

HAPTİK GERİ BİLDİRİME SAHİP ROBOT ELİN BULANIK MANTIK ESASLI KUVVET KONTROLÜ

¹Aslıhan KARACA , ²Cağlar CONKER , ³Hakan YAVUZ 

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
İskenderun, TÜRKİYE

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü,
İskenderun, TÜRKİYE

³Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana, TÜRKİYE
¹aslihan.karaca1@gmail.com, ²caglar.conker@iste.edu.tr, ³hyavuz@cu.edu.tr

(Geliş/Received: 24.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2019)

ÖZ: Sunulan çalışmada; kullanıcı tarafından kontrol edilen bir robot el sistemi için çalışma yapılmıştır. Sistemin nesne kavrama kuvveti hassasiyetinin sağlanması amacıyla kavrama kuvvetinin kontrol sorunu üzerine durulmuştur. Bunun yanı sıra nesneye uygulanan kuvvetin kullanıcıya geri bildirim için haptik geri bildirim sistemi oluşturulmuştur. Robot elin kullanıcı komutu doğrultusunda nesnelere uyguladığı kuvvetin kontrolünde, bulanık mantık önerilmiş ve uygulanmıştır. Kullanıcı bulanık mantık kontrolcüyü tut, bırak, sık gibi farklı kavrama komutlarını gönderebilmektedir. Bulanık mantık kontrolcü ise kullanıcı komutu doğrultusunda objeye uygulanan kuvveti kontrol etmektedir. Ayrıca kuvvet sensöründen gelen veriler bulanık mantık kontrolcü ile değerlendirilerek haptik geri bildirim sisteminde bulunan titreşim motorlarının titreşim şiddeti ayarlanmaktadır. Böylelikle kullanıcı, hem objeleri ne kadar kuvvetle sıkıldığını hissedebilmekte hem de sadece bir kavrama komutu göndererek nesnenin uygun kuvvette kavranmasını sağlayabilmektedir. Oluşturulan sistem objelerin kavranması esnasında oluşan kavrama kuvvetinin kontrol sorunu ve his geri bildirim eksikliği sorunlarına bir çözüm niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: His geri bildirimi, Kuvvet kontrolü, Robot el, Haptik sistem, Bulanık mantık

Fuzzy Logic Based Force Control of Robot Hand with Haptic Feedback

ABSTRACT: In the presented study; work has been done for a robotic hand system controlled by the user. In order to ensure the object grip force sensitivity of the system focused on control problem of clutch force. In addition, a haptic feedback system is provided for feedback to the user of the force applied to the object. Fuzzy logic is proposed and implemented for controlling the force exerted by the robot hand on objects in accordance with the user command. The user can send different gripping commands to the fuzzy logic control system such as grasp, drop and tight grasp. The fuzzy logic controller controls the force applied to the objects in according to the user command. In addition, the data from the force sensor are evaluated by fuzzy logic controller. As a result of the evaluation, the vibration intensity of the vibration motors in the haptic feedback system is adjusted. Thus, the user can feel the grasping force of the objects. Besides, the robot hand has been grasping the objects in the appropriate force range according to the user command. The created system is provides a solution to the problem of force control and lack of haptic feedback in robot hand applications.

Key Words: Haptic feedback, Force control, Robot hand, Haptic system, Fuzzy logic

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Robot manipülatörlerden biri olan robot el, üretimden araştırmaya, askeri alandan protez olarak kullanıma kadar çeşitli kullanım alanlarına sahiptir (Michalec, 2011). Farklı alanlarda kullanılsa da robot ellerin objeleri kavrama kuvvetinin kontrolü önem arz etmektedir. Geçmişten bugüne robot ellerde kuvvet kontrolü üzerine birçok çalışma yapılmış ve geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir. Bekey ve diğ. (1990), Belgrade isimli 5 parmaklı kavrayıcı ve kavrayıcı için kontrol algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirilen kontrol algoritmasının; görev bilgisi ile istenilen kavrama modunu üretmekte olduğunu ve kavrayıcının hedef kuvvete ulaşana kadar parmaklarının kapatma işlemine devam ettiğini çalışmalarında sunmuşlardır. Pons ve diğ. (2004) yapmış oldukları çalışmada, 5 parmaklı robot el bir kullanıcı tarafından EMG (Elektromiyografi) sensörü ile kontrol edilmektedir. PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrolle konum ve kuvvet sensörlerinden gelen verileri işleyerek robot elin parmağının uyguladığı torku kontrol etmişlerdir. Berselli ve diğ. (2009) yapmış oldukları çalışmada, parmağa entegre edilmiş dokunma sensörleri, optik gerilim sensörü ve minyatür yük sensörü ile yenilikçi bir parmak tasarlamışlardır. Parmakların hareketi tendonlar ile sağlanmakta olup, çalışmalarında parmakların eklem açılarını ve nesneye uygulanan kuvveti kontrol etmişlerdir. Kuo ve Chen (2010) çalışmalarında, 5 parmaklı robot el üzerinde kuvvet geri beslemeli kontrol uygulamışlardır. Robot el parmak uçlarına yerleştirilen kuvvet sensörleri ile maksimum izin verilen kuvvete kadar kuvvet uygulayabilmektedir. Sistem bütün parmaklarından kuvvet verisi alana kadar kavrama işlemine devam etmektedir. Savic ve diğ. (2016), 5 parmaklı robot elde parmakların ucunda ve tabanlarında 3 eksenli kuvvet sensörü kullanarak farklı mekanik özellikteki nesnelere hassas kavranmasını sağlamış olduklarını belirtmişlerdir. Delgado ve diğ. (2017) çalışmalarında, 5 parmaklı shadow el kullanmışlardır. Deformasyona uğrayan malzemeleri kavramak için keşif, modelleme, kontrol aşamalarından oluşan 3 aşamalı bir kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Konum ve kuvvet sensörü verileri ile boyut ve yumuşaklık keşfi yapılarak güvenli bir kavrayış elde ettiklerini sunmuşlardır. Vulliez ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, tendonlarla sürülen 4 parmaklı elde pozisyon geri beslemesi ve PI kontrolcü ile eklem pozisyon kontrolü sağlamışlardır. Her parmağın gerçek zamanlı hibrit kuvvet/pozisyon kontrolü yapabilme yeteneğine sahip olduğunu sunmuşlardır. Farklı parmak sayısına sahip robot el ve kavrayıcı sistemleri için uygulama alanlarına yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Acar ve diğ., 2018; Conker ve Karaca, 2019). Sunulan bu çalışmada 5 parmaklı robot el kullanılmıştır. Robot el sistemi çok girdili ve çok çıktılı bir yapıya sahiptir. Bu tip sistemlerin doğrusal bir modelinin elde edilmesi ve kontrolü karmaşık bir konudur (Lin ve Huang, 1996; Katibeha ve diğ., 2016; Yang ve diğ., 2017). Bu sebeple sunulan çalışmada robot elin kullanıcının gönderdiği komut doğrultusunda objenin kavranma kuvvetine karar vermesi için bulanık mantıkla bir kontrol sistemi oluşturulmuştur. Sistemde bulanık mantık; sezgisel uygulamalarda iyi sonuçlar vermesi sebebiyle tercih edilmiştir (Karaca ve Conker, 2018). Bulanık mantık kontrol sistemine kullanıcı tut, sık, bırak gibi komutlar göndermektedir. Bulanık mantık kontrol sistemi ise kullanıcı komutunu ve avuç içi ile parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü verilerini değerlendirerek, robot elin parmaklarını kontrol eden servo motorlara uygun kontrol sinyalinin göndermektedir. Bulanık mantık kontrol sisteminin kararı doğrultusunda servo motorun konum kontrolü sağlanmakta dolayısıyla parmaklar açılmakta veya kapanmaktadır. Bu işlem sonucunda nesnenin kavranma kuvveti ayarlanmakta ve nesne uygun kuvvette kavranabilmektedir.

