

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK SERBESTLİK DERECELİ DÜZLEMSEL İŞ TABLASI VE  
TABLA ÜZERİNDE HAREKET EDEN ROBOTUN EŞ ZAMANLI  
MANİPÜLASYONU VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ**

**Tezi Hazırlayan  
Mustafa SOYLAK**

**Tezi Yöneten  
Prof. Dr. İbrahim UZMAY  
Doç. Dr. Recep BURKAN**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Doktora Tezi**

**Haziran 2008  
KAYSERİ**

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK SERBESTLİK DERECELİ DÜZLEMSEL İŞ TABLASI VE  
TABLA ÜZERİNDE HAREKET EDEN ROBOTUN EŞ ZAMANLI  
MANİPÜLASYONU VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ**

**Tezi Hazırlayan  
Mustafa SOYLAK**

**Tezi Yöneten  
Prof. Dr . İbrahim UZMAY  
Doç. Dr. Recep BURKAN**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Doktora Tezi**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi  
tarafından FBT-05-20 kodu ile desteklenmiştir.**

**Haziran 2008**

**KAYSERİ**

Prof. Dr. İbrahim UZMAY ve Doç Dr. Recep Burkan danışmanlığında **Mustafa SOYLAK** tarafından hazırlanan “**Çok Serbestlik Dereceli Düzlemsel İş Tablası ve Tabla Üzerinde Hareket Eden Robotun Eş Zamanlı Manipülasyonu ve Gerçek Zamanlı Kontrolü**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

04/06/2008

**JÜRİ:**

Başkan: Prof. Dr. Fatih M. BOTSALI

Üye :Prof. Dr. İbrahim UZMAY

Üye :Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN

Üye :Doç. Dr. Şahin YILDIRIM

Üye :Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILMAZ

**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 24/06/2008. tarih ve 2008/18-15 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

24/06/2008.



**Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ**  
Enstitü Müdürü

**TEŐEKKÖR**

Tez alıőmamn her aşamasında desteklerini gÖrdüğüm tez danıőmanım, sayın hocam Prof. Dr. İbrahim UZMAY' a, ikinci danıőmanım sayın hocam Doç Dr. Recep BURKAN' a, doktora tezimde tez izleme komitesinde yer alan sayın hocalarım Prof. Dr. Kenan Danışman ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILMAZ' a ve aileme teőekkÖr ederim. Bu alıőmaya FBT-05-20 kodlu proje kapsamında maddi destek sağlayan Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi' ne teőekkÖr ederim.

**ÇOK SERBESTLİK DERECELİ DÜZLEMSEL İŞ TABLASI VE TABLA  
ÜZERİNDE HAREKET EDEN ROBOTUN EŞ ZAMANLI MANİPÜLASYONU  
VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ**

**Mustafa SOYLAK**  
**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Doktora Tezi, Haziran 2008**  
**Tez Danışmanları: Prof. Dr. İbrahim UZMAY**  
**Doç. Dr. Recep BURKAN**

**ÖZET**

Bu çalışmada, üç serbestlik dereceli düzlemsel iş tablası ile beş serbestlik dereceli, tabla üzerinde hareket eden robot için manipülasyon dinamik modeli ve kontrolü, yörünge planlaması, robot dinamik modeli ve yörünge izleme kontrolü gerçekleştirilmiştir. İş tablası ve tabla üzerinde hareket eden robot için eş zamanlı manipülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Mitsubishi RV-2AJ modeli robot kullanılmıştır. Bu modele simülasyon aşamasında ve gerçek zamanlı çalışma esnasında PID ve çalışma kapsamında geliştirilmiş olan gürbüz kontrol teknikleri uygulayarak yörünge izleme kontrolü gerçekleştirilmiştir. Deneysel inceleme için gerçek zamanlı haberleşme gerçekleştirecek şekilde deneysel bir sistem kurulmuştur. Simülasyon çalışmalarında MSC.ADAMS ve MATLAB/ SIMULINK yazılımları, deneysel kısımda ise; gerçek zamanlı çalışmanın gerçekleştirilmesi için MATLAB XPC-TARGET yazılımı, haberleşme arayüzünü oluşturmak için ise DELPHI yazılımı kullanılmıştır.

Deneysel verilerin elde edilmesinde TÜBİTAK desteği ile kurulan deneysel sistemden de faydalanılmıştır. Sistem için tanımlanan iş; plazma kesme çalışmasıdır. Gerçek zamanlı çalışmada klasik PID kontrol organı kullanılarak incelemeler yapılmış, sinyal gecikmesi ve diğer bozucu etkilerden dolayı istenen sonuçların alınamadığı görülmüştür. PID kontrol organı elemanlarının özel etkilerinin farklı bir kombinasyonu oluşturulmuştur. Klasik PID kontrol organı ve geliştirilen gürbüz kontrol organı arasındaki üstünlükler simülasyon ve deneysel sonuçlarla gösterilmiş, bu çalışma kapsamında geliştirilen gürbüz kontrol organı ile elde edilen sonuçların klasik PID kontrol organından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Gelecekte, farklı kontrol algoritmaları kullanılarak bir çok gerçek zamanlı araştırmanın bu deneysel sistemde incelenmesi mümkün olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Robot denetim, PID denetleme, Gürbüz denetim, Gerçek zamanlı denetim, İş tablası.

**MULTI DEGREE OF FREEDOM PLANAR WORK TABLE AND  
SIMULTANEOUS MANIPULATION AND REAL TIME CONTROLLING OF  
A ROBOT MOVING OVER THE PLANAR WORK TABLE**

**Mustafa SOYLAK**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Ph.D. Thesis, June 2008**

**Thesis Supervisors: Prof. Dr. İbrahim UZMAY**

**Assoc. Prof. Dr. Recep BURKAN**

**ABSTRACT**

In this study, manipulation dynamics modeling and controlling, trajectory planning, robotics dynamic modeling and trajectory tracking control of a planar work table of three degrees of freedom and a five degrees of freedom robot moving over the work table have been carried out. Simultaneous manipulation of both the work table and the robot has been realized. A robot of Mitsubishi RV-2AJ model was used in this study. An experimental setup with a real time communication capabilities were implemented. Simulations were carried out using MSC.ADAMS and MATLAB/SIMULINK commercial packages. MATLAB XPC-TARGET software was used to perform the real time execution for which the communication interface was created using DELPHI.

Measurements were carried out using the experimental setup funded by the TUBITAK. Plasma cutting was defined as the task for the setup. In real time executions, classical PID control unit was used for investigations. Signal delays and some other disturbances resulted in poor performance. A different combination of parts of classical PID control unit was formed. Differences between the classical PID control unit and developed robust control unit was investigated and the robust control unit was found to have better performance against classical PID control unit. Many real time investigations on the same experimental setup would be possible in future using different control algorithms.

**Keywords:** Robot control, PID control, Robust control, Real time control, Work table.

**İÇİNDEKİLER**

KABUL VE ONAY .....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
1. BÖLÜM	
GİRİŞ .....	1
2. BÖLÜM	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	4
2.1.Giriş.....	4
2.2. Literatür Araştırması .....	4
3. BÖLÜM	
MODEL SİSTEMLER.....	17
3.1. Giriş.....	17
3.2. Robot Manipülatör Kinematiği .....	19
3.3. İki Uzunlu Düzlemsel Manipülatör.....	20
3.4. SCARA Tipi Robot .....	22
3.5. Üç Boyutlu Manipülatör .....	25
3.6. İş Tablası Dinamiği .....	28
3.7. İş Tablası ile Robotun Eş Zamanlı Manipülasyonu .....	32
3.8. Deneysel Sistemde Kontrol İçin Simülasyon Çalışması.....	38
4. BÖLÜM	
YÖRÜNGE KONTROLÜ .....	40
4.1. Giriş.....	40
4.2. PID Kontrol.....	41
4.3. Önerilen Gürbüz Kontrol .....	41
5. BÖLÜM	
DENEYSEL SİSTEM.....	43
5.1. Mekanik Sistem.....	43
5.2. Elektronik Sistem ve Gerçek Zamanlı Haberleşme .....	46

6. BÖLÜM	
DENEYSEL ÇALIŞMA VE SİMÜLASYON.....	48
7. BÖLÜM	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	72
KAYNAKLAR .....	74
ÖZGEÇMİŞ .....	84

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Mitsubishi RV-2AJ Robot .....	18
Şekil 3.2. İki uzuvlu düzlemsel manipülatör.....	21
Şekil 3.3. Scara tipi robot.....	23
Şekil 3.4. Üç boyutlu robot .....	25
Şekil 3.5. İş tablası ve eksen hareketleri .....	28
Şekil 3.6. $X_1$ , $X_2$ ve Y tablası modeli.....	29
Şekil 3.7. Döner tabla modeli.....	29
Şekil 3.8. MSC.ADAMS robot modeli ve eklem bağlantıları .....	35
Şekil 3.9. Eş zamanlı manipülasyon MSC.ADAMS yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyon çalışması .....	36
Şekil 3.10. İş tablası eksen motorları deneysel çalışma konumlama hassasiyetleri .....	37
Şekil 3.11. Deneysel sistem Matlab/Simulink yazılımı ile gerçekleştirilen kontrol sistemi blok diyagramı .....	39
Şekil 4.1. Standart PID kontrol sisteminin blok diyagramı .....	41
Şekil 4.2. Geliştirilen gürbüz kontrol organı blok diyagramı .....	42
Şekil 5.1. Plazma kesme işlemi.....	43
Şekil 5.2. Plazma kesme makinesi kesme ağzı ve Mitsubishi RV-2AJ robot .....	44
Şekil 5.3. Plazma kesme deneysel sistem mekanik yapısı ve iş tablası hareket yönleri. ....	45
Şekil 5.4. Gerçek zamanlı kontrol yapısı ve deneysel sistem .....	46
Şekil 6.1. Deneysel sistemin MSC.ADAMS modelinin görünümü.....	48
Şekil 6.2. Simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçların sinüs eğrisi giriş sinyalinde geleneksel PID kontrol organı ve geliştirilen gürbüz kontrol organı için robot eksenlerinin tamamında karşılaştırılması .....	49
Şekil 6.3. Sinüs giriş sinyali için geleneksel PID kontrol yapısı sonuçları .....	54
Şekil 6.4. Sinüs giriş sinyali için gürbüz kontrol yapısı sonuçları.....	57
Şekil 6.5. Geleneksel PID kontrol organı testere dişi şeklinde sinyal girişi sonuçları ...	60
Şekil 6.6. Gürbüz kontrol organı testere dişi şeklinde giriş sinyali uygulanması halinde sonuçları .....	63
Şekil 6.7. Kare dalga şeklinde giriş sinyali için klasik PID kontrol organı sonuçları ....	66
Şekil 6.8. Gürbüz kontrol organı kare sinyal girişi sonuçları .....	69

## 1. BÖLÜM

### GİRİŞ

Endüstriyel otomasyon uygulamalarında robot kullanımı vazgeçilemez bir önem taşımaktadır. Bunun sebebi üretim süreçlerinde istenen standart kalite, dış ortam etkilerden zarar görmeme, yüksek verim, seri üretim, vb. taleplerin oluşmasıdır. Bu talepler beraberinde esnek üretim sistemlerinin gelişmesini ve robot entegre sistemlerin oluşmasını sağlamıştır. Hatta bazı gelişmiş uygulamalarda ki; en çok otomotiv sektöründe karşılaşılmaktadır, birden fazla robotun eş zamanlı çalışması yapılmaktadır. Basit yapılı kontrol teknikleri kullanılarak robotların hızlı ve verimli bir şekilde kullanılması mümkün değildir. Gelişen bilgisayar teknolojisi kullanılarak sistemin dinamik modelinin transfer fonksiyonu olarak kullanılması mümkün hale gelmiştir. Robotun dinamik modeli, robotun hareketi esnasında atalet, merkezci, koryolis, yerçekimi ve sürtünme kuvvetinin olumsuz etkilerini yok etmede kontrol algoritmasının nasıl kullanılacağı konusunda yol göstermektedir. Bunun sonucu manipülatör istenen yörüngeyi izleme işlemini hızlı bir şekilde ve küçük hatalarla gerçekleştirmektedir.

Seçilen kontrol algoritmasının sistemle tam uyumlu olmaması ve dinamik modelin tam olarak tanımlanmamış olması kontrol edilen sistemin performansını önemli ölçüde düşürmektedir. Aynı zamanda bu çalışmaların gerçek zamanlı uygulamalarda da istenen sonucu verebilmesi gerekmektedir. Parametre belirsizliği, sürtünmenin etkisi, esneklik gibi faktörler dinamik modele etki eden faktörler arasında olup bu durum robotun yörünge izleme hatasını arttırmaktadır. Sistemin dinamik modelinin tam olarak bilinmemesi durumunda gürbüz, adaptif, fuzzy ve kayan kipli gibi gelişmiş kontrol algoritmaları kullanılmaktadır. Bu çalışmalar güncel kontrol çalışmalarıdır.

Bu çalışma simülasyon ve deneysel kısımlardan oluşmaktadır. Simülasyon çalışması esnasında MSC.ADAMS yazılımı kullanılarak sistem modeli üzerinde çalışılmıştır. Çalışmanın deneysel bölümünde gerçek zamanlı kontrol uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu sayede teorik olarak belirlenen kontrol algoritmalarına karşılık sistemin cevabı gerçek bir model üzerinde ve gerçek zamanlı tespit edilmiştir. Bu aşamada kontrol yazılımı ile kontrol edilen sistem arayüzünü oluşturan elektronik donanımlar ve yazılımlar hazırlanmıştır. Çalışmanın deneysel kısmında TÜBİTAK-105M039 No' lu "Çok Fonksiyonlu Robotik Esnek İmalat Sistemi Tasarım, İmalat Ve Kontrolü" isimli proje kapsamında alınan destekten faydalanılmıştır, proje tamamlanmıştır. Aynı zamanda doktora çalışmamız Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBT-05-20 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir.

Klasik PID kontrol organı ve çalışma kapsamında geliştirilmiş olan gürbüz kontrol organının deneysel sistem ve simülasyon modeli üzerinde uygulanması sonucunda yörünge izleme kontrolü gerçekleştirilmiştir. Seçilen modelde parametre değerlerinin tam olarak bilinmediği ve sınırlı olduğu kabul edilmiştir. Uygulanan kontrol teknikleri sonucunda parametre belirsizliğinden ve bozucu girişlerden kaynaklanan yörünge hataları giderilmektedir. İzleme hatasını minimum yapan kontrol parametreleri tanımlanmakta, sistem için en sağlıklı sonuçları veren ve PID yapısını oluşturan etkilerinin farklı bir kombinasyonda kullanılması ile oluşturulan gürbüz bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Çalışmanın sadece simülasyon ortamında değil, endüstriyel bir çalışma uygulayan deneysel bir sistem üzerinde de gerçekleştirilmesi, sistemde oluşan sinyal zamanı gecikmelerine karşı yeni bir kontrol organı oluşturulması, simülasyon çalışması ile deneysel çalışma arasında oluşan önemli farklılıkların tespiti, tüm ters kinematik uygulamalarının simülasyon ortamında gerçekleştirilmesi bu doktora çalışması kapsamında yapılmıştır.

Bu çalışma yedi bölümü içermektedir. Birinci bölümde çalışma konusu ve önemi izah edildikten sonra çalışmanın amacı ve kapsamı anlatılmıştır. İkinci bölümde robot kontrolü ile ilgili literatür özetlenmiştir. Üçüncü bölümde model sistemler ayrıntılı olarak verilmiştir. Dördüncü bölümde geliştirilen kontrol algoritması hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde deneysel çalışma ve simülasyon çalışması hakkında bilgi

verilmiş, mekanik ve elektronik yapısı anlatılmıştır. Altıncı bölümde ise, simülasyon çalışmaları ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları göstermekte, bu sonuçlar grafikler halinde gösterilmektedir. Tüm çalışmanın ve elde edilen sonuçların genel değerlendirmesi ve yorumunun yapıldığı, çalışmanın ilerleyen aşaması ile ilgili değerlendirmelerde bulunulan bölüm ise yedinci bölümdür.

## 2. BÖLÜM

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 2.1. Giriş

Robotların iş planları, kontrolleri ve mekanik analizleri güncel bir inceleme konusudur. Robot ile hareketli iş tablasının veya birden fazla robotun ortak manipülasyonu ise ilerleyen teknolojik düzeyin beraberinde getirdiği bir inceleme konusudur. Daha kısa zamanda daha çok işlem gerçekleştirme veya daha büyük yüklerin olduğu durumlarda yeterli taşıma kuvvetinin sağlanabilmesi gibi sebeplerle ortak manipülasyon konusu gündeme gelmiştir. Sistemin gerçek zamanlı kontrol ediliyor olması ise ayrı bir önem taşımaktadır. İyi bir kontrol uygulaması minimum konumlama hatasının elde edilmesini ve kısa sürede istenen konumun elde edilmesini sağlayacaktır. Bu bölümde robotların kontrolüne yönelik yapılan araştırmalar ve gelişmeler verilmiştir.

#### 2.2. Literatür Araştırması

Ortak manipulasyonda karşılaşılan en önemli problemlerden birisi manipulatörlerin çalışması esnasında çarpışmasıdır. Çoğu zaman sadece geometrik çözümlerle gereken şartlar sağlanmakta; yörünge ve engelin hacminin kesişmemesini sağlayacak bir yörünge tanımlanması ile problem çözülmektedir.

Montaj otomasyonu gibi, endüstriyel alanlarda eğrisel yörünge kontrolü gerekmektedir. Bunun sebebi hassas konumlama ve çarpışmanın önlenmesi gerekliliğidir. Gerçek zamanlı çalışmada ortaya çıkan sinyal gecikmelerinin ve dinamik değişimlerin sistem kararlılığını etkilememesini sağlayacak kontrol organı yapısının geliştirilmesi ise ayrı bir önem taşımaktadır.

Çalışmamızda da kullanılan düzlemsel iş tablalarının özellikle takım tezgahları sektöründe olmak üzere yaygın bir kullanımı bulunmaktadır. İmalat ve otomasyon sistemlerinde hassasiyetin konum ve hız açısından önemi doğrultusunda bu sistemler hakkında bir çok çalışma yapılmıştır. Han vd. [1] yaptıkları çalışmada hareketli bir iş tablasının pozisyon kontrolünü incelemişlerdir. İş tablası üzerindeki kütlelerin değişimini değişken parametre olarak kabul edip kayan modda bir kontrol sisteminin formülasyonu gerçekleştirilmiş ve uygulanan kontrol sisteminin verimliliğini göstermek için pozisyon ve takip kontrol cevapları gösterilmiştir. Tseng vd. [2] yaptıkları çalışmada iş tablaları için yüksek hızlarda hassas konumlama konusunda çalışma yapmış olup, makro dinamik büyüklüklerde hareket gerçekleştiren ve aynı zamanda mikro dinamik hassasiyetlerde hızlı ve kesin pozisyonlamayı elde etmek için yeni bir kontrol sistemi stratejisi sunmuştur. Ayrıca belirli amaca yönelik hazırlanmış sistemler üzerinde kullanılan iş tablalarının kontrolü de tanımlı konumlara en hassas şekilde ulaşılabilmesi için gerçekleştirilmiş olup, bu şekilde özel amaca yönelik çalışmalar da yapılmıştır. Ho ve Ji [3] yaptıkları çalışmada melez bir genetik algoritma geliştirerek, montaj sırasında parça yerleşimlerinin ve parça tiplerinin düzeninin optimizasyonunu bir iş tablasından oluşan besleyici sistem üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Haut vd. [4] yumuşak ve sert biyolojik dokuların fiziki büyüklüklerinin ölçümü için 3 boyutlu bir koordinat ölçüm sistemi geliştirmişler ve bu sistemde iş tablasından yararlanmışlardır.

Nagchaudhuri [5,6] robotların ve nümerik kontrollü makinelerin ve takım tezgahlarının değişen iş gerekliliklerine göre yeniden kolay bir şekilde programlanabildiklerini ve bu özelliklerinden dolayı imalat otomasyon sistemlerinde geniş bir kullanım alanına sahip olduklarını göstermiştir. Çeşitli algılayıcılar ve görüntü işleme yöntemleri ile robotik sistemlerin esneklilerinin arttırılabilirliğini incelemiş ve deneysel olarak scara tipi bir robot üzerinde görüntü işleme ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Pham ve Yildirim [7] iki mafsallı düzlemsel robot kolunun kontrolünü yapay sinir ağları kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada önerilen kontrol sisteminin, robotun dinamik parametrelerindeki değişime adaptasyonundaki yüksek yetenek gösterilmiştir. Yildirim [8] Scara tipi bir robot üzerinde yeni bir yapay sinir ağı kullanarak yörünge kontrolü üzerine çalışma yapmıştır ve çalışmaları sonucunda önerilen algoritmayla kontrol sistemi yapısının scara robotları için verimli bir gerçek

zamanlı kontrol stratejisi sağladığını göstermiştir. Yıldırım [9], gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada, yürüyen robotlar için yapay sinir ağları kullanarak gerçekleştirdiği kontrol uygulamasında klasik PD kontrol organından daha iyi sonuçlar alındığını göstermiştir.

Fung vd. [10] tarafından iş tablasının genetik algoritma kullanılarak kontrolüne yönelik çalışma yapılmış, parametrelerin tespitinde deneysel çalışma ile çok uyumlu sonuçlar alındığı gösterilmiştir. İş tablası kontrolüne yönelik diğer bir çalışma ise yapay sinir ağların kullanılarak, geometrik telafi yöntemi ile Tan vd. [11] tarafından yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile çalışmanın sağladığı üstünlükler gösterilmiştir.

Zlajpah [12] Simulation in robotics isimli çalışmasında simülasyon çalışmalarının robot kontrolü alanında geldiği durumu açıklamıştır.

Briot ve Bonev [13] Robot kontrolünde gerçekleşen hatanın sebebini araştırmıştır. Bu hatanın en aza indirilmesi konusunda yeni bir metot önermişler, bu metodun tüm 3 serbestlik dereceli robotlarda kullanılabilir olduğunu tespit etmişlerdir.

Lin [14] seri bağlantılı robot kolları için deneyimden gelen karar sırasının eliminasyonunda adaptif fuzzy kontrol ve kuvvetlendirilmiş öğrenme sisteminin kombinasyonunu algoritma geliştirme sürecinde göz önüne almıştır. Önerilen bu sistemin simülasyonu scara robot üzerinde yapılmış olup, verimliliği gösterilmiştir. Lin ve Brandt [15] gürbüz kontrol problemlerinin optimal kontrol yaklaşımları kullanılarak nasıl çözülebileceğini göstermişler, yeni bir metot önermişler ve bu yaklaşımı scara tipi robot üzerinde uygulamışlardır. Bu yaklaşımın basitliği ve uygulanabilirliği bakımından diğer bütün gürbüz kontrol dizayn metotlarından daha verimli olduğu sonucuna varmışlardır. Hong ve Cho [16] tarafından montaj sırasındaki sınırlandırmalar sağlanırken, montaj maliyetinin minimize edilmesi halinde montaj sırası optimal olarak değerlendirilmektedir. Robotik bir montaj uygulaması için genetik algoritma metodu kullanılarak böyle bir sıralama gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, endüstriyel ürünler için bu metodun faydaları gösterilmiştir. Abdallah vd. [17] robotlar için gürbüz kontrol sistemlerinin genel bir değerlendirmesini yapmışlardır. Bu değerlendirmede analitik olarak hangi gürbüz kontrol sisteminin seçilmesi gerektiği sorusunun zorluğundan bahsedilmekle birlikte rehberlik edecek bilgiler önerilmiştir.

Fu ve Hsu [18] tarafından yapılan çalışmada karşılaşmanın önlenmesiyle ilgili olarak ilk çalışmalar, robot ana gövdesine ve robot-el uzuvlarına yakın uzuvlarda büyük ve küçük uzuvlar kullanarak robot şekillendirmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu metot yalnız küçük uzuvların çarpışacağını göz önünde bulundurmaktadır. Bu tür uzuvlar genellikle küçük hacimlidirler ve onları her robota eklemek için birtakım düzenli geometrilerin kullanımı iyi sonuç vermektedir. Wang [19] tarafından geliştirilen çarpışma bulma algoritmasında iki robotik manipülasyon için kollar silindir olarak modellenmiş olup doğru denklemi kullanarak silindirin merkezi bulunmuştur. Lin ve Tsai [20] tarafından çok kollu robot sistemleri için serbest hareket planı oluşturmuştur. Fallahi [21] tarafından beş kollu manipülatörler için çalışma alanını karakterize eden ve manipülatör sınırlarını belirlemek için sistematik prosedür geliştirilmiştir.

İkinci problem olan iki robotun bir cisim ortak taşınması yani kapalı zincir oluşturması önemli bir araştırma konusudur. Sadece bir robotun yetersiz olduğu ( taşınacak cismin tek robotun taşıma kapasitesinden ağır olduğu, taşınacak cismin boyutlarının tek robotun ulaşabileceği fiziksel sınırların dışında olduğu) durumlarda ortak manipülasyon işlemleri yapılması gerekmektedir. Çoklu robot sistemlerinin kinematik ve dinamik analizi ise robotik araştırmaların diğer yönünü teşkil etmektedir.

Zeheng ve Luh [22], Suh ve Shin [23], Lee [24], Kumar ve Waldron [25] tarafından kinematik ve dinamik analizler yapılmıştır. Kreutz ve Lokshin [26], Wen ve Kreutz [27] tarafından yük dengelenmesi ve kontrolü ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Chan vd. [28] ve Mattson ve Pennock [29] tarafından robotlarının hız problemleri Jacobian matris kullanılarak formülize edilmektedir. Kapalı zincir sisteminin dinamik modeli Hayati [30] tarafından elde edilmiştir. Bunların dışında Tarn vd. [31], Fruta vd. [32] ve Yun [33], Nakamura [34] tarafından dinamik model üzerine incelemeler yapılmıştır.

Farklı kontrol teknikleri kullanılarak ortak manipülasyonun kontrolü ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. İki farklı manipülatörün üç boyutlu cismin taşınması için dinamik model ve kontrol algoritması Unseren [35] tarafından geliştirilmiştir. Konum ve kuvvet kontrolünün aynı anda kontrolünü inceleyen araştırmacılar olmuştur. Konum

ve kuvvet kontrolünün aynı zamanda kontrol edilmesini Hsu [36] ile Perdureau ve Drouin [37] önermiştir. Wang ve McCalmroch [38], Jankovski [39] ve Yao [40] tarafından Lyapunov'un direk metodu kullanılmıştır. Arimoto vd. [41] master slave, Lian ve Lin [42] ise kayar kipli, Ozguner vd. [43] decentralized, karma konum/kuvvet kontrolü Uchiyama ve Dauchez [44], Walker vd. [45], Jean ve Fu [46] tarafından önerilmiştir.

Cisimleri tutmak için kullanılan birden fazla robot manipülatörlerin genel hedefe yönelik servo sistemi Ramadorai ve araştırma grubu tarafından incelenmiştir. Burada asıl amaç, cismin bulunduğu ortamda önceden planlanan yörünge boyunca istenilen hareketi gerçekleştirmesini sağlamaktır [47].

Luecke ve Gardner [48], bölgesel olarak manipülatör kontrol sistemlerinin kuvvet dağılımlarıyla ilgili yapmış oldukları çalışmada; açık kinematik zincirli ve kapalı kinematik zincirli robot manipülatörlerinin kontrolünde gereken kontrol kuvvetlerinin kontrolünde gereken kontrol kuvvetlerini üretmek amacıyla, sadece pozisyon ve hız hatalarını kullanan bölgesel kontrol sistemlerini incelemişlerdir. Bölgesel orantı etkili geri beslemeli kapalı çevrimli sistemlerin kullanımıyla üretilen ve ortak çalışan manipülatör sistemlerinin kontrolünde kullanılacak olan ortak kuvvetler vektörü, sonuçta minimum ağırlıklı Euclid normundaki ortak tork vektörüne dönüşmektedir. Bu kuvvet dağılımının elde edilmesini açıklayan ve analitik sonuçları doğrulayan deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Pang ve Sheng [49], yapmış oldukları çalışmada bir cismi iki robotun kaldırması durumunda sistemin modelini elde etmiş ve adaptif kontrol tekniği uygulamıştır. Cismin dinamiği göz önüne alınmış, adaptif kontrol tekniği cismin ve robot kolun dinamiğindeki belirsizliğinin üstesinden gelmiştir. Robot kolunun yörüngesi değil, taşınan cismin ağırlık merkezinin yörüngesi kontrol edilmiştir. Adaptif kontrolün, hesaplanmış tork tekniği ile yapılan kontrolden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Gao ve Cheng [50], robotlar arasında iş bölümünü basit ve koordineli bir şekilde dağıtılmasını, kuvvet ve hız geçiş zinciri yardımıyla çözen usta-yardımcı(master-helper)

kontrol yöntemi geliştirmiştir. Yük dağılımlı, hareket kordinasyonu, iç kuvvet uyuşmazlığı bu kontrol algoritması ile zlmştir. Bu kontrol algoritması vresel sınırlamalar olması durumunda tanımlanan işlemin izlendiği grlmştir. Kuvvet ve hız kontrolünün birlikte kullanılması konusunda diğer bir çalışma ise Jatta vd. [51] tarafından gerçekleştirilmiş, SCARA bir robot üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda konumlama hassasiyetindeki artış gösterilmiştir.

Sarıkaya [52], ortak çalışan iki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki robot maniplatrle cisim arasındaki bağıl hareketin olmadığını kabul ederek, ortak çalışan robot maniplatrlerle cismin tanımlı yörünge boyunca yapmış olduğu hareketin, Newton-Euler dinamik formülasyonu ile kinematik analizini gerçekleştirmiştir. Robot maniplatrle cismin arasındaki etkileşim ifadelerinden hareketle, ortak robotik manipülasyonun dinamik modeli kurulmuştur. Ortak manipülasyon için geliştirilen dinamik model; robot maniplatrlerle cismin atalet momenti, coriolis ve merkezkaç kuvvetleri ile, ağırlık kuvvetleri ve eklemlere uygulanması gereken tork ifadelerinden meydana gelmektedir. Ortak manipülasyonda yer alan cismin istenilen yörüngede hareketini hassas olarak gerçekleştirebilmesi için, manipülatör eklemlerine ait açısal konum ve açısal hız değerleri, hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model esaslı PD kontrol ve model esaslı adaptif kontrol metoduna göre kontrol edilerek, açısal konum ve açısal hız hata değerlerini hareket süresince minimum yapacak kontrol parametreleri araştırılmıştır.

zkan [53], yapmış olduğu çalışmada, birlikte çalışan iki robot kol ile bir nesneden oluşan sistemler incelenmiştir. Bu sistemlerin kinematik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Böylelikle, hareket denklemleri çıkarılarak, ele alınan sistemlerin tork/kuvvet katsayı matrisleri oluşturulmuştur. Aktif eklem açıları oluşturulduktan sonra sürücü torklar ve kuvvetler bulunmaya çalışılmıştır. Düzlemsel iki robot kol ile nesneden oluşan sistemler için geliştirilen kavramlar birlikte çalışan iki SCARA kolundan oluşan uzaysal sisteme uygulanmıştır.

