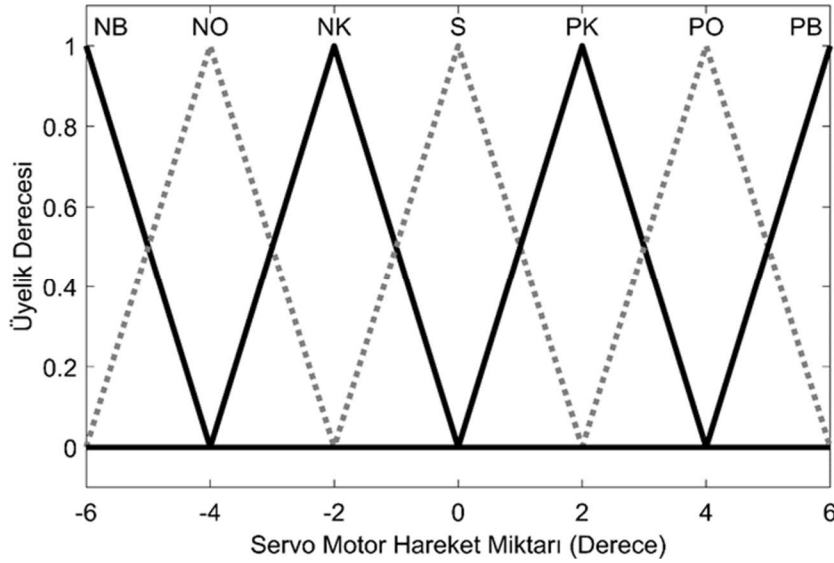
Şekil 3.17. Avuç içinde bulunan kuvvet sensörünün üyelik fonksiyonu

Şekil 3.18’de potansiyometreden gönderilen kontrol sinyalinin üyelik fonksiyonları verilmiştir. Kontrol sistemi kullanıcı temelli bir sistem olup, kullanıcının hatası minimize edilmek istenmektedir. Şekil 3.19’da ise sistemin çıktısının üyelik fonksiyonu

gösterilmektedir. Sistemin çıktısında kuvvet kontrolü için servo motorun kaç derece açı ile dönmesi gerektiğine karar verilmektedir.



Şekil 3.18. Kullanıcıdan gelen kontrol sinyalinin üyelik fonksiyonu



Şekil 3.19. Servo motorun hareket miktarının üyelik fonksiyonu

Bulanık mantık kontrol sisteminde tanımlanan kurallar aşağıda verilmiştir. Burada FSR-1 avuç içindeki kuvvet sensörü, FSR-2 ise parmak ucundaki kuvvet sensörünü ifade etmektedir. Kurallar:

1. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)
2. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)
3. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)

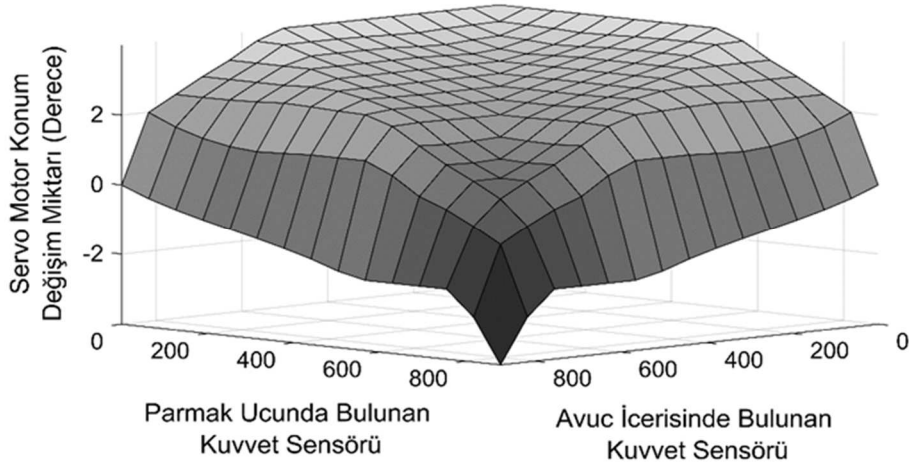
4. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)
5. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NO)
6. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)
7. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)
8. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)
9. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NO)
10. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
11. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)
12. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)
13. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NO)
14. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
15. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
16. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NK)
17. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NO)
18. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
19. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
20. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
21. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NO)
22. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
23. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
24. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
25. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is BIRAK) then (Servo is NB)
26. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is PK)
27. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is PK)
28. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is S)
29. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is S)
30. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NK)
31. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is PK)
32. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is S)
33. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is S)
34. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NK)
35. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NO)
36. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is S)
37. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is S)

38. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NK)
39. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NO)
40. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NO)
41. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is S)
42. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NK)
43. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NO)
44. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NO)
45. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NB)
46. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NK)
47. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NO)
48. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NO)
49. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NB)
50. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-TUT) then (Servo is NB)
51. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PO)
52. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PO)
53. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PK)
54. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PK)
55. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is TUT) then (Servo is S)
56. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PO)
57. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PK)
58. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PK)
59. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is S)
60. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NK)
61. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PK)
62. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PK)
63. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is S)
64. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NK)
65. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NK)
66. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is TUT) then (Servo is PK)
67. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is S)
68. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NK)
69. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NK)
70. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NO)
71. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is TUT) then (Servo is S)

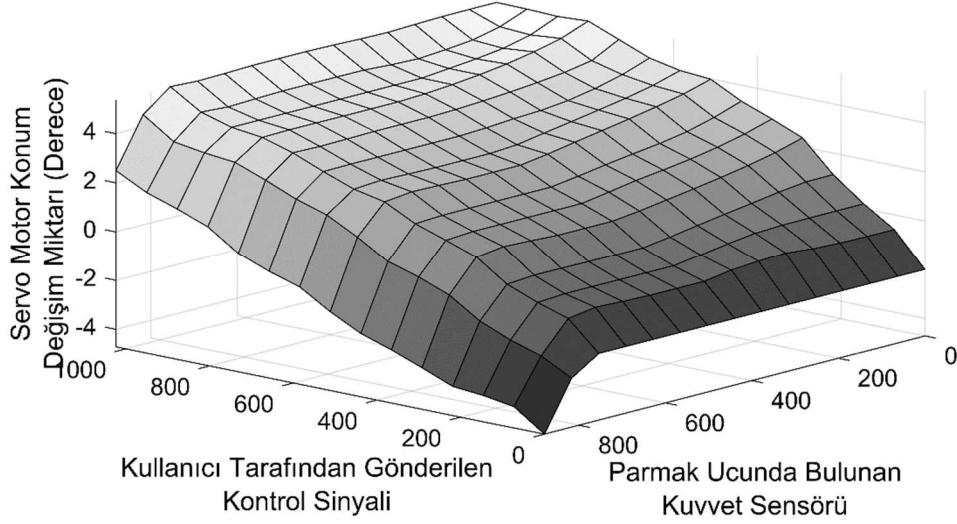
72. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NK)
73. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NK)
74. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NO)
75. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is TUT) then (Servo is NO)
76. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PB)
77. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PB)
78. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PO)
79. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PO)
80. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PK)
81. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PB)
82. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PO)
83. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PO)
84. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PK)
85. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is S)
86. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PO)
87. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PO)
88. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PK)
89. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is S)
90. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is S)
91. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PO)
92. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PK)
93. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is S)
94. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is S)
95. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is NK)
96. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PK)
97. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is S)
98. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is S)
99. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is NK)
100. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is NK)
101. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
102. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
103. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
104. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
105. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PO)

106. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
107. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
108. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
109. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PO)
110. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PK)
111. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
112. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
113. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PO)
114. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PK)
115. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PK)
116. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PB)
117. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PO)
118. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PK)
119. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PK)
120. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is SIK) then (Servo is S)
121. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PO)
122. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PK)
123. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is PK)
124. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is SIK) then (Servo is S)
125. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C) and (Kullanici is SIK) then (Servo is S)

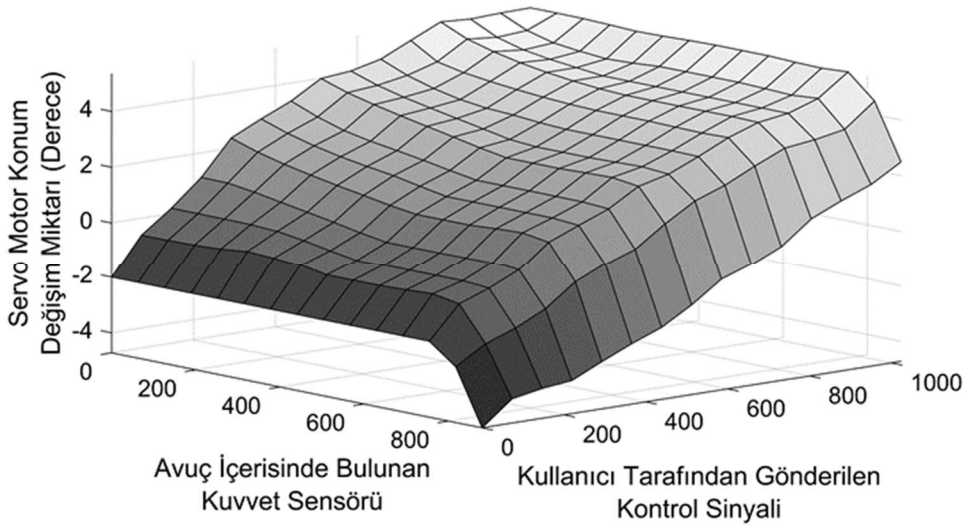
Girdi üyelik fonksiyonları ile çıkış üyelik fonksiyonu ağırlık merkezi yöntemiyle hesaplanmıştır. Servo motorlara uygulanacak olan açı değişim miktarı elde edilmiştir. Servo motor için elde edilen açı değişim miktarının yüzey grafikleri: Şekil 3.20, Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Avuç içerisinde ve parmakta bulunan kuvvet sensörünün değeri ve servo motor konum değışim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği



Şekil 3.21. Kullanıcı tarafından gönderilen kontrol sinyali, parmakta bulunan kuvvet sensörünün değeri ve servo motor konum değışim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği



Şekil 3.22. Avuç içerisinde bulunan kuvvet sensörünün değeri, kullanıcı tarafından gönderilen kontrol sinyali ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği

Oluşturulan bulanık mantık kontrol sistemi bir örnek ile açıklanacak olur ise: avuç içerisinde bulunan kuvvet sensöründen 810, parmak ucunda bulunan kuvvet sensöründen 800 ve kullanıcıdan 768 dijital değeri gönderilsin. Bu değerlerin ait olduğu üyelik kümelerine bakıldığında (Bkz. Çizelge 3.7); 810 değeri hem Orta hem de Çok-Orta üyelik kümesine aittir. 800 değeri ise Orta üyelik kümesine aittir. Kontrol sinyali olan 768 sayısal değeri ise (Bkz. Çizelge 3.8) hafif-sık üyelik kümesinin elemanı olduğu görülmektedir. Verilen bu sayısal değerlerin ait oldukları üyelik kümelerinin üyelik dereceleri Eş. 3.1’de verilen denklem ile hesaplanacak olur ise; Eş.3.8, Eş. 3.9, Eş. 3.10 ve Eş. 3.11 elde edilir. Avuç içerisinde bulunan kuvvet sensöründen gelen 810 sayısal değerinin ait olduğu Orta üyelik kümesi için üyelik derecesi Eş. 3.8 ile hesaplanmıştır.

$$\mu_{x_1} = \frac{852 - 810}{852 - 800} = 0.808 \quad (3.8)$$

Avuç içerisinde bulunan kuvvet sensöründen gelen 810 sayısal değerinin Çok-Orta üyelik kümesi için üyelik derecesi Eş. 3.9 ile hesaplanmıştır.

$$\mu_{x_2} = \frac{810 - 800}{852 - 800} = 0.192 \quad (3.9)$$

Parmak ucunda bulunan kuvvet sensöründen gelen 800 sayısal değerinin Orta üyelik kümesi için üyelik derecesi Eş. 3.10 ile hesaplanmıştır.

$$\mu_{x_3} = \frac{852 - 800}{852 - 800} = 1 \quad (3.10)$$

Kullanıcı tarafından gönderilen kontrol sinyalinin Hafif-Sık isimli üyelik kümesi için üyelik derecesi Eş. 3.11’de verilmiştir.

$$\mu_{x_4} = \frac{1023 - 768}{1023 - 768} = 1 \quad (3.11)$$

Bulanık mantık için tanımlanan kurallara göre elde edilen değerler için bulanıklaştırma işlemi Çizelge 3.10’da sunulmuştur. Eş. 3.8, Eş 3.9, Eş 3.10 ve Eş. 3.11’de elde edilen değerler Çizelge 3.10’da üçgen üyelik fonksiyonları üzerinde gösterilmiştir. Elde edilen üçgen üyelik fonksiyonları üzerinde bulanık mantık kontrolcünde tanımlanan; kural 88 ve kural 89’a göre işlemler yapılmıştır. Durumlar kural tabanında “ve” bağlacı ile tanımlandığı için bulanıklaştırma işlemi “min” operatörü ile yapılmıştır.

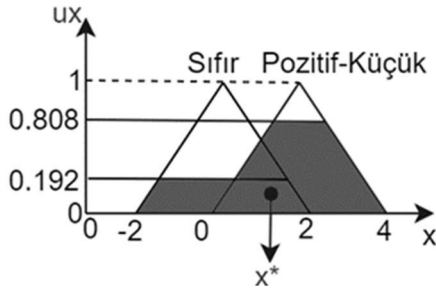
Kural 88. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is PK)

Kural 89. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C-O) and (Kullanici is H-SIK) then (Servo is S)

Çizelge 3.10. Bulanıklaştırma işlemi

Kurallar	Kural 88.	Kural 89.
	Eğer	Eğer
Avuç içerisinde bulunan kuvvet sensörü (FSR-1)		
	ve	ve
Parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü (FSR-2)		
	ve	ve
Kullanıcı komutu		
	O halde	O halde
Servo motor konum değişim miktarı (derece)		

Çizelge 3.10 ile bulanık çıktı elde edilmiştir. Çizelge 3.10'dan elde edilen bulanık çıktı Şekil 3.23'te verilmiştir. Şekil 3.23'te verilen bulanık çıktı için durulaştırma işlemi ağırlık merkezi yöntemi ile yapılmıştır. Ağırlık merkezi yöntemi ile durulaştırma işlemi Eş. 3.5'te verilen denklemde değişkenlerin yerine yazılması ile Eş. 3.12 ve Eş.3.13'te hesaplanmıştır.



Şekil 3.23. Bulanık çıktı

$$x^* = \frac{\int x u_{B.}(x) dx}{\int u_{B.}(x) dx} = \frac{\left(\int_{-2}^{-1.616} x \times (x+2) \times \frac{1}{2} dx + \int_{-1.616}^{0.384} x \times (0.192) dx + \dots \right)}{\left(\int_{-2}^{-1.616} (x+2) \times \frac{1}{2} dx + \int_{-1.616}^{0.384} (0.192) dx + \dots \right)} \quad (3.12)$$

$$\frac{\int_{0.384}^{1.616} x \times x \times \frac{1}{2} dx + \int_{1.616}^{2.384} x \times (0.808) dx + \int_{2.384}^4 x \times (4-x) \times \frac{1}{2} dx}{\int_{0.384}^{1.616} x \times \frac{1}{2} dx + \int_{1.616}^{2.384} (0.808) dx + \int_{2.384}^4 (4-x) \times \frac{1}{2} dx}$$

İntegral alma işlemi yapılıncı Eş. 3.13 elde edilir.

$$x^* = \frac{\int x u_{B.}(x) dx}{\int u_{B.}(x) dx} = \frac{\left(\frac{x^3}{6} + 2x^2/4 \right) \Big|_{-2}^{-1.616} + (0.192 \times x^2/2) \Big|_{-1.616}^{0.384} + \dots}{\left(x^2/4 + x \right) \Big|_{-2}^{-1.616} + (0.192 \times x) \Big|_{-1.616}^{0.384} + \dots} \quad (3.13)$$

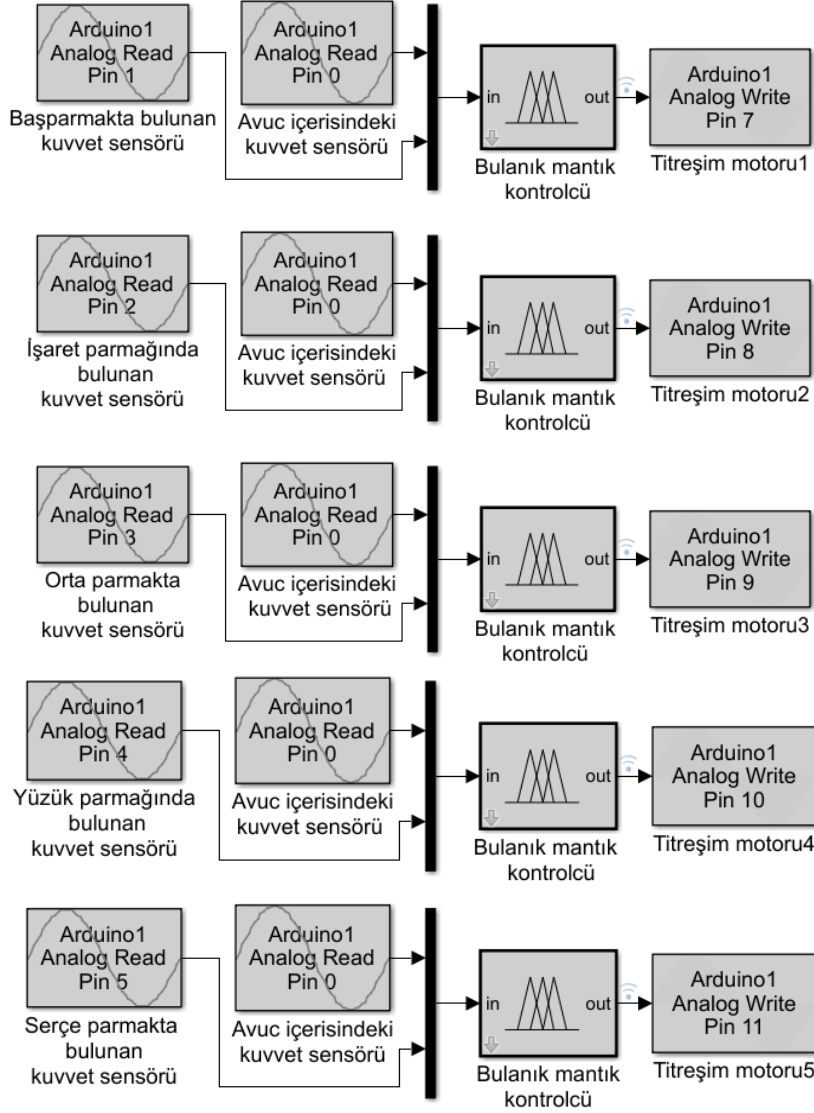
$$\frac{\left(\frac{x^3}{6} \right) \Big|_{0.384}^{1.616} + (0.808 \times x^2/2) \Big|_{1.616}^{2.384} + (4x^2/4 - x^3/6) \Big|_{2.384}^4}{\left(x^2/4 \right) \Big|_{0.384}^{1.616} + (0.808 \times x) \Big|_{1.616}^{2.384} + (2x - x^2/4) \Big|_{2.384}^4} = 1.5$$

Eş. 3.12 ve Eş. 3.13'te verilen işlem ile ağırlık merkezi yöntemi ile durulaştırma işlemi gerçekleştirilmiş ve servo motorun kaç derece hareket etmesi gerektiği hesaplanmıştır.

3.4.2. Haptik geri bildirim sisteminin kontrol yapısı

Robot elin kavradığı objelere uyguladığı kuvveti kullanıcıya haptik (dokunsal) geri bildirim yapabilmesi için titreşim motorları kullanılmıştır. Robot elin objelere uyguladığı kuvvet, parmak uçları ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörleri vasıtasıyla ölçülmekte ve bulanık mantık kontrolcü bu kuvvet verilerini değerlendirerek titreşim motoruna

gönderilecek PWM sinyaline karar vermektedir. Şekil 3.24'te haptik geri bildirim sisteminin blok diyagramı sunulmuştur.



Şekil 3.24. Haptik geri bildirim sistemin blok diyagramı

Bulanık mantıkta çıkarım sistemi olarak Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Girdi ve çıktıların kolaylıkla modellenebilmesi sebebiyle de üçgen üyelik fonksiyonu tercih edilmiştir. Haptik geri bildirim sistemi için bulanık mantık kontrolcü parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verilerini değerlendirmektedir. Bu sensör verileri için 5 üyelik kümesi tanımlanmıştır. Titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyali için ise 7 üyelik kümesi tanımlanmıştır. Bir önceki bölümde (Bkz. Şekil 3.16), (Bkz. Şekil 3.17) kuvvet sensörlerinin üyelik kümeleri ve (Bkz. Çizelge 3.7) kuvvet sensörlerinin üyelik kümelerinin parametreleri verilmiştir.

Haptik geri bildirim sistemi için oluşturulan bulanık mantık kontrolcünün özellikleri ve yapısı

Haptik geri bildirim sistemi için oluşturulan bulanık mantık kontrolcü, parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verisine göre titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyaline karar vermektedir. Kuvvet sensörü verileri için az, az-orta, orta, çok-orta, çok olmak üzere 5 üyelik kümesi tanımlanmıştır. Titreşim miktarı çıktısı için ise: çok-az, az, az-orta, orta, çok-orta, çok ve çok-fazla olmak üzere 7 üyelik kümesi oluşturulmuştur. Bulanık mantık kontrolcü için oluşturulan dilsel kural tablosu Çizelge 3.11’de verilmiştir. Bulanık mantık kural tablosu doğrultusunda (5x5) 25 dilsel kural tanımlaması yapılmıştır.

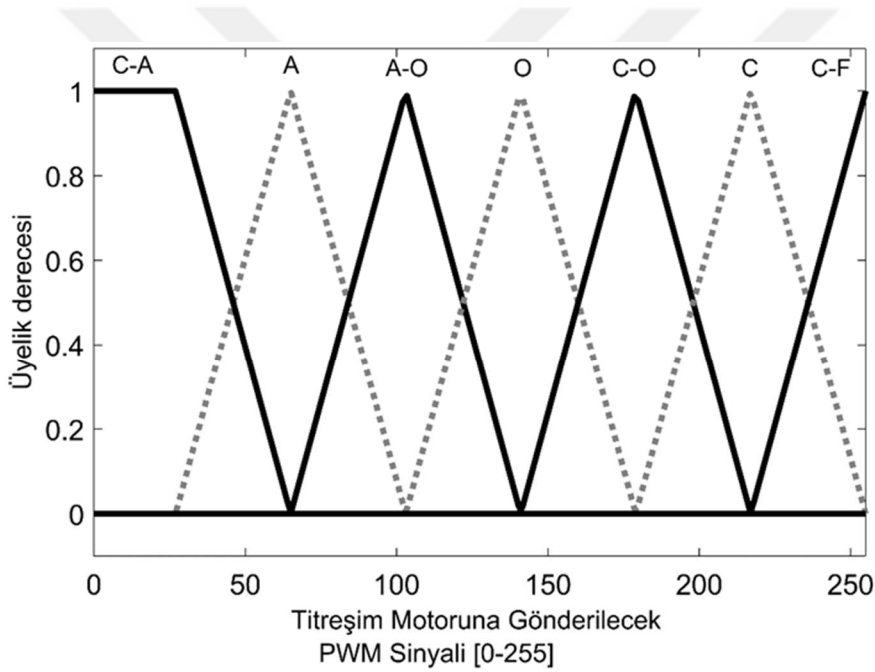
Çizelge 3.11. Bulanık mantık kural tablosu

Parmak ucunda bulunan kuvvet (FSR) sensörü	Avuç içinde bulunan kuvvet (FSR) sensörü					
		Az	Az-Orta	Orta	Çok-Orta	Çok
Az		Çok-Az	Çok-Az	Az	Az-Orta	Orta
Az-Orta		Çok-Az	Az	Az-Orta	Orta	Çok-Orta
Orta		Az	Az-Orta	Orta	Çok-Orta	Çok
Çok-Orta		Az-Orta	Orta	Çok-Orta	Çok	Çok-Fazla
Çok		Orta	Çok-Orta	Çok	Çok-Fazla	Çok-Fazla

Kuvvet sensörlerinin üyelik kümesi parametreleri Çizelge 3.7’de verilmiştir. Titreşim motoru için oluşturulan üyelik kümelerinin parametreleri ise Çizelge 3.12’de sunulmaktadır. Titreşim motoruna PWM sinyali 0-27 arasında gönderildiğinde yetersiz güç sebebiyle çalışmamaktadır. Ancak titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali 27’yi geçtiğinde titreşim motoru çalışmaya başlamaktadır. Şekil 3.25’te PWM titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalinin üyelik kümeleri verilmiştir. Üyelik kümelerinde C-A: çok-az, A: az, AO: az-orta, O: orta, C-O: çok-orta, C: çok, C-F: çok-fazla anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.12. Titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalinin üyelik kümesi parametreleri

Üyelik kümesi isimleri	Üyelik kümesi parametreleri [0-255]
Çok-Az	[0 0 27 65]
Az	[27 65 103]
Az-Orta	[65 103 141]
Orta	[103 141 179]
Çok-Orta	[141 179 217]
Çok	[179 217 255]
Çok-Fazla	[217 255 255]



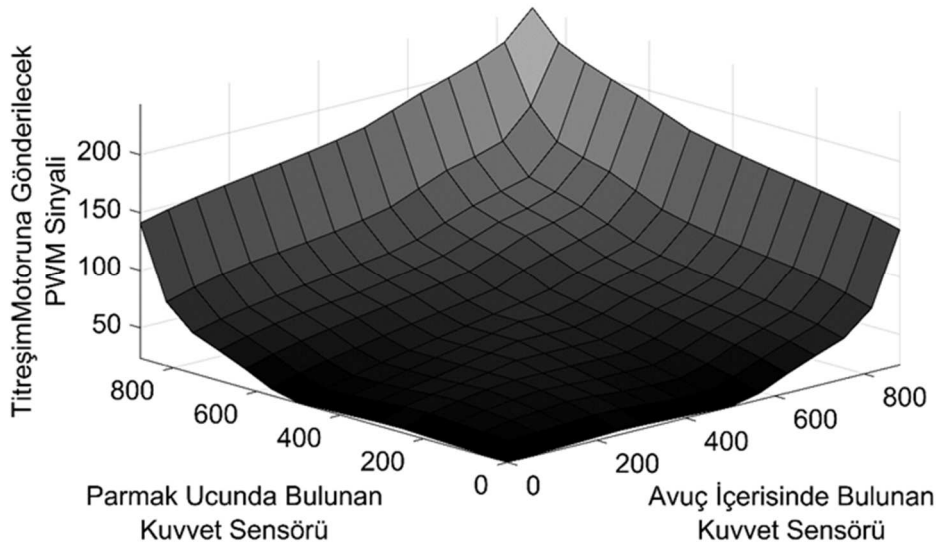
Şekil 3.25. Titreşim motoru için oluşturulan çıktı üyelik kümeleri

Bulanık mantık kontrol sistemi için tanımlanan kurallar ise aşağıda verilmiştir. Burada FSR-1 avuç içindeki kuvvet sensörü, FSR-2 ise parmak ucundaki kuvvet sensörünü ifade etmektedir. Kurallar:

1. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A) then (PWM-Sinyali is C-A)
2. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is A-O) then (PWM-Sinyali is C-A)
3. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is O) then (PWM-Sinyali is A)
4. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C-O) then (PWM-Sinyali is A-O)
5. If (FSR-1 is A) and (FSR-2 is C) then (PWM-Sinyali is O)

6. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A) then (PWM-Sinyali is C-A)
7. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A-O) then (PWM-Sinyali is A)
8. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is O) then (PWM-Sinyali is A-O)
9. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C-O) then (PWM-Sinyali is O)
10. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is C) then (PWM-Sinyali is C-O)
11. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A) then (PWM-Sinyali is A)
12. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is A-O) then (PWM-Sinyali is A-O)
13. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is O) then (PWM-Sinyali is O)
14. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C-O) then (PWM-Sinyali is C-O)
15. If (FSR-1 is O) and (FSR-2 is C) then (PWM-Sinyali is C)
16. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A) then (PWM-Sinyali is A-O)
17. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is A-O) then (PWM-Sinyali is O)
18. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is O) then (PWM-Sinyali is C-O)
19. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C-O) then (PWM-Sinyali is C)
20. If (FSR-1 is C-O) and (FSR-2 is C) then (PWM-Sinyali is C-F)
21. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A) then (PWM-Sinyali is O)
22. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is A-O) then (PWM-Sinyali is C-O)
23. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is O) then (PWM-Sinyali is C)
24. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C-O) then (PWM-Sinyali is C-F)
25. If (FSR-1 is C) and (FSR-2 is C) then (PWM-Sinyali is C-F)

Girdi üyelik fonksiyonları ile çıktı üyelik fonksiyonları ağırlık merkezi yöntemi ile hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda kuvvet değerlerine göre titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyali hesaplanmıştır. Titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalinin değişimini veren yüzey grafiği Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26. Avuç içerisinde bulunan kuvvet sensörü, parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü değeri ve titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalinin bulanık mantık yüzey grafiği

Haptik geri bildirim sistemi için oluşturulan bulanık mantık kontrol yapısı ile bir örnek hesaplama yapılacaktır. Avuç içerisinde bulunan kuvvet sensöründen 537 sayısal değeri, parmak ucunda bulunan kuvvet sensöründen 610 sayısal değeri gelmesi durumunda titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyali hesaplanacaktır. Öncelikle sensörlerden gelen değerlerin üyelik kümelerinde ki üyelik dereceleri hesaplanacaktır. Bu hesaplama işlemi Eş. 3.1’de verilen denklem ile yapılacaktır. 537 değeri (Bkz. Çizelge 3.7) Az-Orta üyelik kümesine aittir. 537 sayısal değerinin Az-Orta üyelik kümesi için üyelik derecesi Eş. 3.14 ile hesaplanmıştır. Parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü değeri olan 610 (Bkz. Çizelge 3.7) Az-Orta hem de Orta üyelik kümesine ait bir değerdir. Bu değer Az-Orta ve Orta isimli üyelik kümelerinde ki üyelik dereceleri Eş. 3.15 ve Eş. 3.16 ile hesaplanmıştır.

$$\mu_{x_1} = \frac{800 - 537}{800 - 537} = 1 \quad (3.14)$$

$$\mu_{x_2} = \frac{800 - 610}{800 - 537} = 0.722 \quad (3.15)$$

$$\mu_{x_3} = \frac{610 - 537}{800 - 537} = 0.278 \quad (3.16)$$

Bulanık mantık kontrolcüde tanımlanan kurallar doğrultusunda ve hesaplanan üyelik dereceleri ile bulanıklaştırma işlemi Çizelge 3.13'te sunulmuştur. Girdi değerlerine göre bulanık mantık kontrolcünün kullandığı kural 7 ve kural 8 aşağıda verilmiştir. Bulanıklaştırma işlemi yapılırken “min” işlemi kullanılmıştır.

