

**ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ BİR KARTEZYEN
ROBOTUN TASARIMI, UYGULAMASI ve DENETİMİ**

Muhammed Fatih ÇORAPSIZ

Doktora Tezi

Elektrik -Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları Bilim Dalı

Doç. Dr. Köksal ERENTÜRK

2014

Her Hakkı Saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ BİR KARTEZYEN ROBOTUN
TASARIMI, UYGULAMASI ve DENETİMİ**

Muhammed Fatih ÇORAPSIZ

**ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Elektrik Makinaları Bilim Dalı**

**ERZURUM
2014**

Her hakkı saklıdır



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



TEZ ONAY FORMU

**ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ BİR KARTEZYEN ROBOTUN TASARIMI,
UYGULAMASI ve DENETİMİ**

Doç. Dr. Köksal ERENTÜRK danışmanlığında, **Muhammed Fatih ÇORAPSIZ** tarafından hazırlanan bu çalışma **13/10/2014** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı – Elektrik Makinaları Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (5./5)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mehmet TÜMAY

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mustafa YAMAN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

İmza :

Üye : Doç. Dr. Köksal ERENTÜRK

İmza :

Üye : Doç. Dr. Tevhit KARACALI

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu **23 / 10 / 2014** tarih ve **42 / 1463** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 2011/416

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ BİR KARTEZYEN ROBOTUN TASARIMI, UYGULAMASI ve DENETİMİ

Muhammed Fatih ÇORAPSIZ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Köksal ERENTÜRK

Esnek üretim sistemlerinde kullanılan kartezyen robotların özellikle düzlemsel hareketlerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Hassas hareket kontrolünün sağlanabilmesinde tasarımda kullanılacak malzemelerin seçilmesi ve bu malzemelerin montajının doğru bir şekilde yapılması hayati önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında; üç serbestlik derecesine sahip bir kartezyen robotun tasarımı, uygulaması ve denetimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kartezyen robotun öncelikle Solid Works programında katı modeli oluşturularak eksenlerde hareket eden uzuvların kütleleri elde edilmiştir. Kartezyen robotun ileri kinematik analizi ve elde edilen kütle değerlerine bağlı olarak dinamik analizi yapılmış olup, dinamik analiz yapılırken Lagrange fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Dinamik analizden elde edilen kuvvetlere kesme kuvvetleri de dahil edilerek her bir eksene etki edecek maksimum kuvvet hesaplanmış olup tasarımda kullanılacak malzemelerin seçimi bu hesaplamalara göre gerçekleştirilmiştir. Kartezyen robotun yörünge izleme ve kontur kontrolü benzetimlerinde PID, gözleyici tabanlı PID ve ileri beslemeli hesaplanan tork kontrol yöntemlerinden yararlanılmıştır. Sistem içerisinde var olan bozucu etkileri yok etmeyi amaçlayan ileri beslemeli hesaplanan tork kontrol yöntemi yörünge izleme ve kontur performansını büyük oranda artırmıştır. Gerçek zamanlı yörünge takip ve kontur kontrolü Labview programında hazırlanan bir arayüz aracılığı ile mikro denetleyici tabanlı olarak açık çevrim ve kapalı çevrim denetim yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Konum bilgisinin elde edilmesi için manyetik doğrusal konum seziciler kullanılmış olup özellikle kapalı çevrim denetim durumunda bu konum sezicilerden alınan bilgiler kullanılarak yörünge izleme ve kontur hataları büyük oranda azaltılmıştır.

2014, 141 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kartezyen Robot, CNC, Kinematik ve Dinamik Modelleme, Kesme Kuvvetleri, İzleme ve Kontur Hataları, PID Kontrol, Luenberger Gözleyici, İleri Beslemeli Hesaplamalı Tork Kontrol.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

DESIGN, IMPLEMENTATION AND CONTROL OF A CARTESIAN ROBOT WITH THREE DEGREES OF FREEDOM

Muhammed Fatih ÇORAPSIZ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering
Electric Machines Branch of Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK

Precision control of planar motion of Cartesian robots that are used in flexible manufacturing systems should be provided. Choosing of the materials considered in the design and proper installation of them have vital importance on the precision control of the system. In this thesis; design, implementation and control of a Cartesian robot with three degrees of freedom have been realized. Firstly, masses of the limbs of the designed system moving in the axes have been calculated using its solid model in Solid Works environment. Dynamical analysis of the system has been performed using Lagrange Equations with respect to forward kinematic analysis and masses have been calculated using Solid Works. By adding cutting forces to the forces obtained from dynamical analysis, maximum forces that affect each axis have been determined and the values of the maximum forces have been used to select construction materials. Methods of PID, observer based PID and feed-forward computed torque control have been used in simulations for the purpose of trajectory tracking and contour control. The method of feed-forward computed torque control method used for eliminating disturbances existing in the designed system has substantially increased trajectory tracking and contour performances. Both real time open loop and real time closed loop controls of the system have been realized using an interface which has been prepared in Labview environment with a microcontroller unit. Magnetic linear encoders have been used to acquire position data. Using these data, trajectory tracking and contour errors have been reduced for closed loop control, significantly.

2014, 141 pages

Keywords: Cartesian Robot, CNC, Kinematic and Dynamic Modeling, Cutting Forces, Tracking and Contour Errors, PID Control, Luenberger Observer, Feedforward Computed Torque Control.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında büyük bir anlayış ve sabır gösteren, beni yönlendiren ve destekleyen, bilgisi ve kişiliği ile her alanda kendime örnek aldığım tez yöneticisi değerli hocam Sayın Doç. Dr Köksal ERENTÜRK'e, doktora öğrenimim süresince yardım ve desteklerini esirgemeyen doktora tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK ve Sayın Prof. Dr. Mustafa YAMAN hocalarıma, doktora arkadaşlarım Çağlar DUMAN, Ahmet DUMLU ve Alırza KALELİ'ye ve çalışmalarım sırasında büyük bir sabır ve anlayış gösteren aileme teşekkür ederim.

Muhammed Fatih ÇORAPSIZ

Ağustos, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kartezyen Robotların Uygulama Alanları ve Yapılan Çalışmalar.....	5
2. KURAMSAL TEMELLER.....	15
2.1.Kartezyen Robotun İleri Kinematik Analizi ve Jakobien Matrisi.....	16
2.2.Kartezyen Robotun Dinamik Analizi.....	19
2.3.Kesme Kuvvetlerinin Hesaplanması.....	22
2.4.Adım Motorları.....	23
2.4.1. Hibrit Adım Motoru.....	24
2.4.2. Hibrid Adım Motorlarının Dinamik Modeli.....	27
2.4.3. Mikro Adımlama Yöntemi.....	31
2.4.4. Hibrit Adım Motorlarının Hız Profillerinin Sağlanması.....	33
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	38
3.1.Kartezyen Robot Tasarımı.....	38
3.1.1. Ana gövde ve ayaklar.....	38
3.1.2. Alüminyum profiller.....	39
3.1.3. Alüminyum lamalar.....	39
3.1.4. Bilyeli vidalı mil ve somunu.....	40
3.1.5. Kaplin.....	42
3.1.6. İş/Fener mili motoru.....	42
3.1.7. Kartezyen robotta kullanılan doğrusal konum seziciler.....	43
3.2. Kartezyen Robotun Boyutları ve Çalışma Uzayı.....	44
3.3. Kesme Kuvvetleri ve Kesme Gücünün Hesaplanması.....	44
3.3.1. Hafif kesme şartlarında kesme kuvvetlerinin hesaplanması.....	44

3.3.1.a. Kesme kuvvetlerinin hesaplanması (Hafif şartlar)	48
3.3.2. Orta ağırlıktaki kesme şartlarında kesme kuvvetlerinin hesaplanması	50
3.3.2.a. Orta ağırlıktaki kesmelerde kesme kuvvetlerinin hesaplanması	52
3.3.3. Ağır kesme şartlarında kesme kuvvetlerinin hesaplanması	53
3.3.3.a. Ağır kesme işlemlerinde kesme kuvvetlerinin hesaplanması	56
3.3.4. Ağır kesme şartlarında kesme gücünün hesaplanması	57
3.4. X Eksen Hesaplamaları	58
3.4.1. Bilyeli vidalı mil ve somun seçimi	58
3.4.2. Vidalı mil sehim hesabı	62
3.4.3. X eksenine etki eden toplam kuvvetin bulunması	63
3.4.4. X eksen motor seçimi	66
3.5. Y Eksen Hesaplamaları	66
3.5.1. Bilyeli vidalı mil ve somun seçimi	66
3.5.2. Vidalı mil sehim hesabı	70
3.5.3. Y eksenine etki eden toplam kuvvetin bulunması	71
3.5.4. Y eksen motor seçimi	73
3.6. Z Eksen Hesaplamaları	74
3.6.1. Bilyeli vidalı mil ve somun seçimi	74
3.6.2. Vidalı mil sehim hesabı	78
3.6.3. Z eksenine etki eden toplam kuvvetin bulunması	79
3.6.4. Z eksen motor seçimi	82
3.7. Eksen Tahrik Motorları ve Sürücüleri	82
3.8. Kartezyen Robotun Denetleyici Kartı ve Kullanıcı Arayüzü	84
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	89
4.1. Kontur (Contour) Hatasının Hesaplanması	89
4.2. PID Kontrol	91
4.3. Luenberger Gözleyici Tabanlı PID Kontrol	98
4.4. İleri Beslemeli Hesaplanan Tork Kontrol	103
4.5. Gerçek Zamanlı Mikro Denetleyici Tabanlı Kontrol	106
5. SONUÇLAR	137
KAYNAKLAR	139
ÖZGEÇMİŞ	142

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

R_a	Doğru akım motoru armatür direnci
L_a	Doğru akım motoru armatür indüktansı
i_a	Armatür akımı
V_a	Besleme gerilimi
T_d	Yük torku
θ_r	Referans konum
θ_m	Gerçek konum
J	Jacobian matrisi
m_i	i . eksenin kütlesi
v_i	i . eksenin hızı
g	Yerçekimi ivmesi
L	Lagrange fonksiyonu
q	Genelleştirilmiş koordinat
K_t	Eyleyici tork sabiti
K_v	Eyleyici hız sabiti
B	Eyleyici viskoz sürtünme katsayısı
V_c	Kesme hızı
f_z	Diş başına ilerleme değeri
Z	Diş sayısı
p	Adım motorunun rotor diş sayısı
R	Adım motorunun faz direnci
L	Adım motorunun faz indüktansı
V_f	İlerleme Hızı

n	Devir sayısı
d	Takım çapı
φ_s	Temas açısı
h_m	Ortalama talaş kalınlığı
b	Talaş genişliği
A_s	Ortalama talaş kesiti
F_{sz}	Bir dişe karşılık gelen kesme kuvveti
F_s	Toplam kesme kuvveti
P_s	Kesme gücü
G	Ağırlık
V	Boşta hareket hızı
F_e	Ortalama yük
C_a	Statik yük kapasitesi
C_{oa}	Minimum dinamik yük kapasitesi
F_H	Mil üzerine gelen kuvvet
$\alpha_{(i)}$	i . eksenin ivmesi
P	Eksen motor gücü
e_i	i . eksenin izleme hatası
ε	Kontur (contour) hatası
δ	İki darbe arasında geçen süre
f_t	Zamanlayıcı çalışma frekansı
c	Zamanlayıcı yenileme katsayısı
ω'	Açısal ivme
ω	Açısal hız

Kısaltmalar

APT	Otomatik Programlama Aracı (Automated Programmed Tool)
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Denetim (Computer Numerical Control)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
FCTC	İleri Beslemeli Hesaplamalı Tork Kontrol (Feedforward Computed Torque Control)
FMC	Esnek Üretim Hücresi (Flexible Manufacturing Cell)
FMS	Esnek Üretim Sistemi (Flexible Manufacturing System)
HM	Hibrid Motor (Hybrid Motor)
MCU	Mikro Denetleyici Birimi (Micro Controller Unit)
PID	Oransal İntegral Türevsel Kontrol (Proportional Integral Derivative Control)
PPP	Prizmatik-Prizmatik-Prizmatik (Prismatic-Prismatic-Prismatic)
RIA	Amerika Robotik Enstitüsü (Robotic Institute of America)
SI/SO	Tek-Girişli Tek-Çıkışlı (Single-Input Single Output)
ZPETC	Sıfır Faiz Hata İzleme Kontrol (Zero Phase Error Tracking Control)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. MIT servomekanizma laboratuvarında gerçekleştirilen ilk bilgisayar denetimli kartezyen robot.....	4
Şekil 1.2. Delikli şerit ve makinası	4
Şekil 1.3. ABD hava kuvvetleri için üretilen uçak motoru piston kolları.....	5
Şekil 1.4. Değişik tiplerde farklı amaçlar için kullanılan kartezyen robotlar	6
Şekil 1.5. Fırlatılan nesnenin görüntüsünü yakalayabilmek için kullanılan kartezyen robotun katı modeli	8
Şekil 1.6. Çift eksenli doğrusal motorlu anorad tipi kartezyen robot	8
Şekil 1.7. Manyetik doğrusal konum sezicili üç eksenli CNC	12
Şekil 2.1. Üç serbestlik dereceli portal tip kartezyen robotun Solid Works programında çizilmiş katı modeli	16
Şekil 2.2. Üç serbestlik dereceli kartezyen robotun şematik gösterimi	17
Şekil 2.3. Adım motorunun manyetik geçirgenliğe sahip malzemeden yapılmış iki çıkıntısı	23
Şekil 2.4. Hibrid adım motorunun genel yapısı (Acarnley 2007).....	25
Şekil 2.5. Hibrid adım motorunun fazlarının uyartımı (Gimbleby 2008).....	26
Şekil 2.6. 50 dişli rotora sahip hibrit adım motorunun iç yapısı (Gimbleby 2008)	27
Şekil 2.7. Hibrit adım motorunun yaklaşık eşdeğer devresi	28
Şekil 2.9. Adım motorunun tam adım ve yarım adım sürülmesi.....	31
Şekil 2.10. Hibrit adım motorunun 1/4 adım ve 1/8 adım oranlarında sürülmesi (Emerald and Kadrmas 1999)	32
Şekil 2.11. Mikroadım ve tam adım sürme durumunda rotor konumunun değişimi	32
Şekil 2.12. Sabit açısal hız için gerekli darbe dizisi	33
Şekil 2.13. Sabit ivmeli hareket için gerekli olan darbe dizisi.....	34
Şekil 3.1. ST-37 saclardan yapılmış ana gövde ve yan kolonlar	38
Şekil 3.2. Alt tablada ve X, Y ve Z eksenlerinde kullanılan Alüminyum profiller	39
Şekil 3.3. Alüminyum lamalar ve çelik miller üzerine bindirilmiş makaralar.....	40
Şekil 3.4. Değişik çap ve ebatlarda bilyeli vidalı miller	41
Şekil 3.5. Y ve Z eksenlerinde kullanılan bilyeli vidalı miller ve mil sonu destekleri...	41

Şekil 3.6. Adım motorlar için özel olarak üretilmiş kaplin.....	42
Şekil 3.7. Tasarlanan kartezyen robotta kesme işlemi için kullanılan uç işlevci.....	43
Şekil 3.8. Kartezyen robotta kullanılan doğrusal konum sezici yapısı	43
Şekil 3.9. Leadshine M880A mikro adım sürücüsü.....	84
Şekil 3.10. Kartezyen robot için hazırlanan kullanıcı arayüzü	85
Şekil 3.11. Tasarımı gerçekleştirilen üç serbestlik dereceli kartezyen robot.....	88
Şekil 3.12. Eksen motor sürücüler ve iş mili motor sürücüsü	88
Şekil 4.1. Doğrusal kontur (contour) hatası (Wang <i>et al.</i> 2009).....	89
Şekil 4.2. Dairesel kontur (contour) hatası (Wang <i>et al.</i> 2009)	90
Şekil 4.3. DC motor kullanılan bir elektromekanik sistemin genel yapısı	91
Şekil 4.4. Modellenen doğru akım motoruna ait blok diyagram	94
Şekil 4.5. Sistemin PID kontrol blok diyagramı	95
Şekil 4.6. Kartezyen robotun X ve Y eksenlerinin izlemesi gereken yörüngeler	96
Şekil 4.7. Arzu edilen yörünge ve uç işlevcinin izlediği yörünge	96
Şekil 4.8. X ve Y eksenlerindeki yörünge izleme hataları.....	97
Şekil 4.9. Kontur (Contour) Hatası	97
Şekil 4.10. Gözleyici tabanlı PID kontrol blok diyagramı	98
Şekil 4.11. X ve Y eksenlerindeki yörünge izleme hataları.....	101
Şekil 4.12. Kontur (contour) hatası.....	102
Şekil 4.13. İleri beslemeli kontrol yapısına ait blok diyagram (Spong <i>et al</i> 2006)	103
Şekil 4.14. İleri beslemeli hesaplanan tork kontrol yapısına ait blok diyagram	104
Şekil 4.15. X ve Y eksenlerindeki yörünge izleme hataları.....	105
Şekil 4.16. Kontur (Contour) hatası	105
Şekil 4.17. Arzu edilen yörünge için açık ve kapalı çevrim denetim takibi	109
Şekil 4.18. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	109
Şekil 4.19. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	110
Şekil 4.20. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları	111
Şekil 4.21. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası.....	111
Şekil 4.22. Arzu edilen yörünge için açık ve kapalı çevrim denetim takibi	112
Şekil 4.23. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	113
Şekil 4.24. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	114
Şekil 4.25. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları	114

Şekil 4.26. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası.....	115
Şekil 4.27. Arzu edilen yörüngenin açık ve kapalı çevrim denetim takibi	116
Şekil 4.28. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	117
Şekil 4.29. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	117
Şekil 4.30. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları	118
Şekil 4.31. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası.....	119
Şekil 4.32. Arzu edilen yörüngenin açık ve kapalı çevrim denetim takibi	120
Şekil 4.33. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	120
Şekil 4.34. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	121
Şekil 4.35. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları	122
Şekil 4.36. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası.....	122
Şekil 4.37. Arzu edilen yörüngenin açık ve kapalı çevrim denetim takibi	123
Şekil 4.38. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	124
Şekil 4.39. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	125
Şekil 4.40. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları	125
Şekil 4.41. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası.....	126
Şekil 4.42. Arzu edilen yörüngenin açık ve kapalı çevrim denetim takibi	127
Şekil 4.43. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	127
Şekil 4.44. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	128
Şekil 4.45. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları	129
Şekil 4.46. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası.....	129
Şekil 4.47. Arzu edilen yörüngenin açık ve kapalı çevrim denetim takibi	130
Şekil 4.48. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	131
Şekil 4.49. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları.....	132
Şekil 4.50. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim izleme hataları	132
Şekil 4.51. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası.....	133
Şekil 4.52. Bilgisayar benzetimi ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	134
Şekil 4.53. Farklı denetleyicilerin tanımlanan örnek yörüngeyi takip başarımı	134
Şekil 4.54. Tanımlanan dairesel yörüngenin takibinde izleme hatalarının değişimi	135
Şekil 4.55. Tanımlanan yörünge için eksenlerin izlemesi gereken referans yörüngeler ve bu yörüngelerin takibinde oluşan izleme hatalarının değişimi.....	135

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Tasarlanan kartezyen robotun çalışma uzayı, tabla boyutları ve eksenlerde hareket eden uzuvların kütle değerleri.....	44
Çizelge 3.2. Freze başlıkları için kesme hızı ve ilerleme değerleri (Akkurt 2010)	45
Çizelge 3.3. Özgül kesme kuvvetinin yaklaşık değerleri (Akkurt 2010).....	48
Çizelge 3.4. Tasarlanan kartezyen robotun tahmini çalışma değerleri	58
Çizelge 3.6. Tasarlanan kartezyen robotun tahmini çalışma değerleri	67
Çizelge 3.7. Tasarlanan kartezyen robotun tahmini çalışma değerleri	75
Çizelge 3.8. Eksenler için kullanılan adım motorlarının özellikleri	83
Çizelge 3.9. Kullanılan mikro denetleyici yapısının genel özellikleri.....	86
Çizelge 4.1. Doğru akım motoru parametreleri	94

1. GİRİŞ

Endüstrilerin gelişmesine ve üretim hacminin artmasına olanak sağlayan esnek üretim sistemlerine her alanda ihtiyaç vardır. Otomasyon denilince hiç şüphesiz akla robotik sistemler gelmektedir. Bu sistemler üretim hacmini artırırken aynı zamanda ürün kalitesini de artırmaktadır. Ayrıca bu sistemler üretim maliyetini azaltmakta ve çalışma şartlarını geliştirmekte, enerji, zaman ve insan gücünden tasarruf sağlamaktadır.

Bu amaçla ilk kez 1946 yılında Parsons Şirketi tarafından helikopterlerin bazı parçalarını üretmek amacı ile bilgisayar denetimli bir mekanizma geliştirilmiştir (Oral 2012). 1952 yılında MIT üniversitesinde geliştirilen bir robot ile savunma endüstrisinde kullanılacak bazı parçaların otomatik olarak üretilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen bu projede robotun hareket edeceği konumlar hesaplanarak delikli kâğıt şerit üzerine geçirilmiştir. Bu delikli kâğıt şerit robot üzerine yerleştirilmiş okuyucu aracılığı ile alınan koordinat bilgilerine göre robotun istenen konumlara hareket ettirilmesine olanak sağlamıştır. Geliştirilen bu mekanizma ile ilk olarak ABD Hava Kuvvetlerinin kullandığı uçakların motor piston kolları üretilmiştir. Ancak bu sistemlerde kullanılan vakumlu tüp, röle vb. elemanların sık sık tamir edilmesi hatta değiştirilmesi gereksinimi bakım-onarım problemini de beraberinde getirmiştir. 1960'lı yıllar ve sonrasında bu sistemlerin bilgisayarlar ile bütünleştirilmesiyle üretim alanında bir devrim yapılmıştır. Bilgisayar destekli olarak tasarlanan bu robot mekanizmalarının ana amacı, ürün kalitesini artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmektir.

Diğer tüm insani faaliyetlere göre somut olarak toplumu zenginleştiren tek faaliyetin üretim olduğu söylenebilir. Tasarlanan ürünler geçmişte sanatkârlar tarafından üretilmiş ve bu nedenle ürünün kalitesi tamamen sanatkârların el becerisine bağlı kalmıştır. Günümüzde teknolojinin gelişmesine paralel olarak tasarlanan robotik sistemler sayesinde istenen ürün daha kısa sürede ve çok daha düşük maliyetlerle ortaya konulabilmektedir (Akkurt 2010).

Bir ürünün taşınması, ürünün belirli bir noktasına kaynak veya boya yapılması ve birden fazla ürünün birleştirilmesi gibi önceden belirlenmiş görevleri yerine getirmek için günümüz endüstrisinde robot manipülatörler kullanılmaktadır. Bilgisayarlar veya mikro işlemci/denetleyicilerle kontrol edilen robot manipülatörler, çok ve farklı görevleri aynı anda yerine getirebilmeleri için kolayca yeniden programlanabilmektedirler. Endüstride esnek üretim hücreleri (FMC- Flexible Manufacturing Cell) ile bu hücrelerin birleşiminden oluşan esnek üretim sistemleri (FMS- Flexible Manufacturing Systems) sayesinde üretim zamanında ve maliyetinde ciddi bir düşüş yaşanmaya başlanmıştır (Akkurt 2010).

Robotun en genel ve kabul edilen tanımlaması Robotic Institute of America (RIA) tarafından yapılmıştır. RIA'ya göre robot, çeşitli görevleri yerine getirmeleri için yeniden programlanabilen, materyalleri taşıyabilen, birleştirebilen veya belirli bir amaç için geliştirilmiş çok fonksiyonlu manipülatörlerdir. Robotlar geometrik ve kinematik yapıları, uygulama alanları ve eklemlere hareket sağlayan eyleyici türleri gibi birçok kritere göre sınıflandırılmaktadır (Spong *et al.* 2006).

Eklem hareketini sağlayan eyleyicilerin güç kaynaklarına göre manipülatörler, elektriksel, hidrolik ve pnömatik olarak tahrik edilen manipülatörler olmak üzere üç ana sınıfta sınıflandırılmaktadır. Endüstriyel manipülatörlerin çoğunluğunda kontrol yöntemlerinin kolay olması ve diğer tip manipülatörlere göre daha sessiz çalışması nedeniyle DC servo motorlar veya adım motorları kullanılmaktadır. Yüksek hız ve/veya yüksek tork değerlerine ihtiyaç duyulan bazı uygulamalarda ise hidrolik tahrikli manipülatörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Hidrolik tahrikli manipülatörlerin gürültülü çalışması, hidrolik sıvısının sızıntı riski ve çevresel donanımlara ihtiyaç duyması bilinen dezavantajlarındandır. Pnömatik tahrikli manipülatörler daha ucuz ve basit olmalarına rağmen hassas olarak kontrol edilebilmelerinin zor oluşu nedeniyle uygulama alanları sınırlıdır.

Robotlar geometrik yapılarına göre sınıflandırılırken ilk üç bağın eklem özellikleri dikkate alınmaktadır. Manipülatörlerin çoğu beş geometrik türden birinin içerisinde yer

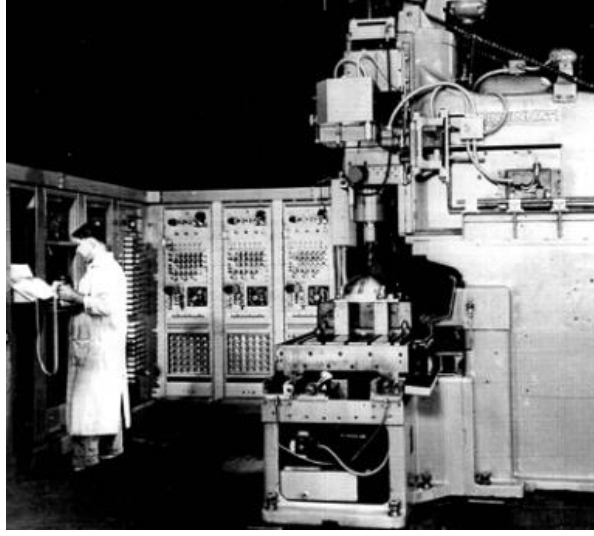
almaktadır. Bunlar kartezyen (PPP), silindirik (RPP), SCARA (RRP), küresel (RPP) ve dönel (RRR) manipülatörlerdir.

Uygulama alanlarına göre robotlar, montaj ve montaj dışı robotlar olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Montaj robotları küçük, elektriksel tahrikli, döner veya SCARA tasarımına sahip robotlardır. Montaj dışı uygulama alanına sahip robotlar ise, kaynak, spreyci boya, malzeme taşıma, yükleme, boşaltma gibi alanlarda kullanılan robotlardır (Spong *et al.* 2006).

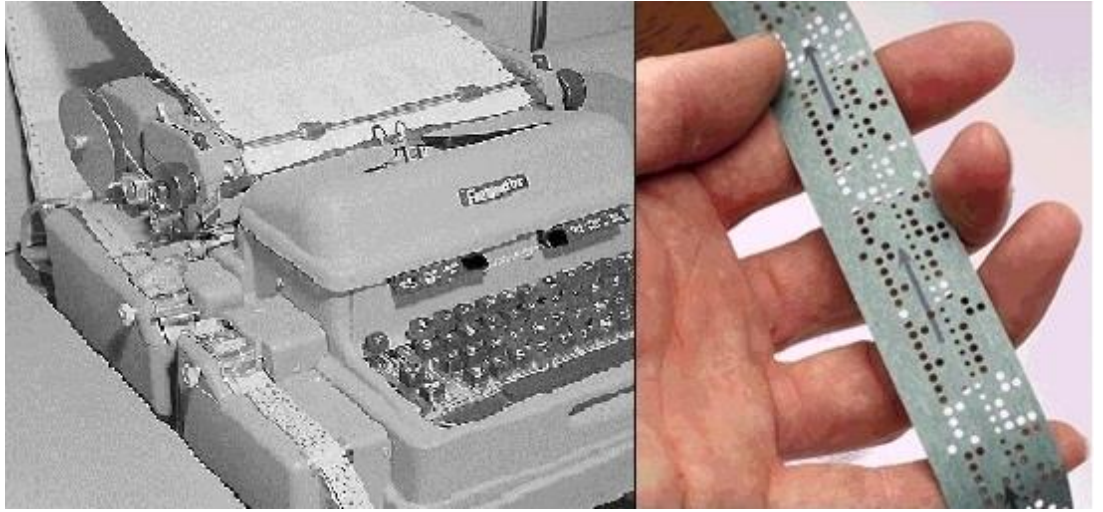
Bir manipülatörün çalışma uzayı manipülatörde asıl işi yapan manipülatör uç işlevcisinin ulaşabileceği uzayın büyüklüğü ile tanımlanmaktadır. Manipülatörlerin çalışma uzaylarının büyüklüğü manipülatörlerin geometrik yapısı ile ilgilidir. Çalışma uzayında kısıtlamalar dikkate alınarak manipülatör uç işlevcisi arzu edilen bir noktaya ulaştırılır.

Bu tez çalışmasının konusu olan kartezyen robotlar birbirine dik üç eksenle hareket edebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle hareketli kısımlar X, Y ve Z koordinat sistemi eksenlerine paralel olacak şekilde yapılandırılmaktadır. Bu tip robotların uç işlevcileri dikdörtgen prizması hacmi içerisindeki tüm noktalara rahatlıkla hareket edebilmektedirler (Koivo 1989). Yük kaldırma ve taşıma bakımından diğer robot türlerine nazaran bu tip manipülatörlerin mukavemetleri çok daha yüksektirler. Çalışma alanlarının robot boyutundan küçük olması, eğilme ve bükülme gibi işlemleri gerçekleştirememesi bu tip robotların dezavantajlarından. Bu tür robotlarda; pozisyon hesaplamaları, mafsalların o anda bulunduğu yerdeki konumuna göre belirlendiğinden çok kolaydır (Sciavicco and Siciliano 1996).

Kartezyen robotların ilk tasarımı 1952 yılında MIT üniversitesi servomekanizma laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş olup Şekil 1.1’de gösterilmiştir. “Cincinnati hydro-tel” adı verilen bu mekanizma “Automated Programmed Tool (APT)” adlı bir yazılımla desteklenmiştir. Bu yazılımla uç işlevcinin ulaşması gereken konum bilgileri bilgisayarda hesaplanarak Şekil 1.2’de gösterildiği gibi delikli kağıt şeritlere işlenmiştir. Sistemin denetimi için yaklaşık 270 vakum tüpü, 170 röle ve 300 diyot kullanılmıştır.

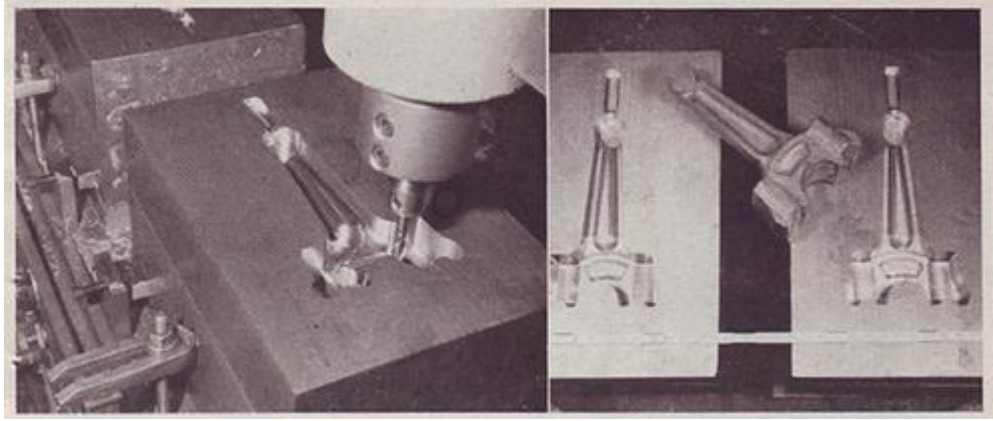


Şekil 1.1. MIT servomekanizma laboratuvarında gerçekleştirilen ilk bilgisayar denetimli kartezyen robot (Douglas 1958)



Şekil 1.2. Delikli şerit ve makinası

ABD hava kuvvetlerinin ihtiyacı olan bazı parçaları üretmek amacıyla geliştirilen bu kartezyen robot ile uçak motorlarının piston kolları üretilmiş olup üretilen parçalar Şekil 1.3'te gösterilmiştir (Douglas 1958; McDonough and Susskin 1969).



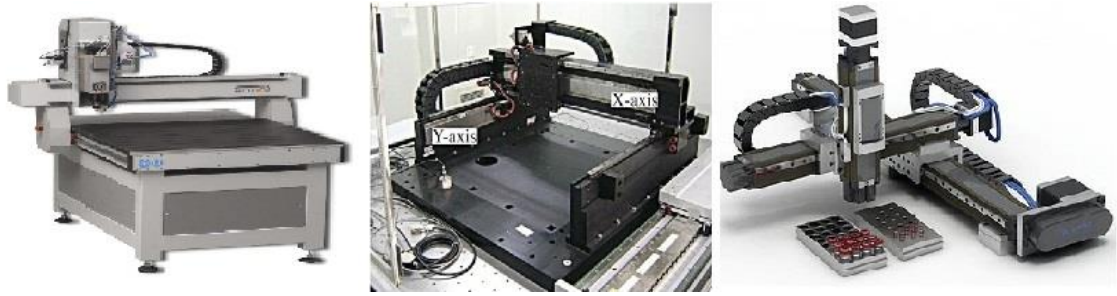
Şekil 1.3. ABD hava kuvvetleri için üretilen uçak motoru piston kolları

1.1. Kartezyen Robotların Uygulama Alanları ve Yapılan Çalışmalar

İnsanlık, tarih boyunca gücünün yetmediği veya yapmakta zorlandığı işleri otomatik olarak gerçekleştirebilecek mekanizmalar yapmaya çalışmıştır. Bu amaçla geçmişte insan desteği ile çalışan ve fonksiyonel olmayan mekanizmalar tasarlanmıştır. Örneğin Orta Çağ'da insanlar gemi yapımında, yükleme-boşaltma gibi işlemlerde vinç, kaldıraç gibi değişik mekanizmalar kullanmışlardır. Günümüz endüstrisinde de insan gücünün ve el becerisinin yetersiz kaldığı durumlar ile karşılaşmakta, bu işlemleri gerçekleştirebilmek için uygun araçların tasarlanması zorunlu bir ihtiyaç haline gelmektedir. Buradan hareketle bu araçlardan zaman ve enerji kaybını en aza indirgeyerek, verilen komutlar doğrultusunda yapılması gereken işlemleri otomatik olarak gerçekleştirmesi beklenmektedir. Artan bu talebe bağlı olarak günümüzde oldukça yüksek teknolojiye ve çeşitliliğe sahip robotik sistemler ve ekipmanları geliştirilmiştir.

Tasarlanan bu tip robotlardan biri de kartezyen robotlardır. Gövde yapılarının sağlam ve çalışma uzayının her noktasına hareket kabiliyetine sahip olmaları gibi üstünlükleri ile üretim tesislerinde, taşıma-yükleme-boşaltma işlemlerinde, otomotiv endüstrisinde, nükleer enerji tesislerinde ve baskı devre yapımında geniş bir uygulama alanı bulmuşlardır. Ayrıca mobil robotların ihtiyaçları karşılayamadığı hassas konumlandırma gerektiren uygulamalarda da kartezyen robotlar rahatlıkla kullanılabilirler.

Kartezyen robotların eksen hareketleri birbirine dik olacak şekilde tasarlanmaktadır. Eksenler arasındaki bu açı değeri değiştirilmeden eksen bağlantı noktalarının değiştirilmesi ile günümüzde çok farklı tiplerde, değişik alan ve amaçlar için kullanılabilecek kartezyen robotlar imal edilmiştir. Şekil 1.4'te değişik tiplerde imal edilen kartezyen robotlar gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Değişik tiplerde farklı amaçlar için kullanılan kartezyen robotlar

Kartezyen robotlar hassas konumlandırılabilme ve hızlı hareket edebilme kabiliyetlerinden dolayı bilimsel anlamda çalışmaların üzerinde yoğunlaştığı robotik uygulamalardan biri olmuştur.