Tarokh ve Seraji [54], yapmış olduğu çalışmada sistem PD kontrolörden oluşan i, PID kontrolöründen oluşan dış döngüden oluşmakta olup i döngü kararlılığı, dış döngü ise

sistem giriş ve çıkış arasındaki hatayı minimuma indirerek yörünge izleme kontrolünü sağlamaktadır. Geliştirilen kontrol kazançları sayesinde yörünge kontrolü sağlanmıştır.

Craig vd.[55] Adaptive Control of Robot Manipulator isimli yapmış oldukları çalışmada model esaslı kontrol tekniğine eklenebilir adaptif kontrol metodu geliştirmiş, Lyapunov'un ikinci metodunu kullanarak kararlı olduğu kanıtlamış, adaptasyon sonucunda hata dinamiğinden kaynaklanan yörünge hatasının giderildiği göstermiştir. Robot Manipulatorlerin Adaptif kontrolleri hakkında diğer bir çalışma ise Liuzzo ve Tomei [56] tarafından gerçekleştirilmiş, iki serbestlik dereceli düzlemsel bir robot modeli kullanılarak izleme hatalarındaki azalma gösterilmiştir.

Craig'in [57] algoritması Hsu vd.[58] tarafından geliştirmiş olup, geliştirilen bu algorithmada açısal ivmenin hesaplanmasına gerek duyulmamaktadır.

Feng ve Palaniswami [59], Lyapunov metodunu kullanarak adaptif kontrol algoritması geliştirerek robotun kartezyen koordinatlarda kontrolünü gerçekleştirmiştir. Adaptif kontrol algoritması ile bölgesel yakınsama ve kararlılık sağlanmıştır. Bu algoritmanın olumlu yönlerinden biri de Jacobian matrisinin tersinin alınmasına gerek duyulmamasıdır.

Ortega ve Spong [60], yapmış olduğu çalışmada, rijit robotların adaptif kontrolü alanında yapılan çalışmaları ve sonuçlarını makalesinde özetlemiştir. Adaptif kontrol, kontrol amacı ve parametreyi uygun hale getirme esasına göre sınıflandırılır. Parametreyi uygun hale getirme algoritması sistemin tahmin edilen parametre ve gerçek parametre arasındaki hataya (prediction error, hata kestirimi) veya istenen yörünge ve gerçek yörünge arasındaki hataya göre(izleme hatası) çalışmaktadır. İzleme hatasına esasına göre Craig [55], Spong ve Ortega [61], Amestegui [62], hassasiyet hatası tespiti esasına göre çalışan adaptif kontrol algoritması Middleton ve Goodwin [63] çalışmaları örnek olarak verilebilir. Bu metotlara adaptif hesaplanmış tork tekniği metodu adı da verilir.

Slotine ve Li [64]; Sadegh ve Horowitz [65], kapsam olarak adaptif hesaplanmış tork tekniğinden farklı olarak geri beslemenin lineerleştirilmesi olarak değil de, rijit robotun kapalı döngü içerisindeki pasifitesini koruma esasına göre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kelly ve Carelli [66], hesaplanmış tork tekniğine ek olarak terim eklemesi sonucunda kapalı döngü sisteminin pasifitesini korumuştur. Bu algoritma da hata izleme esasına göre çalışmaktadır [60].

Robotlarda taşınan cismin özelliklerin (kütle atalet momenti, ağırlık merkezi) tam olarak belirlenemediğinden dolayı parametre belirsizliği oluşmaktadır. Bu parametrelerin ölçülmesi ve hesap edilmesi geometrik olarak karmaşık cisimler için oldukça zordur. Bu gibi durumlarda adaptif ve gürbüz kontrol metotları kullanılmaktadır [67, 68].

Dawson vd. [69] Robot yörüngeyi kontrol amacı ile Lyapunov metodu kullanılarak adaptif kontrol elemanı tasarımı gerçekleştirmiştir. Düzgün sınırsız bozucu girişlere karşı konum, hız ve ivme hatalarının düzgün sınırlı oldukları gösterilmiştir.

Kelly [70], rijit robotlarda hareketin kontrolü için ileri sürdüğü adaptif kontrol tekniğinde hesaplanmış tork tekniği ile beraber integral adaptif kuralından oluşmaktadır. Yapmış olduğu çalışmada kapalı sistem için bölgesel olarak istenilen yörüngeye yakınsadığını göstermiştir.

Slotine ve Li [68], PD geri beslemeli ve parametre ve taşınan yükün belirsizliğini kompanse eden tamamen dinamik model ileri beslemeden oluşan adaptif kontrol metodu geliştirmiştir. Bu metotta, konum ve hız hatasının sıfıra yaklaştığı gösterilmiştir. Lyapunov kararlılığı gösterilmemiştir. Spong vd.[71] geri besleme kazanç matrisinin pozitif tanımlı olduğunu kabul ederek Lyapunov metodunu kullanarak kararlı olduğunu kanıtlamıştır.

Motor dinamiği, robot dinamik karakteristiğine etki eden faktörler arasında olup robotun kararlılığını etkilemektedir. Robot kol dinamiği içerisinde motor dinamiğinin bulunması, robot kol dinamiğinden daha karmaşık olup, motor ve robot parametre

değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Motor ve robot parametre değerlerinin bilinmemesi durumunda adaptif kontrol algoritması önerilmiş olup kararlılığı Lyapunov fonksiyonu ile kanıtlanmıştır [72].

Leib [73], yer çekimi torkunun belirsiz olması durumunda adaptif kontrol algoritması sunmuş, bu algoritma ile tahrik elemanının sınırlı olması durumunda sistemin yarı-bölgesel kararlı olduğu ve konum hatasının sıfıra yaklaştığını göstermiştir.

Dinamik modeli belirsiz olan manipülatörün izleme kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla kontrol elemanı tasarlanmıştır. İstenen adaptif algoritması ile beraber non-linear geri besleme kompensatörü, dinamik belirsizlikten oluşan izleme hatasını gidermek ve bölgesel kararlılığı sağlamak amacıyla Lyapunov metodu kullanarak kontrol elemanı tasarlanmıştır. Kontrol algoritmasının performansını gösteren bilgisayar simülasyonu gerçekleştirilerek izleme hatasını minimum yapan kontrol parametreleri tanımlanmıştır [74].

Kayan kipli kontrol metodu da parametre değişimleri ve bozucu girişlerin olması durumunda etkili kontrol metotları arasındadır. Bu özelliklerinden dolayı kayan kipli kontrol metodu robotikte geniş uygulama alanına sahiptir [75-79].

Chen ve Xu [80], geribesleme lineerleştirme tekniği ve dış sistem kavramı esaslı kayan kipli kontrol tekniği ileri sürmüştür. Robot-konveyör sisteminde yörünge izleme kontrolü ileri sürülen kontrol metodu ile gerçekleştirilmiştir.

Kayan kipli kontrol kapalı döngü sistemi oluşturup model belirsizliği ve dış bozucular karşısında etkilidir. Fakat değişim(switching) yüzeyinin belirsiz olduğu durumlarda sistemin yörüngesinde istenmeyen bir şekilde kayma meydana gelmektedir. Bu olumsuzluğun üstesinden gelmek için zamana göre değişen değişim(switching) yüzeyi kullanılarak yeni kayan kipli kontrol algoritması geliştirilmiştir. Performansını göstermek için bu algoritma iki uzuvlu düzlemsel manipülatöre uygulanmış, hatayı minimum yapan kontrol parametreleri araştırılmıştır [81].

Kayan kipli kontrol metodu, belirsizliği gidermek amacıyla robot manipülatörü kontrolünde zamana göre değişen sınır tabaka(boundary layer) ve değişen düzlemi izleme hatasının fonksiyonu olarak kullanılmış, sümülasyon sonucunda sistem dış bozucular karşısında ve parametre belirsizliği durumunda iyi performans gösterdiği görülmüştür [82].

Mo ve Hwan [83], önerdikleri gürbüz kontrol algoritmasında n kollu manipülatör için parametre belirsizliğinin üst sınırının bilinmediği kabul edilmiştir. Bu önerilen kontrol algoritması Corless-Leitman yaklaşımı esasına dayanmaktadır. Lyapunov kararlılık kriterini kullanarak yörünge hatasının sınırlı olduğunu göstermiştir.

Tang vd. [84] yapmış olduğu çalışmada istenen yörüngeyi izlemesi amacıyla dağıtılmış gürbüz kontrol metodu önermiştir. Kontrol elemanı Lyapunov'un ikinci metodu kullanılarak tasarlanmış ve kararlı olduğu gösterilmiştir. Bu kontrol metodu robot manipulatöre uygulanmış yörünge izleme hatasını minimum yapan kontrol parametreleri tanımlanmıştır.

Liu vd. [85] yapmış olduğu çalışmada gürbüz doymuş(saturation) kontrol algoritması ile birlikte integral kontrol algoritmasını kullanarak bölgesel olarak kararlı gürbüz kontrol algoritması geliştirmiştir. Bu kontrol algoritması robot manipulatöre uygulanmış, doymuş(saturation) ve integral kontrol algoritmaları ile karşılaştırılmış ve deneysel sonuçlar özetlenmiştir.

Mnif vd. [86], parametre belirsizliği bulunan manipülatörler için gürbüz kontrol metodu geliştirmiştir. Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk olarak Corless-Leithmann yaklaşımı ile sistemin kararlılığı sağlanarak hatanın yaklaşımı sağlanmıştır. İkinci kısımda ise devamlı(continuous) geri besleme kazançları ile parametrik olarak belirsiz sistemin asimtotik kararlılığı sağlanmıştır.

Kang vd. [87], yörünge izleme için gürbüz kontrol tekniği önermiştir. Bu metot iki kısımdan oluşmaktadır. Hesaplanmış tork tekniği metodu modellenmiş olan sistemi kompanse eder,  $H_{00}$  kontrolörü ise hesaplanmış tork tekniği ile kompanse edilmeyen

hataları gidermek amacıyla kullanılmıştır. Model yapısını ve parametre değerlerini tanımlamak için deneysel metot kullanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yu [88], yapmış olduğu çalışmada gürbüz adaptif kontrol metodu geliştirmiştir. Çalışmasında direk, indirek ve bunların birleşiminden oluşan kontrol metodundan oluşmaktadır. Sonra değişken yapılı(variable structure) adaptif kontrol metodu konusunda çalışmıştır. Son olarak yeni adaptif ve değişken yapılı(variable structure) adaptif kontrol metodu önerilmiştir.

Lyapunov fonksiyonu esas alınarak basit gürbüz kontrol algoritması geliştirilmiştir. İlk olarak kararlılığı ve performansı sağlanmış, sonradan deneysel sonuçlar verilmiştir. Önerilen gürbüz kontrol algoritmasının izleme hatasını azalttığı görülmüştür [89].

Manipulatörün dinamik modeli non-linear eşitlik olarak ifade edilmektedir. Ayrıca yükleme durumunda parametre değerleri bilinmemekte ve sürekli değişmektedir. Bu problemi gidermek için kayan kipli kontrol algoritması kullanılmaktadır. Kayan kipli kontrol algoritmasının performansını kanıtlamak için SCARA tipi robotun noktasal kontrolüne uygulanmış, yük ağırlığının değişmesi sonucu parametre değerleri değiştiği halde kayan kipli kontrol algoritmasının iyi sonuç verdiği deneysel sonuçlarda görülmüştür [90].

Abdallah vd. [91], yapmış olduğu çalışmada literatürde geçen rijit robotların gürbüz kontrolünü beş kısımda incelemiştir. Bunlar lineer çok değişkenli, passivity(hareketsizlik), değişken yapılı(variable-structure), saturation(doyma), gürbüz-adaptif yaklaşım. Lineer çok değişkenli veya geri besleme lineerleştirme yaklaşımında [92], bölgesel lineerleştirilme ve robot dinamik denkleme eşdeğer sistem elde etmek için ters dinamik denklemi kullanılır. Burada ters dinamik denklemini iyi belirlenememesi durumunda lineerleştirme ve sistemi robot denkleme tekrar eşleme tam elde edilemez. Bu durum çok değişkenli gürbüz kontrol tekniğinde belirsiz geri besleme terimi kullanarak sağlanır [93]. Bu metotlar hesaplanmış tork tekniği esasına dayanır [68], [94]. İkinci metotta ise robotların pasivite özelliği kullanılarak kontrol işlemi gerçekleştirilir [95]. Bu teknik de, robot/kontrol elamanını oluşturan kapalı

sistem robot parametre belirsizliği olduğu halde sistem pasif hale getirilmeye çalışılır. Kollar kontrol ve hesaplanmış tork tekniği kadar açık(saydam,belirli) olmadığı halde yine de pasivite esaslı kontrol metodu kapalı döngü robot/kontrolör sistemini kararlı hale getirir. Bu metodla ilgili çalışmalar [96-98]' de özetlenmiştir.

Diğer grup ise, Lyapunov esaslı non-lineer kontrol kapsamına giren değişken yapılı ve doyma(saturation) teknikleri olup robusly olarak rijit robotlar kontrol edilmeye çalışılır. Variable structure kontrol metodu birçok nonlinear işlemler için kullanılmıştır. Değişken yapılı teorisini Yound [99], ilk olarak robot kontrolüne uygulamıştır. Diğer variable structure control ile ilgili çalışmalar ise [100-108]'de verilmiştir.

Gürbüz saturation yaklaşımında ise robotun dinamik denkleminde verilen belirsizliği kompanse etmek için ek kontrol vektörü tasarlanmaktadır. Spong [104], Cvetkovic [105], Barmish [106], Gutman [107] ve Corless [108] bu alanda çalışmış olan araştırmacılar arasındadır.

Son olarak gürbüz-adaptif yaklaşımda ise gürbüz ve adaptif kontrol tekniklerinin karışımından oluşmaktadır [109,110]. Adaptif ve gürbüz kontrol algoritmalarının bulunduğu çalışmalar arasında [111,112], adaptif kontrolün öğrenme kabiliyetli olduğu, gürbüz kontrolün ise bozucu girişleri gidermekte ve parametre belirsizliği durumunda istenilen performansı sağlamada etkilidir. Gürbüz kontrolde ise st sınır belirlenmekte, parametre değerleri zamanla düzenlenmemektedir. Burada yalnız kestirilen belirsiz parametrelerin düzenlendiği gibi, bu belirsizlik azaltılmaktadır.

Yau ve Tomizuka [113] yapmış olduğu deneysel çalışmasında sonuçları aşağdaki gibi özetlemiştir:

1. Adaptif kontrolde son izleme hatası gürbüz kontrolden küçük.
2. Model esaslı adaptif kontrolün son izleme hatası adaptif kontrol esasına dayanan izleme hatasından küçüktür.
3. En iyi izleme performansı kompensative tipli adaptif kontrolünde oluşmaktadır
4. Dinamik kompensatörün iyileştirilmesi ile izleme hatası iyileştirilmektedir.

Ayrıca yakın zamanda oluşan farklı adaptif gürbüz kontrol algoritmalarının olumlu yönleri SCARA robot üzerinde yapılmış deney çalışması sonucunda özetlenmiştir [114].

Song vd. [115], kayan kipli kontrol esasına göre integrated adaptif gürbüz kontrol algoritması geliştirmiştir. Bu kontrol algoritması adaptif ve gürbüz kontrol algoritmasının olumlu yönlerini kapsamakta, iki kontrol algoritmasının olumsuz yönlerini gidermektedir. Bu kontrol algoritması adaptif kontrol gibi öğrenme özelliğine, gürbüz kontrol gibi belirsizlikten ve bozucu girişten dolayı oluşan izleme hatalarını gidermektedir. Ayrıca bölgesel olarak sistem kararlıdır. Bu metot bir kollu manipülatör üzerinde uygulanmıştır.

Yapılan literatür araştırmasında, önerilen gerçek zamanlı robot kontrolüne yönelik çalışmaların teorik çalışmaların doğruluğunu tespit etmeyi de sağlayan güncel bir araştırma konusu olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, gerçek zamanlı çalışma için farklı kontrol uygulamalarının incelenmesini mümkün kılan deneysel bir sistem ve bu sistemde istenen hassas konumlamayı sağlayan gürbüz bir kontrol algoritması geliştirilmiş, deneysel sistem üzerinde ve simülasyon ortamında kontrol uygulaması gerçekleştirilmiştir.

## 3. BÖLÜM

### MODEL SİSTEMLER

#### 3.1. Giriş

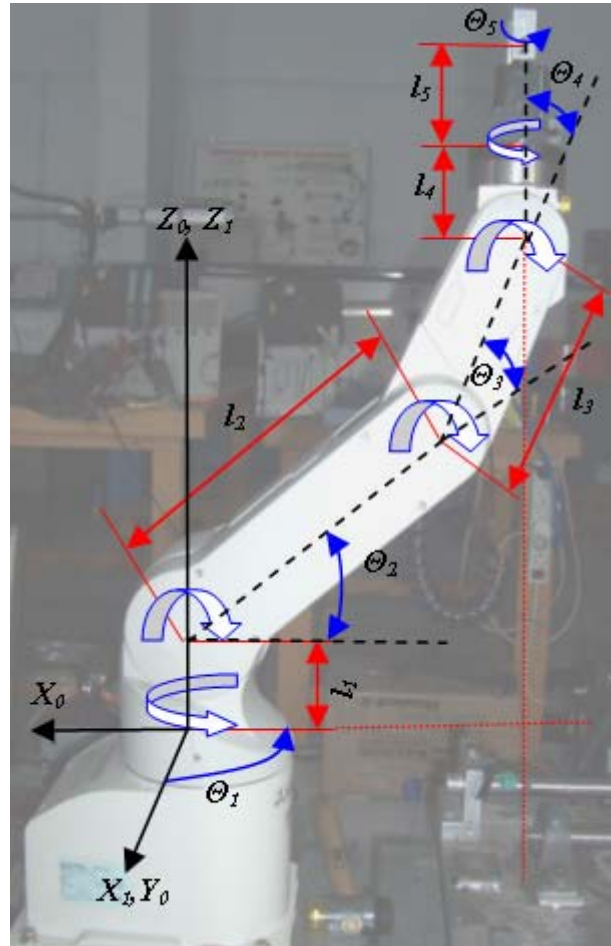
Kayar veya döner mafsalla bağlanmış çeşitli rijit elemanlardan oluşan çok serbestlik dereceli mekanizmalar endüstriyel robotlar olarak isimlendirilmektedir. Bu mekanizma zincirinin bir ucu serbest ve robot manipülatörün kullanılma amacına göre değişik yapıdaki el mekanizmaların bağlanabileceği bilek olup, bileğin gerçekleştirebileceği hareketler genel halde üç serbestlik derecesi ile sınırlıdır. Bu elin istenen yörüngeyi gerçekleştirilmesi için eklem tork/kuvvet fonksiyonlarının belirlenmesi gereklidir. Robot kol dinamiği, manipülatörün hareketini tanımlayan matematiksel denklemlerden oluşur ve robotun istenilen yörüngeyi takip etmesini sağlayan eklem ve kuvvet torklarının hesaplanmasını sağlar. Elde edilen kuvvet ve tork fonksiyonlarından hareket edilerek manipülatör kontrolü gerçekleşir.

Robot modeli olarak iki uzuvlu düzlemsel, üç boyutlu manipülatör ve SCARA tipi robot; ortak manipülasyon sistemi olarak 3 serbestlik dereceli düzlemsel iş tablası ve model robot ortak manipülasyonu seçildi.

Bu çalışmada endüstriyel bir mikro robot olan MITSUBISHI RV-2AJ modeli kullanıldı. Şekil 3.1' de Mitsubishi RV-2AJ robot 3 boyutlu modeli gösterilmiş olup, açık zincir yapısal bir robottur. Robota ait uzuv boyları Tablo 3.1' de verilmiş olup, uzuv açıklamaları Şekil 3.1' de verilmiştir. Robot uzuvları yüksek gerilme dayanımına sahip alüminyum alaşımından imal edilmiştir. Dayanıklı yan panelleri koruma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu konstrüksiyon robotun gerekli dayanımla birlikte hafif olmasını sağlamaktadır. Böylece daha yüksek hızlarda ve daha hassas çalışma imkanı elde edilmektedir. Özellikle çalışmanın durması veya elektrik kesilmesi esnasında yerçekim kuvvetinin dengelenmesi amacıyla eklemlerde fren mekanizması kullanılmıştır.

Robotun operasyon aralıkları şöyledir: bel dönüşü için  $-150^{\circ}$  -  $+150^{\circ}$  (maksimum hız  $180^{\circ}/s$ ), omuz dönüşü için  $-60^{\circ}$  -  $+120^{\circ}$  (maksimum hız  $90^{\circ}/s$ ), dirsek dönüşü için  $-110^{\circ}$  -  $+120^{\circ}$  (maksimum hız  $135^{\circ}/s$ ), bilek adım hareketi için  $-90^{\circ}$  -  $+90^{\circ}$  (maksimum hız  $180^{\circ}/s$ ), bilek yuvarlanma hareketi için  $-200^{\circ}$  -  $+200^{\circ}$  (maksimum hız  $210^{\circ}/s$ ) ' dir.

Eksen hareketlerinin elde edilmesi için AC servomotor kullanıldı. Hareket komutları bilgisayar veya kontrol donanımı ile verilebilmektedir. Bütün komut iletimi ve haberleşmeler paralel veya seri port kullanılmak suretiyle yapılabilmektedir. Mitsubishi RV-2AJ robotun tekrarlama hassasiyeti  $\pm 0.02$  mm'dir.



Şekil 3.1. Mitsubishi RV-2AJ robot.

Tablo 3.1. Mitsubishi RV-2AJ Robot Uzunlukları

Uzuv	Uzunluk: (mm)
Omuz Öteleme Miktarı	0
Üst Kol Uzunluğu	250
Ön Kol Uzunluğu	160
Dirsek Öteleme Miktarı	0
Bilek Uzunluğu	72

### 3.2. Robot Manipülör Kinematiği

Mitsubishi RV-2AJ robot 5 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlar bel, omuz, dirsek, bilek adım ve bilek yuvarlanma'dır. Şekil 1.'deki geometrik bağıntılardan robot kolu uç nokta pozisyonu şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}
 x_0 &= [l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23} + (l_4 + l_5) \cos \theta_{234}] \sin \theta_1 \\
 y_0 &= [l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23} + (l_4 + l_5) \cos \theta_{234}] \cos \theta_1 \\
 z_0 &= l_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_{23} + (l_4 + l_5) \sin \theta_{234}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Burada;  $l_1$ ,  $l_2$  ve  $l_3$  Şekil 3.1.'de gösterilmiş olan uzuv boyları,  $[\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3, \theta_{234} = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4]$ ,  $\theta_{23}$  bel açısı,  $\theta_2$  omuz açısı,  $\theta_3$  dirsek açısı,  $\theta_4$  is bilek adım açısı ve  $\theta_5$  bilek yuvarlanma açısıdır.  $\theta_{234}$  ise  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  ve  $\theta_4$  açıları toplamıdır.

Denklem (3.1)'in düzenlenmesi ile robota ait Jakobyen matrisi aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [a_1 + l_2 c_2 + l_3 c_{23} + (l_4 + l_5) c_{234}] s_1 & -(l_2 s_2 + l_3 s_{23} + (l_4 + l_5) s_{234}) s_1 & -(l_3 s_{23} + (l_4 + l_5) s_{234}) s_1 & -(l_4 + l_5) s_{234} s_1 \\ -[a_1 + l_2 c_2 + l_3 c_{23} + (l_4 + l_5) c_{234}] s_1 & -(l_2 s_2 + l_3 s_{23} + (l_4 + l_5) s_{234}) c_1 & -(l_3 s_{23} + (l_4 + l_5) s_{234}) c_1 & -(l_4 + l_5) s_{234} c_1 \\ 0 & l_2 c_2 + l_3 c_{23} + (l_4 + l_5) c_{234} & l_3 c_{23} + (l_4 + l_5) c_{234} & (l_4 + l_5) c_{234} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \\ d\theta_3 \\ d\theta_4 \end{bmatrix} &= \underline{J(\theta)} d\theta
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Burada  $J(\theta)$  Jakobyen matrisini ifade etmektedir.  $C_2 = \cos(\theta_2)$ ,  $C_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ ,  $S_2 = \sin(\theta_2)$ ,  $S_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$  [30] eşitliklerine sahiptir.

Takip eden analizler, yalnızca önemli manipülatör uzuvlarına uygulanacaktır. Üst kol, ön kol, ve robot ana gövdesi hesaplamalarda temel inceleme uzuvları olacaktır.

### 3.3. İki Uzuvlu Düzlemsel Manipülatör

Newton-Euler denklemi kullanılarak sürtünmenin olmadığı kabul edildiğinde  $n$  kollu robot manipülatörlerin dinamik modeli aşağıdaki gibi yazılır [108],

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = T \tag{3.3}$$

$q$  genel koordinat,  $T$   $n \times 1$  boyutlu tork vektörü,  $M(q)$   $n \times n$  pozitif tanımlı atalet matrisi,  $C(q, \dot{q})$   $n \times 1$  Coriolis ve merkezkaç kuvvet terimleri,  $G(q)$   $n \times 1$  boyutlu gravitasyon terimleridir.

Denklem (3.3) aşağıdaki formda düzenlenebilir.

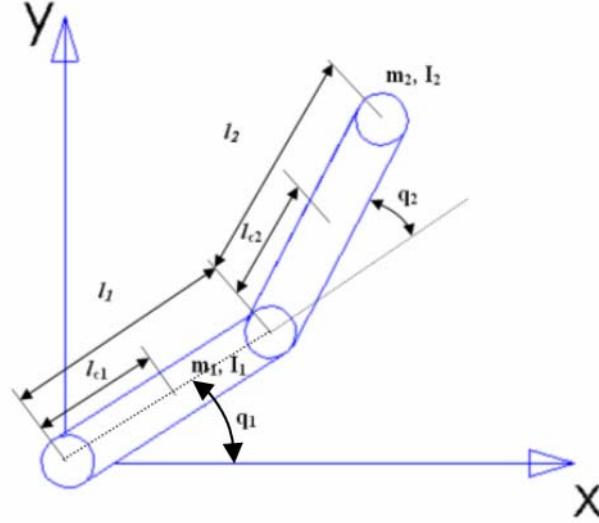
$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\pi = T \tag{3.4}$$

Burada  $\pi$  sabit olup ( $p \times 1$ ) boyutlu matris,  $Y$  ise eklem açısının konum, hız ve ivmenin zamana göre değişimini gösteren  $n \times p$  boyutlu matristir.

Şekil 3.1'de görülen iki kollu düzlemsel manipülatör için robot kol parametreleri;

$$\pi_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1, \pi_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2, \pi_3 = m_2 l_1 l_{c2}, \pi_4 = m_1 l_{c1}, \pi_5 = m_2 l_1, \pi_6 = m_2 l_{c2}$$

Burada  $l_1$  ve  $l_2$  birinci ve ikinci kolun uzunluğu,  $l_{c1}$  ve  $l_{c2}$  birinci ve ikinci kolun ağırlık merkezinin uzaklığı,  $I_1$  ve  $I_2$  birinci ve ikinci kolun kütle atalet momenti,  $m_1$  ve  $m_2$  birinci ve ikinci kolların kütlelerini göstermektedir. İki uzuvlu düzlemsel manipülator Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. İki uzuvlu düzlemsel manipülator.

Yukarıda tanımlanan parametre değerlerine göre robotun  $M(q)$ ,  $C(q)$  ve  $G(q)$  iki kollu düzlemsel manipülator için aşağıdaki gibi tanımlanır [116, 117].

$$\begin{aligned}
 M &= \begin{bmatrix} \pi_1 + \pi_2 + 2\pi_3 \cos(q_2) & \pi_2 + \pi_3 \cos(q_2) \\ \pi_2 + \pi_3 \cos(q_2) & \pi_2 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} -\pi_3 \sin(q_2) \dot{q}_2 & -\pi_3 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \pi_3 \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \\
 G &= \begin{bmatrix} g(\pi_4 + \pi_5) \cos q_1 + g\pi_6 \cos(q_1 + q_2) \\ g\pi_6 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

Denklem (3.4)'deki  $Y$  matrisinin  $y_{ij}$  bileşenleri;

$$\begin{aligned}
 y_{11} &= \ddot{q}; y_{12} = \ddot{q} + \ddot{q}; y_{13} = \cos(q_2)(2\ddot{q} + \ddot{q}) + \sin(q_2)(\dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2); y_{14} = g_c \cos(q_1); \\
 y_{15} &= g_c \cos(q_1); y_{16} = g_c \cos(q_1 + q_2);
 \end{aligned}$$

$$y_{21} = 0 ; y_{22} = \ddot{q} + \ddot{q} ; y_{23} = \cos(q_2) \ddot{q}_1 + \sin(q_2) (\dot{q}_1)^2 ; y_{24} = 0 ; y_{25} = 0 ; y_{26} = g_c \cos(q_1 + q_2) ;$$
(3.6)

### 3.4. SCARA Tipi Robot:

Şekil 3.3'te görülen scara tipi robotun birinci ve ikinci kolun hız bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$v_{0,1} = \begin{bmatrix} l_{c1} S_1 \\ l_{c1} C_1 \end{bmatrix} w_1 \quad v_{0,2} = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 - l_{c2} S_{12} & -l_{c2} S_{12} \\ l_1 C_1 + l_{c2} C_{12} & l_{c2} S_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}$$
(3.7)

Lagrange denkleminde birinci ve ikinci kolun kinetik enerjisi aşağıdaki gibi yazılır [118].

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 v_{0,1}^T v_{0,1} + \frac{1}{2} w_{0,1}^T I_1 w_{0,1}$$
(3.8)

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_{0,2}^T v_{0,2} + \frac{1}{2} w_{0,2}^T I_2 w_{0,2}$$
(3.9)

Burada;

$$v_{0,1}^T v_{0,1} = l_{c1}^2 w_1^2 ; w_{0,2} = w_1 + w_2$$
(3.10)

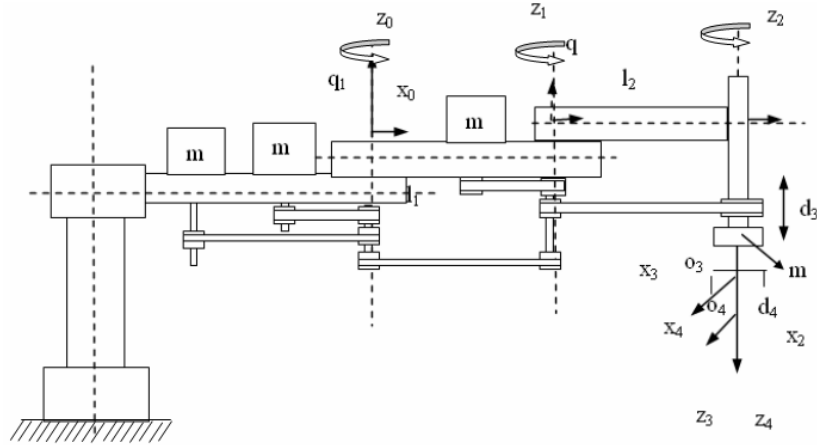
$$v_{0,2}^T v_{0,2} = (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} C_2) w_1^2 + l_{c2}^2 w_2^2 + (2l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} C_2) w_1 w_2$$
(3.11)

Yukarıda tanımlanan eşitliğe göre birinci kolun kinetik enerjisi;

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 w_1^2 + \frac{1}{2} I_1 w_1^2$$
(3.12)

İkinci kolun kinetik enerjisi;

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 [(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} C_2) w_1^2 + l_{c2}^2 w_2^2 + (2l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} C_2) w_1 w_2] + \frac{1}{2} I_2 (w_1^2 + 2w_1 w_2 + w_2^2)$$
(3.13)



Şekil 3.3. Scara tipi robot.

