

CERRAHİ AMAÇLI BİR ROBOT KOLUNUN

TASARIMI VE UZAKTAN KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet YALVAÇ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ağustos, 2015

Bu tez çalışması 13.FEN.BİL.46 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CERRAHİ AMAÇLI BİR ROBOT KOLUNUN TASARIMI VE
UZAKTAN KONTROLÜ

Mehmet YALVAÇ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AĞUSTOS, 2015

TEZ ONAY SAYFASI

Mehmet YALVAÇ tarafından hazırlanan “**CERRAHİ AMAÇLI BİR ROBOT KOLUNUN TASARIMI VE UZAKTAN KONTROLÜ**” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 17/08/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ **Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

Başkan : Doç. Dr. Emin ERGÜN
Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İmza

Üye : Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İmza

Üye : Doç. Dr. Şükrü KARAKAYA
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

01/09/2015

İmza

Mehmet YALVAÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

CERRAHİ AMAÇLI BİR ROBOT KOLUNUN TASARIMI VE UZAKTAN KONTROLÜ

Mehmet YALVAÇ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

Bu çalışmada master/slave yöntemiyle kontrol edilen tek kollu cerrahi robot tasarımı ve uzaktan kontrolü hedeflenmiştir. Bu bağlamda öncelikle cerrahın kol ve parmak hareketlerini algılayan 5 serbestlik dereceli master kol tasarlanmıştır. Master kol cerrahın kol ve parmak hareketlerini hassas bir biçimde okuyarak (360⁰/4096 adım) bu verileri bağlı olduğu bilgisayara aktarmaktadır. Visual Studio C#.Net’de hazırlanan yazılım sayesinde master koldan gelen konum ve ivme bilgileri sürekli olarak alınarak işlenmekte ve icra edilmesi için yine aynı bilgisayara bağlı olan 5 serbestlik dereceli slave robot kola gönderilmektedir. Slave kol ise, anlık olarak gelen bu pozisyon bilgilerini eklem modunda geciktirmeksizin icra eder. Bu aktarım esnasında gelen konum bilgileri slave kolun hareket sınırları içerisinde ise icra edilir. Hareket sınırlarının dışında bir konum bilgisi gelse dahi slave kola bağlı olan servo motorlar bu komutları herhangi bir donanıma zarar vermemek veya zorlamamak için icra etmez. Slave kol, master koldan gelen parmak hareketlerini ise gövdesinin ucuna bağlı olan laparoskopik makasa aktarmaktadır. Ayrıca yine slave kol gövdesine monte edilmiş olan LED aydınlatmalı 720x480p çözünürlüğe sahip bir endoskopi kamerası, ameliyat ortamının görüntüsünü master kolu yönetmekte olan cerrahın gerçek zamanlı izlemesini sağlamaktadır.

2015, vii + 60 sayfa

Anahtar Kelimeler: Cerrahi robot, Master/Slave robotik sistem, Master robot, Slave robot, Servo motor, Laparoskopik cerrahi.

ABSTRACT
M. Sc. Thesis

DESIGN AND REMOTE CONTROL OF A SURGICAL ROBOTIC ARM

Mehmet YALVAÇ

Afyon Kocatepe University

Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Süleyman TAŞGETİREN

In this study, design and remote control of a single arm surgical robot is aimed by master/slave control method. In this context, primarily the master arm with 5 degrees of freedom is designed to detect the finger and arm movements of surgeon. The master arm reads the movements of the surgeon precisely (4096 steps/360⁰) and transfers these data to the connected computer. With the help of a software developed with Visual Studio C #.NET, the position and acceleration information from the master arm are continuously read and processed by the computer and transferred to the slave arm for execution. On the side of the slave arm, the codes listens the commands gathered from the master arm and process the information with the developed software in Visual Studio C # .Net. Commands are detected by the software is transferred to the slave arm in real time. Servo motors do not execute the commands outside of the working fields in order not to cause harm or over forcing the equipments. Slave arm transfers the finger movements from the master arm to the laparoscopic scissors attached to the end of the arm. Moreover an endoscopic camera with LED backlit and a resolution of 720x480p is mounted on the slave arm to monitor the operating environment by the surgeon in real-time.

2015, vii + 60 pages

Keywords: Surgical Robot, Master/Slave robotic system, Master robot, Slave robot, Servo-motor, Laparoscopic surgery.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN, deneysel ve analiz çalışmalarının yapılmasında 13.FEN.BİL.46 kodlu proje ile maddi destek sağlayan Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğüne (BAPK), araştırma ve katı modelleme süresince yardımlarını esirgemeyen Ar. Gör. Dr. Özgür VERİM, servo motorların kontrolü konusunda destek veren ABD Yale niversitesi'nden Dr. Adam SPIERS ve her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı değerli eşim Őeyma YALVAÇ'a teşekkür ederim.

Mehmet YALVAÇ
AFYONKARAHİSAR, 2015

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ	1
1.1 Cerrahi CAD/CAM.....	2
1.2 Cerrahi Robotlarda Kullanılan Teknoloji ve Tasarım Parametreleri.....	4
1.3 Amaç ve Kapsam	10
2. MATERYAL VE METOD.....	11
2.1 Materyal	11
2.1.1 Kullanılan Servo Motorlar	13
2.1.2 Kullanılan Servo Motorların Özellikleri.....	14
2.2 Metot.....	23
2.2.1 Kontrol Akış Diyagramı	24
3. BULGULAR.....	27
3.1 Sistem Tasarımı	27
3.2 Bilgisayar Yazılımı	34
3.3 Robot kollarının komut icra karşılaştırmaları.....	35
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	40
5. KAYNAKLAR	41
5.1 İnternet Kaynakları	58
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Robotik cerrahi alanında yapılan uluslararası yayınların yıllara göre değişimi.	2
Şekil 1.2 Robotun kontrolü için kullanılan bir master sistemi.	4
Şekil 1.3 Operasyon masasına göre robot pozisyonları a) Tek koldan dağılan çok kollu hareketli sistem, b) Gövdeden dağılan çok kollu hareketli sistem, c, d)Operasyon masasına monte edilen sistemi e) tavana monte edilen tek kollu sistem e) MR cihazına monte edilen sistem.	5
Şekil 1.4 Robotik sistemde sterilizasyon örnekleri.	6
Şekil 1.5 Robotik cerrahi için geliştirilmiş çeşitli end efektör tipleri.	8
Şekil 1.6 da Vinci robotik sisteminde laparoskopik cerrahide end efektörün vücuda gidiği noktanın sabitlenmesi sistemi.	9
Şekil 2.1 Servomotor iç yapısı.	11
Şekil 2.2 AC servomotor kesiti.	13
Şekil 2.3 Tezde kullanılan servo motorlar.	14
Şekil 2.4 PID Kazancı.	20
Şekil 2.5 Bağlantı aparatları.	23
Şekil 2.6 Kontrol akış diyagramı.	25
Şekil 3.1 Sistemin genel tasarımı.	28
Şekil 3.2 Solidworks katı modelleme.	29
Şekil 3.3 Master robot gripper kısmı.	29
Şekil 3.4 Master robot servo motor numaraları.	30
Şekil 3.5 Slave robot servo motor numaraları.	31
Şekil 3.6 Master robot.	32

Şekil 3.7 Slave robot.	33
Şekil 3.8 Bilgisayar yazılımı ana formu.	34
Şekil 3.9 Robot kontrol formu.	35
Şekil 3.10 Birinci serbestlik derecesi için motor pozisyonları.	36
Şekil 3.11 İkinci serbestlik derecesi için motor pozisyonları.	36
Şekil 3.12 Üçüncü serbestlik derecesi için motor pozisyonları.	37
Şekil 3.13 Dördüncü serbestlik derecesi için motor pozisyonları.	38
Şekil 3.14 Beşinci serbestlik derecesi için motor pozisyonları.	39

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Kontrol Tablosu (EEPROM).	17
Çizelge 2.2 Kontrol Tablosu (RAM).....	19
Çizelge 2.3 İtaat (uyum) eğimi ile PID arasındaki ilişki.....	24
Çizelge 3.1 Kontrol Limit Tablosu.....	32

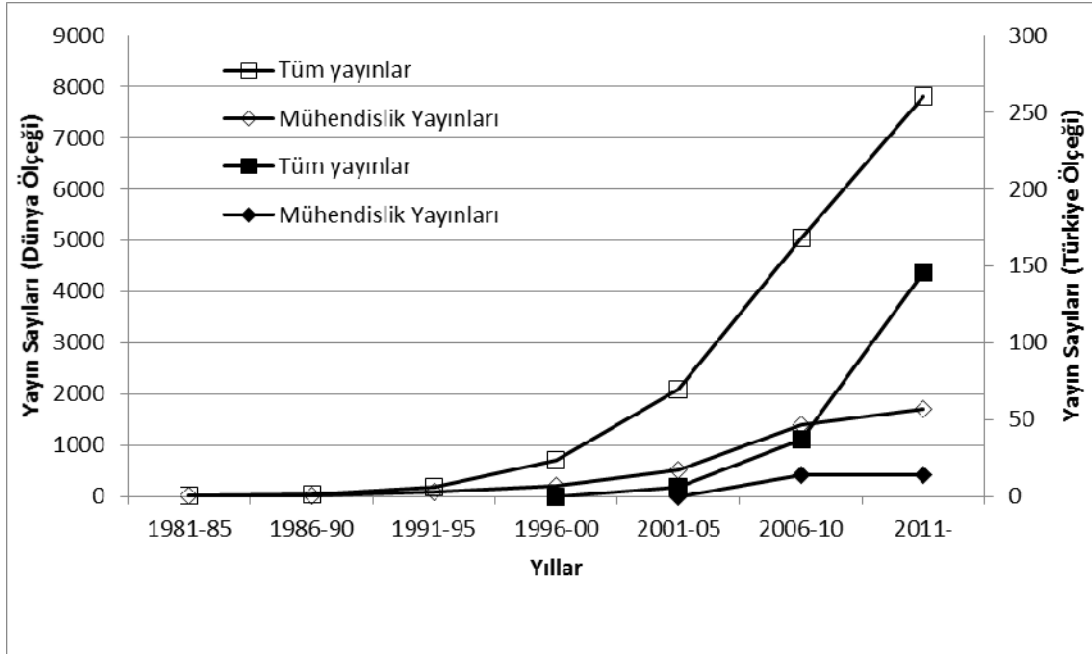
1. GİRİŞ

Sağladığı kolaylıklar nedeniyle, bilgisayar destekli sistemler her geçen gün insan hayatında daha fazla yer almaktadır. Bilgisayar destekli tasarım, üretim, eğitim gibi kavramlar uzun yıllardır kullanılmakta, bu kavramlar çerçevesinde geliştirilen sistemler de yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Cerrahi alanında bilgisayar desteğinin kullanımı önceleri bilgisayarla bütünleşik cerrahi (computer integrated surgery- CIS) ve bilgisayar destekli cerrahi (computer aided surgery-CAS) olarak kullanılmaya başlanmış, daha sonra medikal robotik adıyla yaygınlaşmıştır (Taylor ve Satainovic 2003).

Cerrahi alanında bilgisayarla bütünleşik sistemler, bilgisayar destekli ameliyat ya da medikal robotik olarak adlandırılan sistemlerin kullanımı 1980'li yıllarda başlamıştır (Jankovic and Fahn 1980, Confer and Bainbridge 1984, Gabrini *et al.* 1987, Kwoh *et al.* 1988, Charles *et al.* 1989, Guerroaud and Vidal 1989, Taylor *et al.* 1989). Bu çalışmaları takiben, bu alandaki çalışmalar hızlı bir artış göstermiştir. Taylor yaptığı 250'nin üzerindeki çalışmasıyla bilgisayarların cerrahi alanındaki kullanımının başlangıçtan beri öncüsü ve bu alandaki terminolojiyi oluşturan araştırmacı olmuştur (İnt.Kyn.1). Mart 2015 tarihinde Scopus veri tabanında "robotics" ve "surgery" kelimeleriyle yapılan taramada 15870 adet yayın bulunmuştur. Bu yayınların beşer yıllık aralıklara göre dağılımı Şekil 1.1'de verilmiştir. Şekilde ayrıca yayınlar içinden mühendislik alanlarında yapılanlar ayrılmış olarak da verilmiştir. Aynı şekilde bu alandaki Türkiye adresli yayınlar da gösterilmiştir.

Şekilden görüldüğü gibi, başlangıçta mühendislik ve sağlık alanındaki yayınlar başabaş seyrederken, ortaya konan cerrahi sistemlerin yaygınlık kazanmaya başladığı 1990'lı yıllardan itibaren sağlık alanındaki yayınlar hızla artmış, mühendislik alanındaki artış ise daha sınırlı kalmıştır. Bu alandaki Türkiye adresli yayınların toplamı 189 olup, ilk yayınlar 2000'li yıllardan itibaren görülmekte ve daha ziyade sağlık alanındaki çalışmaları içermektedir. Robot sistemlerinin tasarım ve üretimini içeren araştırma çalışmalarının yer aldığı mühendislik alanındaki çalışmalar ise daha sonra görülmeye başlanmış (2005 yılından itibaren) ve çok daha sınırlı oranda kalmıştır (Güven and Barkana 2010a, Güven and Barkana 2010b, Karadogan and Williams 2010, Turkseven and Ueda 2011, Güven and Barkana 2011, Bebek and Çavuşoğlu 2011, Sengül *et al.*

2013).



Şekil 1.1 Robotik cerrahi alanında yapılan uluslararası yayınların yıllara göre değişimi.

1.1 Cerrahi CAD/CAM

Cerrahi alanda bilgisayar desteği genellikle operasyon öncesi, operasyon esnasında ve operasyon sonrası bilgisayar desteği sağlanan aşamalardan meydana gelir. Operasyon öncesinde hastaya ait 2 veya 3 boyutlu görüntüler elde edilir ve bunlar hastanın diğer bilgileriyle birlikte cerrah tarafından değerlendirilir (Loser and Navab 2000, Kennedy *et al.* 2002, Krieger *et al.* 2005, Krieger *et al.* 2011, Li *et al.* 2011, Lordachita 2013, Blavier and Nyssen 2014, Yang *et al.* 2014, Li *et al.* 2015). Bu kapsamda hastanın durumuna yönelik olarak gerek yumuşak gerekse sert dokuya yönelik değerlendirmeler yapılabilir. Karaciğer bir örnek olarak alınırsa, burada bulunan lezyonun büyüklüğü ve pozisyonu, karaciğerdeki diğer anatomik yapılarla olan ilişkileri ve karaciğerin bir kısmının alınması durumunda kalan kısmın hacminin hesaplanması vb hususlar operasyon öncesi bilgisayar desteği için önemli noktadır (İnt.Kyn.2). Sert doku açısından ise kırık kemiklerin stabilizasyonu levha kullanımı durumunda levhanın kemik anatomisine uygun eğriliğe sahip olması, uygun matkap ve buna bağlı vida açılarının belirlenmesi ve gerekli klavuzların hazırlanması noktalarında bilgisayar desteğinden yararlanılabilir (İnt.Kyn.3).

Ameliyat esnasındaki bilgisayar desteği ise başlangıçta planlanan operasyondaki doğruluğun denetimi ve gerekli ise operasyon planının sürekli güncellenmesi açısından önemlidir. Operasyon esnasında bazı aşamaların doğrudan robot tarafından gerçekleştirilmesi de söz konusu olabilir. Bilgisayar desteği, ameliyat sonrası yapılacak değerlendirmeler için sürekli kayıt olarak envanter oluşturma açısından da önem kazanmaktadır. Bu sayede gerekli istatistiksel değerlendirmeler ve daha sonraki operasyonlar için kullanılabilen deneyimler doğrudan kayıt altına alınmış olur.

Cerrahi operasyon etkileşimli bir işlem olup birçok karar işlem sırasında alınır. Cerrahi robotiğin amacı, cerrahın yerini bir robotun alması değildir. Ancak operasyon sırasında cerraha operasyonu gerçekleştirilmesi için oldukça önemli yardımcı araçlar sağlama açısından cerrahi robotikten yararlanılmaktadır. Bu kapsamda kullanılabilen önemli yardımcılardan biri uzaktan müdahale araçlarıdır. Bu amaçlar kullanılan yardımcılardan biri doğrudan cerrah tarafından kullanılan ve cerrahın operasyon noktasına ulaşmasını sağlayan uzatma araçlarıdır. Bu araçlar cerrahın operasyon kabiliyetini artırarak ve cerrahın kaynaklanabilecek el titremesi gibi istenmeyen hareketleri hastaya yansıtmayarak yardımcı olmaktadır (Jankovic and Fahn 1980, Burgner *et al.* 2008, Burgner *et al.* 2009, Liu *et al.* 2011, Rocon 2014, Yang *et al.* 2015). Bu araçların yararlılığı başka şekilde tedavi edilmeyen olaylara müdahale imkanı vermesi, hata oranlarında azalma sağlama ve operasyon süresinde kısılma sağlama bağli olarak değerlendirilir. Diğer yardımcı araç grubu ise cerrahi destek araçlarıdır. Bu araçlar cerrahın hemen yanında kullanılır ve endoskop tutucu olarak veya retraksiyon gibi işlemler için kullanılır. Bu tipteki araçlar joystick, sesle kontrol veya cerrahın baş hareketlerinin izlenmesi gibi kontrol araçlarından biri ile kullanılır (Confer and Bainbridge 1984, Vaida 2010, Ishii and Futatsugi 2013, Kanno *et al.* 2013, Chen *et al.* 2014). Bu araçları daha akıllı hale getirmek daha fazla otomatik hareket yapmalarını sağlamak için çalışmalar yapılmaktadır. Bu sayede, cerrahın dikkatini daha az dağıtarak endoskopun doğrudan istenen anatomik noktaya hedeflenmesi veya cerrah tarafından kullanılan bir cerrahi aleti takip edecek şekilde yapılmaları sağlanabilmektedir (Şekil 1.2). Bunların değeri de uzaktan müdahale araçlarında olduğu gibi belirlenmekte, ayrıca operasyonun etkinliği de önemli bir kriter olarak değerlendirilmektedir (Fu *et al.* 2010, Baek *et al.* 2010, Guo, *et al.* 2011, Li *et al.* 2012, De Donno *et al.* 2013, Honda *et al.*

2013, Di Natali *et al.* 2015).