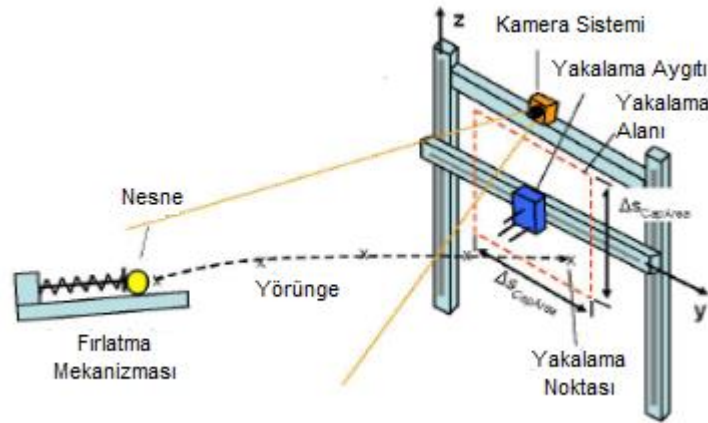
Teo *et al.* (2007) bir kartezyen robotun dinamik modellemesini ve adaptif kontrolünü gerçekleştiren bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada kullandıkları robot yapısı modellenirken Lagrange denkleminden faydalanılmıştır. Robotun konumu, geliştirilen adaptif kontrol yöntemi ile denetlenmiştir. Simulasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar, çeşitli deneyler yapılarak gerçek zamanlı uygulamalarla da desteklenmiştir. Garciaherreros *et al.* (2010) çift sürücülü bir kartezyen robot yapısındaki mekanik bağlardan kaynaklanan konumlandırma ve izleme hatalarının takip edilmesi ve giderilmesi amacıyla model tabanlı bir kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu kontrol yapısı ile izleme ve senkronizasyon hatalarını azalttıkları gözlemlenmiştir.

Kartezyen robotların baskı devre yapımı gibi yüksek konumlama hassasiyeti gerektiren uygulamalarda kullanılabilmesi için konumunun tam olarak kestirilebilmesi gerekmektedir. Kartezyen robotların kontrolü ve gözlemlenmesine örnek bir deneysel

Çalışma Tan *et al.* (2004) tarafından yapılmıştır. Bu deneysel çalışmada kartezyen robot sisteminin hareket kontrolünü tasarladıkları PID geri beslemeli kontrolcünün ve ileri beslemeli denetleyicinin koordinasyonu ile gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, öncelikle geleneksel kontrol yaklaşımları incelenmiş ve çalışmada tasarlanan tam koordine edilmiş denetleyiciyle deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, hareketi sağlamak için servo motorlar kullanılmış olup bu motorlar iki farklı tipte kartezyen robota monte edilmiş ve robotlar üzerindeki konumlandırma hataları karşılaştırılmıştır. Ayrıca sistemde parametre değışimleri ve bozucu etkilerin neden olacağı konumlama hatalarını önlemek için bir gözleyici tasarlamışlardır.

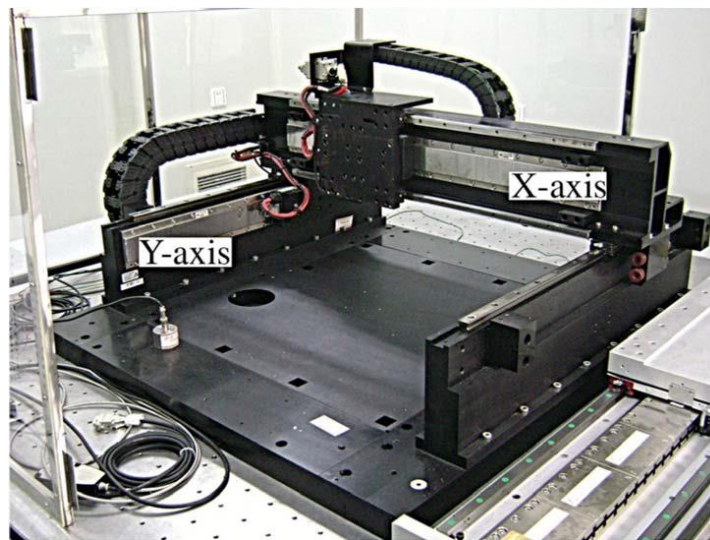
Mikroelektronik üretimi, uzay, bio ilaç ve depolama ortamı gibi birçok alanda kullanılan kartezyen robotlar üzerine yapılan bir diğer çalışmada Teo *et al.* (2008) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada dinamik geometrik hataların düzeltilmesi için iteratif öğrenen kontrol yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yaklaşım ile verilen herhangi bir yörünge için izleme hatalarının azaltıldığı gözlemlenmiştir. Tasarlanan metodun önce bilgisayar ortamında benzetimi yapılmış ve daha sonra gerçek zamanlı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları, gerçek zamanlı uygulama sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların örtüştüğü gözlemlenmiştir.

Üretim sistemlerindeki hareketli cisimlerin görüntülerinin yakalanması için yeni bir yaklaşım getiren Frank *et al.* (2008), hareket halindeki nesnelerin görüntüsünü yakalamak için kartezyen robot mekanizması kullanmışlardır. Bu sisteme yerleştirilen bir kamera yardımıyla ardışık zaman periyotları içerisinde havadaki nesnelerin konumu ölçülebilmektedir. Bu ölçümlere bağlı olarak yakalama noktası hassas olarak belirlenmiş ve robot bu noktaya hareket ettirilmiştir. Son noktayı yakalamak için tasarlanan bu robotların, hareketlerinin hızlı ve düzgün bir şekilde olması gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada optimize edilmiş kontrol yöntemleri kullanılmış olup tasarlanan sistemin katı modeli Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Fırlatılan nesnenin görüntüsünü yakalayabilmek için kullanılan kartezyen robotun katı modeli (Frank *et al.* 2008)

Çift eksenli doğrusal motorlu kartezyen robotun hareket kontrolü üzerine yapılan bir çalışmada, doğrusal olmayan vuruntu kuvvetlerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan anorad tipi kartezyen robot Şekil 1.6’da gösterilmiştir. Bu yapının denetimi için adaptif gürbüz denetleyici yapısı kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolcü ile atalet yükü, sürtünme kuvveti, vuruntu kuvveti ve harici bozulmalar gibi belirsiz dış etkenlerin sisteme olan etkileri de göz önüne alınmıştır (Hu *et al.* 2010).



Şekil 1.6. Çift eksenli doğrusal motorlu anorad tipi kartezyen robot (Hu *et al.* 2010)

Kartezyen robotların bir diğer uygulama alanı ise CNC (Computer Numerically Control – Bilgisayarlı Sayısal Denetim) robotlardır. Bu tip robotlar genellikle malzemeyi istenen boyut ve şekle getirme, kaynak uygulamaları, baskı devre yapımı ve entegre montajı gibi hassas konumlandırma istenen yerlerde kullanılmaktadır. Uç işlevci olarak lazer, su jeti, kaynak torcu ve fener mili (spindle) motoru gibi imalat endüstrisinde sıkça karşılaşılan ekipmanlar kullanılmaktadır (Suh *et al.* 2008). İmalat endüstrisindeki hassas konumlandırmaya olan ihtiyaç, bu tip robotlar üzerine yapılan çalışmaların bu alanda yoğunlaşmasına neden olmuştur (Ouyang *et al.* 2012).

Kartezyen robotların bir türü olan CNC robotların imalat işlemlerinde kullanılması, literatürde bu alanda yapılan çoğu bilimsel çalışmanın, yörünge izleme (trajectory tracking) ve kontur (contour) hatalarını en aza indirgeyebilmek amacıyla yapılmasına neden olmuştur. Bu tip robot manipülatörler için izleme hatası (tracking error) arzu edilen konum ile gerçek konum arasındaki fark olarak tanımlanırken, kontur hatası (contour error) arzu edilen konum ile gerçek konum arasındaki en kısa mesafe olarak tanımlanmaktadır (Xu 2006).

CNC sistemlerde izleme hatalarını azaltabilmek için her eksen ayrı bir kapalı çevrim kontrolcü tarafından kontrol edilmektedir. Kullanılan kontrolcünün performansına bağlı olarak sistemde izleme hataları ortaya çıkmaktadır. Verilen herhangi bir yörünge için her eksenin konum, hız vb. gibi parametreleri farklı olacağından sistemde kontur hatası oluşmaktadır. Kontrol yapısına ileri beslemeli bir hız kontrolcüsü ilave edilerek izleme hataları ve dolayısıyla kontur hataları azaltılabilmektedir (Masory 1986).

Bu hataların azaltılması amacıyla Erkorkmaz and Altintas tarafından yapılan diğer bir çalışmada durum geri beslemeli kontrolcü tasarlanmıştır. Denetleyici tasarımında kutup yerleştirme yöntemi kullanılmıştır. Konum, hız ve bozucu etkileri kestirebilmek için ise Kalman filtre kullanılmıştır. Tasarlanan bu yapı ile yüksek hızda işleme deneyleri yapılmış ve bu deneylerde izleme ve kontur hatalarının azaltıldığı gözlemlenmiştir (Erkorkmaz and Altintas 2001).

Bu alanda yapılan diğ er bir çalışmada sıfır faz hata izleme denetleyicisi (ZPETC- Zero Phase Error Tracking Control) tasarlanmıştır. Tasarlanan bu ileri beslemeli kontrolc u sistemin kutuplarını ve sıfırlarını yok etmeyi amaçlayan bir yapıya sahiptir. Geliştirilen bu kontrolc u bir robot kolun denetiminde kullanılmış olup, izleme hatası ve hızda istenmeyen değişimlerin azaltıldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu denetleyici yapısı sistemin kutuplarının/sıfırlarının yok edilmesine bağlı olduğundan izleme performansı modelleme hataları ve sistem parametre değişimlerine karşı duyarlıdır (Tomizuka 1987).

Kontur ve izleme hatalarını azaltmak için geliştirilen diğ er bir yöntem ise çapraz bağlaşımlı (cross-coupling) kontrol yöntemidir. Bu yöntemde eksenler bağımsız çevrimler halinde değil sistemin tamamı bir bütün olarak kontrol edilmektedir. Çift eksenli bir sistemin bilgisayarlı denetimi için simetrik çapraz bağlaşımlı (cross-coupling) kontrol yapısı Koren (1980) tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemin en önemli iki dezavantajı doğrusal yörüngelerde izleme hatası sıfır olduğunda kontur hatasında büyük salınımların meydana gelmesi ve doğrusal olmayan ( ember ve parabol gibi) yörüngeler için etkinliğinin düşük olmasıdır. Bu iki sakıncayı ortadan kaldıracılamak için değişken kazançlı çapraz bağlaşım kontrolcüsü (variable gain cross coupled controller) tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapı ile eksenlerden alınan izleme hatalarına bağlı olarak kontur hataları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuç bir PID kontrolcüden geçirilerek eksenlere ayrıştırılmıştır. Bu yapının en önemli avantajı kontrolcü kazançlarının her bir adımda bilgisayar üzerinde hesaplanarak gerçek zamanlı ayarlanabilmesidir (Koren and Lo 1991).

Çift eksenli hareket kontrol sistemlerinde kontur hassasiyetini (contouring accuracy) artırabilmek için pozisyon hata kompanzasyonu (position error compensation) yaklaşımı önerilmiştir. Kontrolcünün performansını artırmak için tasarlanan bu pozisyon hata kompanzatörü kontrol yapısına eklenerek farklı şekiller üzerinde gerçek zamanlı deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda izleme performansının arttığı ve kontur hatalarının azaltıldığı gözlemlenmiştir (Su and Cheng 2008).

Tang and Landers (2012) tarafından yapılan diğ er bir çalışmada kontur ve izleme hatalarını azaltmak için model   ng r l  kontrol (model predictive control) yöntemi uygulanmıştır. Tasarlanan denetleyicinin performansı elmas yörüngesi ve serbest geometriye sahip yörüngeler üzerinde deneysel olarak denenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda hem izleme hatalarının ve hem de kontur hatalarının azaltıldığı gözlemlenmiştir.

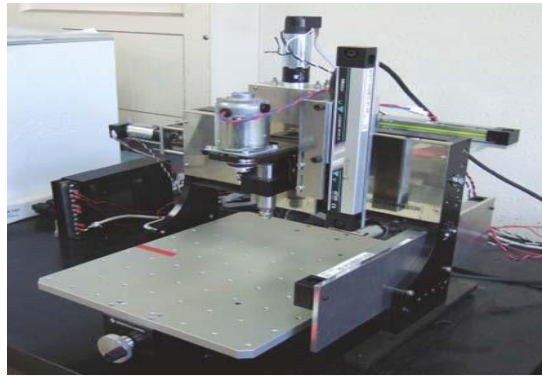
İzleme ve kontur hatalarını en aza indirgeyebilmek için sürtünme ve kesme kuvvetleri gibi bozucu etkilerin ortadan kaldırılması veya en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bu bozucu etkileri azaltmak amacıyla Jee and Koren (2004) tarafından adaptif bulanık mantık kontrol yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu kontrol yapısının önce bilgisayar ortamında benzetimi yapılmış daha sonra gerçek zamanlı deneylerle de desteklenmiştir. Tasarlanan bu yapı ile kontur ve izleme hataları azaltılmış ve elde edilen sonuçlar klasik bulanık mantık kontrolcülerle karşılaştırılmıştır.

Ouyang *et al.* (2012) kontur hatalarını azaltabilmek için pozisyon domeninde kontur izleme kontrolü adı verilen yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Sistemin zaman domeninde elde edilmiş dinamik denklemlerini, ikinci eksendeki hareketi ilk eksendeki hareketin bir fonksiyonu olacak şekilde pozisyon domenine dönüştürmüşlerdir. Hem pozisyon ve hem de zaman domeninde PD tip kontrol yapısını sisteme uygulamışlar ve elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır.

Sencer and Altintas (2009) beş eksenli bir CNC robotun kinematik ve dinamik analizini yapmışlardır. Y nelimlerden kaynaklanan kontur hatalarını azaltabilmek için MI/MO ( ok giriş/çok çıkışlı) kayan kipli denetim yöntemini kullanmışlardır. Kontur performansını test edebilmek amacıyla düşük ve yüksek hızlarda aynı şekiller üzerine denemeler yapmışlar ve elde edilen sonuçları geleneksel kayan kipli denetim yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Tasarlanan kontrolcü yapısıyla hatalar azaltılmış olmasına rağmen getirdiği hesaplama yükünden dolayı uygulanabilmesi için güçlü bir işlemciye ihtiyaç duyulması bu yöntemin dezavatajıdır.

Mannava *et al.* (2012) tarafından yapılan bir çalışmada bozucu etkilerin, model parametre değişimlerinin ve modellenemeyen dinamiklerin etkinliklerin tahmin edilebilmesi için yapay sinir ağı gözlemcisi geliştirilmiştir. Gözleyiciden elde edilen değerler ışığında kontrol sinyali çevrimiçi ayarlanarak kontrolcü performansı arttırılmaya çalışılmıştır. Tasarlanan bu yapı ile bozucu etkiler vb. nedenlerle ortaya çıkan kontur ve izleme hatalarının büyük oranda azaltıldığı gözlemlenmiştir.

Bu alanda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda tasarlanan kontrolcü yapıları geleneksel kontrolcülerle karşılaştırılmıştır. Tasarlanan denetleyicilerin performansı büyük ölçüde kontrolcü kazançlarına bağlıdır. Bu nedenle tasarlanan yörünge izleme kontrolcüsünün kazanç değerleri uygun değerlere ayarlanarak kontur kontrolcüsüne benzer performans elde edilebilmektedir. Şekil 1.7’de gösterilen üç eksenli CNC üzerinde yapılan bir çalışmada, denetleyici olarak izleme veya kontur kontrolcüsü kullanılması durumunda, kontrolcülerin tükettiği enerji miktarları, izleme ve kontur hatalarının değişimi incelenmiştir. Bu değişimi inceleyebilmek için sistemin bilgisayar ortamında benzetimi yapılmış ve daha sonra gerçek zamanlı deneylerle desteklenmiştir. Deney düzeneğinde eksenlerden konum bilgisini alabilmek için doğrusal konum seziciler kullanılmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda izleme kontrolcüsünün kazanç değerleri uygun değerlere ayarlanarak kontur denetleyicilerinin performansına yakın bir performans elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca her iki kontrolcünün enerji tüketim miktarları karşılaştırılmış olup, izleme kontrolcülerinin kontur kontrolcülerine göre çok daha az enerji tükettiği yapılan deneylerle gösterilmiştir (Uchiyama *et al.* 2009).



Şekil 1.7. Manyetik doğrusal konum sezicili üç eksenli CNC (Uchiyama *et al.* 2009)

Üretim sistemlerinde kullanılan bu tip robotlarda hem yörünge izleme ve hem de kontur kontrolünün yapılması üretilecek ürünlerin kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, bu tez çalışmasında elektriksel tahrikli üç eksenli bir CNC robotun tasarımı, uygulaması ve gerçek zamanlı yörünge izleme kontrolü yapılmıştır. Tasarlanan robotun ileri kinematik analizi yapıldıktan sonra eksen hızları ile eyleyici açısal hızları arasındaki ilişkiyi tanımlayan Jacobian matrisi elde edilmiştir. Tasarlanan robotun dinamik analizini yapabilmek için Lagrange denklemlerinden yararlanılmıştır. Eksenlerin ağırlıklarını elde edebilmek için Solidworks programında sistemin katı modeli oluşturulmuştur. Elde edilen ağırlık değerleri ve sistem dinamiği göz önünde bulundurularak hafif, orta ve ağır işletme şartlarında kesme kuvvetleri analizi yapılmıştır. Yapılan bu analiz sonuçlarına bağlı olarak eksenleri tahrik etmek için kullanılan eyleyicilerin ve fener mili motorunun seçimi yapılmıştır. Ayrıca bu kartezyen robotun her bir ekseninin tahrikinde kullanılan adım motorlarının dinamik analizleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Tasarlanan kartezyen robotun, tanımlanan yörünge ve konturları gerçek zamanlı olarak iyi bir performansta takip edebilmesi için eksenleri tahrik etmek amacıyla kullanılan adım motorlarının eş zamanlı olarak kontrolünün gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Kartezyen robotun yörünge izleme ve kontur performansını artırabilmek için bu tez çalışmasında farklı kontrol yöntemlerinden yararlanılmıştır. İlk olarak kartezyen robot manipülatörün yörünge izleme ve kontur kontrol benzetimi PID kontrolcü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ardından tasarlanan bu kontrolcünün performansını artırabilmek için Luenberger gözleyici tasarlanmış ve PID kontrolcü yapısına dahil edilerek yörünge izleme ve kontur denetimi yapılmıştır. Son olarak tüm sistemin dinamik modelinin göz önüne alındığı ileri beslemeli hesaplamalı tork kontrol (FCTC) yönteminden faydalanılmıştır. Tasarlanan üç eksenli kartezyen robotun gerçek zamanlı yörünge ve kontur kontrolü Labview programında hazırlanan bir arayüz üzerinden 32 bitlik bir mikro denetleyici kullanılarak yazılım tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Yörünge izleme kabiliyetini ve kontur performansını incelemek amacıyla dinamik modeli elde edilerek bilgisayar ortamında benzetimi yapılan üç eksenli kartezyen robot sistemine klasik PID kontrol, gözleyici tabanlı PID kontrol ve ileri beslemeli hesaplamalı tork

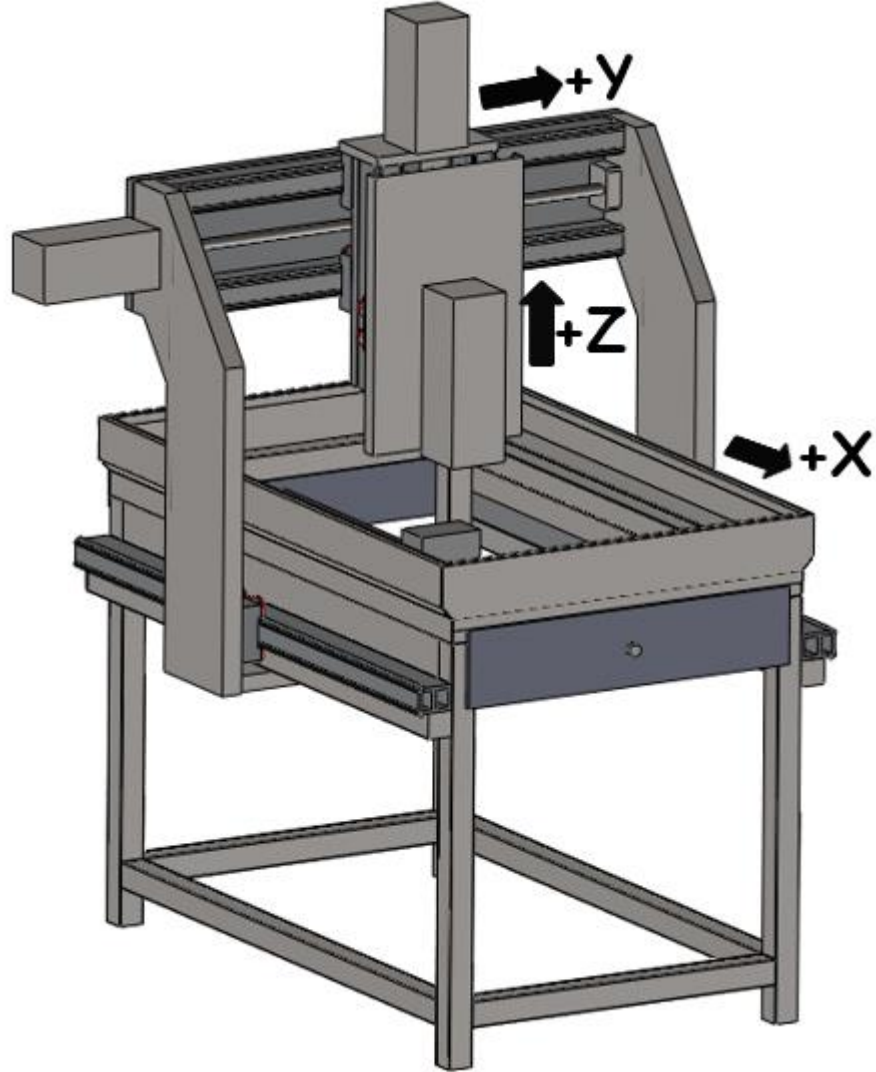
kontrol yöntemi olmak üzere üç farklı kontrol yöntemi uygulanmıştır. Yapılan benzetimler sonucunda ileri beslemeli hesaplamalı tork kontrol yönteminin gözleyici tabanlı PID kontrol yöntemine göre, gözleyici tabanlı PID kontrol yönteminin de klasik PID kontrol yöntemine göre çok daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Gerçek zamanlı olarak sistem açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol edilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen yörünge izleme hataları incelendiğinde, sistemin kapalı çevrim kontrol edilmesi durumunda açık çevrim kontrole göre X ekseninde %63 ile %93 aralığındaki oranlarda ve Y ekseninde %20 ile %92 aralığındaki oranlarda hataların azaltıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kontur hatalarında da %50 ile %88 aralığındaki oranlarda iyileşme sağlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Kartezyen robot manipölatörler için yapılan çalışmalar genellikle üç eksenli kinematik yapısı prizmatik-prizmatik-prizmatik (Prismatic-Prismatic-Prismatic, PPP) bağlara sahip olan sistemlerde yörünge izleme ve kontur kontrolü üzerine yapılmıştır. Kartezyen robot sistemlerinde etkin bir kontrolün gerçekleştirilebilmesi için robotun hareketini ifade eden matematiksel eşitliklerin elde edilip çözülmesi gerekmektedir (Paul 1981). Bu eşitlikler kartezyen robotun kinematik ve dinamik analizinin yapılması sonucu elde edilmektedir. Kartezyen robot kinematiği robot uç işlevcisinin konum, hız ve ivme analizini, robot dinamiği ise eklemlere eyleyiciler tarafından uygulanan kuvvet veya moment gibi büyüklükler ile robot uç işlevcisinin zamana göre konumu, hızı ve ivmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi olarak tanımlanmaktadır (Bingöl ve Küçük 2008, 2009).

Bu tez çalışmasında, konum (yörünge izleme ve kontur) kontrolünün gerçekleştirilmesi amacıyla üç serbestlik dereceli bir kartezyen (CNC) robot tasarlanmış olup bu robotun Solidworks programında çizilmiş katı modeli Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Kartezyen koordinatlı robotlar hem kalibrasyonu sarsıntılardan etkilenmeyecek şekilde olmalı ve hem de kolay sökülüp takılabilen bir yapıya sahip olmalıdır. Bu tip robot manipölatörlerin mekanik mukavemetlerinin yüksek olabilmesi için genellikle robot ana gövdesini oluşturan şase kısmı kutu profillerden, yan kolonlar ise kalın saçlardan imal edilmektedir (Akkurt 2010).

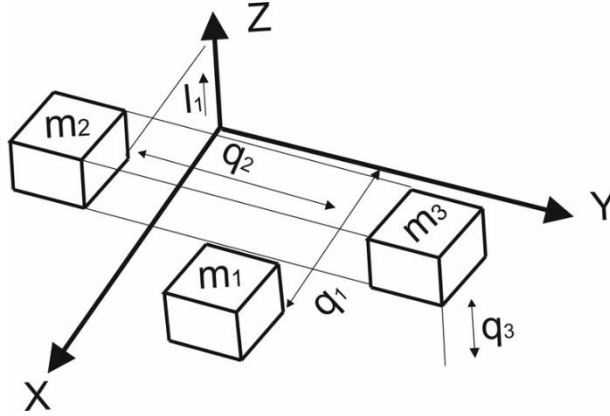
Eksen hareketlerini sağlamak için genellikle bilyeli vidalı miller kullanılmakta olup eyleyici hareketlerinin bu millere aktarılması için kaplin adı verilen bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Özellikle portal tip kartezyen manipölatörlerde eksenlerin yükünü taşıyan arabaların rahatlıkla hareket edebilmesi ve sürtünmenin en aza indirgenebilmesi için indüksiyonla sertleştirilmiş hassas çelik (CromSteel) miller kullanılmaktadır. Hareketli kısımların kasıntı ve zorlamalara maruz kalmaması için yataklama elemanı olarak doğrusal yataklar tercih edilmektedir. Ayrıca portal tip CNC robotlarda işlenecek malzemenin üzerine bağlanacağı sistem alt tablasının ağırlık bakımından hafif mukavemet bakımından yüksek tip malzemelerden seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.1. Üç serbestlik dereceli portal tip kartezyen robotun Solid Works programında çizilmiş katı modeli

2.1. Kartezyen Robotun İleri Kinematik Analizi ve Jakobien Matrisi

Robot kinematiği, bir robot manipülatörün konum, hız ve ivme analizinin incelendiği bir bilim dalıdır. İleri kinematik analiz ise her bir eklemler arasında bir koordinat eksenini yerleştirilip ardışık eklemler arasında dönüşümler yaparak ana gövde ile uç işlevci arasındaki ilişkinin belirlenmesidir. Üç serbestlik dereceli bir kartezyen robotun ileri kinematik analizinde kullanılmak üzere Şekil 2.2’de gösterilen şematik diyagram oluşturulmuştur.



Şekil 2.2. Üç serbestlik dereceli kartezyen robotun şematik gösterimi

Şekil 2.2’de X, Y ve Z eksenlerinde hareket eden uzuvların kütleleri sırasıyla m_1 , m_2 ve m_3 ile gösterilmiştir. Üç serbestlik derecesine sahip kartezyen robotun kinematik ve dinamik analizinin yapılabilmesi için X, Y ve Z eksenleri için sırasıyla q_1 , q_2 ve q_3 genelleştirilmiş koordinatlar seçilmiştir. Bu bilgiler kullanılarak sırasıyla m_1 , m_2 ve m_3 kütlelerinin konumları Denklem 2.1’deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ l_1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 + l_1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de tanımlanan konum ifadelerinin zamana göre birinci türevleri alınarak sırasıyla m_1 , m_2 ve m_3 kütlelerine ait hız ifadeleri Denklem 2.2’de gösterildiği gibi elde edilir.

$$v = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad v_1 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad v_2 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ l_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$v_3 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 + l_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Jakobien matrisi genel bir ifadeyle eklem hızları ile uç işlevci hızı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılmakta olup Denklem 2.3'teki gibi ifade edilmektedir.

$$\dot{x} = J(q) \dot{q} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'te $\dot{x}$ kartezyen hızı, $\dot{q}$ eklem hızını ve $J(q)$ sistemin Jakobien matrisini göstermektedir. Jakobien matrisi robotik sistemlerin dinamik eşitliklerinin elde edilmesinde, farklı robotik sistem yapılarının analizinde, yörünge planlanmasında ve eyleyicilerden uç işlevciye kadar aktarılan kuvvet ve torkların belirlenmesinde önemli roller üstlenmektedirler (Spong *et al* 2006; Sanchez and Cortes 2010). Verilen bir robot sistemi için Jakobien matrisi Denklem 2.4'te gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$J(q) = \frac{\partial f(q)}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(q)}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1(q)}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial f_1(q)}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_2(q)}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2(q)}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial f_2(q)}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m(q)}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m(q)}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial f_m(q)}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te $f(q)$ verilen bir sistem için ileri kinematik eşitliklerini, n sistemdeki eklem sayısını ve m konum değişkeni sayısını göstermektedir.

Üç serbestlik dereceli bir kartezyen robotun Jakobien matrisinin elde edilebilmesi için ileri kinematik ifadelerine ihtiyaç duyulmakta olup bu robotun X, Y ve Z eksenlerindeki konum ifadeleri Denklem 2.5'te gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Jakobien matrisini oluşturmak için x konum değişkeninin, q_1 , q_2 ve q_3 genelleştirilmiş koordinatlara göre kısmi türevleri;

$$\frac{\partial x}{\partial q_1} = \frac{\partial q_1}{\partial q_1} = 1 \quad , \quad \frac{\partial x}{\partial q_2} = \frac{\partial q_1}{\partial q_2} = 0 \quad , \quad \frac{\partial x}{\partial q_3} = \frac{\partial q_1}{\partial q_3} = 0 \quad (2.6)$$

y konum değişkeninin, q_1 , q_2 ve q_3 genelleştirilmiş koordinatlara göre kısmi türevleri;

$$\frac{\partial y}{\partial q_1} = \frac{\partial q_2}{\partial q_1} = 0 \quad , \quad \frac{\partial y}{\partial q_2} = \frac{\partial q_2}{\partial q_2} = 1 \quad , \quad \frac{\partial y}{\partial q_3} = \frac{\partial q_2}{\partial q_3} = 0 \quad (2.7)$$

z konum değişkeninin, q_1 , q_2 ve q_3 genelleştirilmiş koordinatlara göre kısmi türevleri;

$$\frac{\partial z}{\partial q_1} = \frac{\partial q_3}{\partial q_1} = 0 \quad , \quad \frac{\partial z}{\partial q_2} = \frac{\partial q_3}{\partial q_2} = 0 \quad , \quad \frac{\partial z}{\partial q_3} = \frac{\partial q_3}{\partial q_3} = 1 \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu ifadeler kullanılarak sistem $\dot{x} = J(q) \dot{q}$ ve Jakobien matrisi Denklem 2.9'da gösterildiği gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} & \frac{\partial x}{\partial q_3} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} & \frac{\partial y}{\partial q_3} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} & \frac{\partial z}{\partial q_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad , \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{J(q)} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2.2. Kartezyen Robotun Dinamik Analizi

Robot kinematiği kuvvet ve tork gibi hareketi oluşturan büyüklükler dikkate alınmadan robotun hareketini tanımlarken, robot dinamiği eklemlere tahrik elemanları tarafından uygulanan kuvvet veya moment ile hareket arasındaki matematiksel ilişkiyi tanımlar. Bir robotun dinamik analizi sonucunda elde edilen bu matematiksel ifadeler robotun tasarımı, robot hareketlerinin bilgisayar ortamında benzetiminin yapılması ve denetleyici tasarımı gibi aşamalarda çok önemli bir rol üstlenmektedir (Spong *et al.* 2006).

Karmaşık dinamik sistemler, kinetik ve potansiyel enerji farkından yararlanan Lagrange denklemleri kullanılarak basit bir şekilde modellenenabilir. En genel haliyle K ve P bir rijit cismin kinetik ve potansiyel enerjilerini temsil etmek üzere, bu rijit cismin kinetik ve potansiyel enerjileri arasındaki farkı temsil eden Lagrange fonksiyonu $L = K - P$ ifadesi kullanılarak Denklem 2.10'da gösterildiği gibi elde edilmektedir (Pasin 1994; Spong *et al.* 2006).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial(L+P)}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial(L+P)}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} = \tau_j \quad j = (1 \dots n) \quad (2.10)$$

Burada j genelleştirilmiş koordinat indisini, n genelleştirilmiş koordinatların sayısını, L Lagrange fonksiyonunu ($L = K - P$), K sistemin toplam kinetik enerjisini, P sistemin toplam potansiyel enerjisini ve τ_j ise j inci genelleştirilmiş kuvveti ifade etmektedir. Denklem 2.11'de kinetik enerjinin hesaplanmasında kullanılan matematiksel eşitlikler gösterilmiştir.

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.11)$$

Denklem 2.10'da verilen Lagrange fonksiyonu ve daha önce elde edilen ileri kinematik ifadeleri kullanılarak üç serbestlik dereceli bir kartezyen robotun hareket denklemleri elde edilebilmektedir. Lagrange fonksiyonunu (L) belirleyebilmek için en genel haliyle kinetik ve potansiyel enerjileri;

$$K_j = \frac{1}{2} m_j v_j^2 \quad , \quad P_j = m_j g h_j \quad j = (1 \dots n) \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 2.12'den de görülebileceği gibi sistemin kinetik enerjisi hesaplanırken ileri kinematik analizde elde edilen hız değerlerinin karelerinin Denklem 2.13'te gösterildiği gibi alınması gerekmektedir.

$$v_j^2 = v_j^T v_j \quad (2.13)$$

Denklem 2.13 kullanılarak üç serbestlik dereceli kartezyen robotun her bir eksenindeki hız değerlerinin kareleri,

$$v_1^2 = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{q}_1^2 \quad , \quad v_2^2 = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2$$

$$v_3^2 = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2 \quad (2.14)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Denklem 2.14'te hesaplanan hız ifadeleri Denklem 2.12'de yerine yazılarak önce her bir eksenin kinetik enerjisi ve elde edilen bu değerler toplanarak sistemin toplam kinetik enerjisi hesaplanabilir.

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 \dot{q}_1^2 \quad , \quad K_2 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2) \quad , \quad K_3 = \frac{1}{2} m_3 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) \quad (2.15)$$

$$K = \frac{1}{2} m_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} m_3 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) \quad (2.16)$$

Sistemin toplam potansiyel enerjisi Şekil 2.2'de verilen şematik diyagram ve Denklem 2.12 kullanılarak,

$$P = m_2 g l_1 + m_3 g (q_3 + l_1) \quad (2.17)$$

şeklinde elde edilir. Elde edilen bu ifadeler Lagrange fonksiyonunda yerine yazılarak üç serbestlik dereceli kartezyen robotun hareket denklemleri elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} = \tau_j \quad , \quad j = (1 \dots 3) \quad (2.18)$$

Elde edilen toplam kinetik ve potansiyel enerji ifadeleri Denklem 2.18'deki eşitlikte yerine yazılarak üç serbestlik dereceli kartezyen robotun hareket eşitlikleri matris formunda Denklem 2.19'daki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 \end{bmatrix} g \quad (2.19)$$

Lagrange fonksiyonu kullanılarak elde edilen bu eşitlikler ile Denklem 2.20'de verilen Newton-Euler yaklaşımının genel ifadesi karşılaştırıldığında Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerini ifade eden $C(q, \dot{q})$ matrisinin (3x3) sıfır matris olduğu görülmektedir. (Sanchez and Cortes 2010).

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) \quad (2.20)$$

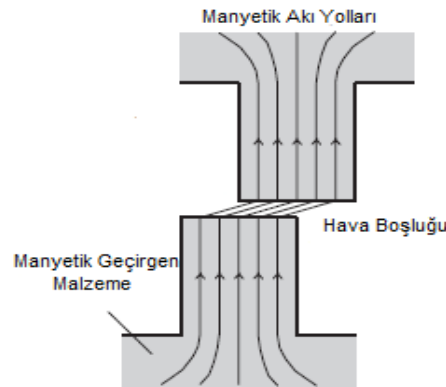
2.3. Kesme Kuvvetlerinin Hesaplanması

Uç işlevcisi kesme işlemleri yapan kartezyen tip robotlarda kesme kuvvetleri genellikle üç ayrı durum için incelenmektedir. Bunlar hafif, orta ve ağır kesme işlemlerinin yapıldığı durumlardır. Bu amaçla kartezyen robotun hafif, orta ve ağır kesme işlemlerinde ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. Buradan elde edilen sonuçlar ışığında en ağır kesme şartları göz önünde bulundurularak kullanılacak malzemeler için gerekli hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalara bağlı olarak kullanılacak malzemelerin her bir eksen için ayrı ayrı seçilmesi gerekmektedir (Büyüksahin 2005; Mendi 2006; Akkurt 2010). Üç serbestlik dereceli kartezyen robot tasarımında kullanılacak malzemeler için gerekli hesaplamalar ve malzemelerin belirlenmesi ile ilgili detaylı bilgi bu tez çalışmasının materyal ve metot bölümünde verilmiştir.