Sistemin potansiyel enerjisi sıfır olduğundan, sistemin toplam enerjisi kinetik enerjiye eşit olup, sistemin toplam enerjisi  $K$  aşağıdaki gibi yazılır

$$K = K_1 + K_2 = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 w_1^2 + \frac{1}{2} I_1 w_1^2 + \frac{1}{2} m_2 [(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} C_2) w_1^2 + l_{c2}^2 w_2^2 + (2l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} C_2) w_1 w_2] + \frac{1}{2} I_2 (w_1^2 + 2w_1 w_2 + w_2^2) \quad (3.14)$$

Birinci ve ikinci ekleme uygulanan tork denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$T_1 = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial w_1} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_1} \quad (3.15)$$

$$T_2 = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial w_2} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_2} \quad (3.16)$$

$w_1 = \dot{q}_1$  ve  $w_2 = \dot{q}_2$  olarak alınırsa dinamik model aşağıdaki gibi elde edilir.

$$T = M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} \quad (3.17)$$

Robot kol parametre değerleri;

$$\pi_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1 \quad \pi_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2 \quad \pi_3 = m_2 l_1 l_{c2} \quad (3.18)$$

Bu parametre değerlerine göre tork denklemi oluşturan M ve C matrisleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$M = \begin{bmatrix} \pi_1 + \pi_2 + 2\pi_3 \cos(q_2) & \pi_2 + \pi_3 \cos(q_2) \\ \pi_2 + \pi_3 \cos(q_2) & \pi_2 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

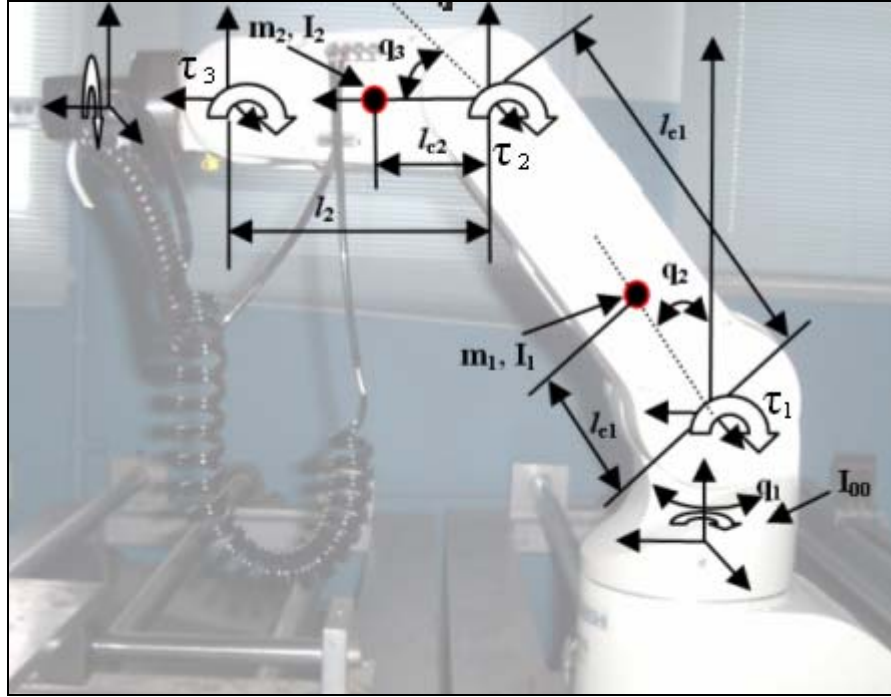
$$C = \begin{bmatrix} -\pi_3 \sin(q_2) \dot{q}_2 & -\pi_3 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \pi_3 \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Tork denklemi  $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\pi = T$  formunda yazılırsa Y matrisi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Y = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 & \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 & \cos(q_2)(2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + \sin(q_2)(\dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2) \\ 0 & \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 & \cos(q_2)\ddot{q}_1 + \sin(q_2)(\dot{q}_1^2) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

### 3.5. Üç Boyutlu Manipülator

Newton-Euler denklemi kullanılarak sürtünmenin ihmal edildiği kabul edilirse Şekil 3.4'te görülen üç boyutlu eklemli manipülator için eklemlere etki eden tork değerleri aşağıdaki gibi ele edilir [119].



Şekil 3.4. Üç boyutlu robot.

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \{I_{00} + (m_1 l_{c1}^2 + I_1) \cos^2 q_2 + m_2 l_1 [l_1 \cos q_2 + 2l_{c2} \cos(q_2 + q_3) \cos q_2] \\ & + (m_2 l_{c2}^2 + I_2) \cos(q_2 + q_3)\} \ddot{q}_1 + 2 \{m_1 l_{c1}^2 + I_1\} \sin q_2 \cos q_3 + m_2 l_1 [l_1 \sin q_2 \cos q_2 \\ & + l_{c2} \sin q_2 \cos(q_2 + q_3)] + (m_2 l_{c2}^2 + I_2) \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3)\} \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ & + 2 [m_2 l_1 l_{c2} \cos q_2 \sin(q_2 + q_3) + (m_2 l_{c2}^2 + I_2) \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3)] \dot{q}_1 \dot{q}_3 \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & (m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos q_3 + m_2 l_{c2}^2 + I_2) \ddot{q}_2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos q_3 + m_2 l_{c2}^2 + I_2 \ddot{q}_3 \\ & - \{(m_1 l_{c1}^2 + I_1) \cos q_2 \sin q_2 + m_2 [l_1^2 \cos q_2 \sin q_2 + l_1 l_{c2} \cos q_2 \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3)] \\ & + I_2 \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3)\} \dot{q}_1^2 + m_2 l_1 l_{c2} \sin q_3 \dot{q}_3^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \sin q_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \\ & + g \{m_1 l_{c1} \cos q_2 + m_2 [l_1 \cos q_2 + l_{c2} \cos(q_2 + q_3)]\} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned}
\tau_3 = & (2m_2 l_1 l_{2c} \cos q_3 + m_2 l_{c2}^2 + I_2) \ddot{q}_2 + (m_2 l_{c2}^2 + I_2) \ddot{q}_3 - m_2 [l_1 l_{c2} \cos q_2 \sin(q_2 + q_3) \\
& + l_{c2}^2 \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3)] + I_2 \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) \dot{q}_1^2 - (m_2 l_1 l_{2c} \cos q_3) \dot{q}_2^2 \\
& \{ (m_1 l_{c1}^2 + I_1) \cos q_2 \sin q_2 + m_2 [l_1^2 \cos q_2 \sin q_2 + l_1 l_{c2} \cos q_2 \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3)] \\
& + g [m_2 l_{c2} \cos(q_2 + q_3)] \} \quad (3.24)
\end{aligned}$$

Burada  $I_{00}$  gövdenin kütle atalet momenti,  $l_1$  ve  $l_2$  birinci ve ikinci kolun uzunluğu,  $l_{c1}$  ve  $l_{c2}$  birinci ve ikinci kolun ağırlık merkezinin uzaklığı,  $I_0$  gövdenin,  $I_1$  ve  $I_2$  birinci ve ikinci kolun kütle atalet momenti,  $m_1$  ve  $m_2$  birinci ve ikinci kolların kütlelerini göstermektedir.

Robot parametreleri;

$$\begin{aligned}
\pi_1 = I_{00} \quad \pi_2 = m_1 l_{c1}^2 + I_1 \quad \pi_3 = m_2 l_1^2 \quad \pi_4 = m_2 l_1 l_{c2}^2 \quad \pi_5 = m_2 l_{c2}^2 + I_2 \quad \pi_6 = m_1 l_{c1} \quad \pi_7 = m_2 l_1 \\
\pi_8 = m_2 l_{c2}
\end{aligned}$$

Bu parametre değerlerine göre Denklem (3.1)'deki M, C ve G matrisleri aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$M(q) = \begin{bmatrix} \pi_1 + \pi_2 c_2^2 + \pi_3 c_2 + 2\pi_4 c_{23} c_2 + \pi_5 c_{23} & 0 & 0 \\ 0 & \pi_2 + \pi_3 + 2\pi_4 c_3 + \pi_5 & \pi_4 c_3 + \pi_5 \\ 0 & \pi_4 c_3 + \pi_5 & \pi_5 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 2\pi_5 s_{23} c_{23} (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) & (2\pi_2 s_2 c_2 + 2\pi_3 s_2 c_2 + 2\pi_4 s_2 c_{23}) \dot{q}_1 & (2\pi_4 c_2 c_{23}) \dot{q}_1 \\ -(\pi_2 s_2 c_2 + \pi_3 s_2 c_2 + \pi_4 s_2 c_{23} + \pi_5 s_{23} c_{23}) \dot{q}_1 & 2\pi_4 s_3 \dot{q}_3 & \pi_4 s_3 \dot{q}_3 \\ -(\pi_4 c_2 s_{23} + \pi_5 s_{23} c_{23}) \dot{q}_1 & -\pi_4 s_3 \dot{q}_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ g\pi_6 c_2 + g\pi_7 c_2 + g\pi_8 c_{23} \\ g\pi_8 c_{23} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Denklem (3.23), (3.24) ve (3.25) denklem (3.2)'deki gibi yazılırsa Y matrisinin bileşenleri;

$$y(1,1) = \ddot{q}_1$$

$$y(1,2) = \cos(q_2)^2 \ddot{q}_1 + 2\sin(q_2)\cos(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2$$

$$y(1,3) = \cos(q_2) \ddot{q}_1 + 2\sin(q_2)\cos(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2$$

$$y(1,4) = 2\cos(q_2 + q_3)\cos(q_2) \ddot{q}_1 + 2\cos(q_2)\sin(q_2 + q_3) \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2\sin(q_2)\cos(q_2 + q_3) \dot{q}_1 \dot{q}_2$$

$$y(1,5) = \cos(q_2 + q_3) \ddot{q}_1 + 2\sin(q_2 + q_3)\cos(q_2 + q_3) (\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3)$$

$$y(1,6) = 0; y(1,7) = 0; y(1,8) = 0$$

$$y(2,1) = 0; y(2,2) = \ddot{q}_3 - \sin(q_2)\cos(q_2) \dot{q}_1^2; y(2,3) = \ddot{q}_3 - \sin(q_2)\cos(q_2) \dot{q}_1^2$$

$$y(2,4) = \ddot{q}_3^2 \cos(q_3) + 2\cos(q_3) \ddot{q}_2 - \sin(q_2)\cos(q_2 + q_3) \dot{q}_1^2 + \sin(q_3) \dot{q}_3^2 + 2\sin(q_3) \dot{q}_2 \dot{q}_3$$

$$y(2,5) = \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \sin(q_2 + q_3)\cos(q_2 + q_3) \dot{q}_1^2$$

$$y(2,6) = g \cos(q_2); y(2,7) = y(2,6); y(2,8) = g \cos(q_2 + q_3);$$

$$y(3,1) = 0; y(3,2) = 0; y(3,3) = 0$$

$$y(3,4) = \cos(q_3) \ddot{q}_2 - \cos(q_2)\sin(q_2 + q_3) \dot{q}_1^2 - \sin(q_3) \dot{q}_2^2$$

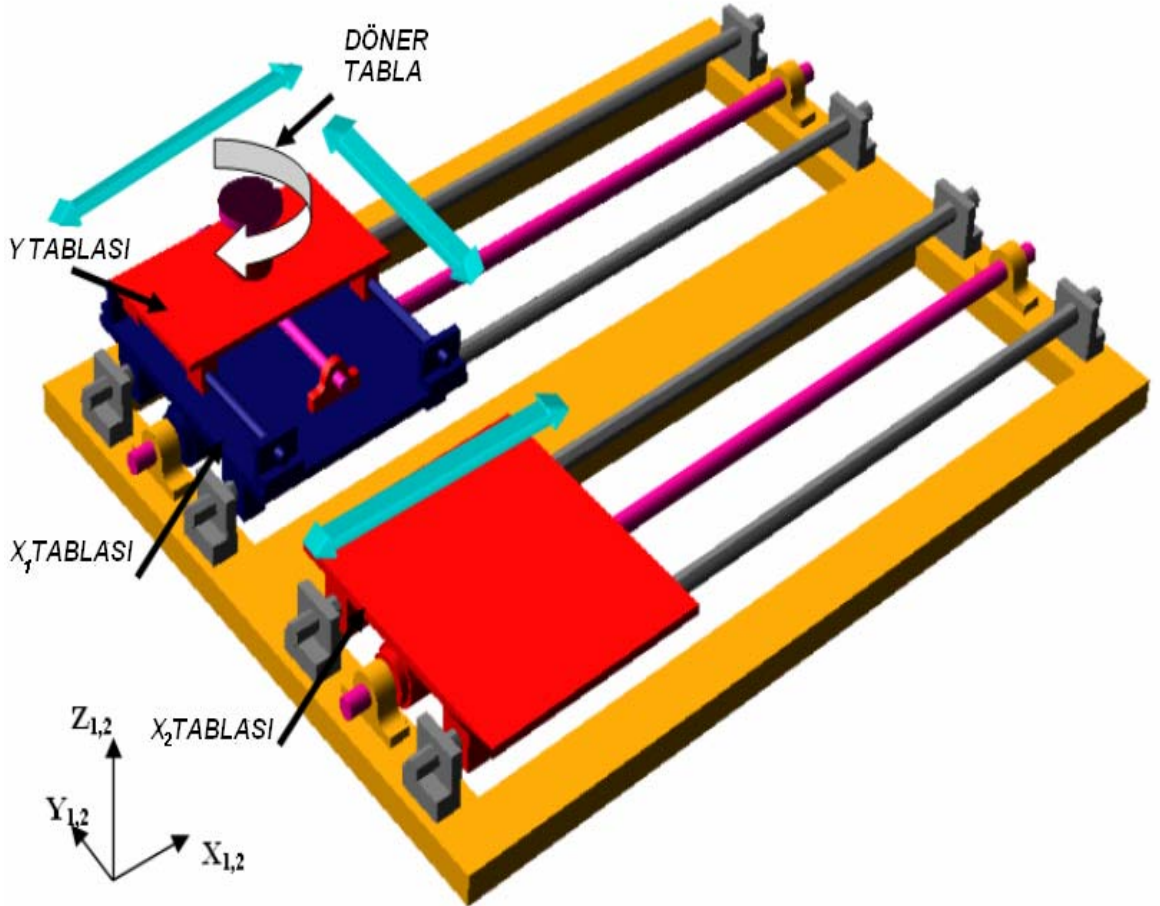
$$y(3,5) = \ddot{q}_3 + \ddot{q}_2 - \sin(q_2 + q_3)\cos(q_2 + q_3) \dot{q}_1^2$$

$$y(3,6) = 0; y(3,7) = 0; y(3,8) = y(2,8)$$

(3.28)

### 3.6. İş Tablası Dinamiği

İş tablası sistemi 3 serbertlik dereceli olup, iki lineer ve bir dönme hareketi gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda robot taşıyıcı tabla hareketi tek serbestlik dereceli olarak çalışmaktadır. Sistem Şekil 3.5’ te gösterilmiştir.

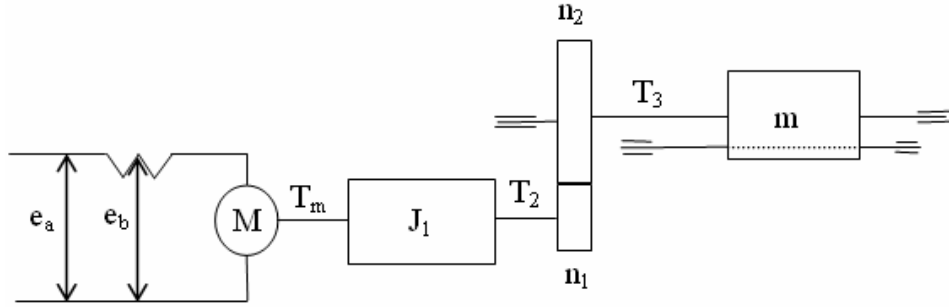


Şekil 3.5. İş tablası ve eksen hareketleri.

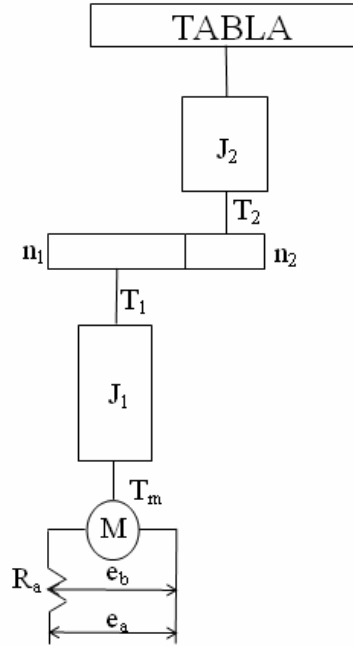
$X_1$ ,  $X_2$  ve  $Y$  tablalarına ve döner tablaya ait matematiksel modeller tamamen ortak özellik taşımaktadır. Sadece sistem elemanlarına ait parametre değerleri farklıdır. Bu durumda matematiksel model ifadesi ortak şekilde ele alınacaktır.

Sistem servomotor, redüktör, konum bilgisi için motor ünitesine entegre edilmiş olan encoder, bilyalı vida ve somun çifti ile lineer yataklama ünitesinden oluşmaktadır.

Doğrusal hareket gerçekleştiren  $X_1$ ,  $X_2$  ve Y Tablaları ile döner tablaya ait modeller sırası ile Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.6.  $X_1$ ,  $X_2$  ve Y tablası model görünüm.



Şekil 3.7. Döner tabla model görünüm.

Burada:  $T_m$  motor mili torkü,  $n_1$  motor mili çıkış dişlisi diş sayısı,  $n_2$  iş tablası dişlisi diş sayısı,  $T_1$  dişli kutusu giriş torkü,  $T_2$  dişli kutusu çıkış torkü’ nu ifade etmektedir.

Kirchoff kanunu’ nun motor çevrimine uygulanmasından armatür voltajı  $V_a$  şu şekilde bulunur;

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + K_b w(t) \quad (3.29)$$

Burada  $w$  açısal hızı (rad/san),  $I_a$ = Armatür Akımı (Amper),  $R_a$ = Armatür Direnci (Ohm),  $L_a$ = Motor İndüktansı (Henry),  $K_b$ =Motor voltajı (emf) sabiti (Volt/(Raydan.Saniye)) ve  $t$  ise zamanı (Saniye) göstermektedir.

$$T_m(t) = J_e \cdot \frac{dw(t)}{dt} + B \cdot w(t) + T_s(t) \quad (3.30)$$

formülü ile sistem için gerekli toplam tork değeri statik ve dinamik değerlerin toplamından elde edilmektedir.

Burada;  $T_m$ = Motor miline uygulanması gereken tork değeri,  $J_e$ =Eşdeğer motor mili atalet momenti,  $B$ = Eşdeğer sürtünme katsayısı,  $T_s$ = Motor miline etkiyen statik tork değeri' ni ifade etmektedir.

$$T_s = T_{gf} + T_{lf} + T_f \text{ ' dir.} \quad (3.31)$$

$T_{gf}$ = kızaklardaki sürtünmeye bağlı tork kaybı,  $T_{lf}$  = bilyalı vida yapısı ve önyüklemeye sebebiyle gerçekleşen tork kaybı ve  $T_f$  = işlem esnasında gerçekleşen tork kaybı' nı ifade etmektedir. Bu tork değerleri ise şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$T_{gf} = \frac{h_p}{2\pi} \cdot \mu_{gf} [(m_i + m_w)g + F_z] \quad (3.32)$$

Burada;  $\mu_{gf}$  = Kızaklar için sürtünme katsayısı,  $m_i$ = iş tablası ağırlığı,  $m_w$ = İş tablası üzerinde taşınan yük ağırlığı,  $F_z$ = işlem esnasında oluşan normal kuvvet,  $h_p$ = vida hatvesi ve  $g$ = yerçekimi' ni ifade etmektedir.

$$T_{lf} = \mu_b \cdot \frac{db}{2} (F_f + F_p) \text{ olup,} \quad (3.33)$$

Burada,  $\mu_b$  = bilyalı vida için sürtünme katsayısı,  $d_b$ = Bilyalı vida çapı,  $F_f$ = İşlem esnasında uygulanan maksimum besleme kuvveti,  $F_p$ = Ön yükleme kuvveti' ni ifade etmektedir.

$$T_f = \frac{h_p}{2\pi} F_f \quad (3.34)$$

formülü ile tespit edilir.

Burada statik tork çok yüksek olduğu için motor mili ile bilyalı vida arasında redüktör uygulaması yapılmaktadır. Bu durumda;

$$r_g = \frac{z_l}{z_m} = \frac{n_m}{n_l} \quad (3.35)$$

formülü ile redüksiyon oranı tespit edilmektedir. Bu durumda motor miline etkiyen redüksiyona uğramış tork değeri;

$$T_{sr} = T_s / r_g \quad (3.36)$$

ifadesi ile elde edilir.

Burada;  $z_m$ = Motor mili dişlisi diş sayısı,  $z_l$ = bilyalı vida dişlisi diş sayısı,  $n_m$ = motor mili çıkışı açısal hız,  $n_l$ = Bilyalı vida açısal hızı' nı ifade etmektedir.

Sistemde motor miline etkiyen toplam atalet momenti;

$$J_e = \frac{J_{nw} + J_l}{r_g^2} + J_m \quad (3.37)$$

ifadesinden elde edilir.

Burada;  $J_m$  = motor mili atalet momenti toplamı,  $J_{nw}$ = iş tablası ve taşınan elemanların toplam atalet değeri,  $J_l$  ise bilyalı vida' nın toplam atalet momentini ifade etmektedir.

Burada;

$$J_{nw} = (m_t + m_w) \left( \frac{h_p}{2\pi} \right)^2 \quad (3.38)$$

ve

$$J_i = \frac{1}{2} m_i \left( \frac{d_p}{2} \right)^2 \quad (3.39)$$

formülleri ile hesaplanır.

Bu formüllerdeki;  $d_p$ = vidalı mil çapını ve  $m_i$ = vidalı mil ağırlığı' nı göstermektedir.

### 3.7. İş Tablası ile Robotun Eş Zamanlı Manipülasyonu

Eş zamanlı manipülasyon, yörünge planlanması ve yörünge izleme kontrolü güncel bir çalışma konusudur. Çeşitli üretim alanlarında otomasyonun geliştirilmesi, yüksek iş verimi ve çalışma esnekliği sağlayabilen çözümlerin bulunmasını gerektirmektedir. Bu amaçlar doğrultusunda birden fazla manipülatörün eş zamanlı kullanımının geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu tür sistemler; endüstriyel otomasyondan, çevrede zararlı maddelerin taşınmasına, uzay çalışmalarından, denizaltı çalışmalarına kadar birçok uygulama alanına yayılmıştır.

Tek manipülatör tarafından yapılamayan birtakım işlerin, birden fazla manipülatörün eş zamanlı çalışmasıyla gerçekleştirilebileceği tespiti ile eş zamanlı manipülasyon sistemlerinin gelişiminde hızlı bir artış sağlanmıştır. Bu işlevler; ağır, uzun, geniş veya esnek cisimlerin taşınmalarını da içermektedir. Ayrıca, belirli bir amaç için farklı görevleri gerçekleştiren birden fazla robotun eş zamanlı kullanımı da söz konusudur. Bu doğrultuda, birden fazla manipülatörün bir arada çalışarak istenen birtakım özel görevleri yerine getirmesini sağlayan otomasyon ve imalat birimleri ilgi odağı olmuştur. Robotların katkısıyla geliştirilen otomasyon, sistemlerin hem esnekliğini artırmakta hem de kapasitenin yeniden düzenlenmesine imkan tanımaktadır. Bununla birlikte, robot entegrasyonu sağlanmış çoklu manipülatörlerin eş zamanlı kullanımı, bir takım teorik ve pratik problemlerin çözümünü de gerekli kılmaktadır. Bunlar daha çok koordinasyon, sıralama, çarpışmalar ve iletişim yapısına bağlı olarak gelişmektedir.

Eş zamanlı manipülasyonda koordinasyonunun en önemli konularından birisi, manipülatörlerin çalışması esnasında çarpışmanın önlenmesidir. Bir çok durumda probleme, manipülatörlerin çalışma alanı içerisinde herhangi bir hareketsiz engelin

olduğu düşünülerek yaklaşılmaktadır. Bu engel tehlike bölgesini tanımlamaktadır. Bu durumda problem sadece geometrik bir özellik taşımaktadır ve gereken şart, yörünge ve engelin hacminin kesişmemesini sağlayacak bir yörüngeyi tanımlanmasıdır. Manipülörlerin eş zamanlı çalışması esnasında, çalışma alanı içerisinde engellerin yerlerinin değişmesi durumunda problem daha karmaşık bir hal almaktadır. Montaj otomasyonu gibi endüstriyel alanlarda eğrisel yörünge kontrolü gerekmektedir. Eş zamanlı manipülasyon için geliştirilen dinamik model; manipülörlerle cismin atalet momenti, koryolis ve merkezkaç kuvvetleri ile, ağırlık kuvvetleri ve eklemlere uygulanması gereken tork ifadelerinden meydana gelmektedir. Eş zamanlı manipülasyonda yer alan cismin istenilen yörüngede hareketini hassas olarak gerçekleştirebilmesi için, manipülör eklemlerine ait açısal konum ve açısal hız değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada; sistem mekanik modelinin oluşturulması, son işlemler ve iş parçası hareket yörüngesinin tespiti ve bu yörünge hareketinin elde edilmesi için robot eklemlerinin ve diğer manipülörlerin yapması gereken zamana bağlı konum değişimlerinin elde edilmesi ve teorik modelleri analitik olarak oluşturulan tüm sistem elemanlarının ortak etkileşimlerini simülasyon ortamında incelemek için MSC firmasının ürünü olan ADAMS yazılımı kullanıldı. MSC.ADAMS bir çok yapıdan oluşan sistemlerin dinamik simülasyonlarının yapılması için en yaygın kullanılan yazılımlardandır. Bu yazılım kullanılarak eş zamanlı manipülasyonda kullanılacak olan manipülör hareketleri tanımlı hale getirilmektedir.

Eş zamanlı manipülasyon çalışmasında, sistem için gerekli invers kinematik uygulaması uç nokta konumunun istenen şekilde gerçekleşmesi için her bir eklemin yapması gereken hareketlerin tanımlanması ile gerçekleştirildi. Bu amaçla model sistemde giriş değerleri eksenler için tork değeri olarak tanımlandı, çıkış değeri ise eksenlerden alınan konum bilgisi olarak oluşturuldu. Sistem lineer olmayan etkileri inceleme imkanı verecek şekilde modellendi.

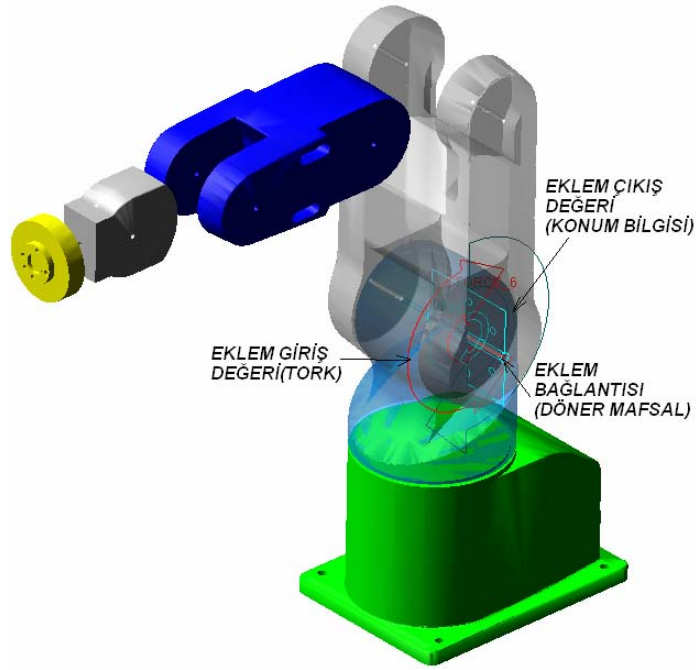
MSC.ADAMS modeli oluşturulurken sırası ile şu işlemler gerçekleştirildi;

1. SOLIDWORKS yazılımı kullanılarak iş tablası ve 5 serbestlik dereceli robot gerçek fiziksel boyutlarında 3 boyutlu olarak çizildi.
2. Tüm 3 boyutlu çizimler farklı bir programda çizilmiş dosyaların program içine getirilmesi özelliği kullanılarak tek bir dosya içinde olacak şekilde MSC.ADAMS programı içine transfer edildi.
3. MSC. ADAMS içine getirilmiş olan 3 boyutlu çizim parçaları gerçekte olduğu şekilde tanımlanan bağlantı elemanları ile birbiri ile ilişkilendirildi. Örneğin, tabla hareketlerinde kullanılan bilyalı vida mekanizması aynı tanımlamalarla MSC.ADAMS yazılımında tabla ile mil arasında tanımlandı. Robot eklemleri döner mafsallarla birbiri ile ilişkilendirildi (Şekil 3.8). Tüm eklem bağlantıları ve manipülatör tanımlamaları gerçek sistemle uyumlu olacak şekilde MSC.ADAMS yazılımında kontrol uygulamasının gerçekleştirilmesi için oluşturuldu. Bu aşama da iş tablasına ait kütleli veriler şu şekilde tespit edilmiştir;

Tablo3.1. İş tablası iş elemanlarının kütleli değerleri

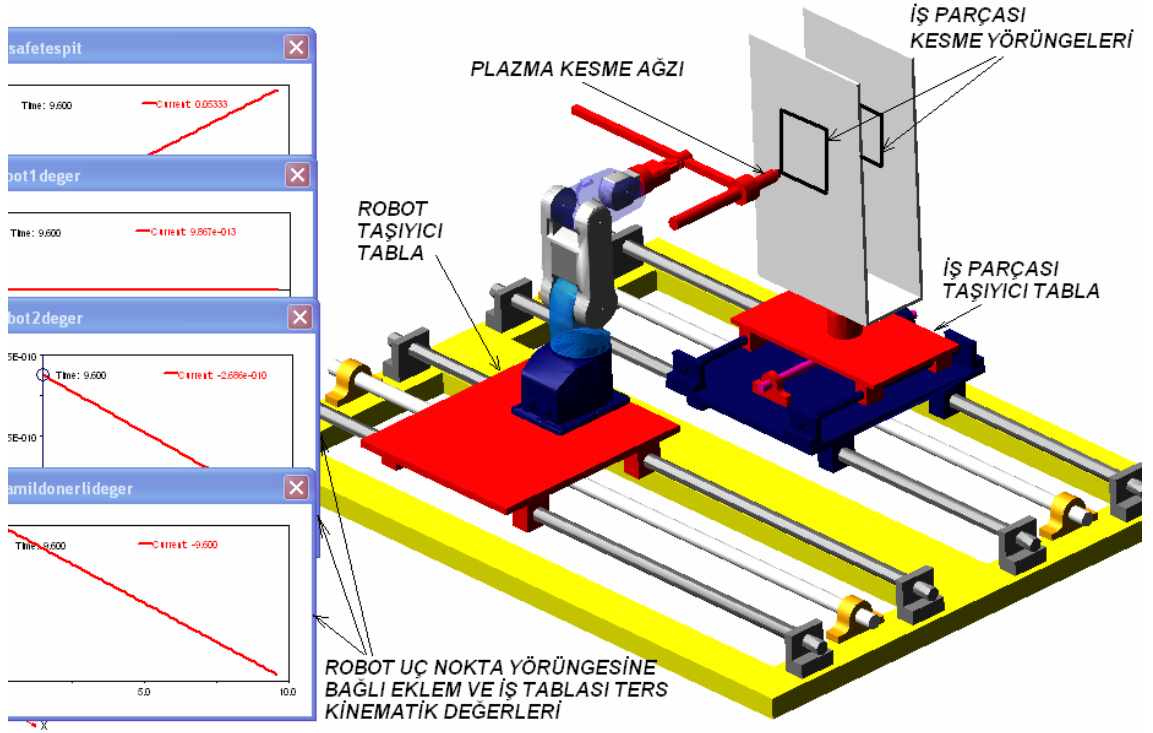
İş Tablası İş Elemanı Adı	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	Kütle [kg]
X <sub>1</sub> TABLASI	540	610	20	-	57.315
Y TABLASI	300	530	14	-	19.366
DÖNER TABLA	-	-	20	150	1.536
X <sub>2</sub> TABLASI	540	610	20		57.315

A: En, B: Boy, C: Kalınlık, D: Çap



Şekil 3.8. MSC.ADAMS robot modeli ve eklem bağlantıları.