Şekil 1.2 Robotun kontrolü için kullanılan bir master sistemi.

1.2 Cerrahi Robotlarda Kullanılan Teknoloji ve Tasarım Parametreleri

Başlangıçta cerrahi robotlarda endüstriyel robotlarda kullanılan sistemler az bir değişiklikle kullanılmaya başlanmıştır (Kwoh *et al.* 1988, Garbini *et al.* 1987, Drake *et al.* 1991). Daha sonraları da başlangıç düzeyindeki çalışmalarda konsantrasyonu sistemin kinematiğine vermek istemeyen araştırmacılar tarafından endüstriyel robotlar kullanılabilir (Yanof *et al.* 2001, Kennedy *et al.* 2002, Miller *et al.* 2005, Ren and Meng 2011).

Cerrahi robotların operasyon odasına uygun bir yapıda olması gerekmektedir. Yeterli mukavemete, rijitliğe ve kullanım amacı için gerekli hareket kabiliyetine sahip olması gerekir. Robotun operasyon odasında hasta vücudunda çalışma yapılacak noktaya ulaşabilecek şekilde yerleştirilmesi gerekirken birlikte odadaki sağlık görevlilerinin hareketlerini engellemeyecek bir yapıda olması da gerekmektedir. Bu amaçla robot operasyon masası üzerine monte edilebildiği gibi (Sackier and Wang 1994, Ghodoussi *et al.* 2002), hastanın arka tarafına zemine veya tavana monte edilenleri de vardır (Kazanides *et al.* 1995, Guthart and Salisbury 2000, Kode and Çavuşoğlu 2007, Jingke *et al.* 2008, Cronin *et al.* 2008, Kratchman *et al.* 2011, Liang *et al.* 2011, Pisla 2012, Mintenbeck *et al.* 2013) (Şekil 1.3).

Robotun hasta ile temas edilen kısımları ile ameliyat odasında kontaminasyona neden olabilecek kısımlarının sterilize edilmesi veya steril malzemelerle kaplanması gerekir.



(a)



(b)



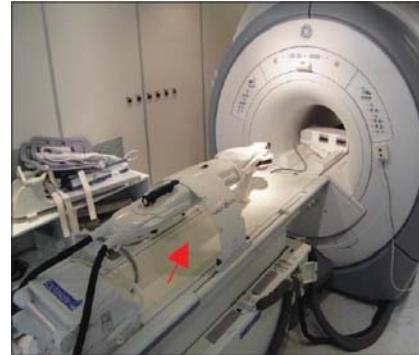
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 1.3 Operasyon masasına göre robot pozisyonları a) Tek koldan dağılan çok kollu hareketli sistem, b) Gövdeden dağılan çok kollu hareketli sistem, c, d)Operasyon masasına monte edilen sistemi e) tavana monte edilen tek kollu sistem f) MR cihazına monte edilen sistem.

En yaygın kullanılan yöntem robot gövdesinin önceden sterilize edilmiş malzemelerle kaplanması, end efektör ve bunu gövdeye bağlayan taşıyıcıların ise sterilize edilmesidir (Entsfellner *et al.* 2013).

End efektörün motor veya sensörle donatılmış olduğu durumlarda gaz ortamda bulundurma veya sıvıya batırma şeklindeki sterilizasyon kullanılırken bu alanda da otoklavda sterilizasyona yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 Robotik sistemde sterilizasyon örnekleri.

Kullanılan görüntü yönlendirme sistemleri olabildiğince küçük yapılar gerekliliğinin yanı sıra görüntünün netliği ve görüntüleme cihazları yardımıyla kontrol edilmeleri açısından da bazı önemli tasarım sınırlandırmaları içermektedir. MR cihazlarının robotlarla birlikte kullanılmaları durumunda ise ortaya çıkan manyetik alan nedeniyle ferromanyetik malzemelerin kullanımında önemli sorunlar ortaya çıkmaktadır (Chinzei *et al.* 1999, Chinzei *et al.* 2000 Greer *et al.* 2008, Stoyanov *et al.* 2010, Sun *et al.* 2014, Yu 2014). Ayrıca MR cihazlarındaki elektrik akımıyla robotik yardımcı sistemlerin kullandığı elektrik arasında girişim ve aşırı ısınma sorunları da ortaya çıkabilmektedir.

Tüm mühendislik alanlarında olduğu gibi güvenlik faktörü, tıbbi robotik alanında da önemli bir faktördür. Tüm tasarım, üretim ve kullanım aşamalarını içerecek şekilde güvenlik faktörünün göz önünde bulundurulması gereklidir (Simaan *et al.* 2004, Shin *et al.* 2006, Shinsuk 2006, Sharkey and Sharkey 2012, Jang and Kim 2013, Sanchez *et al.* 2013, Jin *et al.* 2014, Sullins 2014). Bu nedenle robotik sistemin tüm parçalarından hız sınırlarının doğru belirlenmesi, aktüatörlerde gereğinden fazla güç kullanılmaması, elektronik ve mekanik parçaların yerleşimi konusunda titizlik, acil stop düğmelerinin doğru belirlenmesi, kontrol ve yeniden başlatma aşamalarının iyi planlanması ve tasarım ve test aşamalarının doğru dökümantasyonu gibi hususlar tasarım ve prototip geliştirme çalışmalarında üzerinde önemle durulması gereken konulardır (Davies *et al.*

1996, Du *et al.* 2007, Farkoush *et al.* 2009, Chen *et al.* 2010, Kim *et al.* 2010, Guo and Gao 2010, Nelson and Zhang 2010, Ohno *et al.* 2010, Pisla 2010, Phee *et al.* 2010, Pisla *et al.* 2013a, Pisla *et al.* 2013b, Garg *et al.* 2014, Hong and Jo, 2014, Pile and Simaan 2014).

Tıbbi robot sistemlerinde göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörlerden biri de, robot sisteminin genel amaçlı mı yoksa sadece bir fonksiyonu yerine getirmek için mi tasarlanacağıdır. Genel amaçlı robotlar için söz konusu olan önemli kısıtlayıcılardan birisi sistemin kullanımı için ilgili otoritelerden izin alma noktasındaki zorluklardır. Tasarlanan robotik sistemin bir çok end efektörün takılmasına imkan sağlayacak şekilde yapılması önem arz etmektedir (Lee *et al.* 2009, Lee *et al.* 2009, Piccigallo *et al.* 2010, Terry *et al.* 2012, Choi *et al.* 2014, Seung *et al.* 2015). Ancak, sadece belirli fonksiyonları yerine getirmek amacıyla geliştirilmiş basit sistemlerin kullanımı da mümkündür (Stoianovici *et al.* 1997, Stoianovici *et al.* 1998 Xu *et al.* 2009, Burgner *et al.* 2009, Ding *et al.* 2010, Zahraee *et al.* 2010). Pasif olarak yönlendirilebilen robot kolları kılavuz amaçlı kullanım için yeterli olabilmektedir (Taylor *et al.* 1991, Taylor *et al.* 1992a, Taylor *et al.* 1992b, Potamianos *et al.* 1994, Schneider and Troccaz 2001, Lee *et al.* 2012, Rivas-Blanco *et al.* 2013, Rivas-Blanco *et al.* 2014) (Şekil 1.5).

Önemli bir tasarım yaklaşımı da robotik sistemin modüler olarak tasarlanmasıdır. Bu sistemde bilgisayar ve ona bağlı robot ana gövdesi standart olarak tasarlanırken, farklı amaçlar için geliştirilmiş kol ve benzeri üniteler robot üzerine daha sonradan monte edilip çıkarılabilecek şekilde yapılabilir.

Cerrahi operasyonların büyük bir çoğunluğu bir nokta etrafında yapılan büyük açısız hareketlerle gerçekleştirilmektedir. Laparoskopik cerrahide sabit nokta end efektörün vücuda girdiği noktadır (Şekil 1.6). Perkütan operasyonda ise iğne ucu deri üzerinde bir noktayı işaretlemekte, daha sonraki yönlendirme işlemi bu noktadan yapılmaktadır. Açık mikrocerrahi işlemlerinde kullanılan cerrahi aletin ucu çok küçük hareketler yaparken, aletin diğer kısımları büyük açısız hareketler yapabilmektedir. Yüz ve çene cerrahisinde de buna benzer şekilde çok küçük hareketlerle kemik üzerinde işlem yapmayı gerektirmektedir. Buna bağlı olarak, robotun operasyonlarda kullanılan

uzuvlarının robot gövdesinden ayrı olarak tasarlanması gerekmektedir. Bu sayede robotun ana gövdesi sadece öteleme hareketlerini yaparken, açısal hareketler kollar ve end efektörler yardımıyla gerçekleştirilebilir. Yine bu sayede robotun gövdesi bir noktada sabitlenerek operasyon sırasında öteleme hareketleri yapması engellenmiş olur.

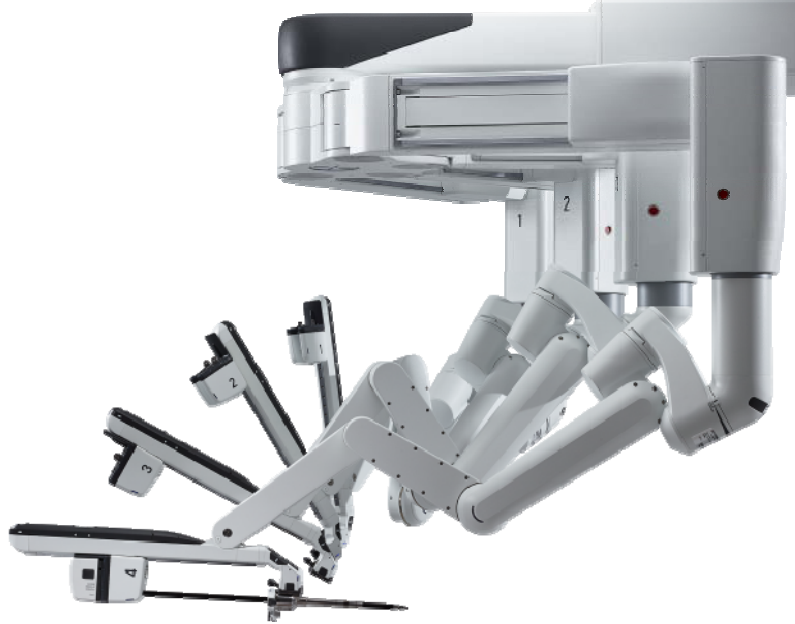


Şekil 1.5 Robotik cerrahi için geliştirilmiş çeşitli end efektör tipleri.

Mevcut robotik sistemlere bakıldığında; açılı hareket eden kollar (Guerrouad and Vidal 1989, Mitsuishi 1995, Cutting *et al.* 1996, Lavallee *et al.* 1996), paralelogram ve 4 kol mekanizmaları (Taylor *et al.* 1995, Kobayashi *et al.* 1999, Taylor *et al.* 1999, Loser and Navab 2000) zincir ve kayış mekanizmaları (Berkelman *et al.* 2002) kullanıldığı görülmektedir. Kullanılacak sistemlerin operatörden gelen komutları boşluksuz olarak robota aktarmaları, herhangi bir güç kaybında hastaya zarar vermeden sistemin hasta üzerinden uzaklaştırılabilmesi ve operatöre acil müdahale için zaman kazandırması gibi hususların da tasarımda göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Bilgisayar tabanlı sistemlerin insanlarla çalışma durumunda hem insandan aldığı komutları yerine getirme, hem de insana karar verme açısından bilgi sağlama fonksiyonları bulunmaktadır. Cerrahi robotik sistemlerde de insan-makine arayüzünün doğru tasarlanması ve ses, bilgisayarla görme, hastanın organlarından alınan tepkilerin

operatöre yansıtılmasını sağlama gibi hususların göz önünde bulundurulması gereklidir (Sheridan *et al.* 1997). Günümüze kadar gerçekleştirilen çeşitli çalışmalarda farklı hususların ön plana çıkarıldığı görülmektedir. Operasyon bölgesinden alınan görüntüler



Şekil 1.6 da Vinci robotik sisteminde laparoskopik cerrahide end efektörün vücuda gidiği noktanın sabitlenmesi sistemi.

cerraha çoğu zaman bir bilgisayar monitöründen yansıtılmaktadır. Bu monitör görüntüyü yansıtmanın yanında hastayla ilgili diğer verilerin de cerraha doğrudan akatarılması için araç olarak kullanılabilir. Bu sistemler cerrahi navigasyon sistemleri olarak adlandırılmaktadır (Adams *et al.* 1990, Smith *et al.* 1994, Taylor *et al.* 1996, Reinhardt *et al.* 1996, DiGioia *et al.* 1996, Simon *et al.* 1997, Nolte *et al.* 1998, Yang *et al.* 2008 Zhai *et al.* 2008 Bauzano *et al.* 2010 Bauzano *et al.* 2011 Wang *et al.* 2013 Bauzano *et al.* 2014).

Bilgisayara komut göndermekte kullanılan arayüzler arasında ise fare, joystick, dokunmatik ekran, buton, pedal gibi araçlar kullanılmaktadır. Bu araçların ameliyat odasında kullanılması sırasında diğer alanlardaki kullanımlarından farklı olarak bazı hususların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunlar arasında sterilizasyon, elektriksel güvenlik, ergonomi vb sayılabilir. Komut vermek amacıyla sesin kullanımı

da söz konusu olabilir. Özellikle hasta başında görev alan sağlık personeli ile iletişim kurmak açısından ses kullanılabilirken, cerrahın el ve ayağının çeşitli kontrol araçları ile meşgul olduğu durumlarda ses ile komut verilmesi de göz önünde bulundurulmalıdır (Uecker *et al.* 1994, Confer and Bainbridge 1984).

Cerrahın bilgisayara verdiği komutların organlar üzerinde ne derece etkili olduğu ve organların tepkisinin cerraha hissettirilmesi konusu da büyük öneme sahiptir. Haptik geribildirim olarak adlandırılan bu alan cerrahi robotiğin önemli araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır (Howe *et al.* 1995, Sheridan *et al.* 1997, Aulignac *et al.* 2000, Kumar *et al.* 2000, Kumar 2001, Berkelmann *et al.* 2001 Nudehi *et al.* 2005, Fujino *et al.* 2008, Holbert and Huber 2008, Perreault *et al.* 2010, Sun *et al.* 2011, Li, *et al.* 2013, Sun *et al.* 2013, Syed *et al.* 2013, Yoon *et al.* 2014, Lee *et al.* 2014, Marbán *et al.* 2014).

1.3 Amaç ve Kapsam

Bu tez çalışmasının amacı master/slave esasına dayanan bir cerrahi sistemin tasarım ve üretimini gerçekleştirmektir. Bu amaçla 5 serbestlik derecesine sahip bir sistem tasarlanacak, bu sistem sayesinde cerrahın koluna bağlı olan master koldaki hareketler hasta tarafında konuşlanmış olan slave kol tarafından taklit edilecektir. Sistem haberleşmesini sağlamak üzere arada bir bilgisayar yazılımı kullanılacaktır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Materyal

Sistemi meydana getiren donanım unsurları bu bölümde açıklanmıştır.

Servo Motorlar: Elektrikli motorların genel yapısını oluşturan stator ve rotor dışında farklı donanımlar eklenerek motorlar daha akıllı ve kararlı çalışır hale getirilmiştir.

Motorlar, genel olarak DC Motorlar, AC Motorlar, Servo Motorlar ve Step Motorlar olmak üzere dört sınıfa ayrılır. Bu türlerin hepsi elektrikle çalışıyor olmasına rağmen çalışma prensipleri birbirlerinden farklıdır. Bu türlerden servo ve step motorlar en gelişmiş türlerdir. Servo motorlar genel çalışma prensibi olarak DC veya AC türlere benziyor olmalarına rağmen donanım olarak bir takım ekstralar barındırmaktadır. Bu donanımlar potansiyometre veya encoder (bu encoder temaslı veya temazsız olabilir), bu encoder ile bağlantılı bir elektronik kontrol devresi ve redüktör mekanizması görevi gören dişli sistemlerinden oluşmaktadır. Bu dişli sistemi motor milinin hem hassas hareket edebilmesini sağlar hemde motorun momentinin yani torkunun artmasını sağlar. (Şekil 2.1) (İnt.Kyn.4).

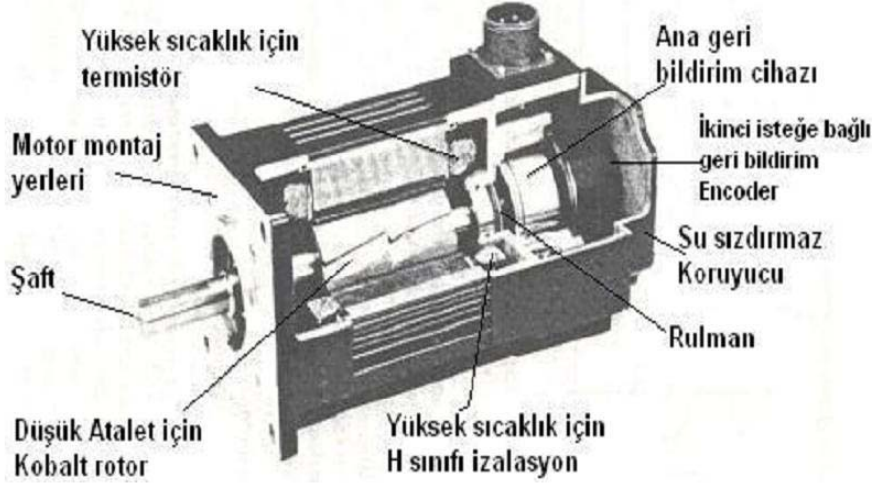


Şekil 2.1 Servomotor iç yapısı.

Servo motorlar 2 sınıfta tanımlanabilir. Bunlar; alternatif akımla (AC) çalışan (firçasız) AC motorlar, doğru akımla (DC) çalışan (firçalı) DC motorlardır (İnt.Kyn.5).