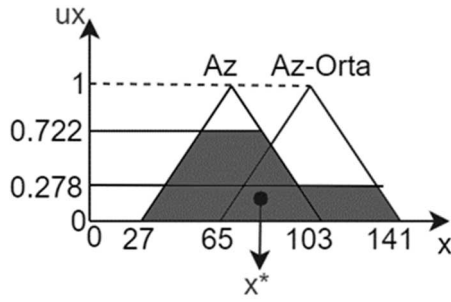
Kural 7. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is A-O) then (PWM-Sinyali is A)

Kural 8. If (FSR-1 is A-O) and (FSR-2 is O) then (PWM-Sinyali is A-O)

Çizelge 3.13. Bulanıklaştırma işlemi

Kurallar	Kural 7	Kural 8
Avuç içerisinde bulunan kuvvet sensörü (FSR-1)		
	ve	ve
Parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü (FSR-2)		
	O halde	O halde
Titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyali		

Çizelge 3.13'te elde edilen bulanık çıktı Şekil 3.27'de sunulmuştur. Ağırlık merkezi yöntemi ile durulaştırma işlemi ise Eş. 3.17 ve. 3.18'de verilmiştir. Durulaştırma işlemi sonucunda titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyali hesaplanmıştır.



Şekil 3.27. Bulanık çıktı

$$x^* = \frac{\int x u_B(x) dx}{\int u_B(x) dx} = \frac{\left(\int_{27}^{54.436} x \times (x - 27)/38 dx + \int_{54.436}^{75.564} (0.722x) dx + \dots \right)}{\left(\int_{27}^{54.436} (x - 27)/38 dx + \int_{54.436}^{75.564} (0.722) dx + \dots \right)} \quad (3.17)$$

$$\frac{\left(\int_{75.564}^{92.436} x \times (103 - x)/38 dx + \int_{92.436}^{130.436} (0.278x) dx + \dots \right)}{\left(\int_{75.564}^{92.436} (103 - x)/38 dx + \int_{92.436}^{130.436} (0.278) dx + \dots \right)}$$

$$\frac{\left(\int_{130}^{141} x \times (141 - x)/38 dx \right)}{\left(\int_{130}^{141} (141 - x)/38 dx \right)}$$

Yukarıda verilen integral alma işlemi yapılır ise Eş. 3.18 elde edilir.

$$x^* \frac{\int x u_B(x) dx}{\int u_B(x) dx} = \frac{\left(\frac{x^3}{3} - 27x^2/2 \right) \times \frac{1}{38} \Big|_{27}^{54.436} + (0.722 \times x^2/2) \Big|_{54.436}^{75.564} + \dots}{\left(x^2/2 - 27x \right) \times 1/38 \Big|_{27}^{54.436} + (0.722 \times x) \Big|_{54.436}^{75.564} + \dots}$$

$$\frac{\left(-x^3/3 + 103x^2/2 \right) \times 1/38 \Big|_{75.564}^{92.436} + (0.278 \times x^2/2) \Big|_{92.436}^{130.436} + \dots}{\left(-x^2/2 + 103x \right) \times 1/38 \Big|_{75.564}^{92.436} + (0.278x) \Big|_{92.436}^{130.436} + \dots} \quad (3.18)$$

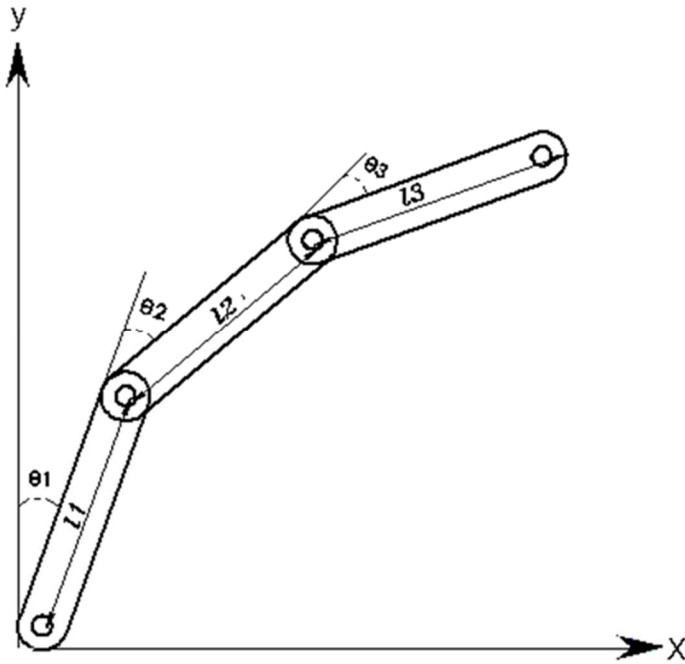
$$\frac{\left(-x^3/3 + 141x^2/2 \right) \times 1/38 \Big|_{130.436}^{140}}{\left(-x^2/2 + 141x \right) \times 1/38 \Big|_{130.436}^{140}} = 77$$

Burada arduino aracılığıyla titreşim motoruna gönderilecek sayısal değer 77 olarak hesaplanmıştır.

3.5. Robot Elin Matematiksel Analizi

3.5.1. Kinematik analiz

Kinematik analiz: eklem değişkenleri ile bir uzvun uç nokta konumu ve yönlenmesinin hesaplanmasıdır. Yani robot sisteminin uzayda istenen noktaya gitmesi için eklem değişkenlerinin alması gereken açısal konum değişkenleri kinematik analiz ile belirlenmektedir (Arı, 2016). Robotların kinematik modellerini oluşturmada, yaygın olarak Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde robot kinematiği 4 değişken ile hesaplanmaktadır. Bu 4 değişken: iki mafsal arası uzaklık (uzvun boyutu, l), iki mafsal arası dönme açısı (eksen kaçıklığı), uzuvlar arasındaki dönme açısı (eklem açısı) ve uzuvlar arası uzaklıktır. Üç eklemlilik bir parmak için Denavit-Hartenberg tablosu Çizelge 3.14'te verilmiştir. Şekil 3.28'de düzlemsel hareket eden, 3 eklemlilik bir robotun üzerinde bulunan değişkenler gösterilmiştir. Birinci, ikinci ve üçüncü uzuvların uç noktaları sırasıyla (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 'dür.



Şekil 3.28. Robot elin bir parmağının değişkenleri

Çizelge 3.14. Denavit-Hartenberg Parametreleri

Uzuv değişkenleri	θ (Eklem açısı)	α (İki mafsal arasındaki dönme açısı)	l (Uzuv uzunluğu)	d (Uzuvlar arasındaki uzaklık)
1	θ_1	0	l_1	0
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	0	l_3	0

Robotun bir eklemine ait dönüşüm matrisi Çizelge 3.14'te verilen Denavit-Hartenberg parametreleri ve temel dönüşüm matrisleri ile belirlenir. Temel homojen dönüşüm matrisleri Eş. 3.19, Eş. 3.20, Eş. 3.21'de verilmiştir (Mutlu, 2011).

$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\text{Rot}(y, \Psi) = \begin{bmatrix} \cos\Psi & 0 & \sin\Psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\Psi & 0 & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\text{Rot}(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Öteleme dönüşüm matrisleri ise Eş. 3.22, Eş. 3.23, Eş. 3.24, Eş. 3.25, Eş. 3.26 ve Eş. 3.27'de verilmiştir (Mutlu, 2011).

$$\text{Trans}(d_1, 0, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\text{Trans}(0, d_2, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\text{Trans}(0, 0, d_3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

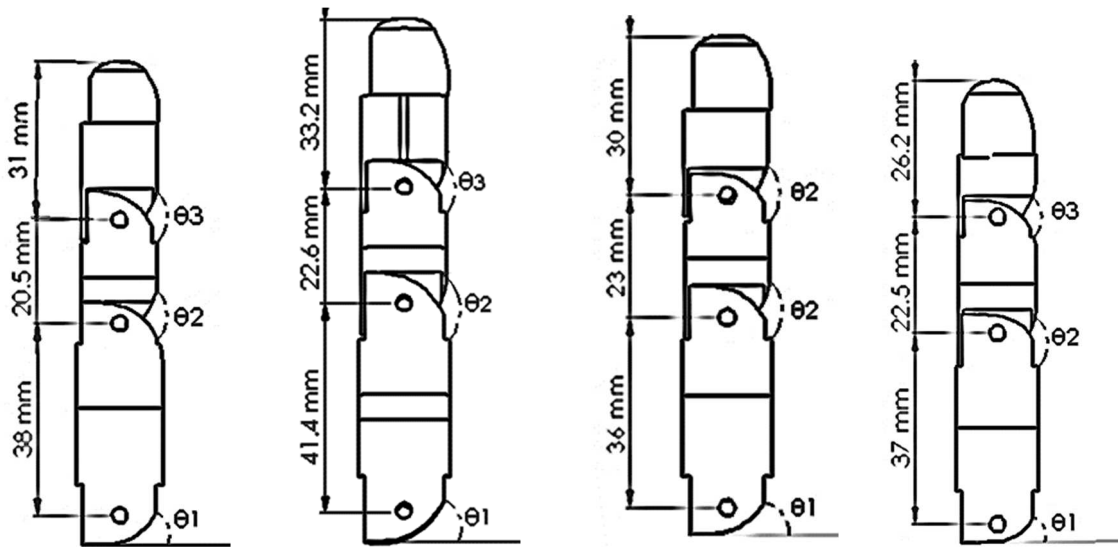
$$\text{Trans}(l_1, 0, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\text{Trans}(0, l_2, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\text{Trans}(0, 0, l_3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Robot elin; serçe, yüzük, orta ve işaret parmağının kinematik analizi

Robot elin serçe, yüzük, orta ve işaret parmağı z eksenini etrafında dönmektedir. Bu parmakların her uzvunun dönüşüm matrisi Eş 3.28'deki gibi yazılır. Şekil 3.29'da robot elin parmaklarının ölçüleri sunulmuştur.



a) İşaret parmağı

b) Orta parmağı

c) Yüzük parmağı

d) Serçe parmağı

Şekil 3.29. Robot elin işaret, orta, yüzük ve serçe parmağının teknik resimleri

Çizelge 3.15'te robot elin; işaret, yüzük, orta ve serçe parmağının uzuvlarının Denavit-Hartenberg parametreleri verilmiştir. Çizelge 3.15'te: l iki mafsalları arasındaki uzaklık (uzunluk boyutu), α iki mafsalları arasındaki dönme açısı, θ uzuvlar arasındaki dönme açısı (eklem açısı) ve d uzuvlar arasındaki dik uzaklıktır.

Çizelge 3.15. Robot elin işaret, yüzük, orta ve serçe parmağının Denavit-Hartenberg parametreleri

Değişken	İşaret parmağı	Orta parmak	Yüzük parmağı	Serçe parmağı
l_1	38 mm	41,4 mm	36 mm	37 mm
l_2	20,5 mm	22,6 mm	23 mm	22,5 mm
l_3	31 mm	33,2 mm	30 mm	26,2 mm
1.Eklem açısı	θ_1	θ_1	θ_1	θ_1
2.Eklem açısı	θ_2	θ_2	θ_2	θ_2
3.Eklem açısı	θ_3	θ_3	θ_3	θ_3
α_1	0	0	0	0
α_2	0	0	0	0
α_3	0	0	0	0
d_1	0	0	0	0
d_2	0	0	0	0
d_3	0	0	0	0

$$A_n = \text{Rot}(z, \theta). \text{Trans}(0, 0, d). \text{Trans}(l, 0, 0). \text{Rot}(x, \alpha) \quad (3.28)$$

Burada $\text{Rot}(z, \theta)$ z eksenini etrafında dönme matrisi, $\text{Trans}(0, 0, d)$ uzuvlar arasındaki uzaklık matrisi, $\text{Trans}(l, 0, 0)$ mafsallar arasındaki uzaklık matrisi, $\text{Rot}(x, \alpha)$ mafsallar arasındaki dönme matrisidir (Mutlu, 2011). Bir uzvun konumunu veren eşitlik ise Eş. 3.29'da verilmiştir.

$$A_n^0 = A_1 \cdot A_2 \dots A_n \quad (3.29)$$

Çizelge 3.14'teki parametreler ile robot elin serçe, yüzük, orta ve işaret parmağı için dönüşüm matrisleri kullanılarak A_1 , A_2 ve A_3 matrisi Eş. 3.30, Eş. 3.31, Eş. 3.32'deki gibi elde edilir.

$$A_1 = Rot(z, \theta_1). Trans(l_1, 0, 0) \quad (3.30)$$

$$A_2 = Rot(z, \theta_2). Trans(l_2, 0, 0) \quad (3.31)$$

$$A_3 = Rot(z, \theta_3). Trans(l_3, 0, 0) \quad (3.32)$$

Nihai dönüşüm matrisi ise Eş. 3.33 ile hesaplanır.

$$A_0 = A_1.A_2.A_3 \quad (3.33)$$

Burada sırasıyla gerekli hesaplamalar yapılacak olur ise A_1 , A_2 ve A_3 ; Eş. 3.34, Eş.3.35, Eş. 3.36'daki gibi hesaplanır.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & l_1 \cdot \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & l_1 \cdot \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_2 \cdot \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2 \cdot \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & 0 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_3 \cdot \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & l_3 \cdot \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Hareketsiz eksen takımına (avuç içine) göre olan dönüşüm matrisi A_1 , A_2 , A_3 matrislerinin çarpımlarıyla elde edilir. İlk olarak A_1 ve A_2 matrisi çarpılır daha sonra elde edilen çarpımla A_3 matrisi de çarpılarak dönüşüm matrisi hesaplanır. A_1 ve A_2 matrislerinin çarpım işlemleri Eş. 3.37, Eş. 3.8, Eş. 3.39, Eş. 3.40 ve 3.41'de verilmiştir (Tarmizi, Elamvazuthi ve Begam, 2009).

$$\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 = \cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos\theta_{12} \quad (3.37)$$

$$\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 = \sin(\theta_1 + \theta_2) = \sin\theta_{12} \quad (3.38)$$

$$A_0^2 = A_1 \cdot A_2 \quad (3.39)$$

$$A_0^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & l_1 \cdot \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & l_1 \cdot \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_2 \cdot \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2 \cdot \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$A_0^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1 \cdot \cos\theta_1 + l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1 \cdot \sin\theta_1 + l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

A_0^2 ve A_3 matrislerinin çarpımı ile son dönüşüm matrisi elde edilir. Bu hesaplama işlemi Eş. 3.42, Eş. 3.43, Eş. 3.44 ve Eş.3.45'te sunulmuştur (Tarmizi ve diğerleri, 2009).

Burada;

$$\cos\theta_{12} \cdot \cos\theta_3 - \sin\theta_{12} \cdot \sin\theta_3 = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) = \cos\theta_{123} \quad (3.42)$$

$$\sin\theta_{12} \cdot \cos\theta_3 + \cos\theta_{12} \cdot \sin\theta_3 = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) = \sin\theta_{123} \quad (3.43)$$

$$A_0^3 = A_0^2 \cdot A_3 \quad (3.44)$$

Eş. 3.44'teki işlem yapılırsa Eş 3.45 elde edilir.

$$A_0^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_{12} & -\sin\theta_{12} & 0 & l_1 \cdot \cos\theta_1 + l_2 \cdot \cos\theta_{12} \\ \sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 & l_1 \cdot \sin\theta_1 + l_2 \cdot \sin\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_3 \cdot \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & l_3 \cdot \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_{123} & -\sin\theta_{123} & 0 & l_1 \cdot \cos\theta_1 + l_2 \cdot \cos\theta_{12} + l_3 \cdot \cos\theta_{123} \\ \sin\theta_{123} & \cos\theta_{123} & 0 & l_1 \cdot \sin\theta_1 + l_2 \cdot \sin\theta_{12} + l_3 \cdot \sin\theta_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

A_0^3 ile en son elde edilen dönüşüm matrisi verilmiştir. Bu matris yardımı ile robot elin; işaret, yüzük, orta ve serçe parmaklarının, parmak ucu koordinatları; gerekli değişkenlerin yerine yazılması ile aşağıda verilen Eş. 3.46 ve Eş. 3.47 vasıtasıyla hesaplanabilir.

$$P_x = l_1 \cdot \cos\theta_1 + l_2 \cdot \cos\theta_{12} + l_3 \cdot \cos\theta_{123} \quad (3.46)$$

$$P_y = l_1 \cdot \sin\theta_1 + l_2 \cdot \sin\theta_{12} + l_3 \cdot \sin\theta_{123} \quad (3.47)$$

Çizelge 3.15'te verilen değerleri sırasıyla Eş. 3.46 ve Eş. 3.47'de yerine yazarsak:

İşaret parmağının konum denklemleri:

$$P_x = 38 \text{ mm} \cdot \cos\theta_1 + 20,5 \text{ mm} \cdot \cos\theta_{12} + 31 \text{ mm} \cdot \cos\theta_{123} \quad (3.48)$$

$$P_y = 38 \text{ mm} \cdot \sin\theta_1 + 20,5 \text{ mm} \cdot \sin\theta_{12} + 31 \text{ mm} \cdot \sin\theta_{123} \quad (3.49)$$

Orta parmağın konum denklemleri:

$$P_x = 41,4 \text{ mm} \cdot \cos\theta_1 + 22,6 \text{ mm} \cdot \cos\theta_{12} + 33,2 \text{ mm} \cdot \cos\theta_{123} \quad (3.50)$$

$$P_y = 41,4 \text{ mm} \cdot \sin\theta_1 + 22,6 \text{ mm} \cdot \sin\theta_{12} + 33,2 \text{ mm} \cdot \sin\theta_{123} \quad (3.51)$$

Yüzük parmağının konum denklemleri:

$$P_x = 36 \text{ mm} \cdot \cos\theta_1 + 23 \text{ mm} \cdot \cos\theta_{12} + 30 \text{ mm} \cdot \cos\theta_{123} \quad (3.52)$$

$$P_y = 36 \text{ mm} \cdot \sin\theta_1 + 23 \text{ mm} \cdot \sin\theta_{12} + 30 \text{ mm} \cdot \sin\theta_{123} \quad (3.53)$$

Serçe parmağın konum denklemleri:

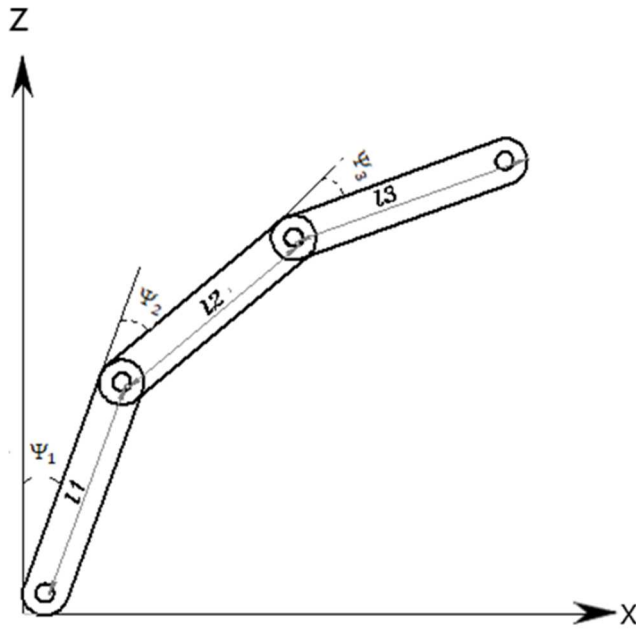
$$P_x = 37 \text{ mm} \cdot \cos\theta_1 + 22,5 \text{ mm} \cdot \cos\theta_{12} + 26,2 \text{ mm} \cdot \cos\theta_{123} \quad (3.54)$$

$$P_y = 37 \text{ mm} \cdot \sin\theta_1 + 22,5 \text{ mm} \cdot \sin\theta_{12} + 26,2 \text{ mm} \cdot \sin\theta_{123} \quad (3.55)$$

Yukarıda elde edilen denklemler ile parmak eklemlerinin açılarını bilmemiz durumunda parmak uçlarının konumu hesaplanmaktadır.

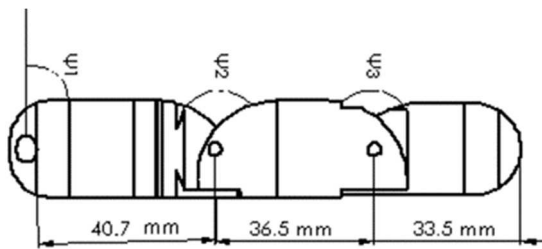
Başparmak için kinematik analiz

Robot elin işaret, orta, yüzük ve serçe parmakları z eksenine, başparmağı ise y eksenine etrafında dönmektedir. Bu sebeple rotasyon matrisi ve transformasyon matrisleri değiştirilerek, gerekli işlemler yapılarak başparmağın kinematik analizi yapılacaktır. Şekil 3.30'da görüldüğü gibi robot elin başparmağı x-z ekseninde hareket etmektedir ve y eksenine dönme eksenidir.



Şekil 3.30. Başparmağın x-z eksenleri arasındaki hareketi

Şekil 3.31'de başparmağın ölçüsünün ve eklem açısı değişkenlerinin isimlendirildiği teknik çizim verilmiştir.



Şekil 3.31. Başparmağın teknik resmi

Elde edilen veriler ile başparmak için Denevit-Hartenberg parametreleri Çizelge 3.16'da sunulmuştur. Başparmağın her uzvunun dönüşüm matrisi Eş 3.56'daki gibi yazılır.

Çizelge 3.16. Başparmağın Denavit-Hartenberg parametreleri

Uzuv değişkenler i	Ψ (Ekleme açısı)	θ (Komşu iki mafsalları arasındaki eksen kaçıklığı)	l (Uzuv uzunluğu)	d (Komşu uzuvlar arasındaki dik uzaklık)
1. Uzuv	Ψ_1	0 (θ_1)	$l_1= 40,7$ mm	0
2. Uzuv	Ψ_2	0 (θ_2)	$l_2= 36,5$ mm	0
3. Uzuv	Ψ_3	0 (θ_3)	$l_3= 33,5$ mm	0

$$A_n = Rot(y, \Psi). Trans(0, d, 0). Trans(l, 0, 0). Rot(z, \theta) \quad (3.56)$$

Burada $Rot(y, \Psi)$ y ekseninde dönme matrisi, $Trans(0, d, 0)$ uzuvlar arasındaki uzaklık matrisi, $Trans(l, 0, 0)$ mafsallar arasındaki uzaklık matrisi, $Rot(z, \theta)$ mafsallar arasındaki dönme matrisidir (Mutlu, 2011). Diğer uzuvlara göre bir uzvun konumunu veren eşitlik ise Eş 3.57’de verilmiştir.

$$A_n^0 = A_1 \cdot A_2 \dots A_n \quad (3.57)$$

Çizelge 3.16’deki parametreler ile robot elin başparmağı için dönüşüm matrisleri kullanılarak, başparmağın her bir uzvu için A_1 , A_2 ve A_3 matrisi Eş. 3.58, Eş. 3.59, Eş. 3.60’deki gibi elde edilir.

$$A_1 = Rot(y, \Psi_1). Trans(l_1, 0, 0) \quad (3.58)$$

$$A_2 = Rot(y, \Psi_2). Trans(l_2, 0, 0) \quad (3.59)$$

$$A_3 = Rot(y, \Psi_3). Trans(l_3, 0, 0) \quad (3.60)$$

Parmak ucunun konumu için dönüşüm matrisi ise Eş 3.61 ile hesaplanır.

$$A_0^3 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (3.61)$$

Eş. 3.58’deki işlemler sırasıyla yapılacak olursa, Eş. 3.62 ve Eş. 3.63 elde edilir.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \Psi_1 & 0 & \sin \Psi_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_1 & 0 & \cos \Psi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \Psi_1 & 0 & \sin \Psi_1 & l_1 \cdot \cos \Psi_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_1 & 0 & \cos \Psi_1 & -l_1 \cdot \sin \Psi_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

Eş. 3.59'daki işlemler yapılacak olursa Eş. 3.64 ve Eş. 3.65 elde edilir.

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \Psi_2 & 0 & \sin \Psi_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_2 & 0 & \cos \Psi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \Psi_2 & 0 & \sin \Psi_2 & l_2 \cdot \cos \Psi_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_2 & 0 & \cos \Psi_2 & -l_2 \cdot \sin \Psi_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Eş. 3.60'daki işlemler yapılacak olursa Eş. 3.66 ve Eş. 3.67 elde edilir.

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \Psi_3 & 0 & \sin \Psi_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_3 & 0 & \cos \Psi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \Psi_3 & 0 & \sin \Psi_3 & l_3 \cdot \cos \Psi_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_3 & 0 & \cos \Psi_3 & -l_3 \cdot \sin \Psi_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Hareketsiz eksen takımına (avuç içine) göre olan dönüşüm matrisi A_1 , A_2 , A_3 matrislerinin çarpımlarıyla elde edilir. İlk olarak A_1 ve A_2 matrisi çarpılır daha sonra elde edilen çarpımla A_3 matrisi de çarpılarak dönüşüm matrisi hesaplanır. A_1 ve A_2 matrislerinin çarpım işlemleri ve kullanılan eşitlikler Eş. 3.68, Eş. 3.69, Eş. 3.70 ve Eş. 3.71'de verilmiştir.

$$\cos \Psi_1 \cdot \cos \Psi_2 - \sin \Psi_1 \cdot \sin \Psi_2 = \cos(\Psi_1 + \Psi_2) = \cos \Psi_{12} \quad (3.68)$$

$$\sin \Psi_1 \cdot \cos \Psi_2 + \cos \Psi_1 \cdot \sin \Psi_2 = \sin(\Psi_1 + \Psi_2) = \sin \Psi_{12} \quad (3.69)$$

$$A_0^2 = A_1 \cdot A_2 \quad (3.70)$$

$$A_0^2 = \begin{bmatrix} \cos \Psi_1 & 0 & \sin \Psi_1 & l_1 \cdot \cos \Psi_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_1 & 0 & \cos \Psi_1 & -l_1 \cdot \sin \Psi_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Psi_2 & 0 & \sin \Psi_2 & l_2 \cdot \cos \Psi_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_2 & 0 & \cos \Psi_2 & -l_2 \cdot \sin \Psi_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \Psi_{12} & 0 & \sin \Psi_{12} & l_1 \cdot \cos \Psi_1 + l_2 \cdot \cos \Psi_{12} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_{12} & 0 & \cos \Psi_{12} & -l_1 \cdot \sin \Psi_1 - l_2 \cdot \sin \Psi_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

A_0^2 ve A_3 matrislerinin çarpımı ile son dönüşüm matrisi elde edilir. Bu hesaplama işlemi ve hesaplama işleminde kullanılan eşitlikler Eş. 3.72, Eş. 3.73, Eş. 3.74 ve Eş.3.75'te sunulmuştur.

$$\cos \Psi_{12} \cdot \cos \Psi_3 - \sin \Psi_{12} \cdot \sin \Psi_3 = \cos(\Psi_1 + \Psi_2 + \theta_3) = \cos \Psi_{123} \quad (3.72)$$

$$\sin \Psi_{12} \cdot \cos \Psi_3 + \cos \Psi_{12} \cdot \sin \Psi_3 = \sin(\Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_2) = \sin \Psi_{123} \quad (3.73)$$

$$A_0^3 = A_0^2 \cdot A_3 \quad (3.74)$$

Eş. 3.74'teki işlemi yapmak için Eş 3.71'de bulunan matris ile Eş. 3.67'de bulunan matris çarpılır. Çarpım sonucu Eş. 3.75'te verilmiştir.

$$A_0^3 = \begin{bmatrix} \cos \Psi_{123} & 0 & \sin \Psi_{123} & l_1 \cdot \cos \Psi_1 + l_2 \cdot \cos \Psi_{12} + l_3 \cdot \cos \Psi_{123} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_{123} & 0 & \cos \Psi_{123} & -l_1 \cdot \sin \Psi_1 - l_2 \cdot \sin \Psi_{12} - l_3 \cdot \sin \Psi_{123} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

$$P_x = l_1 \cdot \cos \Psi_1 + l_2 \cdot \cos \Psi_{12} + l_3 \cdot \cos \Psi_{123} \quad (3.76)$$

$$P_z = -l_1 \cdot \sin \Psi_1 - l_2 \cdot \sin \Psi_{12} - l_3 \cdot \sin \Psi_{123} \quad (3.77)$$

Bilinen değişkenler yerlerine yazılırsa başparmağın konum denklemleri Eş. 3.78 ve Eş. 3.79'daki gibi elde edilir.

$$P_x = 40,7 \text{ mm} \cdot \cos \Psi_1 + 36,5 \text{ mm} \cdot \cos \Psi_{12} + 33,5 \text{ mm} \cdot \cos \Psi_{123} \quad (3.78)$$

$$P_z = -40,7 \text{ mm} \cdot \sin \Psi_1 - 36,5 \text{ mm} \cdot \sin \Psi_{12} - 33,5 \text{ mm} \cdot \sin \Psi_{123} \quad (3.79)$$

3.5.2. Ters kinematik

Ters kinematik ile robot elin parmağının konumundan yola çıkılarak mafsalların açıları bulunacaktır. Denavit-Hartenberg metodu ile hesaplanan ve robot elin; serçe, yüzük, orta ve işaret parmağının parmak ucu konumunu veren eşitlik aşağıda verilmiştir. P_x ; parmak ucunun x koordinatını göstermektedir. P_y ; parmak ucunun y koordinatını göstermektedir.

$$P_x = l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2 \cdot \cos \theta_{12} + l_3 \cdot \cos \theta_{123} \quad (3.80)$$

$$P_y = l_1 \cdot \sin \theta_1 + l_2 \cdot \sin \theta_{12} + l_3 \cdot \sin \theta_{123} \quad (3.81)$$

Düz kinematiğin hesaplanmasının ardından, konum verileri $[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]$, pozisyon (O) ve dönme (R) matrisi ile hesaplanabilir (Kheirikhah, Khodayari ve Tatları, 2010). Eşitliklerdeki $\sin \theta_{123}$, $\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ anlamına gelmektedir. $\cos \theta_{123}$ ise $\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ anlamına gelmektedir.

$$O = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_3 \cdot \cos \theta_{123} + l_2 \cdot \cos \theta_{12} + l_1 \cdot \cos \theta_1 \\ l_3 \cdot \sin \theta_{123} + l_2 \cdot \sin \theta_{12} + l_1 \cdot \sin \theta_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

$$R = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{123} & -\sin \theta_{123} & 0 \\ \sin \theta_{123} & \cos \theta_{123} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

Pozisyon ve dönme matrisi yardımıyla, robot elin; serçe, yüzük, orta ve işaret parmağı için elde edilen ters kinematik denklemler; Eş. 3.84, Eş. 3.85 ve Eş. 3.86'da verilmiştir (Kheirikhah ve diğerleri, 2010).