- İş parçası üzerinde gerçekleştirilecek olan plazma kesme işlemi yörüngesi tanımlandı. İş tablası ve ayrı bir tabla üzerinde hareket eden robotun eş zamanlı manipülasyonunun sağlanması için ortak iş tanımı gerçekleştirildi. Bu amaçla 400X500X100[mm] ebatlarına sahip iki düzlemsel plakayı paralel şekilde bulduran geometride bir iş parçası tanımlandı. Sistem üzerinde bulunan döner tabla yardımıyla iş parçasının her iki yönünde de işlenebilmektedir (Şekil 3.9).
- Simülasyon ortamında gerçekleştirilen plazma kesme işlemi esnasında her bir robot eklemi ve iş tablası hareket elemanı için ters kinematik uygulaması ile (bu değerler MSC.ADAMS yazılımı ile direkt olarak sistemden ölçülmektedir) eş zamanlı manipülasyon esnasında gerçekleştirilmesi gereken hareket tanımlaması yapılmış, Şekil 3.9.' dan da görüleceği gibi zamana bağlı sayısal değerler tespit edilmiştir.

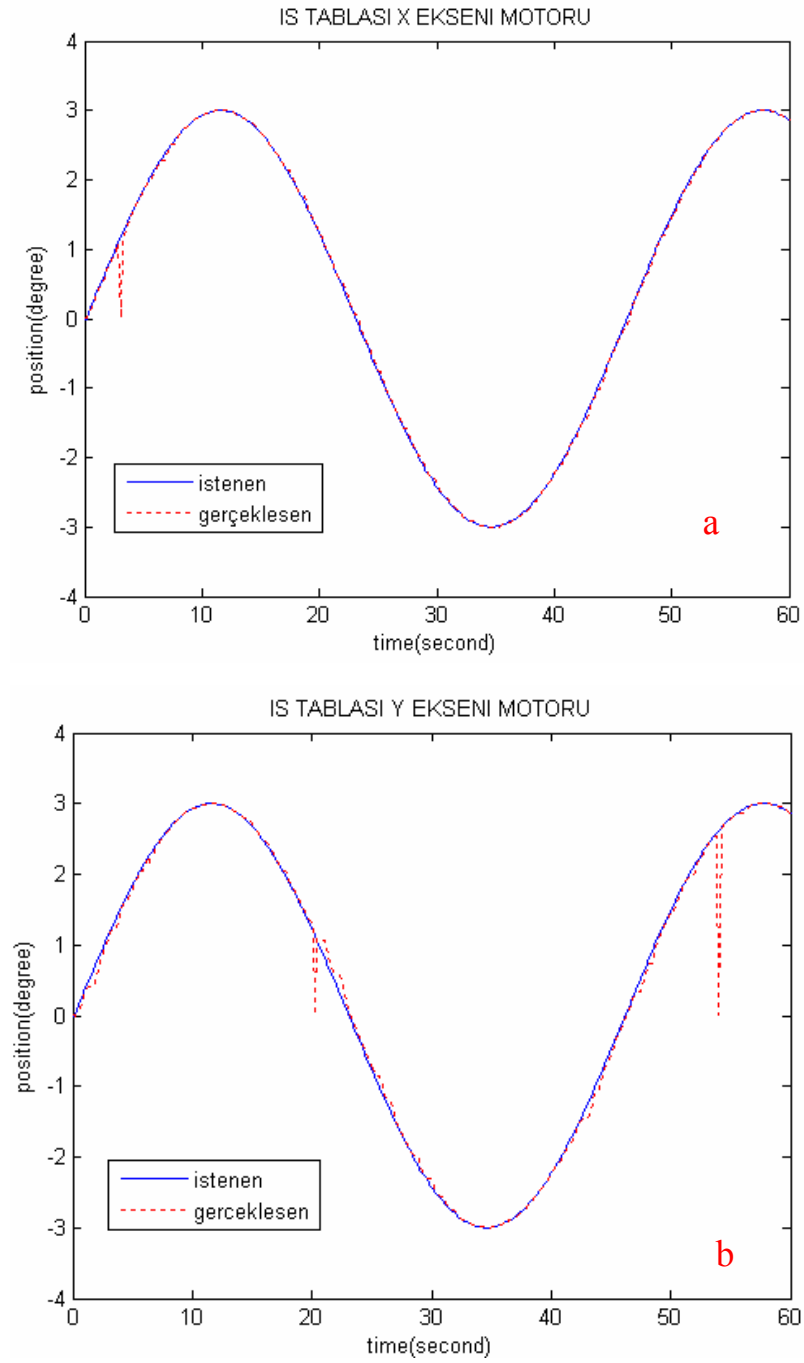


Şekil 3.9. Eş zamanlı manipülasyon MSC.ADAMS yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyon çalışması.

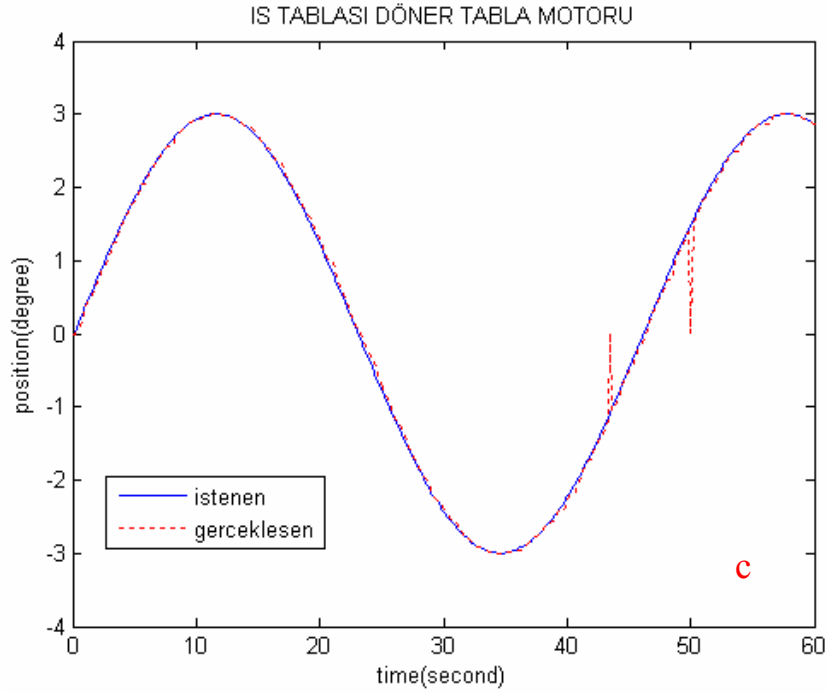
6. Gerçek zamanlı çalışma esnasında, eş zamanlı manipülasyon simülasyon çalışmasında elde edilen her bir eklem ve iş tablası elemanının zamana bağlı konum bilgileri ve bu konum bilgilerine bağlı sürücüler yardımıyla tork değerleri olması gereken değerler olarak sisteme gönderilmekte ve böylece iş tablası ile 5 serbestlik dereceli robot arasındaki ortak manipülasyon deneysel sistemde de gerçekleştirilmektedir. Ortak manipülasyonda kullanılan robot için elde edilen gerçek zamanlı kontrol çalışması sonuçları ise sonuçlar kısmında verilmiştir.

Çalışmada; iş tablası X eksen, Y eksen ve döner tabla ile gerçekleşen dönme eksen hareketleri için kullanılan servomotorlar elektronik donanımları ile desteklenen PID kontrolcü yapısına sahiptir. Bu sebeple bu eksen hareketleri tanımlı işi gerçekleştirmek için kullanılmakta, bu motorlar üzerinde ilave bir kontrol uygulaması gerçekleştirilmemektedir. Ancak, mevcut durumun tespiti için deneysel bir çalışma gerçekleştirilerek eksen motorları için konumlama hassasiyeti tespit edildi ve sonuçlar

Şekil 3.10.(a, b, c) ' de gösterildi. Her üç eksen motoru için yapılan çalışmada bazı noktalarda anlık sapmalar görülmekte, tekrar istenen duruma dönmektedir. Bu sonuç tamamen gürültü etkisinden kaynaklanmaktadır. İlerleyen aşamada, sistemde ortaya çıkan ortam gürültülerden izolasyona yönelik önlemler alınarak, bu istenmeyen durum ortadan kaldırılacaktır.



Şekil 3.10. İş tablası eksen motorları deneysel çalışma konumlama hassasiyetleri.



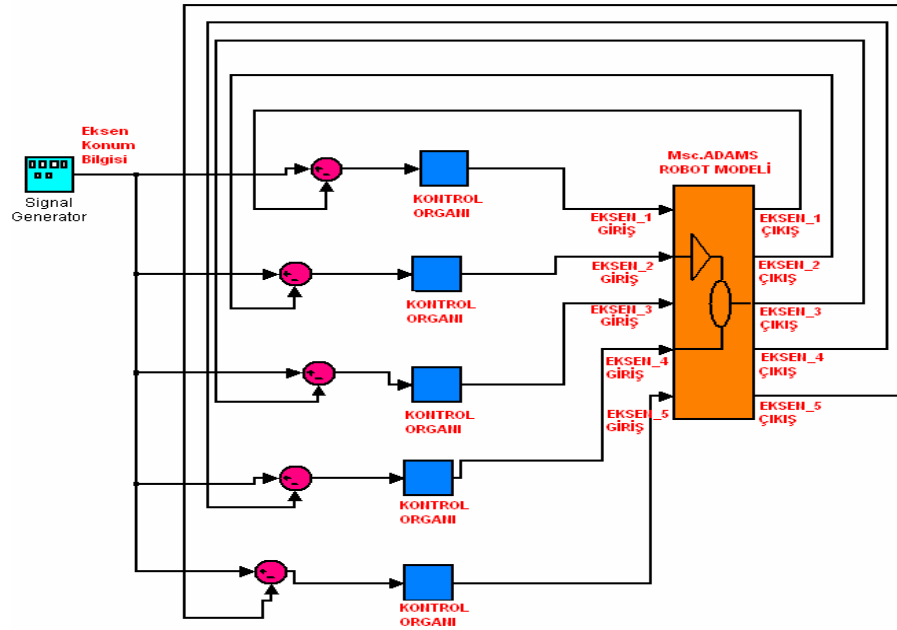
Şekil 3.10.' un Devamı.

Bu sonuçlar göstermektedir ki; deneysel çalışma da kullanılacak olan eksen servomotorları elektronik donanımları ile desteklenen hassas bir konumlama yapısına sahiptirler. Deneysel olarak ilave kontrol etkisi katılması bu motorların pozisyonlamasında mevcut donanımsal yapıları sebebiyle olumsuz etki etmektedirler.

### 3.8. Deneysel Sistemde Kontrol İçin Simülasyon Çalışması

Deneysel sistemin MSC.ADAMS programında oluşturulan modeli ile simülasyon çalışmaları sadece robot ve iş tablası için son işlemci konumuna bağlı her bir eklem ve hareket elemanının zamana bağlı konum verilerinin elde edilmesi için yapılmamaktadır. Aynı zamanda oluşturulan MSC.ADAMS modeli sistem elemanlarının hareketlerinde gerekli kontrol uygulamalarının gerçekleştirilmesi için MATLAB/SIMULINK yazılımında kullanılacak sistem modeli ve buna bağlı transfer fonksiyonu görevini gerçekleştiren kontrol elemanının oluşturulmasını sağlamaktadır.

Kontrol aşamasında transfer fonksiyonu için giriş ve çıkış değerleri hem robot hem de diğer iş tablası elemanları için tanımlanabilmektedir (kontrol uygulamasında incelemeler sadece 5 serbestlik dereceli robot ile gerçekleştirilecektir). Böylece; sistemin dinamik modeli transfer fonksiyonu olarak kullanılabilir. Geri besleme değerleri olarak eklemlerde tanımlanan encoderlardan alınan anlık konum bilgisi kullanılmaktadır. Sistemden alınan anlık konum bilgilerinin hedeflenen konum bilgisinden farkı alınarak anlık konumlama hatası değeri tespit edilmekte, bu değer kontrol bloğuna gönderilmesi ve kontrol etkisinin katılması ile simülasyon çalışmasında kontrol uygulaması yapılmaktadır. Deneysel çalışma esnasında ise MSC.ADAMS programı kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonu yerine sistemin kendisi kullanılmaktadır. Bu konudaki mekanik ve elektronik donanım bilgileri 6. bölüm'de açıklanmıştır. Simülasyon çalışması için MSC. ADAMS yazılımında oluşturulan modelin kontrol için transfer bloğu ve Simulink modeli robot kontrol kısmı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Deneysel sistem MATLAB/SIMULINK yazılımı ile gerçekleştirilen kontrol sistemi blok diyagramı.

## 4. BÖLÜM

### YÖRÜNGE KONTROLÜ

#### 4.1. Giriş

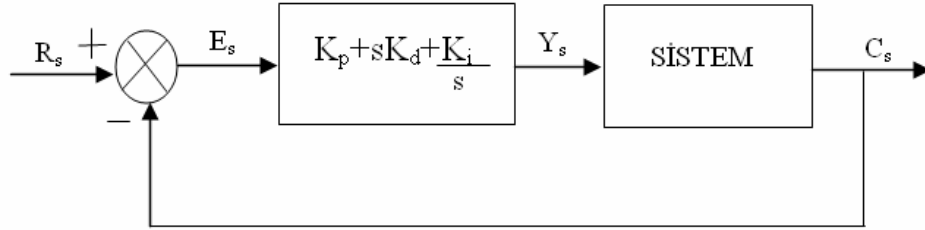
Robot kontrolü alanında kullanılmakta olan bir çok kontrol tekniği kadar, yörünge izleme kontrolü, noktasal kontrol, eklem veya kartezyen uzayında kontrol gibi bu tekniklerin uygulandığı alanlar da önemlidir.

Eklem uzayında kontrol iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak işlem uzayındaki robot tutucusunun konumundan faydalanarak ters kinematik formülünden açısal konum hesaplanmakta, sonrasında referans yörüngenin izlenmesi için eklem uzayında açısal kontrol gerçekleştirilmektedir. Bu kontrolde, robot kolunun elastik oluşundan veya tutucunun konumunun iyi belirlenememesinden kaynaklanan bazı sapmalar olabilmektedir.

İşlem uzayında kontrol ise eklem uzayına göre daha karmaşık algoritma içermektedir. Eklem uzayındaki açı değerleri direk olarak alınmayıp ters kinematik formülü ile açısal değerler hesaplanmakta ve geri beslemeye ters kinematik eşitliği eklenmektedir. Genel olarak hareket kartezyen uzayında tanımlanıp robot elin ivmesi, hızı ve konumu tanımlanarak bu değerlere karşılık gelen açısal değişkenler ters kinematik formülünden yararlanarak hareket eklem uzayında tanımlanır. Bunlar arasında hesaplanmış ivme konum kontrolü [120], hesaplanmış tork tekniği kontrolü gibi çalışmalar olup farklılığı referans yörünge ve hata kartezyen koordinatlarda tanımlanmıştır [121].

## 4.2. PID Kontrol

Oransal, İntegral ve Türev etkilerin birlikteliği ile oluşan kontrol organı PID kontrol organı olarak tanımlanır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Standart PID kontrol sisteminin blok diyagramı

PID kontrol organının matematiksel ifadesi şu şekildedir;

$$y(t) = K_p \left[ e(t) + T_d \frac{de}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right]$$

$$y(t) = \left[ K_p e(t) + K_d \frac{de}{dt} + K_i \int_0^t e(t) dt \right]$$

Burada  $y(t)$  kontrol organı çıkışını,  $e(t)$  hata sinyalini,  $K_p$  oransal kazanç katsayısını,  $K_i$  integral kazanç katsayısı,  $K_d$  türevsel kazanç katsayısını,  $T_d$  ve  $T_i$  türev ve integral zaman sabitlerini ifade etmektedir [122]. Tüm çalışmada kazanç katsayıları sönümlü titreşim yöntemi kullanılarak bulunmuştur.

## 4.3. Önerilen Gürbüz Kontrol

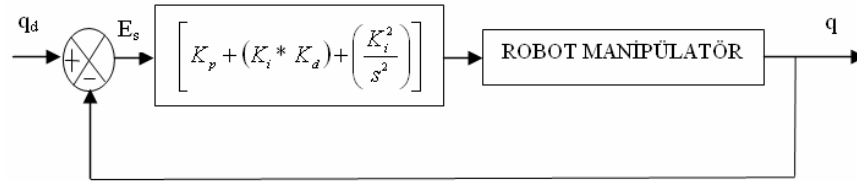
Özellikle robotik uygulamalarda PID kontrol yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bunun sebebi motor kontrolünde PID kontrol organının sağladığı çok iyi sonuçlardır. Ancak, bozucu etkilere ve sinyal zamanı gecikmesine karşı klasik PID kontrol organı ile iyi sonuçlar alınmadığı görülmüştür ve bu durum literatürde de sıkça ifade edilmektedir. Bu sebeple içinde PID bulunduran bir çok melez kontrol uygulaması yapılmıştır.

Klasik PID kontrol organını oluşturan elemanların etkileri incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmaktadır;

- Oransal denetleyiciler ( $K_p$ ), yükselme zamanını azaltır, ama asla tamamen yok etmez, kararlı hal hatası oluşur.
- İntegral denetleyici ( $K_i$ ) kararlı hal hatasının yok edilmesini sağlar, ancak bu geçici tepkinin daha kötü olmasına sebep olabilir.
- Türevsel denetleyici ( $K_d$ ) ise sistemin kararlılığını artırır, aşmayı azaltır ve geçici tepkiyi düzeltir.

Bu çalışmada geleneksel PID kontrol organını oluşturan etkilerin özel bir kombinasyonu ile bu çalışmada kullanılan Gürbüz kontrol organı geliştirilmiştir. Çalışma esnasında klasik PID kontrol organı kullanılması durumunda en önemli problem kalıcı hatanın varlığı olarak tespit edildi ve bu kalıcı hatanın ortadan kaldırılması için integral etkinin artırılması planlandı. Bu ön çalışma sonrası integral etkinin artırıldığı denemeler gerçekleştirildi ve sonuçların önemli ölçüde iyileştiği tespit edildi.

Geliştirilen Gürbüz Kontrol organının blok diyagramı Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Geliştirilen gürbüz kontrol organı blok diyagramı.

Burada  $q$  pozisyon bilgisidir. Önerilen gürbüz kontrol organının matematiksel ifadesi şöyledir:

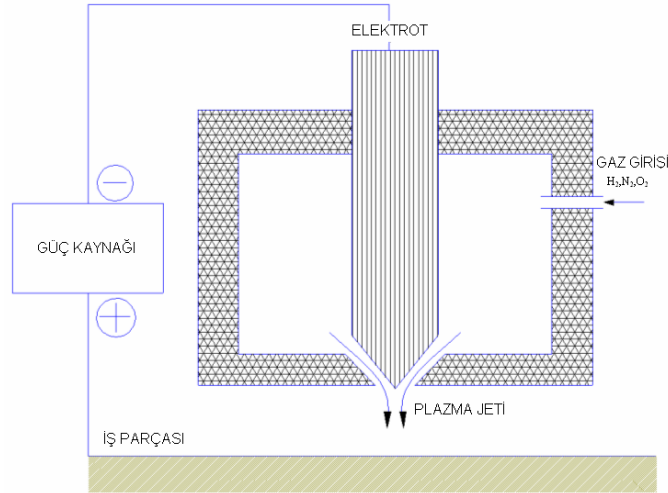
$$y(t) = K_p \left[ e(t) + \left( \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt \right) \cdot \left( T_d \cdot \frac{de}{dt} \right) + \left( \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt \right) \cdot \left( \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt \right) \right]$$

## 5. BÖLÜM

### DENEYSEL SİSTEM

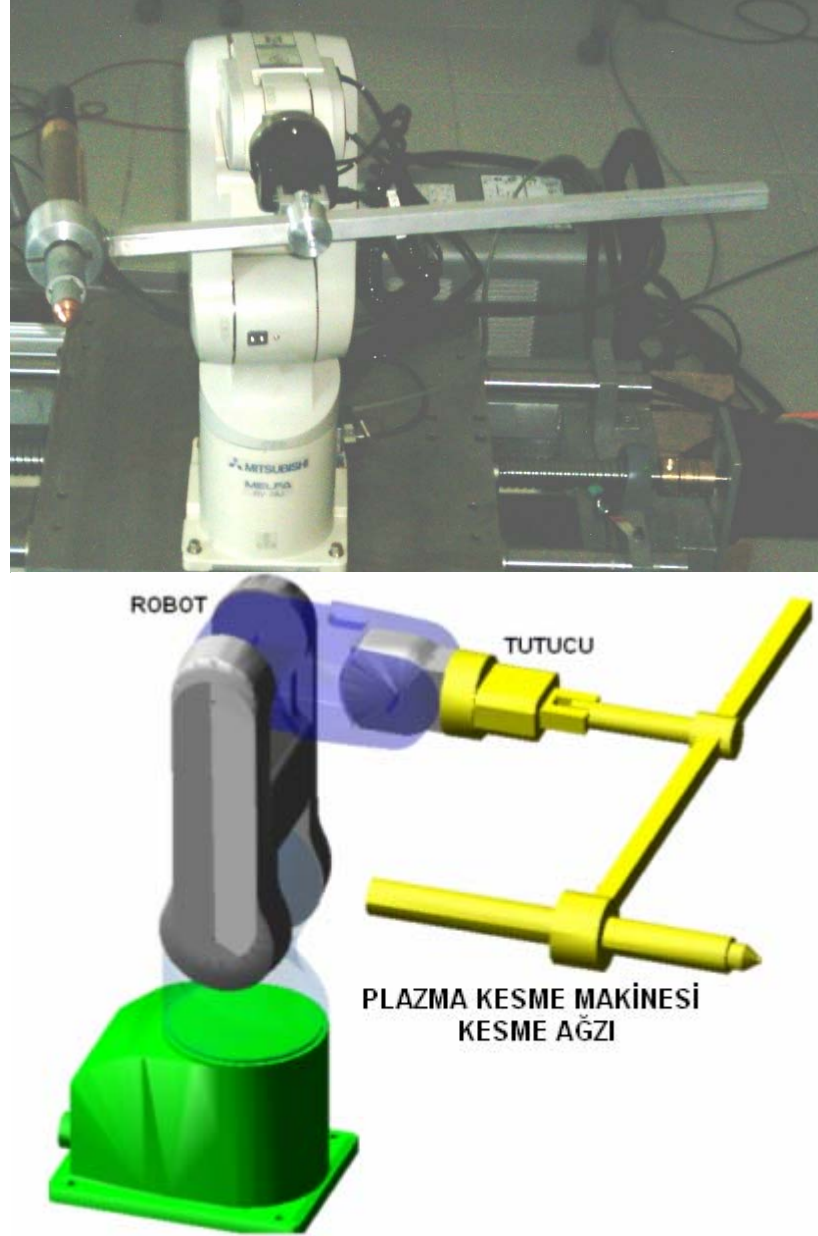
#### 5.1. Mekanik Sistem

Plazma kesme işleminde iyonize edilmiş gaz jeti (plazma) ile materyallerin kesme işlemi gerçekleştirilir. Plazma genellikle elektrik arkında oluşan elektronların üzerine gaz akışı sağlanarak elde edilir. Yüksek hızlı elektronlar Şekil 5.1’ de gösterilen sistem kullanılarak ark etkisi ile gaz moleküllerinden elde edilir. Kesme ağzı kısmına doğru gaz kuvvet uygular ve jet akışı ile metal ısıtılarak kesme gerçekleşir, kesme bölgesindeki erimiş metal kesme bölgesinden uzaklaştırılır.



Şekil 5.1. Plazma kesme işlemi.

Bu çalışmada plazma kesme işleminde robot uygulaması yapılmıştır. Şekil 5.2’ de gösterildiği gibi deneysel sistem şu ekipmanlardan oluşmaktadır; plazma kesme makinesi, 5 serbestlik dereceli robot (MITSUBISHI RV-2AJ), kontrol donanım ve yazılımı.

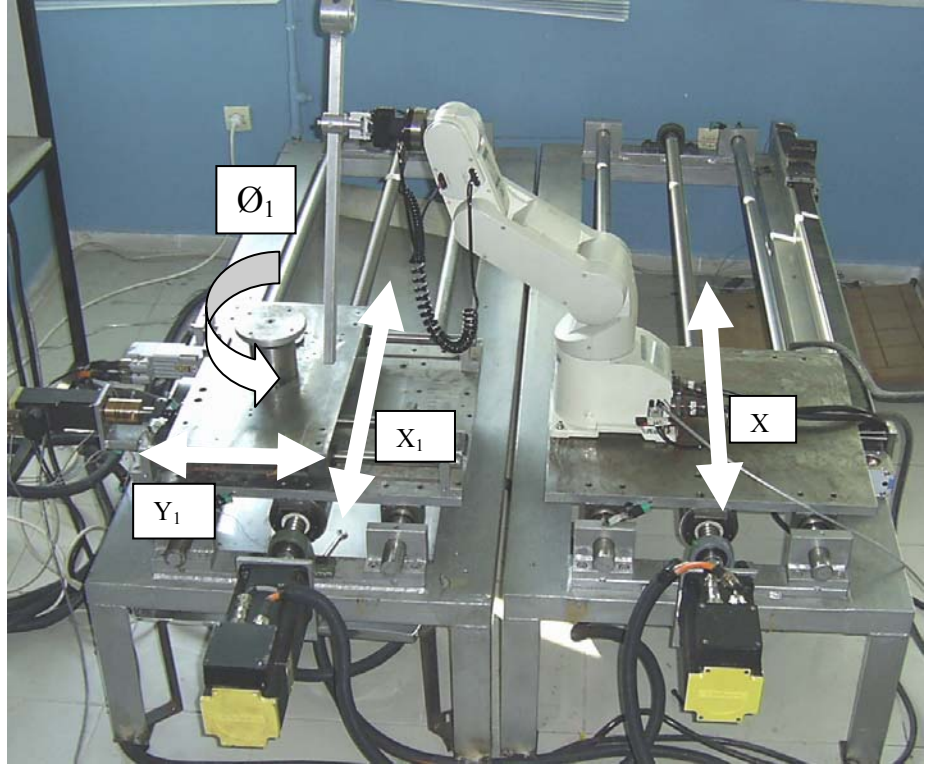


Şekil 5.2. Plazma kesme makinesi kesme ağzı ve Mitsubishi RV-2AJ robot.

Plazma kesme robotu eksen hareketleri servomotorlar kullanılarak elde edilmektedir. Plasma kesme makinesinin kesme ağzı, robot eline özel bir aparat yardımıyla montaj edilmiştir. Tüm hareketler X, Y ve Z eksenlerine 3 boyutlu ortamda gerçekleşmektedir. İş tablası robot ünitesi üzerinde robot ve ona bağlı olarak plazma kesme torçunu taşımakta ve tabla sadece X eksenini yönünde tek eksenli doğrusal hareket yapmaktadır. İkinci iş tablası ünitesi iş parçasını taşımakta ve konumlandırmaktadır. Bu unite X, Y

eksenlerinde doğrusal hareket yapmakta, aynı zamanda üzerinde taşıdığı döner tabla ile iş parçasının gerekli durumlarda kendi eksenini etrafında dönmesini sağlamaktadır.

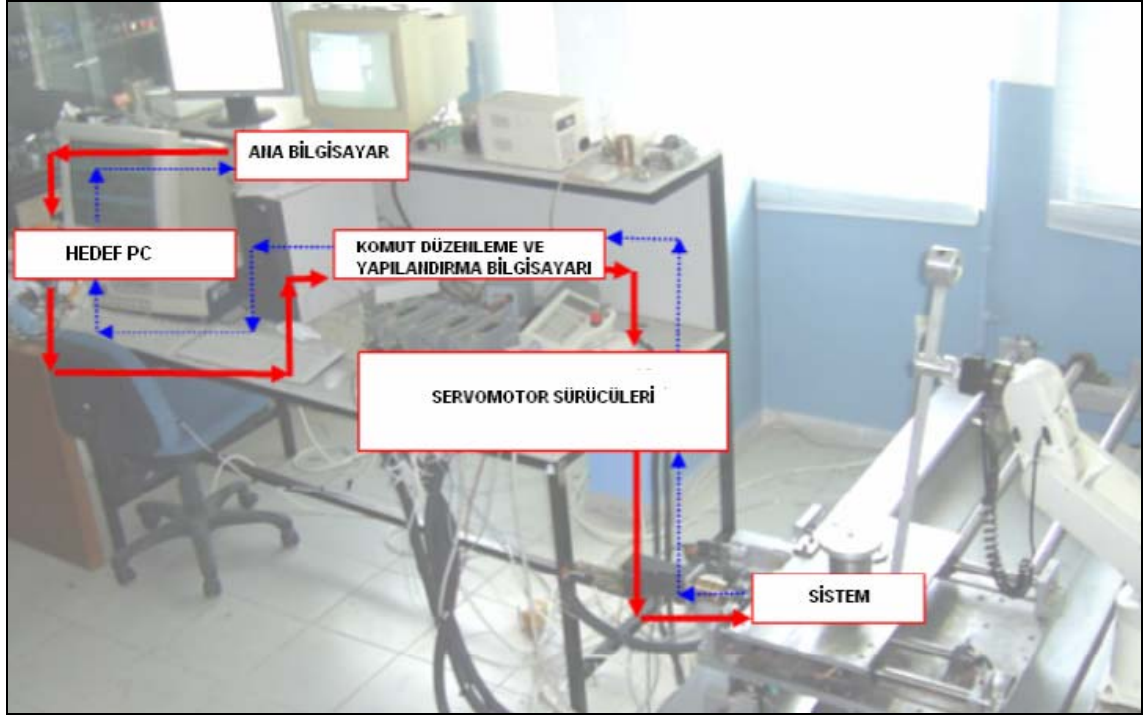
Tüm eksenler için kesme yörüngesinin zamana bağlı konum verileri MATLAB yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Sistem mekanik yapısı ve iş tablası hareket yönleri Şekil 5.3' te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Plazma kesme deneysel sistem mekanik yapısı ve iş tablası hareket yönleri.