DC Servo Motorlar: Servo motorun içerisinde bir adet DC motor bulunmasından dolayı bu isim verilmiştir. Yukarıda bahsedilen ve servo motorlarda AC ve DC motorlara göre bulunan ekstra donanımlar sayesinde motor mili sürekli olarak kontrol altında tutulur. Örneğin temazsız bir mutlak encoder veya potansiyometre kullanılıyorsa, motor 360 derece dönebilme (yani sonsuz tur atabilme) özelliğine sahip olur. Temaslı encoder veya potansiyometre bulunan servo motorlar ise sınırlı açılar içerisinde dönebilmektedir (örneğin 0^0 - 320^0 veya 0^0 - 180^0 gibi). Bu encoder sayesinde motor milinin pozisyon bilgisi kontrol devresi tarafından tespit edilebilmektedir. Böylelikle motora gitmesi istenilen pozisyon bilgisi gönderildiğinde kontrol devresi DC motora enerji vererek başlangıçta hızlı dönmesini sağlar. Hedef pozisyona yaklaştıkça motor devri düşürülerek kullanılan kontrol yöntemine göre hedef pozisyon yakalanmaya çalışılır. Hedef pozisyona ulaşıldığında ise DC motora verilen enerji tamamiyle kesilir. Yine motor bünyesinde yer alan redüktör dişli sistemi ise DC motorun milinde oluşan dönme hareketinin devrini düşürüp torkunun artmasını sağlar. Ayrıca motor duruyor halde iken de var olan pozisyonun korunmasını yine redüktör mekanizması sayesinde sağlamış olur.

AC Servo Motorlar: Servo motorun içerisinde bir adet AC motor bulunmasından dolayı bu isim verilmiştir. DC Servo motorlarda bulunan encoder, kontrol devresi ve redüktörlü dişli sistemi yine bu motorlarda da bulunmaktadır. Bu motorlarda, motor miline direkt olarak elektrik temas etmeden aktarıldığı için bozulma ihtimalleri az, tamir ve bakımları ise kolaydır. AC servo motorlar yüksek güç gerektiren durumlarda DC Servo motor yerine tercih edilebilirler. AC servo motorlar genellikle iki veya üç fazlı olarak geliştirilmektedir. AC servo motorların endüvileri (rotorları) kısa devre çubuklu veya doğal mıknatısa sahiptir. Bu motorlar yapı itibari ile asenkron veya senkron tip motorlara benzemektedir (Şekil 2.2) (İnt.Kyn.4).



Şekil 2.2 AC servomotor kesiti.

Servo Motorların Genel Özellikleri:

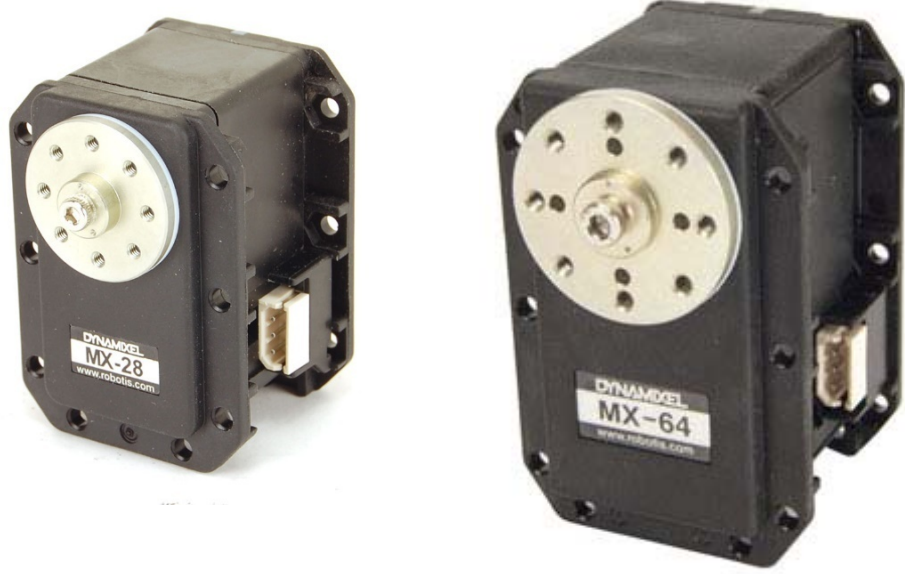
- Diğer motor türlerine göre çok daha hassastır.
- Açısal dönme yöntemi (yani encoder veya potansiyometre) ile çalışmaktadır.
- Bir sürücü ya da kontrol devresi ile kontrol edilirler.
- Endüstride bir çok alanda kullanılmaktadır.
- Mikrokontroller tarafından kolayca kontrol edilebilirler.
- Kolay kontrol edilebilir veya programlanabilirler.

2.1.1 Kullanılan Servo Motorlar

Projede **Robotis** firmasına ait Dynamixel serisi DC servo motorlar kullanılmıştır. Master Robot tarafında MX-28, Slave tarafında ise MX-64 modeli kullanılmıştır. Bu servo motorların tercih edilmesinin başlıca sebepleri şu şekildedir:

- Dişli redüksiyonundan önce 1000 titreşimli artan enkoder.
- Dişli redüksiyonundan sonra 4096 adım mutlak değerli enkoder.
- Elektrik akımı algılamaya dayalı kontrol.
- Dahili sıcaklık algılama.
- Pozisyon-temelli komut.
- Tork-temelli komut.
- Hız-temelli komut.
- Dairesel tip-sökülebilir redüksiyon dişlisi (Düz, Dikey Eksen, Kayış).

- Farklı fiziksel katman bağlantısı seçenekleri (RS-485, CAN, TTL, EtherCat).
- Farklı opsiyonel hazır eklem ve bağlantı şaseleri.
- Farklı geliştirme ortamları için SDK desteği (Visual Studio.NET, MATLAB, Labview, Java, Python, ROS, ecplisc) (İnt.Kyn.6).



Şekil 2.3 Tezde kullanılan servo motorlar.

2.1.2 Kullanılan Servo Motorların Özellikleri

MX-28

Dâhili kontrol yöntemi PID'dir. MX-28T ve MX-28R olmak üzere 2 farklı versiyonu bulunmaktadır. MX-28T, TTL yapıya sahip olup TTL yapının gerektirdiği TTL seviye 3 pinli haberleşme kullanırken, MX-28R RS-485 haberleşme protokolünü kullanır (4 pinli).

Donanım Özellikleri

- **MCU:** ST CORTEX-M3 (STM32F103C8 @ 72MHZ,32BIT)
- **Pozisyon Sensörü:** Temazsız mutlak kodlayıcı (encoder) (12 BiT, 360 Derece)
- **Motor:** Maxon
- **Baud Hızı:** 8000 bps ~ 4.5 Mbps
- **Kontrol Algoritması:** PID KONTROL
- **Çözünürlük:** 0.088°

- **Çalışma Derecesi:** 0° ~ 360° (Sonsuz Dönme hareketi)
- **Ağırlık:** 72gr
- **Boyut(lar):** 35.6mm x 50.6mm x 35.5mm
- **Dişli Azaltım Oranı:** 193 : 1
- **Sabit Tork**
 - 2.3N.m (11.1Volt'ta, 1.3A),
 - 2.5N.m (12Volt'ta, 1.4A)
 - 3.1N.m (14.8Volt'ta, 1.7A)
- **Yüksüz hız**
 - 50rpm (11.1Volt'ta)
 - 55rpm (12Volt'ta)
 - 67rpm (14.8Volt'ta)
- **Çalışma Sıcaklığı:** -5°C ~ +80°C
- **Voltaj:** 10 ~ 14.8V (Tavsiye edilen voltaj 12V)
- **Komut Sinyali:** Dijital paket
- **Protokol Tipi**
 - MX-28T (Yarı-duplex Asenkron Seri Haberleşme (8bit,1 durma biti,Parity(eşlik) biti yok))
 - MX-28R (RS485 Asenkron Seri Haberleşme (8bit,1 durma biti, Parity(eşlik) biti yok))
- **Link (Fiziksel)**
 - MX-28T (Çoklu TTL(time to live- yaşama zamanı) Seviyesi)
 - MX-28R (RS485 Çoklu veri yolu)
- **ID:** 254 ID (0~253)
- **Geri besleme:** Pozisyon, Sıcaklık, Yük, Giriş Voltajı, vb.
- **Malzeme:** %100 Metal Dişli, mühendislik plastiğinden gövde
- **Bekleme akımı:** 100 mA

Kontrol Tablosu: Kontrol tablosu, Dynamixel'in içindeki şu anki durumla ve 'işleyiş'le ilgili verileri içerir. Kullanıcı, direktif paketi yoluyla Kontrol Tablosu verilerini değiştirip Dynamixel'i kontrol edebilir.

EEPROM ve RAM; RAM'deki veriler, (sisteme) enerji verildiğinde tekrar başlangıç değerine ayarlanır, oysa EEPROM alanındaki veriler güç kesilse bile saklanır.

Adres; Verilerin konumunu belirtir. Verileri Kontrol tablosundan okumak veya Kontrol Tablosuna yazmak için, kullanıcı Direktif Paketine doğru adresi atmalıdır.

Erişim; Dynamixel iki çeşit veriye sahiptir: Esas olarak algılama için kullanılan Read-only(Sadece-Okunabilen) veriler ve sürme için kullanılan Read-and-Write (Okunan-ve-Yazılabilen) veriler.

Başlangıç Değeri; Verilerin EEPROM (alanında) olması durumunda, aşağıdaki Kontrol Tablosu'nun sağ tarafındaki başlangıç değerleri fabrika çıkış (varsayılan) ayarlarıdır. Verilerin RAM (alanında) olması durumunda, yukarıdaki Kontrol Tablosu'nun sağ tarafındaki başlangıç değerleri sisteme güç verildiği andaki değerlerdir.

Highest/Lowest (Basamak Değeri) En yüksek/En Düşük Byte; Kontrol Tablosunda bazı veriler aynı ismi paylaşmaktadır, fakat adresleri ayırmak için her ismin sonuna (L) veya (H) -harfleri- eklenmiştir. Bu veriler 16 bit gerektirmektedir, fakat (yüksek) ve (alçak) adreste olmak üzere 8 bitlik iki parçaya bölünmüştür. Bu iki adres aynı anda bir Direktif Paketine yazılmalıdır (İnt.Kyn.5).

Çizelge 2.1 Kontrol Tablosu (EEPROM).

Alan	Adres (Hexadecimal)	Ad	Tanım	R/W	Başlangıç Değeri (Hexadecimal)
E E P R O M	0 (0X00)	Model Numarası (L)	Model numarasının (basamak değeri) en düşük byte'ı	R	29 (0X1D)
	1 (0X01)	Model Numarası (H)	Model numarasının (basamak değeri) en yüksek byte'ı	R	0 (0X00)
	2 (0X02)	Donanım Yazılımı versiyonu	Donanım yazılımı hakkında bilgi	R	-
	3 (0X03)	ID	Dynamixel'in ID si	RW	1 (0X01)
	4 (0X04)	Baud Hızı	Dynamixel 'in Baud Hızı	RW	34 (0X22)
	5 (0X05)	Geri Dönüş Gecikme Süresi	Geri Dönüş Gecikme Zamanı	RW	250 (0XFA)
	6 (0X06)	Saat Yönü (CW) Açılı Limiti (L)	Saat yönü açılı limitinin en düşük byte'ı	RW	0 (0X00)
	7 (0X07)	Saat Yönü (CW) Açılı Limiti (H)	Saat yönü açılı limitinin en yüksek byte'ı	RW	0 (0X00)
	8 (0X08)	Saat Yönünün Ters Yönde(CCW) Açılı Limiti (L)	Saat yönünün ters yönde açılı limitinin en düşük byte'ı	RW	255 (0XFF)
	9 (0X09)	Saat Yönünün Ters Yönde(CCW) Açılı Limiti (H)	Saat yönünün ters yönde açılı limitinin en yüksek byte'ı	RW	15 (0X0F)
	11 (0X0B)	En yüksek Limit Sıcaklık	Dahili sınır sıcaklık	RW	80 (0X50)
	12 (0X0C)	En düşük Limit Voltaj	En düşük voltaj sınırı	RW	60 (0X3C)
	13 (0X0D)	En Yüksek Limit Voltaj	En yüksek voltaj sınırı	RW	160 (0XA0)
	14 (0X0E)	Maksimum Tork(L)	Maksimum torkun en düşük byte'ı	RW	255 (0XFF)
	15 (0X0F)	Maksimum Tork(H)	Maksimum torkun en yüksek byte'ı	RW	3 (0X03)
	16 (0X10)	Durum Geri Dönüş Seviyesi	Durum geri dönüş seviyesi	RW	2 (0X02)
	17 (0X11)	Alarm LEDi	Alarm için LED	RW	36 (0X24)
	18 (0X12)	Alarm Kapatması	Alarm için kapatma	RW	36 (0X24)

Bu tabloda;

“Model numarası” Model Numarasını belirtir.

“Donanım Yazılımı Versiyonu” Donanım yazılımı versiyonunu belirtir.

“ID” Dynamixel’i tanımlamak için yegane sayıdır. 0’dan 253’e (0xFD) olan aralık kullanılabilir ve özellikler Broadcast ID (Yayım ID’si) olarak 254(0xFE) kullanılır. Direktif paketini göndermek için Yayım ID’si kullanılırsa tüm Dynamixel’lere komut verilebilir.

“Baud Hızı” Haberleşme hızını ifade eder, 0’dan 254’e (0xFE) kadar olan değerler haberleşme hızı için kullanılabilir.

“Geri Dönüş Gecikme Süresi” Her bir veri değeri için Direktif Paketi’ni göndermeden Durum Paketi geri dönüncüye kadar geçen gecikme süresidir. 0 ‘dan 254’e (0xFE) (değerler) kullanılabilir, ve veri başına gecikme 2 mikrosaniyedir. Bu demek oluyor ki, eğer veri değeri 10 ise 20 mikrosaniye gecikme olacak. Başlangıç değeri 250’dir. (0xFA) (yani; 0,5 milisaniye)

“CW(Saat Yönü)/CCW (Saat yönünün tersi yönde) Açılı limit” Açılı limiti hareketin sınırlanmasına izin verir. Değer aralığı ve birimi Hedef Pozisyon (Adres 30, 31) ile aynıdır. CW açılı limiti: Hedef Pozisyonun minimum değeri(Adres 30, 31). CCW açılı limiti: Hedef pozisyonun maksimum değeri(Adres 30, 31)

“En yüksek Sıcaklık Limiti” Çalışma sıcaklığının en yüksek sınırıdır. Kullanım aralığı 10’dan 99’a (0x10~0x63) kadardır. Birimi Celcius’tur.

“En düşük(Yüksek) Limit voltajı” Voltajın çalışma aralığıdır. 50’den 250’e (değerler) (0x32 ~ 0x96) kullanılabilir. Birim 0.1V’dir.

“Maksimum Tork” Maksimum çıkış değeri torkudur. 0’da 1023’e (0x3FF)) (değerler) kullanılabilir, ve birim %0,1 civarındadır.

“Durum Geri Dönüş Seviyesi” durum paketinin nasıl geri döndürüleceğini belirler.

0 iken tüm komutlara karşı hiçbir geri döndürme yok. (PING komutu hariç)

1 iken Sadece Read komutu için geri döndürme

2 iken tüm komutlar için geri döndürme

“Alarm Kapatması”, çalışma sırasında olan hataları belirleyerek kendini koruyabilir.

Çizelge 2.2 Kontrol Tablosu (RAM).

Alan	Adres (Hexadecimal)	Ad	Tanım	R/W	Başlangıç Değeri (Hexadecimal)
	24 (0X18)	Tork Etkin	LED Açık/Kapalı	RW	0 (0X00)
	25 (0X19)	LED	LED On/Off	RW	0 (0X00)
	26 (0X1A)	D Kazancı	Türevsel Kazanç	RW	0 (0X00)
	27 (0X1B)	I Kazancı	İntegral Kazancı	RW	0 (0X00)
	28 (0X1C)	P Kazancı	Oransal Kazanç	RW	32 (0X20)
	30 (0X1E)	Hedef Pozisyon(L)	Hedef pozisyonun en düşük Byte'ı	RW	-
	31 (0X1F)	Hedef Pozisyon(H)	Hedef pozisyonun en yüksek Byte'ı	RW	-
	32 (0X20)	Hareket Hızı(L)	Hareket Hızının en düşük Byte'ı	RW	-
	33 (0X21)	Hareket Hızı(H)	Highest byte of Moving Speed	RW	-
	34 (0X22)	Şimdiki Yük(L)	Hareket Hızının en yüksek Byte'ı	RW	ADD14
	35 (0X23)	Tork Limiti(H)	Tork Limitinin en yüksek byte'ı	RW	ADD15
R A M	36 (0X24)	Şimdiki Pozisyon(L)	Şimdiki pozisyonun en düşük Byte'ı	R	-
	37 (0X25)	Şimdiki Pozisyon (H)	Şimdiki pozisyonun en yüksek Byte'ı	R	-
	38 (0X26)	Şimdiki Hız(L)	Şimdiki hızın en düşük byte'ı	R	-
	39 (0X27)	Şimdiki Hız(H)	Şimdiki hızın en yüksek byte'ı	R	-
	40 (0X28)	Şimdiki Yük(L)	Şimdiki yükün en düşük byte'ı	R	-
	41 (0X29)	Şimdiki Yük(H)	Şimdiki yükün en yüksek byte'ı	R	-
	42 (0X2A)	Şimdiki Voltaj	Şimdiki voltaj	R	-
	43 (0X2B)	Şimdiki Sıcaklık	Şimdiki Sıcaklık	R	-
	44 (0X2C)	Kayıtlı	Herhangi bir Direktif kayıt edildi mi manasında	R	0 (0X00)
	46 (0X2E)	Hareket halinde	Herhangi bir hareket var mı manasında (kullanılır)	R	0 (0X00)
	47 (0X2F)	Kilitli	EEPROM'u kilitleme	RW	0 (0X00)
	48 (0X30)	Yumruk(L)	'Yumruk'un en düşük byte'ı	RW	0 (0X00)
	49 (0X31)	Yumruk(H)	'Yumruk'un en yüksek byte'ı	RW	0 (0X00)
	73 (0X49)	Hedef İvme	Hedef ivme	RW	0 (0X00)

Bu tabloda ise;

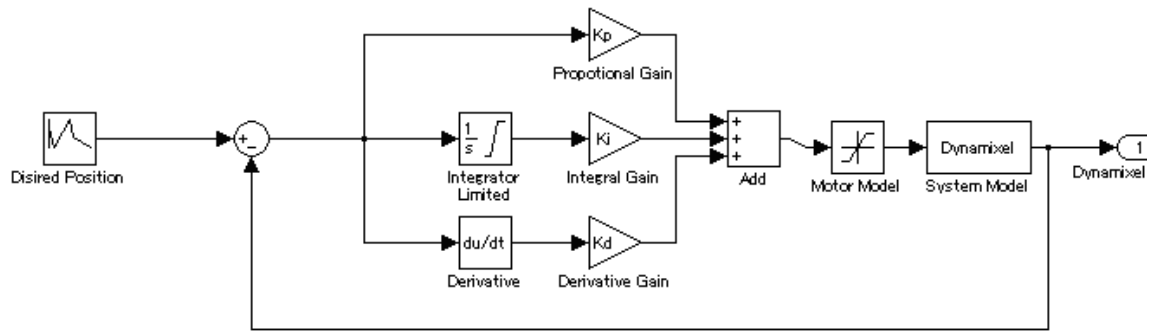
“Tork Etkin” 0 iken Motorun gücünü keserek tork üretimini engeller. 1 iken Motora güç basarak tork üretir.