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left[\frac{(p_y - u_y \cdot l_3) \cdot (l_1 + l_2 \cdot \cos \theta_2) - (p_x - u_x \cdot l_3) \cdot (l_2 \cdot \sin \theta_2)}{l_1^2 + l_2^2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \theta_2} \right] \quad (3.84)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left[\frac{(p_x - u_x \cdot l_3)^2 + (p_y - u_y \cdot l_3)^2 - (l_1^2 + l_2^2)}{2 \cdot l_1 \cdot l_2} \right] \quad (3.85)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left[\frac{(p_x - l_1 \cdot \cos \theta_1 - l_2 \cdot \cos \theta_{12})}{l_3} \right] - (\theta_1 + \theta_2) \quad (3.86)$$

Başparmak için ters kinematik analiz

Kinematik analiz ile Eş. 3.87 ve Eş. 3.88'de verilen başparmağın parmak ucunun konumunu veren denklemler elde edilmiştir. P_x ; parmak ucunun x koordinatını göstermektedir. P_z ; parmak ucunun z koordinatını göstermektedir.

$$P_x = l_1 \cdot \cos \Psi_1 + l_2 \cdot \cos \Psi_{12} + l_3 \cdot \cos \Psi_{123} \quad (3.87)$$

$$P_z = -l_1 \cdot \sin \Psi_1 - l_2 \cdot \sin \Psi_{12} - l_3 \cdot \sin \Psi_{123} \quad (3.88)$$

Ters kinematik analizde konum verileri [$\Psi_1 \ \Psi_2 \ \Psi_3$], pozisyon (O) ve dönme (R) matrisi ile hesaplanacaktır. Başparmağın pozisyon ve dönme matrisleri Eş. 3.90 ve 3.91'de verilmiştir (Kheirikhah ve diğerleri, 2010).

$$O = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cdot \cos \Psi_1 + l_2 \cdot \cos \Psi_{12} + l_3 \cdot \cos \Psi_{123} \\ 0 \\ -l_1 \cdot \sin \Psi_1 - l_2 \cdot \sin \Psi_{12} - l_3 \cdot \sin \Psi_{123} \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

$$R = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Psi_{123} & \sin \Psi_{123} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_{123} & \cos \Psi_{123} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

Başparmağın konumundan, eklemelerinin açısını veren ters kinematik denklemler Eş. 3.92, Eş. 3.93 ve Eş. 3.94'te verilmiştir.

$$\Psi_1 = \sin^{-1} \left[\frac{-(p_z - u_z \cdot l_3) \cdot (l_1 + l_2 \cdot \cos \Psi_2) - (p_x - u_x \cdot l_3) \cdot (l_2 \cdot \sin \Psi_2)}{l_1^2 + l_2^2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \Psi_2} \right] \quad (3.92)$$

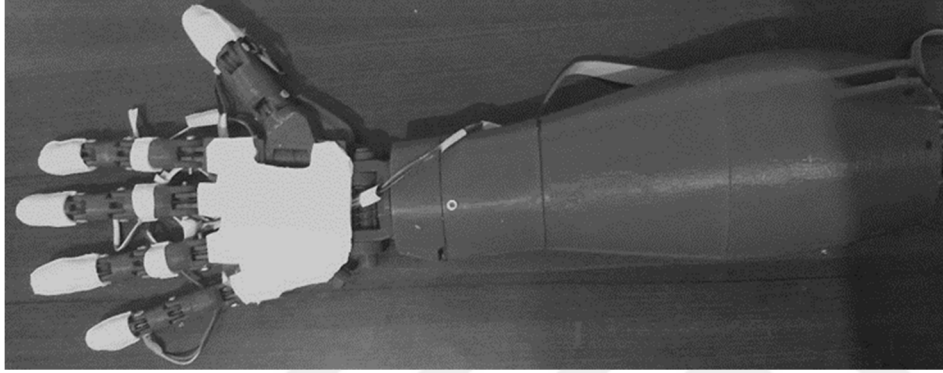
$$\Psi_2 = \text{Cos}^{-1} \left[\frac{(p_x - u_x \cdot l_3)^2 + (p_z - u_z \cdot l_3)^2 - (l_1^2 + l_2^2)}{2 \cdot l_1 \cdot l_2} \right] \quad (3.93)$$

$$\Psi_3 = \text{Cos}^{-1} \left[\frac{(P_x - l_1 \cdot \text{cos} \Psi_1 - l_2 \cdot \text{cos} \Psi_{12})}{l_3} \right] - (\Psi_1 + \Psi_2) \quad (3.94)$$



4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında 5 parmaklı robot el 3 boyutlu yazıcı ile basılmış, parmak uçlarına ve avuç içine kuvvet sensörleri yerleştirilmiştir (Karaca ve Conker, 2018). Kavranan nesnenin kaymaması ve kuvvet sensörlerine temasın daha iyi sağlanması için parmak uçlarının yüzeyi ve avuç içinin yüzeyi silikon ile kaplanmıştır. Oluşturulan ve üzerinde deney yapılan robot el Resim 4.1’de verilmiştir.



Resim 4.1. Robot el

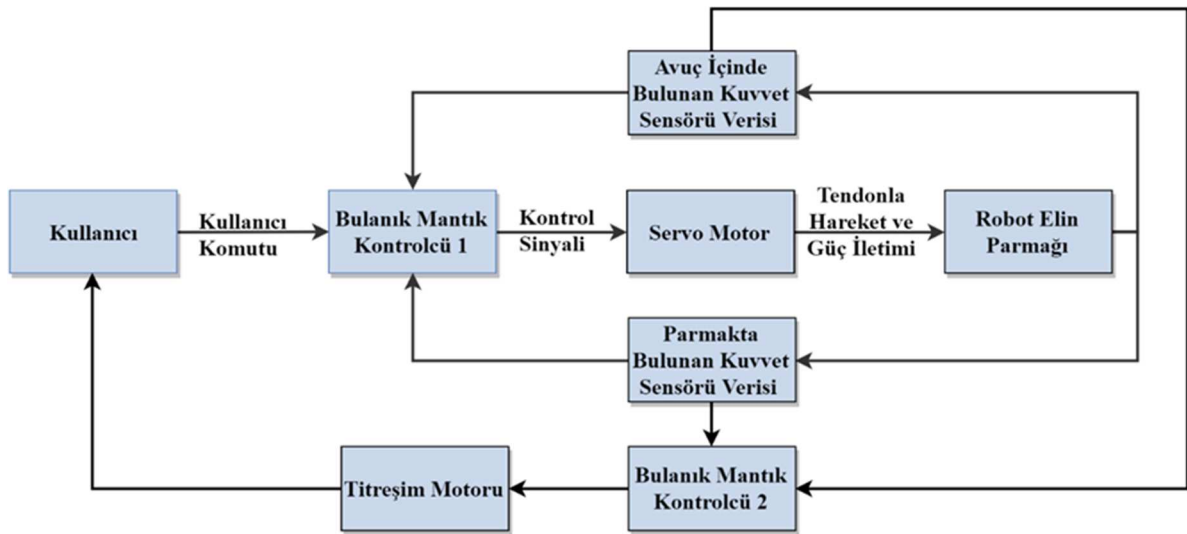
5 parmaklı robot el için her bir parmağına yönelik ayrı ayrı haptik geri bildirim yapabilen haptik geri bildirim sistemi tasarlanmıştır (Karaca ve Conker, 2018). Haptik geri bildirim sisteminde her bir parmak için 1 adet olmak üzere 5 adet mini titreşim motoru kullanılmıştır. Titreşim motorları kol bandına yerleştirilmiştir. Haptik geri bildirim sistemi Resim 4.2’de verilmiştir.



Resim 4.2. Haptik geri bildirim sistemi

Robot elin nesnelere kavraması esnasında uyguladığı kuvvetin kontrolünün sağlanması için bulanık mantık ile kontrolcü (karar destek sistemi) oluşturulmuş ve uygulanmıştır. Kuvvet kontrolünde bulanık mantık kullanılması ile robot el kullanıcı komutu doğrultusunda

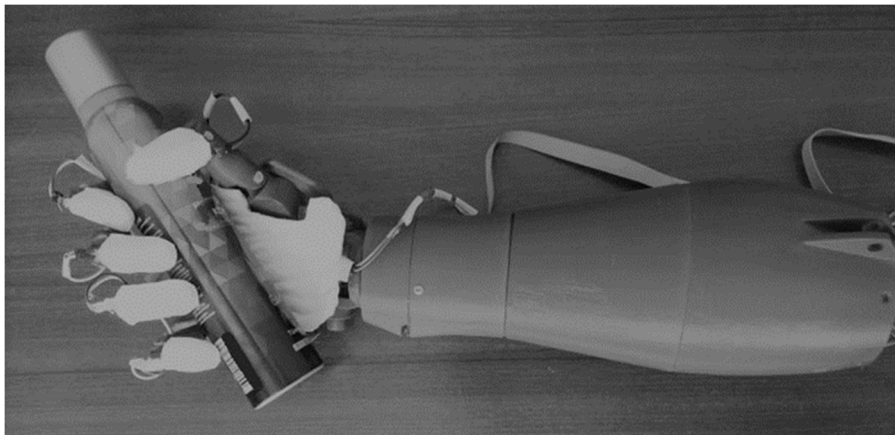
nesnelere insansı bir yaklaşımla kararlı bir şekilde kavramıştır. Ayrıca kullanıcı nesnelere uyguladığı kuvveti, haptik geri bildirim sistemi ile algılamakta bu sayede kullanıcı nesnelere daha kontrollü bir şekilde kavrayabilmektedir. Haptik geri bildirim sisteminin de bulanık mantık kontrol sistemi ile kontrol edilerek haptik geri bildirim hassaslaştırılması sağlanmıştır. Şekil 4.1’de Robot elin bir parmağının haptik geri bildirim ve kuvvet kontrolü sisteminin blok diyagramı verilmiştir. Kullanıcı kontrol sinyalini potansiyometre ile göndermektedir. Şekil 4.1’de Bulanık mantık kontrolcü-1 robot elin kuvvet kontrolünü sağlayan karar destek sistemidir. Bulanık mantık kontrolcü-1 kullanıcının gönderdiği kontrol sinyali, avuç içindeki kuvvet sensörü ve parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü verisini değerlendirerek parmağı kontrol eden servo motora kontrol sinyalini göndermektedir. Servo motora gönderilen kontrol sinyali doğrultusunda servo motor açısı değişmektedir. Servo motorların açılarının değişimi ile tendonlarının gerginlikleri değişmektedir. Dolayısıyla parmağın nesneye uyguladığı kuvvette değişmektedir. Haptik geri bildirim sistemi ise parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verilerini bulanık mantık kontrolcü-2 ile değerlendirerek kullanıcıya his geri bildirimini yapmaktadır. Bu sayede kullanıcının sadece kavrama komutu göndermesi ile hem robot el nesneyi uygun kuvvette kavramaktadır hem de kullanıcı kavrama kuvvetini algılayabilmektedir (Karaca ve Conker, 2018). Haptik geri bildirim ve robot el sistemi için oluşturulan bulanık mantık kontrolcü yapıları materyal ve metot bölümünde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bölümde oluşturulan kontrol yapısı robot el üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar resim, tablo ve grafikler ile sunulmuştur.



Şekil 4.1. Robot el ve haptik geri bildirim sistemi kontrol yapısı

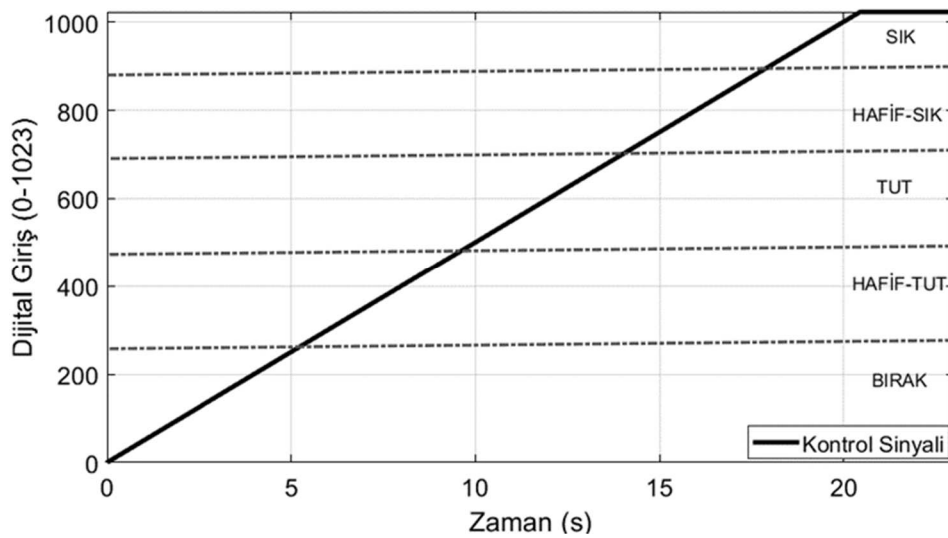
Rampa girdisi ile sistemin test edilmesi

Oluşturulan kontrol yapısı kullanıcı komutu doğrultusunda kavrama işlemlerine karar vermektedir. Nesnenin kavranmasında bırak, hafif-tut, tut, hafif-sık ve sık olmak üzere 5 komut tanımlanmıştır. Hafif-tut komutunda nesneye düşük kuvvet uygulanması istenmektedir. Tut komutunda ise nesnenin hafif -tut komutuna göre daha yüksek kuvvette ve daha stabil bir şekilde kavranması amaçlanmaktadır. Hafif-sık komutunda nesneye tut komutuna göre daha yüksek kuvvet uygulanması, sık komutunda ise nesneye tanımlanan en yüksek kuvvetin uygulanması istenmektedir. Bırak komutunda ise parmakların açılarak nesnenin bırakılması amaçlanmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda bulanık mantık ile karar destek sistemi oluşturulmuş ve robot elin nesnelere kavramasında kuvvet kontrolü sağlanmıştır. Tasarlanan karar destek sisteminin farklı kavrama komutlarında test edilmesi için robot el kontrol sinyali olarak rampa girdisi uygulanmıştır ve robot el rijit bir nesne kavratılmıştır. Robot el ve nesne Resim 4.3'te verilmiştir. Rampa girdisinin değerini gösteren grafik Şekil 4.2'de verilmiştir. Rampa girdisi nesneye uygulanacak kuvvet değerinin referans değeridir. Bulanık mantık kontrolcü robot elin nesneyi kavrama kuvvetine buradan gelen sinyal doğrultusunda karar vermektedir. Rampa sinyalinin değişimi doğrultusunda robot elin parmaklarını kontrol eden servo motorların konum verisi ve parmaklarda bulunan kuvvet sensörü verileri her bir parmak için Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir. Kuvvet sensörlerinden gelen veriler doğrultusunda haptik geri bildirim sisteminde bulunan titreşim motorlarına gönderilecek olan PWM sinyalleri ise Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12'de verilmiştir.



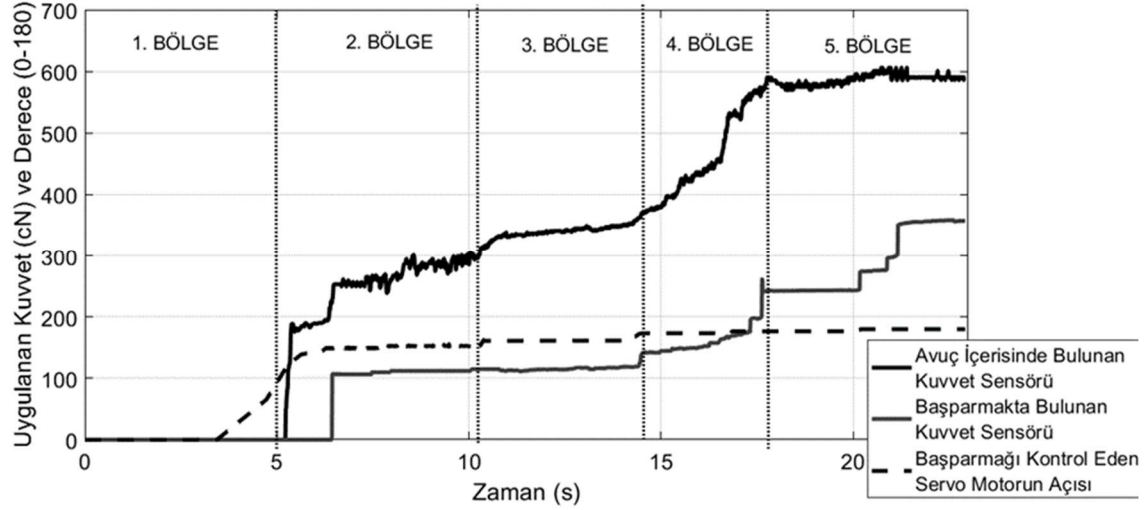
Resim 4.3. Robot el ve kavranan obje

Şekil 4.2'ye bakıldığında başlangıçta bırak komutu gönderilmiştir. Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de 1. bölgede sensörlerden veri alınmadığı ve servo motorların açısı 0 olduğu için sistem başlangıçta yanıtız kalmıştır. Daha sonra Şekil 4.2'de görüldüğü üzere rampa girdisi artarak sisteme hafif-tut komutu gönderilmiştir. Bu komut doğrultusunda robot el parmaklarını kapatmış ve nesneyi Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de 2. bölgede belirtilen kuvvette kavramıştır. Ardından tut komutu devreye girmiş nesne hafif-tut komutuna göre daha yüksek kuvvette stabil bir şekilde kavranmıştır. Kavranma kuvveti ve servo motorların konumu Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de 3. bölgede sunulmuştur. Kontrol sinyali artarak bulanık mantık kontrolciye hafif-sık komutu gönderildiğinde Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de 4. bölgede görüldüğü gibi parmaklar nesneye tut komutuna göre daha yüksek kuvvet uygulamaya başlamıştır. Kontrol sinyali sık komutuna geldiğinde robot elin parmakları nesneye uygulaması gereken maksimum kuvveti uygulamıştır. Robot elin parmaklarının sık komutu doğrultusunda nesneye uyguladıkları kuvvet Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de 5. bölgede verilmiştir. Burada sistem yalnızca parmakta bulunan kuvvet sensörü verilerini değil aynı zamanda avuç içerisinde bulunan kuvvet sensörü verilerini de değerlendirerek kavrama kuvvetine karar vermektedir. Böylelikle kavranan nesnelere ölçüm yetersizliğinden yüksek kuvvet uygulanması önlenmektedir. Her bir parmak için durumun değerlendirilmesi sayesinde farklı nesnelere robot elin parmakları farklı açılarda kapanarak nesnelere şekillerine göre adaptif kavrama yapabilmektedir.

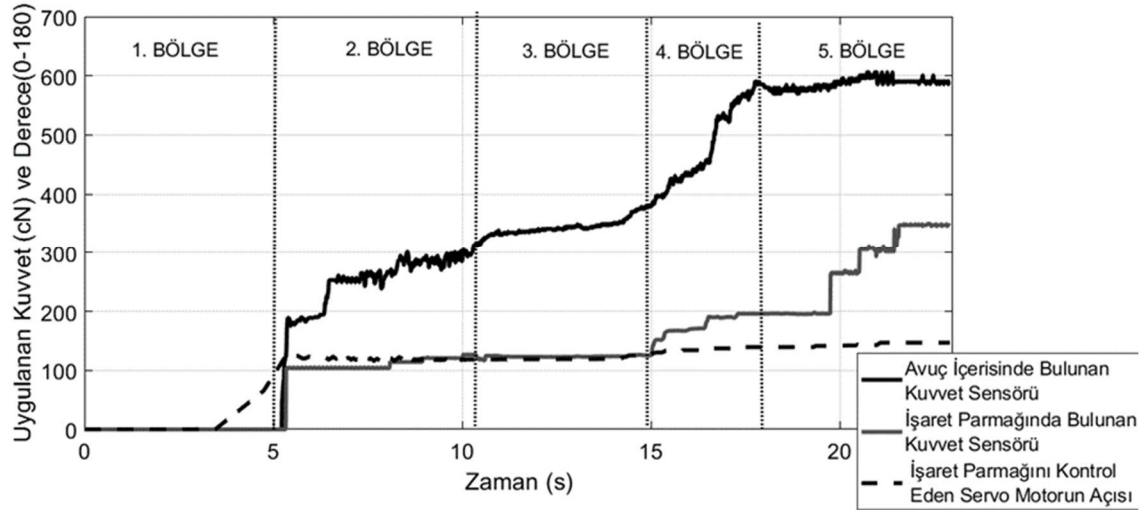


Şekil 4.2. Rampa girdisi

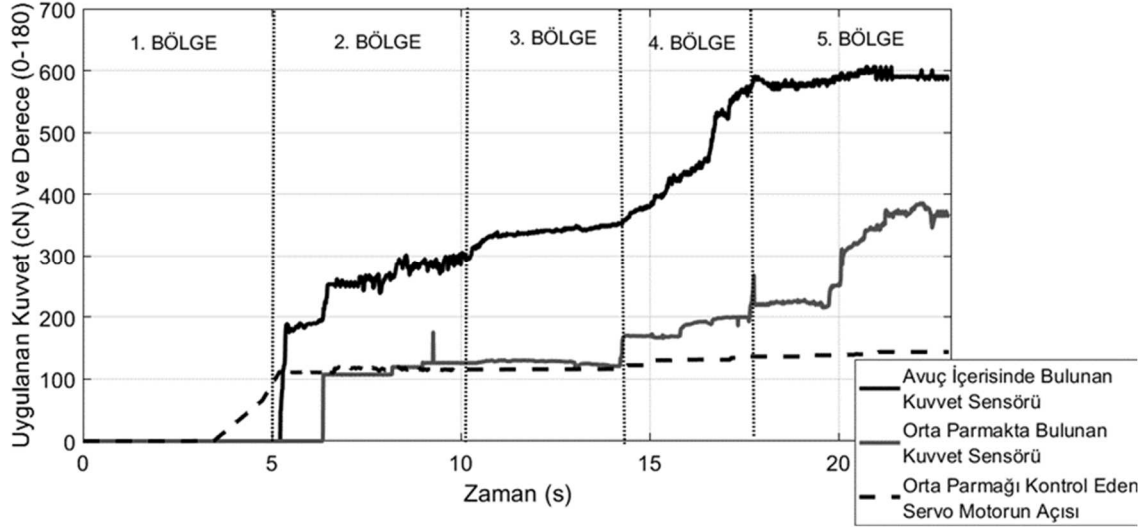
Robot elin parmaklarının uygulayacağı kuvvete avuç içinde bulunan kuvvet sensörü ve parmakta bulunan kuvvet sensörü verisine göre kontrol sistemi karar vermektedir. Bu sebeple Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de hem avuç içerisinde bulunan kuvvet sensöründen gelen veri hem parmakta bulunan kuvvet sensöründen gelen kuvvet verileri birlikte verilmiştir.



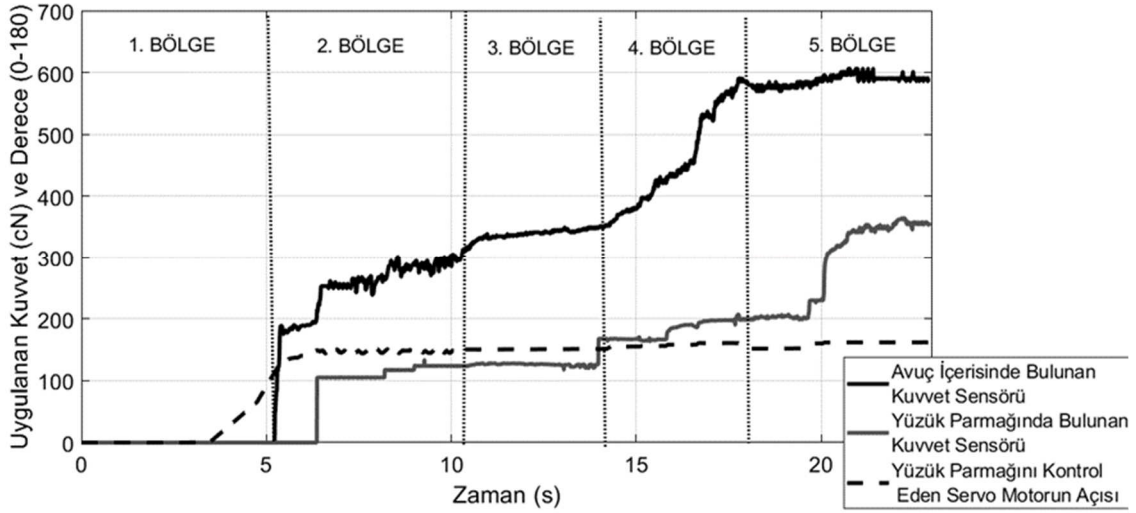
Şekil 4.3. Robot elin başparmağı için sistem cevabı



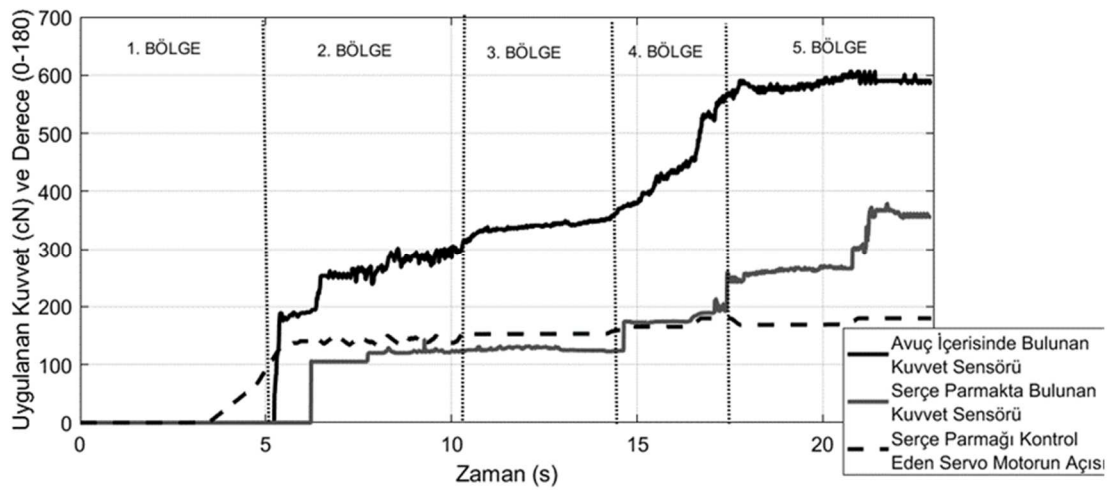
Şekil 4.4. Robot elin işaret parmağı için sistem cevabı



Şekil 4.5. Robot elin orta parmağı için sistem cevabı

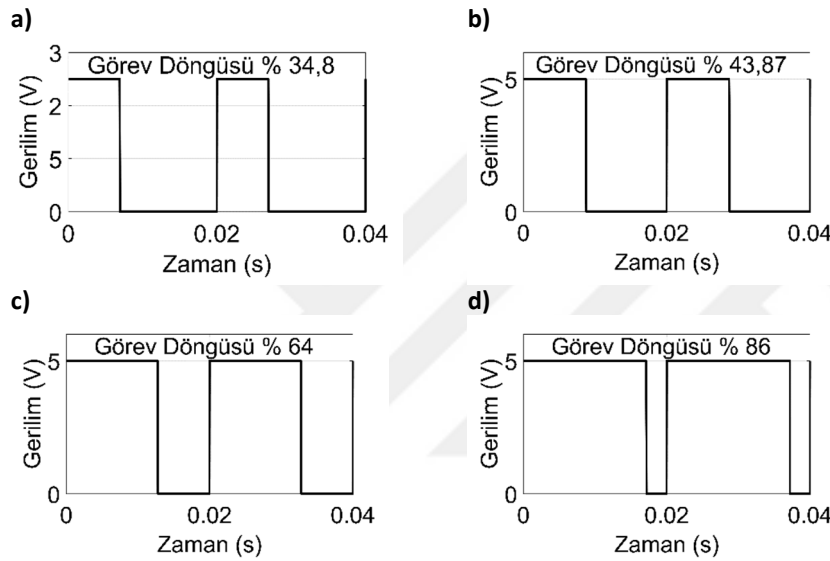


Şekil 4.6. Robot elin yüzük parmağı için sistem cevabı



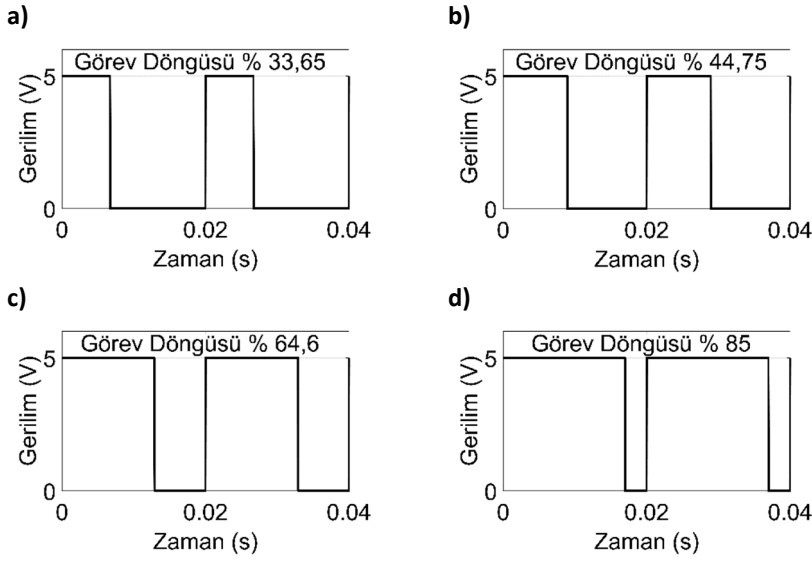
Şekil 4.7. Robot elin serçe parmağı için sistem cevabı

Nesnenin kavranma kuvvetinin artması ile haptik geri bildirim sisteminde bulunan titreşim motorlarına gönderilen PWM sinyallerinin görev döngüsü artmıştır. Burada görev döngüsü sisteme bir periyotta 5 volt gönderme süresidir. Yüzde görev döngüsünün artması titreşim motorlarına gönderilen ortalama gerilim miktarını artırmıştır. Dolayısıyla titreşim motorlarının titreşim şiddetide artmıştır. Başparmağın haptik geri bildirim için kullanılan titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali Şekil 4.3'te verilen 2. durum, 3.durum, 4. durum ve 5. durumda verilen sensör verileri için sırasıyla Şekil 4.8; a), b), c), d)'de verilmiştir.



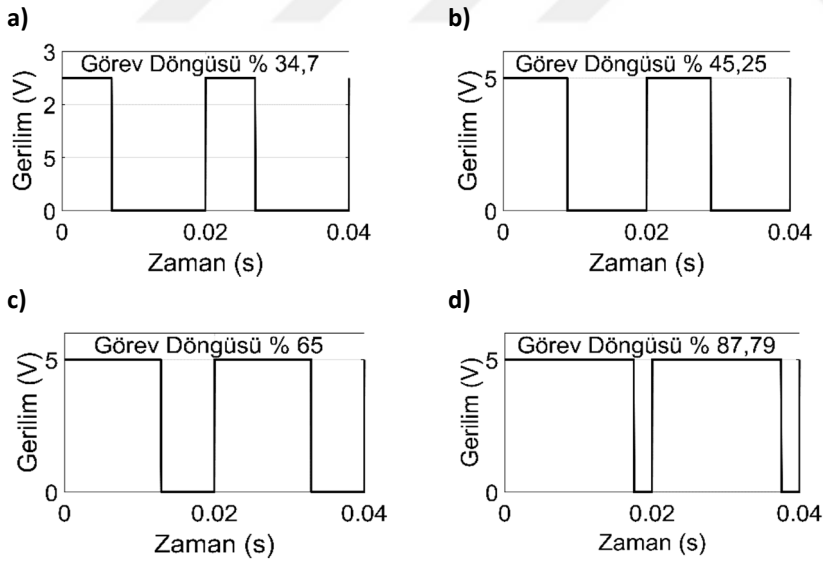
Şekil 4.8. Başparmağın titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri

İşaret parmağının haptik geri bildirimi için kullanılan titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali Şekil 4.4'te verilen 2. durum, 3.durum, 4. durum ve 5. durumda verilen sensör verileri için sırasıyla Şekil 4.9; a), b), c), d)'de verilmiştir.