## 5.2. Elektronik Sistem ve Gerçek Zamanlı Haberleşme

Deneysel sistem elektronik yapısında bilgisayar ile deneysel system arasında haberleşme ve veri transfer işlemleri Matlab X-PC Target ile gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı kontrol uygulaması ve deneysel sistem Şekil 5.4' te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Gerçek zamanlı kontrol yapısı ve deneysel sistem.

Şekil 5.4' te gösterildiği gibi deneysel sistem kontrol ve haberleşmeyi oluşturan üç bilgisayar içermektedir. Bunlardan birincisi ana bilgisayar' dır. Bu bilgisayarda, MATLAB yazılımı hedeflenen yörünge verilerini oluşturur ve bu verileri program içinde hedef PC olarak adlandırılan ve dış ortam haberleşme görevini üstlenen ikinci bilgisayara gönderir. Hedef bilgisayar, MATLAB-XPC sisteminin önemli bir parçasıdır ve gerçek sisteme verileri gönderir. Üçüncü bilgisayar olarak komut düzenleme ve yapılandırma bilgisayarı kullanılmış olup, bu bilgisayar hedef PC' den gelen verileri sürücü ve robot kontrolcüsünün istediği şekilde düzenler ve sisteme gönderir. Bu bilgisayar donanım olarak dış ortam olumsuz etkilerinden en az etkilenen endüstriyel PC olarak seçilmiş ve kullanılmıştır.

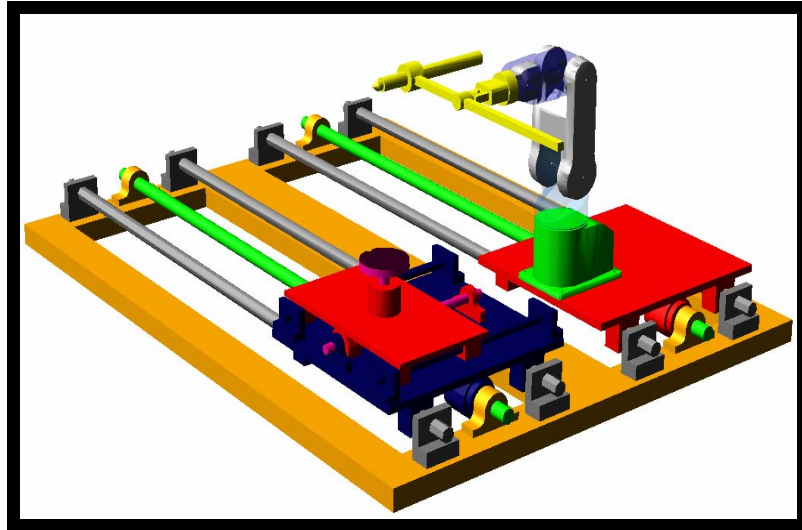
Yukarıda anlatılan bu sistem aynı zamanda ana bilgisayarda gerçek zamanlı pozisyon hatasının tespit edilebilmesi için deneysel sistemden gelen gerçek dataların gerekli düzenlemelerinin yapılmasını ve geriye doğru aktarımını da gerçekleştirmektedir. Böylece gerçek zamanlı çalışma sonucunda kontrol etkisi tespit edilmektedir. Bu işlem için örnekleme zamanı 0.18 saniyedir.

## 6. BÖLÜM

### DENEYSEL ÇALIŞMA VE SİMÜLASYON

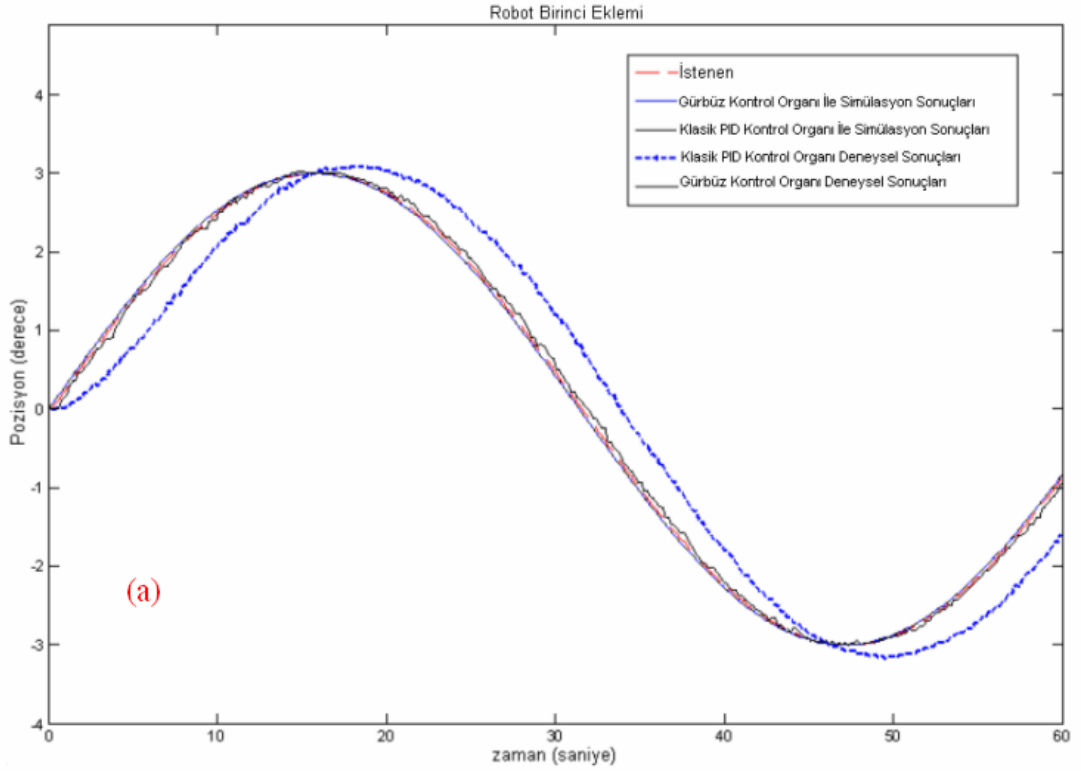
Öncelikli olarak simülasyonların yapılması için MITSUBISHI RV-2AJ robot ve taşıyıcı sistemin MSC.ADAMS modeli oluşturulduğu deneysel sistem simülasyon modeli kısmında açıklanmıştır. Böylece tasarımın sağlıklı şekilde gerçekleşmesi sağlanmıştır.

MSC.ADAMS modeli sistem elemanlarının tamamının gerçek özelliklerinin tanımlanması ile oluşturulmakta ve tüm bu etkiler altında analizlerin yapılmasını sağlamaktadır. Bu özellikler; dış kuvvetler, yer çekimi, temas ilişkileri, sürtünme ve dinamik özellikler. Deneysel sistem elemanları ve plasma kesme robotu spesifik özellikleri olan malzeme cinsi, kütle, yoğunluk, şekil ve mekanik karakteristikleri gerçek sistem özellikleri ile tanımlanmıştır (Şekil 6.1).

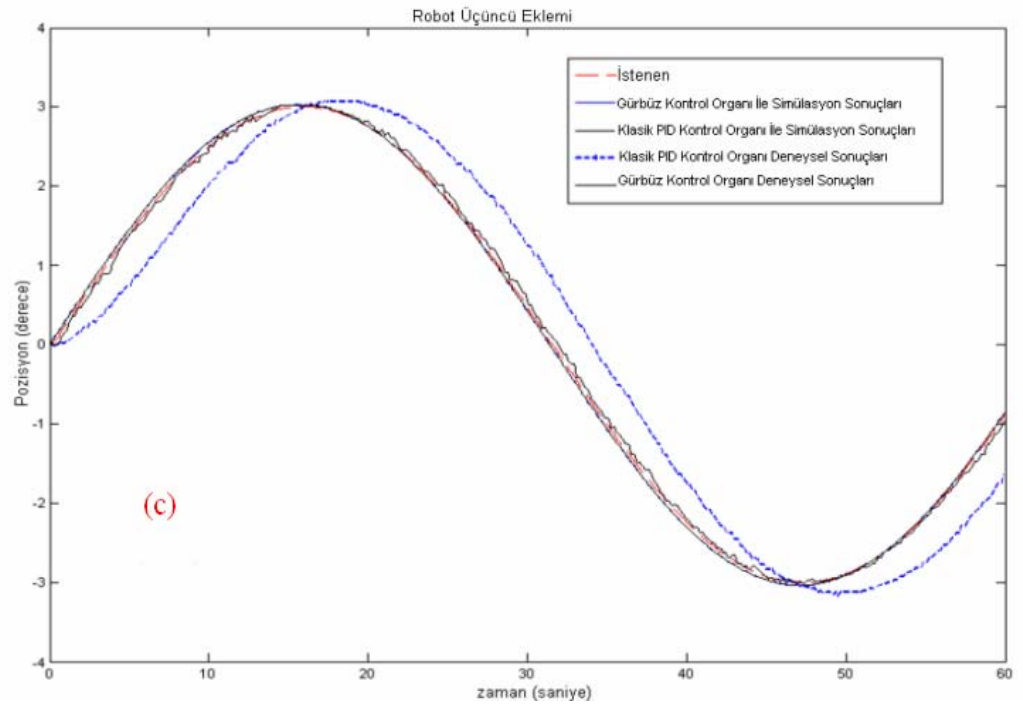
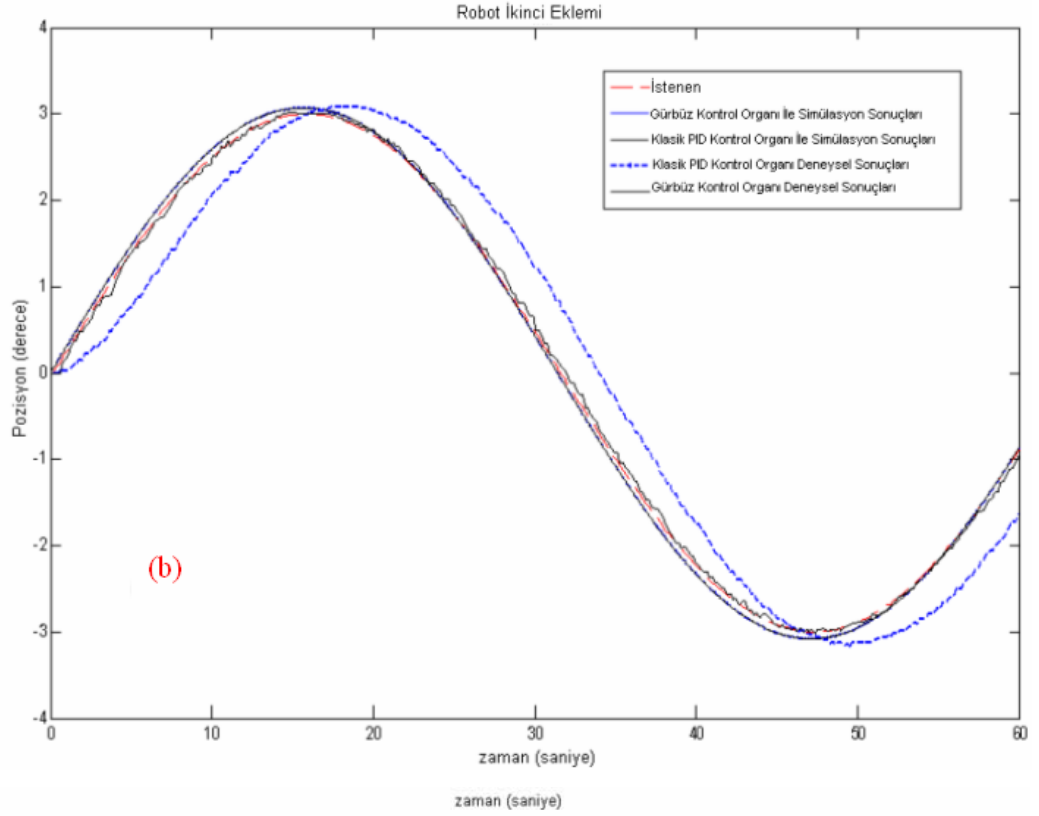


Şekil 6.1. Deneysel sistemin MSC.ADAMS modelinin görünümü.

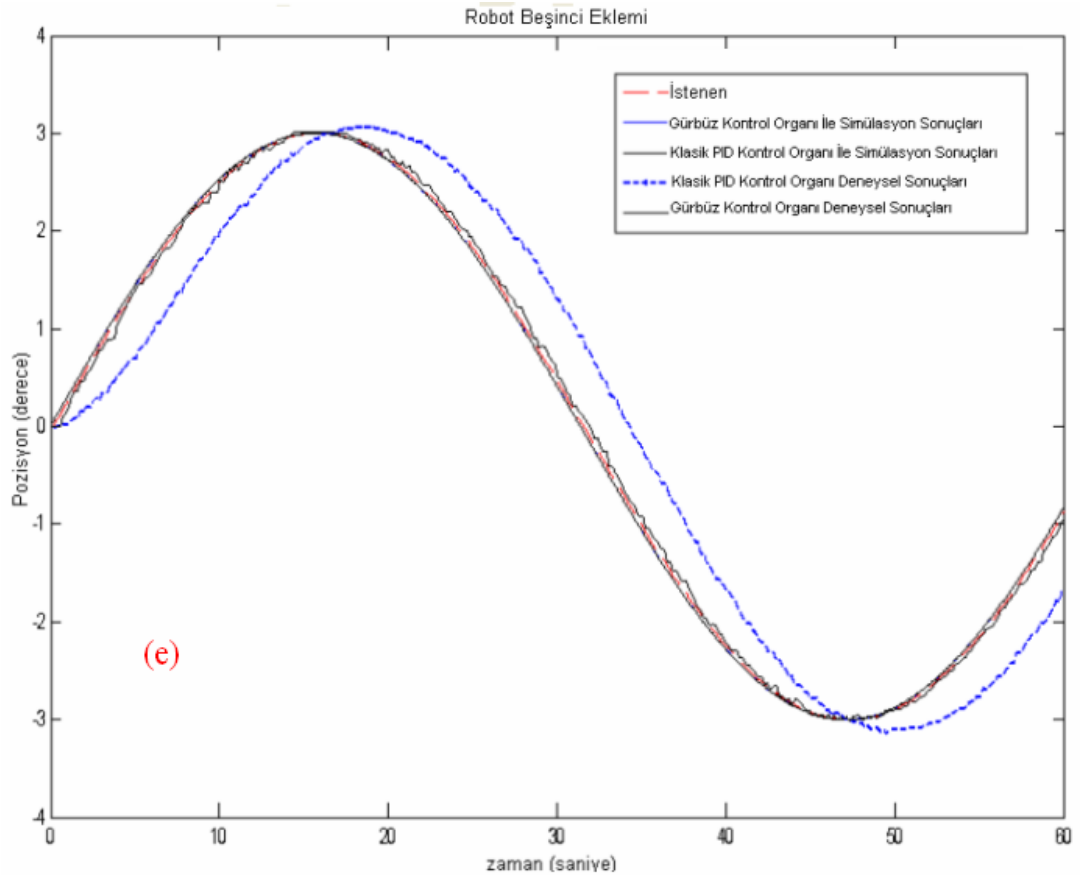
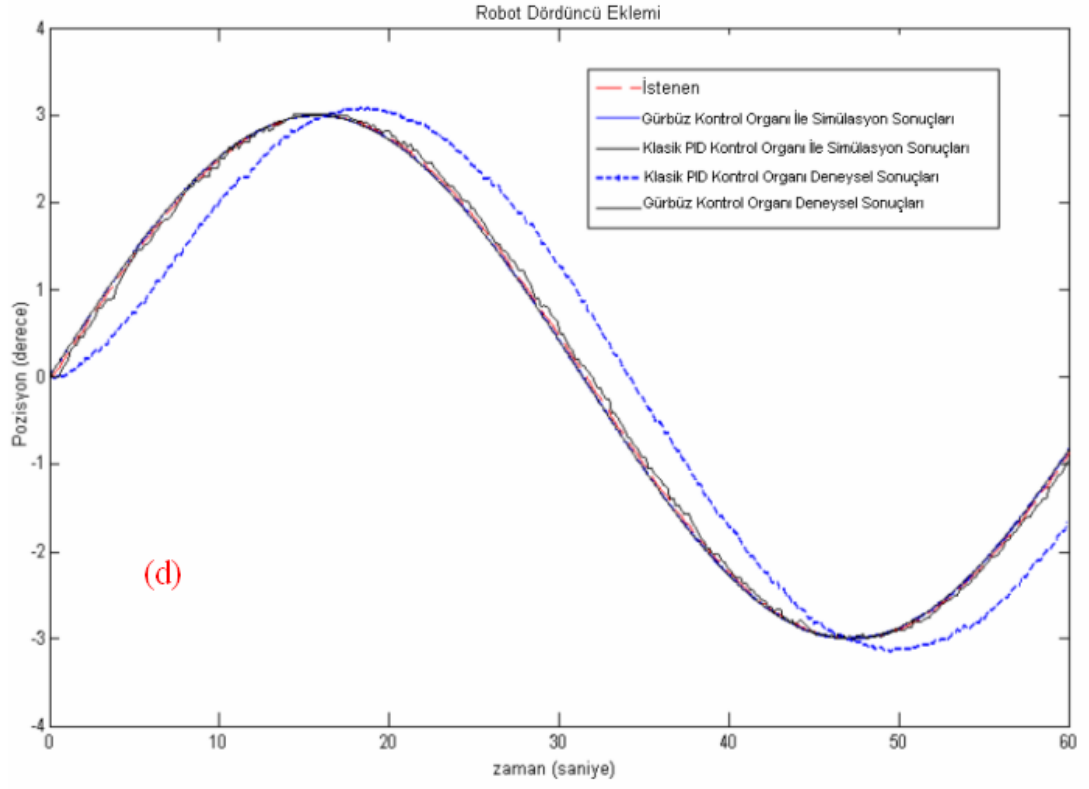
Simülasyon sonuçlarının elde edilmesinde ve deneysel verilerle karşılaştırılmasında Sinüsoidal giriş kullanılmıştır. Bu tercihin sebebi sinüs eğrisi formunda giriş verilerinin diğer giriş verileri(testere dişi, kare, vb) kadar ani değişimler göstermemesidir. Aynı zamanda bir çok deneysel verinin tek grafikte anlatımı açısından da daha net yorumlama imkanı vermektedir. Sonuçlar Şekil 6.2.(a, b, c, d, e)' de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçların sinüs eğrisi giriş sinyalinde geleneksel PID kontrol organı ve geliştirilen gürbüz kontrol organı için robot eksenlerinin tamamında karşılaştırılması (a, b, c, d, e).



Şekil 6.2' nin devamı.



Şekil 6.2' nin devamı.

Robot eksenleri 1 ile 5 numaraları arasında sıralandırılmış olup, numaralandırma gövdeden uç noktaya doğru, küçükten büyüğe gidecek şekilde yapılmıştır. Şekil 6.2.(a, b, c, d, e)‘ de simülasyon çalışmasında klasik PID kontrol yapısının önerilen gürbüz kontrol organından daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bu sonucun sebebi önerilen gürbüz kontrol organının klasik PID kontrol yapısına göre arttırılmış integral etkisine sahip olmasıdır. Gerçek zamanlı deneysel çalışmada ise önerilen gürbüz kontrol yapısı klasik PID kontrol yapısından çok daha iyi sonuç vermektedir. Böylece simülasyon çalışması ile deneysel çalışma arasındaki sonuçların farklılığı tespit edilmiş oldu, integral etkinin arttırılmasının simülasyon çalışmasında sonuçları olumsuz yönde etkilediği tespit edildi. Tablo 6.1’ de simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarına göre çalışmamızda kullanılan gürbüz kontrol ve PID kontrol yapısı ile ortaya çıkan ortalama bağıl gerçek hata değerleri verilmiştir.

Tablo 6.1. Robot Eklemleri Ortalama Bağıl Gerçek Hata Listesi

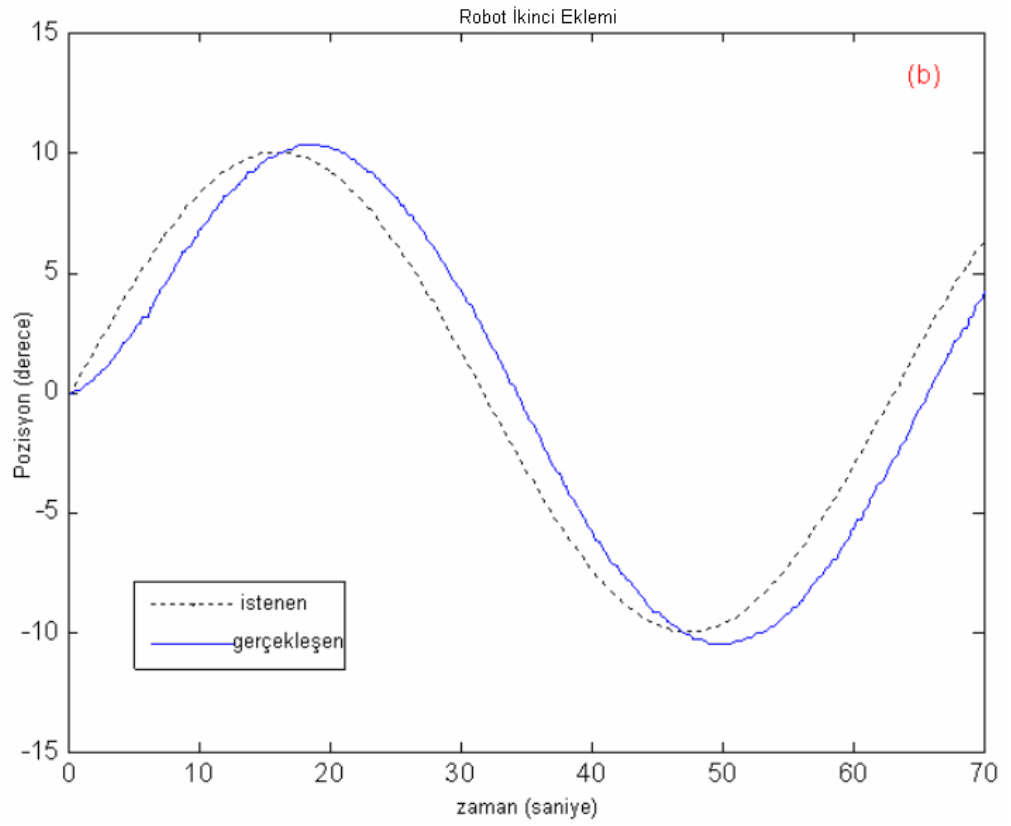
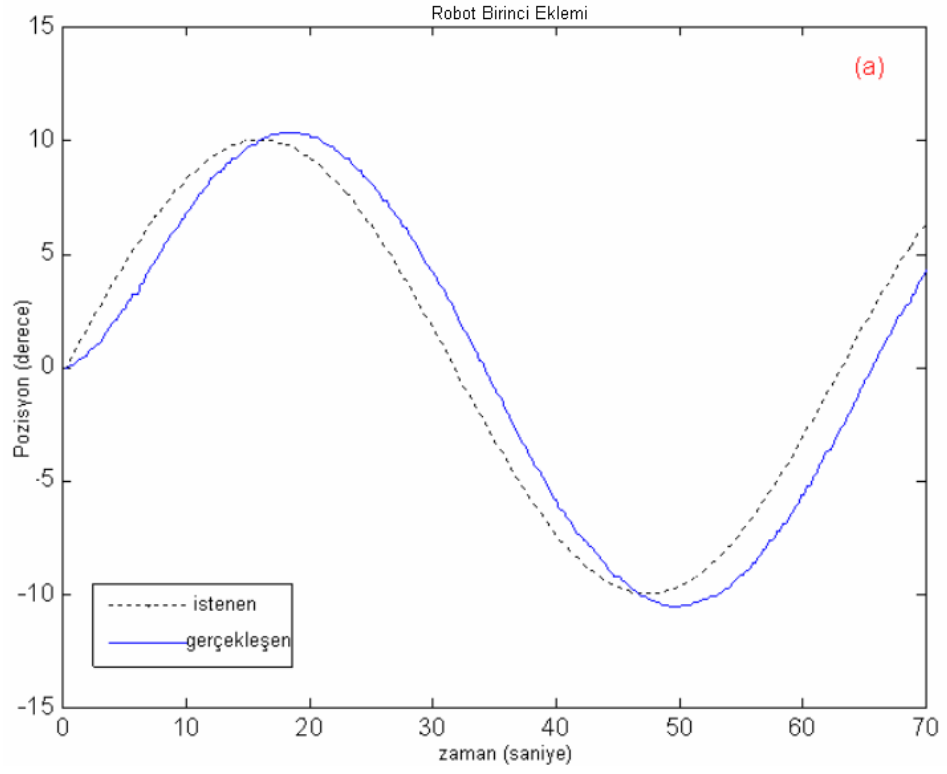
EKLEM NO: ÇALIŞMA ADI:	1. EKLEM [Derece]	2.EKLEM [Derece]	3.EKLEM [Derece]	4.EKLEM [Derece]	5.EKLEM [Derece]
Deneysel PID Kontrol	0.702279	0.701210	0.700217	0.700115	0.701335
Deneysel Gürbüz Kontrol	0.109213	0.109117	0.108011	0.107029	0.107252
Simülasyon PID Kontrol	0.045200	0.045212	0.045117	0.044354	0.044212
Simülasyon Gürbüz Kontrol	0.046725	0.046114	0.046307	0.045106	0.045833

Robot eklemleri için ortalama bağıl net hatanın tespiti amacıyla 4 saniyelik zaman aralığında toplam 15 sayısal değer ölçümü her bir robot ekseni için gerçekleştirildi. Bu ölçümlerde simülasyon çalışması ve deneysel çalışmada klasik PID kontrol organı ve gürbüz kontrol organı ayrı ayrı kullanıldı. Sonuçlar daha önce de grafik yorumlarında

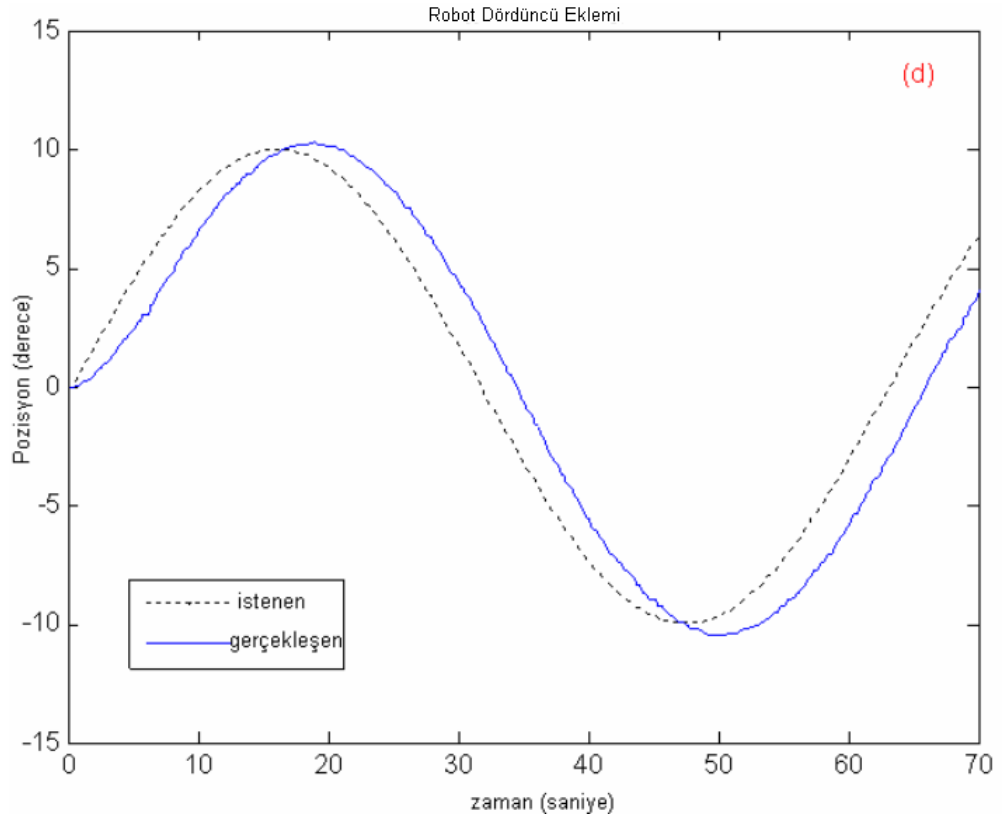
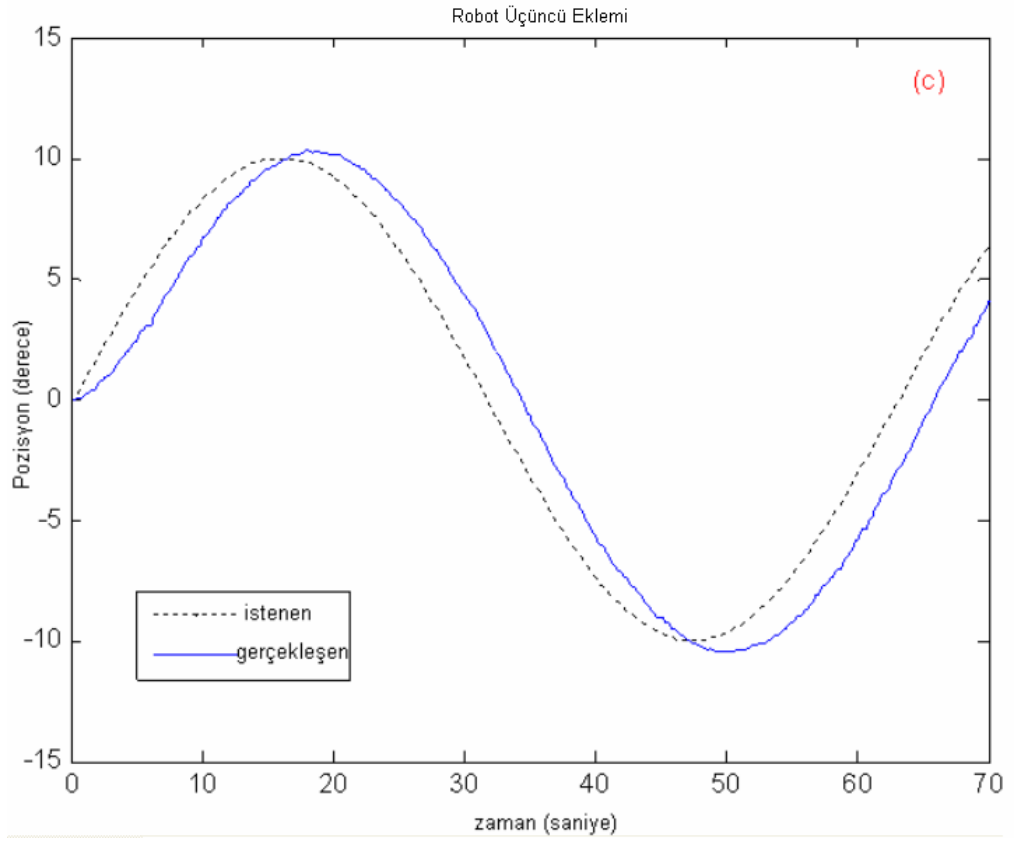
açıklanmış olan gürbüz kontrol organı avantajını deneysel çalışma açısından net şekilde ortaya koymaktadır. Ancak, Tablo 6.1. 'den çıkarılacak diğer sonuç ise; simülasyon çalışmalarında klasik PID kontrol organının geliştirilen gürbüz kontrol organından daha iyi sonuç verdiği'dir. Bunun sebebi deneysel sistemdeki sinyal gecikme zamanının simülasyon çalışmasında olmaması, dolayısıyla sinyal gecikmesine karşı gerçekleştirilen yapısal düzenlemenin simülasyon çalışmasında olumsuz etki oluşturmasıdır.