Kuvvet kontrolünde, kullanıcının nesneyi ne kadar kuvvette sıkıldığını hissedememesi ve bunun sonucunda nesneye istemeden zarar vermesi de önemli bir sorun teşkil etmektedir (Karaca ve Conker, 2018). Sunulan çalışmada bu sorunun çözümü için haptik geri bildirim sistemi kullanılmıştır. Haptik sistemler ile insanlara dokunsal bildirim sağlanması amaçlanmaktadır (Üstünel, 2014). Witteveen ve diğ. (2012), bir grup protez kullanıcısının protez kullanımında görsel, vibrotaktil ve elektro dokunsal bildirim ile performanslarını karşılaştırmışlardır. Yapılan deneylerde, elektro dokunsal bildirim vibrotaktil (titreşim uyaranlı) bildirimle göre daha kullanışsız ve ağrılı olduğu sonucuna ulaşıldığını bildirmişlerdir. Hem görsel hem de vibrotaktil beslemenin birlikte kullanımıyla kavrama işlemlerinin daha başarılı gerçekleştirildiğini belirtmişlerdir. Brown ve diğ. (2013), dirseğe uygulanan haptik geri bildirim ile katılımcıların işlevsel kavrama ve yük kaldırmadaki başarısını denetlemişlerdir. Katılımcılar

EMG (Elektromiyografi) sensörü ile protez eli kontrol etmiştir. Bu protezin kontrolünü titreşim geri bildirimle ve geri bildirimlessiz olarak test etmişlerdir. Titreşim geri bildirim ile kavrama ve kuvvet kontrolünde katılımcıların çok daha başarılı olduğunu tespit ettiklerini bildirmişlerdir. Casini ve diğ. (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 bildirimini yapmaktadır. Sistem temeli elastik bir kayış ve kayışın sarılmasını sağlayan bir doğru akım (DA) motordan oluşmaktadır. Sistem farklı sertlikteki süngerlerin kavranmasında test edilmiş, kullanıcının süngerlerin sertliğini sıralaması istenmiştir. Kullanıcının başarı ile sünger sertliklerini ayırt edebildiğini çalışmalarında sunmuşlardır. Bu çalışmalara bakıldığında sistemlerin kuvvet-pozisyon kontrollerinde haptik bildirim sisteminin önemli bir yeri olduğu görülmektedir. Kullanıcıların robot el sistemini hassas kontrol edebilmesi için haptik geri bildirim sisteminin de hassas olması önemli bir parametredir. Bu sebeple kuvvet sensörü verileri uygun bir şekilde işlenmeli ve haptik geri bildirim sistemi kontrol edilmelidir (Karaca ve Conker, 2018). Sunulan bu çalışmada lineer olmayan sensör verileri bulanık mantık kontrol sistemi ile değerlendirilmiştir. Haptik geri bildirim sisteminde titreşim motorlarının kullanımıyla daha başarılı sonuçlar elde edilmesi sebebiyle sistemde titreşim motorları kullanılmıştır (Brown ve diğ., 2013; Karaca ve Conker, 2018). Kuvvet sensörü verileri bulanık mantıkla işlenmekte ve titreşim motorlarına gönderilecek uygun PWM (Darbe Genişliği Modülasyonu) sinyaline karar verilmektedir. Bu sayede kullanıcı artan veya azalan titreşim şiddeti ile nesneyi ne kadar kuvvette kavradığını hissetmektedir. Sistemin kendi kendini kontrol ederek kullanıcı komutu doğrultusunda nesneyi uygun kuvvette kavraması ve kullanıcıya haptik geri bildirim sistemi ile kavrama kuvvetinin bildirilmesi sayesinde robot el sistemini kullanıcı daha başarılı bir şekilde kontrol edebilmektedir.

Sunulan çalışmanın giriş bölümünde robot el ve haptik bildirim sistemleri hakkında bilgi verilmiş, bu sistemlerde karşılaşılan problemlere değinilerek çözüm önerisinde bulunulmuştur. Ardından üzerinde çalışma yapılan robot el ve haptik geri bildirim sistemleri tanıtılmış, sistemin elektronik donanım yapısı sunulmuştur. Çalışmanın 3. bölümünde robot el ve haptik geri bildirim sistemi için oluşturulan bulanık mantık kontrol yapısı detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Robot el ve haptik geri bildirim sistemi test edilmiş, elde edilen deney sonuçları 4. bölümde grafik ve resimler ile sunulmuştur. 5. Bölümde ise bu çalışma kapsamında tartışılan, test edilen yöntem hakkında kısa bir değerlendirme yapılmıştır.

SİSTEM YAPISI (SYSTEM STRUCTURE)

Sistem yapısı robot el ve haptik geri bildirim sistemi olmak üzere 2 bölümden oluşmaktadır. Robot el 5 parmaklı olup, insan eli boyutundadır. Her bir parmak 1 adet servo motor ile sürülmektedir. Servo motorlardan güç ve hareket iletimi tendonlar ile sağlanmaktadır. Servo motorlar ön kolda yer almaktadır. Robot elin nesnelere uyguladığı kuvvetin ölçülebilmesi için parmak uçlarına ve avuç içine kuvvet sensörleri yerleştirilmiştir (Karaca ve Conker, 2018). Kavranan nesnelere kaymaması ve kuvvet sensörlerine temasın daha iyi bir şekilde sağlanması için parmak uçları ve avuç içi yüzeyi silikon ile kaplanmıştır. Oluşturulan robot el sistemi Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Robot el