2.4. Adım Motorları

Adım motorları diğer elektrik motorlarından farklı olarak sürekli bir dönme hareketi yerine eşit büyüklükteki adım açıları ile hareket edebilen elektromekanik bir sistemdir. Eşit büyüklükteki adım açıları üretmesi nedeniyle hassas konumlandırma gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca motor hareketi için gerekli olan darbe dizilerinin frekansı değiştirilmedikçe sabit hızda çalışması ve rotoru dururken yüksek tutma torku üretmesi gibi özellikleri adım motorunu diğer motor tiplerine üstün kılmaktadır.

Adım motorları çıkık kutuplu motorlar sınıfına girmekte olup statoru ve rotoru manyetik geçirgenliği yüksek (magnetic permeable) dişlerle çevrilmiştir. Adım motorunun rotor milinde meydana getirilecek açısal konum değişimi için stator sargılarına anahtarlama bir gerilim uygulanması gerekir. Uygulanan bu gerilimin anahtarlama frekansına bağlı olarak rotor konumu anlık olarak belirlenebilmektedir. (Kenjo 1984; Bal 2006). Adım motorunun manyetik geçirgenliğe sahip malzemeden imal edilmiş iki çıkıntısına (diş) ait şematik Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Adım motorunun manyetik geçirgenliğe sahip malzemeden yapılmış iki çıkıntısı (Acarnley 2007)

Adım motorlarında daimi mıknatıslar, akım taşıyan sargılar veya bu ikisinin birleşmesinden elde edilen bir yapı kullanılarak manyetik akı üretilmektedir. Adım motorları manyetik akı kaynağına bağlı olarak daimi mıknatıslı, bir veya daha fazla

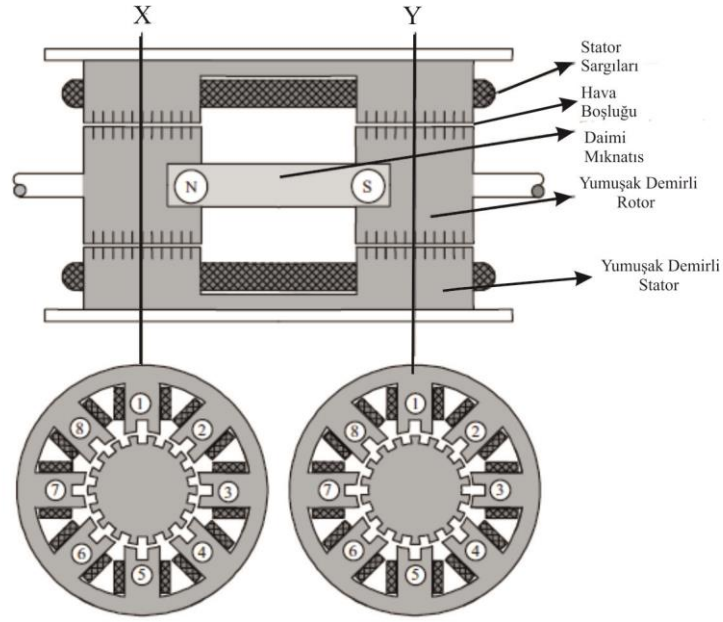
katmanlı değişken relüktanslı ve hibrit (melez-karmaşık) adım motorları olarak sınıflandırılmaktadırlar. Değişken relüktanslı tip adım motorlarında akı sargı akımları tarafından üretilirken, hibrit adım motorlarında sabit mıknatıs ile bir veya daha fazla sargı üzerinden akan akımlar tarafından üretilmektedir (Acarney 2007; Grimbleby 2008).

Tasarımı gerçekleştirilen kartezyen robot sisteminde X, Y ve Z eksenlerindeki hareketleri sağlamak amacıyla hibrit adım motorları kullanılmıştır. Bu nedenle bir sonraki bölümde, hibrit adım motorlarının yapısı detaylı olarak incelenmiş olup bu motorların dinamik modelinin ve mikro denetleyici tabanlı mikro adımlama yönteminin detaylı olarak analizi yapılmıştır.

2.4.1. Hibrit Adım Motoru

Çift çıkık kutuplu motorlar sınıfının bir üyesi olan hibrit adım motorlarında hareketin kaynağı olan manyetik akı, bir veya daha fazla sargı üzerinden geçen akımlar ve daimi mıknatıs tarafından üretilmektedir. Sargılar statorda bulunan kutupların üzerine ve daimi mıknatıs rotor üzerine yerleştirilmiştir. Hibrit adım motorunun genel yapısına ait kesit görüntüleri Şekil 2.4'te verilmiştir. Hibrit adım motorlarında manyetik akı yolu rotor üzerindeki daimi mıknatısın N kutbundan başlar yumuşak demir yapılı rotor uç parçasından geçerek, hava aralığı yolu ile Şekil 2.4'te *X* ile gösterilen kısımda bulunan ilk stator kutbuna ulaşır. Daha sonra stator yumuşak demiri üzerinden geçen manyetik akı Şekil 2.4'te *Y* ile gösterilen kısımda bulunan diğer stator kutbuna ulaşarak, hava aralığı yolu ile rotor yumuşak demirine ve daha sonra rotor yumuşak demiri üzerine yerleştirilen daimi mıknatısın S kutbuna ulaşır.

Genellikle hibrit adım motorlarının statorları sekiz kutuplu olarak üretilmekte olup her bir kutup üzerinde iki ile altı arasında değişen sayıda diş bulunmaktadır. Ayrıca rotorun arzu edilen konuma gelmesini sağlamak için mıknatıs akısının ilgili kutuplar üzerinden akışını engellemek veya desteklemek amacıyla stator kutuplarına sargılar ilave edilmiştir.



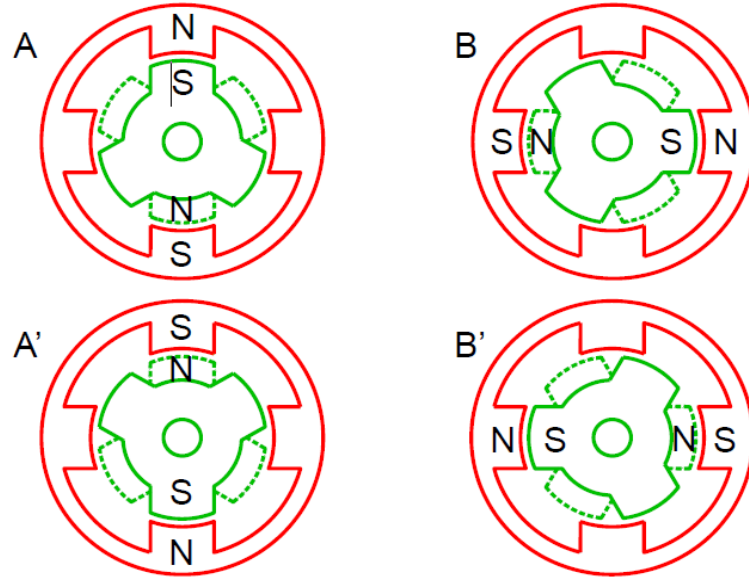
Şekil 2.4. Hibrit adım motorunun genel yapısı (Acarney 2007)

Hibrit adım motorlarında iki farklı sargı kullanılmakta olup her bir sargı sekiz stator kutbundan dördü dolaştırılarak sarılır. Kullanılan sargılardan A fazı olarak isimlendirilen sargı sekiz stator kutbunun 1, 3, 5, 7 ile gösterilen kutuplarına, B fazı olarak isimlendirilen sargı ise 2, 4, 6, 8 ile gösterilen kutuplarına yerleştirilmekte olup bu yapı Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Her faza ait yakın kutuplar birbirine zıt yönlü olarak sarılmıştır.

Hibrit adım motorlarında stator kutupları ve rotorun uç parçaları dişli yapıda imal edilmiştir. Şekil 2.4'te gösterilen adım motorunda sekiz adet kutbun her birinde iki adet diş bulunduğundan toplamda on altı adet stator dişi ve on sekiz adet rotor dişi bulunmaktadır. Şekil 2.4 incelendiğinde, X ve Y bölgesindeki stator dişlerinin her biri karşılıklı iken her iki bölgedeki rotor dişlerinin birbirlerine göre tamamen farklı eksenlerde olduğu görülmektedir.

Hibrit adım motorunun sürekli dönme hareketi yapabilmesi için faz sargılarının sırasıyla uyarılması gerekmektedir. Bu tip motorlarda tam bir uyarım çevrimi dört farklı durumdan oluşmakta olup, bu çevrim rotor hareketinin dört adımına (A, B, A', B') tekabül etmektedir. Hibrit adım motoru rotorunun sürekli olarak saat yönünde dönüş yapabilmesi

için uyartım sıralamasının $A, B, A', B', A, B, \dots$ şeklinde olması gerekmektedir. Rotorun saat dönüş yönünün tersi yönde dönmesi için ise faz uyartım sırasının $A, B', A', B, A, B', \dots$ şeklinde değiştirilmesi gerekmektedir (Acarney 2007; Gimbleby 2008). Fazların uyartım durumuna göre rotor pozisyonunun değişimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Hibrit adım motorunun fazlarının uyartımı (Gimbleby 2008)

Hibrit adım motorlarının rotoru adım genişliklerinin küçük olması hareket hassasiyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Denklem 2.21'de adım genişliğinin hesaplanmasına ilişkin matematiksel ifade sunulmuştur.

$$\text{adım genişliği} = \frac{360}{p} \times \frac{1}{4} = \left(\frac{90}{p}\right)^{\circ} \quad (2.21)$$

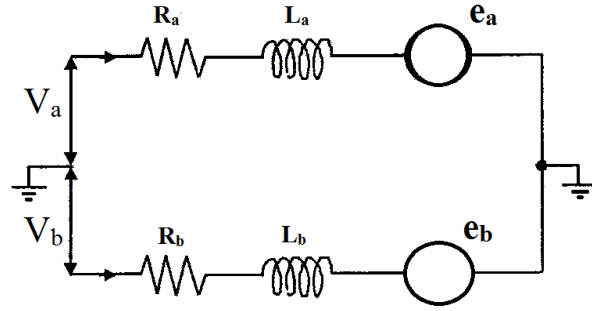
Tasarlanan kartezyen robotun X, Y ve Z eksenlerindeki hareketlerini sağlamak amacıyla hibrit adım motorları kullanılmıştır. Kullanılan hibrit adım motorunun rotoru 50 adet rotor dişi ile çevrelenmiştir. Denklem 2.21'deki ifadeden yararlanılarak adım genişliği $1,8^{\circ}$ hesaplanmıştır. Şekil 2.6'da 50 adet rotor dişine sahip bir hibrit adım motorunun görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.6. 50 dişli rotora sahip hibrit adım motorunun iç yapısı (Gimbleby 2008)

2.4.2. Hibrid Adım Motorlarının Dinamik Modeli

Elektrik motorlarının analizi, tasarımlarına bağlı olarak elde edilecek eşdeğer devrelerle gerçekleştirilmektedir. Ancak geleneksel elektrik motorlarının aksine adım motorları için tam bir eşdeğer devre modeli oluşturmak mümkün değildir. Bu nedenle bu tip motorların dinamik analizi; ortak indüktans, darbe momentleri vb. gibi durumların ihmal edilmesi ile yapılabilmektedir (Kenjo 1984). Hibrit adım motorunun ihmaller yapıldıktan sonra elde edilebilen eşdeğer devresi Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Hibrit adım motorunun yaklaşık eşdeğer devresi (Sabbagh and Mahdi 2010)

Şekil 2.7’deki yaklaşık eşdeğer devreye sahip hibrit adım motorunun gerilim denklemleri;

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} - K_m \omega_r \sin(N_r \theta_m) \quad (2.22)$$

$$v_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} - K_m \omega_r \cos(N_r \theta_m) \quad (2.23)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada; R_a, R_b ve L_a, L_b sırasıyla A ve B faz sargılarının direnç ve indüktans değerlerini, i_a, i_b A ve B faz sargılarına uygulanan akımları, K_m motor tork sabitini, ω_r rotorun açısal hızını, N_r rotor diş sayısını ve θ_m rotor milinde meydana gelecek olan açısal konum değişimini göstermektedir. Hibrit adım motorunda üretilen toplam elektromanyetik tork değeri Denklem 2.24’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$K_m (-i_a \sin(N_r \theta_m) + i_b \cos(N_r \theta_m)) - \tau_d = J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r \quad (2.24)$$

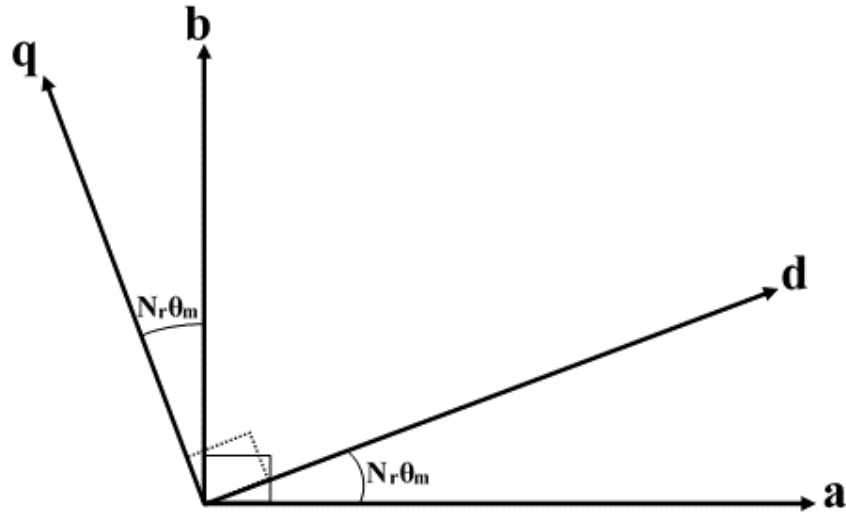
Denklem 2.24’te τ_d yük torkunu, B viskoz sürtünme katsayısını ve J rotorun atalet momentini temsil etmektedir. Hibrit adım motorunun rotor açısal hızı Denklem 2.25’te gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$\omega_r = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.25)$$

Elektriksel ve mekanik açısal konum arasında Denklem 2.26’da gösterildiği gibi bir ilişki vardır.

$$\theta_e = N_r \theta_m \quad (2.26)$$

Stator eksenleri referans alınarak elde edilen hibrit adım motoru modeli, hız ve pozisyon kontrol işlemleri için uygun değildir. Çünkü elde edilen model zamanla değişen büyüklükler (ortak indüktans, darbe momentleri vb.) içermektedir. Hem bu bileşenleri yok etmek ve hem de stator için elde edilen eşitliklerin rotor içinde kullanabilmesini sağlamak amacıyla Park Dönüşüm matrisi uygulanarak stator eksenleri rotor eksenlerine kaydırılır (Sabbagh and Mahdi 2010). Şekil 2.8’de stator referans eksenlerinin (a-b) rotor eksenlerine kaydırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Stator referans eksenlerinin (a-b) rotor eksenlerine kaydırılması (Sabbagh and Mahdi 2010)

Park Dönüşüm matrisi (K_s^e);

$$K_s^e = \begin{bmatrix} \cos(N_r \theta_m) & \sin(N_r \theta_m) \\ -\sin(N_r \theta_m) & \cos(N_r \theta_m) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Daha önce elde edilen dinamik denklemlere Park Dönüşümü uygulandığında, hibrit adım motorunun d - q eksenlerinde ifade edilen yeni modeli;

$$v_{ds} = R_a i_{ds} + L_a \frac{di_{ds}}{dt} - L_a N_r \omega_r i_{qs} \quad (2.28)$$

$$v_{qs} = R_b i_{qs} + L_b \frac{di_{qs}}{dt} + L_b N_r \omega_r i_{ds} + K_m \omega_r \quad (2.29)$$

$$K_m i_{qs} - \tau_d = J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r \quad (2.30)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.31)$$

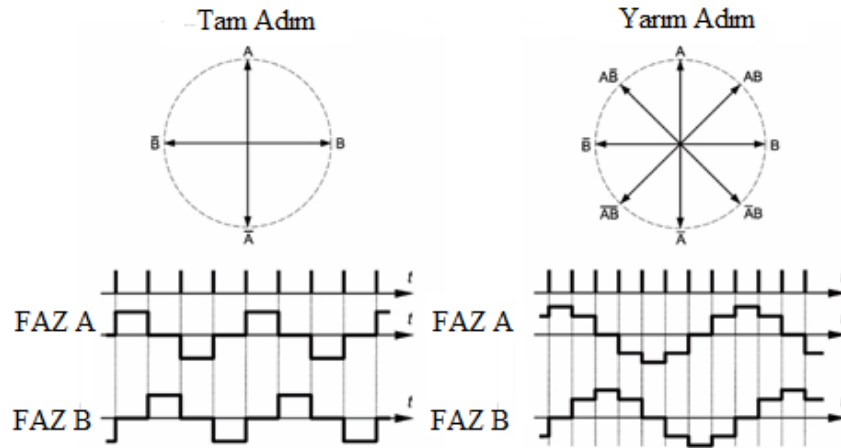
şeklinde elde edilmektedir. Hibrit adım motorunun d - q eksenlerinde ifade edilen eşitliklerinin tekrar a - b eksenlerinde ifade edilebilmesi için Ters Park Dönüşümünün uygulanması gerekir. Ters Park Dönüşümü uygulandıktan sonra ifadeler düzenlenerek elde edilen durum uzay modeli Denklem 2.32’de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \theta_m \\ \omega_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 & \frac{K_m}{L_a} \sin(N_r \theta_m) \\ 0 & -\frac{R_b}{L_b} & 0 & \frac{K_m}{L_a} \cos(N_r \theta_m) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_m}{J} \sin(N_r \theta_m) & -\frac{K_m}{J} \cos(N_r \theta_m) & 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \theta_m \\ \omega_r \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_b} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \tau_d \end{aligned} \quad (2.32)$$

2.4.3. Mikro Adımlama Yöntemi

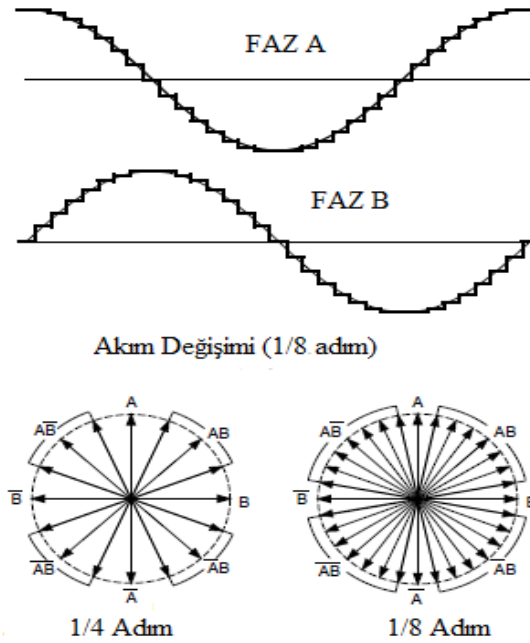
Adım motorlarının sürekli dönme hareketini gerçekleştirebilmesi için faz sargılarının belirli bir sırayla uyarılması gerekmektedir. Bu uyarım geleneksel sürücülerde stator sargılarına doğrudan uygulanan gerilim darbeleri ile sağlanmakta olup bu durum mekanik titreşimlere, ani tork değişimlerine, dinamik torkun zayıflamasına ve motor performansının düşmesine neden olmaktadır. Motorun performansının artması ve daha yumuşak hareketler yapabilmesi için adım genişliğinin azaltılması gerekmektedir (Kenjo 1984; Astarloa *et al.* 2003; Bellini *et al.* 2007).

Hibrit adım motorlarında tam bir uyarım çevrimi rotor hareketinin dört adımında ($A, B, \bar{A}, \bar{B}$) gerçekleşmekte olup bu durum tam adım sürme yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Diğer bir sürüş tekniği olan yarım adım sürme tekniğinde ise fazlara eşit büyüklükte akımlar uygulanarak iki sargı arasında yeni bir ara denge noktası oluşturulmaktadır. Bu sayede tam adıma göre atılan adım sayısı iki katına, adım genişliği ise yarı değerine düşürülmektedir. Adım genişliğinin daha fazla azaltılabilmesi için yeni ara denge noktalarının ($1/4$ adım, $1/8$ adım, ...) tanımlanması gerekmektedir. Adım genişliğini azaltmak için geliştirilen bu yöntem mikro adımlama yöntemi adı verilmektedir. Şekil 2.9'da tam adım ve yarım adım sürme teknikleri gösterilmiştir.



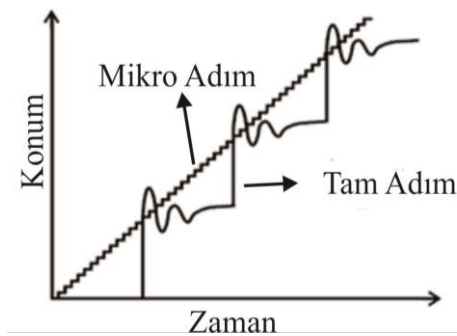
Şekil 2.9. Adım motorunun tam adım ve yarım adım sürülmesi (Bellini *et al.* 2007)

Şekil 2.10’da hibrit adım motorunun fazlarındaki akım değişimi ve $1/4$ adım- $1/8$ adım oranlarında sürülmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Hibrit adım motorunun $1/4$ adım ve $1/8$ adım oranlarında sürülmesi (Emerald and Kadrmas 1999)

Adım motorlarının her bir adımdaki hareketi x denge noktasından $x+$ denge noktasına şeklindedir. Adım genişliğinin büyük olması bu denge noktalarında rotorun kontrol dışı hareket etmesine neden olmaktadır. Mikro adımlama yöntemi bu kontrol dışı hareketlerin en aza indirgenmesini sağlamaktadır. Bu durum Şekil 2.11’den görülebilmektedir.

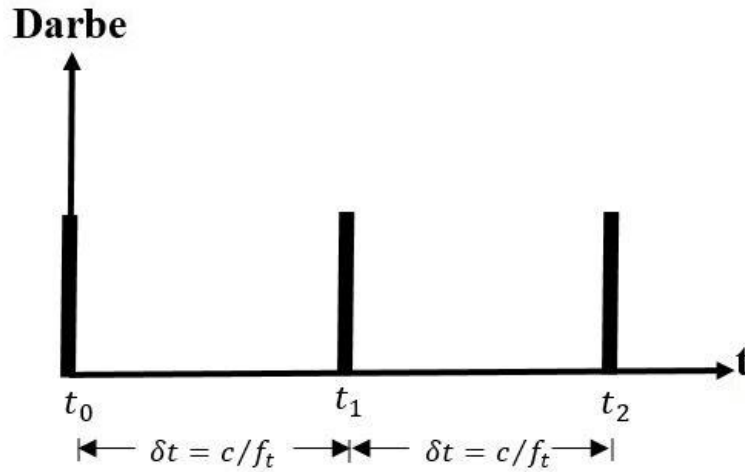


Şekil 2.11. Mikro adım ve tam adım sürme durumunda rotor konumunun değişimi (Bellini et al. 2007)

2.4.4. Hibrit Adım Motorlarının Hız Profillerinin Sağlanması

Hibrit adım motorları kullanılan sistemlerde, ani hız değişimlerinden dolayı oluşabilecek titreşimlerin en aza indirgenebilmesi için motorun kalkış-duruş hareketlerinin yumuşak bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum motorun sabit ivmeli hareketi ile gerçekleştirilebilmektedir. Motora sabit ivmeli hareket yaptırmak için motor açısal hızının doğrusal bir eğime sahip olması gerekmektedir.

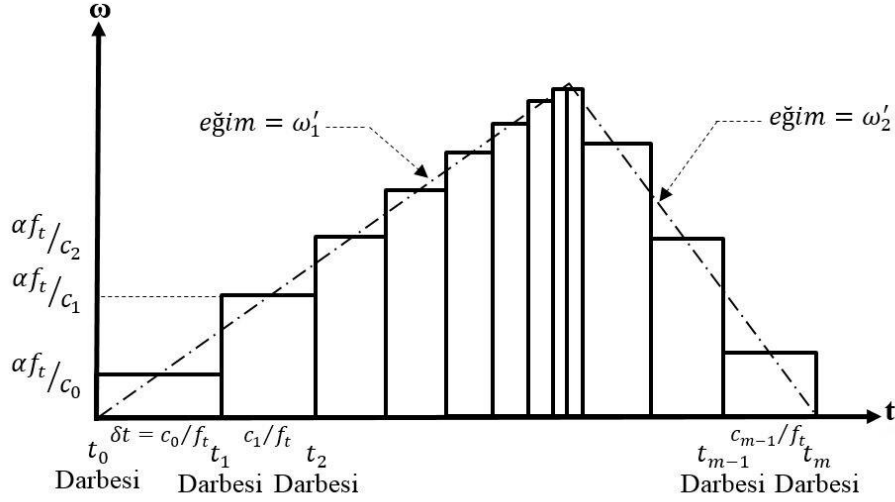
Hibrit adım motorunun açısal hızı mikro denetleyici ünitesi tarafından uygulanan darbe süreleri arasında sürekli değişken bir zaman gecikmesinin oluşturulması gerekmektedir. Hibrit adım motorunun sabit bir hızda döndürülebilmesi için ise motor sürücüsüne uygulanacak olan darbeler arasında geçen sürelerin eşit olması gerekmektedir. Bu durum Şekil 2.12’de gösterilmiş olup burada c sabitlenmiş zamanlayıcı yenileme katsayısını (fixed timer count), $\delta(t)$ iki darbe arasında geçen süreyi, f_t mikro denetleyicinin zamanlayıcı çalışma frekansını (timer frequency) göstermektedir (Austin 2005).



Şekil 2.12. Sabit açısal hız için gerekli darbe dizisi

Motor açısal hızına doğrusal bir eğim kazandırmak ve bu sayede motor kalkış – duruş hareketlerinin daha yumuşak bir şekilde gerçekleştirilebilmesini sağlamak için darbeler arasındaki zaman gecikmelerinin uygun hesaplamalarla değiştirilmesi gerekmektedir.

Şekil 2.13'te açısal hıza doğrusal bir eğim kazandırabilmek için gerekli darbe dizisi gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Sabit ivmeli hareket için gerekli olan darbe dizisi (Austin 2005)

Şekil 2.13'te α adım genişliğini, ω' terimleri ise açısal ivmeyi ve m uygulanan darbe sayısını göstermektedir. Şekil 2.13'ten görülebileceği gibi darbeler arasındaki zaman gecikmeleri ve dolayısıyla adım motorunun açısal hızı, zamanlayıcı yenileme kat sayılarına ($c_0, c_1, \dots, c_m$) bağlı olduğundan bu katsayıların hesaplanması gerekmektedir. Mikro denetleyici tarafından uygulanan iki darbe arasında geçen süre, zamanlayıcı frekansına bağlı olarak Denklem 2.33'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Austin 2005).

$$\delta(t) = \frac{c}{f_t} \quad (2.33)$$

Zamanlayıcı çalışma frekansı f_t sabit olduğundan motor açısal hızı ω ;

$$\omega = \frac{\alpha f_t}{c} \quad (2.34)$$

şeklinde hesaplanır. Adım motorunun açısal ivmesi (ω') ise birbirini takip eden c_1 ve c_2 zamanlayıcı yenileme katsayılarına bağlı olarak Denklem 2.35'teki gibi ifade edilir.

$$\omega' = \frac{2 \alpha f_t^2 (c_1 - c_2)}{c_1 c_2 (c_1 + c_2)} \quad (2.35)$$

Açısal hızı (ω), açısal ivmesi (ω') ve konumu (θ) olarak tanımlanan adım motorunun belirli bir zamanda n adet adım atması durumunda konumu, hızı ve ivmesi arasındaki ifade;

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \int_{\tau=0}^t \omega'(\tau) d\tau = \omega' t \\ \theta(t) &= \int_{\tau=0}^t \omega(\tau) d\tau = \frac{1}{2} \omega' t^2 = n\alpha \end{aligned} \quad (2.36)$$

şeklinde elde edilir. Denklem 2.36'daki n , adım sayısını gösteren sıfırdan büyük reel bir tamsayı olup n 'inci darbenin uygulanacağı zaman Denklem 2.37'de gösterildiği gibi belirlenebilmektedir.

$$t_n = \sqrt{\frac{2 n \alpha}{\omega'}} \quad (2.37)$$

n ve $(n + 1)$ 'inci darbeler arasındaki zaman gecikmesini sağlamak için gerekli olan, zamanlayıcı yenileme katsayısı Denklem 2.38'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$c_n = f_t (t_{n+1} - t_n) \quad (2.38)$$

Adım motorunun ilk hareketi için zamanlayıcı yenileme katsayısı (c_0);

$$c_0 = f_t \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega'}} \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilir. Bu durumda n ' inci zamanlayıcı yenileme katsayısı Denklem 2.40'ta gösterildiği gibi hesaplanır.

$$c_n = c_0(\sqrt{n+1} - \sqrt{n}) \quad (2.40)$$

Denklem 2.39 ve Denklem 2.40 ifadeleri adım motorunun başlangıç hızının sıfır olduğu durumlarda geçerlidir. n 'inci ve $(n-1)$ 'inci zamanlayıcı yenileme katsayıları arasında;

$$\frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{c_0(\sqrt{n+1}-\sqrt{n})}{c_0(\sqrt{n}-\sqrt{n-1})} = \frac{\sqrt{1+\frac{1}{n}}-1}{1-\sqrt{1-\frac{1}{n}}} \quad (2.41)$$

eşitliği söz konusudur. Denklem 2.41'deki kareköklü ifadeler, Denklem 2.42'de gösterilen Taylor serisine açılarak basitleştirilebilir.

$$\sqrt{1 \pm \frac{1}{n}} = 1 \pm \frac{1}{2n} - \frac{1}{8n^2} + \dots \quad (2.42)$$

Denklem 2.42'deki ifade Denklem 2.41'de yerine yazılacak olursa ardışık darbe zamanlayıcı katsayıları arasındaki ilişki;

$$\frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{1+\frac{1}{2n}-\frac{1}{8n^2}-1}{1-(1-\frac{1}{2n}-\frac{1}{8n^2})} = \frac{4n-1}{4n+1} \quad (2.43)$$

şeklinde elde edilir (Austin 2005). Austin yaklaşımı daha önce belirtildiği gibi adım motorunun başlangıçtaki açısal hızının (ω_i) sıfır olduğu durumlarda geçerlidir. Adım

motorunun başlangıçtaki açısal hızının sıfırdan farklı olduğu durumlarda Denklem 2.36 yerine Denklem 2.44 kullanılmalıdır (Siripala and Sekercioglu 2013).

$$\theta(t) = \int_{\tau=0}^t \omega(\tau) d\tau = \left[\frac{1}{2} \omega' \tau^2 + \omega_i \tau \right]_0^t = \frac{1}{2} \omega' t^2 + \omega_i t = n\alpha \quad (2.44)$$

Bu durumda zamanlayıcı yenileme katsayıları;

$$c_n = f_t (t_{n+1} - t_n) = \frac{f_t}{\omega'} \left[\sqrt{\omega_i^2 + 2 \omega' (n+1) \alpha} - \sqrt{\omega_i^2 + 2 \omega' n \alpha} \right] \quad (2.45)$$

$$c_0 = \frac{f_t}{\omega'} \left[-\omega_i + \sqrt{\omega_i^2 + 2 \omega' \alpha} \right] \quad (2.46)$$

şeklinde elde edilir. ω_i sıfırdan farklı iken, n 'inci ve $(n-1)$ 'inci zamanlayıcı yenileme katsayıları arasında Denklem 2.47'de gösterildiği gibi bir ilişki bulunmaktadır (Siripala and Sekercioglu 2013).

$$\frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{\left[\sqrt{\omega_i^2 + 2 \omega' (n+1) \alpha} - \sqrt{\omega_i^2 + 2 \omega' n \alpha} \right]}{\left[\sqrt{\omega_i^2 + 2 \omega' n \alpha} - \sqrt{\omega_i^2 + 2 \omega' (n-1) \alpha} \right]} \quad (2.47)$$

Denklem 2.47 yine Taylor serisine açılıp sadeleştirilirse n 'inci ve $(n-1)$ 'inci zamanlayıcı yenileme katsayıları arasındaki ilişki;

$$\frac{c_n}{c_{n-1}} = 1 - \frac{2 \alpha \omega'}{2 \omega_i^2 + 4 \omega' n \alpha + \omega' \alpha} \quad (2.48)$$

şeklinde elde edilir (Siripala and Sekercioglu 2013).

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Kartezyen Robot Tasarımı

Her robot tipinde olduğu gibi kartezyen robotlarda da kullanılacak malzemelerin belirlenmesi hareket hassasiyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Bir kartezyen robotun konstrüksiyonundan beklenen özellikler; yüksek mukavemet, hafiflik ve dinamik kararlılıktır. Bu özellikleri sağlayabilmek için seçilen malzeme ve konstrüksiyon geometrisi büyük önem taşımaktadır (Büyüksahin 2005). Bu amaçla tez çalışmasının bu bölümünde tasarlanan üç serbestlik dereceli kartezyen robotun tasarımında kullanılan malzemelerin detayları ve bu malzemelerin seçimi için gerekli hesaplamalar sunulmuştur.

3.1.1. Ana gövde ve ayaklar

Robot tipine göre, robot gövdeleri birbirinden oldukça farklıdır. Ancak bir genelleştirme yapılırsa portal tip kartezyen robotların gövdesi, şase ve kolonlardan meydana gelir. Şase, robotun bulunduğu zemine göre yatay, yan kolonlar ise bu zemine göre dikey vaziyette bulunan gövde kısmından oluşur. Tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen kartezyen robot sisteminde şase ve yan kolonlar ST-37 kalitede 5 mm kalınlığında, tabla yanları ise yine aynı kalitede 1,5 mm saçlardan imal edilmiştir. Kartezyen robotun hareketli mekanizmalarının üzerine yerleştirildiği ayaklar 40 x 40 kutu profilden imal edilmiştir.

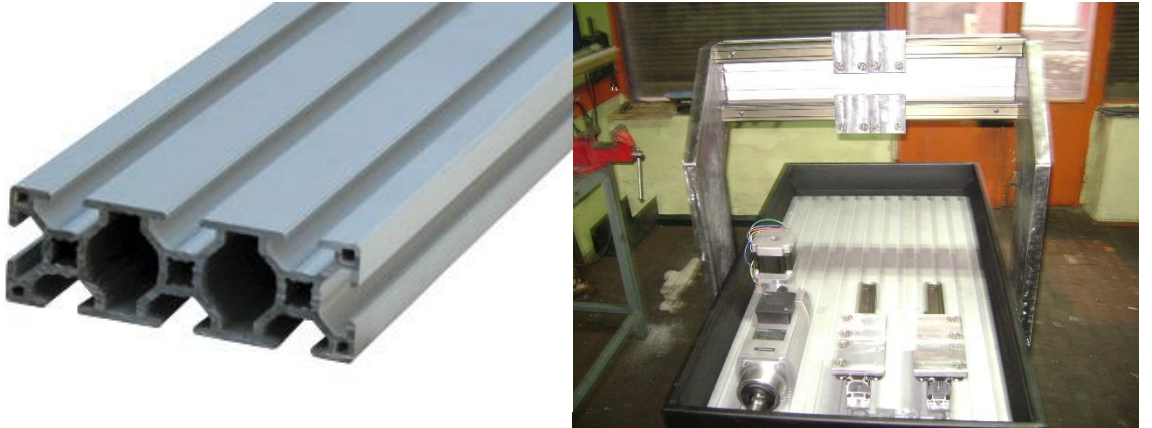


Şekil 3.1. ST-37 saclardan yapılmış ana gövde ve yan kolonlar

3.1.2. Alüminyum profiller

Bu profiller emsallerine göre oldukça dayanıklı ve hafif olmakla beraber, sökme-takma işlemlerini kolaylaştıran bir yapıda imal edilmişlerdir. Uygulama alanlarına göre özel olarak tasarlanmış bu profillerin 8 mm ve 10 mm'lik kanal ölçüleri sayesinde statik ve dinamik yüklemelere karşı daha sağlam bağlantılar yapmak mümkündür. Profiller modüler bir yapıya sahip oldukları için gerekli aksesuar montajları kolayca yapılabilmektedir.