Çalışmanın ilerleyen aşamalarında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu çalışmaların sonuçlarına ulaşılmıştır.

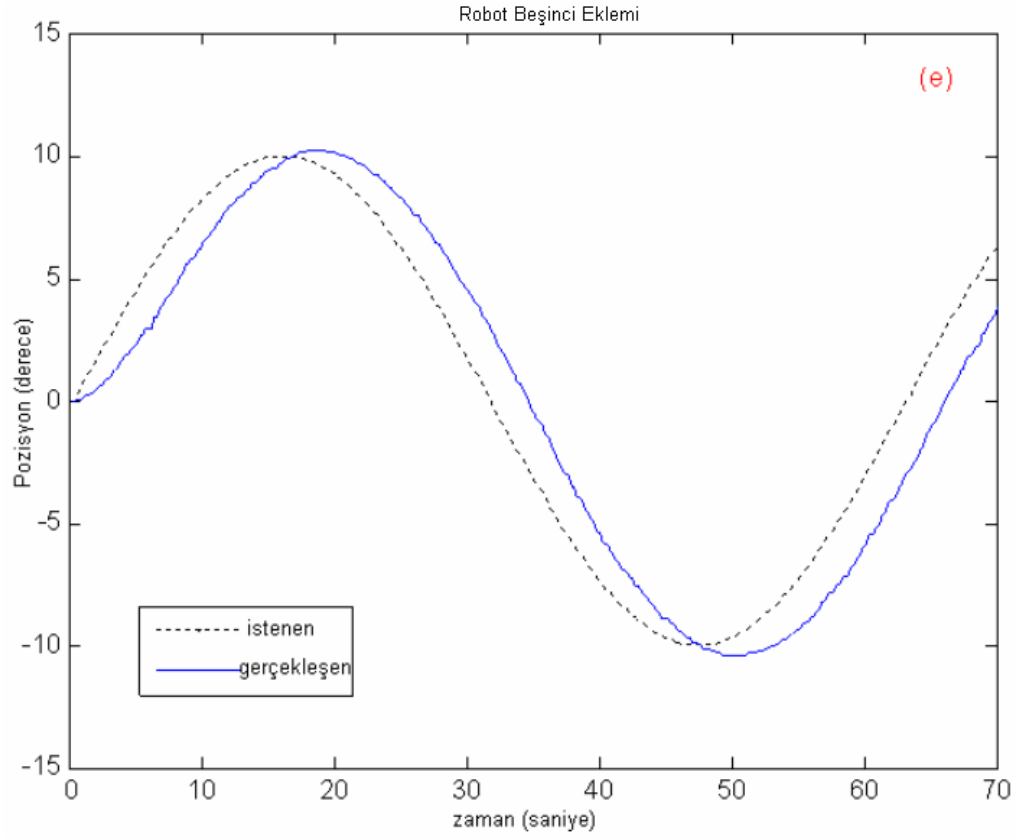
Bu çalışmada izlenecek yörüngeye ait anlık konum bilgilerini elde etmek için Matlab yazılımı kullanıldı. Tüm robot eksenlerinde önerilen gürbüz kontrol yapısı ve klasik PID kontrol organı yapısı kullanılarak gerçek zamanlı sonuçlar elde edildi. Robot eksenleri için sinusoidal, testere dişi ve kare sinyal girişlerine ait cevaplar incelendi. Gerçek zamanlı çalışmada random sinyal girişi sistem yapısı itibariyle kullanılmadı. Şekil 6.3.(a,b,c,d,e)' de klasik PID kontrol organı ile kontrol gerçekleştirilmesi durumunda sinüs eğrisi yapısında olan giriş sinyali için her bir robot eksenini için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 6.3.Sinüs giriş sinyali için geleneksel PID kontrol yapısı sonuçları (a,b,c,d,e).



Şekil 6.3' ün devamı.

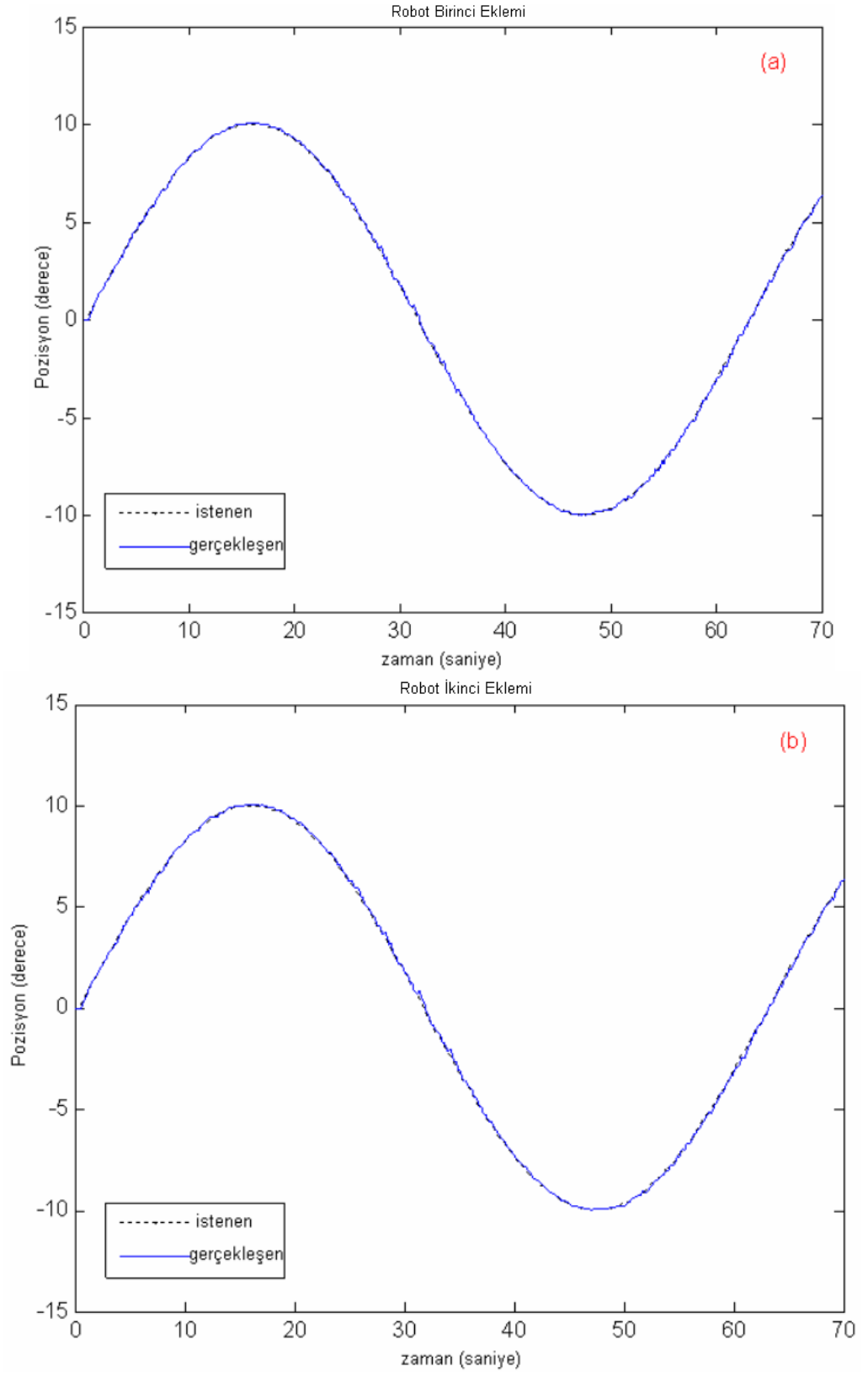


Şekil 6.3' ün devamı.

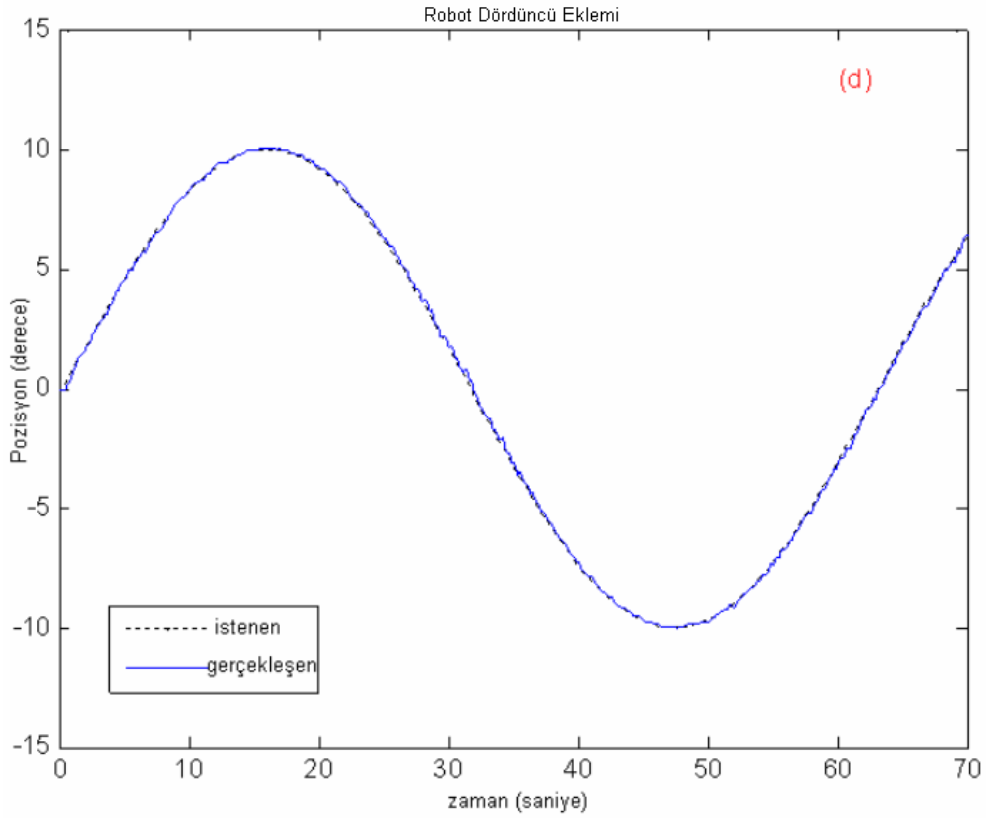
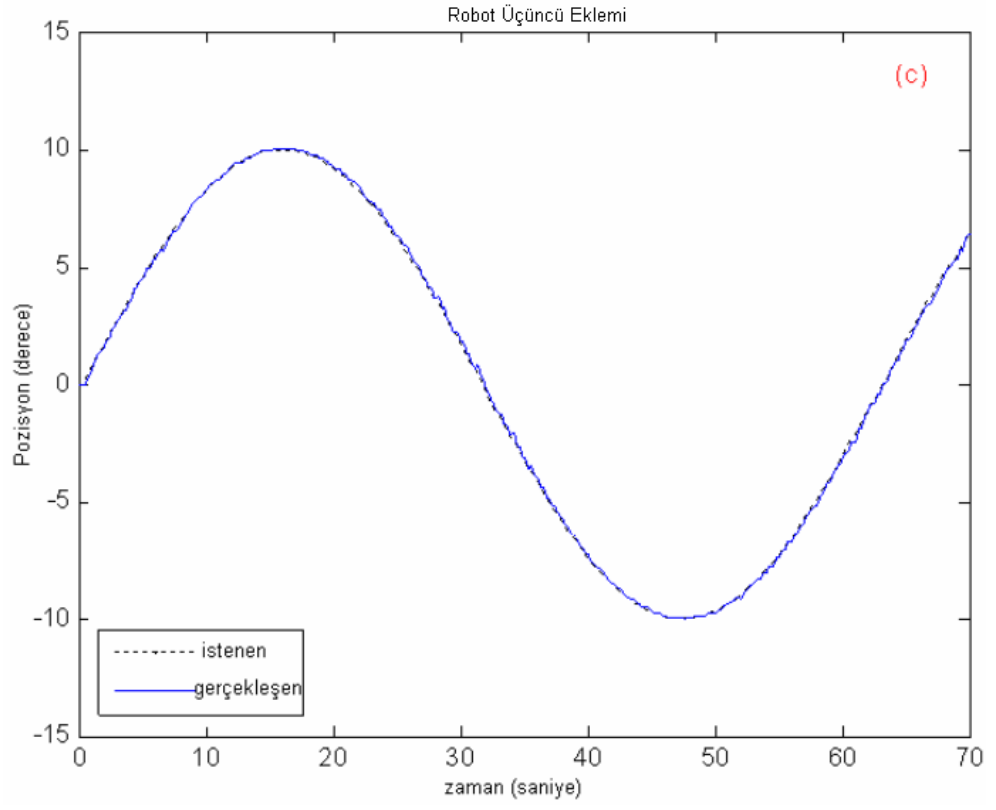
Deneysel sistemde daha önce de belirtildiği üzere sistemin elektronik yapısı sebebiyle önekleme zamanı olarak 0.18 saniye geçmektedir. Klasik PID kontrol yapısının önemli bir dezavantajı hedeflenen konumlama hassasiyetinin zaman gecikmesi durumunda elde edilememesidir. Şekil 6.3.' de gösterildiği gibi gerçek zamanlı deneysel sistemde robot eksenlerinin herbirine sinus yapıları giriş sinyali uygulanmıştır.

Zaman gecikmesi bakımından bu sonuçlar istenen hassasiyette değildir ve bu sonuç beklenmektedir.

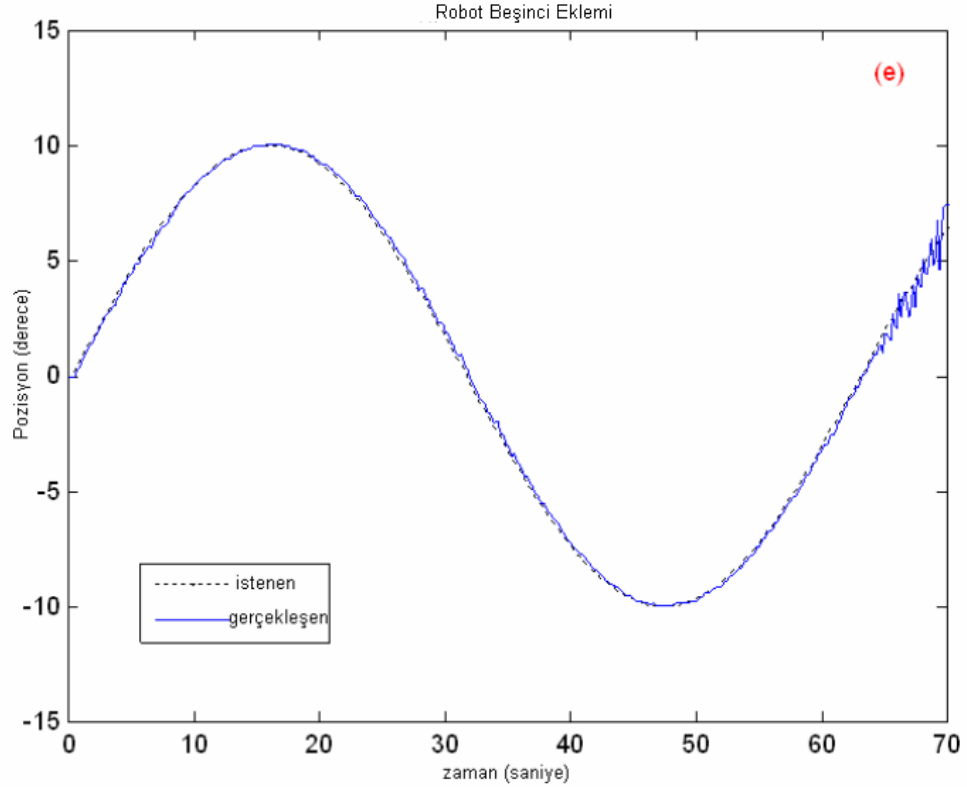
Önerilen gürbüz kontrol yapısı aynı giriş sinyali kullanılarak deneysel sistemde incelenmiştir (Şekil 6.4.(a,b,c,d,e)).



Şekil 6.4. Sinüs giriş sinyali için gürbüz kontrol yapısı sonuçları (a, b, c, d, e).



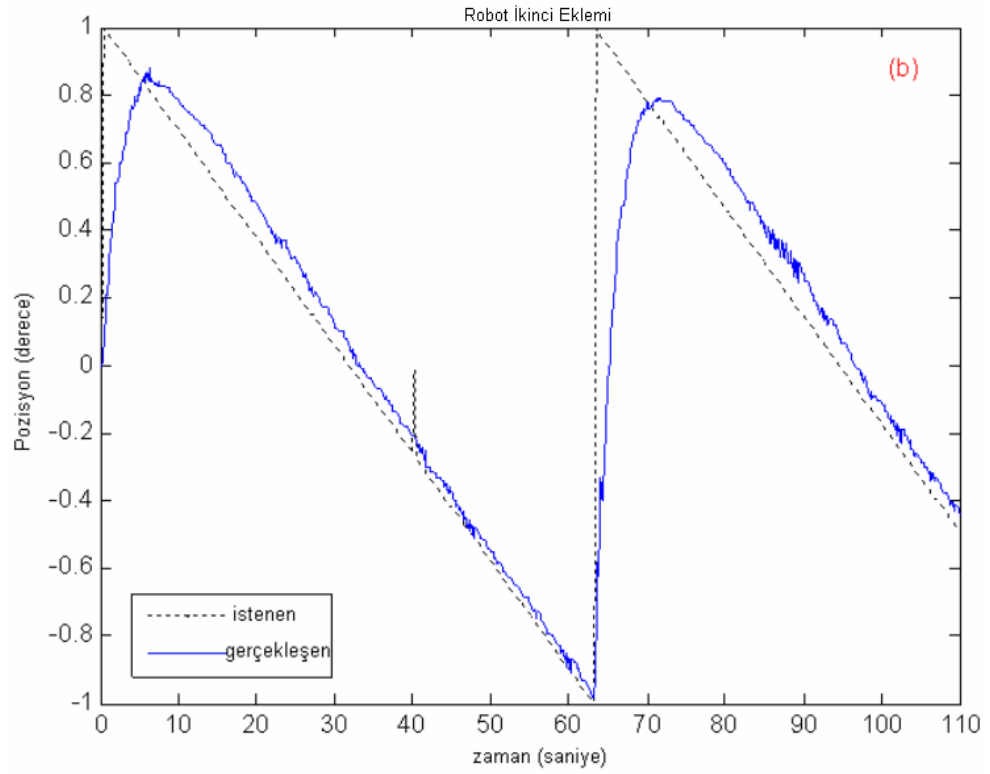
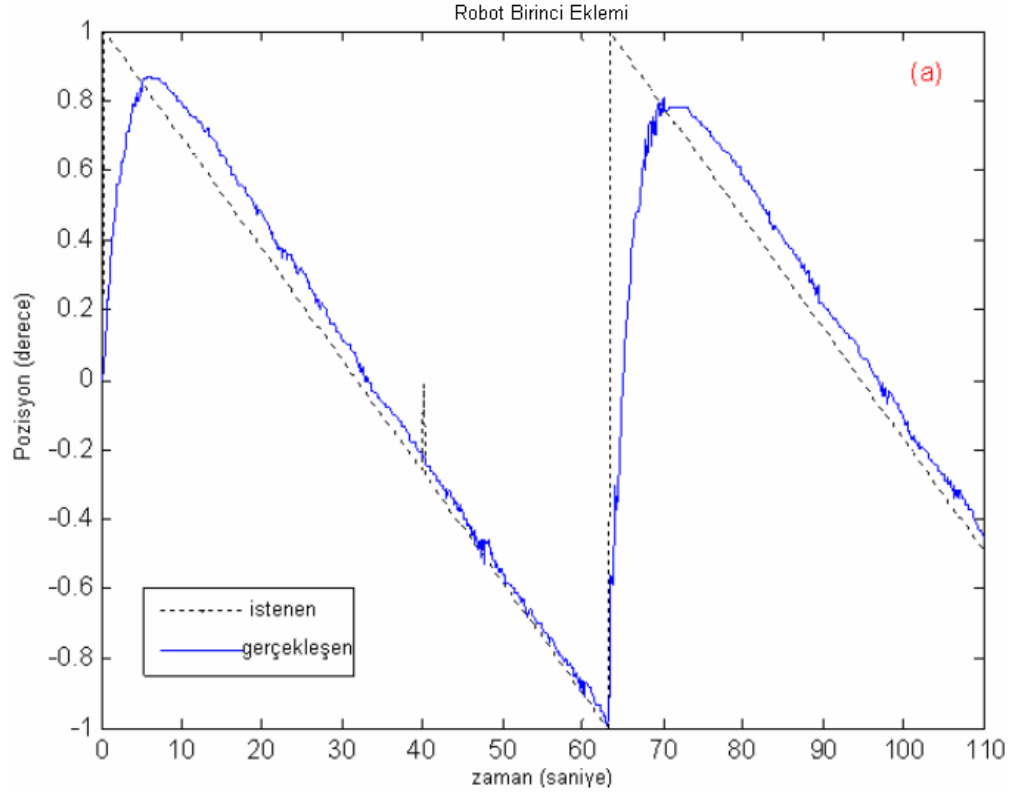
Şekil 6.4' ün devamı.



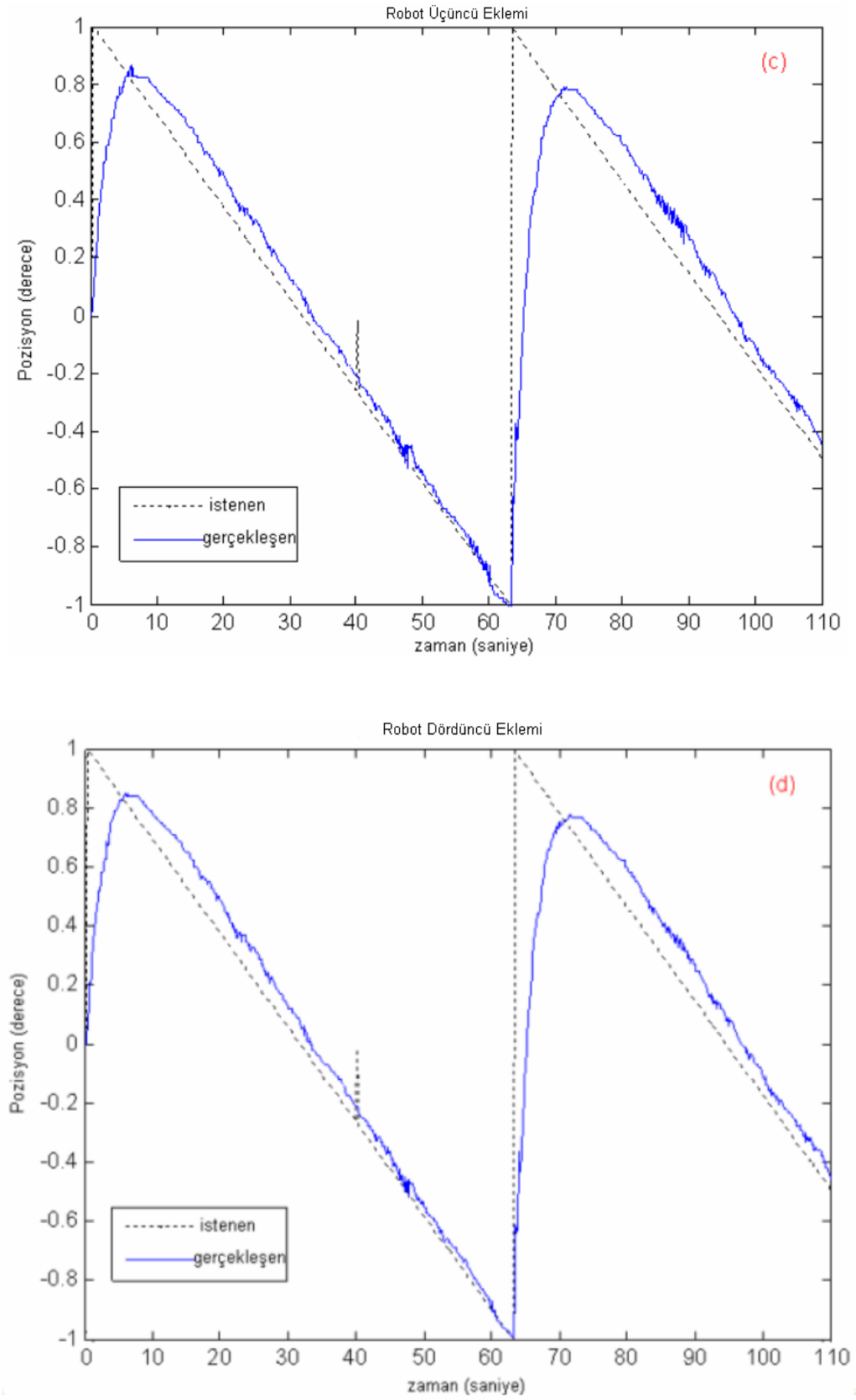
Şekil 6.4' ün devamı.

Şekil 6.4.(a,b,c,d,e)' de görüleceği gibi önerilen gürbüz kontrol organının kullanılması durumunda sinüs sinyal formunda bütün robot eksenleri hedef pozisyon değerlerini çok iyi takip etmektedir. Bu sisteme ilave edilen integral etkinin gerçek zamanlı çalışmalarda sağladığı olumlu bir sonuçtur.

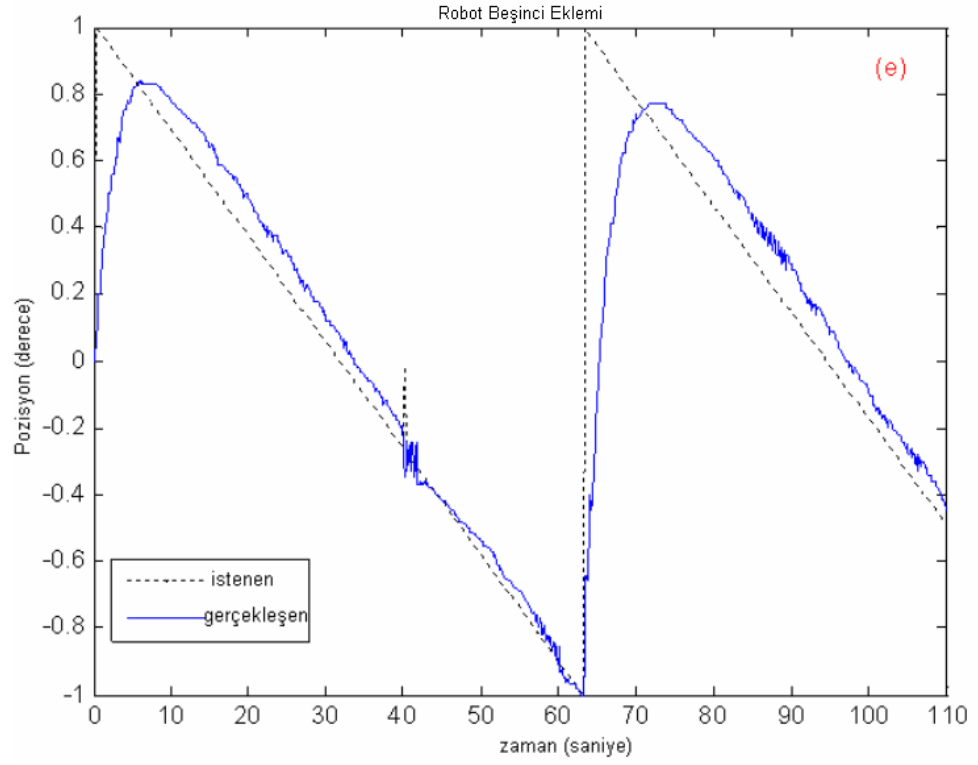
Klasik PID kontrol organının testere dişi formunda giriş sinyali uygulanması durumunda verdiği sonuçlar ise istenen değerden oldukça uzaktır (Şekil 6.5. (a,b,c,d,e)).



Şekil 6.5. Geleneksel PID kontrol organı testere dişi şeklinde sinyal girişi sonuçları (a,b,c,d,e).

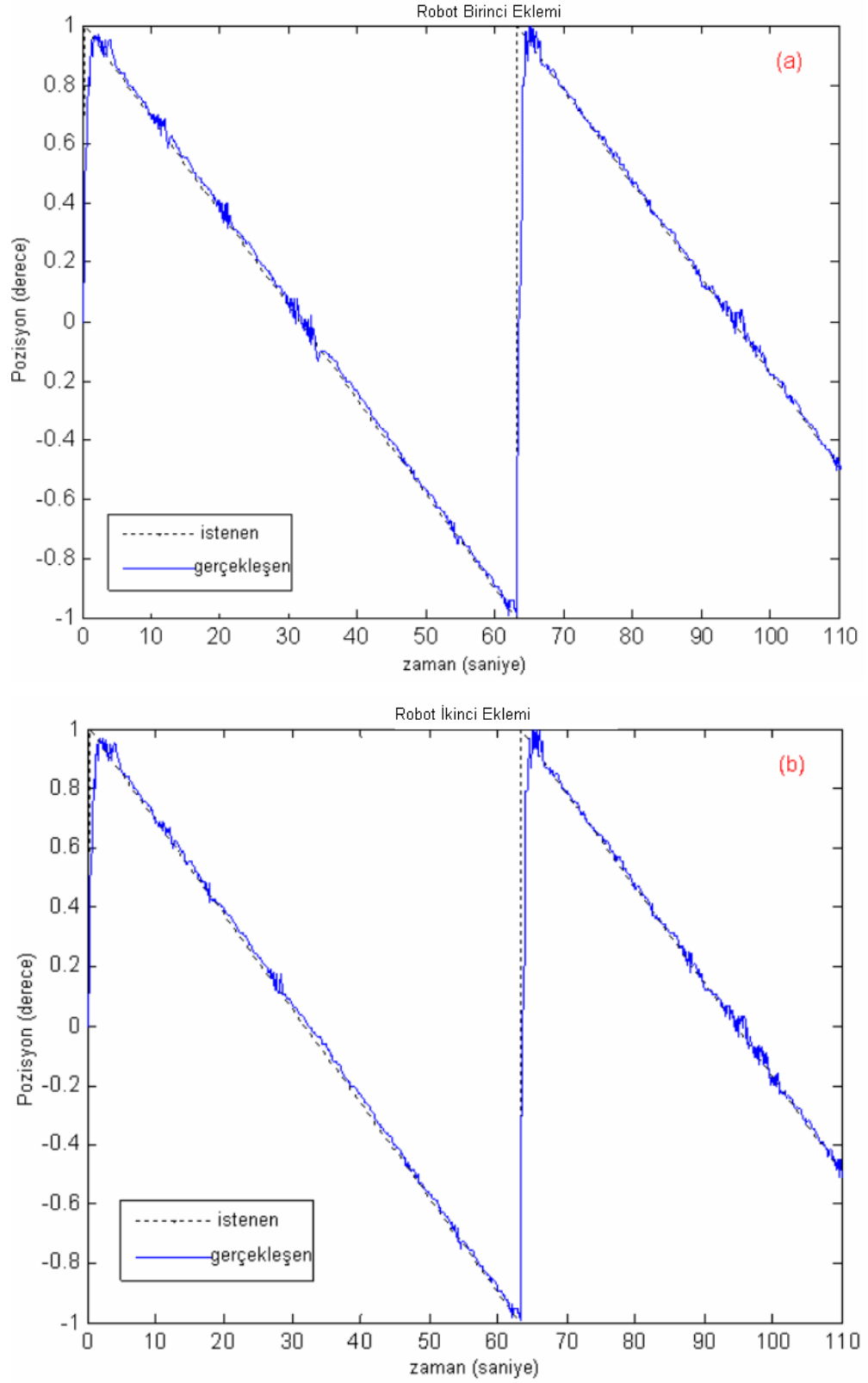


Şekil 6.5' in devamı.