Figure 1. Robot hand

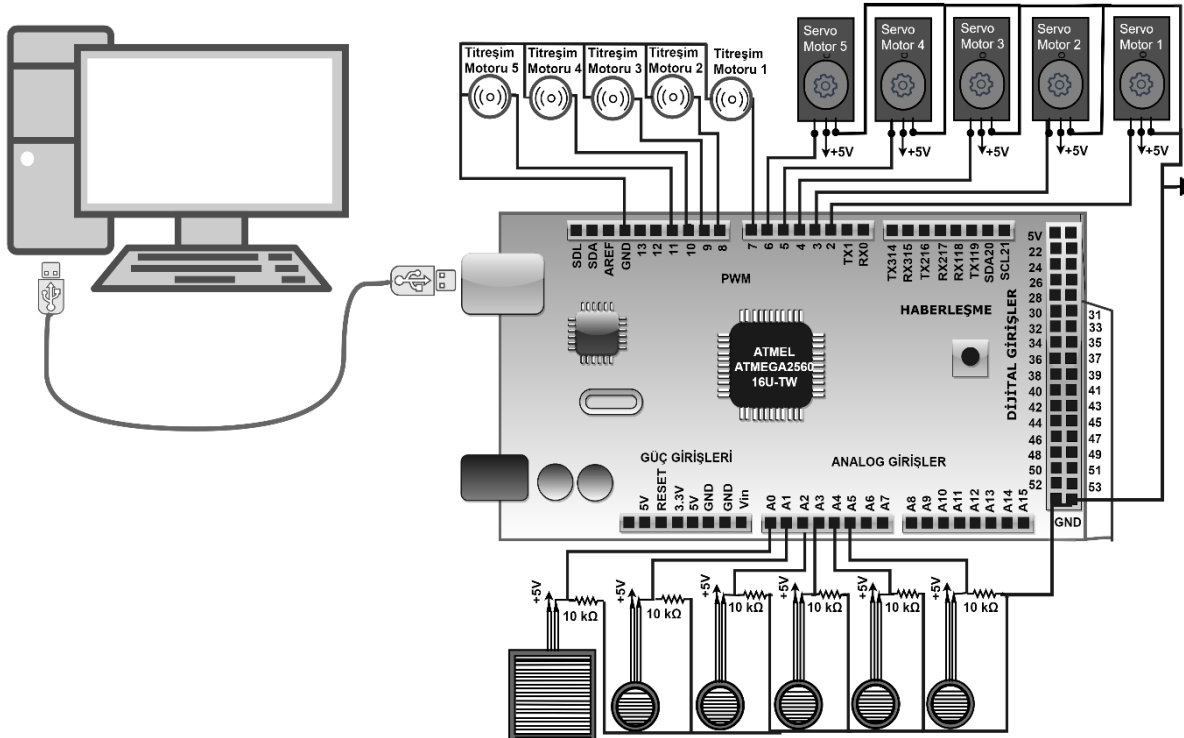
Haptik geri bildirim sisteminde her bir parmak için 1 adet olmak üzere 5 adet mini titreşim motoru kullanılmıştır. Bu sayede her bir parmak için haptik geri bildirim yapılabilmesi sağlanmaktadır. Titreşim motorları kol bandına yerleştirilmiştir. Haptik geri bildirim sistemi Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Haptik geri bildirim sistemi

Figure 2. Haptic feedback system

Haptik geri bildirim ve robot el sisteminde motorlara uygun kontrol sinyallerinin gönderilmesi, bilgisayar ile haberleşmenin sağlanması ve sensörlerden verilerin okunması için Arduino Mega kullanılmıştır. Sistemde bulunan elektronik donanımın bağlantı yapısı Şekil 3’te verilmiştir.

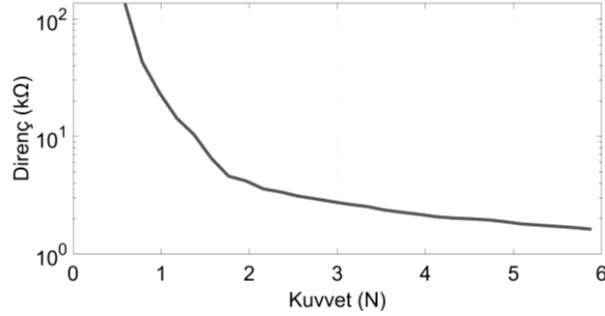


Şekil 3. Sistemin elektronik donanım yapısı

Figure 3. Electronic hardware structure of the system

Kuvvet Sensörü (Force Sensor)

FSR (kuvvete duyarlı direnç) üzerine uygulanan kuvvetin değişmesi ile dirençte değişim gösteren elektronik bileşendir. Robot el üzerine yerleştirilen kuvvet sensörü üzerine farklı kuvvetler uygulanarak kuvvet direnç değişimi test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 4'te direnç değişimi logaritmik, kuvvet değişimi lineer olarak verilmiştir.

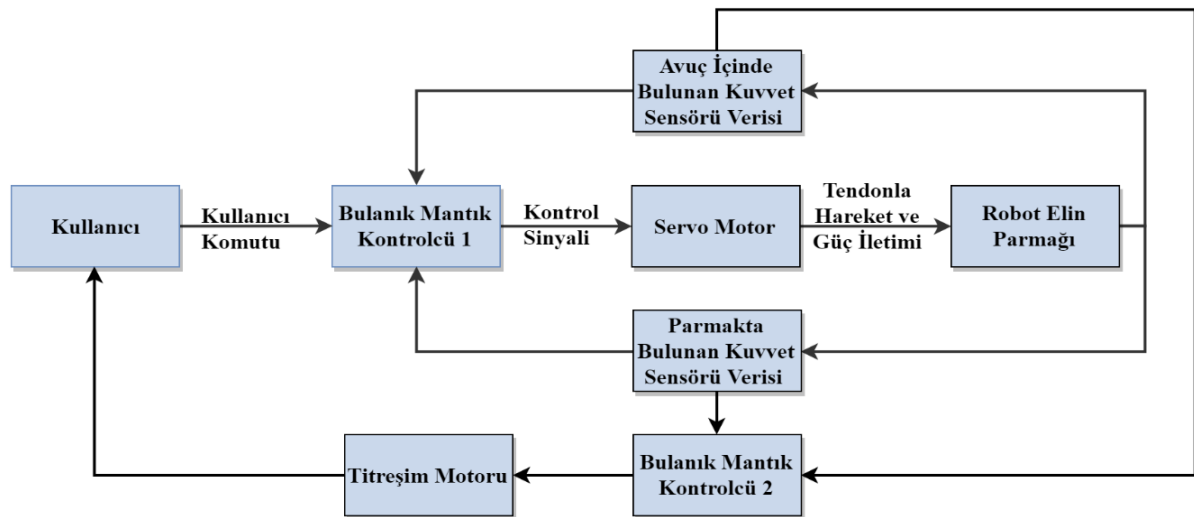


Şekil 4. Kuvvet sensörü kuvvet-direnç eğrisi

Figure 4. Force sensor force-resistance curve

KONTROL YAPISI (CONTROL STRUCTURE)

Haptik geri bildirim ve robot elin kuvvet kontrolü için ayrı ayrı bulanık mantık kontrol yapısı oluşturulmuştur. Haptik geri bildirim sistemi için bulanık mantık kontrolcü parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verilerine göre karar vermektedir. Kuvvet kontrolü için ise bulanık mantık kontrol sistemi kullanıcı komutu, parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verileri doğrultusunda karar vererek kontrol sinyalini belirlemektedir. Kullanıcı kavrama komutlarını joystick yardımı ile göndermektedir. Şekil 5'te haptik geri bildirim ve robot elin kuvvet kontrolü için oluşturulan sistemin blok diyagramı ile gösterimi sunulmuştur. Şekil 5'te bulanık mantık kontrolcü-1; robot elin kuvvet kontrolünü yapmakta, bulanık mantık kontrolcü-2 ise haptik bildirim sisteminde bulunan titreşim motorlarını kontrol etmektedir.