“PID Kazancı” MX serisi PID (oransal-integral-türevsel kazanç) denetleyiciyi, esas kontrol metodu olarak kullanır.

P kazancı oransal bant değerini gösterir. (atıfta bulunur)

I kazancı integral eylemi değerini gösterir.

D türevsel eylem değerini gösterir. (Kazanç değerleri 0~254 arasındadır.)



$$\begin{aligned} K_p &= P \text{ Gain} / 8 \\ K_i &= I \text{ Gain} * 1000 / 2048 \\ K_d &= D \text{ Gain} * 4 / 1000 \end{aligned}$$

Şekil 2.4 PID Kazancı.

“Hedef Pozisyon” Hareket edilecek yerin pozisyon değeridir. 0’dan 7095’e (kadar) (0xFFF) mevcuttur. Birim 0,088 derecedir. Hedef Pozisyon aralık dışında (kalırsa) Durum paketinin Açılı Limit Hata Biti (Bit1) ‘1’ olarak geri döndürülür ve Alarm LED/Kapatma’da ayarlandığı gibi Alarm tetiklenir.

“Hareket Hızı”

- Eklem Modu Hedef Pozisyona hareket hızıdır. 0~1023 (0X3FF) arası değerler kullanılabilir ve birim 0.114 rpm’dir(dakikada dönüş). Hareket hızı, 0’a ayarlanırsa, bu

hızı kontrol etmeksizin motorun maksimum rpm'nin kullanıldığı manasına gelir. Hareket hızı 1023 ise, (gerçek) hız 117.07 rpm civarındadır. Örneğin 300' ayarlandıysa, (gerçek) hız 34,33 rpm'dir.

- Tekerlek modu 0~2047(0X7FF) –arası değerler- kullanılabilir ve birim 0.114 rpm civarındadır. Eğer bir değer 0~1023 aralığında kullanılırsa, saat yönünün tersi yönde dönerken 0'a kurularak durdurulabilir. Eğer bir değer 1024~2047 aralığında kullanılırsa, saat yönünde dönerken 1024'e kurularak durdurulabilir. 10. Bir yönü kontrol etmek için Yön Biti olur.

“Tork Limiti” Maksimum tork değeridir. 0'dan 1023'e (0x3FF) -değerler- kullanılabilir, ve birim %0.1 civarındadır. Örneğin değer 512 ise bu %50 demektir, yani maksimum torkun sadece %50'si kullanılabilir. Güç verilirse, başlangıç değeri olarak Maksimum Tork (adres 14, 15) değeri kullanılır.

“Şimdiki Pozisyon” Dynamixel'in şu anki pozisyon değeridir. Değer aralığı 0~4095 (0xFFFF) -arasındadır- ve birim 0.088 derecedir.

“Şimdiki Hız” Şu anki hareket hızıdır. 0~2047 (0X7FF) –arası değerler- kullanılabilir. Eğer değer 0~1023 aralığında ise, bu motorun saat dönme yönünün terine döndüğünü gösterir. Eğer değer 1024~2047 arasında ise bu motorun saat yönünde döndüğünü gösterir. 10. Bit, yönü kontrol etmek için yön biti olur ve 1024, 0'a eşit olur. Örneğin şimdiki hız 300' e ayarlandıysa motor CCW yönünde 34.33rpm'lik bir (hız) oranıyla hareket ediyordur. (dönüyordur)

“Şimdiki Yük” Şu anki uygulanan yük manasına gelir. Değer aralığı 0~2047 (arasındadır) ve birim %0.1 civarındadır. Değer, 0~1023 arasında ise, bu yükün CCW yönünde çalıştığı (kuvvet uyguladığı) manasına gelir. Değer, 1024~2047 arasında ise, bu, yükün CW yönünde çalıştığı (kuvvet uyguladığı) manasına gelir. Yani 10. Bit, yönü kontrol etmek için yön biti olur ve 1024, 0'a eşit olur. Örneğin değer 512'ye kurulursa, bu, yükün, CCW yönünde maksimum torkun %50 si oranında belirlendiğini gösterir.

“Şimdiki Voltaj” Şu anki sağlanan voltajın büyüklüğüdür. Bu değer gerçek değerden 10 kat daha büyüktür. Örneğin 10V verildiğinde (sağlandığında), veri değeri 100’dür (0x64).

“Şimdiki Sıcaklık” Celcius cinsinden Dynamixel dahili sıcaklığıdır. Veri değeri Celcius olarak gerçek sıcaklık ile aynıdır. Örneğin, veri değeri 85 (0x55) ise şu anki dahili sıcaklık 85°C’tir.

“Kayıtlı Direktifler” 0 iken Reg_Write tarafından gönderilen komut yoktur. 1 iken Reg_Write tarafından gönderilen komutlar mevcuttur.

“ACTION (Eylem)” komutu çalıştırılırsa, değer 0’a değiştirilir.

“Hareket Halinde” 0 iken Hedef Pozisyon komutu işletimi tamamlanmıştır. 1 iken Hedef Pozisyon komutu işletimi devam etmektedir.

“Kilitlenme” 0 iken EEPROM alanı değiştirilebilir. 1 iken EEPROM alanı değiştirilemez.

“Punch (Yumruk)” Motoru minimumda sürmek için (gerekli) akımdır. 0x20’dan 0x3FF’e değer alabilir.

MX-64

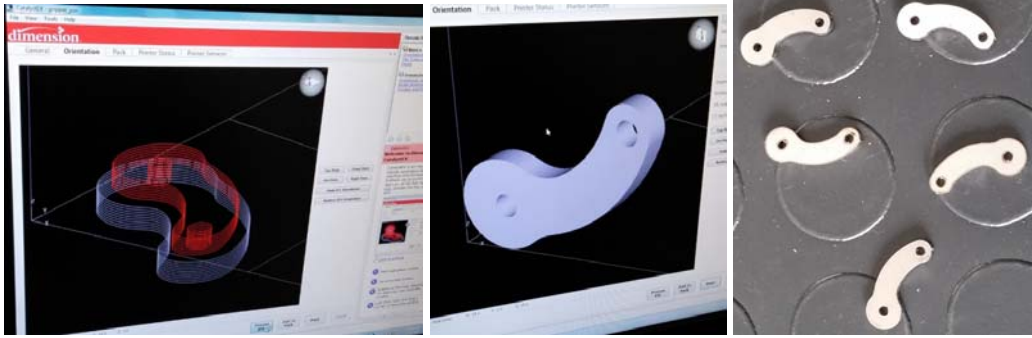
MX-64 aşağıdaki özellikleri haricinde MX-28’in sahip olduğu tüm özelliklere sahiptir.

- **Ağırlık:** 126g
- **Boyut(lar):** 40.2mm x 61.1mm x 41mm
- **Dişli Azaltım Oranı:** 200 : 1
- **Sabit Tork**
 - 5.5N.m (11.1Volt’ta, 3.9A),
 - 6.0N.m (12Volt’ta, 4.1A)
 - 7.3N.m (14.8Volt’ta, 5.2A)
- **Yüksüz Hız**
 - 58rpm (11.1Volt’ta)
 - 63rpm (12Volt’ta)
 - 78rpm (14.8Volt’ta)

2.2 Metot

Çalışmada kontrol sistemi Master-Slave mantığı üzerine oturtulmuştur. Cerrah'ın kumanda edeceği Master robot koluna bağlı servo motorların mutlak enkoder'ları bilgisayar yazılımı tarafından sürekli taranarak bu değerlerin Slave robot koluna gönderilmesi sağlanmıştır. Bu işlem gerçekleştirilirken de komutların gerçek zamanlı olarak karşı tarafa aktarılması için programlama kısmında 10ms'ye de bir master robota ait motorların pozisyon bilgileri dinlenip, slave robota aktarılması sağlanmıştır. Bu da komutların çok hızlı ve güncel bir biçimde hedefe iletilmesini sağlamıştır. Ayrıca Slave robot üzerinde yer alan led aydınlatmalı bir endoskopi kamerası sayesinde, yine Slave robot tarafının Master robot tarafından görsel olarak izlenilmesini mümkün kılmıştır. Bu işlem için ise analoog görüntü çıkışı veren endoskopi kamerasına ait sinyaller, USB destekli bir video capture kartı aracılığı ile dijital hale getirilmiş ve kontrol formu üzerine gerekli DLL dosyaları ile çağırılmıştır.

Bununla birlikte gerek Master robot iskelet yapısı, gerekse de Slave robot iskelet yapısı Solidworks ortamında modellenip, ilgili tüm bileşenleri; gerek CNC tergahtından gerekse de 3D printer'dan çıkartılarak montajları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.5 Bağlantı aparatları.

Kontrol yöntemi olarak kullanılan PID Kazancı (oransal-integral-türevsel kazanç) denetleyiciyi, esas kontrol metodu olarak kullanır.

P kazancı oransal bant değerini gösterir.

I kazancı integral eylemi değerini gösterir.

D türevsel eylem değerini gösterir. (Kazanç değerleri 0~254 arasındadır.)

$$K_P = \text{Kazanç P} / 8$$

$$K_I = \text{Kazanç I} * 1000 / 2048$$

$$K_D = \text{Kazanç D} * 4 / 1000$$

Çizelge 2.3 İtaat (uyum) eğimi ile PID arasındaki ilişki.

Eğim	P Kazancı
8	128
16	64
32	32
64	16
128	8

Kullanılan tüm servo motorlar için yüklü olan P, I ve D kazanç değerleri ise;

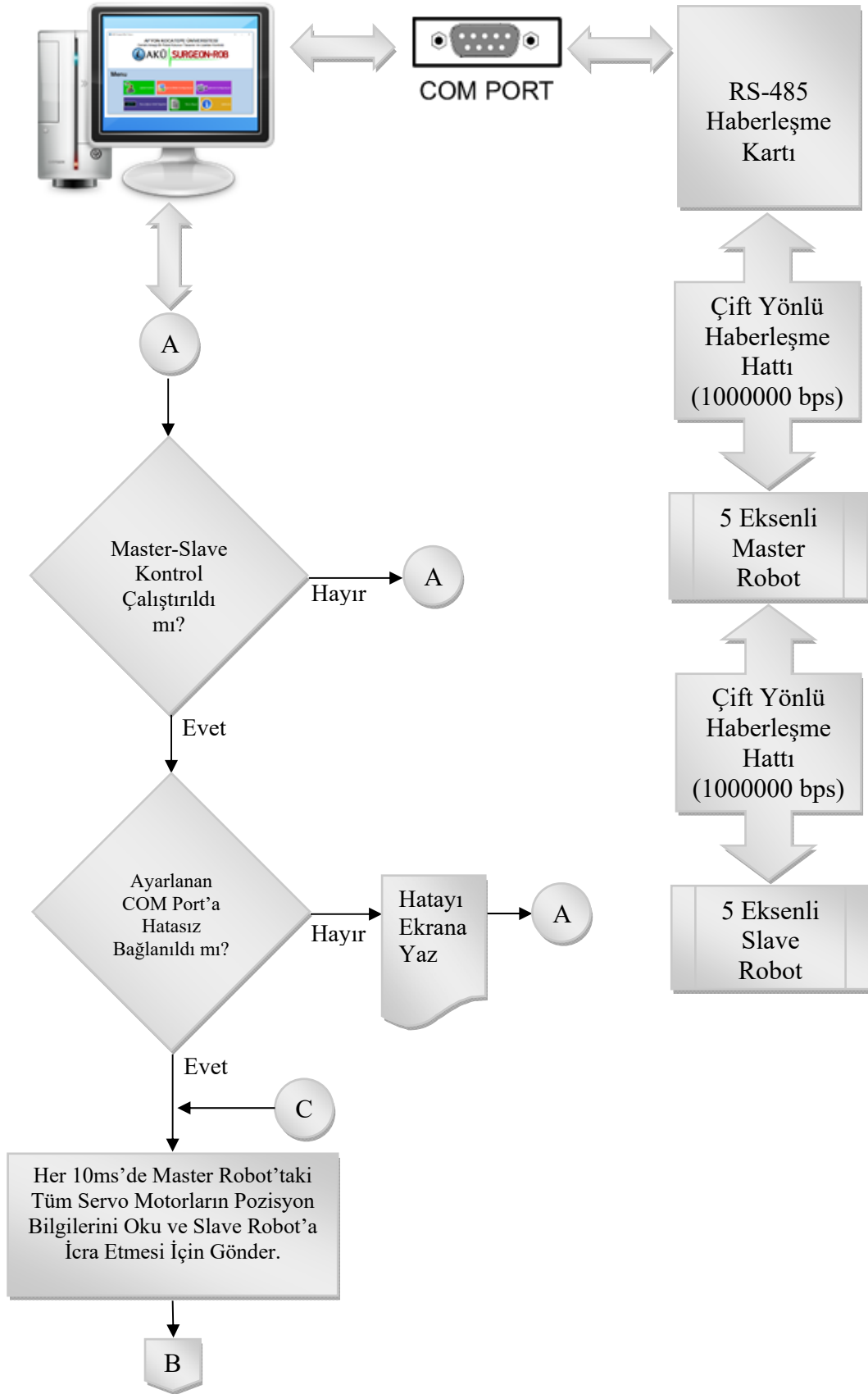
$$P \text{ Kazancı} = 32$$

$$I \text{ Kazancı} = 0$$

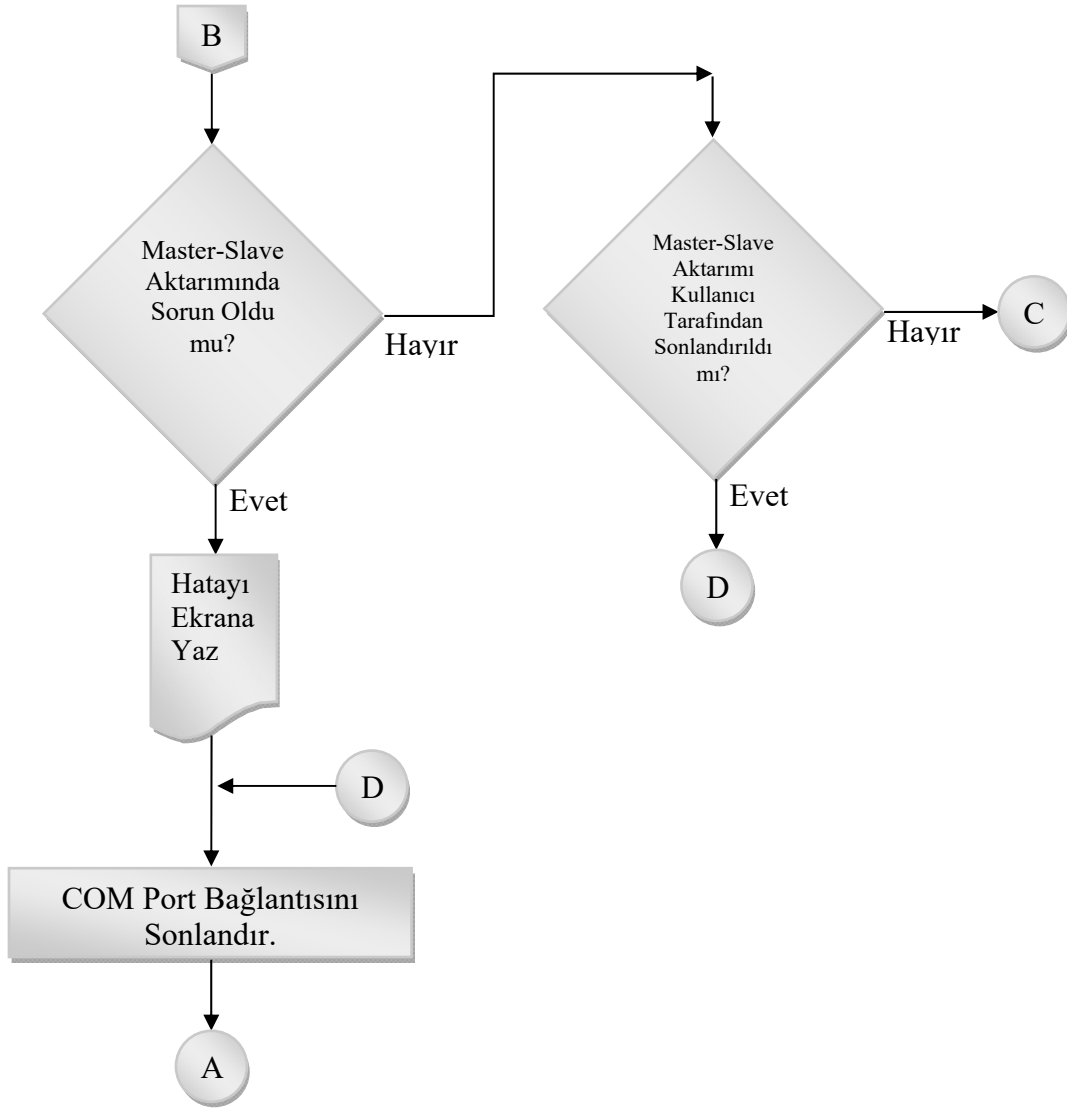
$$D \text{ Kazancı} = 0 \text{ şeklindedir.}$$

2.2.1 Kontrol Akış Diyagramı

Bilgisayar yazılımı sayesinde slave robot, master robotun pozisyon değerlerine sürekli olarak set edilmektedir. Bu süreçte gerçekleşen işlemler blok diyagram olarak Şekil 2.6'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Kontrol akış diyagramı.