Bu özellikleri nedeni ile tasarımı gerçekleştirilen kartezyen robot sisteminde sistem alt tablası için 30x90 mm boyutlarında alüminyum sigma profil kullanılmıştır. X, Y ve Z eksenlerindeki lineer makaralı yatakların üzerinde hareket edebilmesi için de 45x45 mm boyutlarında sigma profiller kullanılmıştır. Ayrıca X, Y ve Z eksenlerinde sürtünmeyi çok küçük değerlere indirmek için kullanılan alüminyum sigma profiller üzerine yataklanmış indüksiyonla sertleştirilmiş çelik miller bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Alt tablada ve X, Y ve Z eksenlerinde kullanılan Alüminyum profiller

3.1.3. Alüminyum lamalar

Alüminyum lamalar da kartezyen robot sistemlerinde sigma profiller gibi büyük bir öneme sahiptir. Yüksek rijitlik ve hafiflik gibi gereksinimleri karşıladığı için tasarımda

hareket eden araba adını verdiğimiz sistemin oluşturulmasında alüminyum lamalar kullanılmıştır. Bu lamalara monte edilen rulmanlı çelik makaraların, indüksiyonla sertleştirilmiş çelik miller üzerinde yuvarlanmasıyla hareketli kısımlar kasıntı ve zorlamalara maruz kalmamaktadır. Doğrusal hareket sağlayan rulmanlı makaralar az gürültülü ve hassas çalışma imkânı sağlamaktadırlar.



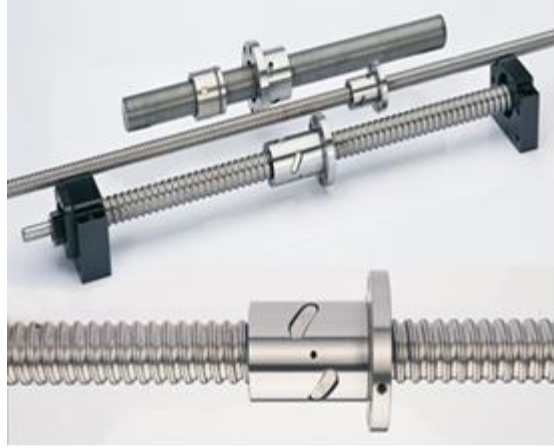
Şekil 3.3. Alüminyum lamalar ve çelik miller üzerine bindirilmiş makaralar

3.1.4. Bilyeli vidalı mil ve somunu

Vidalı miller, vida-somun mekanizması yardımıyla doğrusal hareket elde edilmesini sağlayan makine elemanlarıdır. Robotik sistemlerdeki mekanik gelişmelerin en önemlilerinden biri de bilyeli-vidalı mildir. Bilyeli-vidalı mil, uzun bir çubuğun üzerine açılmış eşit aralıklı vida oyukları, bu oyukta çalışan küresel bilyeler ve bilyeleri içinde hapseden bir somundan ibarettir. Somun, vida boşluğunu sıfıra indiren bir yapıya sahiptir (Michael 2006).

Vidalı mil iki ucundan yataklanarak bir ucundan bir hareketlendirici vasıtası ile döndürülmektedir. Bilyeler vida dış çapındaki oyuklar ile somun iç çapındaki oyuklar arasında kapalı bir kanal içerisinde dolaşmaktadırlar. Klasik millerde karşılaşılan kayma sürtünmesi bilyeli-vidalı milde yuvarlanma sürtünme direncine dönüşmüştür (yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde oluşan dirençtir). Yuvarlanma sürtünme direnci kayma sürtünme kuvvetine göre çok küçük

olduğundan vida ve somun aşınması son derece azaltılmıştır. Bunun sonucunda elemanların ömrü ve hassasiyeti yüksek oranda artmıştır. Bu elemanlar ile 1 mikron seviyesinde hassas kızak ilerleme hareketleri elde edilebilmektedir (Michael 2006).



Şekil 3.4. Değişik çap ve ebatlarda bilyeli vidalı miller

Bu sebeple tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen kartezyen robot sisteminde X,Y ve Z eksenlerindeki hareket kabiliyetini ve hassasiyeti artırmak amacıyla bilyeli vidalı miller kullanılmıştır. Ayrıca bilyeli vidalı miller mil sonu destekleri ile robot gövdesine sabitlenmiştir.



Şekil 3.5. Y ve Z eksenlerinde kullanılan bilyeli vidalı miller ve mil sonu destekleri

3.1.5. Kaplin

Kartezyen robot sistemlerinde mekanik irtibat elemanları olarak kaplinler kullanılmaktadır. Kaplinlerde bağlantı, mekanik bağ ile gerçekleştirilir. Bu nedenle iki mil arasındaki irtibatı sağlamak veya kesmek, mekanik bağlantı elemanının takılıp sökülmesi ile yapılır; bu da ancak döndüren mil dururken mümkündür.



Şekil 3.6. Adım motorlar için özel olarak üretilmiş kaplin

Bilyeli vidalı millerin kullanımında en önemli noktalardan biri de motor ile vidalı milin bağlantısında boşluk olmamasıdır. Buradaki boşluk, amaçlanan hassasiyeti bozacak ve istenilen sonuca ulaştırmayacaktır. Bu nedenle tasarlanan ve imalatı gerçekleştirilen kartezyen robot sisteminde bilyeli vidalı millerle motor arasındaki bağlantıyı sağlayabilmek için sert alüminyumdan yapılmış adım motor kaplinleri kullanılmıştır. Ayrıca bu kaplinlerin zamanla aşınmasından dolayı oluşacak boşlukların alınabileceği bir vida mekanizması bulunmaktadır.

3.1.6. İş/Fener mili motoru

Kartezyen robot sistemlerinde kesicinin dönme hareketini sağlayan parçasına iş/fener mili (spindle motor) denir. Kartezyen robot sistemlerinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken önemli parçalardan biri de iş milidir. İş milinin eğilme ve burulmaya karşı dayanıklı olması ve eksen boyunca etki eden tüm kuvvetlere dayanacak sağlamlıkta olması gerekir (Megep 2006; Megep 2006). Bu nedenle iş mili çok iyi yataklanmalı ve titreşim oluşturmayacak şekilde montajı yapılmalıdır. Yeterli olmayan

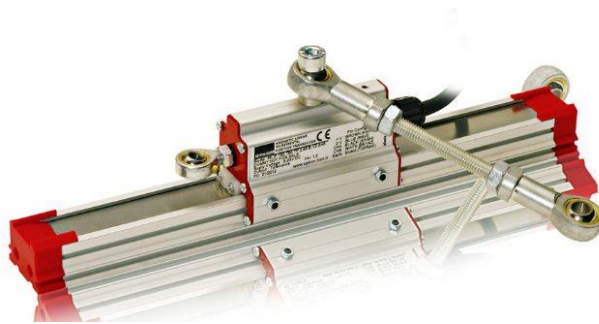
destek yalnızca boyutsal hatalara değil, aynı zamanda kötü yüzey kalitesi ve titreşimlere neden olur. Genellikle küçük güçlü uygulamalarda DC motorlar, büyük güçlü uygulamalarda ise AC motorlar kullanılmaktadır.



Şekil 3.7. Tasarlanan kartezyen robotta kesme işlemi için kullanılan uç işlevci (iş mili)

3.1.7. Kartezyen robotta kullanılan doğrusal konum seziciler

Tasarımı gerçekleştirilen kartezyen robotun konum bilgilerinin elde edilebilmesi için Opkon marka 2,5 μm hassasiyete sahip manyetik doğrusal konum seziciler kullanılmış olup bu doğrusal konum sezicinin yapısı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Kartezyen robotta kullanılan doğrusal konum sezici yapısı

3.2. Kartezyen Robotun Boyutları ve Çalışma Uzayı

Tasarımı gerçekleştirilen kartezyen robotun tabla boyutları ve çalışma uzayı boyutları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda, tabla üzerine bağlanacak maksimum malzeme boyutlarının $1085mm \times 692mm \times 180mm$ olduğu görülmektedir. Tasarım hesaplamaları için robot, SolidWorks isimli programda üç boyutlu olarak modellenmiş ve kütle değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1. Tasarlanan kartezyen robotun çalışma uzayı, tabla boyutları ve eksenlerde hareket eden uzuvların kütle değerleri

	X	Y	Z
Çalışma Uzayı (mm)	905	400	180
Tabla Boyutları (mm)	1085	692	–
Eksen Ağırlığı (kg)	130,34	56,47	30,18

3.3. Kesme Kuvvetleri ve Kesme Gücünün Hesaplanması

Kesme işlemleri yapan kartezyen tip robotlarda genellikle üç ayrı durum için incelenmektedir. Bunlar hafif, orta ve ağır kesme işlemlerinin yapıldığı durumlardır. Bu amaçla tasarlanan portal robotun hafif, orta ve ağır kesme işlemlerinde ortaya çıkan kesme kuvvetleri ayrı ayrı hesaplanacaktır. Buradan elde edilen sonuçlar ışığında en ağır kesme işleminde kullanılan malzeme için gerekli hesaplamalar her bir eksen için ayrı ayrı yapılacaktır.

3.3.1. Hafif kesme şartlarında kesme kuvvetlerinin hesaplanması

Kesme kuvvetlerinin hesaplanabilmesi takım çapından takım diş sayısına, kesme hızından ilerleme değerine kadar birçok parametreye bağlıdır. Kesme kuvvetlerinin hesaplamalarında kolaylık sağlamak amacı ile Çizelge 3.2’de bazı parametreler verilmiştir.

Çizelge 3.2. Freze başlıkları için kesme hızı ve ilerleme değerleri (Akkurt 2010)

Parça Malzemesi	Talaş Tipi	f_z (mm/diş)	V_c (m/dk)	Takım (Sert Metal)
St 50 – St 60	Kaba	0,2 – 0,5	100 - 180	P25 – K40
C 35 – C45	İnce	0,1 – 0,2	120 - 200	
St 70 – St 85 ve az alaşımlı çelikler	Kaba	0,2 – 0,5	70 - 140	
	İnce	0,1 – 0,2	90 - 180	
Yüksek alaşımlı çelikler Kalıp çelikleri	Kaba	0,2 – 0,4	50 -100	
	İnce	0,1 – 0,2	70 - 120	
GS 45 – GS 52	Kaba	0,2 – 0,4	60 - 100	
	İnce	0,1 – 0,2	70 - 120	
GG 25 – GG 30	Kaba	0,2 – 0,5	60 – 120	K10 – K20
	İnce	0,2 – 0,3	80 – 140	
Ms 58 – Ms 63	Kaba	0,2 – 0,4	80 – 140	
	İnce	0,1 – 0,3	90 – 150	
Al – Alaşım (% 9-13 Si) G - AlSi	Kaba	0,1 – 0,6	300 – 600	

Hafif kesme hesaplamaları için hafif malzeme olarak Al alaşımları seçilmiştir. Bu malzeme için Çizelge 3.2’de verilen değerler seçilerek hesaplamalar yapılmıştır.

Seçilen malzeme için kesme hızı $V_c = 300 \text{ m/dk}$, kesme işleminde kullanılacak takım çapı $d = \varnothing 16 \text{ mm}$, diş sayısı $Z = 4$, diş başına ilerleme değeri $f_z = 0,4 \text{ mm/diş}$ yerleştirme açısı $\alpha = 90^\circ$, yana kayma değeri $B = 9 \text{ mm}$ ve paso derinliği $a = 1,91 \text{ mm}$ olarak alınmış ve hesaplamalar bu değerlere göre yapılmıştır.

Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda kesme dönme hızı;

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \left(\frac{dv}{dk} \right) \quad (3.1)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 300}{\pi \cdot 16} \quad (dv/dk)$$

$$n = 5968,3 \text{ } dv/dk$$

olarak hesaplanır. Frezeleme işlemi simetrik veya asimetrik olabilir. Simetrik frezelemede freze eksenini ile malzeme eksenini örtüşür. Asimetrik frezelemede ise iki eksen arasında bir kaçıklık vardır. Her iki durumda da takımın parça genişliği boyunca kaldırdığı talaş temas açısı φ_s ile belirlenir. Simetrik frezelemede temas açısı $\varphi_s = 180^\circ$ 'dir. Asimetrik frezelemede ise temas açısı giriş φ_1 , çıkış φ_2 açılara ve A_1 kaçıklık mesafesine bağlı olarak hesaplanır (Akkurt 2006; 2006; 2010). Freze ile parça arasında iyi bir temas sağlamak amacı ile genellikle $d > B$ olan kısmi frezeleme yöntemi tercih edilmektedir. Kısmi asimetrik frezelemeye göre temas açısını hesaplayacak olursak;

$$\varphi_s = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (3.2)$$

kısmi asimetrik frezelemede $\varphi_1 = 0$ ve $A_1 = 0$ 'dır. Bu durumda $\varphi_s = \varphi_2$ olur. Buradan hareketle temas açısı ;

$$\cos \varphi_s = \cos \varphi_2 = 1 - \frac{2.B}{d} \quad (3.3)$$

$$\cos \varphi_s = 1 - \frac{2.9}{16}$$

$$\cos \varphi_s = -0,125$$

buradan da $\varphi_s = 97,18^\circ$ olarak bulunur. Seçilen ve elde edilen değerler ışığında kesme esnasındaki ilerleme hızı V_f ;

$$V_f = f_z . Z . n \quad (mm/dk) \quad (3.4)$$

$$V_f = 0,4 . 4 . 5968,3$$

$$V_f = 9549,28 \text{ mm/dk} \text{ veya } V_f = 9,6 \text{ m/dk}$$

olarak hesaplanır. Pratik hesaplarda kolaylık sağlamak amacı ile talaşın ortalama kalınlığı h_m alınır ve Denklem 3.5'teki gibi hesaplanır.

$$h_m = \frac{180}{\pi \cdot \varphi_s} \cdot f_z \cdot \sin(x) \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (mm) \quad (3.5)$$

$$h_m = \frac{180}{\pi \cdot 97,18} \cdot 0,4 \cdot \sin(90) \cdot (1 - (-0,125))$$

$$h_m = 0,398 \text{ mm}$$

Talaş genişliği b , ifade 3.6'daki gibi hesaplanır.

$$b = \frac{a}{\sin x} \quad (mm) \quad (3.6)$$

$$b = \frac{1,91}{\sin 90} = 1,91 \text{ mm}$$

Ortalama talaş kalınlığı ve talaş genişliği değerleri göz önünde bulundurulduğunda ortalama talaş kesiti A_s ;

$$A_s = b \cdot h_m \quad (mm^2) \quad (3.7)$$

$$A_s = 1,91 \cdot 0,398$$

$$A_s = 0,761 \text{ mm}^2$$

olarak hesaplanmıştır.

3.3.1.a. Hafif Şartlar Altında Kesme kuvvetlerinin hesaplanması

Kesme kuvvetleri belirlenirken ϕ kesme açısı ve ρ sürtünme açısının tayini oldukça zordur. Dolayısıyla kesme kuvvetlerinin bu değerler kullanılarak hesaplanması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle kesme kuvvetleri, belirli kesme koşullarında yapılan deneylerle elde edilen özgül kesme kuvveti denilen k_s (N/mm^2) faktörüne dayanarak hesaplanmaktadır (Akkurt 2006; Akkurt 2010). Ayrıca özgül kesme kuvveti faktörü yapılacak işlerde kullanılacak olan parça malzemesinin türüne de bağlıdır. Çizelge 3.3'te çeşitli malzemeler için özgül kesme kuvvetleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Özgül kesme kuvvetinin yaklaşık değerleri (Akkurt 2010)

Parça Malzemesi	k_s [N / mm ²]
St 60	1600
St 70	1900
Islah Çelikleri ($\sigma_k \leq 100 N/mm$)	2350
Islah Çelikleri ($\sigma_k \leq 1400 N/mm$)	3500
Cr-Ni Çelikleri	3000
Mn Çelikleri	4800
Dökme Çelik	1500
Dökme Demir	2000
Al-Cu-Mg Alaşımı (Duraliminyum)	800

Frezelemede talaş kaldırma sırasında kesme kuvvetleri değişkendir. Bu nedenle pratikte hesaplamaları kolaylaştırmak amacı ile ortalama talaş kesitine karşılık gelen ortalama kesme kuvvetleri alınır. Buna göre bir dişe karşılık gelen ortalama kesme kuvveti (F_{sz});

$$F_{sz} = b \cdot h_m \cdot k_s \quad (3.8)$$

$$F_{sz} = A_s \cdot k_s$$

$$F_{sz} = 0,761 \cdot 800$$

$$F_{sz} = 609 \text{ N}$$

Frezelemede genelde birden daha çok diş aynı anda talaş kaldırır. Bu nedenle aynı anda parça malzemesi ile temasta bulunan diş sayısının hesaplanması ortalama kesme kuvveti hesaplamalarında kolaylık sağlayacaktır. Aynı anda parça ile temasta bulunan diş sayısı (z_e);

$$z_e = Z \cdot \frac{\varphi_s}{360} \quad (3.9)$$

$$z_e = 4 \cdot \frac{97,18}{360}$$

$$z_e = 1,079$$

olarak hesaplanır. Elde edilen bu değerler kullanılarak tüm frezeye ait ortalama kesme kuvveti (F_s);

$$F_s = z_e \cdot F_{sz} \quad (3.10)$$

$$F_s = 1,079 \cdot 609$$

$$F_s = 657,11 \text{ N}$$

olarak bulunur. Bu değer hesaplamalarda 660 N olarak kullanılacaktır.

3.3.2. Orta ağırlıktaki kesme şartlarında kesme kuvvetlerinin hesaplanması

Orta ağırlıktaki kesme kuvvetleri hesaplamaları için malzeme olarak düşük kopma mukavemetine sahip ıslah çelikleri seçilmiştir. Bu malzeme için Çizelge 3.2’de verilen değerler seçilerek hesaplamalar yapılmıştır.

Seçilen malzeme için kesme hızı $V_c = 120 \text{ m/dk}$; kesme işleminde kullanılacak takım çapı $d = \varnothing 10 \text{ mm}$; diş sayısı $Z = 4$; diş başına ilerleme değeri $f_z = 0,5 \text{ mm/diş}$ yerleştirme açısı $\alpha = 90^\circ$; yana kayma değeri $B = 3,63 \text{ mm}$ ve paso derinliği $a = 1,81 \text{ mm}$ olarak alınmış ve hesaplamalar bu değerlere göre yapılmıştır.

Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda kesme dönme hızı;

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \quad \left(\frac{dv}{dk} \right) \quad (3.11)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 120}{\pi \cdot 10} \quad (dv/dk)$$

$$n = 3819,72 \text{ } dv/dk$$

olarak hesaplanır. Bilindiği gibi frezeleme işlemleri simetrik veya asimetrik olarak yapılabilir. Simetrik frezeleme işlemlerinde freze eksenini malzeme eksenine ile çakışıktır. Asimetrik frezelemede ise freze eksenini ile malzeme eksenini arasında bir kaçıklık vardır. Hem simetrik ve hem de asimetrik frezelemede takımın parça genişliği boyunca kaldırdığı talaş, temas açısı φ_s ile belirlenir. Simetrik frezelemede $\varphi_s = 180^\circ$ iken asimetrik frezelemede giriş φ_1 , çıkış φ_2 açılarına ve A_1 kaçıklık mesafesine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Freze ile parça arasında iyi bir temas sağlamak amacı ile genellikle $d > B$ olan kısmi asimetrik frezeleme yöntemi tercih edilmektedir (Akkurt 2010). Kısmi asimetrik frezelemeye göre temas açısını hesaplayacak olursak;

$$\varphi_s = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (3.12)$$

şeklinde elde edilir. Seçilen frezeleme yönteminde $\varphi_1 = 0$ ve $A_1 = 0$ 'dır. Bu durumda $\varphi_s = \varphi_2$ olur. Buradan hareketle temas açısı;

$$\cos \varphi_s = \cos \varphi_2 = 1 - \frac{2 \cdot B}{d} \quad (3.13)$$

$$\cos \varphi_s = 1 - \frac{2 \cdot 3,63}{10}$$

$$\cos \varphi_s = 0,274 ; \quad \varphi_s = 74,1^\circ$$

olarak hesaplanır. Kesme esnasındaki ilerleme hızı V_f ;

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot n \quad (mm/dk) \quad (3.14)$$

$$V_f = 0,5 \cdot 4 \cdot 3819,72$$

$$V_f = 7639,44 \text{ mm/dk} \text{ veya } V_f = 7,6 \text{ m/dk}$$

olarak elde edilir. Ortalama talaş kalınlığı h_m Denklem 3.15'teki gibi hesaplanır.

$$h_m = \frac{180}{\pi \cdot \varphi_s} \cdot f_z \cdot \sin(x) \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (mm) \quad (3.15)$$

$$h_m = \frac{180}{\pi \cdot 74,1} \cdot 0,5 \cdot \sin(90) \cdot (1 - 0,274)$$

$$h_m = 0,281 \text{ mm}$$

Talaş genişliği b , paso derinliği ve yerleştirme açısına bağlı olarak Denklem 3.16'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$b = \frac{a}{\sin x} \text{ (mm)} \quad (3.16)$$

$$b = \frac{1,81}{\sin 90} = 1,81 \text{ mm}$$

Talaş genişliği ve ortalama talaş kalınlığı değerleri kullanılarak ortalama talaş kesiti A_s ;

$$A_s = b \cdot h_m \text{ (mm}^2\text{)} \quad (3.17)$$

$$A_s = 1,81 \cdot 0,281$$

$$A_s = 0,509 \text{ mm}^2$$

olarak hesaplanmıştır.

3.3.2.a. Orta ağırlıktaki kesmelerde kesme kuvvetlerinin hesaplanması

Frezelemede talaş kaldırma sırasında kesme kuvvetleri değişken olduğundan direkt hesaplanmaları zordur. Bu nedenle pratikte hesaplamaları kolaylaştırmak amacı ile ortalama talaş kesitine karşılık gelen ortalama kesme kuvvetleri alınmaktadır. Buna göre bir dişe karşılık gelen ortalama kesme kuvveti (F_{sz}) Denklem 3.18'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$F_{sz} = b \cdot h_m \cdot k_s \quad (3.18)$$

$$F_{sz} = A_s \cdot k_s$$

$$F_{sz} = 0,509 \cdot 2350$$

$$F_{sz} = 1196,15 \text{ N}$$

Frezelemede genelde birden daha çok diş aynı anda talaş kaldırmakta olup, aynı anda parça ile temasta bulunan diş sayısı (z_e);

$$z_e = Z \cdot \frac{\varphi_s}{360} \quad (3.19)$$

$$z_e = 4 \cdot \frac{74,1}{360} = 0,823$$

olarak hesaplanır. Bu değer kullanılarak tüm frezeye ait ortalama kesme kuvveti (F_s);

$$F_s = z_e \cdot F_{sz} \quad (3.20)$$

$$F_s = 0,823 \cdot 1196,15$$

$$F_s = 984,43 \text{ N}$$

olarak bulunur. Bu değer hesaplamalarda 985 N olarak kullanılacaktır.

3.3.3. Ağır kesme şartlarında kesme kuvvetlerinin hesaplanması

Ağır kesme şartlarındaki kesme kuvvetleri hesaplamaları için malzeme olarak yüksek kopma mukavemetine sahip ıslah çelikleri seçilmiştir. Bu malzeme için Çizelge 2.2’de verilen değerler seçilerek hesaplamalar yapılmıştır.

Seçilen malzeme için kesme hızı $V_c = 100 \text{ m/dk}$, kesme işleminde kullanılacak takım çapı $d = \varnothing 10 \text{ mm}$, diş sayısı $Z = 4$, diş başına ilerleme değeri $f_z = 0,4 \text{ mm/diş}$,

yerleştirme açısı $x = 90^\circ$, yana kayma değeri $B = 2,92 \text{ mm}$ ve paso derinliği $a = 1,75 \text{ mm}$ olarak alınmış ve hesaplamalar bu değerlere göre yapılmıştır.

Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda kesme dönme hızı;

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \left(\frac{dv}{dk} \right) \quad (3.21)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 100}{\pi \cdot 10} (dv/dk)$$

$$n = 3183,1 \text{ } dv/dk$$

olarak hesaplanır. Frezeleme simetrik veya asimetrik olmak üzere iki şekilde olabilir. İki yöntem arasındaki fark; simetrik frezelemede freze eksenini ile malzeme eksenini çakışık, asimetrik frezelemede ise bu iki eksen arasında belirli bir kaçıklık olmasıdır. Her iki frezeleme yönteminde de takımın parça genişliği boyunca kaldırdığı talaş, temas açısı φ_s ile belirlenmektedir. Simetrik frezeleme yönteminde eksenler arasında bir kaçıklık olmadığı için temas açısı $\varphi_s = 180^\circ$ 'dir. Asimetrik frezelemede ise temas açısı, giriş φ_1 , çıkış φ_2 açılarına ve A_1 eksen kaçıklık mesafesine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi freze ile iş parçası arasında iyi bir temas sağlamak amacıyla genellikle $d > B$ olan kısmi frezeleme yöntemi tercih edilmektedir. Kısmi asimetrik frezelemeye göre temas açısı Denklem 3.22'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\varphi_s = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (3.22)$$

Tercih edilen frezeleme yöntemi olan kısmi asimetrik frezelemede $\varphi_1 = 0$ ve $A_1 = 0$ 'dır. Bu durumda Denklem 3.22'den görülebileceği gibi temas açısı $\varphi_s = \varphi_2$ olur. Bu eşitlikler göz önünde bulundurularak temas açısı;

$$\cos \varphi_s = \cos \varphi_2 = 1 - \frac{2 \cdot B}{d} \quad (3.23)$$

$$\cos \varphi_s = 1 - \frac{2 \cdot 2,92}{10}$$

$$\cos \varphi_s = 0,416 \quad \varphi_s = 65,42^\circ$$

olarak hesaplanır. Kesme esnasındaki ilerleme hızı V_f seçilen ve elde edilen değerler kullanılarak;

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot n \quad (mm/dk) \quad (3.24)$$

$$V_f = 0,5 \cdot 4 \cdot 3183,1$$

$$V_f = 6366,2 \text{ mm/dk} \text{ veya } V_f = 6,4 \text{ m/dk}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Ortalama talaş kalınlığı h_m ;

$$h_m = \frac{180}{\pi \cdot \varphi_s} \cdot f_z \cdot \sin(x) \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (mm) \quad (3.25)$$

$$h_m = \frac{180}{\pi \cdot 65,42} \cdot 0,5 \cdot \sin(90) \cdot (1 - 0,416)$$

$$h_m = 0,205 \text{ mm}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Talaş genişliği b , Denklem 3.26'da gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$b = \frac{a}{\sin x} \quad (mm) \quad (3.26)$$

$$b = \frac{1,75}{\sin 90} = 1,75 \text{ mm}$$

Ortalama talaş kesiti (A_s), ortalama talaş kalınlığı ve talaş genişliği değerleri kullanılarak Denklem 3.27’de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$A_s = b \cdot h_m \text{ (mm}^2\text{)} \quad (3.27)$$

$$A_s = 1,75 \cdot 0,205$$

$$A_s = 0,359 \text{ mm}^2$$

3.3.3.a. Ağır kesme işlemlerinde kesme kuvvetlerinin hesaplanması

Frezelemede talaş kaldırma sırasında kesme kuvvetlerinin değişken olması, hesaplamaların karmaşık hale gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle ortalama talaş kesitine karşılık gelen ortalama kesme kuvvetleri kullanılarak hesaplamalar daha kolay bir biçimde elde edilebilmektedir. Buradan hareketle bir dişe karşılık gelen ortalama kesme kuvveti (F_{sz}) Denklem 3.28’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$F_{sz} = b \cdot h_m \cdot k_s \quad (3.28)$$

$$F_{sz} = A_s \cdot k_s$$

$$F_{sz} = 0,359 \cdot 4800$$

$$F_{sz} = 1723,2 \text{ N}$$

Frezeleme işlemlerinde genellikle birden çok diş aynı anda malzeme ile temasta bulunarak talaş kaldırmaktadır. Aynı anda parça ile temasta bulunan diş sayısı (z_e);

$$z_e = Z \cdot \frac{\varphi_s}{360} \quad (3.29)$$

$$z_e = 4 \cdot \frac{65,42}{360}$$

$$z_e = 0,727$$

olarak hesaplanır. Aynı anda parça ile temasta bulunan diş sayısı ve diş başına ortalama kesme kuvveti göz önünde bulundurularak tüm frezeye ait ortalama kesme kuvveti (F_s);

$$F_s = z_e \cdot F_{sz} \quad (3.30)$$

$$F_s = 0,727 \cdot 1723,2$$

$$F_s = 1252,76 \text{ N}$$

olarak bulunur. Bu değer hesaplamalarda 1255 N olarak kullanılacaktır.

3.3.4. Ağır kesme şartlarında kesme gücünün hesaplanması

Kesme kuvvetleri bu tip mekanizmaların tasarımında mukavemet ve rijitliğin hesaplanmasının yanı sıra, gerekli talaş kaldırma gücünün hesaplanmasında da kullanılır. Kesme kuvveti (F_s) ve kesme hızı (V_c) motorun verdiği enerji ile sağlanır. Buna göre en ağır şartlarda kesme işlemini gerçekleştirmek için gerekli olan kesme gücü (P_s);

$$P_s = \frac{F_s \cdot V_c}{1000 \cdot 60} \text{ [kW]} \quad (3.31)$$

$$P_s = \frac{1255 \cdot 100}{1000 \cdot 60}$$

$$P_s = 2,091 \text{ kW}$$

olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan kartezyen robota uç işlevci (iş/fener mili) olarak hesaplamadan elde edilen değerin bir üst değeri olan 2,2 KW gücünde 3 fazlı ve 18.000 dv/dk hıza sahip Arel marka asenkron motor seçilmiştir.

3.4. X Ekseni Hesaplamaları

3.4.1. Bilyeli vidalı mil ve somun seçimi

Vidalı miller, vida-somun mekanizması yardımıyla doğrusal hareket elde edilmesini sağlayan makine elemanlarıdır. Hareket kabiliyetinin ve hassasiyetinin yüksek olması nedeniyle bilyeli vidalı miller tercih edilmiş ve bu millerin çap ve hatve değerlerini belirleyebilmek için gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Tasarımda kullanılan milin hareket ettireceği toplam ağırlık $G = 130 \text{ kg}$, maksimum hareket mesafesi 905 mm , boşta hareket hızı (maksimum iletim hızı) $V = 12 \text{ m/dk}$, en küçük adım aralığı (çözünürlük) $0,098 \mu\text{m}$ ve motor olarak adım motor (maksimum hızı 2400 dv/dk) seçilmiştir.

Çizelge 3.4. Tasarlanan kartezyen robotun tahmini çalışma değerleri

	Hız – Devir $m/dk - dv/dk$	Kesme Kuvveti (N)	İlerleme Direnci (N)	Kullanım Süresi (%)
Boşta İlerleme	12 – 2400	0	130	20
Hafif Kesme	6 – 1200	660	130	40
Orta Kesme	2 – 400	985	130	30
Ağır Kesme	1 – 200	1255	130	10

Kesme işlemi yapan kartezyen robotlar üzerindeki yük ve hız sürekli değişkendir. Bu nedenle mil ömrü ve mil seçimi gibi hesaplamalarda ortalama yük değeri kullanılmaktadır. Ortalama yük (F_e) Denklem 3.32’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$F_e = \left(\frac{F_1^3 \cdot n_1 \cdot t_1 + F_2^3 \cdot n_2 \cdot t_2 + \dots + F_n^3 \cdot n_n \cdot t_n}{n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2 + \dots + n_n \cdot t_n} \right)^{1/3} \quad (N) \quad (3.32)$$

$$F_e = \left(\frac{130^3 \cdot 2400 \cdot 20 + 790^3 \cdot 1200 \cdot 40 + 1115^3 \cdot 400 \cdot 30 + 1385^3 \cdot 200 \cdot 10}{2400 \cdot 20 + 1200 \cdot 40 + 400 \cdot 30 + 200 \cdot 10} \right)^{1/3}$$

$$F_e = 746,28 \text{ N veya } F_e = 74,63 \text{ daN}$$

Elde edilen bu değer kullanılarak mil üzerine gelecek maksimum yük kuvveti;

$$F_{max} = F_e \cdot 1,5 \quad (3.33)$$

$$F_{max} = 74,63 \cdot 1,5$$

$$F_{max} = 111,95 \text{ daN}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma koşullarındaki milin ortalama devir sayısı;

$$n_m = (n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2 + \dots + n_n \cdot t_n) / 100 \quad (dv/dk) \quad (3.34)$$

$$n_m = (2400 \cdot 20 + 1200 \cdot 40 + 400 \cdot 30 + 200 \cdot 10) / 100$$

$$n_m = 1100 \text{ dv/dk}$$

olarak elde edilmiştir. Mil seçimi yapılabilmesi için firmaların katalog bilgilerinde verilen minimum dinamik yük kapasitesi (C_a) ve gerekli statik yük kapasitesi (C_{oa}) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değerler, ortalama ve maksimum yük değerlerinin belirli bir emniyet katsayısı (f_s) ile çarpımı ile elde edilmektedir (Mendi 2006; Büyükaşahin 2006).

Gerekli minimum dinamik yük kapasitesi;

$$C_a = F_e \cdot f_s \text{ [daN]} \quad (3.35)$$

$$f_s = 2,5 \dots 7$$

$$C_a = 74,63 \cdot 7$$

$$C_a = 522,41 \text{ daN}$$

ve gerekli statik yük kapasitesi;

$$C_{oa} = F_{max} \cdot f_s \text{ [daN]} \quad (3.36)$$

$$f_s = 2,5 \dots 7$$

$$C_{oa} = 111,95 \cdot 7$$

$$C_{oa} = 783,65 \text{ daN}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değerler göz önünde bulundurularak Çizelge 3.5'ten DKM–1605FSU modeli mil ve 1605RSU silindirik somunlar seçilmiştir. Sistem üzerindeki en büyük yükü X eksen taşıyacağı için bu eksen miline iki adet somun bağlanmıştır.

Çizelge 3.5. Bilyeli vidalı mil seçim cetveli

Unit : mm

Model No.	Dimensions															
	d	l	Da	D	A	B	L	W	X	Type	H	Q	n	Ca (Kgf)	Coa (kgf)	K
1605-3	16	5	3.175	28	48	10	42	38	5.5	A	40	M8	3	765	1240	17
1605-4	16	5	3.175	28	48	10	50	38	5.5	A	40	M8	4	780	1790	17
1610-3	16	10	3.175	28	48	12	43.3	38	5.5	A	40	M8	3	716	1232	15
2005-4	20	5	3.175	38	58	10	53	47	6.6	A	44	M8	4	1100	2280	21
2504-4	25	4	2.381	40	62	11	46	51	6.6	A	48	M8	4	775	2045	33.4
2505-4	25	5	3.175	40	62	10	53	51	6.6	A	48	M8	4	1250	3070	26
2510-3	25	10	4.762	40	62	12	75	51	6.6	A	48	M8	3	1620	3205	26
2510-4	25	10	4.762	40	62	12	85	51	6.6	A	48	M8	4	1944	3877	27
3205-4	32	5	3.175	50	80	12	53	65	9	A	62	M8	4	1400	4080	32
3210-3	32	10	6.35	50	80	16	77.5	65	9	A	62	M8	3	2605	5310	34
3210-4	32	10	6.35	50	80	16	90	65	9	A	62	M8	4	3390	7170	34
4005-4	40	5	3.175	63	93	18	56	78	9	B	70	M8	4	1575	5290	38
4006-4	40	6	3.969	63	93	14	60	78	9	B	70	M8	4	1889	5317	53
4010-4	40	10	6.35	63	93	18	93	78	9	B	70	M8	4	3850	9470	41
5010-4	50	10	6.35	75	110	18	93	93	11	B	85	M8	4	4390	12400	50
6310-4	63	10	6.35	90	125	18	98	108	11	B	95	M8	4	5070	16600	80
6320-3	63	20	9.525	95	135	20	138	115	13.5	B	100	M8	3	8490	23610	74
8010-4	80	10	6.35	105	145	20	98	125	13.5	B	110	M8	4	5620	21300	90
8020-3	80	20	9.525	125	165	25	143	145	13.5	B	130	M8	3	6302	19008	86

Vida seçimi yapıldıktan sonra gerekli vida uzunluğunun da hesaplanması gerekmektedir. Tasarlanan sistemin X ekseni için gerekli vida uzunluğu;

$$L = \text{Strok} + \text{Somun uz.} + \text{Konstr. dolayı kayıp uz.} + \text{Uç Uz.} \quad (3.37)$$

$$L = 850 + 56 + 180 + 40$$

$$L = 1126 \text{ mm}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu uzunluktaki bilyeli vidalı mil için kritik hız değeri;

$$n_{kr} = f \cdot (d_r/L_v^2) \cdot 10^7 \quad (dv/dk) \quad (3.38)$$

ifadesi ile elde edilmektedir. Burada f iki ucu mafsallı ile tutturulmuş yataklamalar için öngörülen katsayıyı, d_r vidanın dış dibi çapını ve L_v vidalı milin yataklar arası mesafesini göstermektedir. Buna göre seçilen bilyeli vidalı mil için kritik hız değerinin,

$$n_{kr} = 21,9 \cdot \left(\frac{13,1}{1030^2} \right) \cdot 10^7 \quad (3.39)$$

$$n_{kr} = 2705 \text{ } dv/dk$$

olduğu görülmektedir. Kritik hız değeri motorun maksimum devir sayısı üzerinde olduğundan seçilen vidalı mil uygundur.