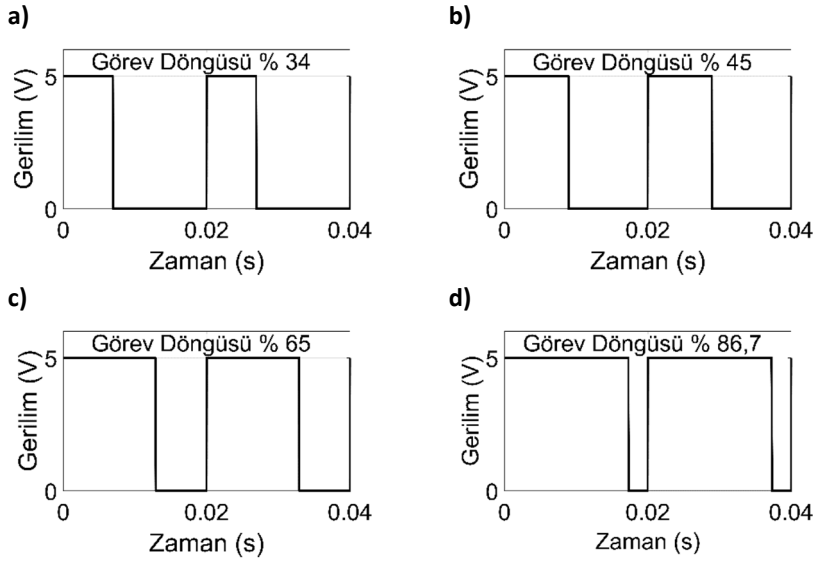
Şekil 4.9. İşaret parmağının titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri

Orta parmağın haptik geri bildirim için kullanılan titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali Şekil 4.5'te verilen 2. durum, 3.durum, 4. durum ve 5. durumda verilen sensör verileri için sırasıyla Şekil 4.10; a), b), c) ve d)'de verilmiştir.



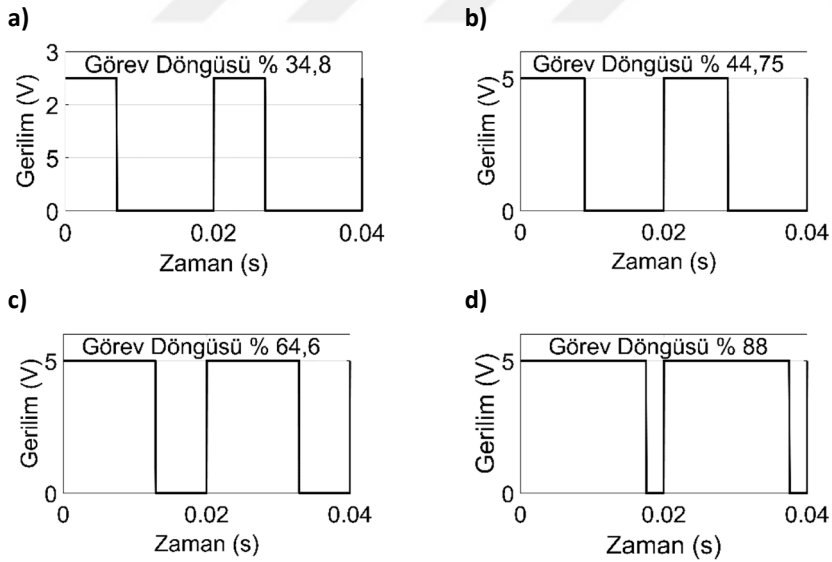
Şekil 4.10. Orta parmağın titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri

Yüzük parmağının haptik geri bildirim için kullanılan titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali Şekil 4.6'da verilen 2. durum, 3.durum, 4. durum ve 5. durumda verilen sensör verileri için sırasıyla Şekil 4.11; a), b), c) ve d)'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Yüzük parmağının titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri

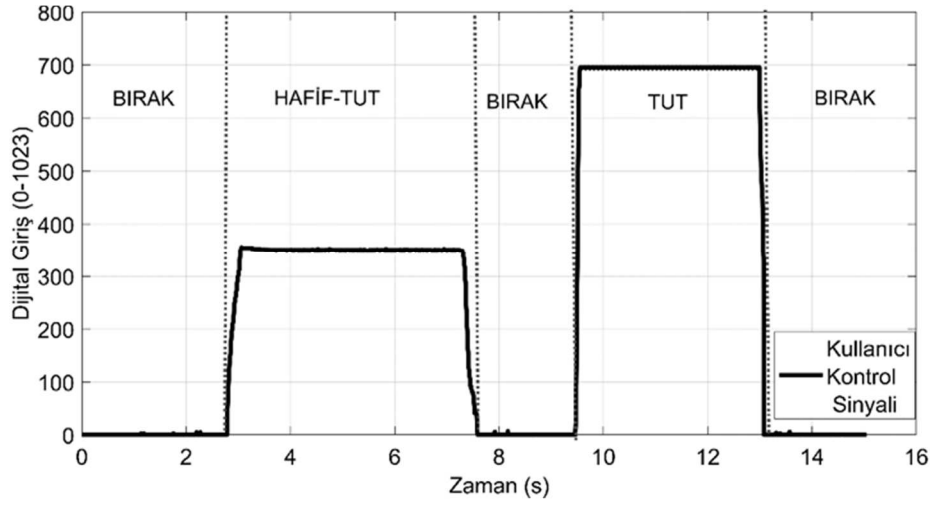
Serçe parmağın haptik geri bildirim için kullanılan titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali Şekil 4.7’de verilen 2. durum, 3.durum, 4. durum ve 5. durumda verilen sensör verileri için sırasıyla Şekil 4.12; a), b), c), d)’de verilmiştir.



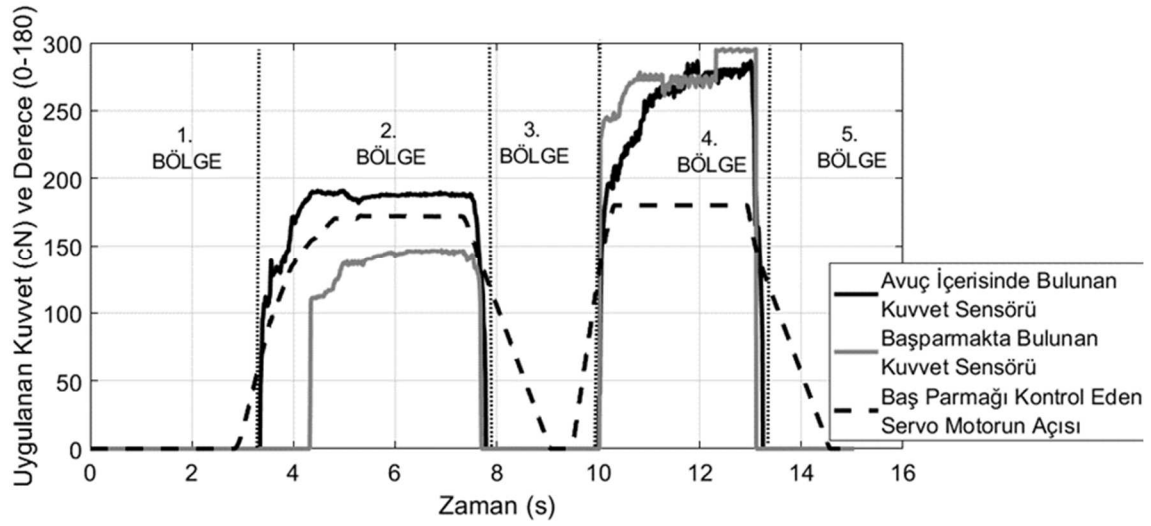
Şekil 4.12. Serçe parmağın titreşim motoruna 2. durum (a), 3. durum (b), 4. durum (c), ve 5. durum (d) için gönderilen PWM sinyalleri

Kullanıcı komutu ile sistemin test edilmesi

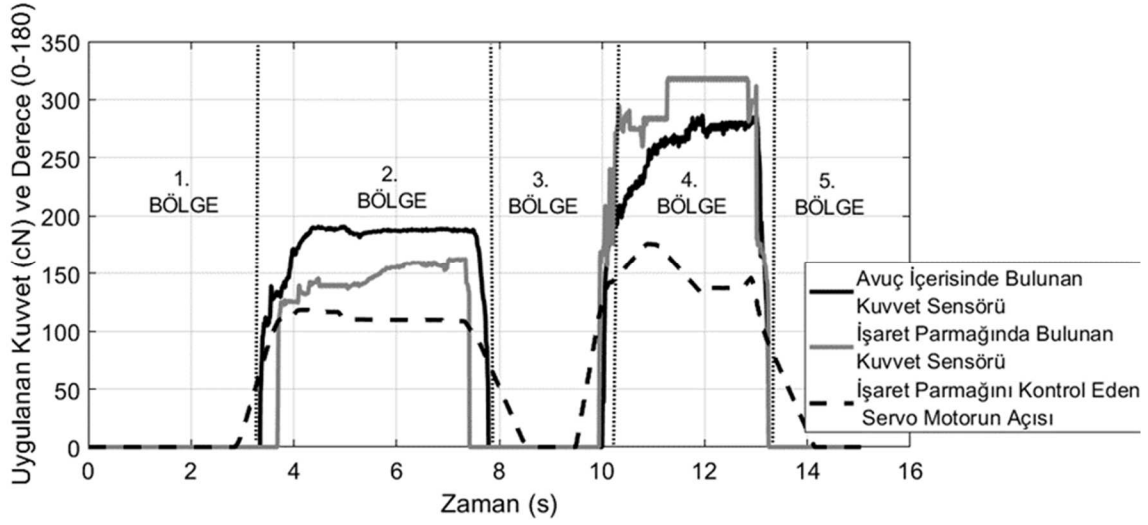
Oluşturulan kontrol yapısı bir kullanıcı ile test edilmiştir. Kullanıcı potansiyometre ile kavrama komutları göndermiştir. Robot el bu komutlar doğrultusunda karton bir bardağı kavramıştır. Robot elin nesneye uyguladığı kuvvet değişiminin gözlemlenebilmesi için karton bardak kullanılmıştır. Robot el karton bardağı, başparmağı, işaret parmağı ve orta parmağı ile kavramıştır. Yüzük ve serçe parmağı üzerlerinde bulunan kuvvet sensörlerinden veri gelmediği için parmaklar kapanmış ve kavrama esnasında kapalı konumda kalmıştır. Kullanıcının göndermiş olduğu kontrol sinyali Şekil 4.13'te sunulmaktadır. Parmakları kontrol eden servo motorların konumları ve sensör verileri Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.13'te görüldüğü üzere kullanıcı önce bırak komutunu göndermiştir. Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16'da 1. bölgede sunulduğu gibi robot elin baş, işaret ve orta parmakları açık olması sebebiyle sistem önce yanıtsız kalmıştır. Ardından kullanıcının hafif-tut komutunu göndermesi ile robot elin parmakları kapanmış karton bardak deforme olmadan kavranmıştır. Robot el ve karton bardağın durumu Resim 4.4. a)'da sunulmaktadır. Parmaklardan alınan kuvvet sensörü verileri ve servo motorların konumları (sistem cevapları) Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16'da 2. bölgede verilmiştir. Ardından robot ele bırak komutu gönderilmiş, parmaklar açılarak bardak bırakılmıştır. Daha sonra kullanıcı tarafından tut komutu gönderilmiş ve karton bardak bir miktar deforme olarak kavranmıştır. Karton bardağa uygulanan kuvvetler ve parmakları kontrol eden servo motorların konumları Şekil 4. 14, Şekil 4.15, Şekil 4.16'da 4. bölgede verilmiştir. Robot el ve karton bardağın durumu ise Resim 4.4. b)'de sunulmaktadır. Son olarak kullanıcı tekrar bırak komutunu göndermiş ve parmaklar açılarak bardak serbest bırakılmıştır.



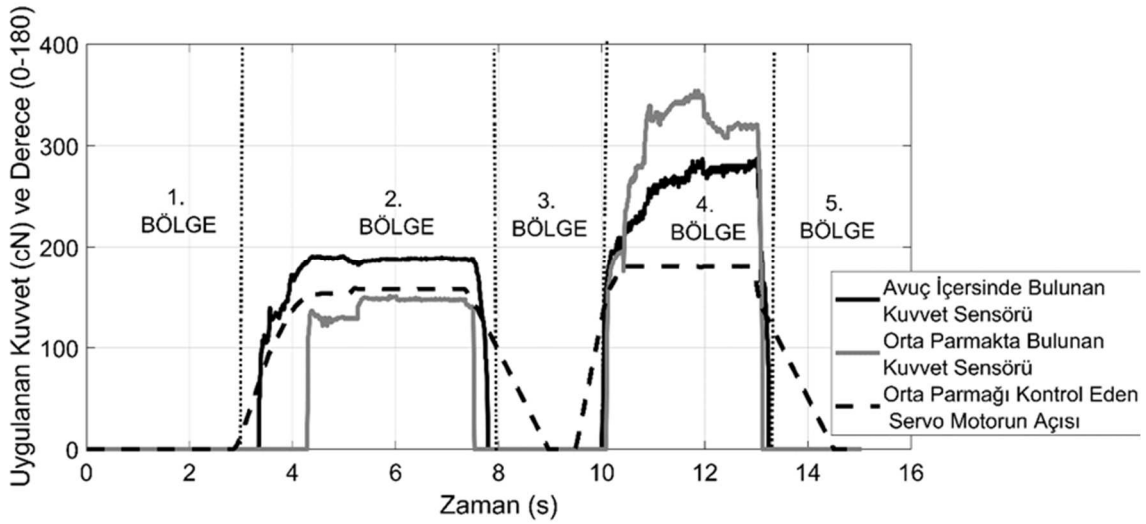
Şekil 4.13. Kullanıcının göndermiş olduğu kontrol sinyali



Şekil 4.14. Kullanıcı komutu doğrultusunda robot elin başparmağının objeye uyguladığı kuvvet ve servo motorun konumu



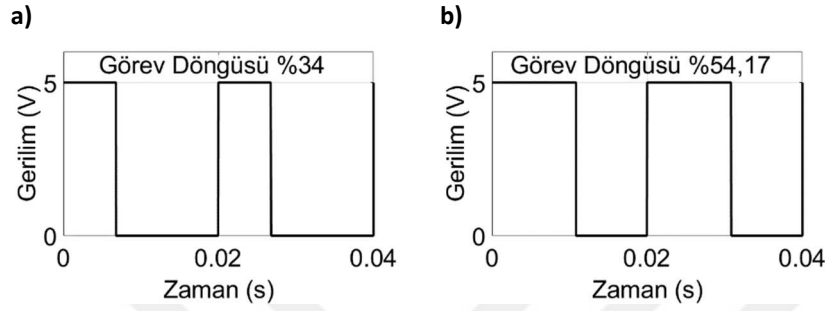
Şekil 4.15. Kullanıcı komutu doğrultusunda robot elin işaret parmağının objeye uyguladığı kuvvet ve servo motorun konumu



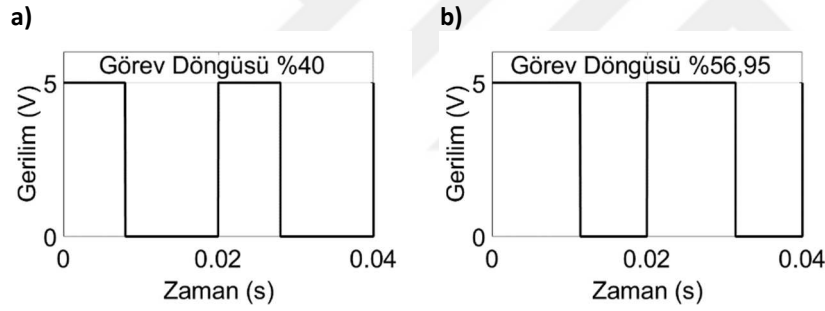
Şekil 4.16. Kullanıcı komutu doğrultusunda robot elin orta parmağının objeye uyguladığı kuvvet ve servo motorun konumu

Kullanıcı bırak komutunu uyguladığı sırada kuvvet sensörlerinden veri gelmediği için titreşim motorları titreşim üretmemektedir. Kullanıcı hafif-tut komutunu uyguladığında bulanık mantık kontrolcü gelen verileri değerlendirmiş ve titreşim motorlarına hesaplanan PWM sinyalini göndermiştir. Titreşim motorlarına gönderilen PWM sinyali Şekil 4.17. a), Şekil 4.18. a), Şekil 4.19. a)'da verilmiştir. Kullanıcıya hissettirilen titreşim şiddeti ile kullanıcı nesneyi kavradığını algılamıştır. Kullanıcı tut komutunu gönderdiğinde nesneye uygulanan kuvvetin artması ile titreşim motorunun titreşim şiddetinin artması için motora gönderilen ortalama gerilim miktarı (PWM sinyali) artmıştır. Titreşim motorlarına gönderilen PWM sinyali Şekil 4.17. b), Şekil 4.18. b), Şekil 4.19. b)'de verilmiştir. Burada

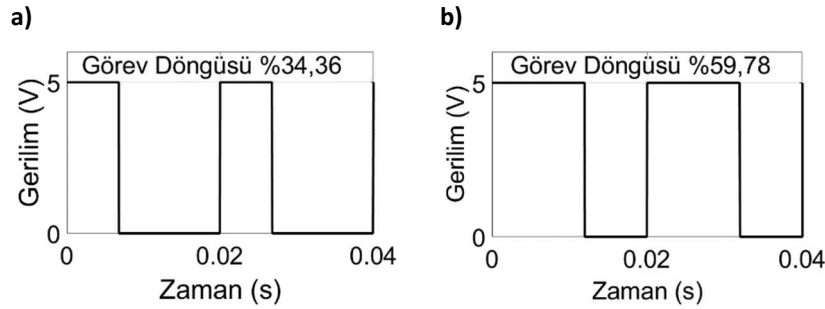
kullanıcıya hissettirilen titreşim şiddetinin artması sayesinde kullanıcı nesneyi daha yüksek kuvvette kavradığını algılamıştır. Haptik geri bildirim sistemiyle kullanıcı gönderdiği kavrama komutunu hissedebilmekte yani his bildirimini ile nesneyi görmese bile nesneye hangi kuvvet aralığında kuvvet uyguladığını tahmin edebilmektedir. Bu sayede kavrama kuvvetini daha bilinçli bir şekilde kontrol edebilmektedir.



Şekil 4.17. Başparmağın titreşim motoruna, hafif-tut komutu uygulandığında (a) ve tut komutu uygulandığında (b) gönderilen PWM sinyalleri



Şekil 4.18. İşaret parmağının titreşim motoruna, hafif-tut komutu uygulandığında (a) ve tut komutu uygulandığında (b) gönderilen PWM sinyalleri

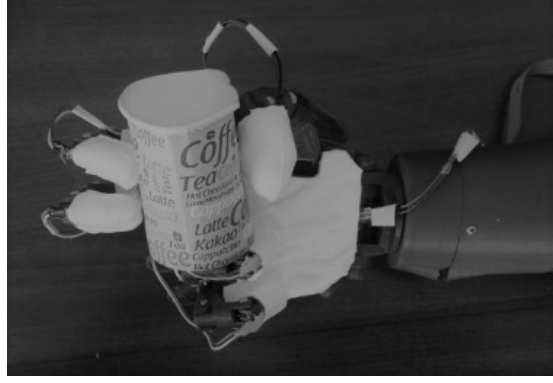


Şekil 4.19. Orta parmağın titreşim motoruna, hafif-tut komutu uygulandığında (a) ve tut komutu uygulandığında (b) gönderilen PWM sinyalleri

a)



b)



Resim 4.4. Robot el, hafif-tut (a) ve tut komutunu (b) uygulandığında robot el ve karton bardağın durumu



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde robotik sistemlerin kullanımıyla birlikte, üretimde oluşabilecek insan hata payı ve kaza oranının düşürülmesi sağlanmaktadır (Özkan, Karayel, Atalı ve Gökbayrak, 2017). Robotik sistemler arasında yer alan robot kavrayıcılar üretimden araştırmaya, askeri alandan protez olarak kullanıma kadar çok geniş kullanım alanına sahiptir. Bu nedenle farklı ihtiyaçlar doğrultusunda farklı kullanım alanlarına yönelik gelişmeye en açık çalışma konularından birisidir. Ancak robot kavrayıcıların farklı çalışma alanlarına yönelik nesneye uyguladıkları kuvvetin hassas kontrol edilememesi sebebiyle kavranan nesnenin zarar görmesi, çözülmesi gereken önemli bir problemdir. İnsanlar nesnelere kavrarken uyguladıkları kuvvete, duyu organlarından gelen veriler doğrultusunda karar vermektedir. Böylelikle objeleri bilinçli bir şekilde istedikleri kuvvette kavrayabilmektedirler. Ancak robot kavrayıcıların tek başına böyle bir yeteneği bulunmamaktadır. Bu sebeple kullanıcı komutu doğrultusunda işlem yapan robot kavrayıcılarda, kavrama kuvvetinin hassasiyeti sağlanması için kavrama kuvvetinin kontrol sorunu çözülmeli ve his geri bildirim eksikliği giderilmelidir. Öncelikle kavrayıcıların nesneyi kavrama kuvvetinin ölçülmesi veya hesaplanması gerekmektedir. Bunun için farklı yöntemler bulunmaktadır. Parmağın konum verisine göre nesnenin hangi kuvvette kavrandığı hesaplanabilmektedir. Ancak bu yöntemde nesnenin şekil, boyut, sertlik gibi bilgilerine ihtiyaç duyulmakta olup, farklı özelliklere sahip nesnelere kavrama kuvvetinin ölçülmesinde hassas sonuç elde edilmesi açısından dezavantajdır. Kuvvet verisi kavrayıcıyı kontrol eden eyleyicinin kullandığı akım miktarının değişimi ile de hesaplanabilmektedir. Ancak kavrayıcı sistemlerinin çoğunluğu lineer bir yapıya sahip değildir. Kavrayıcılar çok girdili ve çok çıktılı yapıya sahiptirler. Bu sebeple bu yöntemde hassas sonuç verememektedir. Nesnelere kavrama kuvveti yaygın olarak kuvvet sensörleriyle ölçülmektedir. Kuvvet sensörleri ile daha hassas veri elde edilmektedir. Hassas veri elde edilmesi kadar elde edilen verilerin uygun bir biçimde değerlendirilmesi de önemli bir konudur. İnsanlar uyguladıkları kuvvete sezgisel olarak karar vermektedir. Bu sebeple robot ellerin veya kavrayıcıların insansı bir yaklaşım ile kavrama yapmasının sağlanmasında bulanık mantık önemli bir kontrolcüdür.

Tez çalışması kapsamında 5 parmaklı robot elin (kavrayıcının) kuvvet kontrol sorunu üzerine durulmuştur. Robot elin doğrusal bir modelini oluşturmanın güç olması sebebiyle kuvvet kontrolü için çözüm yolları karmaşık ve kontrol stratejisini geliştirmek zordur (Boughdiri ve diğerleri, 2012; Khakpour ve Birglen, 2013). Bu sebeple kullanıcı tarafından

kontrol edilen robot elin nesneye uyguladığı kuvvetin kontrolü için bulanık mantık ile kontrolcü geliştirilmiştir. Bulanık mantığın sezgisel uygulamalarda iyi sonuçlar vermesi ve sözel verileri değerlendirmesi sistem için önem arz etmektedir. Kullanıcının nesneye uyguladığı kuvveti hissedememesi sebebiyle nesneye zarar verme sorununa çözüm için ise haptik geri bildirim sistemi tasarlanmıştır. Robot el ve haptik geri bildirim sistemi üzerinde deneysel uygulama yapılmıştır.

Sistem üzerinde yapılan deneysel uygulamalar sonucunda:

- Bulanık mantık ile lineer olmayan sensör verileri değerlendirilerek haptik geri bildirim sistemi ve robot elin kuvvet kontrolü hassaslaştırılmıştır.
- Bulanık mantık kontrolcü, kullanıcının kavrama komutu doğrultusunda robot elin parmaklarının uyguladığı kuvveti değerlendirerek robot elin parmaklarını ayrı ayrı kontrol etmiştir. Her bir parmağın ayrı ayrı kontrol edilmesi sayesinde düzgün geometrik şekilde olmayan nesnelere kavranmasında parmaklar nesnelere şekline göre kapanmaktadır. Nesneye her parmak kullanıcı komutu doğrultusunda belirlenen kuvvet aralığında kuvvet uygulamıştır.
- Robot el nesneye kullanıcı sinyali doğrultusunda düşük, orta veya yüksek kuvvet gibi farklı kuvvet değerlerini uygulayabilmektedir.
- Robot el sistemine haptik geri bildirim sisteminin entegre edilmesi ile kullanıcı nesneyi kavrama kuvvetini algılamakta, nesneye uyguladığı kuvveti daha iyi bir şekilde kontrol edebilmektedir.
- Sistem kontrolünde sadece parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü verisi değil avuç içinde bulunan kuvvet sensörünün de değerlendirilmesi ile nesneye uygulanan kuvvetin daha hassas bir şekilde kontrol edilmesi sağlanmıştır.
- Oluşturulan kontrol yapısı ve haptik geri bildirim sistemi her bir parmak için ayrı ayrı oluşturulması sayesinde farklı parmak sayısına sahip kavrayıcılara da uygulanabilir yapıdadır.

Robot elin kullanıcı komutu doğrultusunda farklı fiziksel özelliklere sahip nesnelere uygun kuvvette kavranması ve kavrama kuvvetinin kullanıcıya hissettirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda haptik geri bildirim sistemi tasarlanmış ve kuvvet kontrolünde bulanık mantık uygulanmıştır. Kullanıcı kavrama komutunu potansiyometre ile göndermektedir. Bu sebeple potansiyometre yerine EEG veya EMG sensörü kullanılarak robot elin kontrolü için daha detaylı bir çalışma ve kuvvet

kontrolünün yanı sıra robot elin kavrama planlaması yapabilmesine yönelik bir çalışma yapılması planlanmaktadır.



KAYNAKLAR

- Abaduljabar, J.S. (2011). Bulanık Mantık Yöntemleri Kullanılarak Gazlı İçeceklerde Karbondioksit Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi*, Ankara.
- Abiri, A., Pensa, J., Tao, A., Ma, J., Juo, Y. Y., Askari, S. J. and Grundfest, W. S. (2019). Multi-Modal Haptic Feedback for Grip Force Reduction in Robotic Surgery. *Scientific reports*, 9(1), 5016.
- Adıgüzel, T. (2007). Geribeslemeli Doğrusallaştırma Metoduna Dayalı Doğrusal Olmayan Kontrol Tasarım, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi*, Ankara.
- Ağralı, E., Rüstemli, S., and Yıldız, S. (2016). Computer Aided Revolving Speed Reading Of Alternating Current Universal Motor. *European Journal of Technic*, 6(2).
- Ahmad, F., ul Haq, T. and Akram, F. (2016, December). Design and implementation of low cost multi threaded haptic feedback device. In *2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*. pp. 1-4.
- Akın, Ö. (2017). Hızla Artan Endüstriyel Robotların Üretim Süreçlerinde Yarattığı Değişimler ve Türkiye İşgücü Piyasasında Yaratacağı Olası Etkilerin Değerlendirilmesi. *İş ve Hayat*, 3(6), 42-71.
- Akkuş, N. ve Yavuz, H. (2018). *Mekatronik Mühendisliğine Giriş*, (1. Baskı), Papatya Yayıncılık Eğitim, 370-377.
- Al-Ali, A. R., Jarrah, M. A. and Dhaouadi, R. (2007). Microcontroller-operated anthropomorphic manipulator with haptic feedback. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(1), 63-70.
- Antfolk, C., D'Alonzo, M., Controzzi, M., Lundborg, G., Rosén, B., Sebelius, F. and Cipriani, C. (2013). Artificial redirection of sensation from prosthetic fingers to the phantom hand map on transradial amputees: vibrotactile versus mechanotactile sensory feedback. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 21(1), 112-120.
- Arı A., (2016). Beş Parmaklı Protez Robot El. Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Aydın, L. ve Küçük, S. (2017). Üç boyutlu yazıcı ve tarayıcı ile hastaya özel medikal ortez tasarımı ve geliştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 20(1), 1-8.
- Balcı, H. (2015). Durum Uzay Metodu ile Ekzotermik (ısı Yayan) Kimyasal Reaktörü Simüle Eden Isıl Sistemin Parametrelerinin Tespiti Ve Geri Beslemeli Kontrolü, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul.
- Bar-Cohen, Y. (2005). *Biomimetics: biologically inspired technologies*. CRC Press.
- Bekey, G. A., Tomovic, R. and Zeljkovic, I. (1990). Control architecture for the Belgrade/USC hand. In *Dextrous robot hands*. Springer, New York, NY. 136-149s.

- Berselli, G., Borghesan, G., Brandi, M., Melchiorri, C., Natale, C., Palli, G. and Vassura, G. (2009). Integrated mechatronic design for a new generation of robotic hands. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(16), 8-13.
- Beschi, M., Villagrossi, E., Tosatti, L. M. and Surdilovic, D. (2017). Sensorless model-based object-detection applied on an underactuated adaptive hand enabling an impedance behavior. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 46, 38-47.
- Bezak, P., Bozek, P. and Nikitin, Y. (2014). Advanced robotic grasping system using deep learning. *Procedia Engineering*, 96, 10-20.
- Bilgiç, H. H. (2018). Esnek Sistemlerin Kontrolü İçin Yapay Zeka Teknikleri İle Girdi Şekillendirici Tasarımı, Doktora Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun*.
- Bilgiç, H. H., Conker, Ç., Yavuz, H., Şen, M. A. ve Konya, H. H. A. (2015, 14-17 Haziran). Sarkaç Tipi Bir Tepe Vincinin Kontrolüne Bulanık Yaklaşım. *Uluslararası Katılımlı 17. Makine Teorisi Sempozyumu, İzmir*.
- Boughdiri, R., Nasser, H., Bezine, H., M'Sirdi, N. K., Alimi, A. M. and Naamane, A. (2012). Dynamic modeling and control of a multi-fingered robot hand for grasping task. *Procedia Engineering*, 41, 923-931.
- Brown, J. D., Paek, A., Syed, M., O'Malley, M. K., Shewokis, P. A., Contreras-Vidal, J. L. and Gillespie, R. B. (2013, April). *Understanding the role of haptic feedback in a teleoperated/prosthetic grasp and lift task. In 2013 World Haptics Conference (WHC)*, pp. 271-276.
- Butterfaß, J., Grebenstein, M., Liu, H. and Hirzinger, G. (2001,May). DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Vol. 1*, South Korea, pp. 109-114.
- Carrozza, M. C., Suppo, C., Sebastiani, F., Massa, B., Vecchi, F., Lazzarini, R. and Dario, P. (2004). The SPRING hand: development of a self-adaptive prosthesis for restoring natural grasping. *Autonomous Robots*, 16(2), 125-141.
- Casini, S., Morvidoni, M., Bianchi, M., Catalano, M., Grioli, G. and Bicchi, A. (2015, September). Design and realization of the cuff-clenching upper-limb force feedback wearable device for distributed mechano-tactile stimulation of normal and tangential skin forces. *In 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1186-1193.
- Chatterjee, A., Aggarwal, V., Ramos, A., Acharya, S. and Thakor, N. V. (2007). A brain-computer interface with vibrotactile biofeedback for haptic information. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 4(1), 40.
- Chaudhary, A. and Raheja, J. L. (2013). Bent fingers angle calculation using supervised ANN to control electro-mechanical robotic hand. *Computers & Electrical Engineering*, 39(2), 560-570.
- Chen, W. and Xiong, C. (2016). On adaptive grasp with underactuated anthropomorphic hands, *Journal of Bionic Engineering*, Cilt. 13(1), s. 59-72.