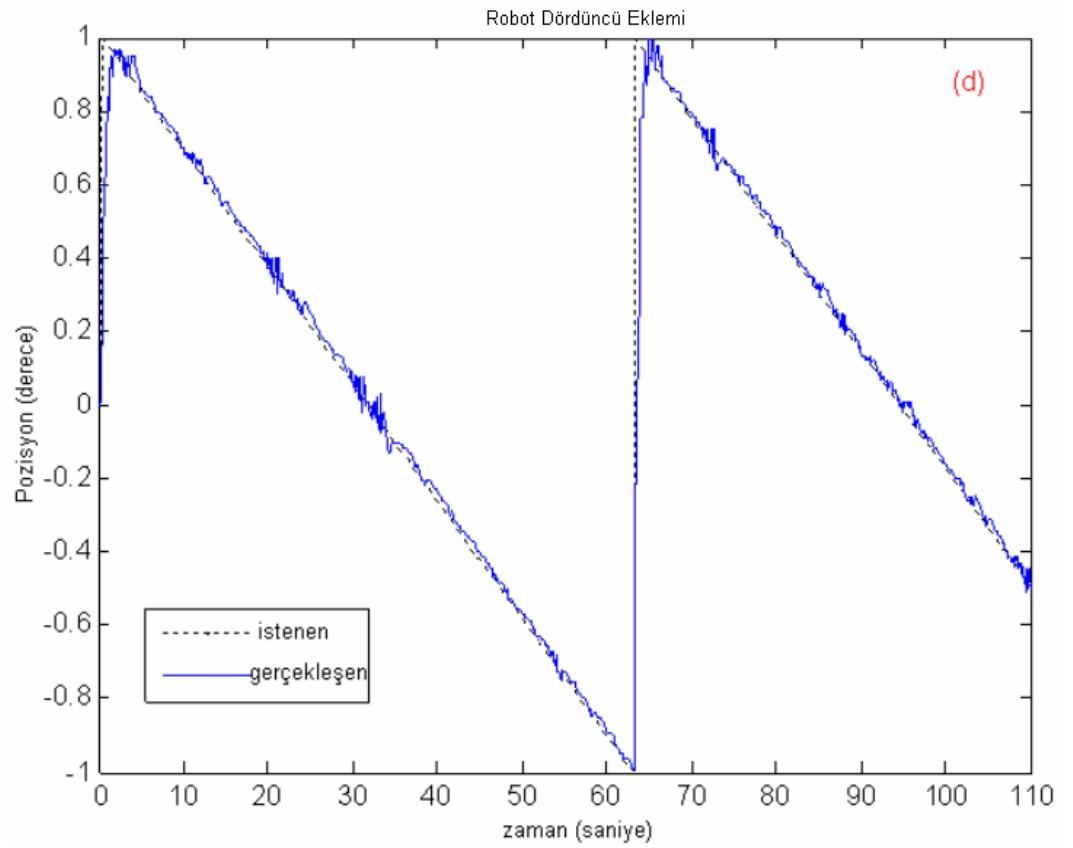
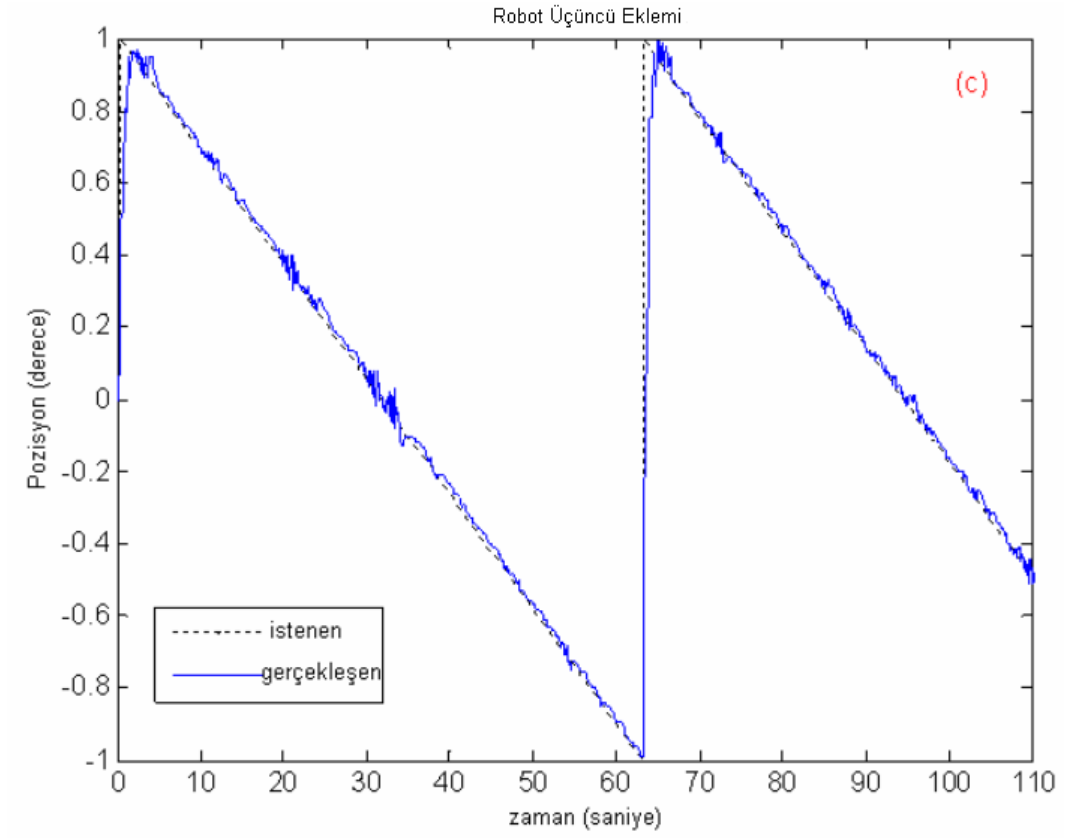


Şekil 6.5' in devamı.

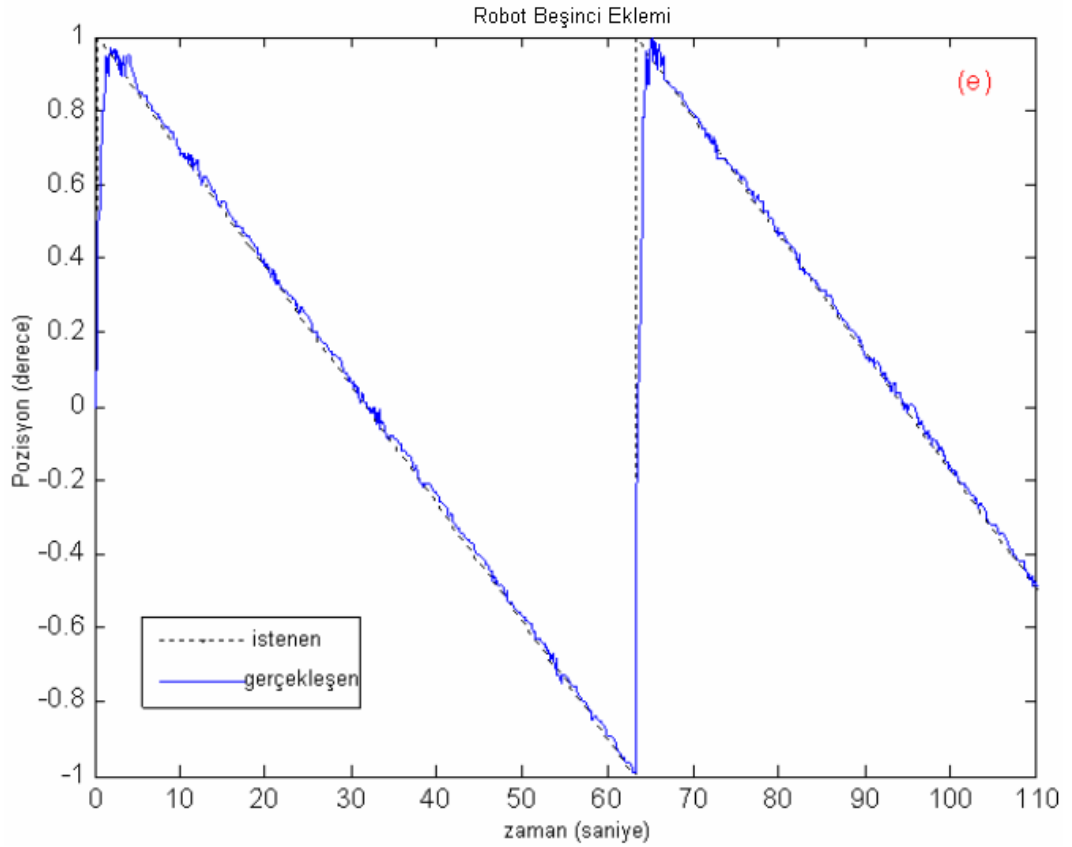
Sinyal gecikme zamanı sebebiyle hiçbir robot eksenini istenen konumlamayı yapamamaktadır. Testere dişi sinyal sinüs sinyali kadar yumuşak geçişlere sahip değildir ve bu da sonucu oluşturan etkenlerdendir. Şekil 6.6. (a, b, c, d, e)' de ise geliştirilen gürbüz kontrol organı kullanılması durumunda testere dişi formunda giriş sinyali için robot eksenlerinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Gürbüz kontrol organı testere dişli şeklinde giriş sinyali uygulanması halinde sonuçları (a, b, c, d, e).

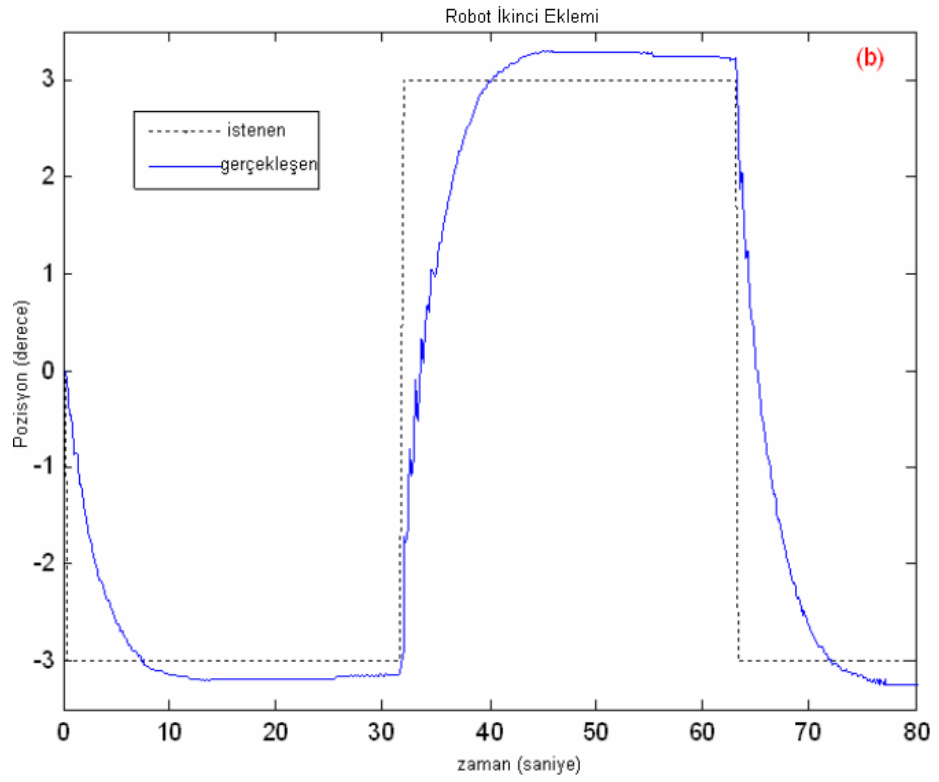
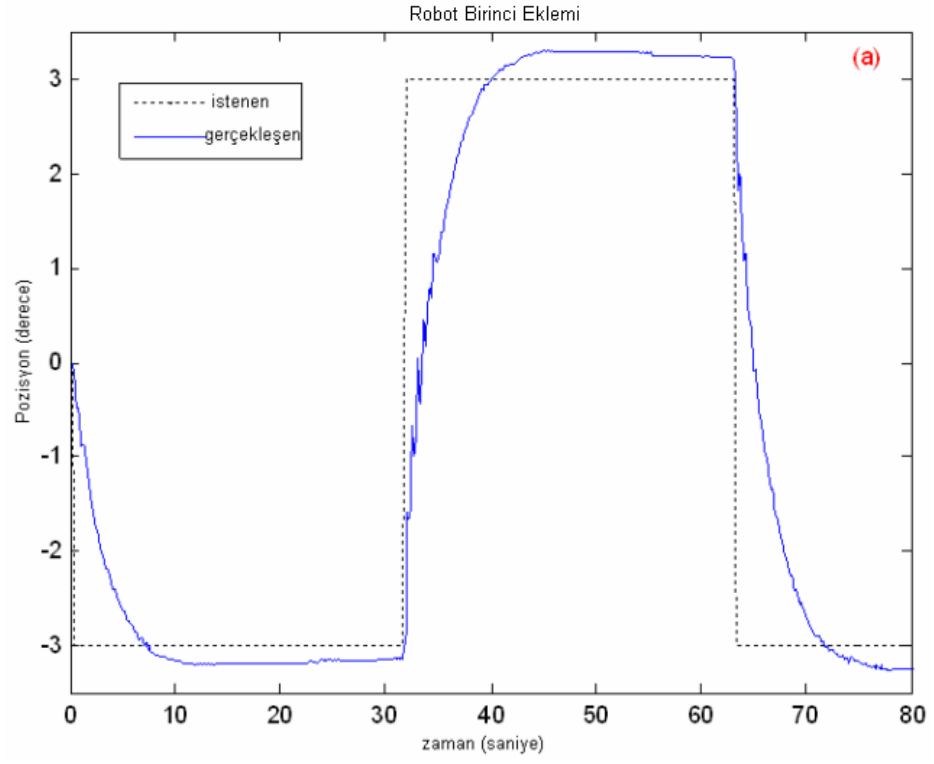


Şekil 6.6' nın devamı.

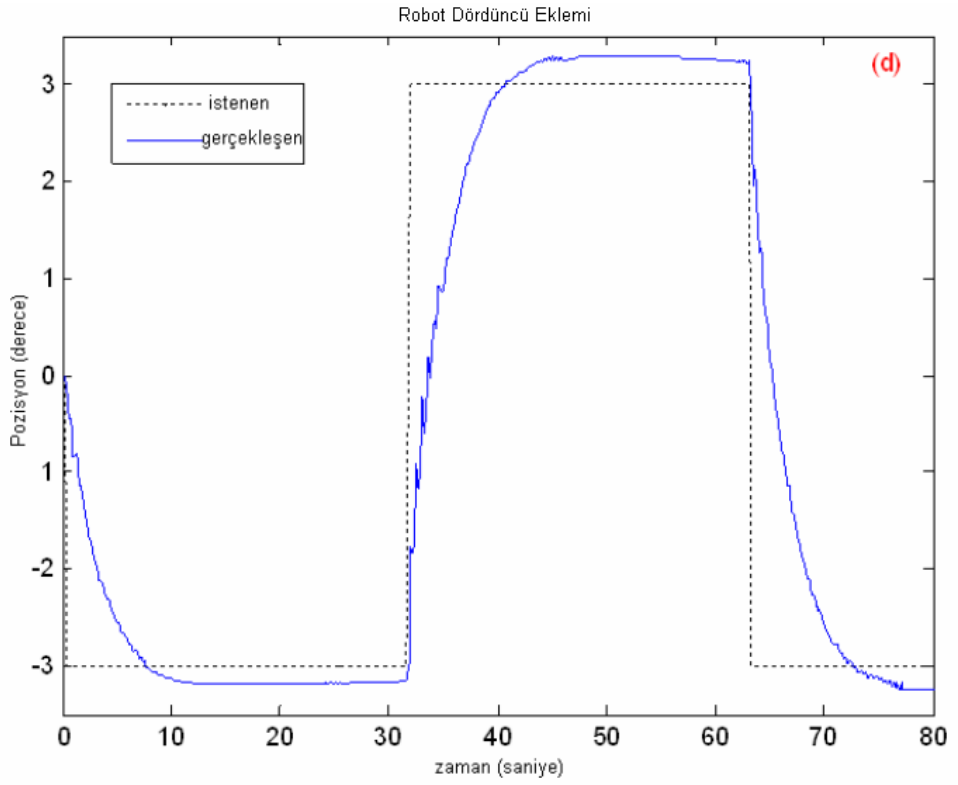
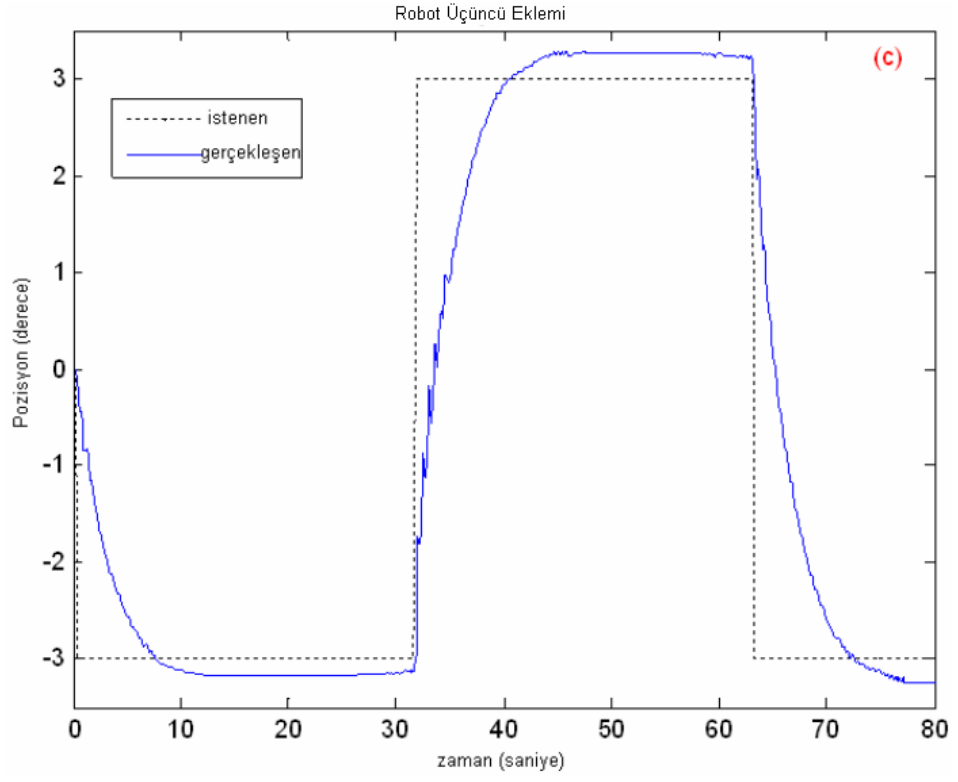


Şekil 6.6' nın devamı.

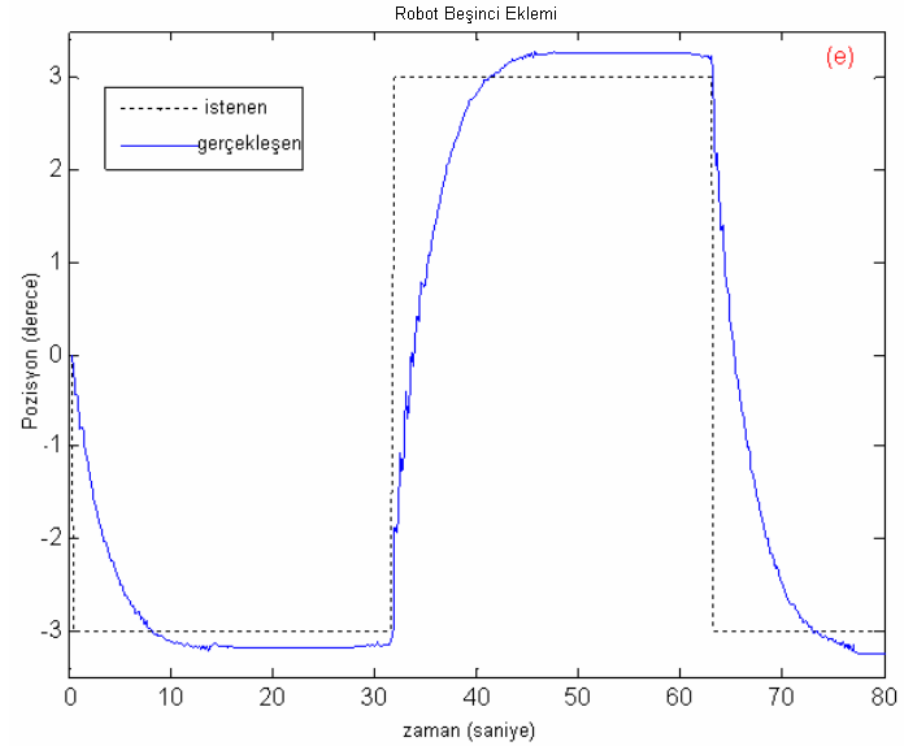
Önerilen gürbüz kontrol organı plasma kesme robotu uygulamasında testere dişi şeklinde sinyal girişi uygulanması halinde klasik PID kontrol organından daha iyi sonuçlar vermektedir (Şekil 6.6.(a, b, c ,d, e)). Bütün eksenler hedef pozisyona çok az hata değerlerinde ulaşabilmektedir. Şekil 6.7.(a,b,c,d,e,)’ de kare dalga şeklinde giriş sinyali için klasik PID kontrol organı sonuçları gösterilmiştir. Sonuçların istenen şartlar olan hızlı ve hassas konumlama kriterlerini sağlamadığı görülmektedir. Bu sonuçların hemen arkasından Şekil 6.8.(a,b,c,d,e)’ de ise aynı şartlarda geliştirilen gürbüz kontrol organı kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Her iki durumun mukayese edilmesi göstermektedir ki; geliştirilen gürbüz kontrol algoritması ile net bir şekilde çok daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Bu sonucu sağlayan daha önceden de ifade edildiği gibi, geliştirilen gürbüz kontrol organının sahip olduğu arttırılmış integral etkidir.



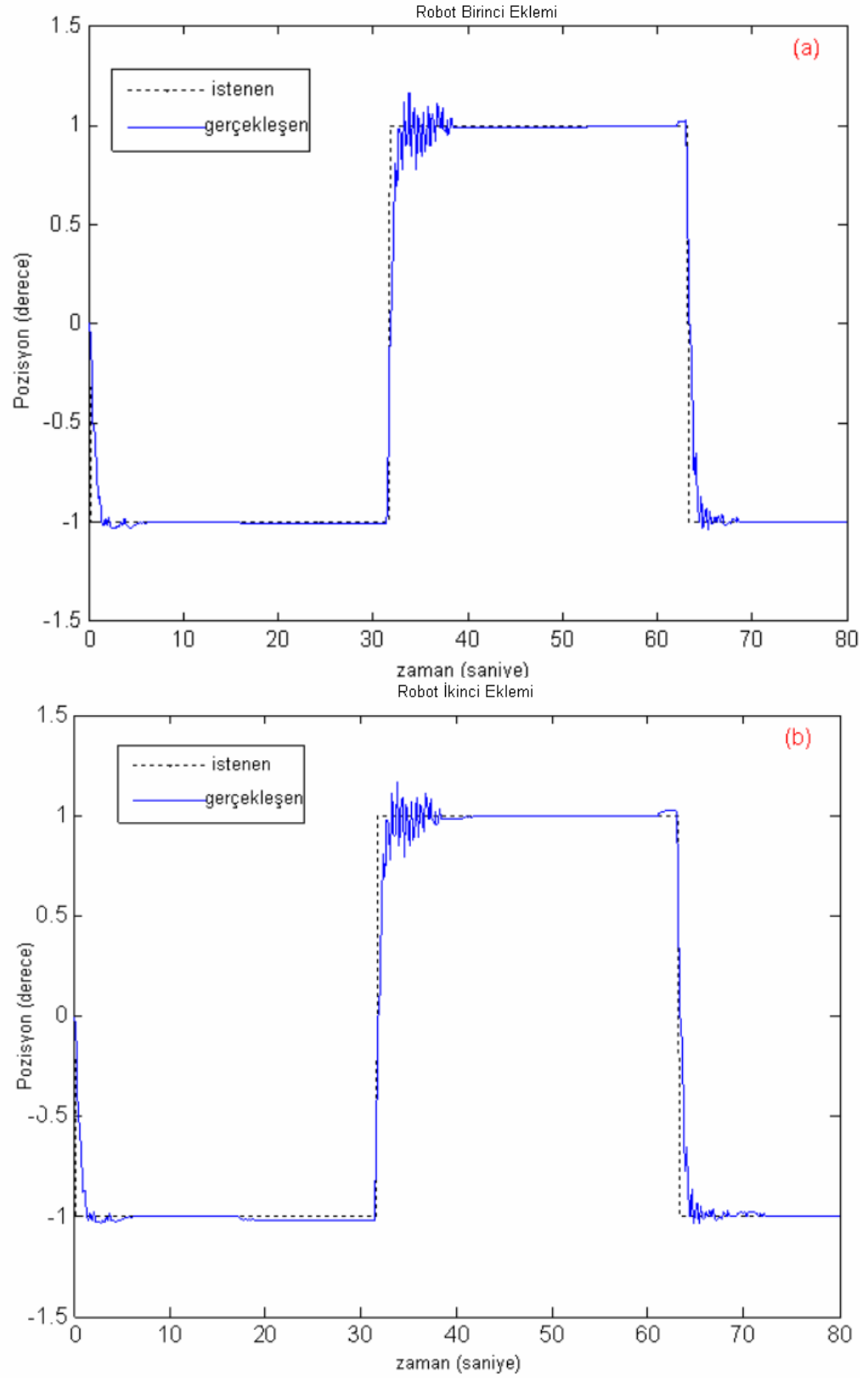
Şekil 6.7. Kare dalga şeklinde giriş sinyali için klasik PID kontrol organı sonuçları (a, b, c, d, e).



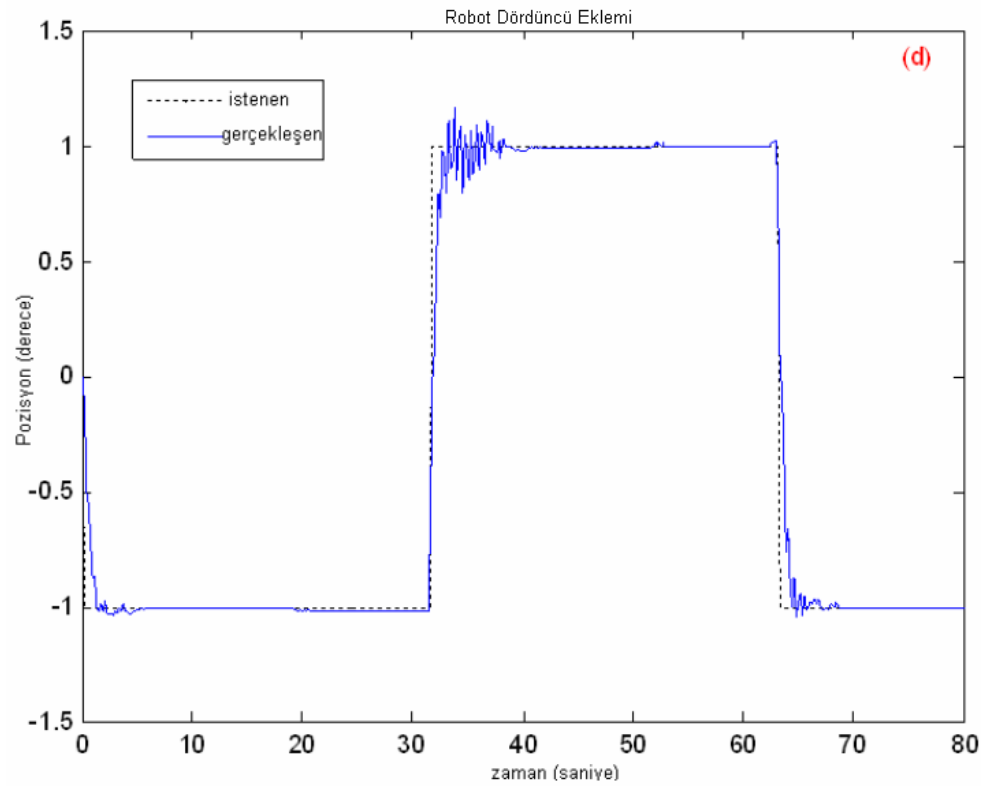
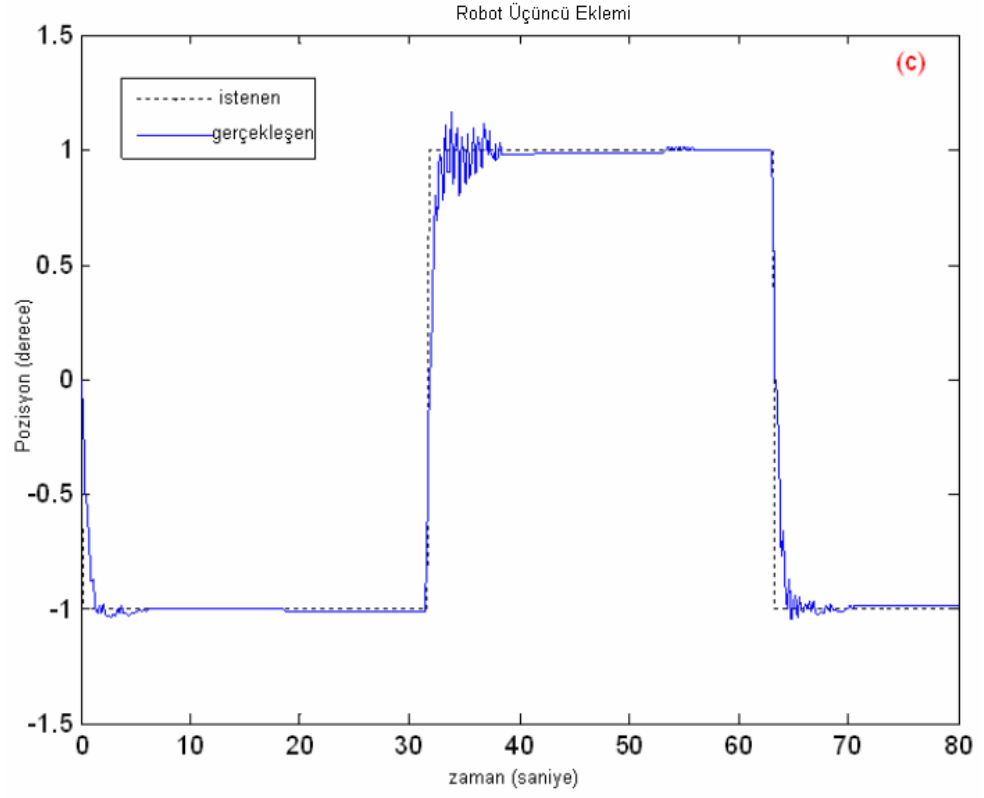
Şekil 6.7' nin devamı.