3.4.2. Vidalı mil sehimi hesabı

Vidalı miller üzerine gelen en yüksek kuvvet hızlanma sırasında oluşmaktadır. Buna göre hızlanma sırasında X eksenini mil üzerine gelen kuvvet;

$$F_H = F_{ilertleme} + \left(\frac{G \cdot V}{60 \cdot \Delta t} \right) \quad (N) \quad (3.40)$$

$$F_H = 130 + \left(\frac{130 \cdot 12}{60 \cdot 0,5} \right)$$

$$F_H = 182 \text{ } N$$

olarak elde edilir. Bu kuvvete maksimum kesme kuvvetini de ekleyecek olursak vidalı mile etki eden toplam kuvvet;

$$F_{vid.mil} = 1255 + 182 \quad (3.41)$$

$$F_{vid.mil} = 1437 \text{ } N$$

olur. Bu kuvvet altında mil üzerinde oluşacak sehim değeri Denklem 3.42'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada K ($kg/\mu m$) vidalı milin rijitlik katsayısını ve g (m/s^2) yerçekimi ivmesini belirtmektedir. Buna göre X eksenine için seçilen vidalı milin en ağır çalışma koşullarındaki sehim değeri;

$$D_{vid.mil} = F_{vid.mil} / (K \cdot g) \quad (\mu m) \quad (3.42)$$

$$D_{vid.mil} = 1437 / (17 \cdot 9,81)$$

$$D_{vid.mil} = 8,62 \mu m$$

olarak hesaplanmıştır. Sehim değeri takım diş sayısının azaltılması ve/veya takım çapının artırılması ile azaltılabilir.

3.4.3. X eksenine etki eden toplam kuvvetin bulunması

Doğrusal makaralar ve üzerinde hareket ettikleri rayların seçimi yapılırken olabilecek en kötü çalışma koşullarına göre hesaplamalar yapılacaktır. Hesaplamalar yapılırken X eksenine üzerinde en yüksek ataletleri oluşturabilmek için maksimum ivmeyle yapacağı hareketleri baz alınmıştır. Ayrıca çalışma şartı olarak en yüksek kesme kuvveti olan ağır çalışma koşulunda hesaplamalar yapılmıştır. X ekseninde hareket ettirilen toplam kütleden dolayı oluşan kuvvet;

$$G = M \cdot g \quad (3.43)$$

$$G = 130 \cdot 9,81$$

$$G = 1275 N$$

olarak elde edilmiştir. Z ekseninin – Z yönünde (aşağıya doğru) maksimum ivme ile yavaşlaması durumunda ortaya çıkan F_z kuvveti (tüm hesaplamalarda $\Delta t = 0,5$ s alınmıştır);

$$\alpha_{\max(z)} = V_{\max(z)} / \Delta t \quad (3.44)$$

$$\alpha_{\max(z)} = 0,2 / 0,5$$

$$\alpha_{\max(z)} = 0,4 \text{ m/s}^2$$

$$F_z = G_z \cdot \alpha_{\max(z)} \quad (3.45)$$

$$F_z = 30 \cdot 0,4$$

$$F_z = 12 \text{ N}$$

olarak hesaplanmıştır. Yine benzer yaklaşımla Y ekseninin +Y yönünde maksimum ivme ile yavaşlaması durumunda ortaya çıkan F_y kuvveti;

$$F_H = V_{\max(y)} / \Delta t \quad (3.46)$$

$$\alpha_{\max(y)} = 0,2 / 0,5$$

$$\alpha_{\max(y)} = 0,4 \text{ m/s}^2$$

$$F_y = G_y \cdot \alpha_{\max(y)} \quad (3.47)$$

$$F_y = 56 \cdot 0,4$$

$$F_y = 22,4 \text{ N}$$

olarak elde edilir. X ekseninde en yüksek atalet değerin elde edilebilmesi için ivmeli hareketinden dolayı oluşan kuvvet F_x ;

$$\alpha_{\max(x)} = V_{\max(x)} / \Delta t \quad (3.48)$$

$$\alpha_{\max(x)} = 0,2 / 0,5$$

$$\alpha_{\max(x)} = 0,4 \text{ m/s}^2$$

$$F_x = G_x \cdot \alpha_{\max(x)} \quad (3.49)$$

$$F_x = 130 \cdot 0,4$$

$$F_x = 52 \text{ N}$$

olarak hesaplanmıştır. En ağır şartlardaki kesme kuvveti de göz önünde bulundurularak ($F_s = 1255 \text{ N}$) X eksenine üzerine etki eden toplam kuvvet;

$$F_T = ((G + F_z)^2 + (F_{ilerleme} + F_s + F_x)^2 + F_y^2)^{1/2} \quad (3.50)$$

$$F_T = ((1275 + 12)^2 + (180 + 1255 + 52)^2 + 22,4^2)^{1/2}$$

$$F_T = 1966,73 \text{ N}$$

olarak elde edilir. X eksenini taşıyan dört adet araba bulunduğundan her bir araba üzerine düşen kuvvet $F_{araba} = 491,7 \text{ N}$ olarak hesaplanmıştır.

3.4.4. X eksen motor seçimi

X eksen yönünde etkiyen toplam kuvvet;

$$F = F_{ilerleme} + F_s + F_x \quad (N) \quad (3.51)$$

$$F = 130 + 1255 + 52$$

$$F = 1437 \, N$$

olarak hesaplanır ve bu kuvvet göz önünde bulundurularak gerekli motor gücü (P)

$$P = \frac{F \cdot V}{\eta} \quad (W) \quad (3.52)$$

$$P = \frac{1437 \cdot 0,2}{0,8}$$

$$P = 359,25 \, W$$

olarak hesaplanmıştır. DC 48 V gerilimle çalışan 350 W gücünde bir servo motorun ürettiği maksimum tork değeri 4,45 N.m'dir. Bu değer göz önüne alındığında X eksenindeki hareketi sağlaması için 8,5 N.m'lik adım motoru kullanılması uygundur.

3.5. Y Eksen Hesaplamaları

3.5.1. Bilyeli vidalı mil ve somun seçimi

Vidalı miller, vida-somun mekanizması yardımıyla doğrusal hareket elde edilmesini sağlayan makine elemanlarıdır. Hareket kabiliyetinin ve hassasiyetinin yüksek olması

nedeniyle bilyeli vidalı miller tercih edilmiş ve bu millerin çap ve hatve değerlerini belirleyebilmek için gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Tasarımda kullanılan milin hareket ettireceği toplam ağırlık $G = 56 \text{ kg}$, maksimum hareket mesafesi 400 mm , boşta hareket hızı (maksimum iletim hızı) $V = 12 \text{ m/dk}$, en küçük adım aralığı (çözünürlük) $0,098 \mu\text{m}$ ve motor olarak step motor (maksimum hızı 2400 dv/dk) seçilmiştir.

Çizelge 3.6. Tasarlanan kartezyen robotun tahmini çalışma değerleri

	Hız – Devir m/dk – dv/dk	Kesme Kuvveti (N)	İlerleme Direnci (N)	Kullanım Süresi (%)
Boşta İlerleme	12 – 2400	0	56	20
Hafif Kesme	6 – 1200	660	56	40
Orta Kesme	2 – 400	985	56	30
Ağır Kesme	1 – 200	1255	56	10

Kesme işlemi yapan kartezyen robotlar üzerindeki yük ve hız sürekli değişkendir. Bu nedenle mil ömrü ve mil seçimi gibi hesaplamalarda ortalama yük değeri kullanılmaktadır. Ortalama yük (F_e) Denklem 3.53'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$F_e = \left(\frac{F_1^3 \cdot n_1 \cdot t_1 + F_2^3 \cdot n_2 \cdot t_2 + \dots + F_n^3 \cdot n_n \cdot t_n}{n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2 + \dots + n_n \cdot t_n} \right)^{1/3} \quad (N) \quad (3.53)$$

$$F_e = \left(\frac{56^3 \cdot 2400 \cdot 20 + 660^3 \cdot 1200 \cdot 40 + 985^3 \cdot 400 \cdot 30 + 1255^3 \cdot 200 \cdot 10}{2400 \cdot 20 + 1200 \cdot 40 + 400 \cdot 30 + 200 \cdot 10} \right)^{1/3}$$

$$F_e = 687 \text{ N veya } F_e = 68,70 \text{ daN}$$

Elde edilen bu değer kullanılarak mil üzerine gelecek maksimum yük kuvveti;

$$F_{max} = F_e \cdot 1,5 \quad (3.54)$$

$$F_{max} = 68,70 \cdot 1,5$$

$$F_{max} = 103,05 \text{ daN}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma koşullarındaki milin ortalama devir sayısı;

$$n_m = (n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2 + \dots + n_n \cdot t_n) / 100 \quad (dv/dk) \quad (3.55)$$

$$n_m = (2400 \cdot 20 + 1200 \cdot 40 + 400 \cdot 30 + 200 \cdot 10) / 100$$

$$n_m = 1100 \text{ dv/dk}$$

olarak elde edilmiştir. Mil seçimi yapılabilmesi için firmaların katalog bilgilerinde verilen minimum dinamik yük kapasitesi (C_a) ve gerekli statik yük kapasitesi (C_{oa}) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değerler, ortalama ve maksimum yük değerlerinin belirli bir emniyet katsayısı (f_s) ile çarpımı ile elde edilmektedir.

Gerekli minimum dinamik yük kapasitesi;

$$C_a = F_e \cdot f_s \text{ [daN]} \quad (3.56)$$

$$f_s = 2,5 \dots 7$$

$$C_a = 68,70 \cdot 7$$

$$C_a = 480,9 \text{ daN}$$

ve gerekli statik yük kapasitesi;

$$C_{oa} = F_{max} \cdot f_s \text{ [daN]} \quad (3.57)$$

$$f_s = 2,5 \dots 7$$

$$C_{oa} = 103,05 \cdot 7$$

$$C_{oa} = 721,35 \text{ daN}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu eksen içinde X ekseninde olduğu gibi Çizelge 3.5'ten DKM-1605FSU modeli mil ve 1605RSU silindirik somunlar seçilmiştir.

Vida seçimi yapıldıktan sonra gerekli vida uzunluğunun da hesaplanması gerekmektedir. Tasarlanan sistemin Y eksenini için gerekli vida uzunluğu;

$$L = Strok + Somun \text{ uz.} + Konstr. \text{ dolaylı kayıp uz.} + Uç \text{ Uz.} \quad (3.58)$$

$$L = 400 + 56 + 260 + 40$$

$$L = 756 \text{ mm}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu uzunluktaki bilyeli vidalı mil için kritik hız değeri;

$$n_{kr} = f \cdot (d_r/L_v^2) \cdot 10^7 \quad (dv/dk) \quad (3.59)$$

ifadesi ile elde edilmektedir. Burada f iki ucu mafsallı ile tutturulmuş yataklamalar için öngörülen katsayıyı, d_r vidanın dış dibi çapını ve L_v vidalı milin yataklar arası mesafesini göstermektedir. Buna göre seçilen bilyeli vidalı mil için kritik hız değerinin,

$$n_{kr} = 21,9 \cdot (13,1/716^2) \cdot 10^7 \quad (3.60)$$

$$n_{kr} = 5597 \, dv/dk$$

olduğu görülmektedir. Kritik hız değeri motorun maksimum devir sayısı üzerinde olduğundan seçilen vidalı mil uygundur.

3.5.2. Vidalı mil sehimi hesabı

Vidalı miller üzerine gelen en yüksek kuvvet hızlanma sırasında oluşmaktadır. Buna göre hızlanma sırasında Y eksenini mil üzerine gelen kuvvet;

$$F_H = F_{ilerleme} + \left(\frac{G \cdot V}{60 \cdot \Delta t} \right) \quad (N) \quad (3.61)$$

$$F_H = 56 + \left(\frac{56 \cdot 12}{60 \cdot 0,5} \right)$$

$$F_H = 78,4 \, N$$

olarak elde edilir. Bu kuvvete maksimum kesme kuvvetini de ekleyecek olursak vidalı mile etki eden toplam kuvvet;

$$F_{vid.mil} = 1255 + 78,4 \quad (3.62)$$

$$F_{vid.mil} = 1333,4 \, N$$

olur. Bu kuvvet altında mil üzerinde oluşacak sehimi değeri ifade 3.63'teki gibi hesaplanmaktadır. Burada $K \, (kg/\mu m)$ vidalı milin rijitlik katsayısını ve $g \, (m/s^2)$ yerçekimi ivmesini belirtmektedir. Buna göre Y eksenini için seçilen vidalı milin en ağır çalışma koşullarındaki sehimi değeri;

$$D_{vid.mil} = F_{vid.mil} / (K \cdot g) \quad (\mu m) \quad (3.63)$$

$$D_{vid.mil} = 1333,4 / (17 \cdot 9,81)$$

$$D_{vid.mil} = 7,99 \mu m$$

olarak hesaplanmıştır. Sehim değeri takım diş sayısının azaltılması ve/veya takım çapının artırılması ile azaltılabilir.

3.5.3. Y eksenine etki eden toplam kuvvetin bulunması

X ekseninde yapılan hesaplamalara benzer olarak Y eksenindeki hesaplamalar da bu ekseninde bulunan doğrusal makaralar ve üzerinde hareketin sağlandığı rayların seçimi yapılırken en ağır çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yapılacaktır. Hesaplamalar yapılırken Y ekseninin maksimum ivmeyle yapacağı hareketler ve bu hareketler sonucu ortaya çıkacak olan en yüksek atalet kuvvetleri göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca en yüksek kesme kuvvetine ihtiyaç duyulan ağır çalışma şartlarına göre hesaplamalar yapılmıştır. Y ekseninde hareket ettirilen toplam kütleden dolayı oluşan kuvvet Denklem 3.64'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$G = M \cdot g \quad (3.64)$$

$$G = 56 \cdot 9,81$$

$$G = 549,36 N$$

Z ekseninin – Z yönünde (aşağıya doğru) maksimum ivme ile yavaşlaması durumunda ortaya çıkan F_z kuvveti (tüm hesaplamalarda $\Delta t = 0,5 s$ alınmıştır);

$$\alpha_{\max(z)} = V_{\max(z)} / \Delta t \quad (3.65)$$

$$\alpha_{\max(z)} = 0,2 / 0,5$$

$$\alpha_{\max(z)} = 0,4 \text{ m/s}^2$$

$$F_z = G_z \cdot \alpha_{\max(z)} \quad (3.66)$$

$$F_z = 30 \cdot 0,4$$

$$F_z = 12 \text{ N}$$

olarak hesaplanmıştır. Y ekseninin +Y yönünde maksimum ivme ile yavaşlaması durumunda ortaya çıkan F_y kuvveti;

$$\alpha_{\max(y)} = V_{\max(y)} / \Delta t \quad (3.67)$$

$$\alpha_{\max(y)} = 0,2 / 0,5$$

$$\alpha_{\max(y)} = 0,4 \text{ m/s}^2$$

$$F_y = G_y \cdot \alpha_{\max(y)} \quad (3.68)$$

$$F_y = 56 \cdot 0,4$$

$$F_y = 22,4 \text{ N}$$

olarak elde edilir. X ekseninde en yüksek atalet değerinin elde edilebilmesi için ivmeli hareketinden dolayı oluşan kuvvet F_x ;

$$\alpha_{\max(x)} = V_{\max(x)} / \Delta t \quad (3.69)$$

$$\alpha_{\max(x)} = 0,2 / 0,5$$

$$\alpha_{\max(x)} = 0,4 \text{ m/s}^2$$

$$F_x = G_x \cdot \alpha_{\max(x)} \quad (3.70)$$

$$F_x = 130 \cdot 0,4$$

$$F_x = 52 \text{ N}$$

olarak hesaplanmıştır. En ağır çalışma şartlarındaki kesme kuvveti de göz önünde bulundurularak ($F_s = 1255 \text{ N}$) Y eksenine üzerine etki eden toplam kuvvet;

$$F_T = \left((G + F_z)^2 + (F_s + F_x)^2 + (F_y + F_{ilerleme})^2 \right)^{1/2} \quad (3.71)$$

$$F_T = ((549,36 + 12)^2 + (1255 + 52)^2 + (22,4 + 56)^2)^{1/2}$$

$$F_T = 1424,61 \text{ N}$$

olarak elde edilir. Y eksenini taşıyan dört adet araba bulunduğundan her bir araba üzerine düşen kuvvet $F_{araba} = 356,1 \text{ N}$ olarak hesaplanmıştır.

3.5.4. Y eksenini motor seçimi

Y eksenine yönünde etkiyen toplam kuvvet;

$$F = F_{ilerleme} + F_s + F_y \quad (N) \quad (3.72)$$

$$F = 56 + 1255 + 22,4$$

$$F = 1333,4 \text{ N}$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu kuvvet göz önünde bulundurularak gerekli motor gücü (P);

$$P = \frac{F \cdot V}{\eta} \quad (W) \quad (3.73)$$

$$P = \frac{1333,4 \cdot 0,2}{0,8}$$

$$P = 333,35 \text{ W}$$

olarak hesaplanmıştır. Çalışma gerilimi DC 48 V ve gücü 350 W olan bir servo motorun ürettiği maksimum tork 4,45 N.m'dir. Bu değerler göz önünde bulundurularak Y eksenindeki hareketi sağlayabilmek için DC 48 – 80 V gerilimlerde çalışabilen 4,5 N.m tork üretebilen hibrit adım motoru tercih edilmiştir.

3.6. Z Ekseni Hesaplamaları

3.6.1. Bilyeli vidalı mil ve somun seçimi

Robotik sistemlerde sıklıkla kullanılan vidalı miller, vida-somun mekanizması yardımıyla doğrusal hareket elde edilmesini sağlayan makine elemanlarıdır. Hareket kabiliyetinin ve hassasiyetinin yüksek olması nedeniyle Z ekseninde bilyeli vidalı mil tercih edilmiştir. Bu millerin çap ve hatve değerleri gerekli hesaplamalar yapılarak belirlenmiştir.

Tasarımda kullanılan milin hareket ettireceği toplam ağırlık $G = 30 \text{ kg}$, maksimum hareket mesafesi 180 mm , boşta hareket hızı (maksimum iletim hızı) $V = 12 \text{ m/dk}$, en

küçük adım aralığı (çözünürlük) $0,098 \mu m$ ve eyleyici olarak hibrit adım motoru (*maksimum hızı* $2400 dv/dk$) seçilmiştir.

Çizelge 3.7. Tasarlanan kartezyen robotun tahmini çalışma değerleri

	Hız – Devir m/dk – dv/dk	Kesme Kuvveti (N)	İlerleme Direnci (N)	Kullanım Süresi (%)
Boşta İlerleme	12 – 2400	0	30	20
Hafif Kesme	6 – 1200	660	30	40
Orta Kesme	2 – 400	985	30	30
Ağır Kesme	1 – 200	1255	30	10

Kartezyen robotlarda kesme işlemi esnasında eksenler üzerindeki yük ve hız sürekli değişkendir. Bu nedenle mil ömrü ve mil seçimi gibi hesaplamaların yapılabilmesi için ortalama yük değeri kullanılması hesaplamalarda kolaylık sağlamaktadır. Ortalama yük (F_e);

$$F_e = \left(\frac{F_1^3 \cdot n_1 \cdot t_1 + F_2^3 \cdot n_2 \cdot t_2 + \dots + F_n^3 \cdot n_n \cdot t_n}{n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2 + \dots + n_n \cdot t_n} \right)^{1/3} (N) \quad (3.78)$$

$$F_e = \left(\frac{30^3 \cdot 2400 \cdot 20 + 690^3 \cdot 1200 \cdot 40 + 1015^3 \cdot 400 \cdot 30 + 1285^3 \cdot 200 \cdot 10}{2400 \cdot 20 + 1200 \cdot 40 + 400 \cdot 30 + 200 \cdot 10} \right)^{1/3} \quad (3.79)$$

$$F_e = 666,4 N \text{ veya } F_e = 66,64 daN$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Denklem 3.79’da hesaplanan bu değer kullanılarak mil üzerine gelecek maksimum yük kuvveti;

$$F_{max} = F_e \cdot 1,5 \quad (3.80)$$

$$F_{max} = 66,64 \cdot 1,5$$

$$F_{max} = 99,96 \text{ daN}$$

olarak hesaplanır. Çizelge 3.7’de belirtilen koşullarda milin ortalama devir sayısı;

$$n_m = (n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2 + \dots + n_n \cdot t_n) / 100 \quad (dv/dk) \quad (3.81)$$

$$n_m = (2400 \cdot 20 + 1200 \cdot 40 + 400 \cdot 30 + 200 \cdot 10) / 100$$

$$n_m = 1100 \text{ dv/dk}$$

olarak elde edilmiştir. Mil seçimi yapılabilmesi için firmaların katalog bilgilerinde verilen minimum dinamik yük kapasitesi (C_a) ve gerekli statik yük kapasitesi (C_{oa}) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değerler, ortalama ve maksimum yük değerlerinin belirli bir emniyet katsayısı (f_s) ile çarpımı ile elde edilmektedir.

Gerekli minimum dinamik yük kapasitesi;

$$C_a = F_e \cdot f_s \text{ [daN]} \quad (3.82)$$

$$f_s = 2,5 \dots 7$$

$$C_a = 66,64 \cdot 7$$

$$C_a = 466,48 \text{ daN}$$

ve gerekli statik yük kapasitesi;

$$C_{oa} = F_{max} \cdot f_s \text{ [daN]} \quad (3.83)$$

$$f_s = 2,5 \dots 7$$

$$C_{oa} = 99,96 \cdot 7$$

$$C_{oa} = 699,72 \text{ daN}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu eksen içinde X ve Y eksenlerinde olduğu gibi Çizelge 3.5'ten DKM-1605FSU modeli mil ve 1605RSU silindirik somunlar seçilmiştir.

Gerekli statik yük ve minimum dinamik yük kapasitesi göz önünde bulundurularak vida seçimi yapıldıktan sonra Z eksenini için gerekli vida uzunluğunun da hesaplanması gerekmektedir. Tasarlanan sistemin Z eksenini için gerekli vida uzunluğu;

$$L = Strok + Somun \text{ uz.} + Konstr. \text{ dolayı kayıp uz.} + Uç \text{ Uz.} \quad (3.84)$$

$$L = 180 + 56 + 90 + 40$$

$$L = 346 \text{ mm}$$

olarak hesaplanmıştır. Elde edilen uzunluktaki bilyeli vidalı mil için kritik hız değeri;

$$n_{kr} = f \cdot (d_r/L_v^2) \cdot 10^7 \quad (dv/dk) \quad (3.85)$$

ifadesi ile elde edilmektedir. Burada f iki ucu mafsallı ile tutturulmuş yataklamalar için öngörülen katsayıyı, d_r vidanın dış dibi çapını ve L_v vidalı milin yataklar arası mesafesini göstermektedir. Buna göre seçilen bilyeli vidalı mil için kritik hız değeri Denklem 3.86'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$n_{kr} = 21,9 \cdot (13,1/346^2) \cdot 10^7 \quad (3.86)$$

$$n_{kr} = 23964 \, dv/dk$$

Denklem 3.86’da hesaplanan kritik hız değeri motorun maksimum devir sayısı üzerinde olduğundan seçilen vidalı mil uygundur.

3.6.2. Vidalı mil sehimi hesabı

Hızlanma sırasında oluşan kuvvet çalışma koşullarına da bağlı olarak vidalı mil üzerine etki edecek en yüksek kuvvettir. Buna göre yukarı çıkarken hızlanma sırasında Z eksenini mil üzerine gelen kuvvet;

$$F_H = M \cdot g + \left(\frac{G \cdot V}{60 \cdot \Delta t} \right) \quad (N) \quad (3.87)$$

$$F_H = 30 \cdot 9,81 + \left(\frac{30 \cdot 12}{60 \cdot 0,5} \right)$$

$$F_H = 306,3 \, N$$

olarak elde edilir. Bilyeli vidalı mile etki eden toplam kuvvet Denklem 3.87’de elde edilen kuvvet değerine maksimum kesme kuvvetinin eklenmesiyle;

$$F_{vid.mil} = 1255 + 306,3 \quad (3.88)$$

$$F_{vid.mil} = 1561,3 \, N$$

şeklinde hesaplanır. Denklem 3.88’de hesaplanan kuvvet altında bilyeli vidalı mil üzerinde oluşacak sehimi değeri ifade 3.89’daki gibi hesaplanmaktadır. Burada K ($kg/\mu m$) vidalı milin rijitlik katsayısını temsil ederken g (m/s^2) yerçekimi ivmesini

belirtmektedir. Buna göre en ağır çalışma koşullarında Z eksenini için seçilen bilyeli vidalı milin sehim değeri;

$$D_{vid.mil} = F_{vid.mil} / (K \cdot g) \quad (\mu m) \quad (3.89)$$

$$D_{vid.mil} = 1561,3 / (17 \cdot 9,81)$$

$$D_{vid.mil} = 9,36 \mu m$$

olarak hesaplanmıştır. Takım diş sayısının azaltılması ve/veya takım çapının artırılması ile Denklem 3.89'da hesaplanan sehim değeri azaltılabilir.

3.6.3. Z eksenine etki eden toplam kuvvetin bulunması

Z eksenine etki eden toplam kuvvetin hesaplamaları yapılırken en kötü çalışma koşulları göz önünde bulundurulacaktır. Bu eksenindeki doğrusal makaralar ve üzerinde hareket ettikleri rayların seçimi yapılırken de bu çalışma koşullarına göre hesaplamalar yapılacaktır. Bu çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yapılan hesaplamalarda Z eksenini üzerinde en yüksek ataletleri oluşturabilmek için maksimum ivmeyle yapacağı hareketleri baz alınmıştır. Ayrıca en yüksek kesme kuvveti en ağır çalışma koşullarında meydana geleceğinden, hesaplamalar bu değerler kullanılarak yapılmıştır. Z ekseninde hareket ettirilen toplam kütleden dolayı oluşan kuvvet;

$$G = M \cdot g \quad (3.90)$$

$$G = 30 \cdot 9,81$$

$$G = 294,3 N$$

olarak elde edilmiştir. Z ekseninin – Z yönünde (aşağıya doğru) maksimum ivme ile yavaşlaması durumunda ortaya çıkan F_z kuvveti (tüm hesaplamalarda $\Delta t = 0,5$ s alınmıştır) ;

$$\alpha_{\max(z)} = V_{\max(z)} / \Delta t \quad (3.91)$$

$$\alpha_{\max(z)} = 0,2 / 0,5$$

$$\alpha_{\max(z)} = 0,4 \text{ m/s}^2$$

$$F_z = G_z \cdot \alpha_{\max(z)} \quad (3.92)$$

$$F_z = 30 \cdot 0,4$$

$$F_z = 12 \text{ N}$$

olarak hesaplanmıştır. Diğer eksenler için yapılan hesaplamalarda olduğu gibi Y ekseninin +Y yönünde maksimum ivme ile yavaşlaması durumunda ortaya çıkan F_y kuvveti;

$$\alpha_{\max(y)} = V_{\max(y)} / \Delta t \quad (3.93)$$

$$\alpha_{\max(y)} = 0,2 / 0,5$$

$$\alpha_{\max(y)} = 0,4 \text{ m/s}^2$$

$$F_y = G_y \cdot \alpha_{\max(y)} \quad (3.94)$$

$$F_y = 56 \cdot 0,4$$

$$F_y = 22,4 \text{ N}$$

olarak hesaplanır. X ekseninde en yüksek atalet değerin elde edilebilmesi için ivmeli hareketinden dolayı oluşan kuvvet F_x ;

$$\alpha_{\max(x)} = V_{\max(x)} / \Delta t \quad (3.95)$$

$$\alpha_{\max(x)} = 0,2 / 0,5$$

$$\alpha_{\max(x)} = 0,4 \text{ m/s}^2$$

$$F_x = G_x \cdot \alpha_{\max(x)} \quad (3.96)$$

$$F_x = 130 \cdot 0,4$$

$$F_x = 52 \text{ N}$$

olarak hesaplanmıştır. En ağır çalışma koşullarındaki kesme kuvveti de ($F_s = 1255 \text{ N}$) hesaplamalara dâhil edilerek Z eksenine etki eden toplam kuvvet;

$$F_T = ((G + F_z + F_{ilerleme})^2 + (F_s + F_x)^2 + (F_y)^2)^{1/2} \quad (3.97)$$

$$F_T = ((294,3 + 12 + 30)^2 + (1255 + 52)^2 + (22,4)^2)^{1/2}$$

$$F_T = 1308,36 \text{ N}$$

olarak elde edilir. Y ekseninde olduğu gibi Z ekseninde de eksen yükünü taşıyan dört adet araba bulunduğundan, kullanılan her bir araba üzerine düşen toplam kuvvet $F_{araba} = 327 \text{ N}$ olarak hesaplanmıştır.

3.6.4. Z eksen motor seçimi

Z eksen yönünde etkiyen toplam kuvvet;

$$F = F_{ilerleme} + F_z + F_s + G - F_{piston}(N) \quad (3.98)$$

$$F = 30 + 1255 + 294,3 + 12 - 220$$

$$F = 1371,3 \text{ N}$$

olarak hesaplanır ve bu kuvvet göz önünde bulundurularak gerekli motor gücü (P)

$$P = \frac{F \cdot V}{\eta} \quad (W) \quad (3.99)$$

$$P = \frac{1371,3 \cdot 0,2}{0,8}$$

$$P = 342,83 \text{ W}$$

olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer göz önünde bulundurularak servo motor seçilecek olursa, DC 48 V gerilimle çalışan 350 W gücünde bir servo motor maksimum 4,45 N.m tork üretmektedir. Bu değer göz önüne alındığında diğer eksenlerde olduğu gibi Z eksenindeki hareketin sağlanabilmesi için 4,5 N.m'lik adım motoru tercih edilmiştir.

3.7. Eksen Tahrik Motorları ve Sürücüleri

Tasarlanan kartezyen robotun eksenlerine hareket sağlamak amacıyla eyleyici olarak üç adet hibrit adım motoru kullanılmıştır. Kullanılan adım motorları X eksen için 8,5 N.m, Y ve Z eksenleri için ise 4,5 N.m tutma torkuna sahip olup bu motorların elektriksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.8'de sunulmuştur.

Çizelge 3.8. Eksenler için kullanılan adım motorlarının özellikleri

X Eksen		Y ve Z Eksenleri	
Motor Özellikleri	Değeri	Motor Özellikleri	Değeri
Step Açısı	1.8°	Step Açısı	1.8°
Bipolar Tutma Torku	8,5 N.m	Bipolar Tutma Torku	4,5 N.m
Akım/Faz	6,8 A	Akım/Faz	4,2 A
Direnç/Faz	0,5 Ω	Direnç/Faz	0,775 Ω
İnduktans/Faz	6 mH	İnduktans/Faz	6,76 mH
Uzunluk	118 mm	Uzunluk	80 mm
Ağırlık	3,8 kg	Ağırlık	2,3 kg

Bu tez çalışmasında tasarlanan üç serbestlik dereceli kartezyen robotun X, Y ve Z eksenleri eyleyicileri olarak kullanılan hibrit adım motorlarının sürülmesinde Şekil 3.9’da gösterilen Leadshine M880A marka mikro adım sürücüler kullanılmıştır. Sürücünün en önemli özelliği yapısında bulunan çift *H-Bridge* sürme devrelerinde kullanılan güç yarıiletkenlerinin anahtarlama frekanslarına bağlı olarak adım motorlarını bir turda, 400 adım ile 51200 adım arasında değişen adım aralıklarıyla sürebilmesidir. Ayrıca sürücü devre üzerinde motorların aşırı akım çekmesini önlemek için sürücü çıkış akımını sınırlayan dip anahtarlar bulunmaktadır. Tasarlanan kartezyen robotun konum ve kontur kontrolünün performansını artırmak amacıyla kullanılan tüm mikro adım sürücüler tur/51200 adım kipinde çalıştırılmış ve böylece hibrit adım motorlarının bir adımı 0,00703125°’lik açı değerine ayarlanmıştır. Ayrıca tasarımda kullanılan bilyeli vidalı miller her eksen için 5 mm hatve değerine sahiptir. Bu nedenle herhangi bir eksendeki adım motorunun bir tur dönmesi durumunda ilgili eksen 5 mm’lik öteleme hareketi yapacaktır.



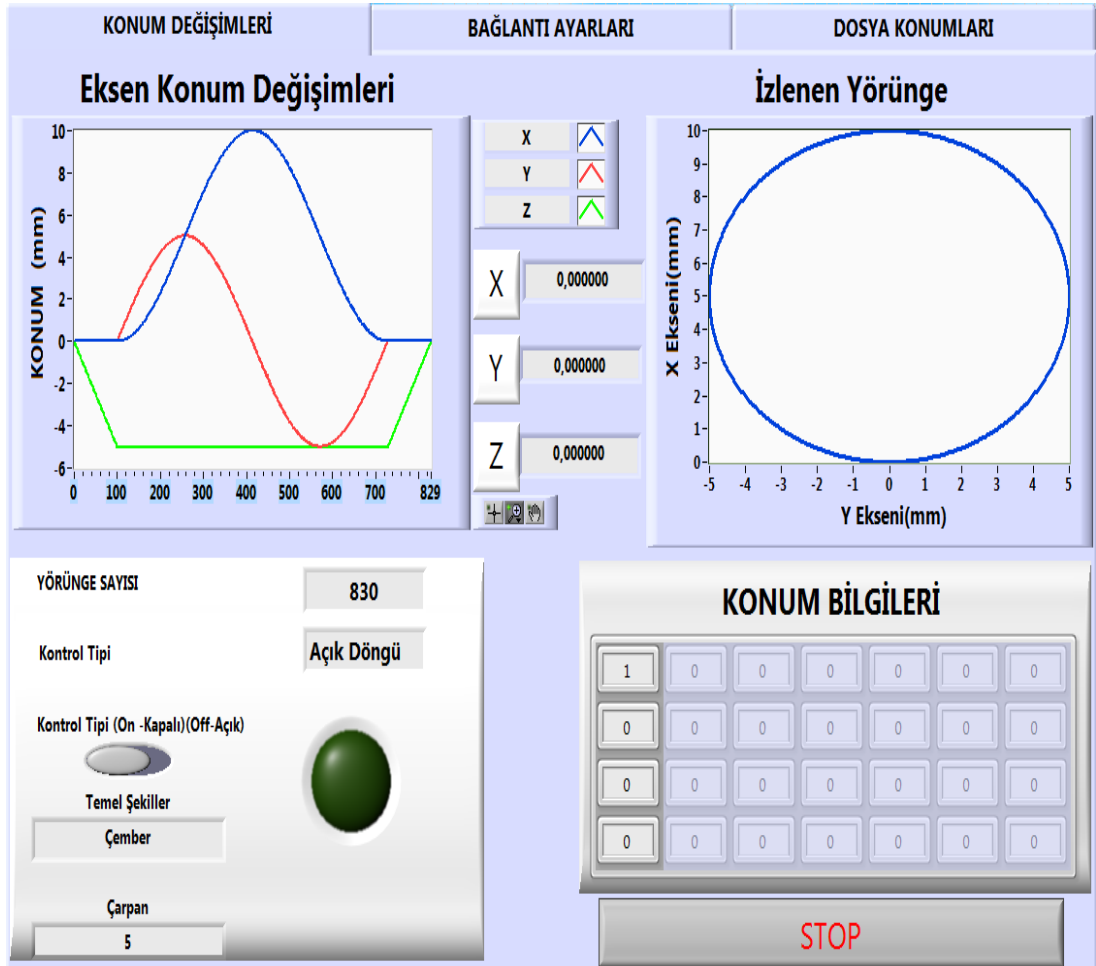
Şekil 3.9. Leadshine M880A mikro adım sürücüsü

3.8. Kartezyen Robotun Denetleyici Kartı ve Kullanıcı Arayüzü

Kartezyen robotun hareket denetiminin yapılabilmesi için öncelikle hareket için gerekli olan G kodlarının üretilmesi veya el yordamı ile girilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Labview programında bir kullanıcı arayüzü hazırlanmıştır. Üretilen G kodları bu arayüz programı aracılığıyla mikro denetleyici hafızasına aktarılmaktadır. Hazırlanan kullanıcı arayüzü ile anlık olarak hem her bir eksenin konum değişimi (arayüzde solda) ve hem de eksen hareketlerindeki değişim sonucunda ortaya çıkacak olan kontur (arayüzde sağda) görülebilmektedir.