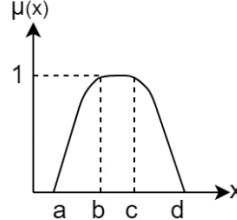


Şekil 5. Kontrol sisteminin blok diyagramı

Figure 5. Block diagram of control system

Bulanık mantık kontrol sisteminde sözel veriler (Kalyoncu ve Haydim, 2009) ile üyelik kümeleri tanımlanmıştır. Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Kuvvet sensöründen kuvvete göre elde edilen sayısal değerler lineer bir şekilde değişmemektedir. Sistem nonlineer bir yapıdadır. Sistem

kontrolünde hem hassasiyetin sağlanması hem de daha genel bir üyelik fonksiyon modeli oluşturulması (Shen ve diğ., 2000) için simetrik olmayan pi üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Pi üyelik fonksiyonu daha iyi bir istikrar ve daha hızlı yakınsama sağlamaktadır (Surajudeen-Bakinde ve diğ., 2018). Pi üyelik fonksiyonu eğrisinin sol tarafı S-üyelik fonksiyonu, sağ tarafı Z-üyelik fonksiyonundan oluşmaktadır (Hajian ve Styles, 2018). Pi-üyelik fonksiyonu Şekil 6'da, üyelik derecesini veren eşitlik Denklem 1'de verilmiştir.



Şekil 6. Pi-üyelik fonksiyonu
Figure 6. Pi-membership function

Şekil 6'da $\mu(x)$; üyelik derecesini, a, b, c ve d ise üyelik fonksiyonunun sınırlarını belirtmektedir.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , & x \leq a \\ 2x \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2 & , & a < x \leq (a+b)/2 \\ 1 - 2x \left(\frac{x-b}{b-a} \right)^2 & , & (a+b)/2 < x < b \\ 1 & , & b \leq x \leq c \\ 1 - 2x \left(\frac{x-c}{d-c} \right)^2 & , & c < x \leq (c+d)/2 \\ 2x \left(\frac{x-d}{d-c} \right)^2 & , & (c+d)/2 < x < d \\ 0 & , & x \geq d \end{cases} \quad (1)$$

Haptik Geri Bildirim Sisteminin Bulanık Mantık Kontrol Yapısı (Fuzzy Logic Control Structure of Haptic Feedback System)

Haptik geri bildirim sistemi için bulanık mantık kontrol sistemi (Bulanık mantık kontrolcü-2) kuvvet sensörü verilerini değerlendirerek titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyaline karar vermektedir. Kuvvet sensörü verilerinin bulanık mantıkla değerlendirilmesi için mantık kontrolcüde 3x3(9) adet kural tanımlaması yapılmıştır. Tanımlaması yapılan kurallar Çizelge 1'de verilmiştir. Kuvvet sensörü verileri Az, Orta ve Çok olmak üzere 3 üyelik kümesinde tanımlanmıştır. Kuvvet sensörleri verileri doğrultusunda titreşim motorlarına gönderilecek PWM sinyali Az, Az-Orta, Orta, Çok-Orta ve Çok olmak üzere 5 üyelik kümesinde tanımlanmıştır.

Çizelge 1. Kural tablosu-1

Table 1. Rule table-1

Avuç içinde bulunan sensörü	Parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü		
	Az	Orta	Çok
Az	Az	Az-Orta	Orta
Orta	Az-Orta	Orta	Çok-Orta
Çok	Orta	Çok-Orta	Çok

Girdi üyelik kümesi parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir. Kuvvet sensörü 0-5886 milinewton aralığında test edilmiş, 0-880 aralığında sayısal değerler elde edilmiştir. Girdi üyelik kümeleri kuvvet sensörlerine kuvvet uygulandığında elde edilen sayısal değerler doğrultusunda oluşturulmuştur. Çizelge 2’de hem kuvvet değeri hem kuvvet sensöründen elde edilen sayısal değerlere göre girdi üyelik kümesi parametreleri verilmiştir.

Çizelge 2. Kuvvet sensörleri bulanık mantık üyelik kümesi parametreleri

Table 2. Fuzzy logic membership function parameters of force sensors

Parmak ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörlerinin üyelik kümesi isimleri	Kuvvet sensöründen elde edilen sayısal değere göre üyelik kümesi parametreleri	Kuvvet sensöründen elde edilen sayısal değerlere karşılık gelen kuvvet (mN)
Az	[0 0 0 800]	[0 0 0 2943]
Orta	[0 800 800 880]	[0 2943 2943 5886]
Çok	[800 880 880 880]	[2943 5886 5886 5886]

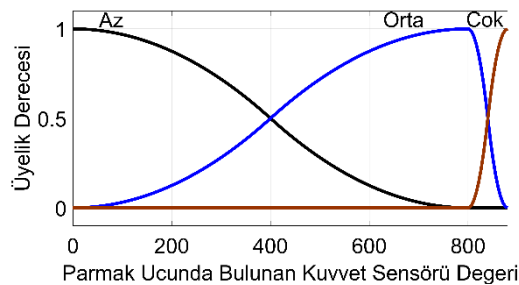
Çizelge 3’te ise titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalinin üyelik kümelerinin parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3. Titreşim motorunun bulanık mantık üyelik kümesi parametreleri

Table 3. Fuzzy logic membership function parameters of vibration motor

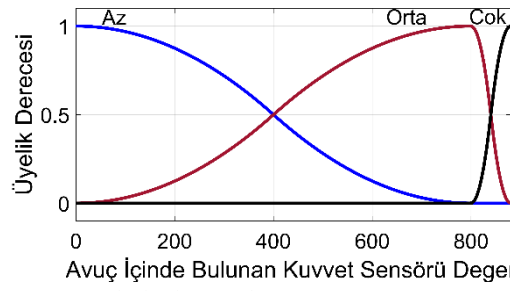
Üyelik kümesi isimleri	Üyelik kümesi parametreleri
Az	[0 0 27 84]
Az-Orta	[27 84 84 141]
Orta	[84 141 141 198]
Çok-Orta	[141 198 198 255]
Çok	[198 255 255 255]

Çizelge 2 ve Çizelge 3’te verilen parametreler ile tanımlanan üyelik kümeleri Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8’de üyelik kümelerinin başlangıç ve tepe, tepe ve bitiş noktaları kuvvete göre eşit aralıklarla tanımlanmıştır.