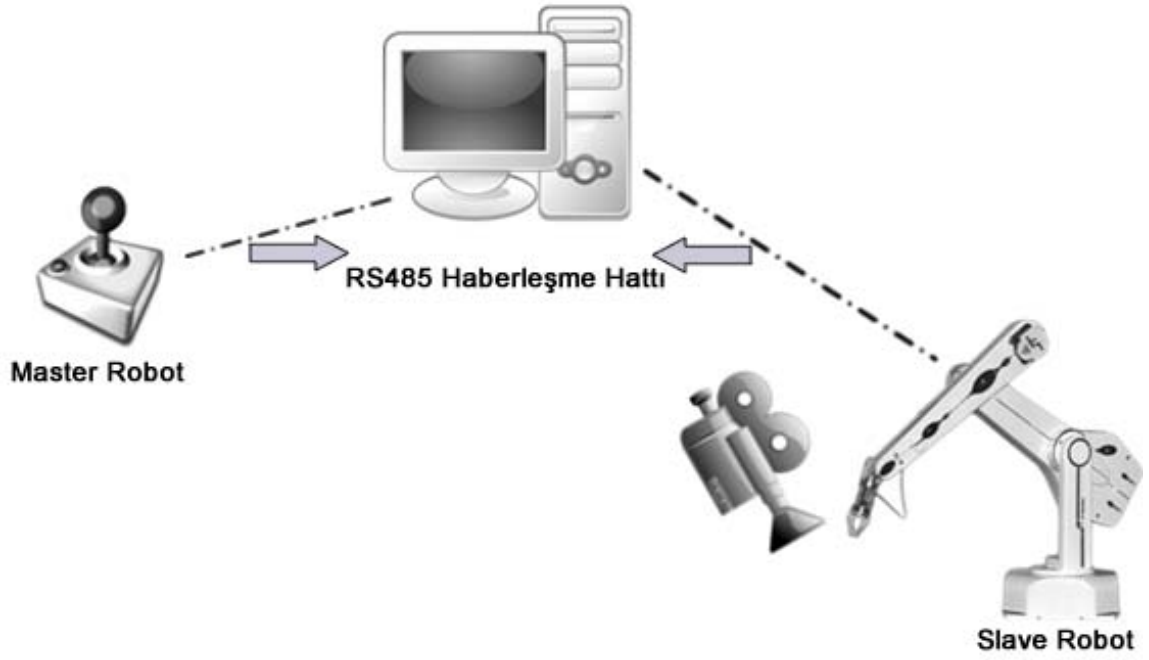
Şekil 2.6 (Devam) Kontrol akış diyagramı.

3. BULGULAR

3.1 Sistem Tasarımı

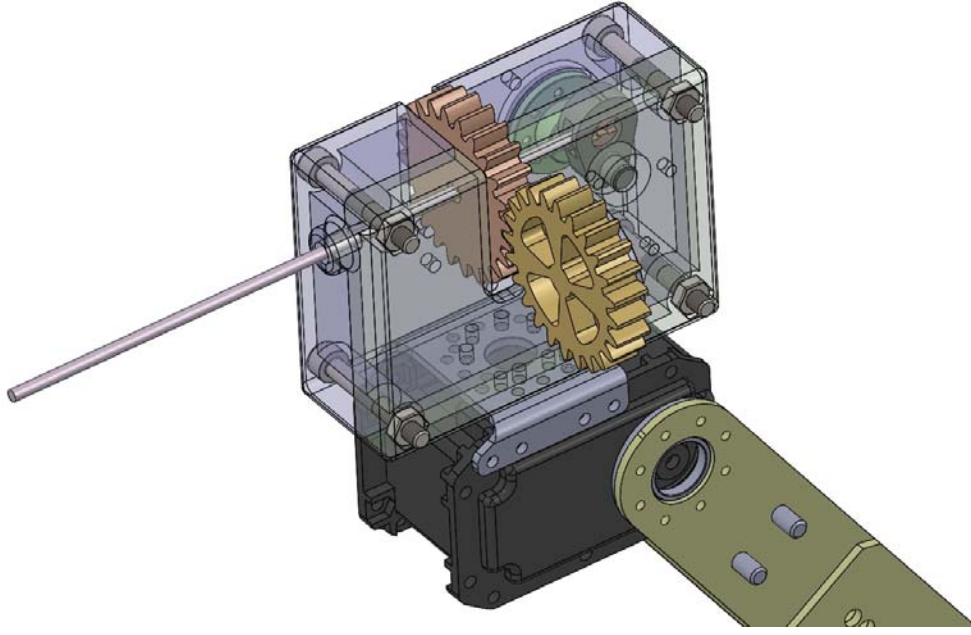
Bu çalışmada master/slave yöntemiyle kontrol edilen tek kollu cerrahi robot tasarımı ve uzaktan kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda öncelikle cerrahın kol ve parmak hareketlerini algılayan 5 serbestlik dereceli master kol tasarlanmıştır. Master kol cerrahın kol ve parmak hareketlerini hassas bir biçimde okuyarak bu verileri bağlı olduğu bilgisayara aktarmaktadır. Visual Studio C#.Net’de hazırlanan yazılım sayesinde Master koldan gelen konum ve ivme bilgileri sürekli olarak okunarak işlenmekte ve icra edilmesi için yine aynı bilgisayara bağlı olan ve 5 serbestlik dereceli slave kola aktarılmaktadır. Master koldan gönderilen komutlar gerçek zamanlı olarak geciktirilmeksizin slave kola aktarılır. Bu aktarım esnasında gelen konum bilgileri Slave kolun hareket sınırları içerisinde ise icra edilir. Hareket sınırlarının dışında bir konum bilgisi gelse dahi slave kola bağlı olan servo motorlar, bu komutları herhangi bir donanıma zarar vermemek veya zorlamamak için icra etmez. Slave kol, master koldan gelen parmak hareketlerini ise gövdesinin ucuna bağlı olan laparoskopik makasa aktarmaktadır. Ayrıca yine Slave kol gövdesine monte edilmiş olan 6 adet parlak LED aydınlatmasına sahip 720x480p çözünürlüğünde bir endoskopi kamerası, ameliyat ortamının görüntüsünü, master kolu yönetmekte olan cerrahın gerçek zamanlı izlemesini sağlamaktadır.

Sistem tasarımı genel olarak Şekil 3.1’de olduğu gibi bir bilgisayara RS485 haberleşme hattı üzerinden bağlı olan iki robot koldan oluşmaktadır. Bu robot kollardan birincisi cerrah tarafından kullanılan Master robot kol, diğeri ise hasta tarafı Slave robot koldur. Robot kollar bilgisayar yazılımı aracılığıyla çift yönlü haberleşebilmektedir.



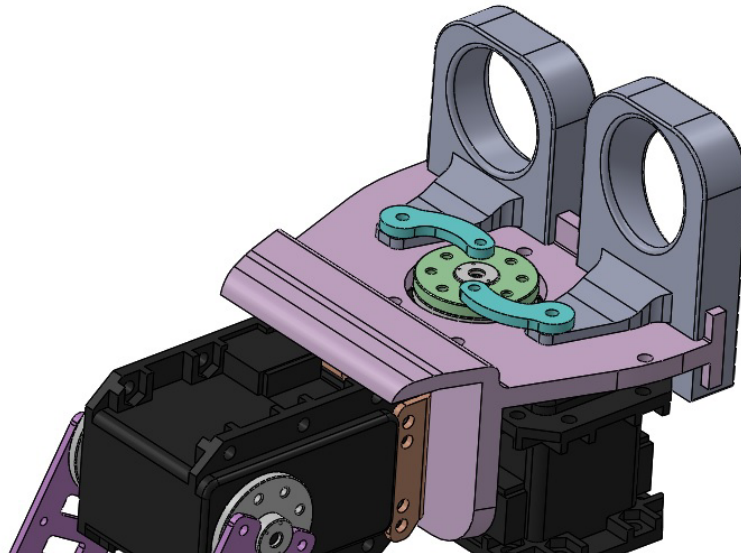
Şekil 3.1 Sistemin genel tasarımı.

Master robot kol tasarımında cerrahın kol hareketlerini hassas olarak okuyabilmek için slave robotta kullanılan servo motorlardan daha düşük tork değerinde ancak aynı çözünürlüğe sahip servo motorlar kullanılmıştır. Bu servo motorlar dinleme modunda çalıştırıldığından, yazılımla dişli redüktör sistemleri devre dışı bırakılmıştır. Böylelikle motorlar enerji verildiğinde millerini kilitleyerek serbest bırakabilmektedirler. Bu sayede mutlak temassız enkoder, cerrah tarafından pozisyonu değiştirilen motor milinin konum bilgisini rahatlıkla okuyabilmektedir. Bu düzen içerisinde çalışacak motorlar için cerrahın kol ve el kontrolüne uygun master ve slave robot için birer metal konstrüksiyon oluşturulmuştur. Bu konstrüksiyon öncelikle Solidworks katı modelleme yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 3.2).



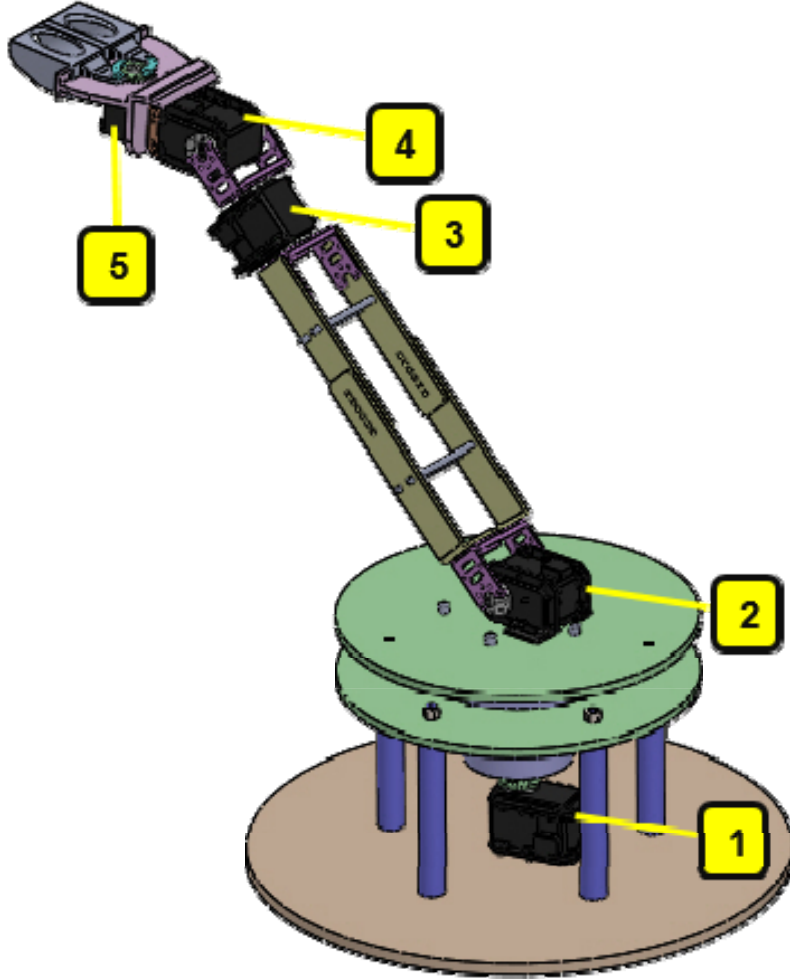
Şekil 3.2 Solidworks katı modelleme.

Ardından tüm parçalar üç boyutlu yazıcı, lazer CNC tezgahları ve torna tezgahları kullanılarak oluşturulmuş ve bir araya getirilmiştir. Ayrıca master robotta cerrahın, slave robotun uç kısmına bağlı olan makası rahat kontrol edebilmesi amacıyla baş parmak ve işaret parmağının rahatça girebileceği iki adet yüzük, parmakların ergonomik yapısı dikkate alınarak yine katı modelleme yöntemi ile tasarlanmıştır (Şekil 3.3). Ardından bu yüzükler ile cerrahın lineer hareketlerini dairesel harekete çevirip servo motora aktaran mekanizma geliştirilmiştir.

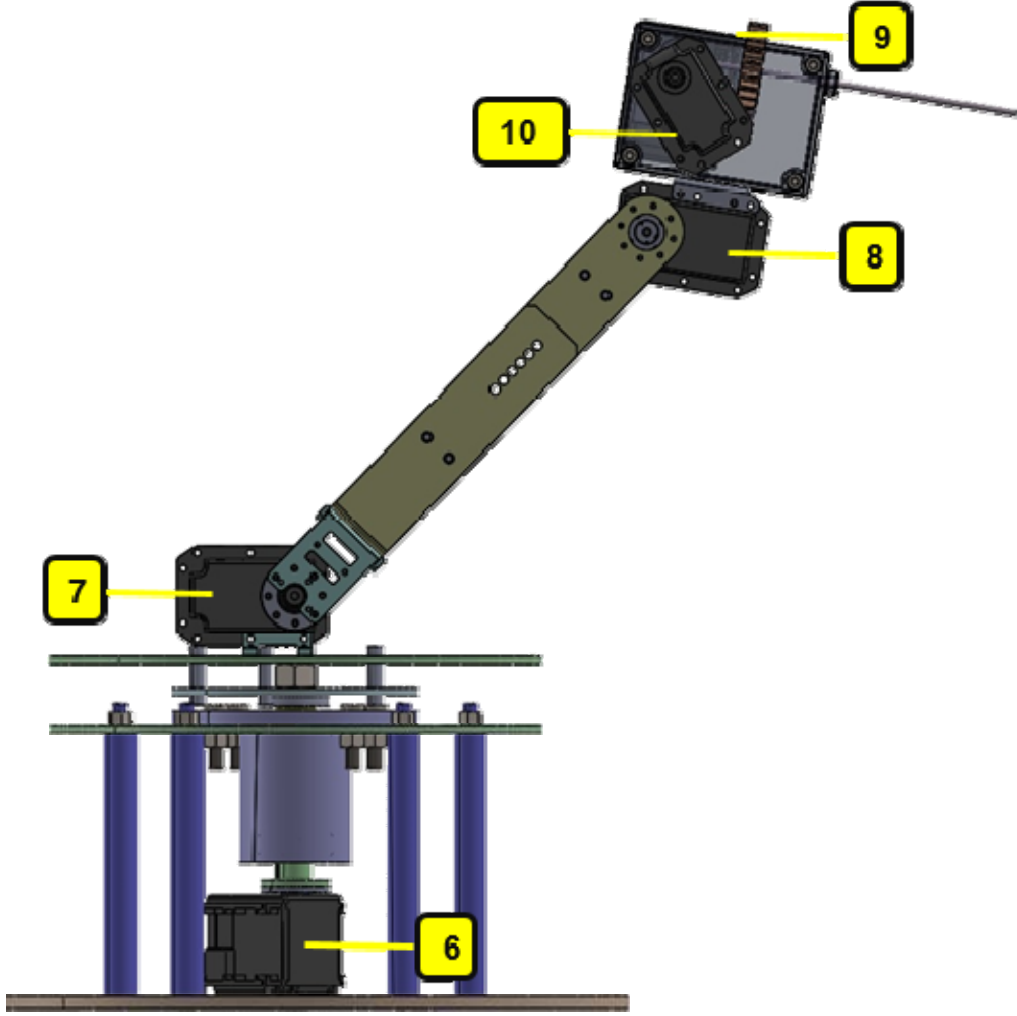


Şekil 3.3 Master robot gripper kısmı.

Master robot cerrahın 5 eksenli kol hareketlerini okuyabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Bu 5 serbestlik derecesi ile cerrahın eş zamanlı tüm eksenlerde oluşturduğu konum değişiklikleri sırasız bir bir biçimde, olduğu gibi slave robota aktarılmaktadır. 5 serbestlik derecesi için motorlar aşağıdan yukarıya doğru 1'den başlayarak 5'e kadar numaralandırılmıştır. Motorlara ait numaralar Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Master robot servo motor numaraları.



Şekil 3.5 Slave robot servo motor numaraları.

Servo motorlara ait numaralar, servo motorların dahili sistemlerine entegre edildikten sonra ise Slave robota ait servo motorların limit açıları ile ilgili de ayrı bir programlama gerçekleştirilmiştir. Bu programlama sayesinde slave robotun fiziki yapısından ötürü oluşan limit pozisyon açıları tespit edilerek bu limitler dışında bir pozisyon komutunun motorlara gelmesi durumunda motorların bu komutu icra etmemesi sağlanmıştır. Bu sınırlar ve ilgili motor bilgileri Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1 Kontrol Limit Tablosu.

Servo Motor ID	Limit Pozisyon Aralığı (0-4095 Adım)
6	1000 – 3400
7	2000 – 3167
8	1400 – 2810
9	110 – 2048
10	1810 – 2250



Şekil 3.6 Master robot.



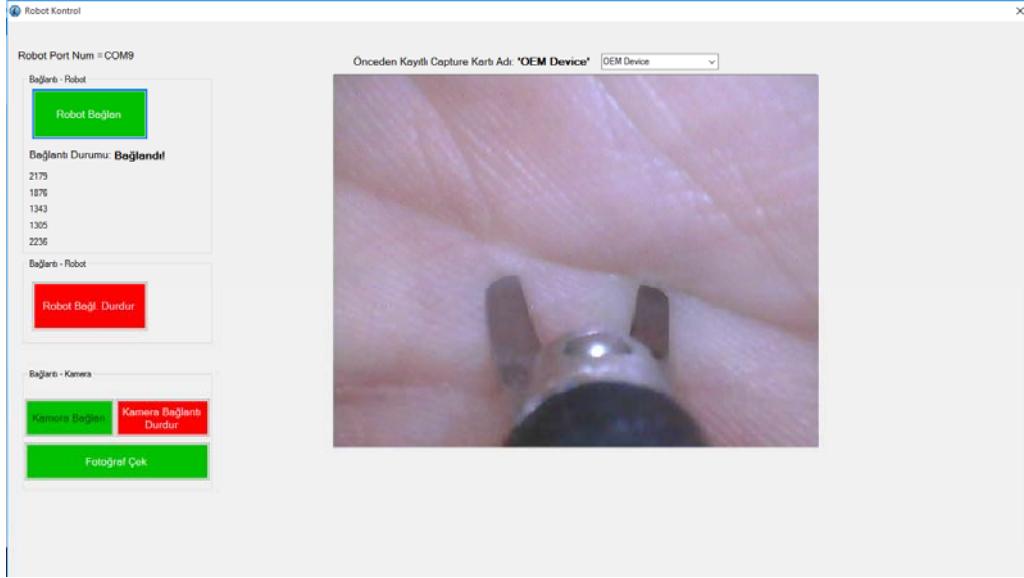
Şekil 3.7 Slave robot.