Konum bilgileri alanına girilecek değerlerle X, Y ve Z eksenleri çalışma uzayı içerisinde arzu edilen konumlara taşınabilmektedir. Bu alandaki ilk satır yapılacak hareketin istenen sürede yapılabilmesi için süre bilgisinin kullanıcı tarafından girilebilmesi amacıyla yerleştirilmiştir. Hazırlanan arayüzde elmas, çember, üçgen, kare, beşgen vb. temel şekilleri çizdirebilmek için bir birim oluşturulmuş olup dışarıdan girilecek katsayı (çarpan) değeriyle de seçilen şeklin boyutları istenen değere ayarlanabilecek bir biçimde düzenlenmiştir. Ayrıca dışarıdan verilecek G kodlarının sisteme aktarımı için dosya

konumları sekmesi ve bilgisayar bağlantısı için bağlantı ayarları sekmesi oluşturulmuştur. Hazırlanan arayüzün ekran görüntüsü Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Kartezyen robot için hazırlanan kullanıcı arayüzü

Atmel’in SAM3X/E mikro denetleyici ailesinin bir üyesi olan AT91SAM3X8E mikro denetleyicisi 32-bit ARM Cortex-M3 mikro işlemciye sahip olup bu işlemci 84 MHz’lik çalışma frekansına sahiptir. Kullanılan mikro denetleyici yapısına ait genel özellikler Çizelge 3.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9. Kullanılan mikro denetleyici yapısının genel özellikleri

Özellik	Değer
Mikro Denetleyici	AT91SAM3X8E
Çalışma Gerilimi	3.3 V
Giriş Gerilimi	7 – 12 V
Dijital I/O portu	54
Analog Giriş Port Sayısı	12
Analog çıkış Port Sayısı	2
3.3 V ve 5V Port Maksimum Akımları	800 mA
I/O Portundan çekilebilecek maksimum Akım	130 mA
Genel amaçlı/PWM Zamanlayıcı Sayısı-	9/1
Flash Memory	512 kB
SRAM Hafızası	96 kB (64kB+32kB)
Saat Hızı	84 MHz

Kartezyen robot uç işlevcisinin çalışma uzayı içerisindeki herhangi bir konuma hareket ettirilmesi veya istenilen bir yörüngenin elde edilmesi gibi işlemlerin arzu edilen sürede yapılabilmesi için üretilen G kodlarının eyleyici olarak kullanılan adım motorları üzerinden eksenlere aktarılması gerekmektedir.

Kartezyen robotun yörünge takip ve kontur denetimi için hazırlanan arayüz sürekli olarak mikro denetleyici birimi ile haberleşmektedir. Tasarlanan kartezyen robotun istenilen konumlara hareket ettirilmesi veya arzu edilen bir şeklin robot uç işlevcisinin hareketleri ile elde edilmesi için konum bilgileri arayüz üzerinden mikro denetleyici ünitesine gönderilmektedir. Bu gönderim işlemi ile eş zamanlı olarak mikro denetleyici ünitesi her bir eksendeki doğrusal konum sezicilerden gelen motor konumlarını USB port üzerinden arayüz programına göndermekte olup arayüz üzerinde her bir eksenin konumu anlık olarak takip edilebilmektedir.

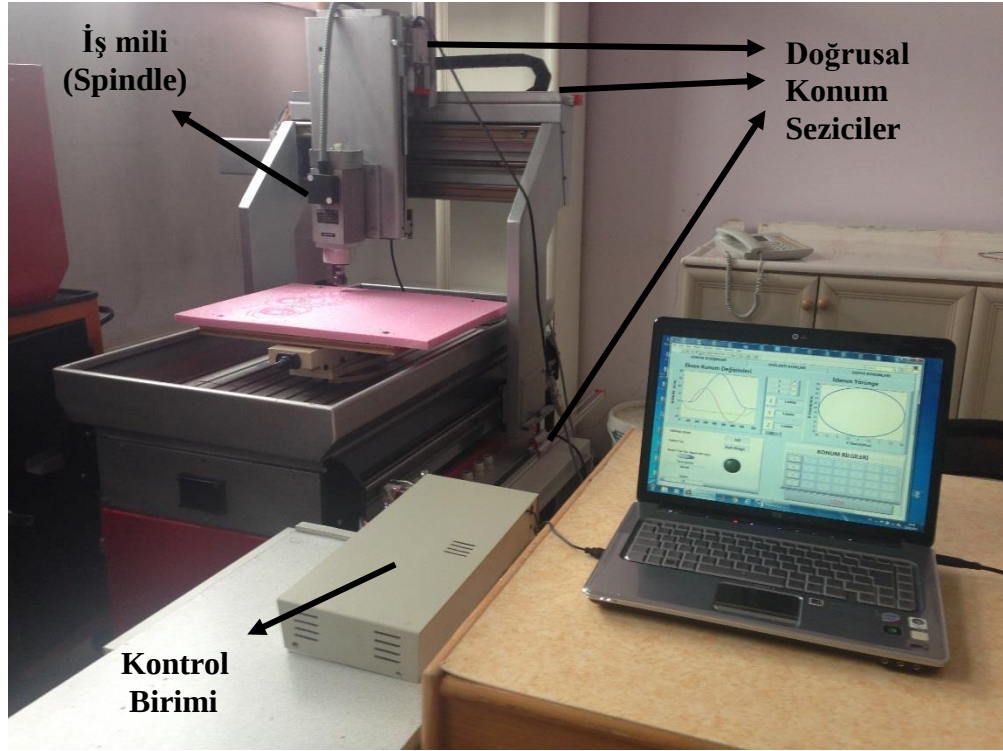
Mikro denetleyici ünitesine arayüz üzerinden gönderilen konum bilgileri ile arzu edilen konum veya şekillerin elde edilebilmesi için C programlama dilinde yazılan yazılım aracılığıyla gerekli olan adım sayıları hesaplanarak sürücü devreler üzerinden motorlara aktarılmaktadır. Kartezyen robotun tercih edilen kontrol yöntemine bağlı olarak verilen bir konuma hareket ettirilmesi veya verilen bir yörüngeyi takibinin gerçekleştirilmesi için her bir adım motorunun kontrollü olarak hesaplanan konum değerlerine arzu edilen sürede ve eş zamanlı olarak ulaşılabilmesi gerekmektedir.

Geliştirilen bir yazılım sayesinde mikro denetleyicinin sayıcı-zamanlayıcı özelliği kullanılarak her bir doğrusal konum seziciden gelen motor konum bilgileri eş zamanlı olarak mikro denetleyicinin sayısal girişlerinden okutulabilmektedir. Ayrıca doğrusal konum sezicilerden alınan bilgiler ve tercih edilen kontrol tipine bağlı olarak her bir mikro adım sürücüsünün arzu edilen konumlar için gerek duyulan darbe dizileri ve motor yön bilgileri yine eş zamanlı olarak mikro denetleyicinin dijital çıkışlarından sürücülere gönderilebilmektedir.

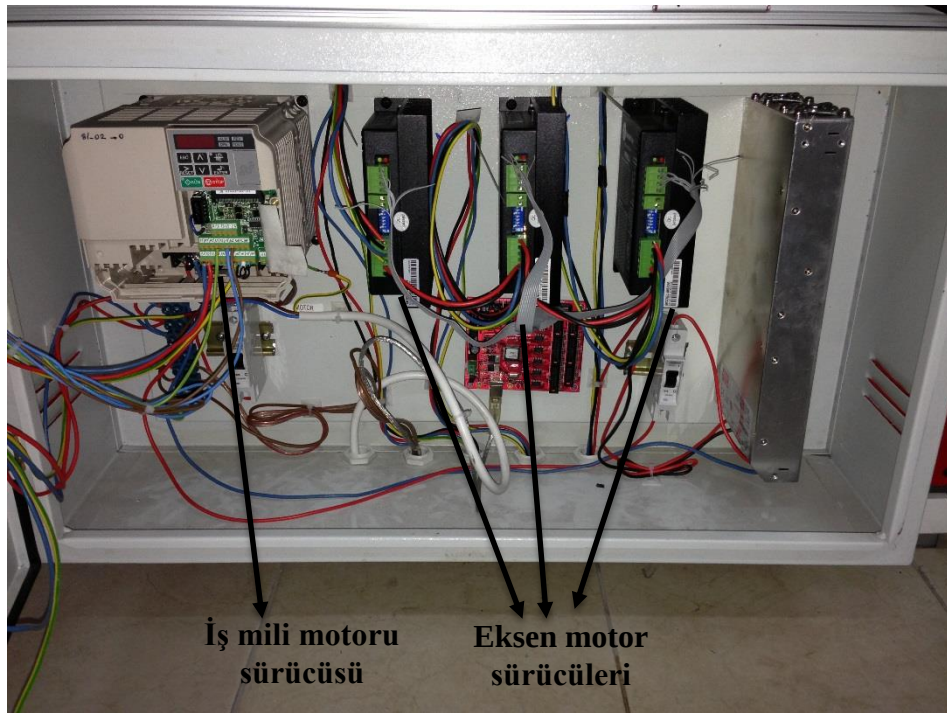
Mikro adım sürücüleri alınan bu bilgilere göre adım motorlarının faz girişlerini uyartarak motor millerinin belirlenen sürede arzu edilen açısal konumlara getirilmesini ve böylece motor millerine bağlı olan bilyeli vidalı mil-somun mekanizması aracılığıyla da uç işlevcinin kartezyen uzayda arzu edilen konumlara ulaşılabilmesini sağlamaktadır.

3.9. Tasarımı Gerçekleştirilen Kartezyen Robot

Tez çalışmasının bu bölümünde, tasarlanan üç serbestlik dereceli kartezyen robotun tasarımında kullanılan malzemelerin detayları ve bu malzemelerin seçimi için gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır. Bu bilgilere ve yapılan hesaplamalara göre gerekli olan malzemeler seçilerek üç serbestlik dereceli kartezyen robot Şekil 3.11’de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen robotun eksen hareketlerini ve uç işlevcinin hız kontrolünü sağlamak için gerekli olan sürücü birimi Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Tasarımı gerçekleştirilen üç serbestlik dereceli kartezyen robot



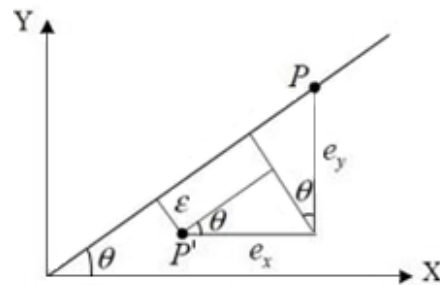
Şekil 3.12. Eksen motor sürücüler ve iş mili motor sürücüsü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Genel olarak bir robot kolunun dinamik performansı, etkili bir kontrol algoritması kullanılması ve uygun dinamik modelin elde edilmesine bağlıdır. Kontrol işlemi ise, elde edilen robot dinamik modelinin arzu edilen sistem cevap ve performansını sağlaması için uygun algoritma üretilmesidir (Bingül ve Küçük 2009). Bu amaçla tez çalışmasının bu bölümünde tasarlanan üç serbestlik dereceli kartezyen robotun daha önce elde edilen kinematik ve dinamik eşitlikleri kullanılarak bilgisayar benzetimleri yapılmıştır. Bilgisayar benzetimlerinde tasarlanan kartezyen robotun yörünge takip ve kontur kontrolü performansını incelemek amacıyla sabit mıknatıslı doğru akım motorları kullanılmış olup benzetimlerde bu robot yapısına PID, Luenberger gözleyici tabanlı PID ve ileri beslemeli hesaplanan tork kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Gerçek zamanlı deneylerde adım motorları kullanılmış olup açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol durumlarında yörünge takibi ve kontur hatalarının değişimi incelenmiştir.

4.1. Kontur (Contour) Hatasının Hesaplanması

Eksenler arasındaki eş zamansızlık probleminden ortaya çıkan kontur hatası arzu edilen yörünge ile izlenen yörünge arasındaki en kısa mesafe olarak tanımlanmakta olup eksenlerin yörünge izleme hatalarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Kontur hatası doğrusal ve dairesel yörüngeler için farklı hesaplamalar yapılarak elde edilmektedir. Tasarlanan kartezyen robot sistemi uç işlevcisinin yaptığı doğrusal kontur hatalarının hesaplanmasında kullanılan şematik diyagram Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

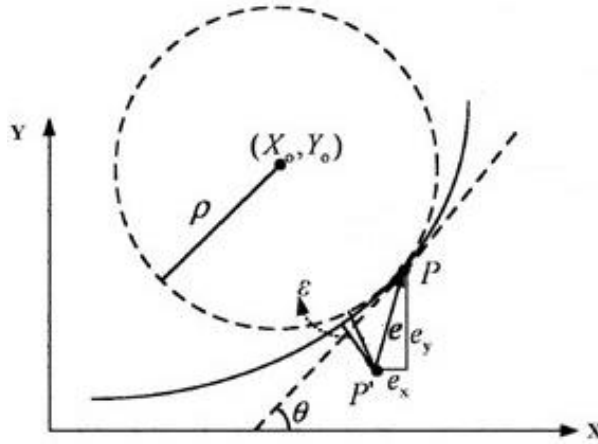


Şekil 4.1. Doğrusal kontur (contour) hatası (Wang *et al.* 2009)

Şekil 4.1’de P arzu edilen konumu, P' mevcut konumu, e_x, e_y izleme hatalarını ve ε kontur hatasını göstermektedir. Doğrusal kontur hatası Denklem 4.1’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = e_y \cos \theta - e_x \sin \theta \quad (4.1)$$

Dairesel yörüngelerde meydana gelen kontur hatalarının hesaplanmasına ait şematik diyagram Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Dairesel kontur (contour) hatası (Wang *et al.* 2009)

Şekil 4.2’de P arzu edilen konumu, P' mevcut konumu, e_x, e_y izleme hatalarını, ρ dairenin yarıçapını ve ε kontur hatasını göstermektedir. Dairesel kontur hatası Denklem 4.2’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

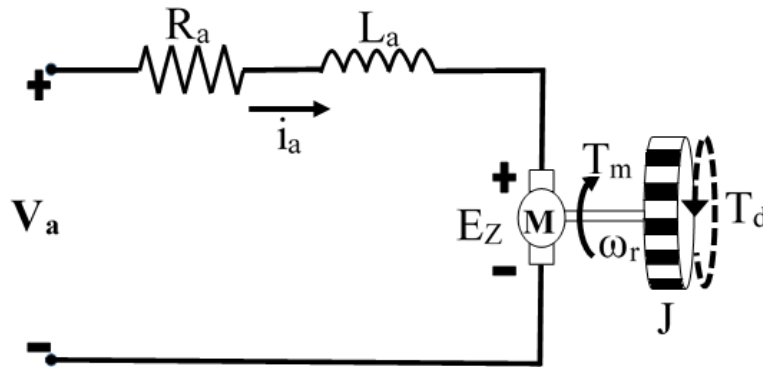
$$\varepsilon = \left(\frac{e_y}{2\rho} + \cos \theta \right) e_y - \left(\sin \theta - \frac{e_x}{2\rho} \right) e_x \quad (4.2)$$

Tasarlanan kartezyen robot sisteminin uç işlevcisinin yaptığı kontur hataları Denklem 4.1 ve 4.2’de verilen ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır.

4.2. PID Kontrol

Tasarlanan üç serbestlik dereceli kartezyen robotun eksen hareketlerini sağlamak amacıyla eyleyici olarak doğru akım motoru seçilmiş olup robot hareketlerinin kontrol edilebilmesi için öncelikle bu motorun dinamik modeli çıkarılmıştır. Elde edilen diferansiyel denklemler dördüncü dereceden Runge – Kutta yöntemi kullanılarak MATLAB ortamında çözülmüştür. Bu denklemlerin çözümünden elde edilen değerlere bağlı olarak kartezyen robotun yörünge takip ve kontur kontrolü PID kontrol yöntemi ile sağlanmıştır.

Doğru akım motorları elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektromekanik bir sistemdir. Motor milinden elde edilecek tork değeri oluşturulan manyetik akı ve armatür akımıyla doğru orantılıdır (Bir 1999). Sabit mıknatıslı doğru akım motorlarında uyarım sargısındaki manyetik akı sabit tutulacağından armatür gerilimindeki değişim armatür akımının değişmesine neden olacaktır. Manyetik akının sabit olması motora uygulanacak olan giriş gerilimi ile motor milinin açısal hız ve konumunun kontrol edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle DC motorlar modellenirken hem elektriksel hem de mekanik analizinin yapılması gerekmektedir. DC motor kullanılan elektromekanik bir sisteme ait şematik diyagram Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. DC motor kullanılan bir elektromekanik sistemin genel yapısı

Kirchoff'un gerilimler kanunu kullanılarak eşdeğer devrenin gerilim denklemi;

$$V_a = V_R + V_L + E_z \quad (4.3)$$

şeklinde elde edilir. Denklem 4.3'de V_R direnç üzerindeki gerilimi, V_L bobin üzerindeki gerilimi ve E_z ise üretilen zıt elektromotor kuvvetini göstermektedir. Denklem 4.3 eşitliğinde verilen gerilimler;

$$V_R = i_a R_a \quad , \quad V_L = L_a \frac{di_a}{dt} \quad , \quad E_z = k_v \omega_r \quad (4.4)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Denklem 4.4'de i_a armatür akımını, R_a armatür sargı direncini, L_a armatür bobinin indüktansını, k_v sabit mıknatısların akı yoğunluğu tarafından belirlenen hız sabitini ve ω_r armatürün açısal hızını göstermektedir. Denklem 4.4'de elde edilen değerler Denklem 4.3'de yerine yazılacak olursa;

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_v \omega_r \quad (4.5)$$

eşitliği elde edilir. Motorun milindeki mekanik sistemin hareket eşitlikleri;

$$T_m = k_t i_a = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_d \quad (4.6)$$

şeklinde elde edilir. Burada T_m elektromanyetik torku, J rotor ve miline bağlı mekanik yükün atalet momentini, B sürtünme katsayısını, k_t sabit mıknatısların akı yoğunluğu tarafından belirlenen tork sabitini ve T_d yük torkunu göstermektedir (Bir 1999).

Denklem 4.5 ve 4.6'da elde edilen diferansiyel denklemlerin, sistemin durum uzay modelini oluşturmak için düzenlenmiş hali Denklem 4.7 ve 4.8'de verilmiştir

$$\frac{di_a}{dt} = (V_a - i_a R_a - k_v \omega_r) / L_a \quad (4.7)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = k_t i_a - B\omega_r - T_d \quad (4.8)$$

Sabit uyarımlı doğru akım motorunun armatür akımı ve açısal hızı için Denklem 4.8’de elde edilen diferansiyel eşitliklerin durum uzay gösterimi Denklem 4.9’da sunulmuştur.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k_v}{L_a} \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_d \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Denklem 4.7 ve Denklem 4.8’deki ifadelerin başlangıç şartları sıfır kabul edilerek Laplace dönüşümü;

$$s i_a(s) = -\frac{R_a}{L_a} i_a(s) - \frac{k_v}{L_a} \omega_r(s) + \frac{1}{L_a} V_a(s) \quad (4.10)$$

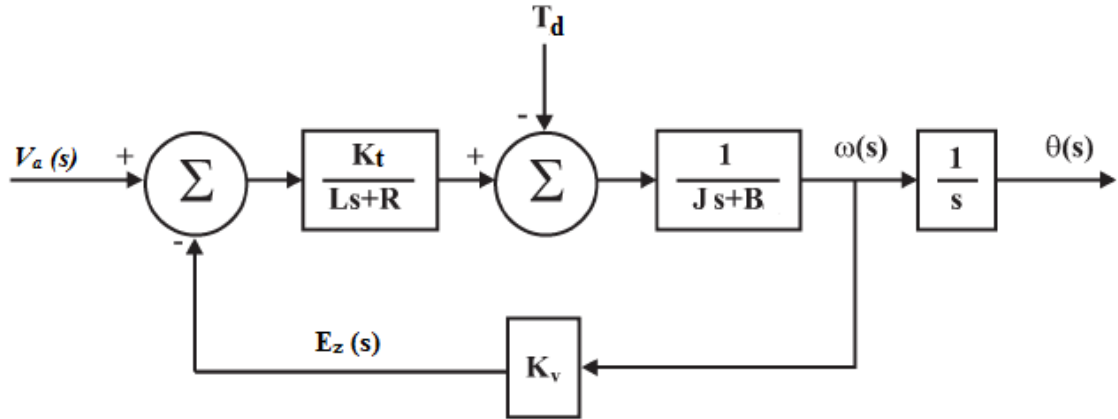
$$s\omega_r(s) = \frac{k_t}{J} i_a(s) - \frac{B}{J} \omega_r(s) - \frac{1}{J} T_d(s) \quad (4.11)$$

şeklinde elde edilir. Elde edilen bu ifadeler düzenlenerek Denklem 4.12 ve 4.13’de gösterilmiştir.

$$i_a(s) = \frac{-k_v \omega_r(s) + V_a(s)}{sL_a + R_a} \quad (4.12)$$

$$\omega_r(s) = \frac{-k_t i_a(s) - T_d(s)}{sJ + B} \quad (4.13)$$

Bu ifadelerden elde edilen blok diyagram Şekil 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.4. Modellenen doğru akım motoruna ait blok diyagram

Şekil 4.4’deki blok diyagram göz önünde bulundurularak tüm sistemin transfer fonksiyonu;

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t / (L_a J)}{s[s^2 + s[(R_a J + L_a B)] + (R_a B + K_t K_v) / (L_a J)]} \quad (4.14)$$

şeklinde elde edilir. Transfer fonksiyonu elde edilen doğru akım motorunun benzetimde kullanılan parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Doğru akım motoru parametreleri

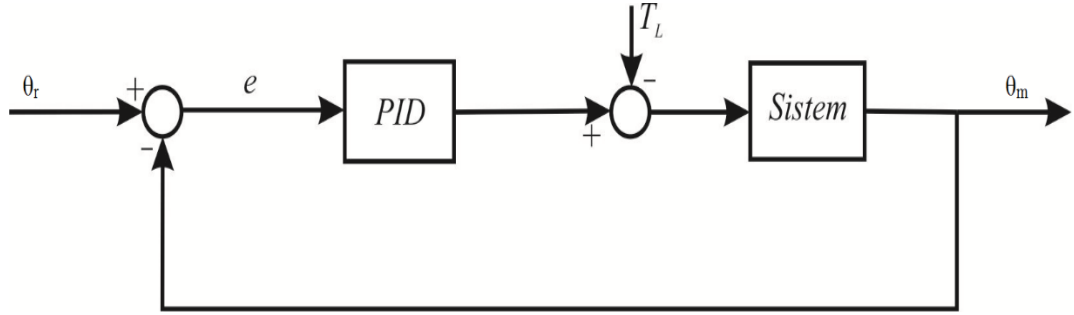
Parametre	Değer
Giriş Gerilimi (V _a)	36 V
Armatür Direnci (R _a)	1,4 Ω
Armatür İndüktansı (L _a)	0,00805 H
Rotor Ataleti (J)	0,00434 kg/m ²
Tork Sabiti (k _t)	0,095
Armatür Akımı (yüksüz)	1,62 A
Sürtünme Katsayısı (B)	0,07812 N.m/s

Endüstriyel uygulamaların vazgeçilmez kontrolcüsü olan PID denetleyici yapısının zaman ve s-domenlerindeki ifadesi sırasıyla Denklem 4.15 ve 4.16’da gösterilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.15)$$

$$u(s) = K_p + K_I s^{-1} + s K_D \quad (4.16)$$

Elde edilen tüm sistem eşitlikleri MATLAB ortamında kodlanarak benzetim gerçekleştirilmiştir. PID kontrol ilave edilen sistemin blok diyagramı Şekil 4.5’te gösterilmiştir. Sistemin giriş büyüklüğü doğru akım motorunun armatür akımı, çıkış büyüklüğü ise her bir ekseninde meydana gelen açısal konum değişimidir.



Şekil 4.5. Sistemin PID kontrol blok diyagramı

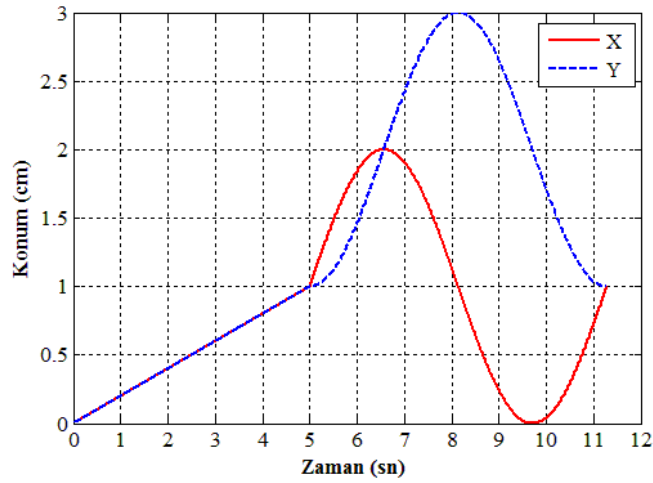
Kartezyen robotun yörünge takip ve kontur performansını incelemek amacıyla hem doğrusal ve hem de dairesel hareketlerin yapılacağı bir yörünge tanımlanmıştır.

$$\left. \begin{matrix} x = 1 \\ y = 1 \end{matrix} \right\} \quad t \leq 5 \quad (4.17)$$

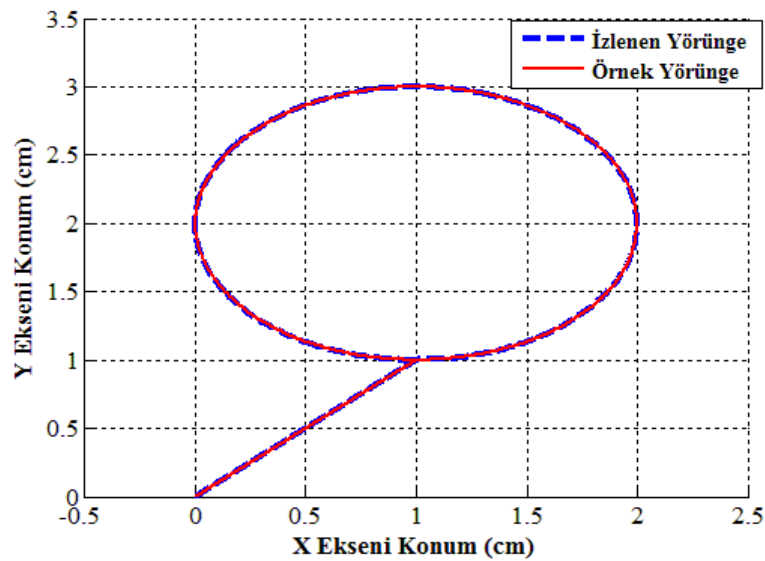
$$\left. \begin{matrix} x = \cos \theta \\ y = 1 + \sin \theta \end{matrix} \right\} \quad 5 < t \leq 5 + 2\pi \quad (4.18)$$

Kartezyen robot için tanımlanan yörüngelerin gerçekleştirilmesini sağlayacak olan eksenlerin konum değişimleri, PID kontrol blok diyagramında gösterilen θ_r referans

açısız konum olarak kontrol sistemine giriş olarak uygulanmaktadır. Denetleyici performansını en iyi düzeye getirecek olan kazanç parametreleri Bode diyagramları göz önünde tutularak $K_p = 3,05$, $K_I = 0,219$ ve $K_d = 2,95$ değerlerine ayarlanmış ve yörünge örnekleme adımı 10 Hz olarak belirlenmiştir. Denklem 4.17 ve 4.18’de tanımlanan eşitliklere göre X ve Y eksenlerindeki motorların izlemesi gereken yörüngeler Şekil 4.6’da ve arzu edilen şekil ile kartezyen robotun PID kontrolü sonucu izlediği yörünge Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

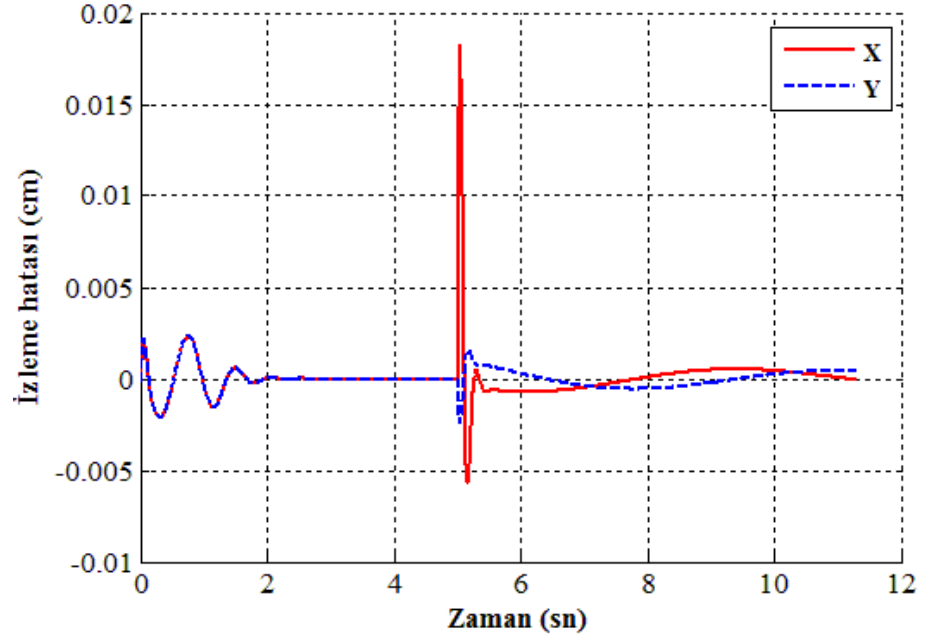


Şekil 4.6. Kartezyen robotun X ve Y eksenlerinin izlemesi gereken yörüngeler

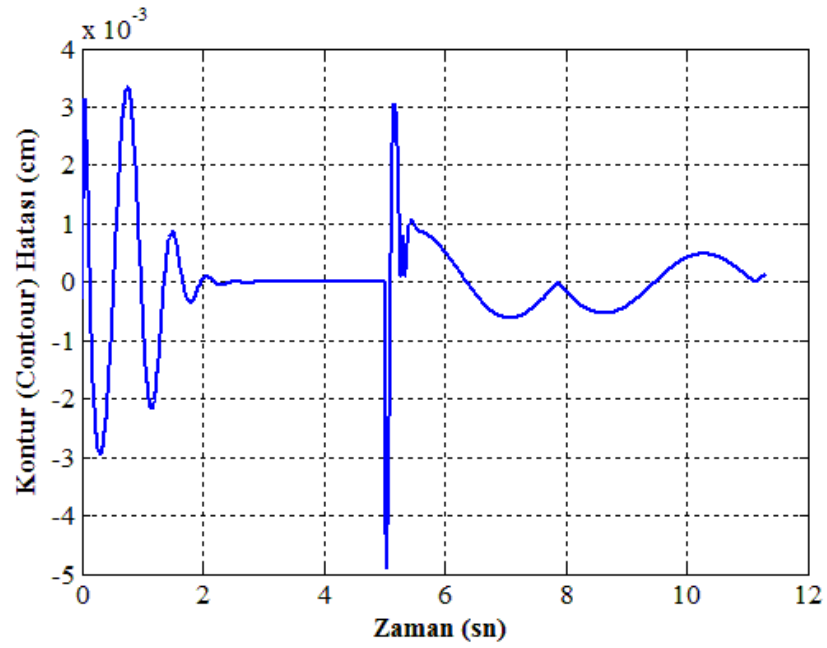


Şekil 4.7. Arzu edilen yörünge ve uç işlevcinin izlediği yörünge

Tanımlanan yörüngeler için kartezyen robot uç işlevcisinin yapmış olduğu izleme ve kontur hataları sırasıyla Şekil 4.8 ve 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.8. X ve Y eksenlerindeki yörünge izleme hataları

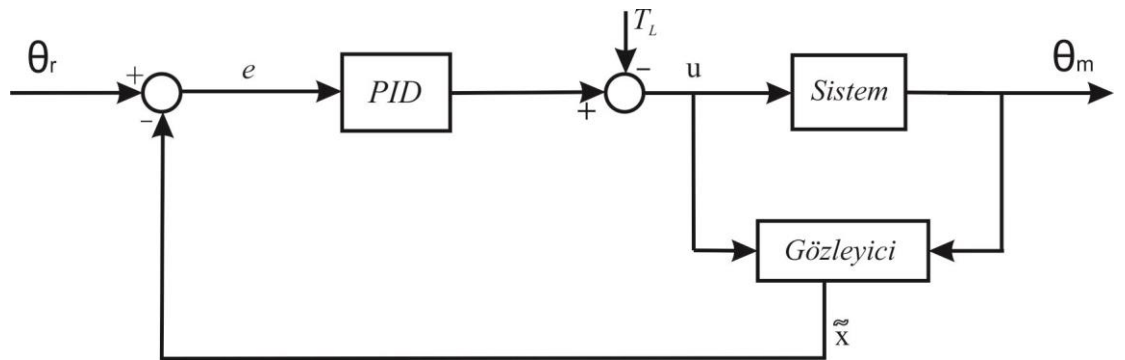


Şekil 4.9. Kontur (Contour) Hatası

Elde edilen yörünge izleme hataları incelendiğinde doğrusal hareket gerçekleştirilirken arzu edilen yörünge için yaklaşık iki saniye sonra yakalandığı, doğrusal hareketin tamamlanıp dairesel hareketin başladığı durumdaki hata değerinin yaklaşık 180 μm ve kalıcı durum hatasının yaklaşık 10-15 μm olduğu görülmektedir. Oluşan bu hatalara bağlı olarak hesaplanan kontur hata değerinin dairesel hareket başlangıcında yaklaşık 40 μm olduğu görülmektedir. Ayrıca bu kontrol yapısının kullanılması durumunda yapılan benzetimin gerçekleşme süresi 0,7800 saniye olarak ölçülmüştür.

4.3. Luenberger Gözleyici Tabanlı PID Kontrol

PID denetleyici yapısı kullanılması durumunda elde edilen hata değerlerini azaltmak ve kontrolcünün performansını artırmak amacıyla sisteme bir gözleyici yapısı ilave edilmiştir. Bu gözleyici yapısı sistemin anlık olarak çıkış bilgisi ile tahmin edilen çıkış bilgisinin farkını alıp hesaplanan bir L kazanç matrisi ile çarparak sisteme dahil etmektedir. Tasarlanan bu yapı ile hem referans yörünge için daha hızlı yakalanması ve hem de hata değerlerinin azaltılması sağlanmıştır. Gözleyici yapısının tasarımında kullanılan tüm hesaplamalar bu bölümde detaylı olarak verilmiş olup gözleyici tabanlı kontrol yapısına ait blok diyagram Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Gözleyici tabanlı PID kontrol blok diyagramı

Durum uzayı biçiminde verilen bir sistemin tanımı;

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.19)$$

$$y = Cx \quad (4.20)$$

şeklinde yapılmaktadır. Burada A sistem matrisini; B giriş sinyalini ölçekleyen vektörü, C çıkış katsayı matrisini, x durum değişkenlerini içeren durum vektörünü, y çıkış vektörünü ve u giriş sinyalini göstermektedir. Bu yapıya sahip bir sisteme ilave edilecek Luenberger gözleyicinin tanımı;

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (4.21)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (4.22)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu eşitliklerdeki $\hat{}$ simgesi tahmin edilen değerleri ve L gözleyici kazanç matrisini göstermektedir. Gözleyici tasarımındaki problem $\hat{x}$ gözleyici durum değişkeni değerinin, x durum değişkenine yaklaşmasını sağlayacak bir L matrisinin elde edilmesidir. Denklem 4.21'deki ifade

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + LCx \quad (4.23)$$

şeklinde düzenlenebilir. Gözleyici kazanç matrisinin belirlenebilmesi için durum uzayı formunda verilen sistemin gözlenebilirlik durumunun incelenmesi gerekmektedir. Bu inceleme sayesinde ancak gözleyicinin tam mertebeli veya azaltılmış mertebeli olarak tasarlanmasına karar verilebilecektir. Gözleyici tipinin ve gözleyici durum uzay modelinin belirlenebilmesi için öncelikle A, B ve C matrislerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu matrisler Denklem 4.24'te gösterilmiştir

$$A = \begin{bmatrix} -173.9130 & -11.8012 \\ 21.8894 & -18.0000 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 124.2236 & 0 \\ 0 & -230.4147 \end{bmatrix} C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Durum uzayı formunda tanımlanan çok giriş çok çıkışlı sistemler için gözlenebilirlik kuralı Denklem 4.25'te gösterilmiştir.

$$Q = \text{rank} \left(\begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \right) \quad (4.25)$$

Bu hesaplama MATLAB ortamında $Q = \text{rank}(\text{obsv}(A, C))$ komutu kullanılarak çok basit bir şekilde yapılabilir. Bir sistemin durum gözlenebilir olabilmesi için hesaplanan Q değerinin durum değişkeni sayısına eşit olması gerekmektedir. Tasarlanan sistem için Denklem 4.25'teki Q değeri MATLAB ortamında $Q = \text{rank}(\text{obsv}(A, C))$ komutu ile hesaplanmış ve sonuç $Q = 2$ olarak bulunmuştur. Bu değer, durum değişkeni sayısına eşit olduğundan tasarlanan sistemin durum gözlenebilir olduğunu ve L kazanç matrisinin keyfi olarak belirlenebileceğini göstermektedir. Ancak kazanç matrisi hesaplanırken gözleyicinin sistemdeki ani ve hızlı değişimleri daha çabuk sezerek durum vektörünü üretebilmesi için gözleyici özdeğerleri sistem özdeğerlerinden 2 ile 5 kat daha hızlı olacak şekilde ayarlanmalıdır. Ayrıca $A - LC$ matrisinin özdeğerleri sol yarı düzlemde olacak şekilde seçilmelidir. Çünkü bir gözleyicinin dinamik davranışı $A - LC$ matrisi tarafından belirlenmektedir. Gözleyicinin hata dinamiği Denklem 4.26 ve 4.27'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır (Luenberger 1971; Ellis 2002; Spong *et al.* 2006; Efe 2012).