- Coelho, J., Piater, J. and Grupen, R. (2001). Developing haptic and visual perceptual categories for reaching and grasping with a humanoid robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 37(2-3), 195-218.
- Colella, N., Bianchi, M., Grioli, G., Bicchi, A. and Catalano, M. G. (2019). A Novel Skin-Stretch Haptic Device for Intuitive Control of Robotic Prostheses and Avatars. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 1572-1579.
- Conker, C. (2018). *Mekatronik Mühendisliğine Giriş*, (1. Baskı), Papatya Yayıncılık Eğitim, 519-569.
- Controzzi, M., Cipriani, C. and Carrozza, M. C. (2014). Design of artificial hands: A review. In *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development* (pp. 219-246). Springer, Cham.
- Çagglar, E., Orhan, S., Özen, A. and İnce, G. (2017, May). Haptic seat interface design for improved user experience. In *2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 1-4.
- Delgado, A., Jara, C. A. and Torres, F. (2017). In-hand recognition and manipulation of elastic objects using a servo-tactile control strategy. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48, 102-112.
- Demir, K., Demir, E. B. K., Çaka, C., Tuğtekin, U., İslamoğlu, H. ve Kuzu, A. (2016). Üç boyutlu yazdırma teknolojilerinin eğitim alanında kullanımı: *Türkiye'deki uygulamalar*. *Ege Eğitim Dergisi*, 17(2), 481-503.
- Devol, J. G. C. (1961). U.S. Patent No. 2,988,237. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Doğrul, Y. (2018). Bulanık Mantık Denetimli Alçak Gerilim Statik Var Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi Ve Plc İle Gerçeklenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Ebrahimnejad, A. and Verdegay, J. L. (2018). Fuzzy set theory. In *Fuzzy Sets-Based Methods and Techniques for Modern Analytics* (pp. 1-27). Springer, Cham.
- Endo, T., Tanimura, S. and Kawasaki, H. (2011). Development of a surgical knife device for a multi-fingered haptic interface robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 6460-6465.
- Ergin, Ö.F. (2012). Az Tahrikli Çok Parmaklı Robotik El Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Fan, R. E., Culjat, M. O., King, C. H., Franco, M. L., Boryk, R., Bisley, J. W. and Grundfest, W. S. (2008). A haptic feedback system for lower-limb prostheses. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 16(3), 270-277.
- Fasoulasa, J., Konstantoudakisa, L., Kritsotakisa, N. and Sfakiotakisb, M. (2017). Design, Development And Control Of The Anthropomorphic Robotic Hand Talos. *15th International Symposium on Ambient Intelligence and Embedded Systems (AmiEs'16)*, At Heraklion, Crete, Greece.

- Ficuciello, F., Palli, G., Melchiorri, C. and Siciliano, B. (2014). Postural synergies of the thumb for human-like grasping. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(4), 515-527.
- Fu, H., Yang, H., Song, W. and Zhang, W. (2017). A novel cluster-tube self-adaptive robot hand. *Robotics and biomimetics*, 4(1), 25.
- Fujimoto, K., Kobayashi, F., Nakamoto, H. and Kojima, F. (2013, December). Development of haptic device for five-fingered robot hand teleoperation. In *Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 820-825.
- Fukaya, N. ve Ogasawara, Y. (2017, October). Development of humanoid hand with cover integrated link mechanism for daily life work. In *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)* pp. 1-4.
- Fukaya, N., Toyama, S., Asfour, T. and Dillmann, R. (2000). Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference*, 30 Oct-5 Nov. ,Japan, Vol. 3, pp. 1754-1759.
- Gosselin, C., Pelletier, F. and Laliberte, T. (2008, May). An anthropomorphic underactuated robotic hand with 15 dofs and a single actuator. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation* , pp. 749-754.
- Grossard, M. (2015). Robust Decentralized Control of a Fully Actuated Robot Hand. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 2176-2182.
- Hasan, B. A. Ş. and Yapıcı, F. (2015). Ergonomik Tasarım Ve Üretimde Hızlı Prototipleme Teknolojisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 199-204.
- Hatzfeld, C. and Kern, T. A. (2016). *Engineering Haptic Devices*. Springer London Limited.
- Hirose, S. and Umetani, Y. (1978). The development of soft gripper for the versatile robot hand, *Mechanism and machine theory*, Cilt. 13(3), s. 351-359.
- Hocaoglu, E. (2014). Design and tele-impedance control of a variable stiffness transradial hand Prosthesis, *Doctoral dissertation, Sabancı üniversitesi*, İstanbul.
- Hussain, I., Meli, L., Pacchierotti, C., Salvietti, G. and Prattichizzo, D. (2015, June). Vibrotactile haptic feedback for intuitive control of robotic extra fingers. In *World Haptics*, pp. 394-399.
- Inaba, H., Nakajima, S., Sakakibara, S. and Nihei, R. (1984). *U.S. Patent No. 4,479,673*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- İnternet: Argonne National Laboratory. (1949). Reactors: Modern-Day Alchemy Argonne National Laboratory. <http://www.ne.anl.gov/About/modern-day-alchemy>. (Erişim Tarihi:14.03. 2017).

- İnternet: Devol, G. (1959). Robotic Industries Association “A Tribute To Joseph Engelberger”. <http://www.robotics.org/joseph-engelberger/about.cfm> (Erişim Tarihi: 14 Mart 2017).
- İnternet: Langevin, G. (2016). “Robot Hand InMoov”. <http://inmoov.fr/> (Son Erişim Tarihi:20 Mayıs 2019).
- İnternet: Shadow Robot Company. 2015.“Shadow Dexterous Hand E2 Series”.URL: https://www.shadowrobot.com/wpcontent/uploads/shadow_dexterous_hand_technical_specification_E_20150827.pdf , Son erişim tarihi: 7 kasım 2017.
- Jacobsen, S., Iversen, E., Knutti, D., Johnson, R. and Biggers, K. (1986, April). Design of the Utah/MIT dextrous hand. In *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Vol. 3, pp. 1520-1532). IEEE.
- Jeong, S. H., Kim, K. S. and Kim, S. (2017). Designing anthropomorphic robot hand with active dual-mode twisted string actuation mechanism and tiny tension sensors. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(3), 1571-1578.
- Jimenez, A. R., Soembagijo, A. S., Reynaerts, D., Van Brussel, H., Ceres, R. and Pons, J. L. (1997). Featureless classification of tactile contacts in a gripper using neural networks. *Sensors and Actuators A: Physical*, 62(1-3), 488-491.
- Karaca, A. ve Conker, Ç. (12 Eylül, 2018) Bulanık Kontrolör Esaslı Haptik Robotik El, *TOK2018 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Kayseri.
- Karaçizmeli, C., Çakır, G. and Tükel, D. (2014, April). Robotic hand project. In *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 473-476.
- Katibeha, F., Egtesadb, M., Bazargan-Laric, Y. (2016). Dynamic modeling and control of a 4 DOF robotic finger using adaptive-robust and adaptive-neural controllers, *International Journal of Robotics*, Vol. 4, No. 4, p. 51-61.
- Kaufmann, A., Gupta, M. M. (1988). Fuzzy mathematical models in engineering and management science, *Elsevier Science Inc*.
- Kawasaki, H., Komatsu, T., Uchiyama, K. (2002). Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II., *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Cilt. 7(3), s. 296-303.
- Khakpour, H. and Birglen, L. (2013). Numerical analysis of the grasp configuration of a planar 3-DOF linkage-driven underactuated finger. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 8(2), 021010.
- Kheirikhah, M. M., Khodayari, A. and Tatlari, M. (2010, December). Design a new model for artificial finger by using SMA actuators. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1590-1595.

- Kobayashi, F., Kitabayashi, K., Shimizu, K., Nakamoto, H. and Kojima, F. (2016). Human motion caption with vision and inertial sensors for hand/arm robot teleoperation. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 52(3-4), 1629-1636.
- Kontarinis, D. A., Son, J. S., Peine, W. and Howe, R. D. (1995, May). A tactile shape sensing and display system for teleoperated manipulation. *In Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 641-646
- Kovacic, Z. and Bogdan, S. (2005). *Fuzzy controller design: theory and applications*. CRC press.
- Köse, E. ve Mühürçü, A. (2018). *Mekatronik Mühendisliğine Giriş*, (1. Baskı), Papatya Yayıncılık Eğitim, 419-454.
- Kroemer, O. B., Detry, R., Piater, J. and Peters, J. (2010). Combining active learning and reactive control for robot grasping. *Robotics and Autonomous systems*, 58(9), 1105-1116.
- Kubat, C.(2014). *MATLAB: Yapay Zeka ve Mühendislik Uygulamaları*. Pusula yayınları
- Kuo, C. H. and Chen, C. T. (2010). Development of Tendon Based Dexterous Robot Hand. *In Advances in Robot Manipulators*. IntechOpen.
- Kurita, Y., Ono, Y., Ikeda, A. and Ogasawara, T. (2011). Human-sized anthropomorphic robot hand with detachable mechanism at the wrist. *Mechanism and Machine Theory*, 46(1), 53-66.
- Kuzu, H. (2018). *Uzman Sistem ve Bulanık Mantık Tabanlı Öğretim Modellerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay.
- Lee, D. H., Park, J. H., Park, S. W., Baeg, M. H. and Bae, J. H. (2016). KITECH-hand: A highly dexterous and modularized robotic hand. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(2), 876-887.
- Lin, L. R. and Huang, H. P. (1996). Integrating fuzzy control of the dexterous National Taiwan University (NTU) hand. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1(3), 216-229.
- Lin, L. R., Huang, H. P. (1998). NTU hand: A new design of dexterous hands, *Journal of Mechanical Design*, Cilt. 120(2), s. 282-292.
- Liu, H., Meusel, P., Seitz, N., Willberg, B., Hirzinger, G., Jin, M. H. and Xie, Z. W. (2007). The modular multisensory DLR-HIT-Hand. *Mechanism and Machine Theory*, 42(5), 612-625.
- Liu, J. (2018). Adaptive fuzzy control. *In Intelligent Control Design and MATLAB Simulation*, Springer, Singapore.

- Liu, Y., Namiki, A., Teshigawra, S. and Tobita, K. (2017, December). Development of a fishhook-type robot hand: EEL-hand. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* pp. 2480-2483.
- Lovasz, E. C., Mărgineanu, D. T., Ciupe, V., Maniu, I., Gruescu, C. M., Zăbavă, E. S. and Stan, S. D. (2017). Design and control solutions for haptic elbow exoskeleton module used in space telerobotics. *Mechanism and Machine Theory*, 107, 384-398.
- Lovchik, C. S., Aldridge, H. A. and Driftler, M. A. (1999). Design of the NASA Robonaut hand.
- Luo, M., Carbone, G., Ceccarelli, M. and Zhao, X. (2010). Analysis and design for changing finger posture in a robotic hand. *Mechanism and Machine Theory*, 45(6), 828-843.
- Ma, Z. and Ben-Tzvi, P. (2013, October). Tendon transmission efficiency of a two-finger haptic glove. In *2013 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)* pp. 13-18.
- Michalec, R. (2011). Modeling and control of multifingered dextrous manipulation for humanoid robot hands. *Université Pierre et Marie Curie-Paris VI*, PhD Thesis, Paris.
- Mishima, M., Kawasaki, H., Mouri, T. and Endo, T. (2009). Haptic teleoperation of humanoid robot hand using three-dimensional force feedback. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(16), 431-436.
- Mouri, T., Kawasaki, H. and Ueki, S. (2017). Bilateral Tele-operated Hand Robot with Communicational Time Delay. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 12721-12726.
- Mutlu, A. (2011). Robot Manipulatorların Bulanık Mantıklı Gürbüz Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, *Fen, Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul*.
- Nguyen, H. T., Walker, C. L. and Walker, E. A. (2018). *A first course in fuzzy logic*. CRC press. ix-x.
- Odhner, L. U., Jentoft, L. P., Claffee, M. R., Corson, N., Tenzer, Y., Ma, R. R. and Dollar, A. M. (2014). A compliant, underactuated hand for robust manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, 33(5), 736-752.
- Orji, I. J. and Wei, S. (2015). An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection: A case on manufacturing industry. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 1-12.
- Osswald, D., Martin, J., Burghart, C., Mikut, R., Wörn, H., and Bretthauer, G. (2004). Integrating a flexible anthropomorphic, robot hand into the control, system of a humanoid robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 48(4), 213-221.
- Özkan, S. S., Karayel, D., Atalı, G. ve Gökbayrak, İ. (2017). Esnek Algılayıcı Kontrollü Robot El Tasarımı ve Gerçeklenmesi. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(3), 35-40.

- Pacchierotti, C., Meli, L., Chinello, F., Malvezzi, M. and Prattichizzo, D. (2015). Cutaneous haptic feedback to ensure the stability of robotic teleoperation systems. *The International Journal of Robotics Research*, 34(14), 1773-1787.
- Piazza, C., Grioli, G., Catalano, M. G. and Bicchi, A. (2019). A century of robotic hands. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2, 1-32.
- Pons, J. L., Rocon, E., Ceres, R., Reynaerts, D., Saro, B., Levin, S., and Van Moorleghe, W. (2004). The MANUS-HAND dextrous robotics upper limb prosthesis: mechanical and manipulation aspects. *Autonomous Robots*, 16(2), 143-163.
- Rodić, A., Miloradović, B., Popić, S. and I. Kršenković, (September 2013). Development of Anthropomorphic Robot hand of Modular Structure. *Proc. Of the RAAD 2013, 22nd Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*, September 11-13, 2013, Portorož, Slovenia
- Rossi, M., Bianchi, M., Battaglia, E., Catalano, M. G. and Bicchi, A. (2019). HapPro: a wearable haptic device for proprioceptive feedback. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 66(1), 138-149.
- Salisbury, K., Conti, F. and Barbagli, F. (2004). Haptic rendering: introductory concepts. *IEEE computer graphics and applications*, 24(2), 24-32.
- Sartori, E., Fiorini, P. and Muradore, R. (2016, October). Cutaneous feedback in teleoperated robotic hands. *In IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 686-691.
- Saut, J. P. and Sidobre, D. (2012). Efficient models for grasp planning with a multi-fingered hand. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(3), 347-357.
- Savić, S., Raković, M., Penčić, M., Nikolić, M., Dudić, S. and Borovac, B. (2016, June). Design of an Underactuated Adaptive Robotic Hand with Force Sensing. *In International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN*, Zlatibor.
- Sedef, K. (2009). Protez El Tasarımı ve Prototip Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri*.
- Shauri, R. L. A., Saiki, K., Toritani, S. and Nonami, K. (2012). Sensor integration and fusion for autonomous screwing task by dual-manipulator hand robot. *Procedia Engineering*, 41, 1412-1420.
- Shen, Y., Liu, Y. and Li, K. (2000). Haptic tactile feedback in teleoperation of a multifingered robot hand. *In Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation* (Cat. No. 00EX393) Vol. 1, pp. 85-90.
- Shen, Y., Lo, W., Li, K. and Liu, Y. (2003). Haptic feedback in teleoperation of multifingered robot hands. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 9(3), 143-154.
- Sommer, N. and Billard, A. (2016). Multi-contact haptic exploration and grasping with tactile sensors. *Robotics and autonomous systems*, 85, 48-61.

- Song, G., Guo, S. and Wang, Q. (2006, August). A Tele-operation system based on haptic feedback. *In 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*, pp. 1127-1131.
- Stone, R. J. (2000, August). Haptic feedback: A brief history from telepresence to virtual reality. *In International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction* (pp. 1-16). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sun, J. and Zhang, W. (2012). A novel coupled and self-adaptive under-actuated multi-fingered hand with gear-rack-slider mechanism. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(1), 42-49.
- Sümbül, H. and Coşkun, A. (2011). Mayın Tarama ve Bomba İmha Sistemlerinin Tek Robot Üzerinde Modernizasyonu. *Akademik Bilişim'11-XIII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri*, 39-43.
- Tai, K., El-Sayed, A. R., Shahriari, M., Biglarbegian, M. and Mahmud, S. (2016). State of the art robotic grippers and applications. *Robotics*, 5(2), 11.
- Takahashi, T., Tsuboi, T., Kishida, T., Kawanami, Y., Shimizu, S., Iribe, M. and Fujita, M. (2008). Adaptive grasping by multi fingered hand with tactile sensor based on robust force and position control , *In Robotics and Automation*, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on pp. 264-271.
- Tarmizi, W. F. B. W., Elamvazuthi, I. and Begam, M. (2009). Kinematic and dynamic modeling of a multi-fingered robot hand. *International Journal of Basic & Applied Sciences*, 9(10), 89-96.
- Teng, M. C., Tsai, Y. J. and Hsiao, C. C. (2013). Mechanical Design and Kinematic Analysis of a 10 DOF Robot Manipulator. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(5), 301-306.
- Tiwana, M. I., Redmond, S. J. and Lovell, N. H. (2012). A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering. *Sensors and Actuators A: physical*, 179, 17-31.
- Touvet, F., Daoud, N., Gazeau, J. P., Zegloul, S., Maier, M. A. and Eskiizmirliler, S. (2012). A biomimetic reach and grasp approach for mechanical hands. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(3), 473-486.
- Turner, M., Gomez, D., Tremblay, M. and Cutkosky, M. (1998, November). Preliminary tests of an arm-grounded haptic feedback device in telemanipulation. *In Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division* (Vol. 64, pp. 145-149).
- Ueda, J., Kondo, M. and Ogasawara, T. (2010). The multifingered NAIST hand system for robot in-hand manipulation. *Mechanism and Machine Theory*, 45(2), 224-238.
- Uraz, C. and Macit, Ş. 2018. Electroless Cu Plating on ABS Plastic by Using Environmentally Friendly Chemicals, *Journal of Science and Engineering*, Cilt. 20(59), s. 369-375.

- Üstünel, H. (2014). Üstün Yetenekli Öğrencilerin Kullanımı İçin Sanal Gerçeklik Ortamında Kuvvet Geribeslemeli Haptik Uygulamaların Geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne.
- Üzgün, H. D. (2015). Esnek ve Sürekli Yapılarla Robotik El Tasarımı, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Vásquez, A. and Perdereau, V. (2017). Proprioceptive shape signatures for object manipulation and recognition purposes in a robotic hand. *Robotics and Autonomous Systems*, 98, 135-146.
- Vulliez, P. Gazeau, J. P., Laguillaumie, P., Mnyusiwalla, H., and Seguin, P. (2018). Focus on the mechatronics design of a new dexterous robotic hand for inside hand manipulation. *Robotica*, 36(8), 1206-1224.
- Wiste, T. and Goldfarb, M. (2017, May). Design of a simplified compliant anthropomorphic robot hand. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 3433-3438).
- Witteveen, H. J., Droog, E. A., Rietman, J. S. and Veltink, P. H. (2012). Vibro-and electrotactile user feedback on hand opening for myoelectric forearm prostheses. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 59(8), 2219-2226.
- Xu, S., Xu, Y. and Xu, X. (2018, June). Structural design and kinematics analysis of SHU-hand II humanoid robotic hand. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 16–17 June, China.
- Yamano, I. and Maeno, T. (2005, April). Five-fingered robot hand using ultrasonic motors and elastic elements. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2673-2678.
- Yan, J., El-Baradie, M. A. and Hashmi, M. S. J. (1992). The development of a robotic compliance control system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Cilt. 32(4), s. 477-486.
- Yang, J., Pitarch, E. P., Abdel-Malek, K., Patrick, A. and Lindkvist, L. (2004). A multi-fingered hand prosthesis. *Mechanism and Machine Theory*, 39(6), 555-581.
- Yang, Y., Zhang, W., Xu, X., Hu, H. and Hu, J. (2016). LIPSA hand: a novel underactuated hand with linearly parallel and self-adaptive grasp. In *Mechanism and Machine Science* (pp. 111-119). Springer, Singapore.
- Yesmunt, G. S. 2014. Design, analysis, and simulation of a humanoid robotic arm applied to catching, Purdue University.
- Yıldıran, M. (2016). Moda giyim sektöründe üç boyutlu yazıcılarla tasarım ve üretim. *Art-e Sanat Dergisi*, 9(17), 155-172.
- Yılmaz, A. (2018). Yapay Zeka. *Kodlab Yayınları*.

- Yoshikawa, T., Endo, T., Maeno, T. and Kawasaki, H. (2009). Multi-fingered bimanual haptic interface with three-dimensional force presentation. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(16), 651-656.
- Yuden, M. A. M., Ghazaly, M. M., Amran, A. C., Jamaludin, I. W., Yee, K. H., Yaacoba, M. R. and Kiata, Y. C. (2017). Positioning Control Performances Of A Robotic Hand System. *Jurnal Teknologi*, 79(1), 15-23.
- Yüksel, İ. (2015). *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri* (Beşinci Baskı). NOBEL Yayıncılık
- Zaidi, L., Corrales, J. A., Bouzgarrou, B. C., Mezouar, Y. and Sabourin, L. (2017). Model-based strategy for grasping 3D deformable objects using a multi-fingered robotic hand. *Robotics and Autonomous Systems*, 95, 196-206.
- Zhang, T., Jiang, L. and Liu, H. (2018). Design and functional evaluation of a dexterous myoelectric hand prosthesis with biomimetic tactile sensor. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(7), 1391-1399.
- Zollo, L., Roccella, S., Guglielmelli, E., Carrozza, M. C. and Dario, P. (2007). Biomechatronic design and control of an anthropomorphic artificial hand for prosthetic and robotic applications. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 12(4), 418-429.
- Zsiros, P., Baranyi, P., Kovari, L. and Korondi, P. (2000). A generalised neural network for a humanoid hand. In ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No. 00TH8543) ,Vol. 2, pp. 523-528.



Bulanık Kontrolör Esaslı Haptik Robotik El Fuzzy Controller Based Haptic Robotic Hand

Aslıhan Karaca¹, Çağlar Conker²

¹Makine Mühendisliği Bölümü
İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay
aslihan.karaca1@gmail.com

²Mekatronik Mühendisliği Bölümü
İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay
caglar.conker@iste.edu.tr

Özetçe

Dokunsal bildirim insan-makine etkileşimine entegre edilmesiyle makinelerin kontrolünde hassasiyet ve verimlilik artmıştır. Bu doğrultuda insan-makine etkileşimlerinden biri olan robot ellerde dokunsal bildirim hassaslaştırılması, kullanıcı deneyimini (tutma, kavrama hissi) arttıracak ve kullanıcının sistemi daha hassas kontrol etmesini sağlayacaktır. Sunulan çalışmada 5 parmaklı robot elde dokunsal(haptik) geri bildirim hassas bir şekilde sağlanması için kuvvet geri bildirimini değerlendirilmesinde yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık önerilmiştir. Bulanık mantık doğrusal olmayan sistemlere ve karmaşık problemlere rahatlıkla uygulanabilmesi sebebiyle tercih edilmiştir. Robot elin nesnelere uyguladığı kuvvet, kuvvet sensörleri vasıtasıyla ölçülmektedir. Bu sensörlerden elde edilen veriler bulanık mantık kontrolör için kuvvet geri beslemesi olarak kullanılmaktadır. Kullanıcıya haptik geri bildirim sağlanması için ise titreşim motorları kullanılmıştır. Oluşturulan bulanık mantık kontrolör parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verilerini değerlendirerek, titreşim motoruna değerlendirme sonucu hesaplanan PWM sinyalini göndermektedir. Bu sayede kullanıcı nesneye uyguladığı kuvvete göre değişen titreşim miktarıyla nesneyi ne kadar sıkı tuttuğu herhangi bir hareket kısıtlaması olmadan hissedebilecektir.

Abstract

Integrating tactile feedback into human-machine interaction has increased sensitivity and efficiency in machine control. In this respect, sensitizing the tactile feedback in robot hands one of the human-machine interactions, will increase the user experience (holding, gripping feeling) and allow the user to control the system more precisely. In the presented study fuzzy logic one of the artificial intelligence techniques, was proposed in evaluating the force feedback to provides for 5-fingered robot hand provides precise haptic feedback. Fuzzy logic is preferred because it can be easily applied to nonlinear systems and complex problems. The force applied of robot

hand to objects is measured by force sensors. The data obtained from these sensors is used as force feedback for the fuzzy logic controller. Vibration motors are used to provide haptic feedback to the user. The generated fuzzy logic controller evaluates the force sensor data that is in the finger and palm. Then the vibration motor sends the calculated result which is PWM signal to the motor. In this way the user can feel how hold tight the object without motion restriction with the amount of vibration that varies according to the force applied to the object.

1. Giriş

Robot manipulatörlerin kontrolü sırasında kullanıcıya haptik geri bildirim sağlanması ile kullanıcının manipulatörleri kontrolü daha verimli bir şekilde sağlanmış ve kullanıcının kontrol sırasında yapmış olduğu hata payı azalmıştır [1]. Bu sebeple insanların en temel duyularından biri olan dokunma duyusunun, insan ve robotların etkileşimleri için kullanılmasına yönelik çalışmalar artmıştır. Haptik geri bildirim insanlara dokunsal geri bildirim sağlamayı amaçlayan çalışmalar kapsamaktadır [2]. Haptik geri bildirim cerrahiden, teleoperasyon sistemlerine kadar pek çok alanda kullanılmakta ve kullanıldığı alanlara yönelik, hassaslaştırma ve geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir. Manipulatör kontrollerinde kullanıcılar için yapılan bazı haptik bildirim sistemlerine bakılacak olursa: Turner ve arkadaşları 1998 yılında yaptıkları çalışma ile 2 parmaklı bir robot tutucunun kontrolü için cyberglove geliştirmiştir. Geliştirilen sistem tendon sürücülü dış iskelet yapısıdır. Dış iskeleti kullanıcının kullanabilmesi için ele giymesi gerekmektedir. Sistem: kuvvet geri beslemesi verileri ile kullanıcının parmak hareketlerini kısıtlayarak haptik geri bildirim sağlamaktadır [3]. 2000 yılında Shen ve ekibi yüksek kararlılıkta ve çözünürlükte olan elektro dokunsal eldiven geliştirmiştir. Uzaktan kontrol edilen robot elin dokunma geri bildirimini ile kullanıcıya dokunma hissi elektriksel sinyaller ile sağlanmaktadır [4]. 2006 yılında Song ve arkadaşları yaptıkları çalışmada phantom haptik cihaz kullanmışlardır. Bu cihazın kullanıcı tarafından kontrol edilebilen kalem benzeri yapısı mevcuttur. Kuvvet geri beslemesinden gelen sinyallere göre kalemin hareket kabiliyeti

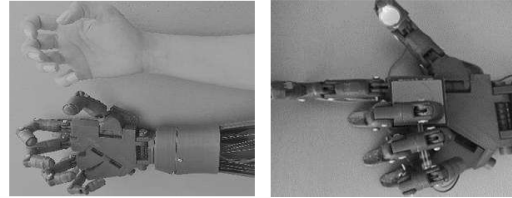
kısıtlanmaktadır. Bu sistemde de kullanım alanı kısıtlı olup kullanıcının sistemi bir eli ile kontrol etmesi gerekmektedir ancak bu şekilde his bildirimini sağlanmaktadır [5]. 2007 yılında Al-Ali ve ekip arkadaşları her parmağı tendon ve tendona bağlı motor ile sürülen haptik eldiven geliştirmişlerdir. Robot eldeki kuvvet sensöründen gelen sinyal ile motor akım değeri karşılaştırılarak hata sinyali elde edilmektedir. Bu hata sinyali ile haptik eldivende bulunan DC motora uygun PWM (darbe genişlik modülasyonu) sinyali gönderilerek tendonlar sürülmektedir. Geliştirilen bu haptik bildirim sisteminde kullanıcının sistemi eline takması gerekmekte olup, yalnızca ele takıldığında işe yaramaktadır buda kullanım alanını kısıtlamaktadır [6]. 2008 yılında Fan ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada alt ekstremite protezleri kullanılırken kullanıcının yürüyüş sırasında dengesini sağlayabilmesi için kullanıcının protezin konumunu ve yönünü belirleyebilmesinde pnömatik balon aktüatörü kullanılmıştır. Pnömatik balon aktüatörü kuvvet geri beslemesine göre doğrusal olarak çalışmaktadır [7]. 2009 yılında Mishima ve ekip arkadaşları 5 parmak ve 15 ekleme sahip haptik arayüz robotu tasarlamışlardır. Her ekleme bulunan DC servo motorlara iletilen PWM sinyalleri değişimi ile eklemlerde bulunan motorların torqu değişmekte ve kullanıcıya geri bildirim sağlamaktadır. Kullanıcının parmak uçları haptik ara yüze temas etmesi gerekmektedir [8]. 2013 yılında Antfolk ve arkadaşları çalışmalarında protez elin parmak uçlarına kuvvet sensörleri yerleştirmiş ve kuvvet sensörü verileri doğrudan titreşim motorlarına gönderilerek kullanıcıya dokunsal geri bildirim sağlamıştır [9]. 2013 yılında Fujimoto ve arkadaşları kuvvet geri bildirim ile kontrol edilen 5 parmağa giyilebilen haptik eldiven tasarlamıştır. Eldivende, tendon sürüclü bir mekanizma oluşturulmuş olup, kuvvete göre tendonları sıkıştırarak, parmaklarda hareket kısıtlılığı ile kullanıcıya his bildirimini sağlamaktadır. Haptik sisteminin kontrolü PD sistem ile sağlanmıştır [10]. 2017 yılında Lovasz ve çalışma arkadaşları haptik bildirim için dirsek dış iskelet modeli önermişlerdir. Dış iskelet modelinde dirsekte bulunan servo motorlar dirsek hareketini kısıtlamak için voltaj aşamaları ile dirseğe fren uygulayarak ve sistemde bulunan titreşim motoru kullanılarak kullanıcıya duysal geri bildirim vermektedir [11].

Mevcut sistemler incelendiğinde sistemlerin kontrolünde kullanıcı deneyimini arttırmaya yönelik kuvvet geri beslemesi ile kullanıcıya haptik geri bildirimini hassas kontrolünde eksiklik tespit edilmiştir. Ayrıca geliştirilen sistemlerin bir kısmı da kullanıcıya hareket kısıtlaması koymaktadır. Sunulan çalışmada haptik geri bildirim için titreşim motoru kullanılmış olup bu sayede kullanıcıya hareket kısıtlaması olmaksızın dokunsal geri bildirim sağlanması amaçlanmıştır. Haptik geri bildirimini hassaslaştırılması için sistemden gelen sensör verileri uygun bir şekilde işlenmeli ve uygun kontrol sinyali üretilmelidir. Sunulan çalışmada sezgisel uygulamalarda ve karmaşık sistemlerde iyi sonuçlar vermesi sebebiyle bulanık mantık kontrolör (bulanık mantık karar destek sistemi) önerilmiştir [12]. Sistem çok girdili bir yapıda olup, önerilen kontrol sistemi ile sistem üzerinde bulunan kuvvet sensörü verileri bulanık mantık kontrolör ile değerlendirilmekte ve uygun kontrol sinyali titreşim motoruna gönderilmektedir. Bulanık mantık kontrolör vasıtasıyla haptik geri bildirim

hassaslaştırılmıştır. Ayrıca her bir parmak için ayrı ayrı haptik geri bildirim yapabilen bir sistem geliştirilmiştir

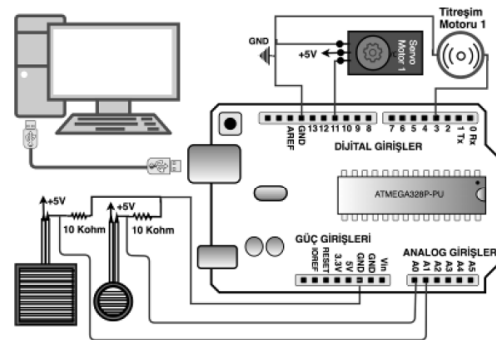
2. Robot El Ve Haptik Geri Bildirim Sisteminin Donanımsal Yapısı

Haptik geri bildirim sistemi 5 parmaklı robot el için oluşturulmuştur. Çalışmada Inmoov el kullanılmıştır [13]. Bu robot el 17 serbestlik derecesine sahiptir ve elde bulunan eklemler mafsallarla birbirine bağlanmış olup, parmakların tendonlarla sürülmektedir. İnsan eli boyutuna ve yapısına benzer yapıda ve boyutta olan robot elin parmaklarının hareketi servo motorlar ile sağlanmaktadır. Nesnelere kavranma kuvvetinin ölçülebilmesi için robot elin parmak uçlarına ve avuç içine kuvvet sensörü yerleştirilmiştir. İnsan eli ile robot el Şekil 1a'da ve robot ele kuvvet sensörlerinin yerleştirilmiş hali Şekil 1b'de sunulmaktadır.