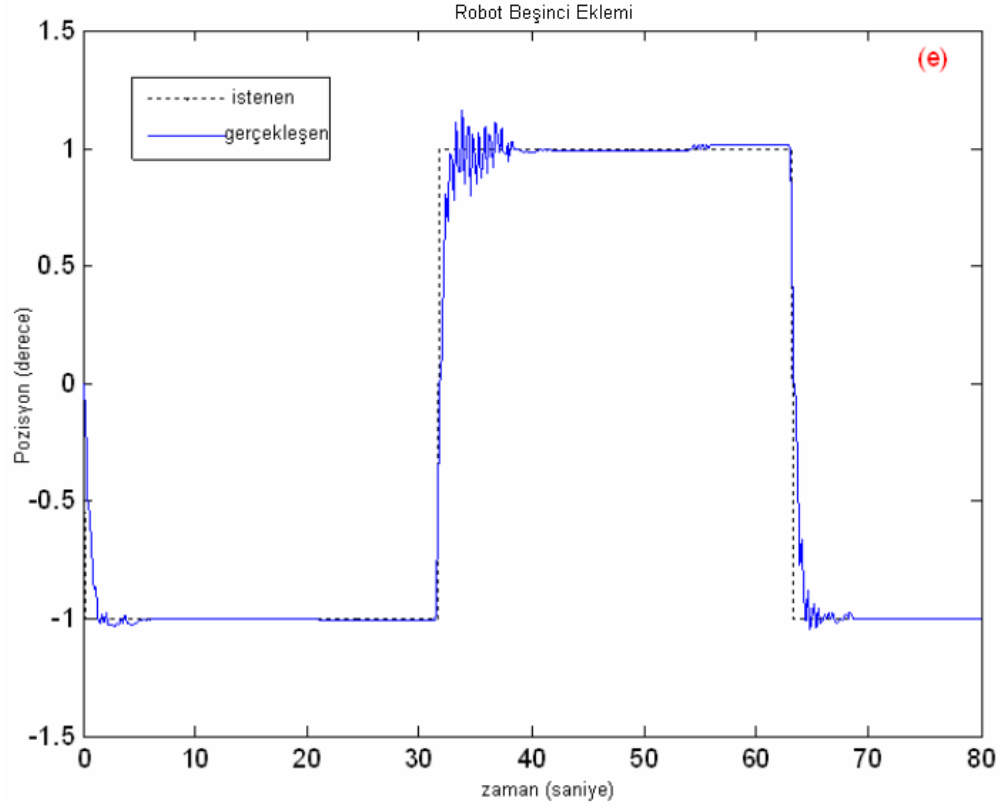
Şekil 6.7' nin devamı.



Şekil 6.8.Gürbüz kontrol organı kare sinyal girişı sonuçları (a, b, c, d, e).



Şekil 6.8' in devamı.



Şekil 6.8' in devamı.

Şekil 6.7.(a, b, c, d, e) ve Şekil 6.8.(a, b, c, d, e)' de görüleceği gibi kare giriş sinyali uygulanması durumunda önerilen gürbüz kontrol organı ile klasik PID kontrol organına göre çok daha az aşma değerleri ile daha kısa sürede denge konumu sağlanması mümkün olmaktadır.

Tüm kare sinyal ve testere dişi formunda sinyal girişi ile gerçekleştirilen deneylerde sinüs formunda olan giriş sinyali ile gerçekleştirilen deneylerle karşılaştırıldığında aşma miktarının ve istenen değere ulaşırken gerçekleşen salınım miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu testere dişi formunda ve kare sinyal formunda olan giriş sinyal yapılarının karakteristiğinden kaynaklanmakta, bu sinyal yapılarında sinyal karakteristiğinde ani değişimler görülmektedir. Dolayısıyla, bu sinyal türlerinde gerçekleşen değişimlere sistem cevabı da, sinüsoidal yapıda sinyal girişine göre önemli farklılık göstermektedir.

## 7. BÖLÜM

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, düzlemsel bir iş tablası ile 5 serbestlik dereceli tabla üzerinde hareket eden bir robotun hassas bir şekilde pozisyonlamasının yapılması için konum kontrolüne yönelik simülasyon ortamında ve geliştirilen deneysel sistem kullanılarak deneysel ortamda klasik PID kontrol organı ve çalışma kapsamında geliştirilen gürbüz kontrol organı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde ve bağıl hata cinsinden tablo halinde verilmiştir. Çalışma kapsamında ters kinematik uygulaması tamamen simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Robot eklemleri ve iş tablası hareket elemanlarının gerçekleştirilmesi gereken zamana bağlı konum değerlerinin simülasyon ortamında elde edilmesi ile bu değerler deneysel sistemde istenen değerler olarak sisteme gönderilmiştir ve böylece, deneysel sistemde robot eklemleri ve iş tablası hareket elemanlarının eş zamanlı manipülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde klasik PID kontrol organı ve çalışma kapsamında geliştirilen gürbüz kontrol organı hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde ise deneysel sistem anlatılmıştır. Altıncı bölümde ise karşılaştırmalı olarak simülasyon çalışması ve deneysel çalışmalarda klasik PID kontrol organı ve önerilen kontrol organı kullanılması durumunda alınan sonuçlar gösterilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

- Simülasyon çalışmasında klasik PID kontrol organı ve çalışma kapsamında geliştirilen gürbüz kontrol organı kullanılmış, en iyi sonucu klasik PID kontrol organı vermiştir. Önerilen gürbüz kontrol organı ile klasik PID kontrol organı kullanılması sonucunda elde edilen veriler arasındaki fark oldukça azdır.
- Deneysel çalışma da; klasik PID kontrol organı ve çalışma kapsamında geliştirilen gürbüz kontrol organı kullanılmış, en iyi sonucu gürbüz kontrol

organını vermiştir ve klasik PID kontrol organını kullanılması ile çalışma kapsamında geliştirilen gürbüz kontrol organını kullanılması durumunda elde edilen fark simülasyon çalışmasına göre çok daha büyüktür.

Gerçekleştirilen çalışma da göstermektedir ki; endüstriyel ve deneysel uygulamalarda gerçek zamanlı çalışmanın zorlukları bulunmaktadır. Bunlar lineer olmayan değişimler, zaman gecikmeleri, bozucu etkiler şeklinde sıralanabilir.

Klasik PID kontrolcünün gerçek zamanlı çalışmada kullanılması durumunda sahip olduğu bazı dezavantajlarının ortadan kaldırılması gerekir. Bu çalışmada PID kontrol organını oluşturan kısımların özel etkileri göz önüne alınmak suretiyle yeni bir gürbüz kontrol organı geliştirildi. Böylece klasik PID kontrol organının dezavantajları deneysel çalışma için giderildi. Geliştirilen gürbüz kontrol organından elde edilen sonuçların simülasyon çalışmasında klasik PID kontrol organından daha kötü olmasının sebebi ise simülasyon çalışmasında gerçek zamanlı çalışmada oluşan zaman gecikmelerinin bulunmamasıdır. Dolayısıyla; zaman gecikmeleri sebebiyle ortaya çıktığı tespit edilen kalıcı hataları ortadan kaldırmak için geliştirilen gürbüz kontrolcü yapısındaki arttırılmış integral etki, bu durumda olumsuz etki yapmaktadır.

Geliştirilen gürbüz kontrol organı ile gerçek zamanlı deneysel uygulamalarda çok iyi sonuçlar alındı. Çalışmamız göstermiştir ki; deneysel uygulamalarda PID kontrol organı etkileri ile oluşturulabilecek yeni kontrol organları ile çok değişik sistemler için iyi sonuçlar elde edilebilmesi mümkündür. Çalışmanın diğer bir sonucu ile simülasyon sistemleri ile gerçek zamanlı çalışan sistemlerin entegre çalışmasının sağlanabilirliğinin gösterilmesidir. Böylece eş zamanlı olarak simülasyon programlarının ve deneysel çalışmaların birinin diğerini destekler sonuçlar alması mümkün hale gelmektedir.

İlerleyen aşamalarda; çalışma kapsamında geliştirilen sistem kullanılarak, YSA (Yapay Sinir Ağları), Fuzzy, Adaptif, vb. kontrol organları ile bu kontrol organlarının birlikteliği ile elde edilecek melez kontrol organlarının deneysel ortamda gerçek zamanlı çalışmalarda incelenmesi gerçekleştirilecektir.

**KAYNAKLAR**

1. Han, S.A., Choi, S.B., Cheon, C.C., Position Control of X-Y Table Mechanism Using Electro-Rheological Clutches, *Mechanism and Machine Theory*, 35, 1563-1577, 2000.
2. Tseng, Y., et al., High-Speed and Precise Positioning of an X-Y Table, *Control Engineering Practice*, 11, 357-365, 2003.
3. Ho, W., Ji, P., Component Scheduling for Chip Shooter Machines: A Hybrid Genetic Algorithm Approach, *Computers&Operations Research*, 30, 2175-2189, 2003.
4. Haut, T., et al., A High-Accuracy Three-Dimensional Coordinate Digitizing System for Reconstructing the Geometry of Diarthrodial Joints, *Journal of Biomechanics*, 31, 571-577, 1998.
5. Nagchaudhuri, A., Industrial Robots and Vision System for Introduction to Flexible Automation to Engineering Undergraduates, Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Hiroshima, Japan, July 14-19, 2002.
6. Nagchaudhuri, A., Robotics and Machine Vision for Introduction to Flexible Automation to Engineering Undergraduates, 32nd ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, Boston, MA, USA, November 6-9, 2002.
7. Pham, D.T., Yildirim, S., Control of the Trajectory of a Planar Robot Using Recurrent Hybrid Networks, *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 39, 415-429, 1999.
8. Yildirim, Ş., Adaptive Robust Neural Controller for Robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 46, 175-184, 2004.
9. Yildirim, Ş., Design of A Proposed Neural Network Control System for Trajectory Controlling of Walking Robots, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16, 368-378, 2008.
10. Fung, R., Hsu, Y., Huang, M., System Identification of a Dual-Stage XY Precision Positioning Table, *Precision Engineering*, (In Press), 2008.
11. Tan, K., K., Huang, S.,N., Lee, T., H., Geometrical Error Compensation and Control of an XY Table Using Neural Networks, *Control Engineering Practice*, 14, 59-69, 2006.
12. Zlajpah, L., Simulation in Robotics, *Mathematics and Computers in Simulation*, Article in Press, 2008.

13. Briot, S., Boney, I., Accuracy Analysis of 3-DOF Planar Parallel Robots, *Mechanism and Machine Theory*, 43, 445–458, 2008.
14. Lin, C.K., A Reinforcement Learning Adaptive Fuzzy Controllers for Robots, *Fuzzy Sets and Systems*, 137, 339-352, 2003.
15. Lin, F., Brandt, R., D., An Optimal Control Approach to Robust Control of Robot Manipulators, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(1), 1998.
16. Hong, D.S., A Genetic-Algorithm-Based Approach to the Generation of Robotic Assembly Sequences, *Control Engineering Practice*, 7, 151-159, 1999.
17. Abdallah, C., et al., Survey of Robust Control for Rigid Robots, *IEEE Control Systems*, 11 (2), 24-30, 1991.
18. Fu, L. C., Hsu, Y. J., Fully Automated Two-Robot Flexible Assembly Cell, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3, 332-370, Atlanta, May, 1993.
19. Wang, S. L., Collision Detection of Multiple Robots, *International Journal of Robotics and Automation*, 11(4), 183-189, 1996.
20. Lin, C. F., Tsai, W. H., Trajectory Modeling, Collision Detection and Motion Planning for Two Robot Manipulators, *International Journal of Robotics and Automation*, 6 (4), 193-209, 1991.
21. Fallahi, B., et al., A study of Workspace of Five-Bar Closed Loop Manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, 29(5), 759-765, 1994.
22. Zeheng, Y. F., Luh, J. Y. S., Joint torques for control of two coordinated moving Robots, *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, 1375-1380, 1986.
23. Suh, I. H., Shin, K. G., Coordination of Dual Robot Arms Using Kinematic Redundancy, *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, 504-509, 1988.
24. S. Lee and J. M. Lee, Task Oriented Dual Arm Manipulability and It's Application to Configuration Optimization, *Proc. IEEE Conference on Decision and Control*, Austin, 2253-2260, 1988.
25. Kumar. V., Waldron, K. J., Force Distribution in Closed Kinematic Chains, *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, 114-119, 1988.

26. Kreutz, K., Lokshin, A., Load Balancing and Closed Chain Multiple Arm Control, Proc. American Control Conference, U.S.A., 2148-2155, 1988.
27. Wen, J. T., Kreutz, K., Stability Analysis of Multiple rigid Robot Manipulators Holding a Common Rigid Objects, Proc. IEEE Conference on Decision and Control, Austin, 192-197, 1988.
28. Chan, A. G., Pennock, G. R., The Velocity Problems of Two 3-R Robots Manipulating a Planar Open-Chain Payload, International Journal of Robotics and Automation, 11(4), 161-168, 1996.
29. Mattson, K. G., Pennock, G. R., The Velocity Problems of Two 3-R Robots Manipulating a Four-Bar Linkage Payload, Mechanism and Machine Theory, 31(8), 1019-1032, 1996.
30. Hayati, S., Hybrid Position/Force Control of Multiarm Cooperating Robots, Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, Sanfrancisco, CA, 82-89, 1986.
31. Tarn, T. J., Bejczy, A. K., Yun, X., Design of Dynamic Control of Two Cooperating Robot Arms: Closed Chain Formulation, Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, NC, 1-7, 1987.
32. Frutta, K., Kosuge, K., Shiote, Y., Hatona, H., Master-Slave Manipulator Based on Internal Model Following Control Concept, Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, NC, 567-572, 1987.
33. Yun, X., Nonlinear Feedback Control of Two Manipulator In Presence Of Environmental Constraints, Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ, 1252-1259, 1989.
34. Nakamura, Y., Nagai, K., Yoshikawa, T., Mechanics of Coordinative Manipulation by Multiple Robotic Mechanism, Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, NC, 991-998, 1987.
35. Unseren, M. A., Rigid Body Dynamics and Decoupled Control Architecture for Two Strongly Interacting Manipulators, Robotica, 9, 421-430, 1991.
36. Hsu, P., Coordinated control of Multiple Manipulator Systems, IEEE Transaction on Robotics and Automation, 9(4), 400-410, 1993.
37. Perdereau, V. Drouin, M., Hybrid External Control for Two Robot Coordinated Motion, Robotica, 14, 141-153, 1996.

38. Wang, D., McClamroch, N. H., Position and Force Control for Constrained Manipulator, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 43(8), 1101-1107, 1993.
39. Jankovski, K. P., ElMaragh, W. H. ElMaragh, H. A., Inverse Dynamic of Multiple Robots Arms with Flexible Joints, *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, 996-1003, 1993.
40. Yao, B., Gao, W. B., Chan, S. P., Cheng, M., VSC Coordinated Control of Two Manipulator Arms In the Presence of Environmental Constrains, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 37(11), 1806-1812, 1992.
41. Arimato, S., Miyazaki, F., Kavamura, S., Cooperative Motion Control of Multiple Robot Arms or Fingers, *IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, 1407-1412, 1987.
42. Lian, K. Y., Lin, C. R., Sliding-Mode Motion/Force Control of Constrained Robots, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 43(8), 1101-1107, 1998.
43. Ozguner, U., Yurkovich, S., Al-Abbas, F., Decentralized Variable Structure Control of a Two-Arm Robotic System, *Proc. IEEE Conf. On Robotics and Automation*, Raleigh, NC, 1248-1254, 1987.
44. Uchiyama, M., Dauchez, P., A Symmetric Position/Force Control Scheme for the Coordination of the Two Robots, *Proc. of IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, 350-356, 1988.
45. Walker, M. W., Kim, D., Dionise, J., Adaptive Coordinated Motion Control of Two Manipulator Arms, *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Scottsdale, AZ, 1084-1090, 1989.
46. Jean, J. H. Fu, L. C., An Adaptive Control Scheme for Coordinated Multimanipulator System, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 9(12), 226-231, 1993.
47. Ramadorai, A. K., Tarn, T. J., Bejczy, A. K., Xi, N., Task Driven Control of Multi-Arm Systems, *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2(3), 198-205, 1994.
48. Luecke, G. R., Gardner, J. F., Experimental Results for Force Dissributions in Cooperating Manipulator Systems Using Joint Local Control, *The International Journal of Robotic Research*, 13(6), 471-480, 1994.

49. Huang, H. P., Chen, R. S., Modeling and Adaptive Coordination Control of a Two-Robot System, *Journal of Robotic System*, 65-69, 1992.
50. Gao, W., Cheng, M., A New Control Strategy for Robotic Systems In Tracking Task, *Mechatronics*, 1(3), 353-366, 1991.
51. Jatta, F., Legnani, G., Visioli, A., Ziliani, G., On The use of Velocity Feedback In Hybrid Force/Velocity Control of Industrial Manipulators, *Control Engineering Practice*, 14, 1045-1055, 2006.
52. Sarıkaya, H., İki Serbestlikli Düzlemsel Manipülâtörlerin Ortak Manipülasyonu, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 1995.
53. Özkan, B., Dynamic Modeling and Control of Two Coordinated Robot Manipulators, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 1999.
54. Tarokh, M., Seraji, H., A Multivariable Control Scheme for Robot Manipulators, *Journal of Robotic Systems*, 8, 1991.
55. Craig, J. J., Hsu, P., Sastry, S. S., Adaptive Control of Robot Manipulator, *The International Journal of Robotics Research*, 16-28, 1987.
56. Liuzzo, S., Tomei, P., A Global Adaptive Learning Control for Robotic Manipulators, *Automatica*, 44, 1379–1384, 2008.
57. Hsu, P., Bodson, M., Sastry, S., Paden, B., Adaptive Identification and Control for Manipulators without Using Joint Accelerations, *IEEE*, 3, 1210-1215, 1987.
58. Feng, G., Palaniswami, M., Adaptive Control of Robot Manipulator in Task Space, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 38(1), 100-104, 1993.
59. Ortega, R., Spong, M. W., Adaptive Motion Control of Rigid Robots: A Tutorial, *Automatica*, 25, 877-888, 1989.
60. Spong, M. W., Ortega, R., An Adaptive Inverse Dynamic Control of Rigid Robots, *IEEE Trans. Automatic Control*, 1988.
61. Amestegui, M., Ortega, R., Ibarra, J. M., Adaptive Linearizing-Decoupling Robot Control: A Comparative Study of Different Parametrization. Proc. 5<sup>th</sup> Yale Workshop on Applications of Adaptive Systems Theory, New Haven, Connecticut, 1987.
62. Middleton, R. H., Goodwith, G. C., Adaptive Computed Torque Control for Rigid Link Manipulators, *System Control Lett.*, 10, 9-16, 1988.
63. Slotine, J., Li, W., Adaptive Control: A New Perspective., Proc. IEEE Conf. On Decision and Control, Los Angeles, California, 1987.

64. Sadegh, N., Horowitz, R., Stability Analysis of an Adaptive Controller For Robotic Manipulators, IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Raleigh, North Carolina, 1987.
65. Kelly, R., Ortega, R., Carelli, R., Adaptive Motion Control Design of Robot Manipulators: An Input –Output Approach, Proc. , IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Philadelphia, Pennsylvania, 1988.
66. Spong, M. W., Vidyasagar, M., Robust Linear Compensator Design for Nonlinear Robotic Control, IEEE Journal of Robotic and Automation, 13(4), 345-350, 1987.
67. Slotine, J. J., Li, W., On the Adaptive Control of Robotic Manipulators, Int. J. Robotics Research, 6(3), 49-59, 1987.
68. Dawson, D. M., Lewis, F. L., Dorsey, J. F., A Nominal Adaptive Controller for a Robot Manipulator, Journal of Robotic Systems 7(6), 865-879, 1990.
69. Kelly, R., Adaptive Computed Torque Plus Compensation Control for Robot Manipulator, Mechanism and Machine Theory, 25(2), 161-165, 1990.
70. Spong, M. W., Ortega, R., Kelley, R., Comments on Adaptive Manipulator Control: A Case Study , IEEE Transaction on Automatic Control, 35(6), 761-762, 1990.
71. Yuan, J., Adaptive Control of Robotic Manipulator Including Motor Dynamics, IEEE Transaction on Robotics and Automation, 11(4), 612-617, 1995.
72. Leib, A., Adaptive Output Regulation of Robot Manipulators under Actuator Constrains, IEEE Transaction on Robotics and Automation, 16(1), 29-35, 2000.
73. Zhang F., Dawson, D.M., De Queiroz, M.S., Dixon, W., Global Adaptive Feedback Control of Robot Manipulators, Proceeding of the 36<sup>th</sup> Conference on Decision&Control, U.S.A., December, 1997.
74. Yeung, K. S., Chen, Y. P., A New Controller Design for Manipulators using The Theory of Variable Structure Systems, IEEE Trans. Automat. Cont., 33, 200-206, 1988.
75. Bailey E., Arapostathis, A., Simple Sliding Mode Control Scheme Applied to Robot Manipulators, Int. J. Control., 45(4), 1987.
76. Young, K. D., Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems, IEEE Trans. Sys. Man. Cybern, 8, 101-109, 1978.
77. Slotine, J. E ., Sasstry, S. S., Tracking Control of Non-Linear System Using Sliding Surface with Application to Robot Manipulators, Int. J. Control., 38(2), 465-492, 1983.

78. Slotine, J. E., The Robust Control of Robot Manipulators, *Int. J. Robotics Research*, 4, 49-63, 1985.
79. Chen, C., Xu, R., Tracking Control of Robot Manipulator using Sliding Mode Controller with Performance Robustness, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 21, 64-70, 1999.
80. Park C. W., Kim, J. H., Kwon, C., Park, M., Tracking Control of a Robot Manipulator Using Sliding Mode Controller with Fast and Accurate Performance, *Proceeding of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 305-310, 1999.
81. Bekit, B. W., Whidborne, J. F., Seneviratne, L. D., Sliding Mode Control for Robot Manipulators Using Time-Varying Switching Gain and Bound Layer, *International Conference on Control*, 1198-1203, September 1-4, 1998.
82. Keun, M., Jong-Hwan, K., Robust Control of Robot Manipulators with Parametric Uncertainty, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 39(6), 1994.
83. Tang, Y., Tomizuka, M., Guerrero, G., Montemayor, G., Decentralized Robust Control of Mechanical Systems, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 45(4), 2000.
84. Liu, G. J., Goldenberg, A. A., Asymptotically Stable Robust Control of Robot Manipulators, *Mech. Mach. Theory*, 31(5), 607-618, 1996.
85. Mnif, F., Boukas, E. K., Saad, M., Robust Control for Constrained Robot Manipulator, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 11, 129-123, 1999.
86. Kang, B. S., Kim, S. H., Kwak, Y. K., Smith, C. C., Robust Tracking Control of a Direct Drive Robot, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 121, 261-269, 1999.
87. Yu, H., Robust Combined Adaptive and Variable Structure Adaptive Control of Robot Manipulators, *Robotica*, 16, 623-650, 1998.
88. Tseng, T., Masayoshi, M., Guerrero, G., Robust Control of Rigid Robots, *Proc. of the 36<sup>th</sup> Conference on Decision & Control*, San Diego, 791-796, California, December, 1997,
89. Belhocine, M., Hamerlain, M., Bouyoucef, K., Robust Control Using Sliding Mode, *Proc. of the 12<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Intelligent Control*, İstanbul, Turkey, 361-366, July 16-18, 1997.

90. Abdullah, C., Davson, D., Dorato, P., Jamshidi, M., Survey of Robust Control for Rigid Robots, *IEEE Contr. Syst. Mag.*, 11(2), 24-30, 1991.
91. Kreutz, K., On Manipulator Control by Exact Linearization, *IEEE Trans. Auto. Contr.*, 34, 763-767, 1989.
92. Dorato, P., *Robust Control*, New York: IEEE Press, 1987.
93. Samson C., Robust Nonlinear Control of Robotic Manipulators, in *Proc. 22<sup>nd</sup> IEEE Conf. Dec. Cont.*, San Antonino, 1211-1216, December, 1983.
94. Spong, M. W., *Control of Flexible Joint Robots: A Survey*, Coordinated Science Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, February 1990.
95. Anderson, R. J., Passive Computed Torque Algorithms for Robots, *Proc. IEEE Conf. Dec. & Cont.*, Tampa, FL, 1638-1644, December, 1989.
96. Anderson, R. J., *A Network Approach to Force Control In Robotics And Teleoperation*, Ph. D. Thesis, University Illinois, Urbana- Champaign, 1989.
97. Abdullah, C., Cordan, R., A Positive-Real Design for Robotic Manipulators, *Proc. IEEE Amer. Contr. Confer.*, San Diego, Ca, May, 1990.
98. Yound, K. D., Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems, *IEEE Trans., Sys., Man., and Cyber.*, 8, 210-218, 1978.
99. Morgan, R. G., Ozguner, U., A Decentralized Variable Structure Control Algorithm for Robotic Manipulators, *IEEE Rob. & Automation*, 1, 57-65, 1985.
100. S. Nicosia, and P. Tomei, Model Reference Adaptive Control Algorithm for Industrial Robots, *Automatica*, pp. 635-644, May (1984).
101. Bailey, E., Arapostathis, A., Simple Sliding Mode Control Scheme Applied to Robot Manipulators, *Int. J. Contr.*, 45, 1197-1209, 1987.
102. Bartolini, G., Zolezzi, T., Variable Structure Nonlinear Control Law, *IEEE Trans., Auto. Contr.*, 30, 681-684, 1985.
103. Spong, M.W., Thorb, J. S., Kleinwaks, J. M, Robust Microcompensator Control of Robot Manipulators, *Automatica*, 23, 373-379, 1987.
104. Cvetkovic, V., Vukobratovic, M., One Robust, Dynamic Control Algorithm for Manipulation Systems, *Int. Journal Robotic Research*, 1, 15-28, 1982.

105. Barmish, B. R., Petersen, I. R., Fever, A., Linear Ultimate Control of Uncertain Dynamic Systems, *Automatica*, 19, 523-532, 1983.
106. Gutman, S., Uncertain Dynamic Systems, A Lyapunov Min-Max. Approach, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 24, 437-443, 1979.
107. Corless, M. J., Leithman, G., Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Systems, *IEEE Trans Automatic Control*, 26, 1139-1144, 1981.
108. Spong, M. W., Ghorbel, F., Robustness of Adaptive Control of Robots, in Proc. Symposium Control of Robots and Manufacturing Systems, Arlington, November, 1990.
109. Ionnu, P. A., Kokotovic, P. V., Instability Analysis and Improvement of Robustness of Adaptive Control, *Automatica*, 20, 583-594, 1984.
110. Yau, B., Tomizuka, M., Smooth Robust Sliding-Mode Control of Robot Manipulators with Guaranteed Transient Performance, *Proceeding of IEEE International Conference on Control, USA*, 1176-1180, 1994.
111. Yau, B., Tomizuka, M., Robust Desired Compensation Adaptive Control of Robot Manipulators, With Guaranteed Transient Performance, *Proceeding of IEEE International Conference Robotics and Automations, USA*, 1830-1836, 1994.
112. Yau, B., Tomizuka, M., Comparative Experiments of Robust and Adaptive Control with Robust Adaptive Controller for Robot Manipulators, *Proceeding of the 33rd Conference on Decision and Control, Lake Buana Visst*, 1290-1295, December, 1994.
113. Yau, B., Tomizuka, M., Litherland, J., Implementation Issues and Experimental Studies Of Adaptive Robust Controllers for Robot Manipulators, *Proceedings of The American Control Conference, Philadelphia*, 2203-2205, June, 1998.
114. Song, G., Longman, R.W., Mukherjee, R., Integrated Sliding-Mode Adaptive-Robust Control, *IEEE Proc. Control Theory Appl.*, 146(4), 341-347, 1999.
115. Spong, M.W., Vidyasagar, M., *Robot Dynamics and Control*, New York, 1989.
116. Spong, M.W., On the Robust Control of Robot Manipulators, *IEEE Trans. Automat. Cont.*, 37, 1782-1786, 1992.
117. Koo, K. M., Kim, J. H., Robust Control of Robot Manipulators with Parametric Uncertainty, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 39(6), 1230-1233, 1994.

118. Burkan, R., Uzmay, I., SCARA tipi Robotun Adaptif ve Gürbüz Yörünge İzleme Kontrolü, 10. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, 707-715, Konya, Eylül, 2001.
119. Rivin, E.I., Mechanical Design of Robots, The McGraw-Hill Comp.,1987.
120. Luhi, J. Y. S., Fisher, W.D., Paul, R. P. C., Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators, IEEE Transaction on Automatic Control, 28(2), 153-161, 1983.
121. An, C.H., Atkeson, C.G., Hollerbach, J.M., Model-Based Control of Robot Manipulators, MIT Pres., 1988.
122. Khan, A. A., Fuzzy PID Controller: Design, Tuning and Comparision with Conventional PID Controller, Engineering of Intelligent Systems, IEEE International Conference on, April, 2006.

## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa SOYLAK, 1974 yılında Kayseri’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kayseri’de tamamladı. 1991 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nü kazandı ve 1996 yılında bu bölümden mezun oldu. 1997 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilimdalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimini 2000 yılında tamamladıktan sonra 2002 yılında Makine Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. Halen, Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Mustafa SOYLAK, evli ve iki çocuk babasıdır.

Adres:

Erciyes Üniversitesi,  
Sivil Havacılık Yüksekokulu,  
Uçak Gövde- Motor Bölümü,  
38039, Kayseri  
Tel: (352) 4374901-41101  
Fax: (352) 437 57 44  
E-posta: soylakm@erciyes.edu.tr