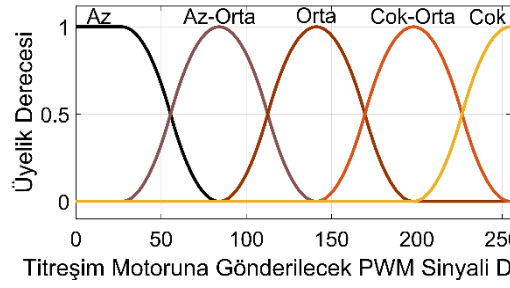
Şekil 7. Parmakta bulunan kuvvet sensörünün üyelik kümeleri

Figure 7. Membership function of force sensor on finger



Şekil 8. Avuç içinde bulunan kuvvet sensörünün üyelik kümeleri

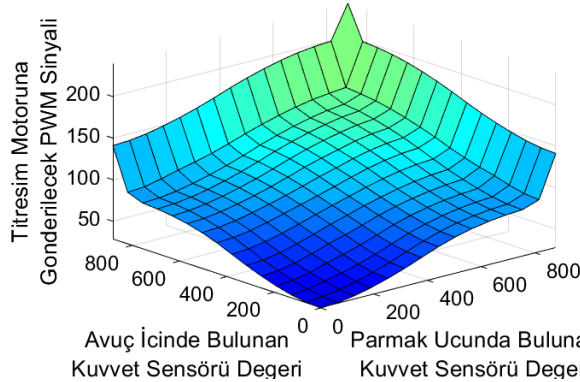
Figure 8. Membership function of force sensor in the palm



Şekil 9. Titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyalinin üyelik kümeleri

Figure 9. Membership function of the PWM signal to be sent to the vibration motor

Bulanık mantık kontrolcü-2'de; girdi üyelik kümeleri ile çıktı değeri ağırlık merkezi yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyali elde edilmiştir. Oluşturulan bulanık mantık kontrolcünün yüzey grafiği ise Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Bulanık mantık kontrolcü-2 yüzey grafiği

Figure 10. Fuzzy logic controller-2 surface

Robot Elin Kuvvet Kontrol Yapısı (Force Control Structure of Robot Hand)

Robot elin kuvvet kontrolünde bulanık mantık kontrolcü-1; parmakta ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verilerini kullanıcı komutu doğrultusunda değerlendirerek servo motorun açı kontrolünü sağlamaktadır. Parmakları kontrol eden servo motorun açı kontrolü ile parmakların açılıp kapanması veya nesnelere uygulanan kuvvet kontrol edilmektedir. Bulanık mantık kontrolcü-1'de kuvvet sensörü verileri için Az, Orta ve Çok olmak 3 üyelik kümesi tanımlanmıştır. Bu üyelik kümelerinin parametre aralıkları haptik geri bildirim sisteminde bulunan kuvvet sensörü parametre aralıklarıyla aynı olup Çizelge 2'de verilmiştir. Bulanık mantık kontrolcü-1 için önce kuvvet sensörü verileri ile kural tablosu oluşturulmuş daha sonra bu kural tablosundan elde edilen durumlar ile kullanıcı komutu değerlendirilerek kural tablosu-3 oluşturulmuştur. Kuvvet sensörü verileri için oluşturulan kural tablosu Çizelge 4'te kural tablosu-2 olarak sunulmuştur. Burada kuvvet

sensörlerinden gelen veriler doğrultusunda; Az, Az-Orta, Orta, Çok-Orta ve Çok olmak üzere 5 durum elde edilmiştir. Kuvvet sensörü verileri ve kullanıcı komutu doğrultusunda oluşturulan kural tablosu ise Çizelge 5'te kural tablosu-3 olarak verilmiştir. Kullanıcı komutu; bırak, hafif tut, tut, hafif sık, sık olmak üzere 5 üyelik kümesinde tanımlanmıştır. Oluşturulan kural tabloları doğrultusunda 3x3x5 (45) adet kural tanımlaması yapılmıştır. Burada çıktı olarak NB (Negatif-Büyük), NK (Negatif-Küçük), S (Sıfır), PK (Pozitif-Küçük), PB (Pozitif Büyük) olmak üzere 5 çıktı kümesi tanımlanmıştır.

Çizelge 4. Kural tablosu-2

Table 4. Rule table-2

Avuç içinde bulunan kuvvet sensörü	Parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü			
		Az	Orta	Çok
	Az	Az	Az-Orta	Orta
	Orta	Az-Orta	Orta	Çok-Orta
	Çok	Orta	Çok-Orta	Çok

Çizelge 5. Kural tablosu-3

Table 5. Rule table-3

Kural Tablosu 2'den elde edilen sonuç	Kullanıcı kavrama komutu					
		Bırak	Hafif-Tut	Tut	Hafif-Sık	Sık
	Az	NK	PK	PK	PB	PB
	Az-Orta	NK	S	PK	PK	PB
	Orta	NB	NK	S	PK	PB
	Çok-Orta	NB	NK	NK	S	PK
	Çok	NB	NB	NB	NK	S

Kullanıcının gönderdiği kavrama komutlarının bulanık mantık üyelik kümesi parametreleri Çizelge 6'da sunulmuştur. Servo motorun hareket miktarını veren bulanık mantık çıktı üyelik kümesinin parametreleri ise Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 6. Kullanıcının gönderdiği kavrama komutlarının üyelik kümesi parametreleri

Table 6. Membership function parameters of the clutch commands sent by the user

Üyelik kümesi isimleri	Üyelik kümesi parametreleri
Bırak	[0 0 0 256]
Hafif-Tut	[0 256 256 512]
Tut	[256 512 512 768]
Hafif-Sık	[512 768 768 1023]
Sık	[768 1023 1023 1023]

Çizelge 7. Servo motorun üyelik kümesi parametreleri

Table 7. Membership function parameters of servo motor

Üyelik kümesi isimleri	Üyelik küme parametreleri
Negatif-Büyük	[-8 -8 -8 -4]
Negatif-Küçük	[-8 -4 -4 0]
Sıfır	[-4 0 0 4]
Pozitif-Küçük	[0 4 4 8]
Pozitif-Büyük	[4 8 8 8]

Kuvvet sensörlerinin üyelik kümeleri haptik geri bildirim sistemindeki ile aynı olup Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Kullanıcının göndermiş olduğu kavrama komutlarını üyelik kümeleri Şekil 11'de, servo motorun konum kontrolü için oluşturulan üyelik kümeleri Şekil 12'de sunulmaktadır.