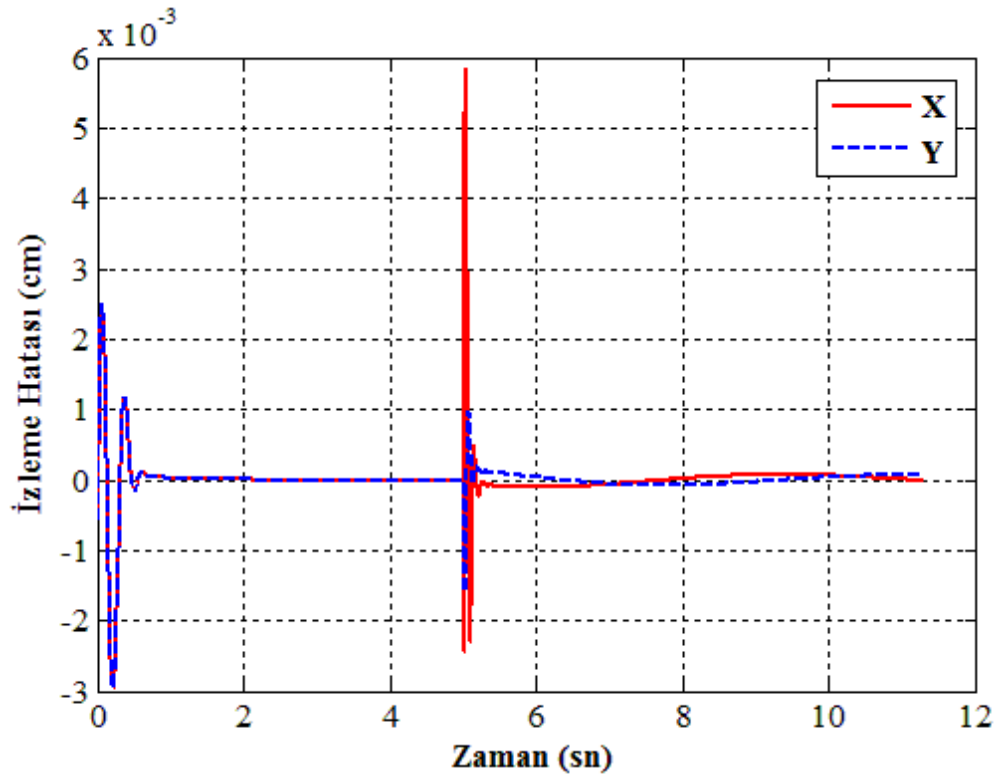
$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (4.26)$$

$$\dot{e} = (A - LC) e(t) \quad (4.27)$$

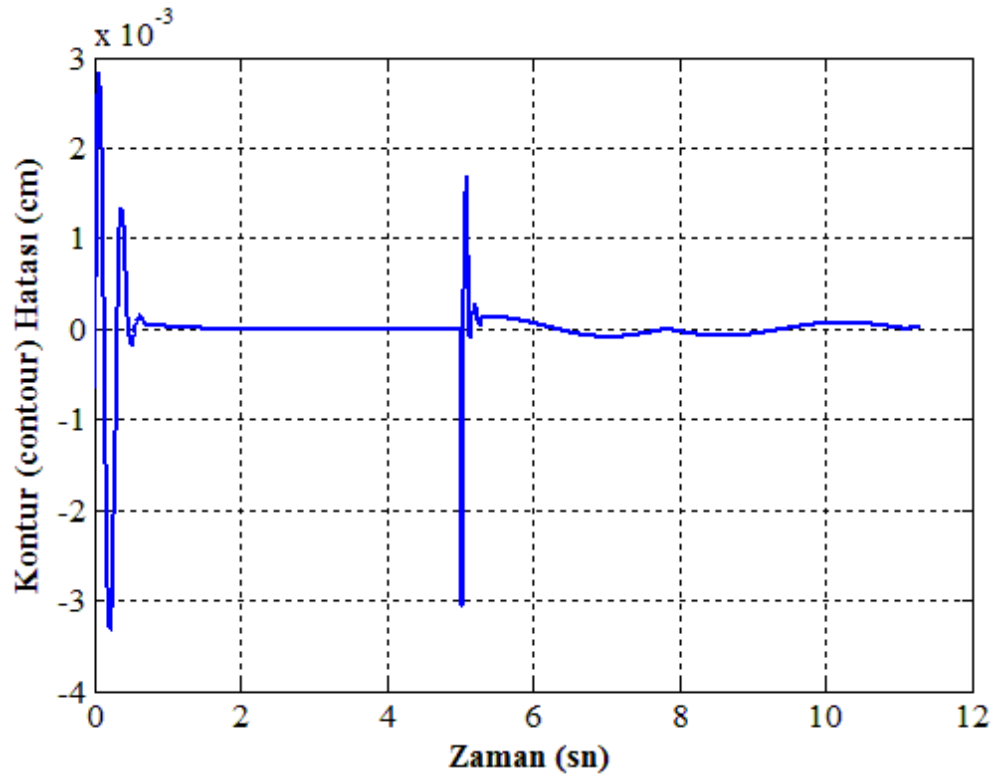
Kazanç matrisi sistem matrisinden elde edilecek karakteristik denklem kullanılarak veya MATLAB ortamında $L = (\text{place}(A', C', [\text{kutup1}, \text{kutup2}, \dots, \text{kutup } n]))'$ komutu ile kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Tasarlanan sistem için kazanç matrisi yapılan birçok denemeden sonra sistem matrisi özdeğerlerinin iki katı olacak şekilde MATLAB ortamında place komutu kullanılarak hesaplanmış ve gözleyicinin durum uzay formundaki eşitlikleri Denklem 4.28'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \hat{\omega}_r \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} -344,4764 & 0 \\ 0 & -39,3497 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \hat{\omega}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 170.5634 & -11.8012 \\ 21.8894 & 21.3497 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_r \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 124.2236 & 0 \\ 0 & -230.4147 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_d \end{bmatrix} \quad (4.28) \end{aligned}$$

Denklem 4.28’de elde edilen bu durum uzay modeli MATLAB ortamında dördüncü mertebeden Runge – Kutta yöntemi ile çözülmüştür. Sonuçları karşılaştırmak amacıyla gözleyici tabanlı PID denetleyici yapısının uygulandığı sisteme de sırasıyla Şekil 4.4’te verilen yörüngeler tanımlanarak Şekil 4.5’teki arzu edilen şeklin elde edilmesine çalışılmıştır. Gözleyici tabanlı PID kontrol yapısının sisteme uygulanması durumunda kartezyen robot uç işlevcisinin yapmış olduğu yörünge izleme ve kontur hataları sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. X ve Y eksenlerindeki yörünge izleme hataları



Şekil 4.12. Kontur (contour) hatası

Elde edilen yörünge izleme hataları incelendiğinde doğrusal hareket gerçekleştirilirken arzu edilen yörüngeye yaklaşık 0,8 saniye sonra yakalandığı, doğrusal hareketin tamamlanıp dairesel hareketin başladığı durumdaki hata değerinin yaklaşık 60 μm ve kalıcı durum hatasının yaklaşık 1-2 μm olduğu görülmektedir. Oluşan bu hatalara bağlı olarak hesaplanan kontur hata değerinin dairesel hareket başlangıcında yaklaşık 30 μm olduğu görülmektedir. Ayrıca bu kontrol yapısının kullanılması durumunda yapılan benzetimin gerçekleşme süresi 1,9032 saniye olarak ölçülmüştür.

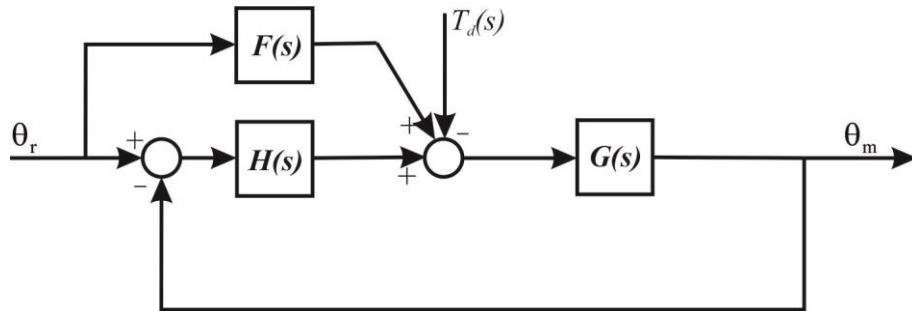
Gözleyici tabanlı PID kontrol yapısı kullanılması durumunda hem izleme ve hem de kontur hataları PID denetleyici kullanılan duruma göre büyük oranda azaltılmıştır. Ancak gözleyici yapısının getirdiği ek hesaplamalar benzetimin gerçekleşme süresinin uzamasına neden olmaktadır.

4.4. İleri Beslemeli Hesaplanan Tork Kontrol

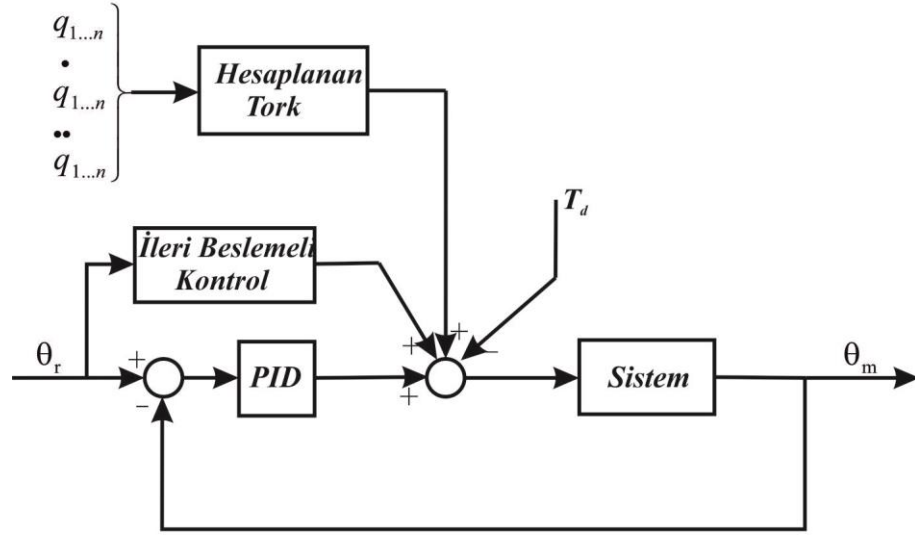
İleri beslemeli kontrol, zamanla değişen yörüngelerin takibinde sistemin transfer fonksiyonunun kutuplarını/sıfırlarını yok ederek zamanla değişen bozucu sinyalin etkinliğini azaltmak veya ortadan kaldırmak için kullanılan bir kontrol yöntemidir. Bu yöntem sistemin transfer fonksiyonunun tersinin sisteme giriş olarak uygulanmasıyla elde edilmektedir. Kısaca sistemin transfer fonksiyonu $G(s)$ ise sisteme $F(s) = G(s)^{-1}$ büyüklüğünde bir giriş sinyali uygulayarak transfer fonksiyonun kutuplarını/sıfırlarını yok etmeyi amaçlamaktadır. Böylece sistemde sadece bozucu etki olarak eklem torkları kalacaktır (Tomizuka 1987; Spong *et al.* 2006; Bingül ve Küçük 2009).

Hesaplanan tork kontrol yöntemi ise sisteme giren doğrusal olmayan bozucu sinyallerin sistem içerisinde modellenerek yok edilmesini amaçlayan bir yapıya sahiptir. Sistemde bozucu etki özelliği gösteren eklem torklarının etkisini yok etmek amacıyla kendisiyle aynı büyüklükte bir sinyal hesaplanarak sisteme dâhil edilmektedir. Böylece oluşan hataların en aza indirgenmesi veya sıfırlanması amaçlanmaktadır (Spong *et al.* 2006; Bingül ve Küçük 2009).

İleri beslemeli kontrol ve ileri beslemeli hesaplanan tork kontrol yapılarına ait blok diyagramlar sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. İleri beslemeli kontrol yapısına ait blok diyagram (Spong *et al.* 2006)



Şekil 4.14. İleri beslemeli hesaplanan tork kontrol yapısına ait blok diyagram

Tasarlanan kartezyen robot için daha önce Denklem 4.14’de elde edilen transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 4.13’de gösterilen ifadeler Denklem 4.29, 4.30 ve 4.31’de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K_t/(L_m J_m)}{s^2 + s[(R_m J_m + L_m B_m)] + (R_m B_m + K_t K_v)/(L_m J_m)} \quad (4.29)$$

$$F(s) = G(s)^{-1} \quad (4.30)$$

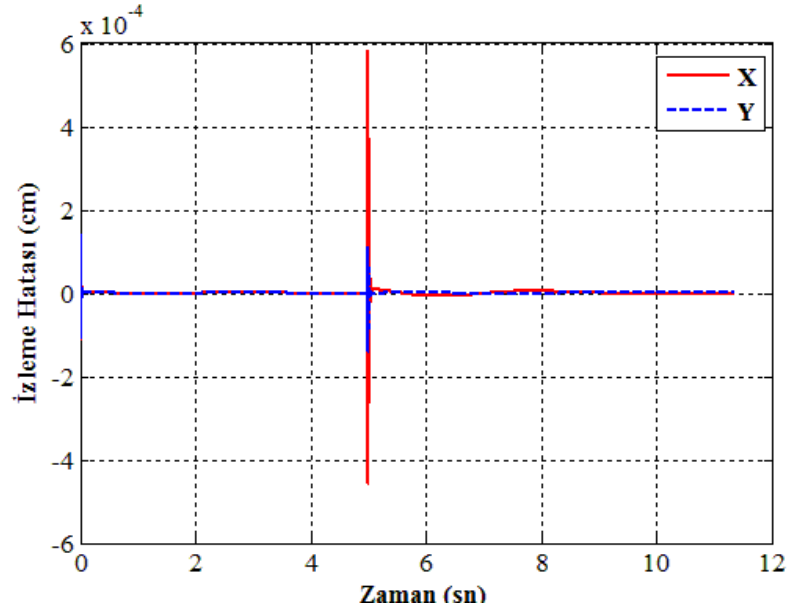
$$H(s) = K_p + K_I s^{-1} + K_d s \quad (4.31)$$

Hesaplanan tork ifadeleri ise Denklem 4.32’de gösterildiği gibi sisteme ilave edilmiştir.

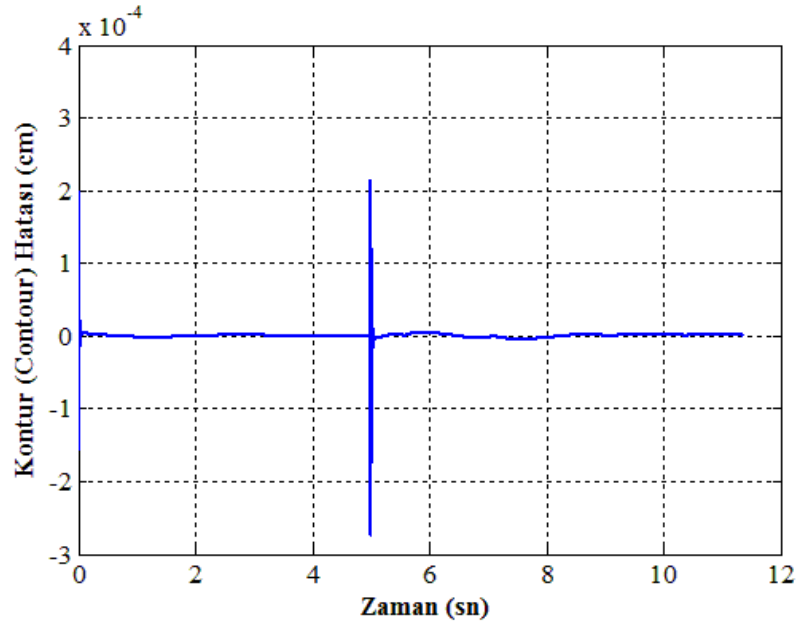
$$\tau_{comp} = M(q)J^{-1}(\ddot{q}_r - \dot{J}\dot{q}) + N(q, \dot{q}) \quad (4.32)$$

Burada M kütle matrisini, $\ddot{q}_r$ referans ivmeyi, $\dot{q}$ referans hız değerini ve N matrisi ise Coriolis, merkezkaç ve yerçekimi kuvvetlerini ifade etmektedir (Bevly *et al.* 2000). Bu kontrol yapısı MATLAB/SIMULINK ortamında modellenerek yörünge takip ve kontur

kontrolü yapılmıştır. Bu kontrol yapısının sisteme uygulanması durumunda elde edilen yörünge izleme ve kontur hataları sırasıyla Şekil 4.15 ve 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.15. X ve Y eksenlerindeki yörünge izleme hataları



Şekil 4.16. Kontur (Contour) hatası

Elde edilen yörünge izleme hataları incelendiğinde doğrusal hareket gerçekleştirilirken arzu edilen yörünge için yaklaşık 0,1 saniye sonra yakalandığı, doğrusal hareketin tamamlanıp dairesel hareketin başladığı durumdaki hata değerinin yaklaşık 6 μm ve kalıcı durum hatasının yaklaşık 0,25 μm olduğu görülmektedir. Yapılan bu hatalara bağlı olarak hesaplanan kontur hata değerinin dairesel hareket başlangıcında yaklaşık 2 μm olduğu görülmektedir. Ayrıca bu kontrol yapısının kullanılması durumunda yapılan benzetimin gerçekleşme süresi 7,0356 saniye olarak ölçülmüştür.

İleri beslemeli hesaplanan tork kontrol yapısının kullanılması durumunda daha önce sisteme uygulanan PID kontrol ve gözleyici tabanlı PID kontrol yapılarına göre hem izleme ve hem de kontur hataları büyük oranda azaltılmıştır. Ancak sisteme hesaplanan tork yapısının getirdiği ek işlemler benzetimin gerçekleşme süresinin diğer iki kontrol yöntemine göre çok daha uzun olmasına neden olmaktadır.

4.5. Gerçek Zamanlı Mikro Denetleyici Tabanlı Kontrol

Robot uç işlevcisinin yörünge ve kontur kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için alınan G kodları veya el yordamıyla girilen konum bilgileri arayüz üzerinden USB port aracılığı ile mikro denetleyici birimine aktarılmaktadır. Mikro denetleyici aktarılan bu konum bilgilerini önceden belirlenmiş olan örnekleme frekansında (doğrusal yörüngeler için) örneklemektedir. Örnekleme sonucunda mikro denetleyici içerisinde elde edilen bu konum bilgileri, eksenlerde bulunan adım motorları için arzu edilen adım sayısı değeri ve dönüş yönü bilgilerine dönüştürülmektedir. X, Y ve Z eksenlerine bağlanan adım motorlarına ait arzu edilen adım sayısı değerleri ve motor dönüş yönü bilgileri kullanılan mikro denetleyicinin hafızasına kaydedtirilmektedir.

X, Y ve Z eksenleri için belirlenen bu adım sayısı değerleri ve motor dönüş yönü bilgileri mikro denetleyicinin giriş-çıkış kanallarına iki bitlik bilgi ile gönderilmektedir. Bu bilginin ilk biti motor dönüş yönü bilgisini, ikinci bit ise saat durdurma/başlatma (interrupt) bilgisini içermektedir. Mikro denetleyici yapılarında farklı frekanslardaki saat

darbelerinin üretebilmesi için saat başlatma/durdurma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Mikro denetleyici, saatine gönderilecek olan lojik 1 ve lojik 0 bilgisi ile başlatılıp durdurulabilmektedir. X,Y ve Z eksenleri için üretilmesi gereken farklı frekanslardaki darbe dizileri, mikro denetleyici saatine lojik 1 bilgisi gönderilmesi ile elde edilmektedir. Mikro denetleyici aldığı bu bilgiyle gerekli darbe dizilerini üretir ve çıkış portlarına aktarır. Böylece daha önce kaydedilen adım değerleri gönderilen darbe oranında azaltılmakta ve adım değerleri sıfır olduğunda mikro denetleyici saatine lojik 0 bilgisi gönderilmektedir. Gelen lojik 0 bilgisi ile birinci örnekleme adımı sonlandırılarak ikinci örnekleme adımına geçilmektedir.

Üretilen bu darbe dizilerinin aynı sürede gerçekleşmesi eş zamansızlık problemini ortadan kaldırarak kartezyen robot uç işlevcisinin kontur performansını artırmıştır. Kartezyen robotun yörünge ve kontur kontrolü söz konusu mikro denetleyici yapısı kullanılarak açık çevrim ve kapalı çevrim denetim yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir.

Açık çevrim denetim yapısı kullanılması durumunda eksenlere paralel olarak bağlanmış doğrusal konum sezicilerden örnekleme hızına bağlı olarak alınan bilgiler uç işlevcisinin o an için bulunduğu konum bilgisinin ve yapılan hataların analiz edilebilmesi amacıyla her bir örnekleme adımında kaydedilmektedir.

Kapalı çevrim denetim yapısında ise eksenlere paralel olarak bağlanmış doğrusal konum sezicilerden gelen darbe dizileri örnekleme adımına bağlı olarak mikro denetleyici tarafından sayılarak hafızaya kaydedilmektedir. Kaydedilen bu bilgiler kullanarak her bir örnekleme adımında arzu edilen konum ile gerçek konum arasındaki fark olarak tanımlanan hata değerleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu hata değerleri her bir eksen için gerçek konum bilgilerine eklenerek arzu edilen yörünge takibinin çok daha düşük hata değerleri ile gerçekleştirilebilmesi sağlanmaktadır.

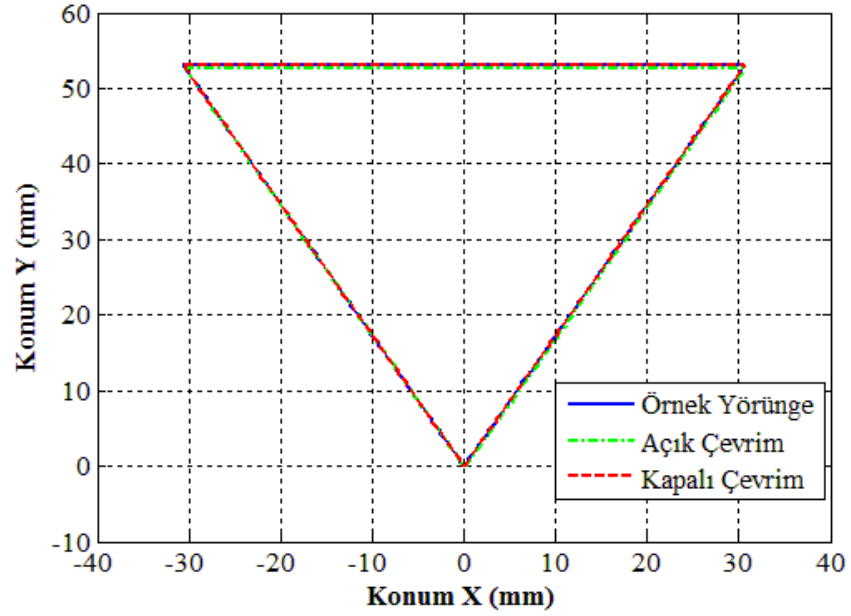
Bu tez çalışmasında tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen kartezyen robotun uç işlevcisinin yörünge takip ve kontur kontrolü mikro denetleyici tabanlı açık çevrim ve kapalı çevrim denetim yapıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kartezyen robotun yörünge takip ve kontur davranışlarını incelemek amacıyla bu tip robotların konum kontrolünde tanımlanan yörüngeler araştırılmış olup en fazla çalışma konusu olan yörüngelerin belirlenmesine çalışılmıştır. Yapılan gerçek zamanlı açık çevrim ve kapalı çevrim konum kontrolü uygulamalarında belirlenen bu yörüngeler kullanılmıştır. Konum kontrolü gerçekleştirilirken öncelikle arzu edilen yörüngeyi matematiksel olarak tanımlanmış ve bu tanımlama sonucu elde edilecek şekil grafikler üzerinde gösterilmiştir. Ardından açık çevrim ve kapalı çevrim denetleyici kullanılması durumunda her bir eksenindeki izleme hatası değerleri ve kontur hataları grafiksel olarak sunulmuştur.

Kartezyen robot uç işlevcisinin yörünge takip ve kontur performansını incelemek amacıyla ilk olarak üçgen şeklinde bir yörünge tanımlanmış olup tanımlanan yörüngeye ait matematiksel eşitlikler Denklem 4.33'te gösterilmiştir.

$$\left. \begin{array}{l} x = a \sin(t) \\ y = b \cos(t) \\ z = c \end{array} \right\} \quad t = 0: 2\pi/k: 2\pi, \quad k = 3 \quad (4.33)$$

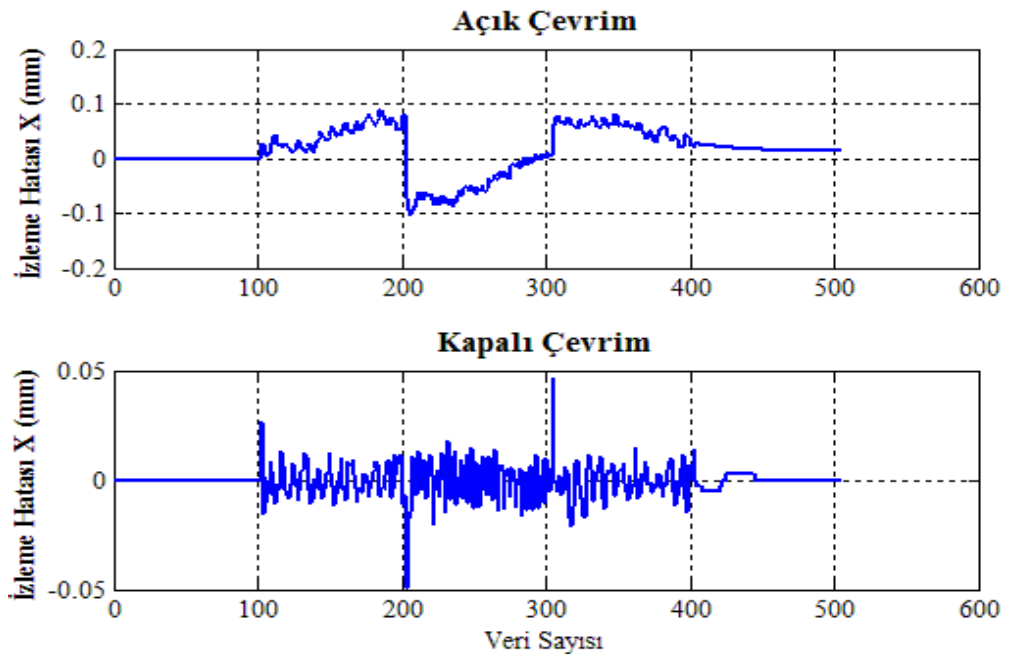
Tanımlanan bu matematiksel ifadede a ve b katsayıları üçgenin boyutlarını ayarlamak için kullanılan sabitleri, c paso derinliğini, k örnekleme adım sayısını ve t örnekleme süresini göstermektedir. Bu matematiksel eşitlikler kullanılarak tanımlanan arzu edilen yörünge ve açık çevrim/kapalı çevrim denetim durumlarında bu yörüngeyi takibi Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

Tanımlanan tüm geometrik şekillerde uç işlevcinin Z eksenindeki hareketi için aynı yörünge kullanılmıştır. Bu nedenle tüm şekiller için bu ekseninde meydana gelen hata değerleri benzer olarak elde edilmiştir.



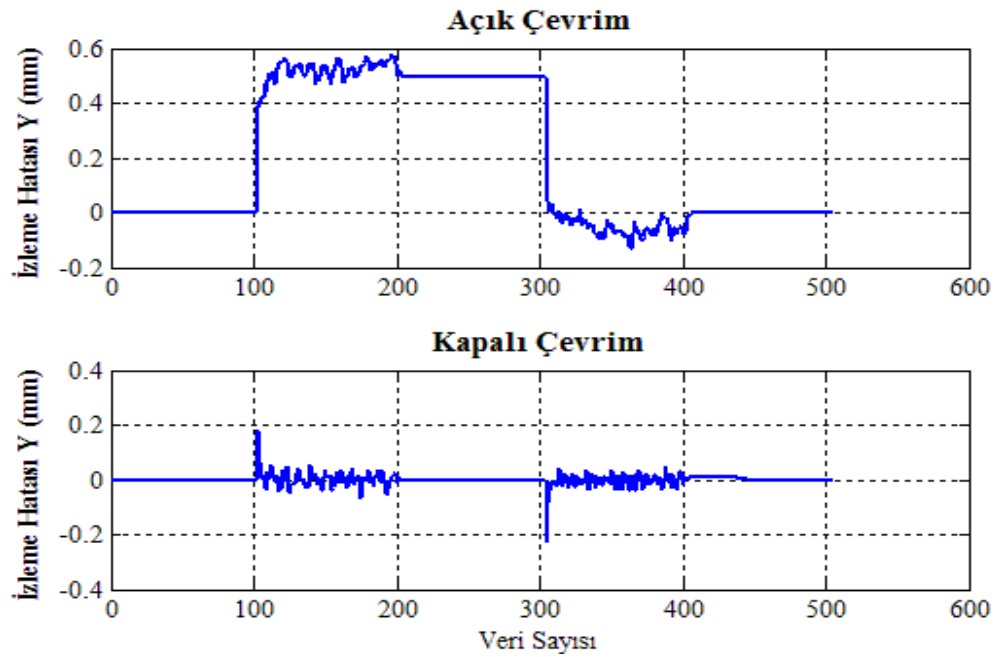
Şekil 4.17. Arzu edilen yörünge ve açık ve kapalı çevrim denetim durumlarında takibi

Açık çevrim ve kapalı çevrim denetim durumlarında tanımlanan bu yörüngeyi takibinde X, Y ve Z eksenlerinde yapılan izleme hataları sırasıyla Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

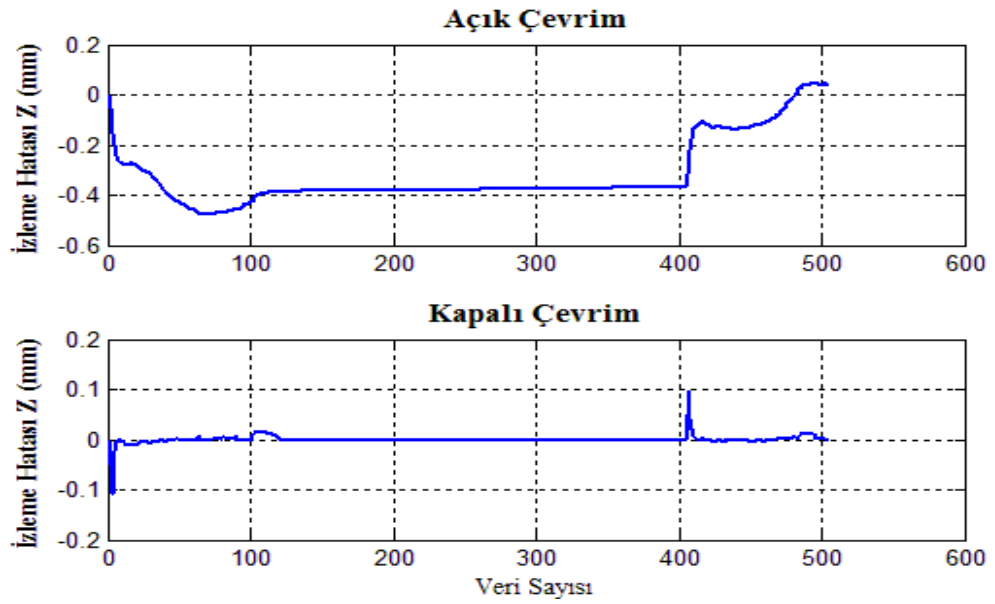
Şekil 4.18'den de görülebileceği gibi açık çevrim denetim durumunda X ekseninde meydana gelen izleme hatası değeri $30\ \mu\text{m}$ ile $100\ \mu\text{m}$ aralığında değişirken kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık $10\ \mu\text{m}$ gibi bir değere indirgenmiştir. Kapalı çevrim denetimde yön değiştirme esnasında meydana gelen hata değeri yaklaşık $50\ \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.19. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

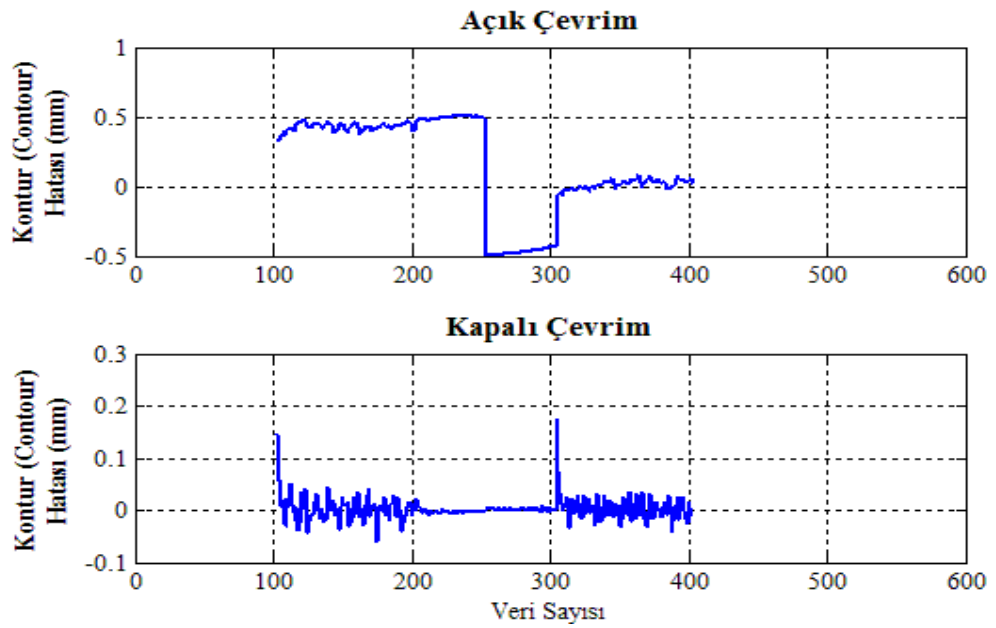
Y ekseninde meydana gelen izleme hatası değeri yaklaşık $580\ \mu\text{m}$ iken kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık $50\ \mu\text{m}$ gibi bir değere indirgenmiştir. Kapalı çevrim denetimde yön değiştirme esnasında meydana gelen hata değeri yaklaşık $228\ \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.

Z ekseninde meydana gelen izleme hatası değeri yaklaşık $470\ \mu\text{m}$ olarak ölçülürken kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık $5\ \mu\text{m}$ gibi bir değere indirgenmiştir. Kapalı çevrim denetimde yön değiştirme esnasında meydana gelen hata değeri yaklaşık $100\ \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.20. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

X ve Y eksenlerinde elde edilen izleme hataları kullanılarak hesaplanan kontur hatası Şekil 4.21’de gösterilmiş olup ilk yüz veri Z eksenindeki hareket için tanımlanmıştır. Bu aralık boyunca X ve Y eksenlerinde hareket olmadığından kontur hatası hesaplanmamıştır.