3.2 Bilgisayar Yazılımı

Bilgisayar yazılımı Microsoft Visual Studio C#.NET ortamında geliştirildi. Proje kapsamında kullanılan servo motorların SDK'sı projeye eklenerek motorlardan anlık verilerin yakalanması sağlanmıştır. Yazılım sayesinde; Slave Robot'un kontrolü, servo motorların konfigürasyonları, kamera konfigürasyonu, servo motorların anlık değerlerinin okunması, master ve slave robot arasında ilişkili servo motorların komut gönderme ve alma işlemlerine ait sürelerinin analizine imkan sağlayan servo rapor gibi işlemleri gerçekleştirmek mümkündür (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).



Şekil 3.8 Bilgisayar yazılımı ana formu.

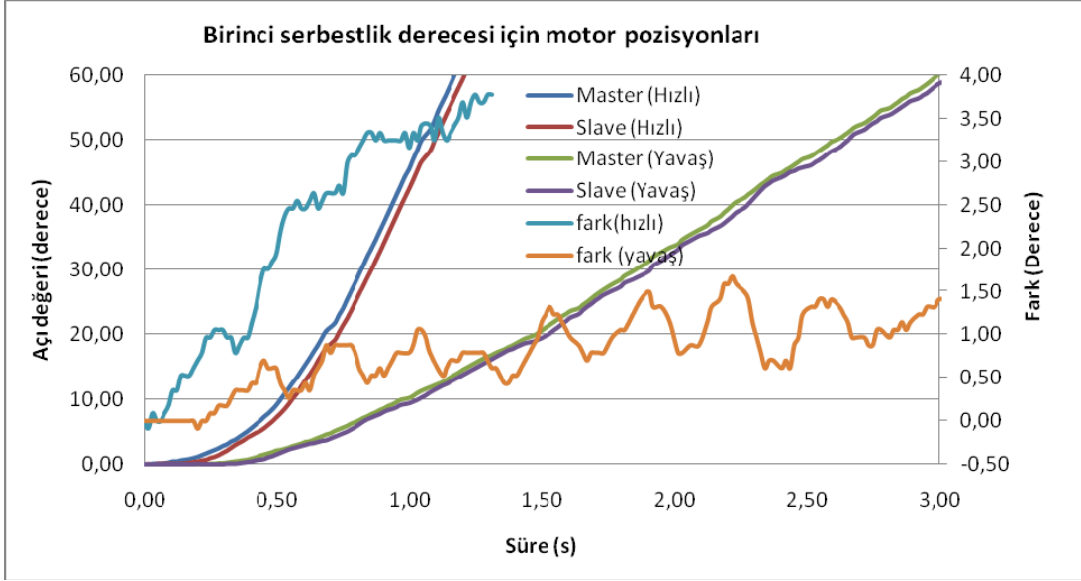


Şekil 3.9 Robot kontrol formu.

3.3 Robot kollarının komut icra karşılaştırmaları

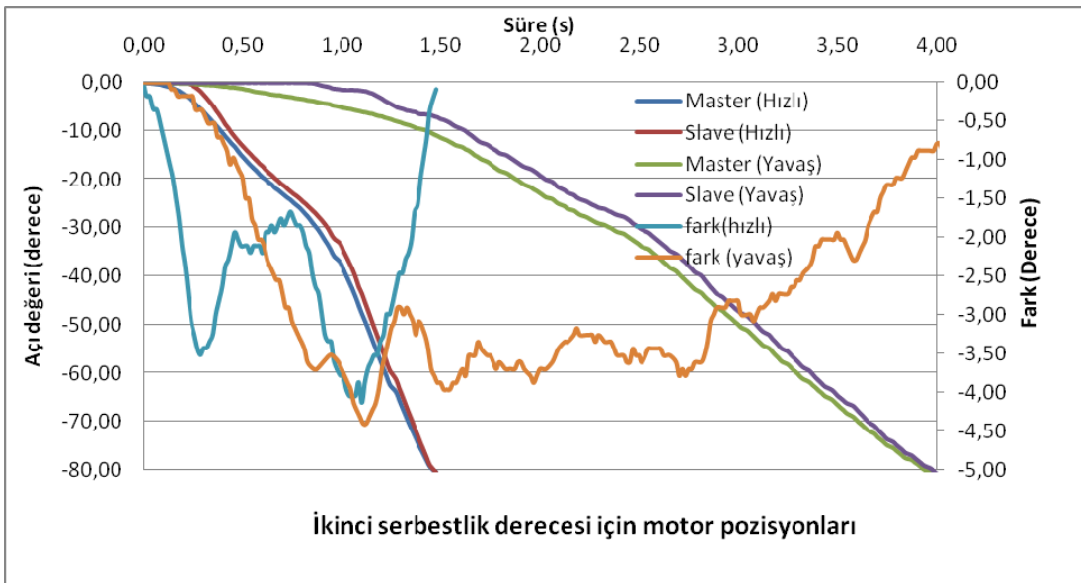
Geliştirilen sistemde master koldan gönderilen komutların slave robot tarafından icra ediliş hızlarını karşılaştırmak üzere bazı çalışmalar yapılmıştır. Bilgisayar yazılımı aracılığıyla, seçilen serbestlik derecesine ait servo motorlardan master robot tarafındaki ilgili motordan her 5ms'de bir konum bilgisi alınarak slave robot tarafındaki ilgili motora aktarılır. Hemen ardından slave robotta ki ilgili motorun konum bilgisi istenir. Bu veriler hafızaya alındıktan sonra ise işlem belirlenen süre kadar 5'er ms aralıklarla devam eder. Bu kapsamda her bir motorun gönderilen pozisyon bilgisi ile icra edilen pozisyon bilgisi değerleri zamana göre grafik olarak Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

Şekil 3.10'da 1 ve 6 nolu motorlarla sağlanmakta olan birinci serbestlik derecesine ait iki farklı hızda yapılan deney sonucu gösterilmiştir. Grafikte motorlara ait açı değerlerinin zamanla değişimi verilmektedir. Grafikte ayrıca konum farklarının zamanla değişimi de verilmiştir. Görüldüğü gibi düşük hızlı yüklemde maksimum konum farkı 2 ila 0,5 derece arasında nisbeten kararlı olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek hızlı yüklemde ise farkın giderek arttığı gözlenmektedir. Bu durum uygulanan PID kontrol sisteminin hıza göre optimize edilmesi gereğini ortaya çıkarmaktadır. Ancak en büyük fark bile maksimum açının %7 si düzeyindedir.



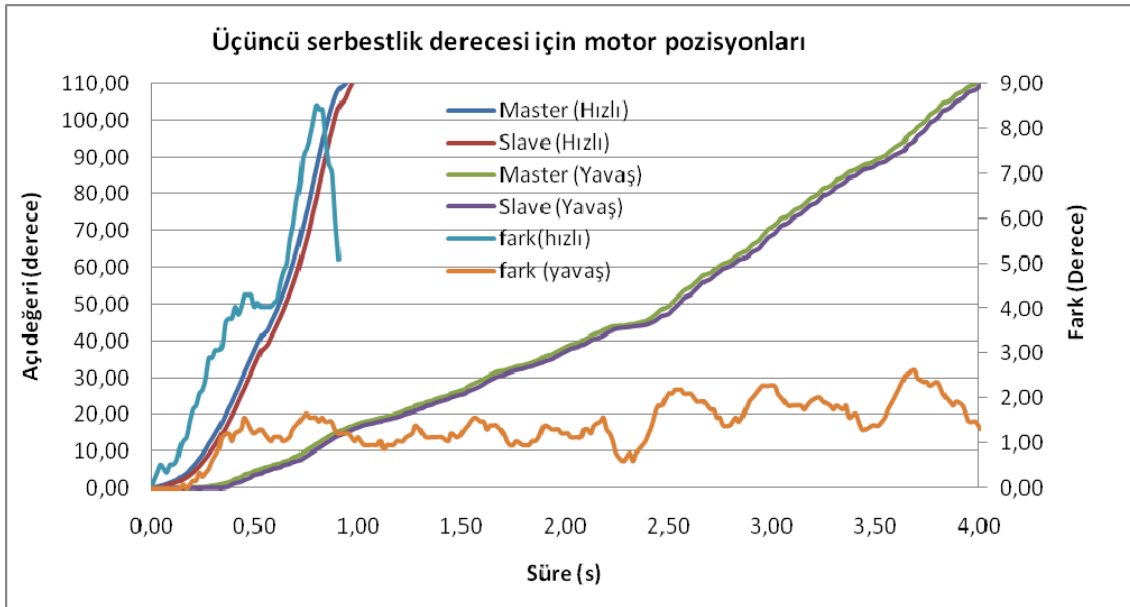
Şekil 3. 10 Birinci serbestlik derecesi için motor pozisyonları.

Şekil 3.11'de ikinci serbestlik derecesini kontrol eden 2 ve 7 numaralı motorlara ait deney sonuçları gösterilmiştir. Burada motorlar verilen komuta göre saat yönünde döndükleri için konum bilgileri negatif değerler almaktadır. Yapılan yüklemelerde düşük hızlı durumda 4 s içinde, yüksek hızlı uygulamada ise 1,5 s içinde 80 derecelik durum değişimi sağlanmıştır. Bu motorlarda meydana gelen farklar hızdan bağımsızdır. En büyük fark -4 derecedir. Yavaş yüklemelerde bu fark, slave robota verilmiş olan hareket alanı sınırlaması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Zamanın geçmesiyle fark hızla düşmektedir.



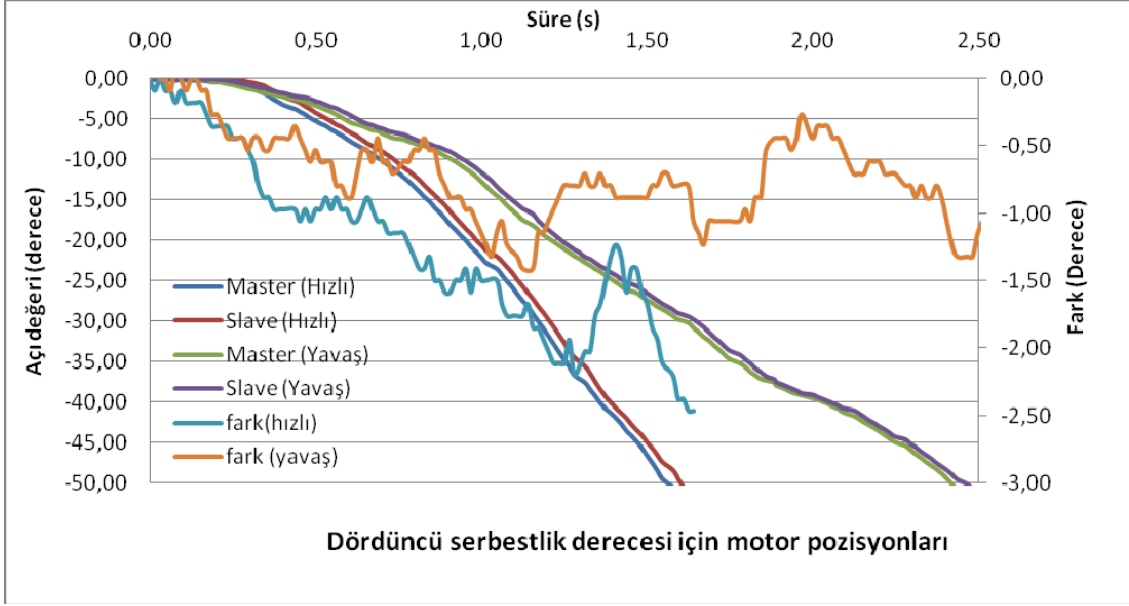
Şekil 3.11 İkinci serbestlik derecesi için motor pozisyonları.

Şekil 3.12'de 3 ve 9 nolu motorlarla sağlanmakta olan üçüncü serbestlik derecesine ait iki farklı hızda yapılan deney sonucu gösterilmiştir. Grafikte motorlara ait açı değerlerinin zamanla değişimi verilmektedir. Grafikte ayrıca konum farklarının zamanla değişimi de verilmiştir. Görüldüğü gibi düşük hızlı yüklemde maksimum konum farkı yaklaşık 2 ila 1,5 derece arasında nisbeten kararlı olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek hızlı yüklemde ise farkın giderek arttığı gözlenmektedir.



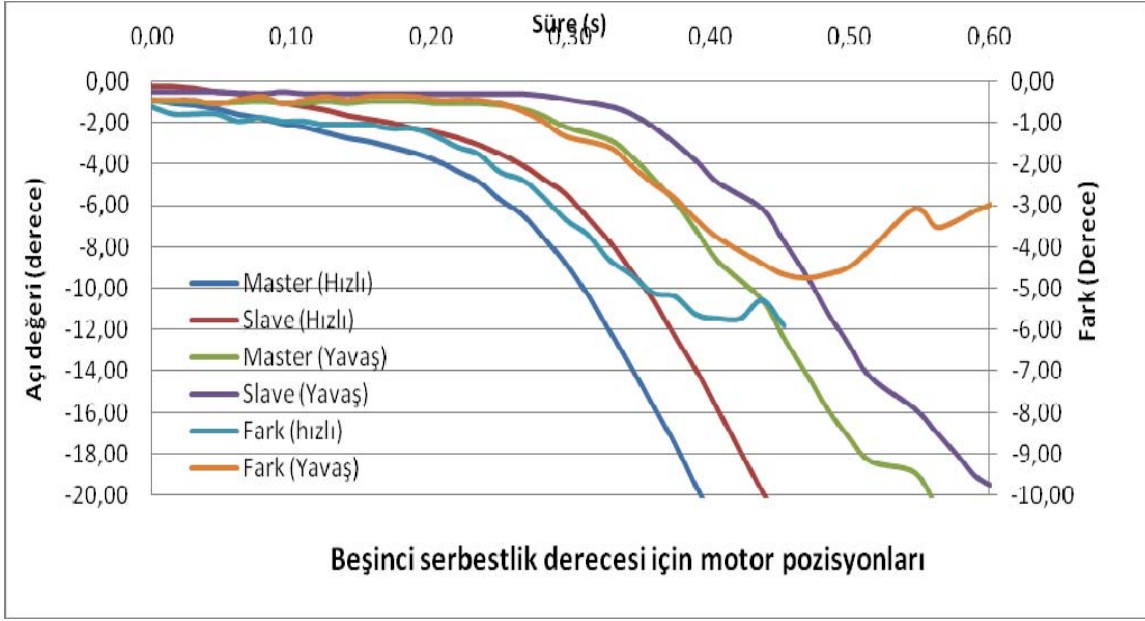
Şekil 3.12 Üçüncü serbestlik derecesi için motor pozisyonları.

Şekil 3.13'de dördüncü serbestlik derecesini oluşturan 4 ve 8 numaralı motorlara ait deney sonuçları gösterilmiştir. Burada motorlar verilen komuta göre saat yönünde döndükleri için konum bilgileri negatif değerler almaktadır. Yapılan yüklemde düşük hızlı durumda 4 s içinde, yüksek hızlı uygulamada ise yaklaşık 2 s içinde 50 derecelik durum değişimi sağlanmıştır. Bu motorlarda meydana gelen farklar hızdan bağımsızdır. En büyük fark -2,5 derecedir. Yavaş yüklemde bu fark, slave robota verilmiş olan hareket alanı sınırlaması nedeniyle ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.13 Dördüncü serbestlik derecesi için motor pozisyonları.