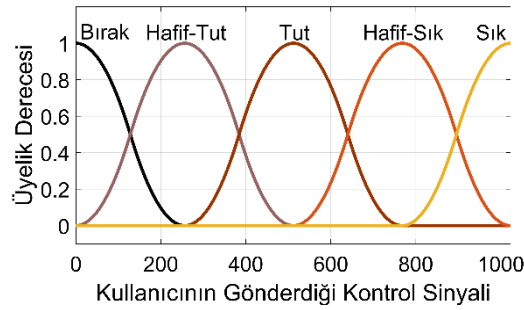
**Şekil 11.** Kullanıcının gönderdiği kavrama komutlarının üyelik kümeleri

Figure 11. Membership function of clutch commands sent by the user

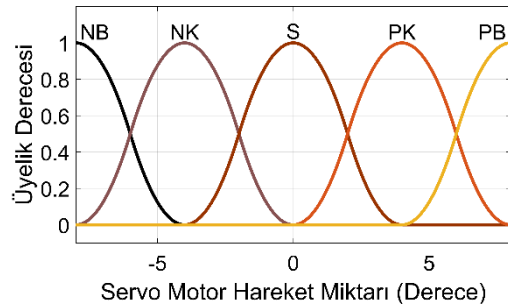
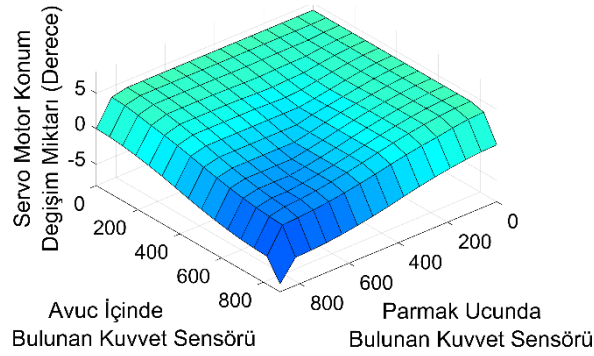
**Şekil 12.** Servo motorun hareket miktarının üyelik kümeleri

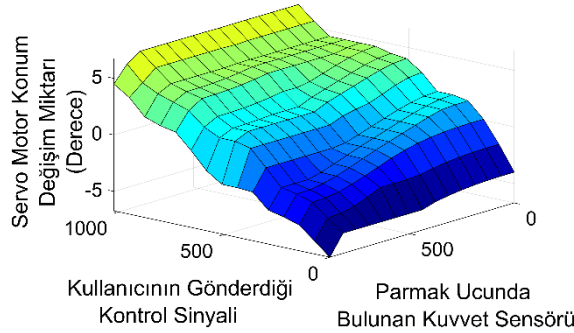
Figure 12. Membership function of servo motor

Girdi üyelik kümeleri ile çıktı üyelik kümeleri ağırlık merkezi yöntemi ile değerlendirilmekte ve çıktı değeri hesaplanmaktadır. Kuvvet kontrolü için oluşturulan bulanık mantık kontrol yapısına ait yüzey grafikleri Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'te sunulmuştur.



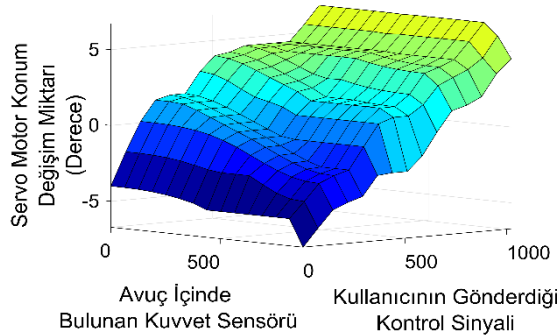
Şekil 13. Kuvvet sensörü verileri ile servo motorun bulanık mantık yüzey grafiği

Figure 13. Fuzzy logic surface of servo motor and force sensor data



Şekil 14. Kullanıcının gönderdiği kontrol sinyali, parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü verisi ve servo motorun konum değişimini veren bulanık mantık yüzey grafiği

Figure 14. Control signal, force sensor data at fingertip and fuzzy logic surface giving servo motor position change



Şekil 15. Avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verisi, kullanıcıyı gönderdiği kontrol sinyali ve servo motorun konum değişimini veren bulanık mantık yüzey grafiği

Figure 15. Control signal, force sensor data on the palm and fuzzy logic surface giving servo motor position change

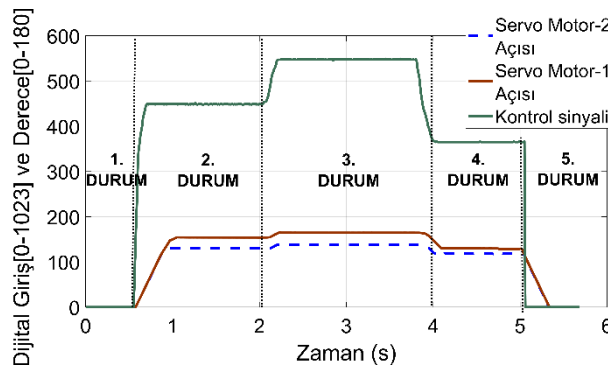
Robot el kullanıcı komutu doğrultusunda nesneye uygulayacağı kuvvete karar verebilmekte, parmaklarını nesnelere göre adaptif hareket ettirebilmektedir. Ayrıca kullanıcıya haptik bildirim yapılması ve haptik geri bildirim sisteminin hassaslaştırılması sayesinde; kullanıcının nesnelere kavraması esnasında his geri bildirim eksikliğinden ortaya çıkan hata payı azalacaktır. Kontrol yapısı 5 parmaklı robot el için oluşturulmuş olup farklı parmak sayısına sahip kavrayıcılara uygulanabilir yapıdadır.

BULGULAR (RESULTS)

Robot el için geliştirilen kontrol sistemi ve haptik geri bildirim sistemi test edilmiş, deney ve deney sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Deney ve deney sonuçları baş parmak ile işaret parmağı için verilmiştir. Geliştirilen kuvvet kontrolü sistemi ile kullanıcı komutu doğrultusunda nesnelere kuvvet uygulanmaktadır. Kullanıcının kavrama komutlarını gönderebilmesi için joystick kullanılmıştır.

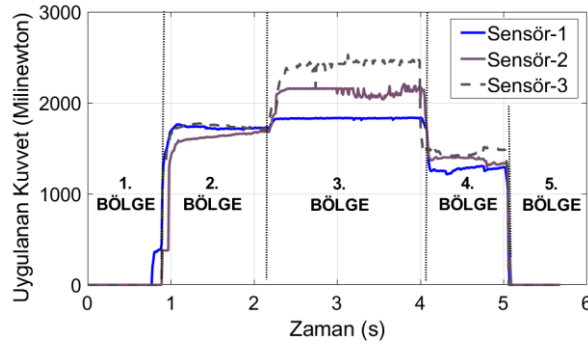
Joystick'den mikrodenetleyici 0 ile 1023 arasında değişen değerler elde etmektedir. Şekil 16'da; deney sırasında kullanıcının gönderdiği kontrol sinyali, başparmağı kontrol eden servo motorun (servo motor-1) açısı ve işaret parmağını kontrol eden servo motorun (servo motor-2) açısı verilmiştir. Şekil 17'de ise avuç içerisinde bulunan kuvvet sensöründen (sensör-1), başparmakta bulunan kuvvet sensöründen (sensör-2) ve işaret parmağında bulunan kuvvet sensöründen (sensör-3) elde edilen kuvvet verileri sunulmaktadır. Şekil 18 ve Şekil 19'da ise kuvvet sensöründen gelen veriler doğrultusunda titreşim motoruna gönderilecek PWM sinyali verilmiştir. PWM sinyalinde yüzde görev döngüsünün artması ile titreşim motoruna gönderilen ortalama gerilim miktarı artmaktadır. Gerilim miktarının artmasıyla motorun titreşim şiddeti yükselmektedir.