Şekil 1: a) Robot el ve insan eli. b) Sensörler ile robot el.

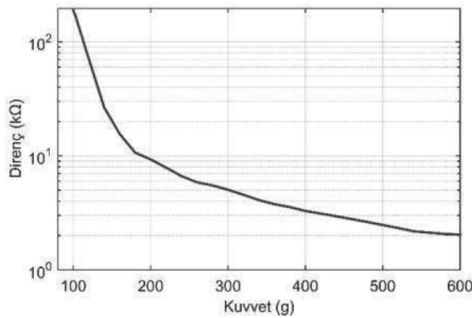
Her bir parmağın haptik geri bildirim sistemi için birer adet titreşim motoru kullanılmıştır. Her parmak için avuç içinde ve parmakta bulunan kuvvet sensörlerinden gelen verilerle bulanık mantık kontrolör titreşim motoruna uygun PWM sinyalini hesaplayarak göndermektedir. Bu sayede her bir parmak için ayrı ayrı haptik geri bildirim yapabilen bir sistem geliştirilmiştir. Kuvvet sensörü verilerinin okunması, parmakların hareketi için servo motorun konum kontrolü, titreşim motorlarına uygun PWM sinyalinin gönderilmesi mikrodenetleyici ile sağlanmaktadır. Robot elin 1 parmağının haptik geri bildirim sisteminin elektronik donanım yapısı Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2: Mikrodenetleyici tabanlı haptik geri bildirim sisteminin elektronik donanım yapısı.

2.1. Kuvvet Sensörü

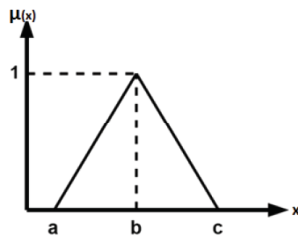
FSR (kuvvete duyarlı direnç) kuvvet sensörü; aktif yüzeyine uygulanan kuvvetin artması ile dirençte azalma gösteren polimer kalın film elektronik bileşendir. Sistemde kullanılan kuvvet sensörü üzerine 600 grama kadar ağırlık konularak kuvvet-direnç değişimi test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3'de sunulmaktadır. Şekil 3'de: kuvvet sensörü üzerine kuvvet uygulanmaya başladığında önce direnç değişiminin çok yüksek olduğu, uygulanan kuvvet arttıkça direnç değişiminin azalarak direncinin düştüğü görülmektedir. Şekil 3'de direnç değişimi logaritmik olarak kuvvet değişimi lineer olarak verilmiştir.



Şekil 3: Kuvvet sensörünün kuvvet-direnç değişimi.

3. Haptik Geri Bildirimin Kontrolör Yapısı

Robot elin nesneye uyguladığı kuvveti kullanıcıya haptik geri bildirim yapılabilmesi için titreşim motoru kullanılmıştır. Robot elin nesneyi kavrarken uyguladığı kuvvet, kuvvet sensörleri vasıtasıyla ölçülmekte ve bulanık karar destek sistemi bu kuvvet verilerini değerlendirerek titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyaline karar vermektedir. Bulanık karar destek sisteminde sözel verilerin kolaylıkla modellenilebilmesi sebebiyle Mamdani bulanık çıkarım sistemi (FIS) tanımlanmıştır. Girdi ve çıktılar üzerinde hesaplama basitliği sebebiyle bulanık küme olarak üçgen üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Üçgen üyelik fonksiyonu Şekil 4'de sunulmakta ve Denklem 1'de matematiksel olarak ifade edilmektedir [14].



Şekil 4: Üçgen üyelik fonksiyonu.

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} a < x < b \rightarrow \frac{(x-a)}{(b-a)} \\ b < x < c \rightarrow \frac{(c-x)}{(c-b)} \\ x < a \text{ veya } x > c \rightarrow 0 \end{cases} \quad (1)$$

Yukarıda (1) denkleminde μ_A üyelik derecesi, **a** başlangıç sınır değeri, **c** bitiş sınır değeri ve **b** en çok üyelik derecesine sahip olunan noktadır.

Her bir parmak için parmakta bulunan kuvvet sensörü ve avuçta bulunan kuvvet sensörü verisi bulanık karar destek sistemi ile değerlendirilerek haptik geri bildirim şiddetine karar verilmektedir. Kuvvet sensörü verileri için az, az-orta, orta, çok-orta, çok olmak üzere 5 üyelik kümesi tanımlanmıştır. Titreşim miktarı çıktısı için ise: çok-az, az, orta, az-orta, orta, çok-orta, çok ve çok-fazla olmak üzere 7 üyelik kümesi oluşturulmuştur. Ve 25 dilsel kural tanımlaması yapılmıştır. Belirlenen kurallar doğrultusunda oluşturulan kural tablosu Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1: Haptik geri bildirim kural tablosu

Parmakta bulunan kuvvet sensörü						
Avuç içinde bulunan kuvvet sensörü		Az	Az-Orta	Orta	Çok-Orta	Çok
	Az	Cok-Az	Cok-Az	Az	Az-Orta	Orta
	Az-Orta	Cok-Az	Az	Az-Orta	Orta	Çok-Orta
	Orta	Az	Az-Orta	Orta	Çok-Orta	Çok
	Çok-Orta	Az-Orta	Orta	Çok-Orta	Çok	Çok-Fazla
	Çok	Orta	Çok-Orta	Çok	Çok-Fazla	Çok-Fazla

Kuvvet sensörü üzerine 0-600 g aralığında ağırlık konularak dijital değerler elde edilmiş ve bulanık mantık üyelik kümeleri oluşturulurken elde edilen dijital değerler kullanılmıştır. Üyelik kümelerinin; dijital değerler ile tanımlanan parametreleri ve bu değerlere karşılık gelen ağırlık değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Parmaktaki FSR sensörü ile avuç içindeki FSR sensörünün üyelik kümelerinin parametreleri aynı şekilde tanımlanmış olup tek bir tabloda, Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2: Bulanık mantık girdi üyelik kümelerinin parametreleri

Parmaktaki ve Avuç İçindeki FSR'nin Girdi Üyelik Küme İsimleri	Okunan Dijital Değerlere Karşılık Gelen Kuvvet (g)	Okunan Dijital Değere Göre Üyelik Kümesi Parametreleri [0-1023]
Az	[0 0 150]	[0 0 360]
Az-Orta	[0 150 300]	[0 360 680]
Orta	[150 300 450]	[360 680 795]
Çok-Orta	[300 450 600]	[680 795 850]
Çok	[450 600 600]	[795 850 850]

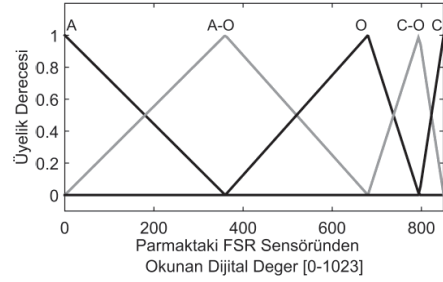
Titreşim motoruna PWM sinyali 0-27 arasında gönderildiğinde yetersiz güç sebebiyle çalışmamaktadır. Ancak titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali 27'yi geçtiğinde titreşim motoru çalışmaya başlamaktadır. Bu sebeple çıktı üyelik kümelerinde ilk üyelik fonksiyonu dik yamuk şeklinde belirlenmiştir [15]. Bu üyelik fonksiyonunda en çok üyelik derecesine sahip olunan noktalar 0 ve 27 olarak tanımlanmıştır. Çıktı üyelik kümelerinin parametreleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3: Bulanık mantık çıktı üyelik kümelerinin isimleri ve parametreleri

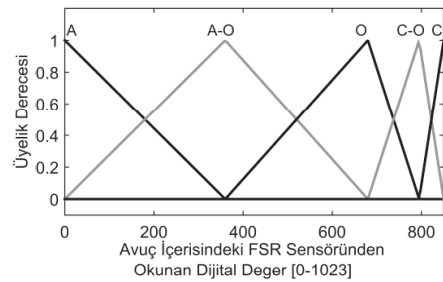
Çıktı Üyelik Küme İsimleri	Çıktı Üyelik Kümesi Parametreleri [0-255]
Cok-Az	[0 0 27 65]
Az	[27 65 103]
Az-Orta	[65 103 141]
Orta	[103 141 179]
Cok-Orta	[141 179 217]
Cok	[179 217 255]
Cok-Fazla	[217 255 255]

Sisteme 2 girdi (FSR sensör verileri) ve 1 çıktı (titreşim motoru için PWM sinyali) tanımlanmıştır. Şekil 5'de parmaktaki FSR sensörü için oluşturulan girdi üyelik kümeleri, Şekil 6'da avuç içindeki FSR sensörünün girdi üyelik kümeleri, Şekil 7'de titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalinin çıktı üyelik kümeleri sunulmuştur. Şekil 8'de ise girdiler ile çıktının ilişkisini gösteren bulanık mantık yüzey grafiği verilmiştir. Üyelik kümelerinde C-A: çok-az, A: az, A-O: az-orta, O: orta, C-O: çok-orta, C: çok, C-F: çok-fazla anlamına gelmektedir. Sensör verilerinin bulunduğu üyelik kümelerinin sınırları belirlenirken sensörden okunan dijital değere karşılık gelen kuvvet miktarı dikkate alınmıştır. Arduino 10 bitlik analog/dijital dönüştürücüye sahip olduğu için sensörlerden 0-1023 aralığında değer elde edilebilmektedir. Sensörler 0-600 g aralığında test edilerek 0-850 arasında sayısal değerler elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler ile girdi üyelik kümeleri tanımlanmıştır. Girdi üyelik kümeleri oluşturulurken kuvvete göre, üçgen üyelik kümelerinin parametreleri tanımlanırken kuvvet değerlerine karşılık gelen dijital değerler kullanılmıştır. Girdi üyelik kümesi parametreleri ve bu parametrelere karşılık gelen kuvvet değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.

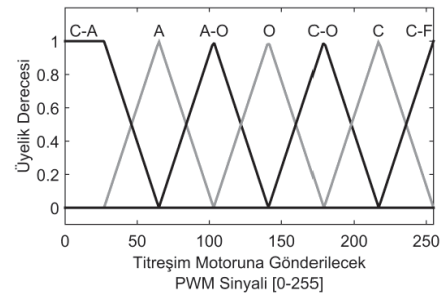
Kuvvet sensörüne kuvvet uygulandığında direnç değişimi başlangıçta çok yüksek olup, kuvvet miktan arttıkça direnç değişim miktan azalarak direnç düşmektedir. Kuvvet sensörünün direnç değişiminin lineer olmaması sebebiyle mikro denetleyici tarafından kuvvet sensörlerinden elde edilen dijital değerlerde lineer bir değişim göstermemektedir. Girdi üyelik kümelerinin parametreleri tanımlanırken kuvvet değerlerine karşılık gelen dijital değerlerin kullanılması sebebiyle üyelik kümelerinin parametreleri farklı aralıklara sahiptir. Bulanık karar destek sisteminde doğrudan sensör verisinin kullanımıyla ek bir hesaplama işlemine gerek kalmamıştır.



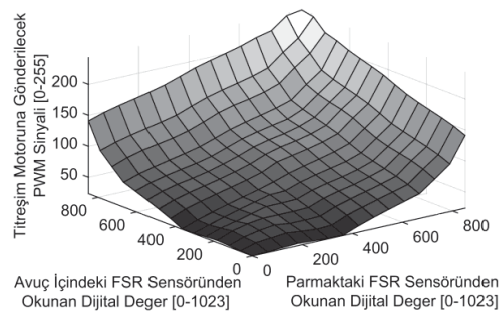
Şekil 5: Parmaktaki FSR sensörü girdi üyelik kümeleri.



Şekil 6: Avuç içindeki FSR sensörü girdi üyelik kümeleri.



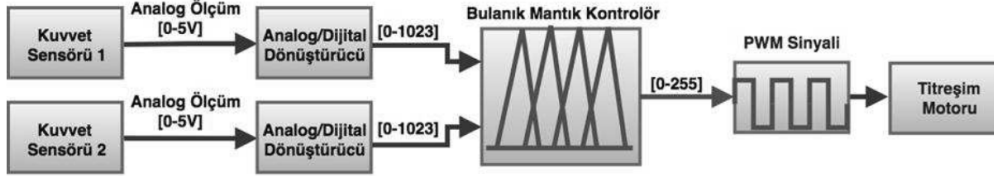
Şekil 7: Titreşim motoru için oluşturulan çıktı üyelik kümeleri.



Şekil 8: Bulanık mantık yüzey grafiği.

Her bir parmak için parmakta ve avuç içerisinde bulunan kuvvet sensörü verileri bulanık mantık kontrolöre girmektedir. Bulanık mantık kontrolör kuvvet sensörü verilerini

değerlendirilmekte ve titreşim motorunun titreşim miktarına karar vermektedir. Robot elin 1 parmağının haptik geri bildirim kontrol sistemi Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9: Robot elin 1 parmağının haptik geri bildirim için oluşturulan sistem.

4. Deneyle ve Tartışma

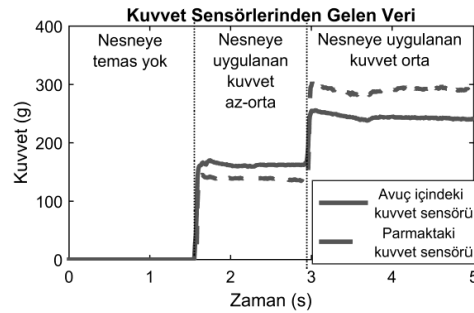
Kuvvet sensörlerine rastgele kuvvet uygulanmış ve çalışma frekansı 200 Hz olan titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalleri bulanık mantık kontrolör tarafından hesaplanmıştır. Uygulanan kuvvet değerleri, kuvvet değerlerine karşılık gelen mikrodenetleyici tarafından elde edilen dijital değerler ve PWM sinyalleri Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4: Kuvvet sensörü verileri ve verilere göre bulanık mantık kontrolör tarafından hesaplanan PWM sinyalleri

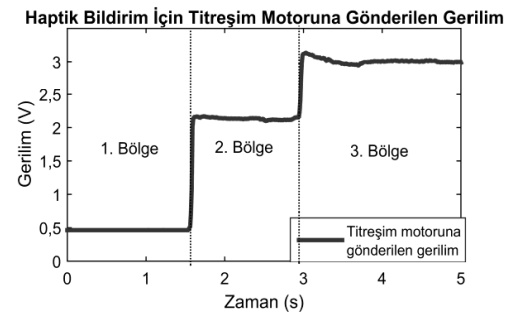
Parmakta bulunan FSR	Dijital değer	800	
	Kuvvet değeri (g)	460	
Avuç içinde bulunan FSR	Dijital değer	848	
	Kuvvet değeri (g)	580	
Parmakta bulunan FSR	Dijital değer	755	
	Kuvvet değeri (g)	380	
Avuç içinde bulunan FSR	Dijital değer	780	
	Kuvvet değeri (g)	420	
Parmakta bulunan FSR	Dijital değer	280	
	Kuvvet değeri (g)	140	
Avuç içinde bulunan FSR	Dijital değer	770	
	Kuvvet değeri (g)	400	

Sistem çok girdili ve lineer olmayan bir yapıya sahiptir. Bu sebeple gelen verilerin değerlendirilmesinde bulanık mantık kontrolör geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Kuvvet

sensörü verilerine göre bulanık mantık kontrolör PWM sinyali üretmektedir. PWM sinyali ile 1 periyotta sisteme belirli aralıklarla 5 volt ve 0 volt gönderilerek ortalama gerilim miktarı ayarlanmaktadır. 1 periyotta 5v gönderilme aralığı duty cycle (görev döngüsü) olarak adlandırılmaktadır. Görev döngüsünün değişmesiyle ortalama gerilim miktarı değişmektedir. Bu sayede titreşim motorunun titreşim şiddeti kontrol edilmektedir. Tablo 4'de görüldüğü üzere kuvvet miktarı arttıkça görev döngüsünün doluluk yüzdesi artmakta, kuvvet azaldıkça görev döngüsünün doluluk yüzdesi azalmaktadır. Bu doğrultuda kuvvet miktarı arttıkça titreşim motorunun titreşim şiddeti artmaktadır.



Şekil 10: Kuvvet sensörlerinden gelen veri



Şekil 11: Kuvvet sensörlerinden gelen veriye göre titreşim motoruna gönderilen ortalama gerilim miktarı

Robot ele az-orta kuvvet ve orta kuvvetle bir nesne kavraması için komut gönderilmiştir. Ve nesnenin kavranması sırasında bulanık mantık kontrolör tarafından titreşim motoruna gönderilecek ortalama gerilim miktarı

hesaplanmıştır. Nesne kavranırken, nesneye uygulanan kuvvet Şekil 10'da verilmiştir. Kuvvete göre bulanık mantık kontrolör tarafından hesaplanarak, titreşim motoruna gönderilen ortalama gerilim miktarı ise Şekil 11'de sunulmuştur. Nesneye temas olmaması durumunda titreşim motoru titreşim üretmemektedir. Nesneye temas anından sonra ise: nesneye az-orta kuvvet uygulandığında Şekil 11'de 2. bölgedeki ortalama gerilim titreşim motoruna gönderilmiştir; nesneye orta kuvvet uygulandığında ise Şekil 11'de 3. bölgede görülen ortalama gerilim titreşim motoruna gönderilmiştir. Şekil 10 ve Şekil 11'de görüldüğü gibi nesneye uygulanan kuvvet arttıkça titreşim motoruna gönderilen gerilim miktarı artmaktadır. Bu doğrultuda titreşim motorunun ürettiği titreşim şiddetinde artmaktadır. Kullanıcı, robot elin nesnelere uyguladığı kuvveti değişen titreşim şiddeti ile hissedebilecektir.

5. Sonuçlar

Kullanıcının robot eli daha hassas kontrol edebilmesi için: robot elin nesnelere sıkma kuvvetinin kullanıcıya geri bildirim yapılmalıdır. Sunulan çalışmada 5 parmaklı tendonlarla sürülen bir robot elin, kullanıcıya kuvvet geri bildirimini sağlanması için haptik geri bildirim kontrol sistemi tasarlanmıştır. Haptik geribildirim sağlanmasında titreşim motorları kullanılmıştır. Titreşim motoru kullanımıyla kullanıcı hareketlerinde herhangi bir kısıtlama olmaksızın dokunsal geri bildirim sağlanması amaçlanmıştır. Robot elin nesnelere uyguladığı kuvvet ise, ele yerleştirilen kuvvet sensörleriyle ölçülmektedir.

Daha önce yapılan çalışmalarda: oluşturulan sistemlerin kontrolünde kullanıcı deneyimini arttırmaya yönelik kuvvet geri beslemesinin değerlendirilmesi ile kullanıcıya haptik geri bildirim hassas kontrolünde eksiklik tespit edilmiştir. Haptik geri bildirim hassas bir şekilde sağlanması için; lineer olmayan kuvvet sensörü verilerinin uygun bir şekilde değerlendirilmesi ve değerlendirme sonucu elde edilen uygun kontrol sinyalinin titreşim motorlarına iletilmesi gerekmektedir. Sunulan çalışmada sensör verilerinin değerlendirilmesi için, doğrusal olmayan ve çok girdili sistemlerde iyi sonuçlar vermesi sebebiyle bulanık mantık kullanılarak kontrol sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan kontrol sistemi tek bir sensör verisini değil, hem parmakta hemde avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verilerini değerlendirmektedir. Bu değerlendirme ile titreşim motoruna gönderilecek uygun PWM sinyali hesaplanmaktadır. Kullanıcı nesneye uyguladığı kuvvete göre değişen titreşim miktarıyla, robot elin kavrama kuvvetini hissedebilecektir. Oluşturulan kontrol sistemi lineer olmayan sensör verilerini değerlendirmiş ve değerlendirme sonucunda elde edilen uygun kontrol sinyali titreşim motorlarına gönderilerek haptik geri bildirim sistemi hassaslaştırılmıştır. Sistemin hassaslaştırılmasıyla kullanıcı deneyiminin (tutma, kavrama hissi) artırılması sağlanacaktır. Ayrıca oluşturulan bulanık mantık kontrol yapısında üçgen üyelik kümesi kullanılmasıyla girdi ve çıktılar üzerinde hesaplama basitliğine sahip ve yeniden yapılandırılabilir değerlerle farklı alanlarda da kullanılacak bir kontrol sistemi oluşturulmuştur.

Kaynakça

[1] R. J. Stone, Haptic feedback: A brief history from telepresence to virtual reality. In Haptic Human-Computer Interaction, Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.

[2] M. I. Tiwana, S. J. Redmond and N. H. Lovell, "A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering", *Sensors and Actuators A: physical*, vol. 179, 17-31.2012.

[3] M. Turner, D. Gomez, M. Tremblay and M. Cutkosky "Preliminary tests of an arm-grounded haptic feedback device in telemanipulation", In Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division, Vol. 64, pp. 145-149, November 1998.

[4] Y. Shen, Y. Liu, L. Kejie, "Haptic Tactile Feedback in Teleoperation of a Multifingered Robot Hand", Proc. Third World Congress Intelligent Control and Automation, vol. 1, pp. 85-90, 2000

[5] G. Song, S. Guo, Q. Wang, "A Tele-operation system based on haptic feedback", IEEE International Conference on Information Acquisition, pp. 1127-1131, 2006.

[6] A. Al-Ali, M. Jarrah and R. Dhaouadi, "Microcontroller-operated anthropomorphic manipulator with haptic feedback", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 23, no. 1, pp. 63-70, 2007.

[7] R. E. Fan, M. O. Culjat, C. King, M. L. Franco, R. Boryk, J. Bisley, E. Dutton, W. S. Grundfest, "A haptic feedback system for lower-limb prostheses", *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 270-277, Jun. 2008.

[8] M. Mishima, H. Kawasaki, T. Mouri, T. Endo, "Haptic teleoperation of humanoid robot hand using three-dimensional force feedback," *Proceedings of IFAC SYROCO 2009*, Gifu, Japan, September, pp. 565-570, 2009.

[9] C. Antfolk, M. D'Alonzo, M. Controzzi, G. Lundborg, B. Rosen, F. Sebelius, C. Cipriani, "Artificial Redirection of Sensation from Prosthetic Fingers to the Phantom Hand Map on Transradial Amputees: Vibrotactile versus Mechanotactile Sensory Feedback", *IEEE Trans. Neural Systems and Rehabilitation Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 112-120, Jan. 2013.

[10] K. Fujimato, F. Kobayashi, H. Nakamoto and F. Kojima, "Development of haptic device for five-fingered robot hand teleoperation", In: *System Integration (SII)*, 2013 IEEE/SICE International Symposium on. IEEE, 820-825, (2013).

[11] E. C. Lovasz, D. T. Mărgineanu, V. Ciupe, I. Maniu, C. M. Gruescu, E. S. Zăbavă, S.D. Stan, "Design and control solutions for haptic elbow exoskeleton module used in space telerobotics", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 107, pp. 384-398, 2017.

[12] C. Kubat, MATLAB: Yapay Zeka ve Mühendislik Uygulamaları, Pusula yayınları, ISBN, 978-605, 2014.

[13] G. Langevin "Inmoov Open Source 3D printed life-size robot", inmoov.fr, 2012. [Online]. Available: <http://inmoov.fr/>, [Accessed: 13- Jun- 2017].

[14] A. Kaufmann, M. M. Gupta, *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, New York: Elsevier, 1988.

[15] A. Yılmaz, YAPAY ZEKA, KODLAB Yayın Dağıtım Yazılım ve Eğitim Hizmetleri San. Ve Tic. Ltd. Şti, ISBN, 978-605-9118-80-4, 2017



Bulanık Mantık Esaslı Karar Destek Sistemi ile Robot Elin Kuvvet Kontrolü

Fuzzy Logic Based Decision Support System for Force Control of Robot Hand

Çağlar Conker^{1*}, Aslıhan Karaca²

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Hatay

² İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: caglar.conker@iste.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 23.10.2018

DOI:10.21205/deufmd.2019216210

Kabul Tarihi / Accepted: 22.01.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

Atıf şekli/ How to cite: CONKER, Ç., KARACA, A. (2019). Bulanık Mantık Esaslı Karar Destek Sistemi ile Robot Elin Kuvvet Kontrolü. DEUFMD, 21(62), 433-447.

Öz

Son yıllarda gelişen teknoloji ile robotlar üzerine yapılan çalışmaların ciddi oranda arttığı gözlenmektedir. Robotik sistemlerde robot el konusu, farklı ihtiyaçlar doğrultusunda farklı kullanım alanlarına yönelik olarak gelişmeye en açık çalışma alanlarından birisidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, robot el uygulamalarında karşılaşılan en büyük sorunun nesnelere kavrama kuvvetinin kontrolü olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple robot elin nesnelere zarar vermeden kavrama işlemini gerçekleştirebilmesi için kavrama kuvvetinin kontrol sorunu çözümlenmelidir. Sunulan çalışmada nesnelere uygulanan kuvvetin kontrol probleminin çözümü için yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık önerilmiştir. Önerilen yöntemde, robot el kavrama kuvvetini kullanıcının gönderdiği sinyal doğrultusunda belirlemektedir. Sistemin avuç içerisinde ve parmaklarının iç kısımlarında bulunan sensörler vasıtasıyla nesnelere uygulanan kuvvet ölçülmekte ve bu sensör ölçümleri kuvvet geri beslemesi olarak kullanılmaktadır. Ölçülen sensör verileri ve kullanıcı sinyali bulanık mantık kontrolör(karar destek sistemi) ile denetlenerek nesnenin kontrol sistemi tarafından belirlenen kuvvette stabil bir şekilde kavranması sağlanmaktadır. Geliştirilen kontrol yapısı oluşturulan sistemde uygulanmış ve kullanıcıdan gönderilen komut doğrultusunda hassas ve kararlı kavrama yapabildiği sunulan çalışma ile gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık, Karar destek sistemi, Robot el, Akıllı sistem, Robotik sistemler

Abstract

In recent years, it is observed that the studies on robotic systems have increased tremendously. In the field of robotic systems, the robotic hand based research is one of the most popular fields due to wide range of application areas. It can be observed from a literature review of robot hand applications is that one of the main research topic in the area is on control of gripping force of the objects. Hence, the force feedback problem appears to be a challenge to be overcome where the objective is to perform the grasping operation without damaging the objects being hold. In this study, Fuzzy Logic based artificial intelligence techniques has been proposed as a solution of the problem of force control problem mentioned. In proposed method, the robot hand determines the grip force by the direction of the signal sent by the user. The force applied to the objects is measured by the sensors. These sensor measurements are then used as force feedback. The

measured sensor data and the user input signals are controlled by a fuzzy logic control system (decision support system) to ensure that the object is grasped in a stable manner. The developed control structure is implemented and it proven that the user is able to grasp sensitively and decisively by the direction of the control command sent by the user.

Keywords: Fuzzy logic, Decision support system, Robot hand, Smart systems, Robotic systems


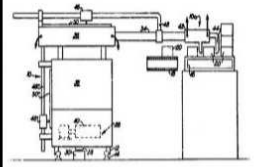



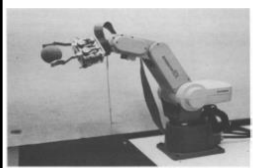
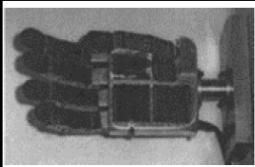
1. Giriş

Günümüzde robotik sistemlerin kullanımıyla birlikte, üretimde oluşabilecek insan hata payı ve kaza oranının düşürülmesi sağlanmaktadır. Endüstriyel yapıdaki robotların geliştirilmesinde, insansı robotlar üzerine yoğunlaşılmasını takiben üretimde: kalite, verimlilik ve robotların kontrol hassasiyeti her geçen gün artmaktadır. Bu doğrultuda robot manipülatörlerin insan eli yapısına olan benzerliklerinin arttığı ve bu konu üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı gözlemlenmektedir[1]. Yapılan çalışmalar, elektronik/mekanik tasarımların iyileştirilmesini, hassas hareket ve kuvvet kontrollerinin yapılmasını veya mevcut yapıların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Robot manipülatörler; üretimden araştırmaya, askeri alandan protez olarak kullanıma kadar çok geniş kullanım alanına sahiptir [1]. Bu nedenle farklı ihtiyaçlar doğrultusunda farklı kullanım alanlarına yönelik gelişmeye en açık çalışma konularından birisidir. Robot manipülatörler üzerine geçmişten bugüne birçok çalışma yapılmış ve araştırma, geliştirme çalışmaları artarak devam etmiştir. İncelenen ve önemli olduğu düşünülen çalışmaların bir kısmı kronolojik sırayla Tablo 1’de sunulmaktadır.

Manipülatörlerin nesneye uyguladıkları kuvvetin hassas kontrol edilememesi sebebiyle kavranan nesnenin zarar görmesi, çözülmesi gereken önemli bir problemdir. Tablo 1’e bakıldığında robot ellerde kuvvet kontrolüne ve nesnelerin en uygun biçimde kavranmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Ayrıca robot ellerin kontrolünün hassaslaştırılmasına yönelik çalışmalara devam edilmektedir. Robot manipülatörler çok girdili ve çok çıktılı yapıya sahip sistemlerdir. Bu tip sistemlerin doğrusal bir modeli oluşturularak kontrol edilmesi oldukça güçtür[2,3]. Robot manipülatörlerden biri olan robot el ile nesnelere dokunmak, tutmak, nesnelerin deforme olmasını gözardı ederek kavrama işlemini gerçekleştirmek ve bu hareket formları oluşturulurken kuvvet sensörlerinden alınan geri bildirimler de kullanılarak hareket profillerinin oluşturulması

ya da matematiksel modellemeler kullanılarak bu çok girdili sistemlerin kontrolü oldukça karmaşık bir konudur[3,4,5]. Tabloda bulunan literatür çalışmaları incelendiğinde; robot ellerin nesnelere kavraması sırasında hareket ve nesnelere uyguladıkları kuvvetin kontrolü; matematiksel çözümlerinin yanı sıra, PID, PD, PI, makine öğrenmesi, empedans kontrol gibi kontrol yöntemleri kullanılarak veya farklı kontrol algoritmalarıyla sağlanmıştır. Robot el için doğrusal model oluşturmanın güç olması sebebiyle mevcut olan sistemlerdeki kuvvet geri besleme sorununa yönelik önerilen çözüm yolları karmaşık ve kontrol stratejisinin geliştirilmesi zordur[2,6]. Sunulan çalışmada, kuvvet geri besleme sorununun olabildiğince basit ve hassas bir şekilde çözüme kavuşturulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda sunulan çalışmada kuvvet kontrolünde matematiksel ifadeleri, dilsel ifadelerle temsil etmesi ve sezgisel uygulamalarda iyi sonuçlar vermesi sebebiyle yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık kullanılarak, bulanık mantık temelli bir kontrolcü geliştirilmiştir. Bulanık mantık kontrol sisteminin robot eli kontrolü sırasında değerlendirmede kullanacağı referans değer kullanıcı tarafından bir potansiyometre aracılığıyla gönderilmektedir. Bu sayede geliştirilen kontrol sistemi ile kullanıcı temelli hassas kuvvet kontrolü yapılabilmektedir. Kontrol sistemi robot elde test edilmiş ve kullanıcının istediği kavrama kuvvetinin kontrolü sağlanmıştır. Robot elin her bir parmağı, kullanıcı tarafından gönderilen tek bir kontrol sinyaline göre nesneye uyguladığı kuvveti birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol etmektedir. Bu sayede robot elin parmakları kavranan nesnenin şekline göre adaptif bir şekilde hareket edebilmektedir. Sağlanan kuvvet ve hareket kontrolü vasıtasıyla robot elde oluşabilecek kontrol yetersizliği sonucu nesnelerin zarar görmesi önenebilecektir. Geliştirilen kontrol sistemi karmaşıklıkta uzak, geniş uygulama alanına ve hassas sonuçlar verebilen bir yapıya sahiptir.