Şekil 3.14'de beşinci serbestlik derecesini kontrol eden 5 ve 10 numaralı motorlara ait deney sonuçları gösterilmiştir. Burada motorlar verilen komuta göre saat yönünde döndükleri için konum bilgileri negatif değerler almaktadır. Yapılan yüklemde düşük hızlı durumda 0,6 s içinde, yüksek hızlı uygulamada ise yaklaşık 0,5 s içinde 20 derecelik durum değişimi sağlanmıştır. Bu motorlarda meydana gelen farklar hızdan bağımsızdır. En büyük fark -6 derecedir. Zamanın geçmesiyle fark hızla düşmektedir. En kısa hareket alanına sahip serbestlik derecesini bu motorlar oluşturmaktadır. Robotun ucuna eklenmiş olan makası kontrol etmekte olan bu motorda tasarımdan kaynaklanan sorunlar nedeniyle diğer motorlara göre daha büyük bir fark meydana gelmiştir (Şekil 3.3). Diğer serbestlik derecelerinde %10'un altında olan farklar burada %30 dolayında gerçekleşmiştir. Sonraki çalışmalarda daha uygun gripper tasarımı konusunda çalışmalar yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.14 Beşinci serbestlik derecesi için motor pozisyonları.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

- Oluşturulan sistem ile cerrahın kol ve parmak hareketleri yüksek hassasiyet ile (360⁰/4096 adım) slave robota aktarılmıştır. Ancak bu noktada hastanın organlarının slave robota göstermiş olduğu tepki, direnç veya mukavemeti cerrah tarafına aktarma ihtiyacı hissedilmiştir.
- Ayrıca tek kol ile gerçekleştirilebilecek işlemlerin çok sınırlı olması sebebiyle ve cerrahın iki kolunu birden kullanabilmesinin sağladığı avantajlar da gözle alındığında sistemin minimum iki koldan oluşması ve cerrahın sıralı işlemleri beklemeksizin gerçekleştirmesi gerektiği gözlemlenmiştir. Böylelikle cerrah örneğin bir dokuyu tuttuğu yerde, diğer kol yardımıyla da dikebilecek veya benzer işlemleri hemşire yardımını minimum seviyede tutarak gerçekleştirebilecektir.
- Ayrıca robot kolun hastanın vücuduna girdiği noktanın sabitlenmesi ve öteleme hareketleri harcindeki diğer tüm işlemlerin fonksiyonel end efektörler ile sağlanması gerektiği gerçeği tecrübe edilmiştir.
- Öte yandan geliştirilen kontrol yazılımında farklı kontrol algoritmaların da denenmesi gerekmektedir. Cerrahın kol veya parmaklarında oluşan istemsiz titremeleri kontrol yazılımının tespit edip slave robot tarafına aktarmaması gerekmektedir. Nitekim pratikte uygulanan birçok durumda hasta ile cerrah aynı fiziksel ortamda bulunmalarına rağmen robotik cerrahi sistemi tercih edilmektedir. Bunun en büyük sebeplerinden biri de sistemin, cerrahın istemsiz hareketlerini absorbe edip hasta tarafına yansıtmasıdır.
- Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de de görüldüğü üzere slave robot ile master robotun konum zaman grafiklerinde bir faz farkı oluşmaktadır. Bu faz farkının daha da azaltılması amacıyla; bilgisayar yazılımı aracılığıyla master robotun konum bilgileri çok daha yüksek frekanslı bir tarama yöntemi ile denenebileceği gibi Bulanık Mantık, Yapay Sinir ağları ve Genetik Algoritmalar gibi ileri düzey yöntemlerin denenmesine gerek bulunmaktadır.
- Şekil 3.10, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de görüldüğü üzere slave robot üzerindeki yük, yapı itibari ile az ve salınımlı çok olmayan aksam olduğundan düşük hızlardaki kontrolün çok daha tutarlı olduğu gözlemlenmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Adams, L., Gilsbach, J. M., Krybus, W., Meyer-Ebrecht, D., Mösges, R. and Schlöndorff, G. (1990). CAS - a navigation support for surgery. In 3d imaging in medicine, Springer Berlin Heidelberg, 411-423.
- Aguirre, M. E. and Frecker, M. (2007). Size and Shape Optimization of a 1.0 mm Multifunctional Forceps-Scissors Instrument for Minimally Invasive Surgery. In ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 671-679.
- Baek, Y. M., Kozuka, Y., Sugita, N., Morita, A., Sora, S., Mochizuki, R. and Mitsuishi, M. (2010). Highly precise master-slave robot system for super micro surgery. In Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on, IEEE, 740-745.
- Bauzano, E., Estebanez, B., Garcia-Morales, I. and Muñoz-Martinez, V. F. (2014). Robot Collaborative Assistance for Suture Procedures via Minimally Invasive Surgery. In ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference, Springer International Publishing, 255-269.
- Bauzano, E., Muñoz, V., Garcia-Morales, I. and Estebanez, B. (2010). Control Methodologies for Endoscope Navigation in Robotized Laparoscopic Surgery. In Research and Education in Robotics-EUROBOT 2009, Springer Berlin Heidelberg, 11-22.
- Bauzano, E., Muñoz, V.F., Garcia-Morales, I. (2011) "A multi-behaviour algorithm for auto-guided movements in surgeon assistance" *Int J Mechanics and Control*, **12(1)**: 35-41.
- Bebek, Ö. and Çavuşoğlu, M. C. (2011). Towards the Development of a Robotic System for Beating Heart Surgery. In *Surgical Robotics*, Springer US, 525-556.

- Berkelman, P. J., Rothbaum, D. L., Roy, J., Lang, S., Whitcomb, L. L., Hager, G. and Niparko, J. K. (2001). Performance evaluation of a cooperative manipulation microsurgical assistant robot applied to stapedotomy. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2001*, Springer Berlin Heidelberg, 1426-1429.
- Berkelman, P., Cinquin, P., Troccaz, J., Ayoubi, J., Letoublon, C. and Bouchard, F. (2002). A compact, compliant laparoscopic endoscope manipulator. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, IEEE **2**: 1870-1875.
- Blavier, A. and Nyssen, A. S. (2014). The effect of 2D and 3D visual modes on surgical task performance: role of expertise and adaptation processes. *Cognition, Technology & Work*, **16(4)**: 509-518.
- Burgner, J., Raczowsky, J. and Woern, H. (2009). End-effector calibration and registration procedure for robot assisted laser material processing: tailored to the particular needs of short pulsed CO₂ laser bone ablation. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, IEEE, 3091-3096.
- Burgner, J., Zhang, Y., Raczowsky, J., Woern, H., Eggers, G. and Muehling, J. (2008). Methods for end-effector coupling in robot assisted interventions. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, IEEE, 3395-3400.
- Charles, S., Williams, R. E. and Hamel, B. (1989). Design of a surgeon-machine interface for teleoperated microsurgery. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 1989. Images of the Twenty-First Century., Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in*, IEEE, 883-884.
- Chen, W. W., Yan, G. Z., Liu, H., Jiang, P. P. and Wang, Z. W. (2014). Design of micro biopsy device for wireless autonomous endoscope. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **15(11)**: 2317-2325.

- Chen, Y., Tanaka, S. and Hunter, I. W. (2010). Disposable endoscope tip actuation design and robotic platform. In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE, IEEE, 2279-2282.
- Chinzei, K., Hata, N., Jolesz, F. A. and Kikinis, R. (2000). MR compatible surgical assist robot: System integration and preliminary feasibility study. In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2000, Springer Berlin Heidelberg, 921-930.
- Chinzei, K., Kikinis, R. and Jolesz, F. A. (1999). MR compatibility of mechatronic devices: design criteria. In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI'99, Springer Berlin Heidelberg, 1020-1030.
- Choi, H., Kwak, H. S., Lim, Y. A. and Kim, H. J. (2014). Surgical robot for single-incision laparoscopic surgery. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **61(9)**: 2458-2466.
- Confer, R. G. and Bainbridge, R. C. (1984). Voice control in the microsurgical suite. In Proc. Voice I/O Systems Applications Conf.'84.
- Cronin, J. A., Frecker, M. I., and Mathew, A. (2008). Design of a compliant endoscopic suturing instrument. *Journal of Medical Devices*, **2(2)**: 025002.
- Cutting, C. B., Bookstein, F. L. and Taylor, R. H. (1996). Applications of simulation, morphometrics and robotics in craniofacial surgery. *Computer-Integrated Surgery*, 641-662.
- d'Aulignac, D., Balaniuk, R. and Laugier, C. (2000). A haptic interface for a virtual exam of the human thigh. In Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on, IEEE, **3**: 2452-2457.
- Davies, B. L. (1996). A discussion of safety issues for medical robots. *Computer-Integrated Surgery*, 287-296.
- De Donno, A., Nageotte, F., Zanne, P., Zorn, L. and de Mathelin, M. (2013). Master/slave control of flexible instruments for minimally invasive surgery. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 483-489.

- Di Natali, C., Buzzi, J., Garbin, N., Beccani, M. and Valdastri, P. (2015). Closed-Loop Control of Local Magnetic Actuation for Robotic Surgical Instruments. *Robotics, IEEE Transactions on*, **31(1)**: 143-156.
- DiGioia, A. M., Simon, D. A., Jaramaz, B., Blackwell, M., Morgan, F., O'Toole, R. V., and Kischell, E. (1996). HipNav: pre-operative planning and intra-operative navigational guidance for acetabular implant placement in total hip replacement surgery. *Computer Assisted Orthopedic Surgery*.
- Ding, J., Xu, K., Goldman, R., Allen, P., Fowler, D. and Simaan, N. (2010). Design, simulation and evaluation of kinematic alternatives for insertable robotic effectors platforms in single port access surgery. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, IEEE, 1053-1058.
- Drake, J. M., Joy, M., Goldenberg, A. and Kreindler, D. (1991). Computer-and robot-assisted resection of thalamic astrocytomas in children. *Neurosurgery*, **29(1)**: 27-33.
- Du, Q., Zhang, X. and Zou, L. (2007). Design Optimization of a Minimally Invasive Surgical Robot. In *Integration Technology, 2007. ICIT'07. IEEE International Conference on*, IEEE, 179-184.
- Entsfellner, K., Tauber, R., Roppenecker, D. B., Gumprecht, J. D., Strauss, G. and Lueth, T. C. (2013). Development of universal gripping adapters: Sterile coupling of medical devices and robots using robotic fingers. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2013 IEEE/ASME International Conference on*, IEEE, 1464-1469.
- Eslami, S., Fischer, G. S., Song, S. E., Tokuda, J., Hata, N., Tempny, C. M. and Iordachita, I. (2013). Towards Clinically Optimized MRI-Guided Surgical Manipulator for Minimally Invasive Prostate Percutaneous Interventions: Constructive Design. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, IEEE, 1228-1233.

- Farkoush, S. H., Najarian, S., Emamieh, G. D. and Sarkar, S. (2009). Design and Construction of a Novel Surgical Instrument Applicable in Esophagectomy. In 25th Southern Biomedical Engineering Conference 2009, 15–17 2009, Miami, Florida, USA, Springer Berlin Heidelberg, 21-22.
- Fu, Y., Li, H. and Xie, Q. (2010). Master-Slave Control Technology Research for Abdominal Minimally Invasive Surgery Robot. In ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, 569-575.
- Fujino, S., Sato, D., Abe, K., Konno, A. and Uchiyama, M. (2008). Displaying feeling of cutting by a micro-scissors type haptic device. In Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, IEEE, 2067-2072.
- Garbini, J. L., Kaiura, R. G., Sidles, J. A., Larson, R. V. and Matson, F. A. (1987). Robotic instrumentation in total knee arthroplasty. In Proc. 33rd Annu. Meeting, Orthopaedic Research Society, 413.
- Garg, A., Vikram, C. S., Gupta, S., Sutar, M. K., Pathak, P. M., Mehta, N. K. and Gupta, V. K. (2014). Design and Development of In Vivo Robot for Biopsy. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, **42(3)**: 278-295.
- Ghodoussi, M. and Wang, Y. (2002). Robotic surgery-the transatlantic case. In Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, IEEE, **2**: 1882-1888.
- Greer, A. D., Newhook, P. M. and Sutherland, G. R. (2008). Human–machine interface for robotic surgery and stereotaxy. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, **13(3)**: 355-361.
- Guerrouad, A. and Vidal, P. (1989). SMOS: stereotaxical microtelemanipulator for ocular surgery. In Engineering in Medicine and Biology Society, 1989. Images of the Twenty-First Century., Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in, IEEE, 879-880.
- Guo, J., Guo, S., Xiao, N., Ma, X., Yoshida, S., Tamiya, T. and Kawanishi, M. (2011). A new master-slave robotic catheter system. In Complex Medical Engineering (CME), 2011 IEEE/ICME International Conference on, IEEE, 610-613.

- Guo, W. Z. and Gao, F. (2010). Solution space atlases, workspace characteristics charts and joint space maps for the design of planar serial manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, **45(3)**: 392-407.
- Guthart, G. and Salisbury Jr, J. K. (2000). The Intuitive™ Telesurgery System: Overview and Application. In ICRA, 618-621.
- Güven, Y. and Barkana, D. E. (2010a). Bone cutting trajectory generation using a medical user interface of an orthopedical surgical robotic system. In Human System Interactions (HSI), 2010 3rd Conference on, IEEE, 325-330.
- Güven, Y. and Barkana, D. E. (2010b). Medical user interface for orthopedical surgical robotic system. In Biomedical Engineering Meeting (BIYOMUT), 2010 15th National, IEEE, 1-5.
- Güven, Y. and Barkana, D. E. (2011). Evaluation of an Orthopedic Surgical Robotic System Orthoroby on Bone Cadaver. In Intelligent Automation and Systems Engineering, Springer New York, 41-52.
- Hagn, U., Nickl, M., Jörg, S., Passig, G., Bahls, T., Nothhelfer, A. and Hirzinger, G. (2008). The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications. *Industrial Robot: An International Journal*, **35(4)**: 324-336.
- Holbert, B. and Huber, M. (2008). Building a haptically enhanced computer desktop for the physically disabled using a force feedback mouse. In *Proceedings of the Fourth IASTED International Conference*, **619(17)**: 25.
- Honda, S., Kato, T., Masuda, H. and Jullakarn, I. (2013). Teleoperation of a Master-Slave Pneumatic Robot Arm System Over the Internet: Consideration of Delay Between Oregon and Fukuoka. In *Information Technology Convergence*, Springer Netherlands, 1011-1018.
- Hong, M. B. and Jo, Y. H. (2014). Design of a Novel 4-DOF Wrist-Type Surgical Instrument With Enhanced Rigidity and Dexterity. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, **19(2)**: 500-511.
- Howe, R. D., Peine, W. J., Kantarinis, D. A. and Son, J. S. (1995). Remote palpation technology. *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE*, **14(3)**: 318-323.

- Ishii, C. and Futatsugi, T. (2013). Design and Control of a Robotic Forceps Manipulator with Screw-Drive Bending Mechanism and Extension of Its Motion Space. *Procedia CIRP*, **5**: 104-109.
- Jang, J. and Kim, Y. S. (2013). Safety management algorithm for telesurgical robot system for brain tumor surgery. In IEEE ISR 2013.
- Jankovic, J. and STANLEY, F. (1980). Physiologic and pathologic tremors: Diagnosis, mechanism and management. *Annals of internal medicine*, **93(3)**: 460-465.
- Jianxi, Y., Bingqian, Y. and Fengkui, C. (2008). Design of a Computer Aided Surgical Navigation system based on C-arm. In Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on, IEEE, 73-76.
- Jin, H., Hu, Y., Tian, W., Zhang, P., Zhang, J. and Li, B. (2014). Safety analysis and control of a robotic spinal surgical system. *Mechatronics*, **24(1)**: 55-65.
- Kanno, T., Haraguchi, D., Tadano, K. and Kawashima, K. (2013). Design of a 4-DOF forceps manipulator for robotic surgery. In System Integration (SII), 2013 IEEE/SICE International Symposium on, IEEE, 778-783.
- Karadogan, E. and Williams, R. L. (2010). A cable-actuated robotic lumbar spine for palpatory training of medical students. In ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 309-318.
- Kazanzides, P., Mittelstadt, B. D., Musits, B. L., Bargar, W. L., Zuhars, J. F., Williamson, B. and Carbone, E. J. (1995). An integrated system for cementless hip replacement. *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE*, **14(3)**: 307-313.
- Kennedy, C. W., Hu, T. and Desai, J. P. (2002). Combining haptic and visual servoing for cardiothoracic surgery. In Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, IEEE, **2**: 2106-2111.
- Kim, K. Y., Song, H. S., Park, S. H., Lee, J. J. and Yoon, Y. S. (2010). Design and evaluation of a teleoperated surgical manipulator with an additional degree of freedom for laparoscopic surgery. *Advanced Robotics*, **24(12)**: 1695-1718.

- Kobayashi, E., Masamune, K., Sakuma, I., Dohi, T. and Hashimoto, D. (1999). A new safe laparoscopic manipulator system with a five-bar linkage mechanism and an optical zoom. *Computer Aided Surgery*, **4(4)**: 182-192.
- Kode, V. R. C. and Çavuşoğlu, M. C. (2007). Design and characterization of a novel hybrid actuator using shape memory alloy and dc micromotor for minimally invasive surgery applications. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, **12(4)**: 455-464.
- Kratchman, L. B., Blachon, G. S., Withrow, T. J., Balachandran, R., Labadie, R. F. and Webster, R. J. (2011). Design of a bone-attached parallel robot for percutaneous cochlear implantation. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **58(10)**: 2904-2910.
- Krieger, A., Iordachita, I., Guion, P., Singh, A. K., Kaushal, A., Ménard, C. and Whitcomb, L. L. (2011). An MRI-compatible robotic system with hybrid tracking for MRI-guided prostate intervention. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **58(11)**: 3049-3060.
- Krieger, A., Susil, R. C., Ménard, C., Coleman, J., Fichtinger, G., Atalar, E. and Whitcomb, L. L. (2005). Design of a novel MRI compatible manipulator for image guided prostate interventions. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **52(2)**: 306-313.
- Kumar, R. (2001). An augmented steady hand system for precise micromanipulation. The Johns Hopkins University.
- Kumar, R., Berkelman, P., Gupta, P., Barnes, A., Jensen, P. S., Whitcomb, L. L. and Taylor, R. H. (2000). Preliminary experiments in cooperative human/robot force control for robot assisted microsurgical manipulation. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, IEEE, **1**: 610-617.
- Kwoh, Y. S., Hou, J., Jonckheere, E., and Hayati, S. (1988). A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **35(2)**: 153-160.

- Lavallee, S. (1996). Image-Guided Operating Robot: A Clinical Application in Stereotactic Neurosurgery, Computer Integrated Surgery Technology and Clinical Applications, 343-352.
- Lee, D. H., Kim, U. and Choi, H. R. (2014). Development of multi-axial force sensing system for haptic feedback enabled minimally invasive robotic surgery. In Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 4309-4314.
- Lee, H., Choi, Y. and Yi, B. J. (2012). Stackable 4-BAR manipulators for single port access surgery. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, **17(1)**: 157-166.
- Lee, J., Hwang, I., Kim, K., Choi, S., Kyun Chung, W. and Soo Kim, Y. (2009). Cooperative robotic assistant with drill-by-wire end-effector for spinal fusion surgery. *Industrial Robot: An International Journal*, **36(1)**: 60-72.
- Lee, J., Kim, J., Lee, K. K., Hyung, S., Kim, Y. J., Kwon, W. and Choi, J. Y. (2014). Modeling and control of robotic surgical platform for single-port access surgery. In Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 3489-3495.
- Li, G., Su, H., Cole, G., Shang, W., Harrington, K., Camilo, A. and Fischer, G. S. (2015). Robotic System for MRI-Guided Stereotactic Neurosurgery. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **62(4)**: 1077-1088.
- Li, H., Kawashima, K., Tadano, K., Ganguly, S. and Nakano, S. (2013). Achieving haptic perception in forceps' manipulator using pneumatic artificial muscle. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, **18(1)**: 74-85.
- Li, H., Tadano, K. and Kawashima, K. (2012). Achieving force perception in master-slave manipulators using pneumatic artificial muscles. In SICE Annual Conference (SICE), 2012 Proceedings of, IEEE, 1342-1345.
- Li, M., Kapoor, A., Mazilu, D. and Horvath, K. (2011). Pneumatic actuated robotic assistant system for aortic valve replacement under MRI guidance. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **58(2)**: 443-451.