Bulanık mantık kontrolcü-1 kullanıcının gönderdiği kontrol sinyali doğrultusunda, her bir parmak için; parmakta bulunan kuvvet sensörü ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verilerini işleyerek nesnelere uygun kuvvette kavranmasını sağlamaktadır. Şekil 16 ve Şekil 17'de görüldüğü üzere her bir parmak ayrı ayrı kontrol edilmektedir. Bulanık mantık kontrolcü-2 ise kuvvet sensörü verilerine göre titreşim motorlarının titreşim şiddetini ayarlamaktadır. Her bir parmak için ayrı ayrı haptik geri bildirim yapabilen bir sistem oluşturulmuştur. Başparmağın haptik geri bildirimi için kullanılan titreşim motoruna gönderilen PWM sinyalleri Şekil 18'de, işaret parmağının titreşim motoruna gönderilen PWM sinyalleri Şekil 19'da verilmiştir. Deney sırasında başlangıçta bırak komutu gönderilmiş olup servo motorlar 0 konumundadır ve Şekil 17 1. bölgede görüldüğü üzere sensörlerden herhangi bir veri gelmemektedir. Şekil 16 2. durumda kullanıcının hafif-tut ile tut komutu arasında bir komut gönderilmiştir. Bulanık mantık kontrolcü bu komut doğrultusunda uygun kuvvette nesneyi kavramıştır. Nesneyi kavrama kuvveti Şekil 17 2. bölgede verilmiştir. Nesneyi kavradığı sırada kullanıcıya titreşim motorları ile his bildirim yapılmış olup titreşim motorlarına gönderilen PWM sinyalleri Şekil 18.a ve Şekil 19.a'da verilmiştir. Kullanıcı Şekil 16 3. durumda robot ele tut komutunu göndermiş, bu doğrultuda bulanık mantık kontrolcü servo motorlara sinyal göndererek, nesnenin kavrama kuvvetini arttırmıştır. Tut komutu doğrultusunda nesneye uygulanan kuvvet Şekil 17'de 3. bölgede verilmiştir. Nesneye uygulanan kuvvetin artması ile kullanıcıya hissettirilen titreşim şiddetide artmıştır. Titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali Şekil 18.b ve Şekil 19.b'de verilmiştir. Durum 4'te kullanıcı hafif-tut komutunu göndermiştir. Bulanık mantık kontrolcü kullanıcı komutu doğrultusunda parmakları kontrol eden servo motorlara kontrol sinyali göndererek, nesneye uygulanan kuvveti azaltmıştır. Nesneye uygulanan kuvvet Şekil 17'de 4. bölgede verilmiştir. Hafif-tut komutu esnasında titreşim motorlarına gönderilen PWM sinyalinin yüzde görev döngüsü azalmıştır. Dolayısıyla titreşim motorlarının titreşim şiddeti de azalmıştır. Hafif-tut komutu esnasında titreşim motorlarına gönderilen PWM sinyali Şekil 18.c ve Şekil 19.c'de verilmiştir. Şekil 16 5. durumda ise kullanıcının bırak komutu gönderilmiş ve parmaklar açılarak nesne bırakılmıştır. Bu sebeple Şekil 17 5. bölgede kuvvet sensörlerinden veri gelmemektedir. Kullanıcıya da herhangi bir his bildirim yapılmamaktadır.



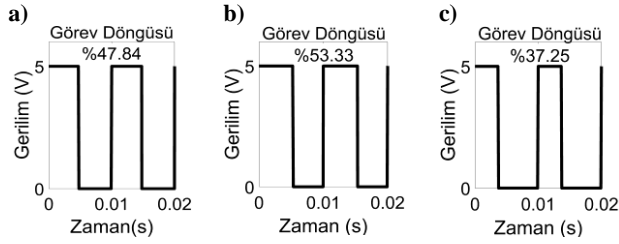
Şekil 16. Kullanıcının gönderdiği kontrol sinyali ve robot elin işaret ve başparmağını kontrol eden servo motorların konum verileri

Figure 16. The control signal sent by the user and the position data of the servo motors controlling the index finger and thumb of the robot hand



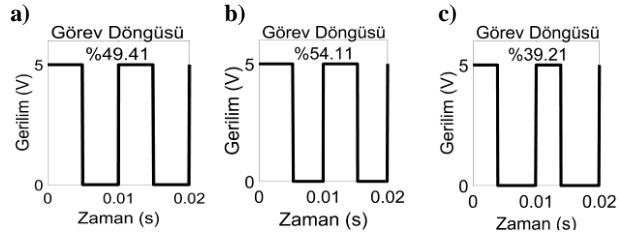
Şekil 17. Robot elin başparmağı, işaret parmağı ve avuç içinde bulunan kuvvet sensörü verileri

Figure 17. Force sensor data of robot hand's thumb, index finger and on the palm



Şekil 18. Robot elin başparmağının titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali

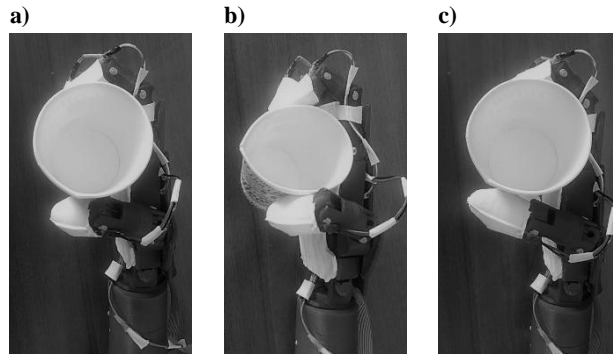
Figure 18. PWM signal sent to the vibration motor of the thumb of the robot hand



Şekil 19. Robot elin işaret parmağının titreşim motoruna gönderilen PWM sinyali

Figure 19. PWM signal sent to the vibration motor of the index finger of the robot hand

Şekil 16 ve Şekil 17'de verilen işlemler gerçekleşirken robot el ve kavradığı nesnenin (karton bardağın) durumu Şekil 20'de verilmiştir. Şekil 20'de a, b, c resimleri sırasıyla Şekil 17'de 2. bölge, 3. bölge ve 4. bölge ile gösterilen farklı kuvvet aralıklarının nesneye uygulanması ile elde edilmiştir.