Tablo 1. Literatür tablosu

	Çalışmanın içeriği	Çalışmanın görseli	Mekanik özellikleri
1949 Argonne Milli Laboratuvar [7]	Yapılan çalışma ile laboratuvar ortamında radyoaktif malzemeleri işlemek için mekanik manipülatör geliştirilmiştir. İlk uzaktan kontrollü robotik el, efendi-köle tipindedir. Efendi manipülatöre kullanıcı tarafından bir dizi hareket verilmekte, köle olan manipülatör ise bu hareketleri mümkün olduğu kadar hızlı takip etmektedir.		Çubuk mekanizmaları ile, yarı universal eklemler ve pençe benzeri el yardımıyla kavrama sağlanmaktadır.
1954 G.Devol [8]	Geliştirilen cihaz; bir dizi hareket adımlarından oluşan işlemleri (belirli bir konumda bulunan bir nesneyi kavrayıp, belirlenen başka konuma bırakmak gibi) program içerisindeki komutlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu cihaz; tarihte geliştirilen ilk programlanabilir elektromekanik manipülatör olarak kabul edilmektedir.		-
1959 G.Devol ve J.F. Engelberger[9]	Bu çalışmada bir manipülatörün, bilgisayar ile uyumlu çalışması sağlanmıştır. Bunun sonucunda birçok farklı görev otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile ilk endüstriyel robotlara öncülük edilmiştir.		-
1978 S.Hirose ve Y.Umetani [10]	Mekanik yapısı sayesinde nesneyi şekline göre adaptif şekilde kavrayabilen yumuşak tutucu geliştirilmiştir. Bir motor ile kontrol edilen bu prototip bağlantı kasnakları vasıtasıyla kuvvetleri dağıtmaktadır. Üniform basınç ile her şekildeki nesneyi tutabilmektedir.		Her bir mafsallı bir serbestlik derecesine sahip sistemin bağlantı kasnakları ile güç iletimi sağlanmaktadır.
1990 G.Bekey ve arkadaşları [11]	Yapılan çalışmada; kavramadan önce hedef nesnenin konumu, yönü ve geometrisi görüş sisteminden alınan veriler ile birleştirilmektedir. Kontrol algoritması; görev bilgisi ile istenilen kavrama modunu üretir ve hedef kuvvete gelinceye kadar parmaklar kapatılır. Bu sayede insan eline benzer adaptif kavrama sağlanmaktadır.		5 parmaklı belgrade el, dört motorlu bir tutucudur. Her parmak çifti 1 serbestlik derecesine ve başparmağı 2 serbestlik derecesine sahiptir.
1992 J.Yan ve arkadaşları [12]	Bu çalışma da sensörlerden gelen veriler geri beslemede kullanılarak robot kol ve elin; pozisyon ve kuvvet uyum kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrol sistemiyle; robot kolun kinematik denklemleri ile kolun pozisyon uyum planlaması ve elin kuvvet uyum planlaması sağlanmıştır.		2 serbestlik derecesine sahip 2 parmaklı tutucu tasarlanmıştır.
1998 Y.Lin ve arkadaşları[13]	Tasarlanan 17 serbestlik derecesine sahip elin her bir eklemi ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Uygulanan algoritma ile simülasyonda çokgen ve silindirik şeklindeki nesnelerin en uygun pozisyon için temas noktaları seçilmesi sağlanmıştır.		5 parmaklı elin başparmak ve işaret parmağı 4'er, diğer parmakları 3'er serbestlik derecesine sahiptir.

DEU FMD 21(62), 433-447, 2019

2000 N. Fukaya ve arkadaşları [14]	Yapılan çalışmada geliştirilen elin bütün parmakları aynı kuvveti uygulayabilmekte ve 6 temel tutma işlevini yerine getirebilmektedir. Tasarımın kavrama deneyleri sonucunda insan elinin kavrama biçimlerinden çok küçük sapmalar gözlemlenmiştir.		Tasarlanan el; 5 parmaklı ve 20 serbestlik derecesine sahiptir. Elde hareket iletimi tendonlarla sağlanmaktadır.
2001 J. Butterfaß ve arkadaşları [15]	Manipülâtör harici bir bilgisayar ile seri haberleşme yaparak kontrol edilmektedir. Sensörlerden gelen veriler ve bilgisayardan gelen veriler doğrultusunda kavrama sağlayabilmektedir. Parmakların kartezyen empedans kontrolü yapılmıştır. Empedans kontrolünde hatayı düşürmek için PI kontrol uygulanmıştır.		13 serbestlik derecesine sahip 4 parmaklı robotik elin, hareket iletimi eklemlerde bulunan dişliler ile sağlanmaktadır.
2002 H. Kawasaki ve arkadaşları [16]	Manipülâtör bilgisayar tabanlı robot el kumandası ile kontrol edilmiştir. Eklem, bağlantı pozisyonu ve temas kuvveti ile hibrit bir kontrol sistemi sağlanmıştır. Temas olmadığı durumda PID kontrol eklem pozisyon kontrolüne uygulanmış ve temas durumunda pozisyon ve kuvvetin hibrit kontrolü gerçekleştirilmiştir.		Tasarlanan elin toplam 20 eklemi ve 16 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Güç iletimi dişliler ile sağlanmaktadır.
2004 J.L. Pons ve arkadaşları [17]	Yapılan çalışma ile kullanıcı; parmak hareketlerini EMG sensörü ile kontrol etmektedir. PID kontrolle konum ve kuvvet sensörlerinden gelen verileri işleyip parmağın uyguladığı tork ayarlanmaktadır. Başparmakta bulunan genova mekanizması ile 2 eksenli mafsallın hareketlerinin yönlendirilmesi bir motorla yapılmaktadır. Ayrıca önerilen empedans kontrol yaklaşımı, parmakların sanal yaylar gibi hareket etmesini sağlamaktadır.		10 serbestlik derecesine sahip 5 parmaklı el tasarımı yapılmıştır. Başparmakta genova mekanizması kullanılmıştır. 4. ve 5. Parmaklar manuel olarak bükülebilmektedir.
2007 L.Zollo ve arkadaşları [18]	Parmakların eklem açısı, tendon gerginliği ve motor hareketi PD kontrolcü ile sağlanmıştır. Yapay elin mekanik tasarımını, el kontrol sisteminin tasarımı ile uyumlu hale getirmek ve insan elinin kinematik ve dinamik yapısına benzer el tasarımı yapılabilmesi için biyomekatronik yaklaşımla elin tasarımının ve kontrol sisteminin optimizasyonu üzerinde durulmuştur.		3 parmaklı elin, baş parmağı 4 diğer parmakları 3 serbestlik derecesine sahiptir. Parmaklardaki bütün eklemler mafsallar ile birbirine bağlıdır.
2007 H.Liu ve arkadaşları [19]	Çalışmada 5 aşamalı modüller kontrol sistemi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Kontrol sistemi; düşük seviyeli kontrol aşaması, parmakdaki dataların işlemesi, eldeki dataların işlemesi, yüksek seviyeli kontrol ve dış kumanda aşamasından oluşmaktadır. Sistem test edildiğinde kendi kendine kavramada ve tele-operasyon denemelerinde kontrol mimarisi elin kontrolünde başarı göstermiştir.		Parmakları 3'er, avuç içi 1 serbestlik derecesine sahip olan 4 parmaklı el toplam 13 serbestlik derecesine sahiptir. Parmakların hareket iletimi konik dişlilerle sağlanmaktadır.

2010 O.B. Kroemer [20]	Yapılan çalışmada çeşitli makine öğrenmesi metotları kullanılarak kavrama işlemi için hiyerarşik yapıda aşamalı hibrit denetleme sunulmuştur. Yüksek seviye kontrolör; obje kavramalarında takviyeli öğrenme kullanarak nereden kavrayacağına karar verirken, düşük seviyeli kontrolörde taklit öğrenme ve görme temelli reaktif kontrolör sayesinde uygun kavrayış hareketlerini seçmektedir. Oluşturulan sistem ile yeni bir nesnenin kavranması hızlı bir şekilde öğrenilebilmektedir.		Bu çalışmada tasarım yapılmamıştır. 7 serbestlik derecesine sahip Mitsubishi kol ve barrett el kullanılmıştır.
2013 M.C. Teng ve arkadaşları [21]	Çalışmada ters kinematik çözümleme ile kontrol algoritması uygulanmıştır. İstenen hareketi gerçekleştirmek için ters kinematik çözümleme ve referans konum kullanılarak robot manipülatör kontrol edilmektedir. Nesnenin görsel özelliklerinin tanınması ve hareket kontrolü sağlanarak nesne manipülasyonu gerçekleştirilmektedir.		Bu tasarım; elin 4 ve kolun 6 olmak üzere toplam 10 serbestlik derecesine sahiptir. Parmaklara güç iletimi tendonlar ile yapılmaktadır.
2016 W. Chen ve C. Xiong [22]	Çalışmada adaptif kavrama için konum ve kuvvet değişimine dayanan yeni bir yöntem sunulmuştur. Hareket kuvvetlerinin gelişimi incelenerek bir analiz yöntemi geliştirilmiş, geliştirilen analiz yöntemiyle kavranan farklı nesnelere güvenli ve adaptif kavrama sağlanmıştır.		Testlerde kullanılan elin kuvvet iletimi tendonlarla sağlanmaktadır. El 5 parmak ve 16 ekleme sahiptir.
2017 L.Zaidi ve arkadaşları [23]	Bu çalışmada deforme olan cisimleri kavrayabilmek için model tabanlı bir strateji geliştirilmiştir. Deforme olan nesne kavranmaya başladığında fark edilerek, nesne-parmak deformasyon hesabı yapılmaktadır. Böylece kuvvet kontrolü ile nesneye zarar vermeden kavrama sağlanabilmektedir.		Bu çalışmada tasarım yapılmamıştır. Hazır Kuka LWR4 ve Shadow el kullanılmıştır.
2018 S. Xu ve arkadaşları [24]	Yapılan çalışmada; farklı robot platformlarına uyarlanabilir bir robot el tasarlanmıştır. Parmak ucunun pozisyonunu elde etmek için bir kinematik model oluşturulmuş ve robot elinin hareket yörüngesi ve kavrama alanı çözülmüştür. Sisteme farklı robot platformlarında farklı görevler verilmiştir. Sistem yapılan deneylerde yaklaşık 10 farklı kavrama görevini gerçekleştirebilmiş, farklı robot platformlarında uyumlu bir şekilde çalışabilmektedir.		Tasarımı yapılan el 5 parmaklı ve baş parmağı 4 diğer parmakları 3'er olmak üzere toplam 16 serbestlik derecesine sahiptir. Motorlardan parmaklara hareket ve güç iletimi tendonlarla sağlanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

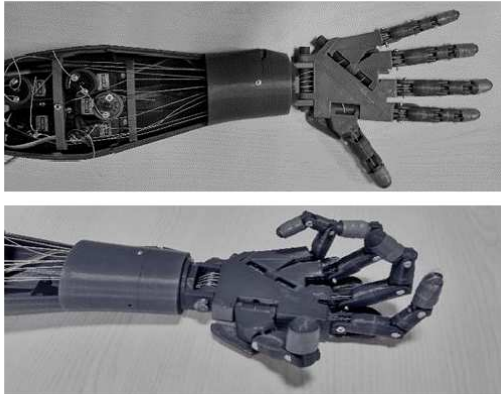
Bu bölümde robot elin mekanik yapısı, sensör verilerinin işlenmesi ve sistemin elektronik ve elektromekanik donanım yapısı sunulmaktadır.

2.1. Robot elin mekanik yapısı

Çalışmada 5 parmaklı robot el kullanılmıştır. 17 serbestlik derecesine sahip robot elin; baş, işaret ve orta parmakları 3'er serbestlik derecesine sahiptir. Yüzük ve serçe parmakları ise avuç içinde kısmen hareket yapabilmelerini sağlayan eklemlerle 4'er serbestlik derecesine sahiptir. Parmaklara hareket iletimi tendonlarla sağlanmaktadır. Tendon kullanımı ile parmak eklemlerinin nesneye göre adaptif şekil alması

sağlanmıştır. Tendonların hareketini sağlayan eyleyiciler ön kolda yer almaktadır. Ayrıca bilek tek serbestlik derecesine sahiptir ve hareket iletimi dişlilerle sağlanmaktadır. Elin boyutu ve yapısı, insan eli ile benzer yapıdadır.

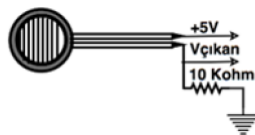
Elin üretimi için 3 boyutlu yazıcı teknolojisini kullanılmıştır. El Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) malzeme ile basılmıştır. ABS kullanımı ile ucuz ve hafif bir el prototipi elde edilmiştir [25]. Basımı ve montajı yapılan el Şekil 1'de sunulmaktadır. Basımı yapılan ve deneylerde kullanılan robot el 2012 yılında Gael Langevin tarafından tasarlanmış ve açık kaynak tasarım olarak paylaşılmıştır [26].



Şekil 1. Deneysel olarak kullanılan robot el

2.2 Kuvvet sensörü

FSR (kuvvete duyarlı direnç) kuvvet sensörü; aktif yüzeyine uygulanan kuvvetin artması ile dirençte azalma gösteren polimer kalın film elektronik bileşendir[27]. Sistemde İnterlink Elektronik'in FSR 402 isimli kuvvet sensörü kullanılmıştır. Kuvvet sensörü üzerine 600 grama kadar ağırlık konularak kuvvet-gerilim değişimi test edilmiştir. Kuvvet sensörüne uygulanan kuvvet miktarına göre üzerinden geçen gerilim miktarı, mikrodenetleyici ile ölçülmüştür. Sensörde üretilen değerler 0-5000 mili volt aralığındadır. Ancak mikrodenetleyici 10 bitlik analog-dijital dönüştürücüye sahip olduğu için 0-5000 mili volt aralığıyla orantılı 0-1023 aralığında sayısal değerler elde edilmektedir. Sensör ve direnç yardımıyla gerilim bölücü devre oluşturulmuş olup, oluşturulan devre ile kuvvet ölçümü yapılmıştır. Sensörün üzerine gelen kuvvete göre, direnç değişimi Denklem 1'de verilen matematiksel ifade ile hesaplanmıştır, devre ise Şekil 2'de sunulmuştur. Elde edilen kuvvete göre direnç değişiminin grafiği Şekil 3'te sunulmuştur.



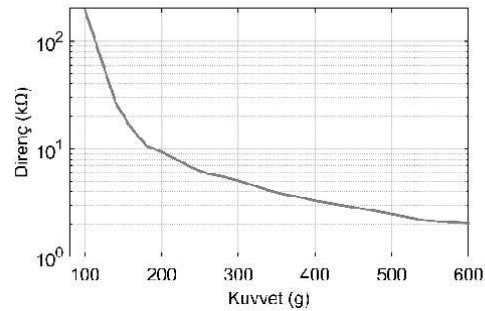
Şekil 2. Gerilim bölücü devre

$$R1 = R2 \times (V_{giren} - V_{çikan}) \div V_{çikan} \quad (1)$$

Denklem 1'de: R1; kuvvet sensörü direnç değeri, R2 devrede kullanılan 2. direnç değeri(10 kΩ), Vgiren; sensöre verilen gerilim

miktarı(5V), Vçikan; sensörden çıkan gerilim miktarıdır.

Şekil 3'te kuvvet sensörü üzerine kuvvet uygulandığında başlangıçta direnç değişiminin çok yüksek olduğu daha sonra direnç değişiminin azalarak, direncinin düştüğü görülmektedir. Şekil 3'te sunulan grafikte direnç değişimi logaritmik olarak, kuvvet değişim miktarı ise lineer olarak verilmiştir.

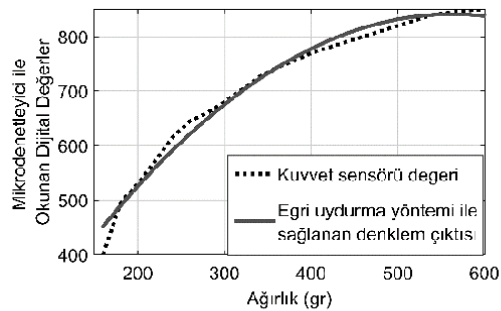


Şekil 3. Kuvvet-direnç değişim grafiği

Kuvvet sensörüne yapılan test sonuçları mikrodenetleyici tarafından okunmuş ve elde edilen sayısal değerler eğri uydurma yöntemi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen kuvvet eğrisinin denklemi Denklem 2'de verilmiştir. Eğri uydurma yönteminde denklem elde edilirken sensörün başlangıçta duyarsız olduğu değerler ihmal edilmiştir. Eğri uydurma yöntem çıktısı ile ölçüm sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir. Elde edilen denklemin, kuvvet sensörü değerlerinin değişimi ile tutarlılığa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

$$P = (-0.0024 \times x^2) + (2.7008 \times x) + 81 \quad (2)$$

Denklem 2'de: x; ağırlık miktarıdır(gr).

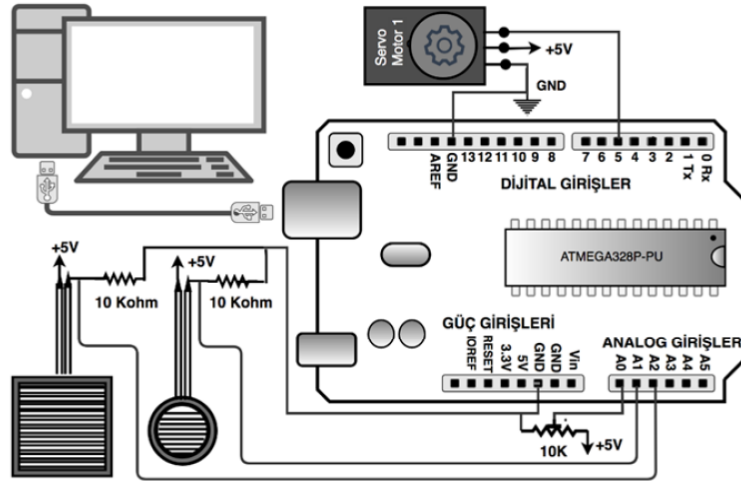


Şekil 4. Eğri uydurma yöntemi ile elde edilen grafik

2.3. Robot elin elektronik ve elektromekanik donanım yapısı

Robot elin parmaklarını hareket ettirebilmek için parmaklarda bulunan misinaların sürülmesi, eyleyiciler ile sağlanmıştır. Eyleyici olarak her bir parmak için bir adet olmak üzere toplam 5 adet servo motor kullanılmıştır. Servo motorlar; 180 derece hareket kabiliyeti, kontrol kolaylığı ve konum hassasiyetinden dolayı tercih edilmiştir. Sistemde Tower Pro marka MG996R isimli servo motor kullanılmıştır. Robot elin objeleri kavrama esnasında objeye uygulanan kuvvetin ölçülebilmesi için parmak falanklarına ve avuç içine kuvvet sensörleri yerleştirilmiştir. Kuvvet sensörünün özellikleri bölüm 2.2'de tartışılmıştır. Kullanıcıdan komut

gönderimi için ise 1 adet potansiyometre kullanılmıştır ve kullanıcı potansiyometre ile mikrodenetleyiciye farklı komut sinyalleri gönderebilmektedir. Robot elde sensörlerden gelen verilerin işlenmesi, servo motorların kontrol işlemleri, bilgisayar ile haberleşmenin gerçekleştirilmesi için mikrodenetleyici kullanılmıştır. Mikrodenetleyici olarak arduino uno tercih edilmiştir. Robot elin 1 parmağının elektronik ve elektromekanik sistemlerinin mikrodenetleyici ile bağlantısı Şekil 5'te gösterilmektedir. Robot elin hareket ve kuvvet kontrolü oluşturulan kontrolcü sistem üzerinden, bilgisayar ve mikrodenetleyicinin seri haberleşmesi ile kontrol edilmektedir.



Şekil 5. Robot elin 1 parmağının, mikrodenetleyici tabanlı kontrol sisteminin elektronik donanım yapısı

2.4. Bulanık mantık kontrol yapısı

Sistem MIMO (çok girdili ve çok çıktılı) yapıya sahiptir. Bu tip bir sistem için doğrusal bir model oluşturularak kontrolünü gerçekleştirmek oldukça zordur. Ayrıca robot el ile nesnelere dokunmak, tutmak ve deforme olmasını göz ardı ederek kavramak gibi farklı hareketler yapılması ve bu hareket formları oluşturulurken kuvvet sensörlerinden alınan geri bildirimler de kullanılarak hareket profilleri için uygun girdinin oluşturulması oldukça karmaşık ve uzmanlık gerektiren bir konudur. 1965 yılında Zadeh tarafından geliştirilen bulanık mantık yöntemi ile kontrol sisteminin tasarımı bu problem için oldukça etkin bir çözüm yoludur. Bulanık mantık, probleme ait matematiksel olarak muğlaklığı temsil etmek ve biçimsel yapıya kavuşturulmuş araçlar sağlamak için tasarlanmıştır[28].

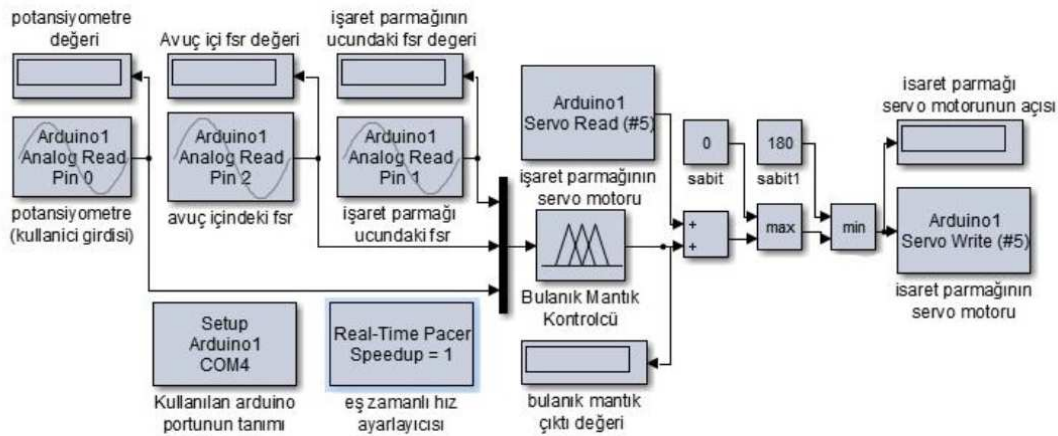
Bulanık mantık; sisteme özel, belirli uygulamalar için oldukça iyi performans sağlamaktadır [29]. Bu sebeple sistem kontrolünde bulanık mantık tabanlı kontrolcü kullanılmıştır. Tasarlanan kullanıcı temelli, bulanık mantık karar destek sistemi; kullanıcı komutu ve kuvvet geri bildirimini ile kendi kendine kavrama işlemine karar verebilen, adaptif bir kavrama yeteneğine sahiptir. Geliştirilen sistemde; robot el nesneyi kavramaya başladığında kuvvet sensörü verileri mikrodenetleyiciye gönderilmektedir, ayrıca kullanıcıdan da bir kontrol işareti alınmaktadır. Gelen veriler doğrultusunda bilgiler bulanık mantık kontrolör ile değerlendirilmektedir. Değerlendirme sonucunda servo motorlara hareket komutu verilerek nesnenin uygun kuvvette kavranması sağlanmaktadır.

2.5. Kuvvet kontrolü için uygulanan bulanık mantık karar yapısı

Robot el sisteminin hareket kontrolü servo motorlarla yapılmakta olup, kavrayıcı uzuvlara kuvvet sensörleri yerleştirilerek, tutulan nesneye uygulanan kuvvetin ölçülmesi ve geri besleme yapılabilmesi sağlanmaktadır. Kullanıcı tarafından farklı kavrama komutlarının gönderilebilmesi için ise potansiyometre kullanılmıştır. Potansiyometreden gönderilen sinyal doğrultusunda sistem kavrama kuvvetini belirlemektedir. Her parmak için bulanık mantık kullanılarak, potansiyometre ve kuvvet sensörü verileri ile kuvvet geri beslemeli

kontrolcü geliştirilmiştir. Şekil 6'da işaret parmağı için oluşturulan bulanık kontrolcü sisteminin blok diyagramı sunulmaktadır.

Bu sistemde robot el üzerinde bulunan kuvvet sensör verileri ile kullanıcıdan gelen komut doğrultusunda parmakların açılması veya kapanması için servo motorlara uygun PWM (darbe genişlik modülü) sinyali gönderilerek açı kontrolü yapılmaktadır. Gönderilecek olan PWM sinyaline bulanık mantık kontrolör ile karar verilmektedir. Bu sayede kullanıcı temelli, kuvvet geri beslemesiyle parmaklarını kuvvete göre nesneye uyarlayan akıllı bir sistem geliştirilmiştir.



Şekil 6. Geliştirilen kontrol sisteminin blok diyagramı

2.6. Tasarlanan bulanık mantık kontrolörünün özellikleri ve yapısı

Tasarlanan bulanık mantık kontrolör her bir parmak için 2 sensör ve 1 kullanıcı sinyali olmak üzere 3 girdiye göre karar vermekte olup 1 çıktı üretmektedir. Sistemde kuvvet kontrolünün sağlanması için konum kontrolü yapılmaktadır. Tablo 2 ve Tablo 3'te Bulanık mantık kontrolör için oluşturulan dilsel kural tabloları verilmektedir. Dilsel kural tablosu kullanıcı temelli oluşturulmuş ve 125 kural tanımı yapılmıştır. Tablolara bakıldığında sistem durumu önce kuvvet sensöründen gelen verilere göre karar almakta, ardından kullanıcıdan gelen veri ile gerekli kontrol sinyalini göndermektedir.

Okunan sensör değerleri bulanık mantık kural tablosunda: az, az-orta, orta, çok-orta ve çok olmak üzere 5 girdi üyelik kümesinde tanımlanmıştır. Tablo 2'de sunulan kural tablosunda: parmak ucundaki sensör ve avuç

içerisindeki sensör üyelik kümesi değerlerine göre sırasıyla D1; az ve az, az ve az-orta durumunu D2; az ve orta, az-orta ve az-orta, az-orta ve orta, çok-orta ve az durumunu, D3; az-orta ve çok-orta, orta ve orta, çok ve az durumunu, D4: çok ve az-orta, çok-orta ve orta, orta ve çok, çok-orta ve çok-orta durumunu, D5: çok ve çok-orta, çok ve çok durumunu temsil etmektedir. Tablo 3'te sunulan girdilere göre çıktı üyelik kümeleri dilsel olarak: NB; negatif-büyük, NO; negatif orta, NK; negatif-küçük, S; sıfır, PK; pozitif-küçük, PO; pozitif-orta, PB; pozitif-büyük şeklinde tanımlanmıştır.

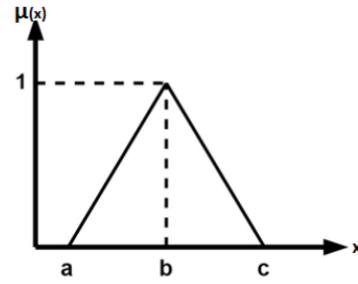
Tablo 2. Kural tablosu 1

Parmak Ücündeki FSR Sensörü	Avuç İçindeki FSR Sensörü					
		Az	Az-Orta	Orta	Çok-Orta	Çok
	Az	D1	D1	D2	D2	D3
	Az-Orta	D1	D2	D2	D3	D4
	Orta	D2	D2	D3	D4	D4
	Çok-Orta	D2	D3	D4	D4	D5
Çok	D3	D4	D4	D5	D5	

Tablo 3. Kural tablosu 2

1. Kural Tablosu Sonucu	Kullanıcıdan Gelen Komut					
		Bırak	Hafif-Tut	Tut	Hafif-Sık	Sık
	D1	NK	PK	PO	PB	PB
	D2	NK	S	PK	PO	PB
	D3	NO	NK	S	PK	PO
	D4	NB	NO	NK	S	PK
D5	NB	NB	NO	NK	S	

Bulanık mantık kontrol sisteminde Mamdani bulanık çıkarım sistemi (FIS) tanımlanmıştır. FIS sistemi 3 girdi ve 1 çıktı üyelik fonksiyonundan oluşmaktadır. FIS sisteminin üyelik fonksiyonları Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir. Üyelik fonksiyonu olarak üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Üçgen üyelik fonksiyonu, karar vericilerin kullanımı ve hesaplaması için kolay olması sebebiyle tercih edilmiştir[30]. Ayrıca girdi ve çıktılar üzerinde hesaplama basitliği nedeniyle üçgen, bulanık küme olarak kabul edilmiştir. Üçgen üyelik fonksiyonu Şekil 7'de gösterilmekte ve Denklem 3'te matematiksel olarak ifade edilmektedir [31].

**Şekil 7.** Üçgen üyelik fonksiyonu

$$\mu_A(x) = \begin{cases} a \leq x < b & \rightarrow \frac{(x-a)}{(b-a)} \\ b \leq x \leq c & \rightarrow \frac{(c-x)}{(c-b)} \\ x < a \text{ veya } x > c & \rightarrow 0 \end{cases} \quad (3)$$

Denklem 3'te μ_A üyelik derecesi, a başlangıç sınır değeri, c bitiş sınır değeri ve b en çok üyelik derecesine sahip olunan noktadır.

Kuvvet sensörü üzerine 0-600 g aralığında kuvvet uygulanarak test edilmiştir. Bu test sonucunda 0-600 g kuvvet aralığına karşılık mikrodenetleyici tarafından 0-850 aralığında sayısal değerler elde edilmiştir. Elde edilen sayısal değerler bulanık mantık girdi üyelik kümelerinin parametrelerinin tanımlanmasında kullanılmıştır. Bu parametreler ve kuvvet karşılıkları Tablo 4'te sunulmuştur. Kullanıcı tarafından gönderilen kontrol sinyalinin girdi üyelik kümesi parametreleri Tablo 5'te, bulanık mantık çıktı üyelik kümesi parametreleri Tablo 6'da sunulmuştur. Tablo 5'te bulunan kullanıcı kontrol sinyali girdi üyelik kümesi parametreleri bir potansiyometreden elde edilen dijital değerler doğrultusunda tanımlanmıştır. Potansiyometreden 0 ile 1023 arasında lineer bir şekilde değişen dijital değerler elde edilmekte ve tablo 5'te bulunan parametrelerin tanımlanmasında, elde edilen bu dijital değer aralığı, eşit değer aralıklarıyla kullanılmıştır.