- Liang, K., Li, J., Kong, K., Gao, Y. and Liu, D. (2011). Control system design of a novel minimally invasive surgery robot. In Complex Medical Engineering (CME), 2011 IEEE/ICME International Conference on, IEEE, 394-399.
- Liu, Z., Wu, Q., Zhang, Y., Wang, Y. and Chen, C. P. (2011). Adaptive fuzzy wavelet neural network filter for hand tremor canceling in microsurgery. *Applied Soft Computing*, **11(8)**: 5315-5329.
- Loser, M. H. and Navab, N. (2000). A new robotic system for visually controlled percutaneous interventions under CT fluoroscopy. In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2000, Springer Berlin Heidelberg, 887-896.
- Marbán, A., Casals, A., Fernández, J. and Amat, J. (2014). Haptic Feedback in Surgical Robotics: Still a Challenge. In ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference, Springer International Publishing, 245-253.
- Maurin, B., Bayle, B., Piccin, O., Gangloff, J., de Mathelin, M., Daignon, C. and Gangi, A. (2008). A patient-mounted robotic platform for CT-scan guided procedures. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **55(10)**: 2417-2425.
- Miller, A., Allen, P., Santos, V. and Valero-Cuevas, F. (2005). From robotic hands to human hands: a visualization and simulation engine for grasping research. *Industrial Robot: An International Journal*, **32(1)**: 55-63.
- Mintenbeck, J., Estana, R. and Woern, H. (2013). Design of a modular, flexible instrument with integrated DC-Motors for minimal invasive robotic surgery. In Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2013 IEEE/ASME International Conference on, IEEE, 1249-1254.
- Mitsubishi, M., Watanabe, T., Nakanishi, H., Hori, T., Watanabe, H. and Kramer, B. (1995). A tele-micro-surgery system with co-located view and operation points and a rotational-force-feedback-free master manipulator. In Proc. 2nd Int. Symp. Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 111-118.

- Nelson, C. A. and Zhang, X. (2010). Equivalent Mechanisms Techniques for Redesign of a Spherical Surgical Tool Manipulator. In *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 11-17.
- Nolte, L. P., Slomczykowski, M. A., Strauss, M. J., Hofstetter, R., Schlenzka, D., Laine, T. and Sati, M. (1998). Use of C-arm for surgical navigation in the spine. *Proc. CAOS/USA'98*.
- Nudehi, S. S., Mukherjee, R. and Ghodoussi, M. (2005). A shared-control approach to haptic interface design for minimally invasive telesurgical training. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, **13(4)**: 588-592.
- Ohno, S., Hiroki, C. and Yu, W. (2010). Design and manipulation of a suction-based micro robot for moving in the abdominal cavity. *Advanced Robotics*, **24(12)**: 1741-1761.
- Park, S. (2006). Safety strategies for human-robot interaction in surgical environment. In *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference*, IEEE, 1769-1773.
- Perreault, S., Talasaz, A., Trejos, A. L., Ward, C. D., Patel, R. V. and Kiaii, B. (2010). A 7-DOF haptics-enabled teleoperated robotic system: Kinematic modeling and experimental verification. In *Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on*, IEEE, 906-911.
- Phee, S. J., Kencana, A. P., Huynh, V. A., Sun, Z. L., Low, S. C., Yang, K. and Ho, K. Y. (2010). Design of a master and slave transluminal endoscopic robot for natural orifice transluminal endoscopic surgery. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **224(7)**: 1495-1503.
- Piccigallo, M., Scarfogliero, U., Quaglia, C., Petroni, G., Valdastrì, P., Menciassi, A. and Dario, P. (2010). Design of a novel bimanual robotic system for single-port laparoscopy. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, **15(6)**: 871-878.

- Pile, J. and Simaan, N. (2014). Modeling, Design and Evaluation of a Parallel Robot for Cochlear Implant Surgery. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, **19(6)**: 1746-1755.
- Pisla, D., Gherman, B. G., Suci, M., Vaida, C., Lese, D., Sabou, C. and Plitea, N. (2010). On the Dynamics of a 5 DOF Parallel Hybrid Robot used in Minimally Invasive Surgery. In *New Trends in Mechanism Science*, Springer Netherlands, 691-699.
- Pisla, D., Gherman, B., Vaida, C. and Plitea, N. (2012). Kinematic modelling of a 5-DOF hybrid parallel robot for laparoscopic surgery. *Robotica*, **30(07)**: 1095-1107.
- Pisla, D., Gherman, B., Vaida, C., Suci, M. and Plitea, N. (2013a). An active hybrid parallel robot for minimally invasive surgery. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **29(4)**: 203-221.
- Pisla, D., Szilaghyi, A., Vaida, C. and Plitea, N. (2013b). Kinematics and workspace modeling of a new hybrid robot used in minimally invasive surgery. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **29(2)**: 463-474.
- Potamianos, P., Davies, B. L. and Hibberd, R. D. (1994). Intra-operative imaging guidance for keyhole surgery methodology and calibration, *Proc. 1st Int. Symp. Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* **1**: 98 -104.
- Reinhardt, H. F. (1996). Neuronavigation: a ten-year review. *Computer-integrated surgery*, 329-341.
- Ren, H. and Meng, M. Q. H. (2011). Investigation of the essentials for integrating off-the-shelf industrial robotics in precise computer-assisted surgery. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, **11(05)**: 1113-1123.
- Rivas-Blanco, I., Bauzano, E., Cuevas-Rodriguez, M., del Saz-Orozco, P. and Munoz, V. F. (2013). Force-position control for a miniature camera robotic system for single-site surgery. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, 3065-3070.

- Rivas-Blanco, I., Cuevas-Rodriguez, M., Bauzano, E., Gomez-deGabriel, J. and Muñoz, V. F. (2014). Single Incision Laparoscopic Surgery Using a Miniature Robotic System. In XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013, Springer International Publishing, 105-108.
- Rocon, E., Gallego, J. A., Belda-Lois, J. M. and Pons, J. L. (2014). Assistive Robotics as Alternative Treatment for Tremor. In ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference, Springer International Publishing, 173-179.
- Sackier, J. M. and Wang, Y. (1994). Robotically assisted laparoscopic surgery. From concept to development, *Surgical Endoscopy*, **8**: 63 -66.
- Sanchez, L. A., Le, M. Q., Rabenoroso, K., Liu, C., Zemiti, N., Poignet, P. and Dario, P. (2013). A case study of safety in the design of surgical robots: The ARAKNES platform. In Intelligent Autonomous Systems 12, Springer Berlin Heidelberg, 121-130.
- Schneider, O. and Troccaz, J. (2001). A six-degree-of-freedom passive arm with dynamic constraints (PADyC) for cardiac surgery application: Preliminary experiments. *Computer aided surgery*, **6(6)**: 340-351.
- Sengül, A., Barsi, A., Ribeiro, D. and Bleuler, H. (2013). Role of Holographic Displays and Stereovision Displays in Patient Safety and Robotic Surgery. In Intelligent Autonomous Systems 12, Springer Berlin Heidelberg, 143-154.
- Seung, S., Liu, P., Park, S., Park, J. O. and Ko, S. Y. (2015). Single-port robotic manipulator system for brain tumor removal surgery: SiromanS. *Mechatronics*, **26**: 16-28.
- Sharkey, N. and Sharkey, A. (2012). Robotic surgery and ethical challenges. *Medical Robotics: Minimally Invasive Surgery*, 276-291.
- Sheridan, T. B., Thompson, J. M., Hu, J. J. and Ottensmeyer, M. (1997). Haptics and supervisory control in telesurgery. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, SAGE Publications, **41(2)**: 1134-1137.
- Shin, W. H., Ko, S. Y. and Kwon, D. S. (2006). Design of a dexterous and compact laparoscopic assistant robot. In SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference, IEEE, 233-237.

- Simaan, N., Taylor, R. and Flint, P. (2004). High dexterity snake-like robotic slaves for minimally invasive telesurgery of the upper airway. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2004*, Springer Berlin Heidelberg, 17-24.
- Simon, D. A., Jaramaz, B., Blackwell, M., Morgan, F., DiGioia, A. M., Kischell, E. and Kanade, T. (1997). Development and validation of a navigational guidance system for acetabular implant placement. In *CVRMed-MRCAS'97*, Springer Berlin Heidelberg, 583-592.
- Smith, K. R., Frank, K. J. and Bucholz, R. D. (1994). The Neurostation™ - a highly accurate, minimally invasive solution to frameless stereotactic neurosurgery. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, **18(4)**: 247-256.
- Stoianovici, D., Cadeddu, J. A., Demaree, R. D., Basile, S. A., Taylor, R. H., Whitcomb, L. L. and Kavoussi, L. R. (1997). An efficient needle injection technique and radiological guidance method for percutaneous procedures. In *CVRMed-MRCAS'97*, Springer Berlin Heidelberg, 295-298.
- Stoianovici, D., Whitcomb, L. L. anderson, J. H., Taylor, R. H. and Kavoussi, L. R. (1998). A modular surgical robotic system for image guided percutaneous procedures. In *Medical Image Computing and Computer - Assisted Intervention - MICCAI'98*, Springer Berlin Heidelberg, 404-410.
- Stoyanov, D., Scarzanella, M. V., Pratt, P. and Yang, G. Z. (2010). Real-time stereo reconstruction in robotically assisted minimally invasive surgery. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2010*, Springer Berlin Heidelberg, 275-282.
- Sullins, J. P. (2014). Ethical Trust in the Context of Robot-Assisted Surgery. *APA Newsletter on Philosophy and Computers*, **14**: 1.
- Sun, Y., Jin, H., Hu, Y., Zhang, P. and Zhang, J. (2014). State recognition of bone drilling with audio signal in Robotic Orthopedics Surgery System. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 3503-3508.

- Sun, Z., Wang, Z. and Phee, S. J. (2011). Towards haptics enabled surgical robotic system for NOTES. In *Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, 2011 IEEE Conference on, IEEE, 229-233.
- Sun, Z., Wang, Z. and Phee, S. J. (2013). Haptic modeling of stomach for real-time property and force estimation. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, **13(03)**: 1350021.
- Syed, A., Duan, X. G., Kong, X., Li, M., Wang, Y. and Huang, Q. (2013). Maxillofacial surgical robotic manipulator controlled by haptic device with force feedback. In *Complex Medical Engineering (CME)*, 2013 ICME International Conference on, IEEE, 363-368.
- Taylor, R. H. and Stoianovici, D. (2003). Medical robotics in computer-integrated surgery. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, **19(5)**: 765-781.
- Taylor, R. H., Lavalley, S., Burdea, G. and Mosges, R. (1996). A telerobotic assistant for laparoscopic surgery. *Computer-Integrated Surgery*, 581 -592.
- Taylor, R. H., Funda, J., Eldridge, B., Gomory, S., Gruben, K., LaRose, D. And Anderson, J. (1995). A telerobotic assistant for laparoscopic surgery. *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE*, **14(3)**: 279-288.
- Taylor, R. H., Paul, H. A., Cutting, C. B., Mittelstadt, B., Hanson, W., Kazanzides, P. and Larose, D. (1992a). Augmentation of human precision in computer-integrated surgery. *Innovation et technologie en biologie et médecine*, **13(4)**: 450-468.
- Taylor, R., Funda, J., LaRose, D., Kim, Y., Bruun, N., Swarup, N. and Treat, M. (1992b). A passive/active manipulation system for surgical augmentation. In *Proceedings of the First International Workshop on Mechatronics in Medicine and Surgery*.
- Taylor, R., Jensen, P., Whitcomb, L., Barnes, A., Kumar, R., Stoianovici, D. and Kavoussi, L. (1999). A steady-hand robotic system for microsurgical augmentation. *The International Journal of Robotics Research*, *18(12)*, 1201-1210.
- Taylor, R., Paul, H. A. and Mittelstadt, B. (1989) A robotic system for cementless total hip replacement surgery in dogs. IBM TJ Watson Research Center.

- Terry, B. S., Mills, Z. C., Schoen, J. and Rentschler, M. E. (2012). Single-port-access surgery with a novel magnet camera system. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **59(4)**: 1187-1193.
- Turkseven, M. and Ueda, J. (2011). Design of an MRI compatible haptic interface. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 2139-2144.
- UECKER, D. (1994). A Speech-Directed Multi-Modal Man-Machine Interface for Robotically Enhanced Surgery. In Proceedings of the First International Symposium on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 176-183.
- Vaida, C., Pisla, D., Plitea, N., Gherman, B., Gyurka, B., Graur, F. and Vlad, L. (2010). Development of a voice controlled surgical robot. In New Trends in Mechanism Science, Springer Netherlands, 567-574.
- Wang, Y., Xiao, N. and Guo, S. (2013). Design of a surgeon's controller for catheter navigation. In Mechatronics and Automation (ICMA), 2013 IEEE International Conference on, IEEE, 974-978.
- Xu, K., Goldman, R. E., Ding, J., Allen, P. K., Fowler, D. L. and Simaan, N. (2009). System design of an insertable robotic effector platform for single port access (SPA) surgery. In Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 5546-5552.
- Yang, B., Roys, S., Tan, U. X., Philip, M., Richard, H., Gullapalli, R. and Desai, J. P. (2014). Design, Development and Evaluation of a Master-Slave Surgical System for Breast Biopsy under Continuous MRI. *The International journal of robotics research*, **33(4)**, 616-630.
- Yang, S., MacLachlan, R. and Riviere, C. N. (2015). Manipulator design and operation of a six-degree-of-freedom handheld tremor-canceling microsurgical instrument. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, **20(2)**: 761-772.
- Yanof, J., Haaga, J., Klahr, P., Bauer, C., Nakamoto, D., Chaturvedi, A. and Bruce, R. (2001). CT-integrated robot for interventional procedures: Preliminary experiment and computer-human interfaces. *Computer Aided Surgery*, **6(6)**: 352-359.

- Yoon, S. M., Choi, W. H. and Lee, M. C. (2014). Backlash compensation by smooth backlash inverse for haptic master device using cable-conduit. In Control, Automation and Systems (ICCAS), 2014 14th International Conference on, IEEE, 127-132.
- Yu, J., Liu, R., Zhang, H. and Zhang, J. (2007). Design and development of an assisting robotic arm in minimally invasive breast surgery. In Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on, IEEE, 349-354.
- Yu, L., Wang, Z., Yu, P., Wang, T., Song, H. and Du, Z. (2014). A new kinematics method based on a dynamic visual window for a surgical robot. *Robotica*, **32(04)**: 571-589.
- Zahraee, A. H., Szewczyk, J., Paik, J. K. and Morel, G. (2009). Robotic hand-held surgical device: evaluation of end-effector's kinematics and development of proof-of-concept prototypes. In Medical image computing and computer-assisted intervention: MICCAI... International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, **13(3)**: 432-439.
- Zhai, W., Zhao, Y. and Jia, P. (2008). A navigation system for minimally invasive abdominal intervention surgery robot. In Robotics, Automation and Mechatronics, 2008 IEEE Conference on, IEEE, 819-823.

5.1 İnternet Kaynakları

- 1- <http://www.scopus.com/authid/detail.url?origin=resultslist&authorId=7405756438&zone=> , 15.03.2015.
- 2- <http://www.intrasense.fr/index.php/en/solutions-en/expert-modules-xp/articles-10-en>, 15.03.2015.
- 3- <http://www.emdt.co.uk/daily-buzz/automatic-planning-technology-facilitates-shoulder-surgery>, 15.03.2015.
- 4- <http://www.teknokoliker.com/2012/07/servo-motorlar-ve-kullanm.html>, 13.05.2015.
- 5- <http://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik-motorlari/servo-motor-nedir-526/>, 13.05.2015.
- 6- <http://support.robotis.com/en/>, 13.05.2015.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet YALVAÇ
Doğum Yeri ve Tarihi : MALATYA / 28.10.1981
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (e-posta) : m.yalvac@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Yeşilyurt Çok Programlı Endüstri Meslek Lisesi,
Bilgisayar Bölümü, 1999
Lisans : Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Düzce T.E.F.,
Bilgisayar Öğretmenliği, 2008
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği, 2015

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

- Afyon Kocatepe Üniversitesi – Bilgi İşlem Daire Başkanlığı (AFYONKARAHİSAR) “Uzman” (Akademik Kadro) Ocak 2012 – Halen
- MİMSAN Mak. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti. (MALATYA) “Endüstriyel Elektrik-Elektronik ve Otomasyon Yönetmeni” Şubat 2011 – Eylül 2011
- MİMSAN Mak. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti. (MALATYA) “Bilgi-İşlem Yönetmeni” Temmuz 2010 – Şubat 2011
- ÖZ DÖRT MEVSİM ZİRAAT ALETLERİ (MALATYA) “Bilgi İşlem Sorumlusu” Haziran 2009 – Şubat 2010
- DEMİTAŞ A.Ş. (DÜZCE) “Fabrika Bilgisayar Ağ Desteği ve Bilgisayar Bakımı” Kasım 2007 – Haziran 2008
- Güven Bilgisayar Ltd. Şti. (DÜZCE) “Teknik Servis Genel Sorumlusu” Kasım 2004 – Haziran 2005, Eylül 2005 – Haziran 2006, Eylül 2006 – Haziran 2007, Eylül 2007 – Haziran 2008
- Betacom Bilgisayar Ltd.Şti. (MALATYA) “Teknik Servis Genel Sorumlusu” Haziran 2000 – Eylül 2004

Yayınları (SCI ve diğer) :

- Şahin, İ. and Yalvaç, M. (2012). MYROBOT: Wireless Controlled Mobile Exploration Robot. *E-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences*, **7(1)**: 340-347.
- Şahin, İ. ve Yalvaç, M. (2011). MYROBOT: Kablosuz Kontrol Edilebilen Mobil Araştırma Robotu. 5th International Computer & Instructional Technologies Symposium (ICITS2011), Elazığ, Mayıs.
- YALVAÇ M. (2008). Bilgisayar Aracılığı ile Kablosuz Kontrol Edilebilen Mobil Araştırma Robotu Projesi. Lisans Bitirme Tezi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Düzce.