Şekil 20. Robot el ve kavradığı nesnenin durumu

Figure 20. Robot hand and gripped object

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sunulan çalışmada robot el sistemine haptik geri bildirim sistemi entegre edilmiştir. Bu sayede kullanıcı nesnelere uyguladığı kuvveti daha hassas kontrol ederek, daha başarılı kavrama yapabilmektedir. Sistem kontrolünde sadece parmak ucunda bulunan kuvvet sensörü verisi değil avuç içinde bulunan kuvvet sensörünün de değerlendirilmesi ile; sadece parmakta bulunan kuvvet sensör verisini değerlendiren sistemlere (Antfolk ve diğ., 2013; Sartori ve diğ., 2016) göre nesneye uygulanan kuvvetin daha hassas bir şekilde kontrol edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca robot el sisteminin kuvvet kontrolü için bulanık mantık kontrolcü tasarlanmıştır. Bulanık mantığın sezgisel uygulamalarda iyi sonuçlar vermesi ve sözel verileri değerlendirmesi sistem için önem arz etmektedir. Bu kontrolcü vasıtasıyla robot elin her bir parmağı, kullanıcı tarafından gönderilen tek bir kontrol sinyaline göre nesneye uyguladığı kuvveti birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol etmektedir. Dolayısıyla robot elin parmakları kavranan nesnenin şekline göre farklı şekillerde hareket edebilmektedir. Robot el kullanıcısı, hem objeleri ne kadar kuvvetle sıkıldığını hissedebilmekte hem de sadece bir kavrama komutu göndererek nesnenin uygun kuvvette kavranmasını sağlayabilmektedir. Bu sebeple oluşturulan sistem objelerin kavranması esnasında oluşan kavrama kuvveti belirsizliği ve his geri bildirim eksikliği sorunlarına bir çözüm niteliğindedir. Her bir parmak için ayrı ayrı kuvvet kontrolü ve haptik geri bildirim sistemi oluşturulması sayesinde; oluşturulan kontrol yapısı ve haptik geri bildirim sistemi farklı parmak sayısına sahip sistemlere de uyarlanabilir yapıdadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Acar, O., Kalyoncu, M., Hassan, A., 2019, "The Bees' algorithm For Design Optimization of A Gripper Mechanism", *Selçuk-Teknik Dergisi*, 69-86.
- 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*, Cilt 21, Sayı 1, ss. 112-120.
- Bekey, G. A., Tomovic, R., Zeljkovic, I., 1990, "Control architecture for the Belgrade/USC hand", *Dextrous robot hands*, Springer, New York, NY, ss. 136-149.
- Berselli, G., Borghesan, G., Brandi, M., Melchiorri, C., Natale, C., Palli, G., Vassura, G., 2009, "Integrated mechatronic design for a new generation of robotic hands", *IFAC Proceedings Volumes*, Cilt 42, Sayı 16, ss. 8-13.
- Brown, J. D., Paek, A., Syed, M., O'Malley, M. K., Shewokis, P. A., Contreras-Vidal, J. L., Gillespie, R. B., "Understanding the role of haptic feedback in a teleoperated/prosthetic grasp and lift task", 2013 World Haptics Conference (WHC), 2013 April, ss. 271-276, IEEE.
- Casini, S., Morvidoni, M., Bianchi, M., Catalano, M., Grioli, G., Bicchi, A., "Design and realization of the cuff-clenching upper-limb force feedback wearable device for distributed mechano-tactile stimulation of normal and tangential skin forces", 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 September, ss. 1186-1193, IEEE.
- Conker, Ç., Karaca, A., 2019, " Bulanık Mantık Esaslı Karar Destek Sistemi ile Robot Elin Kuvvet Kontrolünün Sağlanması", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 21, Sayı 62, ss. 433-447.
- Delgado, A., Jara, C. A., 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.
- Hajian, A., Styles, P., 2018, *Application of Soft Computing and Intelligent Methods in Geophysics*, Springer, Cham.
- Kalyoncu, M., Haydim, M., 2009, " Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage" *Mechatronics*, Cilt 19, Sayı, 6, ss. 847-858.
- Karaca, A., Conker, Ç., " Bulanık Kontrolör Esaslı Haptik Robotik El", TOK2018 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Kayseri, 12-14 Eylül 2018.

- 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*, Cilt 4, No 4, ss. 51-61.
- Kuo, C. H., Chen, C. T., 2010, "Development of Tendon Based Dexterous Robot Hand", *Advances in Robot Manipulators*, IntechOpen.
- Lin, L. R., Huang, H. P., 1996, "Integrating fuzzy control of the dexterous National Taiwan University (NTU) hand", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Cilt 1, Sayı 3, ss. 216-229.
- Michalec, R., 2011, Modeling and control of multifingered dextrous manipulation for humanoid robot hands, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, PhD Thesis, Paris.
- Pons, J. L., Rocon, E., Ceres, R., Reynaerts, D., Saro, B., Levin, S., Van Moorlegghem, W., 2004, "The MANUS-HAND dextrous robotics upper limb prosthesis: mechanical and manipulation Aspects", *Autonomous Robots*, Cilt 16, Sayı 2, ss. 143-163.
- Sartori, E., Fiorini, P. and Muradore, R., "Cutaneous feedback in teleoperated robotic hands", In IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, October, 2016.
- Savić, S., Raković, M., Penčić, M., Nikolić, M., Dudić, S., Borovac, B., "Design of an Underactuated Adaptive Robotic Hand with Force Sensing", In International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN, Zlatibor, June 2016.
- Shen, J., Shen, W., Sun, H. J. and Yang, J. Y., 2000, "Fuzzy neural nets with non-symmetric π membership functions and applications in signal processing and image analysis", *Signal processing*, Cilt 80, Sayı 6, ss. 965-983.
- Surajudeen-Bakinde, N. T., Faruk, N., Popoola, S. I., Salman, M. A., Oloyede, A. A., Olawoyin, L. A. and Calafate, C. T., 2018, " Path loss predictions for multi-transmitter radio propagation in VHF bands using adaptive Neuro-Fuzzy inference system", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Cilt 21, Sayı 4, ss. 679-691.
- Üstünel, H., 2014, Üstün Yetenekli Öğrencilerin Kullanımı İçin Sanal Gerçeklik Ortamında Kuvvet Geribeslemeli Haptik Uygulamaların Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vulliez, P., Gazeau, J. P., Laguillaumie, P., Mnyusiwalla, H., Seguin, P., 2018, "Focus on the mechatronics design of a new dexterous robotic hand for inside hand Manipulation", *Robotica*, Cilt 36, Sayı 8, ss. 1206-1224.
- Witteveen, H. J., Droog, E. A., Rietman, J. S., Veltink, P. H., 2012, "Vibro-and electrotactile user feedback on hand opening for myoelectric forearm prostheses", *IEEE transactions on biomedical engineering*, Cilt 59, Sayı 8, ss.2219-2226.
- Yang, Y., Zhang, W., Xu, X., Hu, H., Hu, J., " 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 2017, Wuhan ,China, 739-751.