Tablo 4. Parmaktaki ve avuç içindeki FSR'nin girdi üyelik kümesi parametreleri

Parmaktaki ve Avuç İçindeki FSR'nin Girdi Üyelik Küme İsimleri	Okunan Dijital Değerlere Karşılık Gelen Kuvvet (g)	Okunan Dijital Değere Göre Üyelik Kümesi Parametreleri [0-1023]
Az	[0 0 150]	[0 0 360]
Az-Orta	[0 150 300]	[0 360 680]
Orta	[150 300 450]	[360 795]
Çok-Orta	[300 450 600]	[680 850]
Çok	[450 600 600]	[795 850]

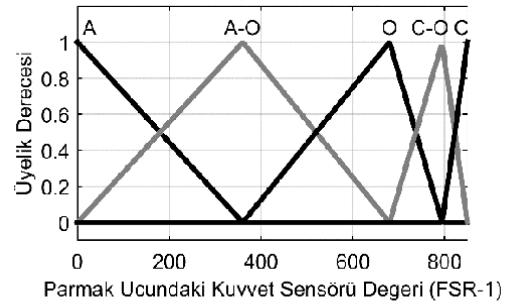
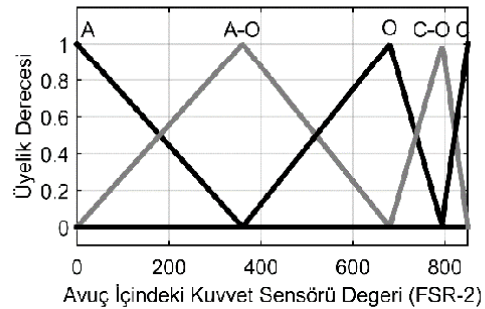
Tablo 5. Kullanıcı kontrol sinyalinin girdi üyelik kümesi parametreleri

Kontrol Sinyalinin Girdi Üyelik Küme İsimleri	Tanımlanan Girdi Üyelik Küme Parametreleri
Bırak	[0 0 256]
Hafif Tut	[0 256 512]
Tut	[256 512 768]
Hafif Sık	[512 768 1023]
Sık	[768 1023 1023]

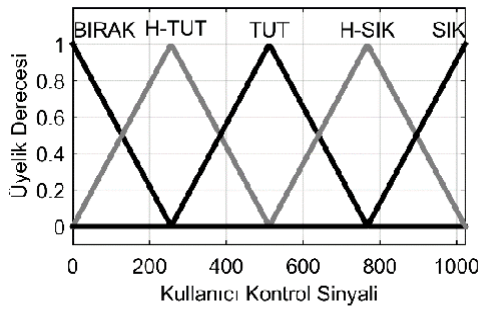
Tablo 6. Servo motorun çıktı üyelik kümesi parametreleri

Servo Motorun Çıktı Üyelik Küme İsimleri	Tanımlanan Çıktı Üyelik Küme Parametreleri
Negatif Büyük (NB)	[-6 -6 -4]
Negatif Orta (NO)	[-6 -4 -2]
Negatif Küçük (NK)	[-4 -2 0]
Sıfır (S)	[-2 0 2]
Pozitif Küçük (PK)	[0 2 4]
Pozitif Orta (PO)	[2 4 6]
Pozitif Büyük (PB)	[4 6 6]

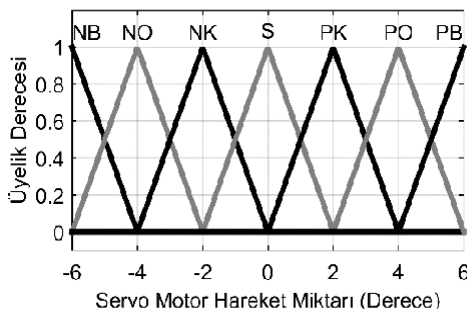
Kuvvete göre kuvvet sensörlerinin girdi üyelik fonksiyonu parametreleri 150 gramlık aralıklarla belirlenmiştir. Şekil 8 ve 9'da gösterilen girdi üyelik fonksiyonlarının sınırları robot el üzerinde kullanılan kuvvet sensörleri tarafından ölçülen ve mikrodenetleyici tarafından elde edilen dijital değerler doğrultusunda tanımlanmıştır. Ancak kuvvete göre kuvvet sensöründen elde edilen dijital değerlerin lineer olmaması sebebiyle üyelik fonksiyonlarının parametre aralıkları eşit değildir.

**Şekil 8.** Parmak ucundaki kuvvet sensörünün üyelik fonksiyonu**Şekil 9.** Avuç içindeki kuvvet sensörünün üyelik fonksiyonu

Şekil 10'da kullanıcıdan gelen kontrol sinyalinin girdi üyelik fonksiyonu gösterilmektedir. Kontrol sistemi kullanıcı temelli bir sistem olup, kullanıcının hatası minimize edilmek istenmektedir. Şekil 11'de ise sistemin çıktısının üyelik fonksiyonu gösterilmektedir. Sistemin çıktısında kuvvet kontrolü için servo motorun kaç derece açı ile dönmesi gerektiğine karar verilmektedir.

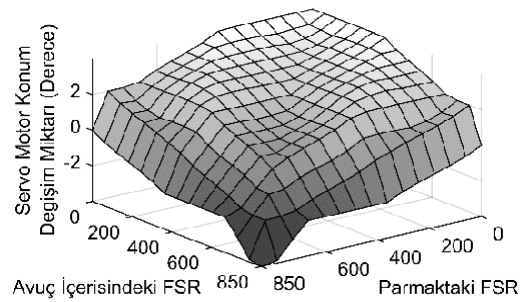


Şekil 10. Kullanıcıdan gelen kontrol sinyalinin üyelik fonksiyonu

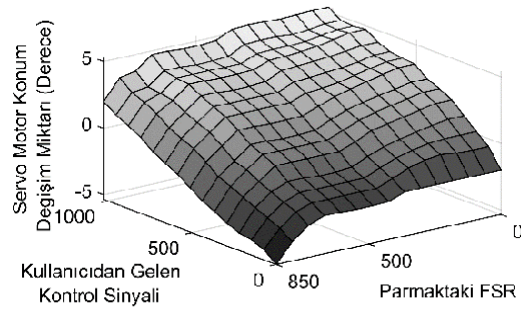


Şekil 11. Servo motorun hareket miktarı üyelik fonksiyonu

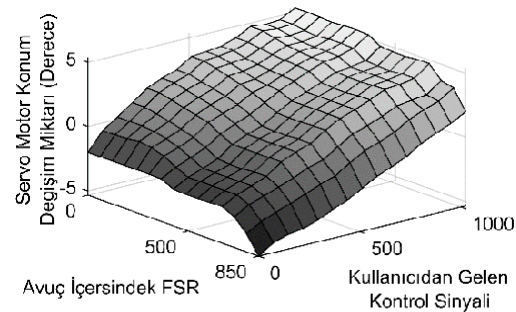
Girdi üyelik fonksiyonları ile çıkış üyelik fonksiyonu ağırlık merkezi yöntemi ile hesaplanmıştır ve uygulanacak olan konum değişim miktarı elde edilmiştir. Servo motor için elde edilen konum değişim miktarının yüzey grafikleri: Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te gösterilmektedir.



Şekil 12. Avuç içerisindeki ve parmaktaki kuvvet sensörünün değeri ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği



Şekil 13. Kullanıcıdan gelen kontrol sinyali, parmaktaki kuvvet sensörünün değeri ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği



Şekil 14. Avuç içerisindeki kuvvet sensörünün değeri, kullanıcıdan gelen kontrol sinyali ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği

3. Bulgular

Geliştirilen kontrol sistemi kullanıcı temelli oluşturulmuş olup, kullanıcıdan gönderilen sinyal doğrultusunda kavrama işlemleri gerçekleştirilmektedir.

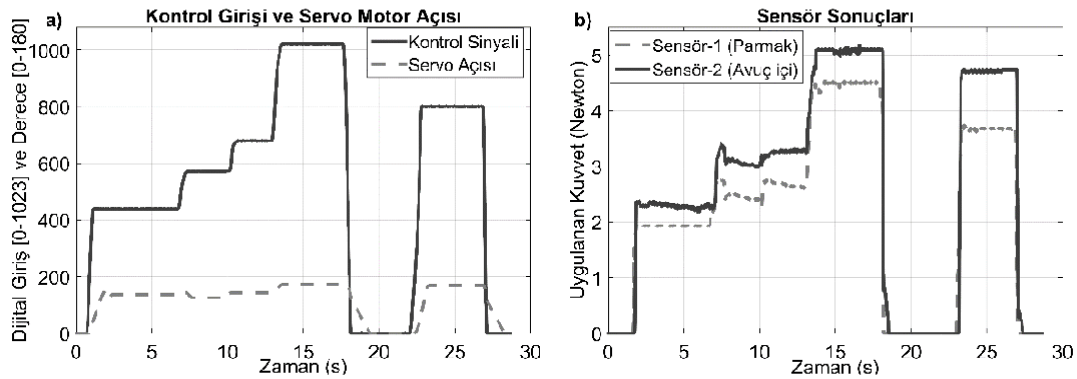
Nesnenin kavranmasında; bırak, hafif-tut, tut, hafif-sık ve sık komutları tanımlanmış ve uygulanmıştır. Hafif-tut komutunda nesneye düşük kuvvet uygulanarak nesnenin kavranması istenilmektedir, tut komutunda ise nesneye zarar vermeden, stabil bir kavrama sağlanması amaçlanmaktadır. Hafif sık komutunda nesneye tut komutuna göre daha fazla kuvvet uygulanarak nesnenin kavranmasının sağlanması, sık komutunda ise nesneye yüksek kuvvet uygulayarak nesnenin kavranması istenmektedir. Bırak komutunda ise robot elin parmaklarının açılarak nesnenin bırakılması amaçlanmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda, bir karar destek sistemi tasarlanmış ve robot

elin nesnelere kavramasında hassas kuvvet kontrolü sağlanmıştır.

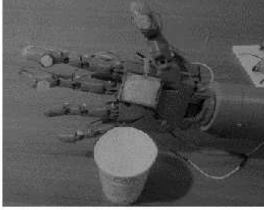
Tasarlanan karar destek sistemi ile robot el kontrol edilmiş ve farklı kavrama komutlarında nesneye uygulanan kuvvet değişiminin gözlemlenebilmesi için nesne olarak karton bir bardak kullanılmıştır. Deney sonucunda robot elin bir parmağı için elde edilen grafikler Şekil 15'te sunulmuştur. Sistemde uygulanan kontrol sinyali ile parmağı hareket ettiren servo motorun konumu Şekil 15a'da parmak ucu ve avuç içi sensörlerinden alınan ölçüm sonuçları ise Şekil 15b'de sunulmaktadır. Şekil 15'te, 0 ile 18 (s) zaman aralığında, robot ele bırak, tut, hafif sık ve sık kavrama komutları gönderilmiştir. Bu komutlar doğrultusunda, robot el karton bardağı farklı kuvvet aralıklarında kavramıştır. Bu kavrama işlemleri sonucunda elde edilen görseller Şekil 16'da sunulmaktadır. Başlangıçta Şekil 16a'da robot ele bırak komutu uygulanmaktadır. Bu sebeple robot el açıktır. Şekil 16b'de robot el tut komutunu uygulamakta ve karton bardak zarar görmeden kavranmıştır. Şekil 16c'de robot ele hafif sık komutu gönderilmiş, robot el nesneyi tut komutuna göre daha yüksek kuvvetle kavramış ve bu sebeple karton bardak deforme olmuştur. Şekil 16d'de ise robot ele sık komutu gönderilmiştir. Sık komutu doğrultusunda nesne daha yüksek kuvvetle kavranmış ve hafif sık komutundaki duruma göre daha fazla deforme olmuştur. Grafik ve şekillerde de görüldüğü üzere kontrol sistemi kullanıcı

komutu doğrultusunda farklı kavrama komutlarını başarı ile yerine getirebilmektedir.

Kontrol sistemi; avuç içerisine yerleştirilen nesnenin üzerine uygulanacak kuvveti, parmakların konumunu değiştirerek belirlemektedir. Robot eli başlangıçta aktif hale getirecek ve hafif tut, tut, hafif sık, sık, bırak komutlarını gönderecek kullanıcı kontrol sinyali bir potansiyometre ile üretilmektedir. Kullanıcı bu potansiyometre üzerinden üretilen analog sinyal yardımıyla robot elin nesnelere kavraması sırasında uygulayacağı kuvvet miktarını tanımlamaktadır. Oluşturulan bulanık mantık kontrol yapısı; potansiyometreden 0-1023 aralığında okunan dijital sinyali değerlendirme aşamasında kullanılmaktadır. Böylece robot elin nesneyi kavrama esnasında uygulaması gereken kuvvetin belirlenmesi için kontrolcüye bilgi sağlamaktadır. Bu bilgi ile uygulanacak kuvvet; az, az-orta, orta, çok-orta veya çok olarak belirlenmektedir. Ölçüm sonuçları ile kuvvet sensörleri için bulanık mantık üyelik kümelerinde tanımlanan parametre sınırları bölüm 2.6'da Tablo 4'te sunulmuştur. Parmakların nesne ile temas anında ölçülen kuvvet değeri bulanık mantıkla oluşturulan karar destek sistemi tarafından değerlendirilmektedir. Kontrol sinyalinin durumuna göre kuvvet ölçüm sonucu istenilen değere geldiğinde servo motor durdurularak nesneye uygulanan kuvvetin sabit kalması sağlanmaktadır.



Şekil 15. Robot elin tek parmağı için üretilen kontrol sinyali ile ölçüm sonuçları



Şekil 16a. Robot ele bırak komutunun uygulanması



Şekil 16b. Robot ele tut komutunun uygulanması



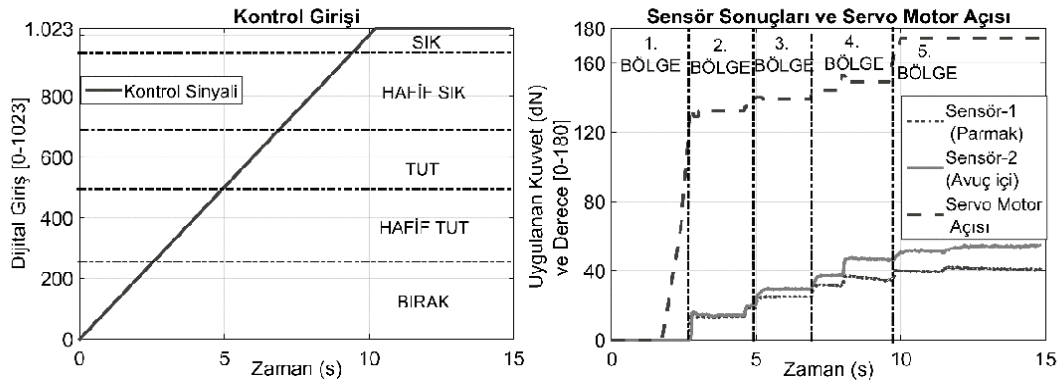
Şekil 16c. Robot ele hafif sık komutunun uygulanması



Şekil 16d. Robot ele sık komutunun uygulanması

Farklı kontrol sinyali değerlerindeki durumları gösterebilmek için robot ele, kontrol sinyali olarak rampa girdisi uygulanmıştır. Rampa girdisinin değeri, elde edilen servo motor konumu ve ölçülen sensör sonuçları Şekil 17'de sunulmuştur. Rampa girdisinin değeri referans değer olup, bu değer ile nesneye uygulanacak kuvvet miktarına karar verilmektedir. Sistem çalıştırılıp rampa girdisi uygulandığında; başlangıçta bulanık mantık kontrolör bırak komutunu değerlendirmiştir. 1. bölgede servo motor sıfır derece konumunda ve sensörlerden gelen veriler sıfır olduğu için sistem önce yanıtız kalmıştır. Rampa girdisinin değeri artmaya başlayıp hafif-tut komutu devreye girdiğinde; servo motora uygun sinyal gönderilerek parmak kapanmaya başlamıştır. Nesne kavranırken devamlı bulanık mantık kontrolör sensör verilerini ve rampa girdisini değerlendirmiştir. Şekil 17'de 2. bölgede görüldüğü üzere; hafif-tut komutu doğrultusunda nesnenin, bulanık mantık kontrolör tarafından elde edilen uygun kuvvet aralıklarında sabit kuvvetle kavranması sağlanmıştır. Bu sayede nesneye daha fazla kuvvet uygulanması engellenmiştir. Rampa girdisinin değeri artıp tut komutu devreye girdiğinde ise; Şekil 17'de 3. Bölgede tut komutu doğrultusunda bulanık mantık kontrolör tarafından belirlenen kuvvet aralıklarında nesnenin stabil bir şekilde kavrandığı görülmektedir. Rampa girdisi hafif sık komutunu gönderdiğinde; nesnenin bulanık mantık kontrolör tarafından belirlenen uygun kuvvet aralığında kavranması için servo motora bulanık mantık kontrolör tarafından hesaplanan kontrol sinyali gönderilmiştir. Ve Şekil 17'de 4. bölgede görüldüğü gibi, nesnenin tut komutuna

göre daha yüksek kuvvete kavranması sağlanmıştır. Rampa girdisinin değeri artıp sık komutu devreye girdiğinde ise; motora gönderilen sinyal doğrultusunda servo motorun torku artmış ve nesne daha yüksek kuvvetle kavranmaya başlamıştır. Sık komutu doğrultusunda uygulanan kuvvet miktarı ve servo motorun konum değişimi Şekil 17'de 5. bölgede gösterilmektedir. 17'de görüldüğü üzere rampa girdisinin değeri değiştiğinde sistemin kavrama kuvvetinin değeri değişmektedir. Bulanık mantık kontrolör sistemi devamlı değerlendirerek servo motora gönderilecek sinyale karar vermektedir. Bu sinyal yardımıyla parmakların konumu ve nesneye uyguladıkları kuvvet miktarları değişmektedir. Oluşturulan sistemde; bulanık mantık temelli kontrol sistemi yardımıyla robot el, gerekli hassasiyette nesnelere kavramaktadır. İnsanlar nesnelere kavramak için başlangıçta parmaklarının konumunu hızlı bir şekilde değiştirerek, nesneye teması sağlamaktadır. Daha sonra duyu organlarından gelen verilere göre, parmaklara daha yavaş ve küçük hareketler yaptırılarak nesnelere uygun kuvvette, stabil bir şekilde kavranmaktadır. Robot elin parmakları açık durumdayken, kavrama komutlarından biri devreye girdiğinde parmaklar nesneye dokunana kadar bulanık mantık kontrolör servo motorun konumunu hızlı bir şekilde değiştirmesini sağlamak ve parmaklar kapanmaktadır. Nesneye temasından sonra ise bulanık mantık kontrolör servo motorun daha küçük miktarda konum değiştirmesini sağlayarak ya da mevcut konumunu sabit tutarak nesnenin kavranma kuvveti kontrol edilmektedir.



Şekil 17. Rampa girdisi ve sistem cevabı

4. Tartışma ve Sonuç

Sunulan çalışmada: 3 boyutlu yazıcı ile 5 parmaklı robot elin basımı yapılmıştır. Basımı ve montajı yapılan elin üzerine kuvvet sensörleri yerleştirilmiştir. Gerekli mekanik ve elektromekanik sistemlerinde el içerisine yerleştirilmesi ve elektronik donanımın bağlantılarının yapılması ile sistemin mekanik ve donanımsal yapısı tamamlanmıştır. Sistemde kullanılan kuvvet sensörleri üzerine ağırlık konularak dijital değerler elde edilmiş ve eğri uydurma yöntemi ile sensörün ağırlık-okunan dijital değer değişiminin denklemi elde edilmiştir. Oluşturulan sistemi kontrol etmek için bulanık mantık kullanılarak kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan kapalı kontrol sistemi her bir parmak için 2 sensör ve 1 kullanıcı sinyali olmak üzere 3 girdiye göre karar vermekte olup 1 çıktı üretmektedir. Bütün parmaklar için oluşturulan kontrol sistemi yapısı aynı olup, bu çalışmada robot elin bir parmağının kontrolü için oluşturulan yapı tanıtılmış ve deney sonuçları sunulmuştur.

Manipulatörler nesnelere kavrarken nesneye uyguladıkları kuvveti hassas bir şekilde kontrol etmeleri gerekmektedir. Aksi takdirde nesnelere

zarar verilebilir. Kuvvet kontrolünün sağlanması, yaygın olarak kuvvet geri beslemesi ile çözümlenmektedir. Mevcut sistemlerin bir kısmı incelenmiş ve kuvvet geri beslemesine yönelik önerilen çözüm yollarının karmaşık ve çok fazla işlem gerektirdiği görülmüştür. Sunulan çalışmada kuvvet geri beslemesi ile bulanık mantık kontrolcü tasarlanmış ve önerilen kontrol yapısıyla özellikle hassas nesnelere kavranmasında karşılaşılan kuvvet belirsizlik probleminin çözülmesi amaçlanmıştır. Bulanık mantık kontrolcü ile lineer olmayan sensör verileri işlenerek, basit ve geniş uygulama alanına sahip bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcü, kullanıcı sinyali doğrultusunda nesnelere kavrama kuvvetine karar vermektedir. Nesnenin robot elden düşmeyeceği kadar çok, deforme olmayacağı kadar az kuvvet hesaplanarak robot ele hassas ve kararlı kavrama özelliği kazandırılmaktadır. Ayrıca elin kullanıcı sinyali ile nesneye yüksek, orta ya da düşük kuvvet uygulayarak kavrama yapılabilmesi sağlanmaktadır. Elde edilen kuvvet kontrolü sayesinde robot elde oluşabilecek kontrol yetersizliği sonucu nesnenin zarar görmesi önlenilebilecektir.

Kaynakça

- [1] MICHALEC, R. 2011. Modeling and control of multifingered dextrous manipulation for humanoid robot hands. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, PhD Thesis, 588s, Paris.
- [2] Boughdiri, R., Nasser, H., Bezine, H., M'Sirdi, N. K., Alimi, A. M., Naamane, A. 2012. Dynamic modeling and control of a multi-fingered robot hand for grasping task, *Procedia Engineering*, Vol. 41, p. 923-931. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.264
- [3] Katibeha, F., Eghtesadb, M., Bazargan-Laric, Y. 2016. Dynamic modeling and control of a 4 DOF robotic finger using adaptive-robust and adaptive-neural controllers, *International Journal of Robotics*, Vol. 4, No. 4, p. 51-61.
- [4] Lin, L. R., Huang, H. P. 1996. Integrating fuzzy control of the dexterous National Taiwan University (NTU) hand., *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1(3), p. 216-229. DOI: 10.1109/3516.537044
- [5] Yang, Y., Zhang, W., Xu, X., Hu, H., Hu, J. 2017. LIPSA hand: a novel underactuated hand with linearly parallel and self-adaptive grasp, In *Mechanism and Machine Science*, 10th International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 16-18 August, Wuhan, China, 739-751.

- [6] Khakpour, H., Birglen, L. 2013. Numerical analysis of the grasp configuration of a planar 3-DOF linkage-driven underactuated finger, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 8(2), p. 021010-1, 021010-8. DOI: 10.1115/1.4007359
- [7] Argonne National Laboratory. 1949. Reactors: Modern-Day Alchemy Argonne National Laboratory. <http://www.ne.anl.gov/About/modern-day-alchemy>. (Erişim Tarihi:14.03. 2017).
- [8] Devol, J. G. C. 1961 . U.S. Patent No. 2,988,237. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [9] Devol, G. 1959. Robotic Industries Association "A Tribute To Joseph Engelberger". <http://www.robotics.org/joseph-engelberger/about.cfm> (Erişim Tarihi: 14 Mart 2017).
- [10] Hirose, S., Umetani, Y. 1978 . The development of soft gripper for the versatile robot hand, *Mechanism and machine theory*, Cilt. 13(3), s. 351-359. DOI: 10.1016/0094-114X(78)90059-9
- [11] Bekey, G. A., Tomovic, R., Zeljkovic, I. 1990. Control architecture for the Belgrade/USC hand. In *Dextrous robot hands*. Springer, New York, NY. 136-149s.
- [12] Yan, J., El-Baradie, M. A., Hashmi, M. S. J. 1992. The development of a robotic compliance control system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Cilt. 32(4), s. 477-486. DOI: 10.1016/0890-6955(92)90039-J
- [13] Lin, L. R., Huang, H. P. 1998. NTU hand: A new design of dextrous hands, *Journal of Mechanical Design*, Cilt. 120(2), s. 282-292. DOI: 10.1115/1.2826970
- [14] Fukaya, N., Toyama, S., Asfour, T., Dillmann, R. 2000. Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)*. Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference, 30 Oct-5 Nov. ,Japan, Vol. 3, pp. 1754-1759.
- [15] Butterfaß, J., Grebenstein, M., Liu, H., Hirzinger, G. 2001. DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on* Vol. 1, 21-26 May, South Korea, pp. 109-114.
- [16] Kawasaki, H., Komatsu, T., Uchiyama, K. 2002. Dextrous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II, *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Cilt. 7(3), s. 296-303. DOI: 10.1109/TMECH.2002.802720
- [17] Pons, J. L., Rocon, E., Ceres, R., Reynaerts, D., Saro, B., Levin, S., Van Moorleghem, W. 2004. The MANUS-HAND dextrous robotics upper limb prosthesis: mechanical and manipulation aspects, *Autonomous Robots*, Cilt. 16(2), s. 143-163. DOI: 10.1023/B:AURO.0000016862.38337.f1
- [18] Zollo, L., Roccella, S., Guglielmelli, E., Carrozza, M. C., Dario, P. 2007. Biomechatronic design and control of an anthropomorphic artificial hand for prosthetic and robotic applications, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, Cilt. 12(4), s.418-429. DOI: 10.1109/TMECH.2007.901936
- [19] Liu, H., Meusel, P., Seitz, N., Willberg, B., Hirzinger, G., Jin, M. H., Xie, Z. W. 2007. The modular multisensory DLR-HIT-Hand, *Mechanism and Machine Theory*, Cilt. 42(5), s. 612-625. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.04.013
- [20] Kroemer, O. B., Detry, R., Piater, J., Peters, J. 2010. Combining active learning and reactive control for robot grasping, *Robotics and Autonomous Systems*, Cilt. 58(9), s.1105-1116. DOI: 10.1016/j.robot.2010.06.001
- [21] Teng, M. C., Tsai, Y. J., Hsiao, C. C. 2013. Mechanical Design and Kinematic Analysis of a 10 DOF Robot Manipulator, *IFAC Proceedings Volumes*, Cilt. 46(5), s.301-306. DOI: 10.3182/20130410-3-CN-2034.00022
- [22] Chen, W., Xiong, C. 2016. On adaptive grasp with underactuated anthropomorphic hands, *Journal of Bionic Engineering*, Cilt. 13(1), s. 59-72. DOI: 10.1016/S1672-6529(14)60160-8
- [23] Zaidi, L., Corrales, J. A., Bouzgarrou, B. C., Mezouar, Y., Sabourin, L. 2017. Model-based strategy for grasping 3D deformable objects using a multi-fingered robotic hand, *Robotics and Autonomous Systems*, Cilt. 95, s. 196-206. DOI: 10.1016/j.robot.2017.06.011
- [24] Xu, S., Xu, Y., Xu, X. 2018. Structural design and kinematics analysis of SHU-hand II humanoid robotic hand. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 16-17 June, China, Vol. 394, No. 4, p. 042068.
- [25] Uraz, C., Macit, Ş. 2018. Electroless Cu Plating on ABS Plastic by Using Environmentally Friendly Chemicals, *Journal of Science and Engineering*, Cilt. 20(59), s. 369-375. DOI: 10.21205/deufmd.2018205930
- [26] Langevin, G. 2012. Inmoov Open Source 3D printed life-size robot. <http://inmoov.fr/hand-and-forarm/> (Erişim Tarihi: 19.03.2018).
- [27] FSR 402 Data Sheet. 2010. <http://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf> (Erişim Tarihi: 03.06.2018).
- [28] Türkbey, O. 2003. Çok Amaçlı Makina Sıralama Problemi İçin Bir Bulanık Güçlü Metod, *DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen Ve Mühendislik Dergisi*, Cilt. 5, s.81-98.
- [29] Kubat, C. 2014. MATLAB: Yapay Zeka ve Mühendislik Uygulamaları. Pusula yayınları
- [30] Kaftan, İ., Balkan, E., Şalk, M. 2013. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Ve Jeofizikte Kullanım Alanları: Sismoloji Örneği, *DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen Ve Mühendislik Dergisi*, Cilt. 15(2), s.15-29.
- [31] Kaufmann, A., Gupta, M. M. 1988. *Fuzzy mathematical models in engineering and management science*, Elsevier Science Inc.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARACA, Aslıhan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri :16. 09.1994, Hatay
 Medeni hali : Bekar
 e-mail : aslihan.karaca1@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2019
Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2016
Lise	Naim Atakaş Anadolu Lisesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-2019	Hatay Atlas Yapı Denetim Ltd. Şti.	Mühendis

Yabancı Dil	Puanı	Dönemi
(YÖKDİL) İngilizce	73,75	Eylül 2018

Yayınlar

Karaca, A. ve Conker, Ç. (12 Eylül, 2018). Bulanık Kontrolör Esaslı Haptik Robotik El, *TOK2018 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Kayseri.

Conker, Ç. ve Karaca, A. (2019). Bulanık Mantık Esaslı Karar Destek Sistemi ile Robot Elin Kuvvet Kontrolü. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi*, 433-447.

DİZİN

A

Açık Çevrim Kontrol · 29, 30
 Aristo Mantığı · 31
 Ağırlık Merkezi · 36, 37, 57, 61,
 62, 66, 68
 Analog-Dijital Dönüştürücü · 40,
 43
 Aktüatör · 4,23,29,30

B

Bulanık Küme · 31, 32, 33, 34,
 35, 36
 Bulanık Mantık · 3, 4, 5, 7, 8, 31,
 32, 34, 35, 47, 48, 49, 50, 51,
 53, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 67,
 68, 84, 85, 86, 87, 95, 98, 99,
 Bulanık Sistem · 35
 Bulanıklaştırma · 36, 60, 61, 68

D

Denavit-Hartenberg · 70, 71, 73,
 78, 81
 Dilsel Değişkenler · 34
 Direnç · 40, 41
 Dokunma Duyusu · 3
 Durulaştırma · 36, 61, 62, 68

E

Eyleyici · 43, 45, 98
 Eğri Uydurma · 6, 41, 42

G

Geri Besleme · 2, 3, 4, 7, 10, 13,
 14, 18, 19, 23, 29, 47

H

Haptik · 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 14,
 22, 23, 24, 25, 26, 27, 39, 43,
 47, 62, 63, 64, 67, 84, 85, 86,
 90, 91, 92, 96, 99
 His Geri Bildirimi · 9, 24, 25, 85,
 98

K

Karar Destek Sistemi · 84, 85, 86
 Kapalı Çevrim Kontrol · 4, 29, 30,
 31
 Kuvvet Geri Beslemesi · 2, 3, 4,
 14, 23, 47
 Kuvvet Kontrolü · 2, 3, 4, 11, 13,
 14, 15, 19, 24, 25, 31, 47, 53,
 84, 85, 86, 98, 99

L

Lineer · 7, 15, 25, 41, 51, 52, 98,
 99

M

Mamadani Bulanık Çıkarım · 35,
 50, 63
 MIMO · 47
 Mikrodenetleyici · 37, 38, 40, 41,
 43, 47, 50, 52

Ö

Öteleme Dönüşüm Matrisi · 71

P

PWM · 23, 24, 39, 43, 48, 63, 64,
 65, 66, 67, 68, 86, 90, 91, 92,
 95, 96

R

Referans Kuvvet · 47

S

Sezgisel · 4, 33, 35, 97, 98,
 Serbestlik Derecesi · 7, 10, 11, 12,
 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24,
 25, 44, 45

T

Ters Kinematik · 8, 16, 81, 82
 Tendon · 3, 10, 12, 13, 14, 15, 16,
 19, 23, 24, 25, 26, 45, 46, 85

Ü

Üç Boyutlu Yazıcı · 42
 Üçgen Üyelik Fonksiyonu · 33,
 60, 63
 Üyelik Derecesi · 32, 33, 34, 59,
 60, 67

Y

Yapay Zeka · 4, 8, 31



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