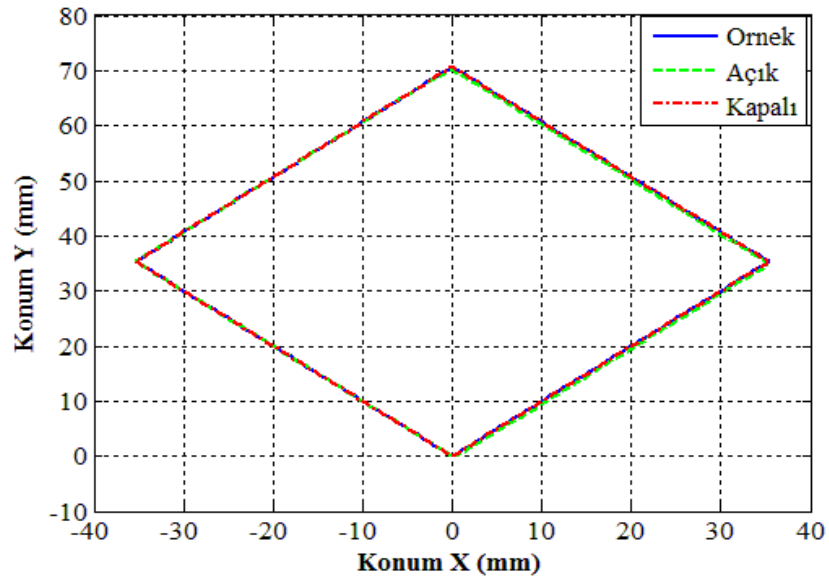
Şekil 4.21. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası

Şekil 4.21’den görülebileceği gibi açık çevrim denetim durumunda kontur hatası 500 μm civarında iken bu değer kapalı çevrimde yaklaşık 30 μm gibi bir değere indirgenmiştir. Kontur hata değerinin en yüksek ölçüldüğü an olan yön değiştirme anında ise bu değer yaklaşık 174 μm olduğu görülmektedir.

Yörünge takip ve kontur performansının incelenmesi amacıyla tanımlanan ve bu tip robotlar üzerinde sıklıkla çalışılan elmas yörüngesine ait matematiksel eşitlikler Denklem 4.34’te gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

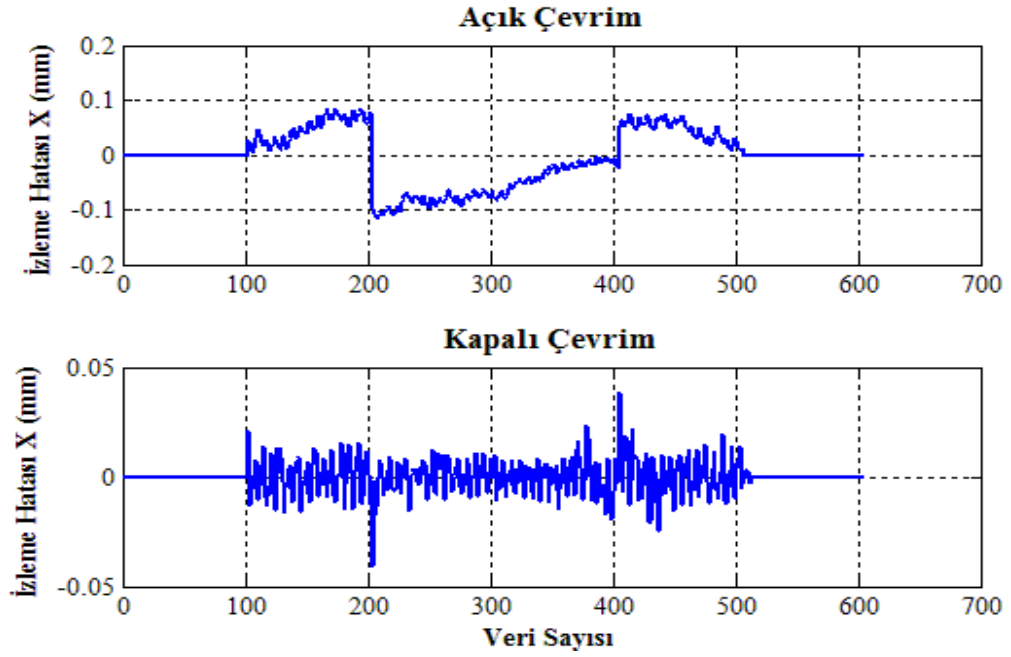
$$\left. \begin{array}{l} x = a \sin(t) \\ y = b \cos(t) \\ z = c \end{array} \right\} \quad t = 0: 2\pi/k: 2\pi, \quad k = 4 \quad (4.34)$$

Şekil 4.22’de Denklem 4.34’teki eşitlikler kullanılarak elde edilen yörünge ve açık çevrim/kapalı çevrim durumlarında bu yörüngeyi takibi gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Arzu edilen yörüngeyi açık ve kapalı çevrim denetim durumlarında takibi

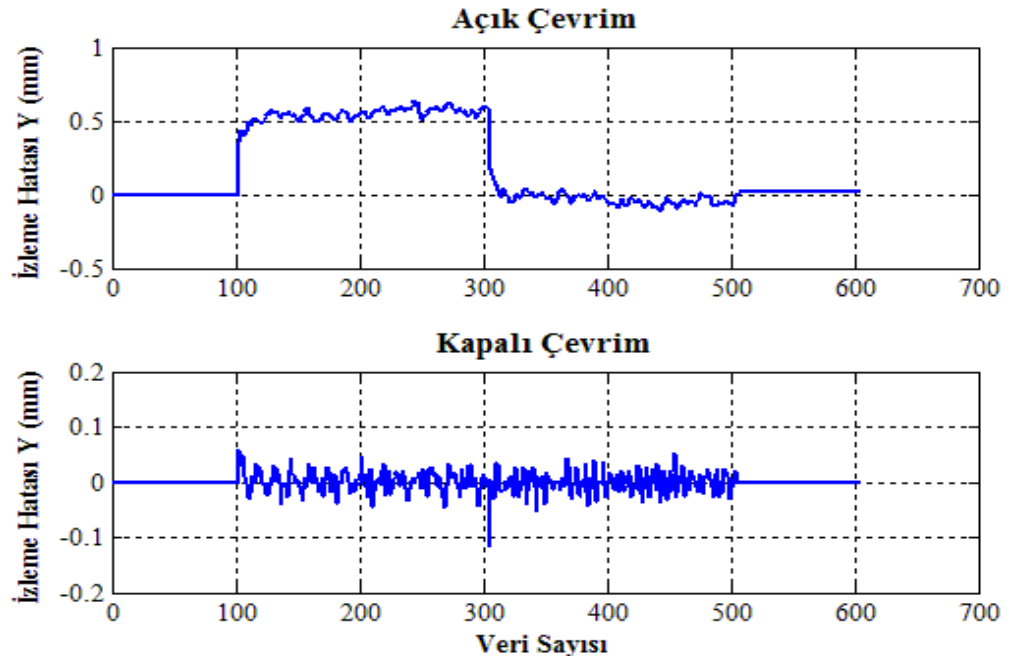
Şekil 4.22’de verilen yörünge için açık çevrim/kapalı çevrim denetim durumlarında X, Y ve Z eksenlerinde oluşan izleme hataları sırasıyla Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25’te gösterilmiştir.



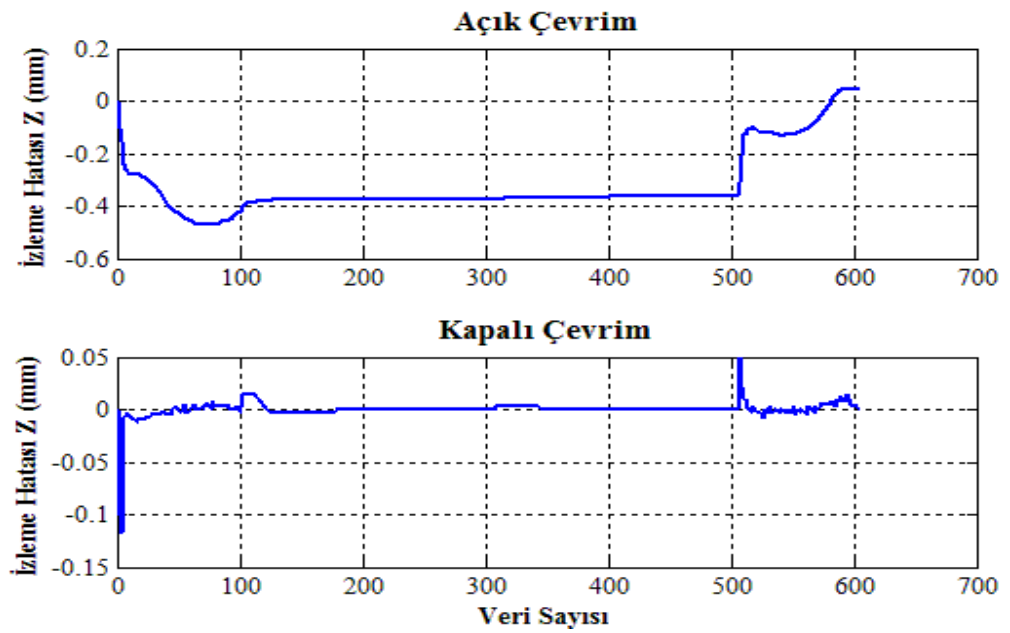
Şekil 4.23. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Şekil 4.23 incelendiğinde, açık çevrim denetim durumunda X eksenindeki izleme hatası değeri 30 μm ile 100 μm aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Kapalı çevrim denetim durumunda ise bu hatanın yaklaşık 10 μm civarına indirgendiği görülmüştür. Kapalı çevrim denetim durumunda verilen yörüngeye bağlı olarak uç işlevcinin yön değiştirmesi esnasında oluşan hata değeri yaklaşık 40 μm olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.24'ten görülebileceği gibi Y ekseninde oluşan hata değeri, yaklaşık 100 μm ile 600 μm aralığından doğrusal konum sezicilerden alınan bilgiler kullanılarak yapılan kapalı çevrim denetim durumunda yaklaşık 30 μm gibi bir değere indirgenmiştir. En büyük hata değerlerinin meydana geldiği yön değiştirme esnasında kapalı çevrim denetim yapılırken meydana gelen hata değeri yaklaşık 115 μm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.24. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

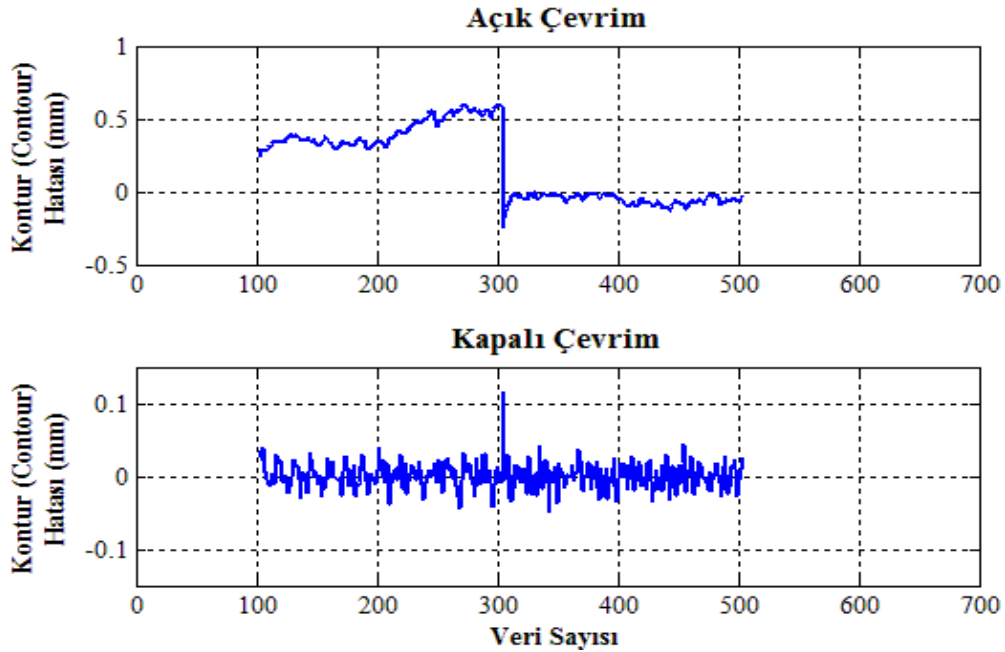


Şekil 4.25. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Z ekseninde oluşan izleme hatası (Şekil 4.25) açık çevrim durumunda yaklaşık olarak 470 μm ve kapalı çevrim durumunda yaklaşık 5 μm olarak ölçülmüş olup bu değerler Şekil 4.20'de elde edilen hata değerleri ile yaklaşık olarak aynıdır. Kapalı çevrim denetim

durumundaki en büyük hata değeri yön değıştirme esnasında ölçölmüş olup bu hata değeri yaklaşık 50 μm 'dir. Şekil 4.26'da bu yöröngenin takip edilmesi esnasında oluşın kontur hatasının değışimi gösterilmiştir.

X ve Y eksenlerindeki izleme hata değeri kullanarak hesaplanan kontur hatası, açık çevrim denetim durumunda yaklaşık 130 μm ile 600 μm aralığında iken kapalı çevrim denetim yöntemi kullanarak yaklaşık 30 μm gibi bir değere indirgenebilmiştir. Kapalı çevrim denetim yöntemi kullanıldığında oluşın en büyük kontur hatasının 116 μm civarında olduğu Şekil 4.26'dan görölebilmektedir.

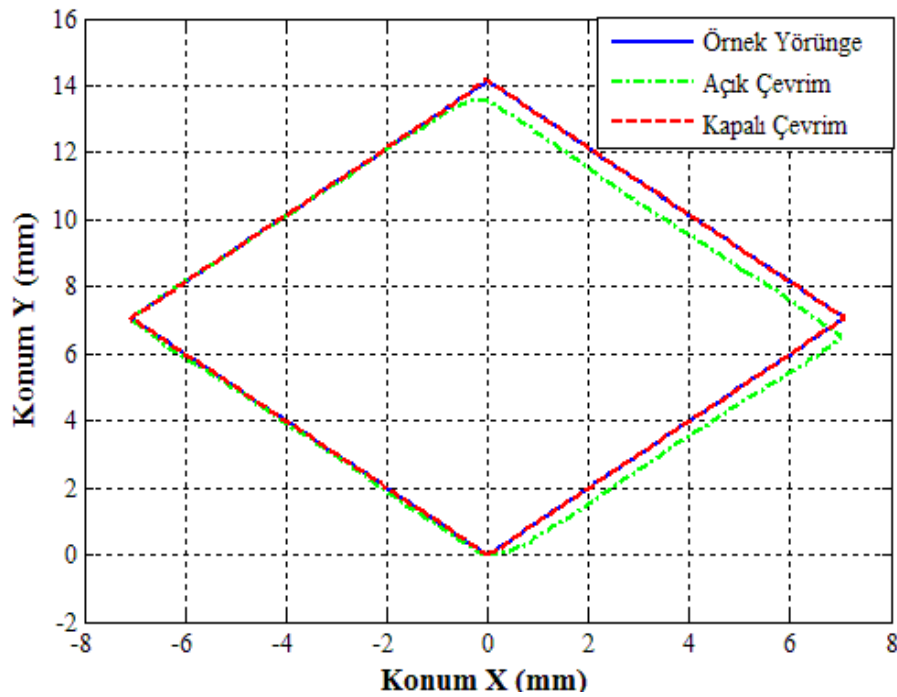


Şekil 4.26. Tanımlanan yörögede meydana gelen kontur (contour) hatası

Aynı şeklin farklı boyutlardaki yöröge takip ve kontur performansını incelenebilmek amacıyla Şekil 4.22'de tanımlanan elmas yörögesine ait matematiksel eşitliklerin belirlenen bir katsayı ile çarpılması durumunda elde edilen eşitlikler Denklem 4.35'te verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} x &= (a/5) \sin(t) \\ y &= (b/5) \cos(t) \\ z &= c \end{aligned} \right\} \quad t = 0: 2\pi/k: 2\pi, \quad k = 4 \quad (4.35)$$

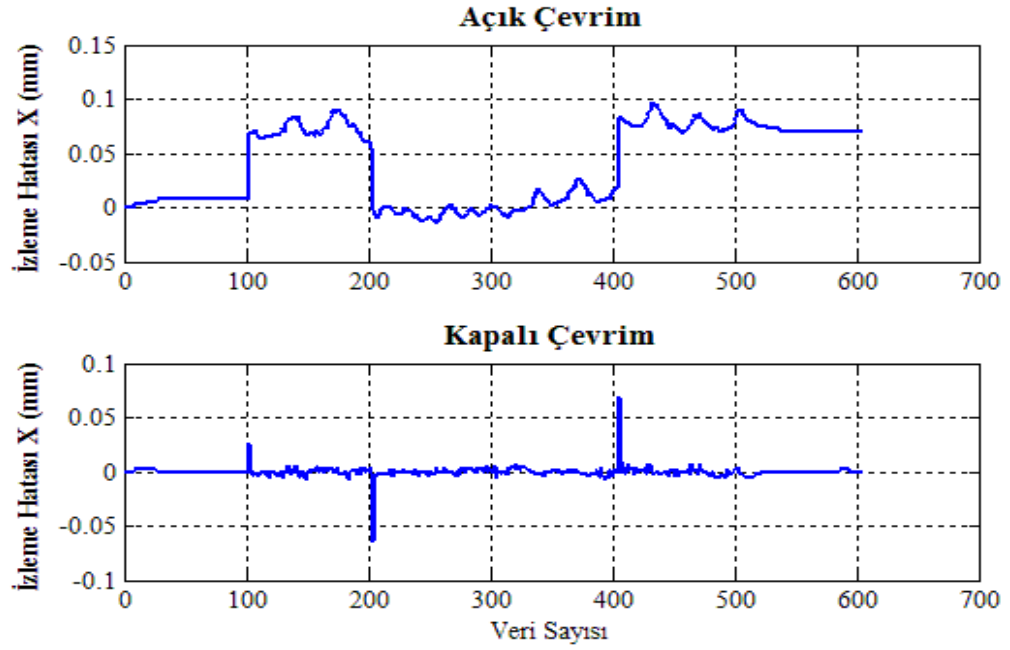
Denklem 4.35’te verilen eşitlikler kullanılarak tanımlanan arzu edilen yörünge ve bu yörünge için açık çevrim/kapalı çevrim denetim durumlarında takip edilmesi Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



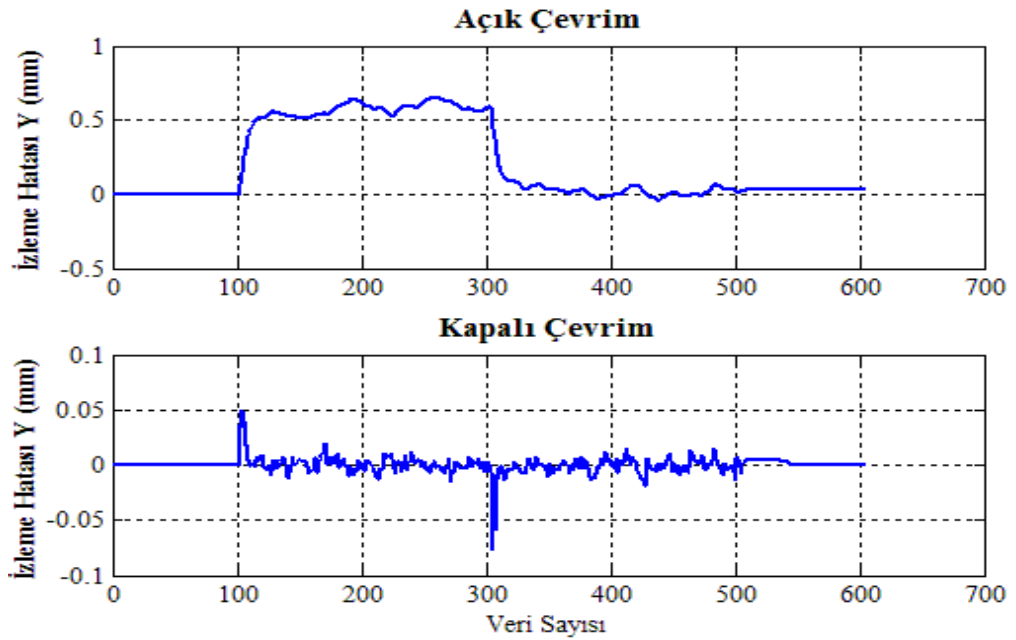
Şekil 4.27. Arzu edilen yörünge için açık ve kapalı çevrim denetim durumlarında takibi

Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30’da sırasıyla X, Y ve Z eksenlerinde bu yörünge için takibinde oluşan izleme hataları açık çevrim/kapalı çevrim denetim durumları için gösterilmiştir.

Şekil 4.28’de, açık çevrim denetim yöntemi kullanılması durumunda X ekseninde oluşan izleme hatası değerinin 15 µm ile 100 µm aralığında olduğu görülmüştür. Kapalı çevrim denetim durumunda izleme hatası yaklaşık 5 µm olmasına rağmen yön değiştirme esnasında bu hata değerinin yaklaşık 70 µm’ye kadar yükseldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.28. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

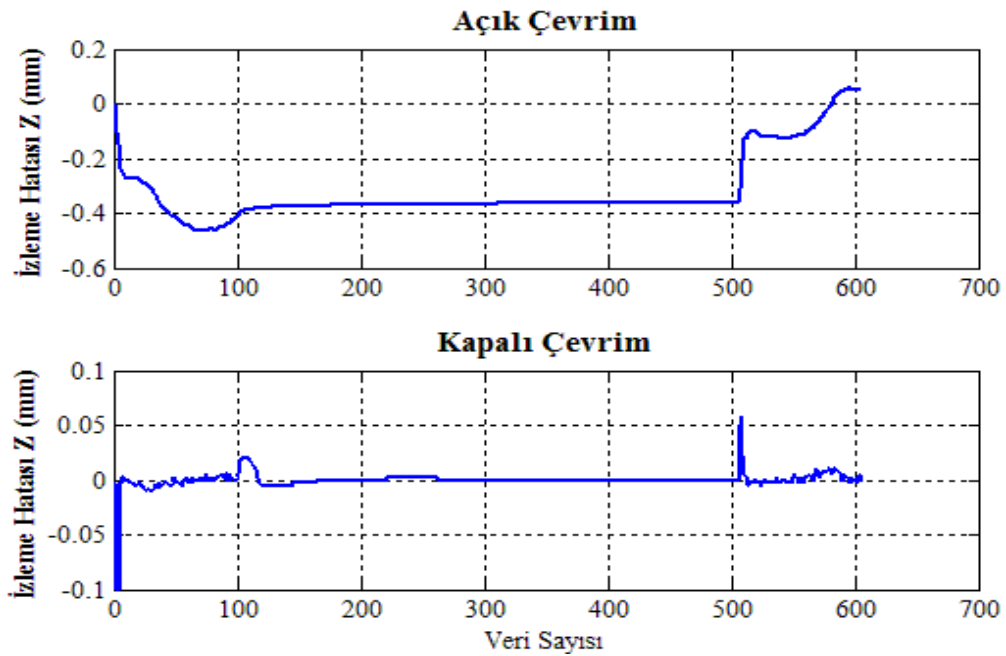


Şekil 4.29. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Şekil 4.29'da Y ekseninde meydana gelen izleme hatalarının açık çevrim/kapalı çevrim durumlarındaki değişimi gösterilmiş olup açık çevrim durumunda bu hata değerinin yaklaşık 650 μm olduğu görülmüştür. Bu hata değeri kapalı çevrim denetim yöntemi

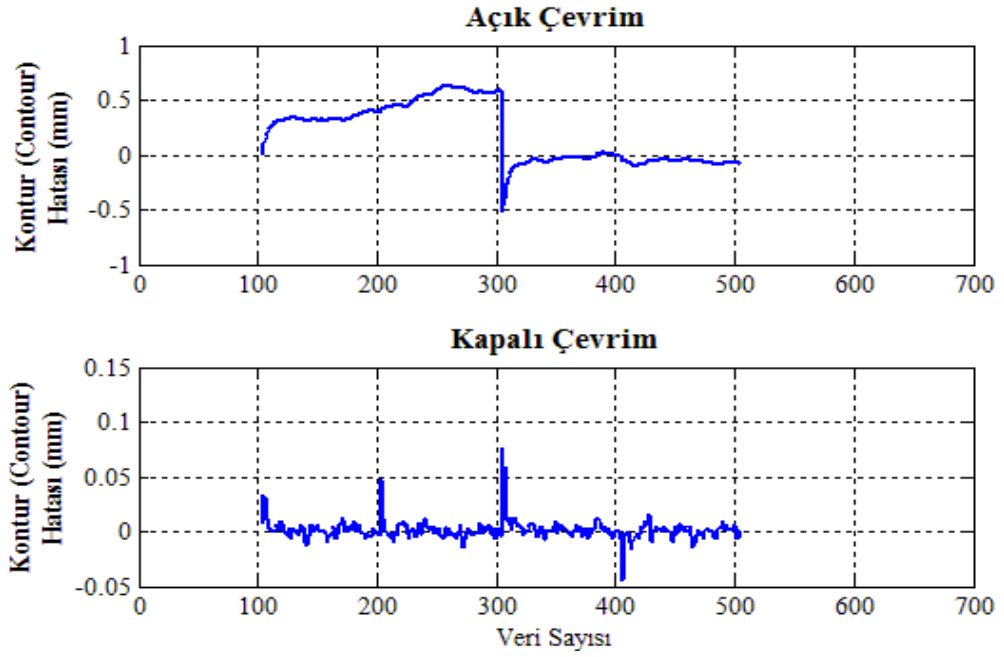
kullanılması durumunda yaklaşık 10 μm olarak ölçülmüştür. Kapalı çevrim denetimde uç işlevcinin yön değiştirmesi esnasında oluşan izleme hatası değeri ise yaklaşık 75 μm olarak ölçülmüştür.

Açık çevrim denetim durumunda Z ekseninde oluşan izleme hatası değeri yaklaşık 460 μm , kapalı çevrim denetim durumunda ise bu hata yaklaşık 5 μm olarak ölçülmüş olup bu hataların değişimi Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Kapalı çevrim denetimde ölçülen en büyük hata değerinin yaklaşık 56 μm olduğu Şekil 4.30'dan görülebilmektedir.



Şekil 4.30. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Açık çevrim denetim durumunda kontur hatası 100 μm ile 625 μm aralığında iken bu değer kapalı çevrimde yaklaşık 8 μm gibi bir değere indirgenmiş olup bu durum Şekil 4.31'den görülebilmektedir. Kapalı çevrim denetimde yön değiştirme esnasında oluşan izleme hatası ise yaklaşık 76 μm olarak ölçülmüştür.



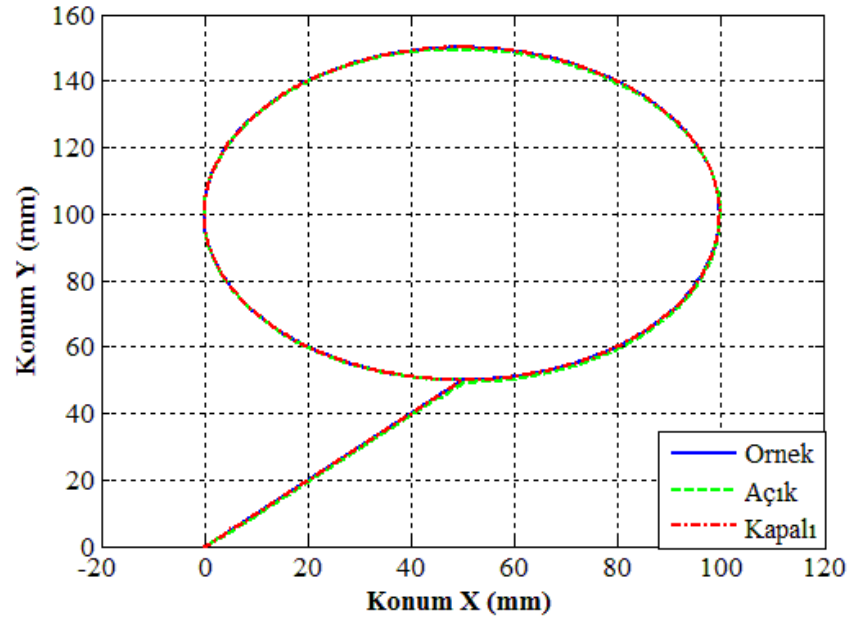
Şekil 4.31. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası

Denklem 4.36 ve 4.37 ile ifade edilen doğrusal ve dairesel yörüngeler kullanılarak açık çevrim/kapalı çevrim durumlarındaki yörünge takip ve kontur performansı incelenmiştir.

$$\left. \begin{array}{l} x = a t \\ y = b t \\ z = c \end{array} \right\} \quad t = 0:0.01:5 \quad (4.36)$$

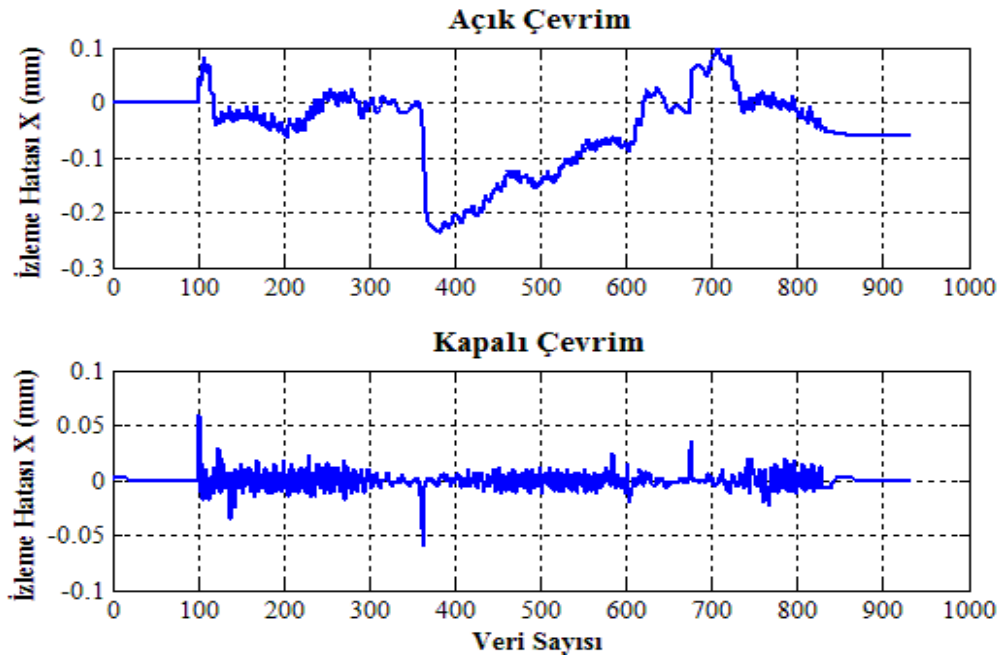
$$\left. \begin{array}{l} x = a \sin(t) \\ y = b \cos(t) \\ z = c \end{array} \right\} \quad t = 5:0.01:5 + 2\pi \quad (4.37)$$

Denklem 4.36 ve 4.37'deki matematiksel eşitlikler kullanılarak elde edilen yörünge ve açık çevrim/kapalı çevrim denetim durumlarında bu yörüngeyi Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



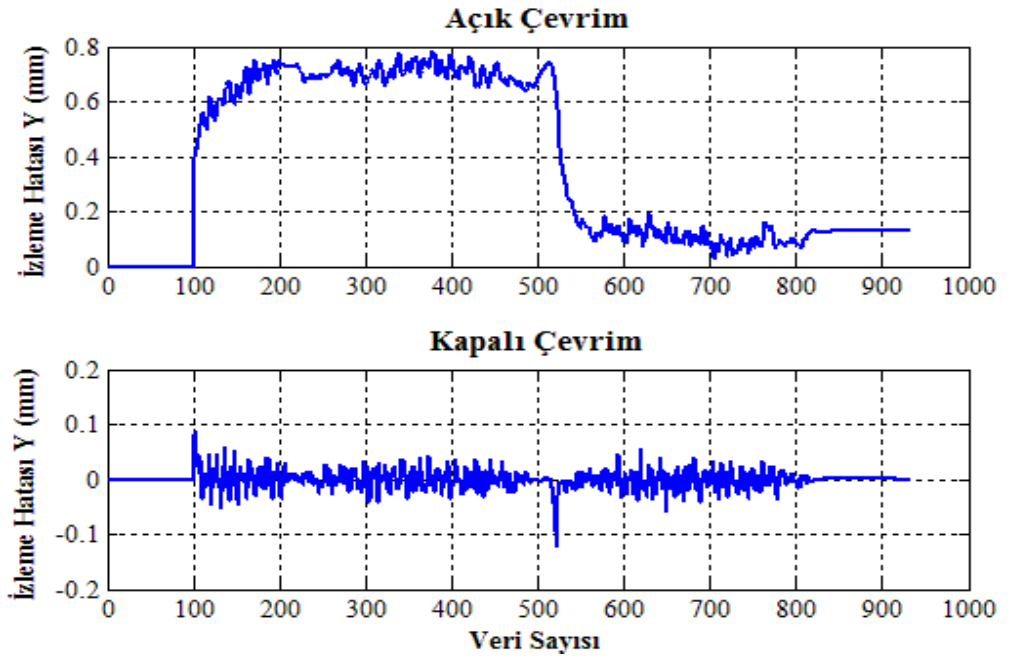
Şekil 4.32. Arzu edilen yörüngenin açık ve kapalı çevrim denetim durumlarında takibi

Açık çevrim ve kapalı çevrim denetim durumlarında tanımlanan bu yörüngenin takibinde X, Y ve Z eksenlerinde yapılan izleme hataları sırasıyla Şekil 4.33, 4.34 ve 4.35'te gösterilmiştir.



Şekil 4.33. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

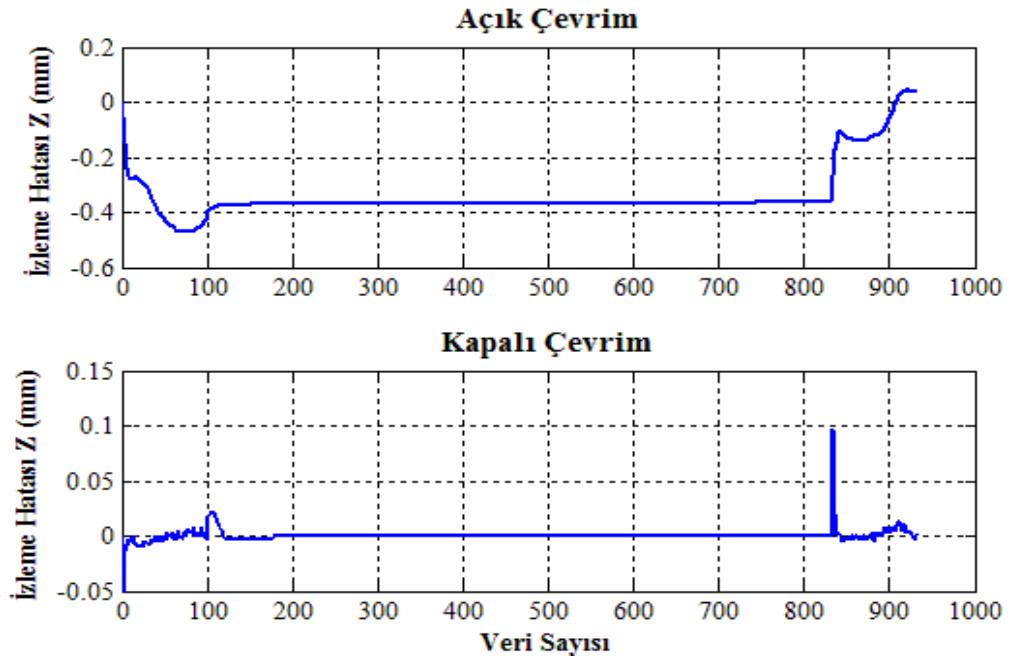
X ekseninde meydana gelen açık çevrim denetim durumundaki izleme hatasının yaklaşık 40 μm ile 235 μm arasında değiştiği Şekil 4.33'ten görülmektedir. Kapalı çevrim denetim kullanılması durumunda ise meydana gelen izleme hatası yaklaşık olarak 15 μm ölçülmüştür. Kapalı çevrim denetim durumunda X eksenindeki yön değiştirme sonucunda yaklaşık 60 μm izleme hatası olduğu görülmüştür.



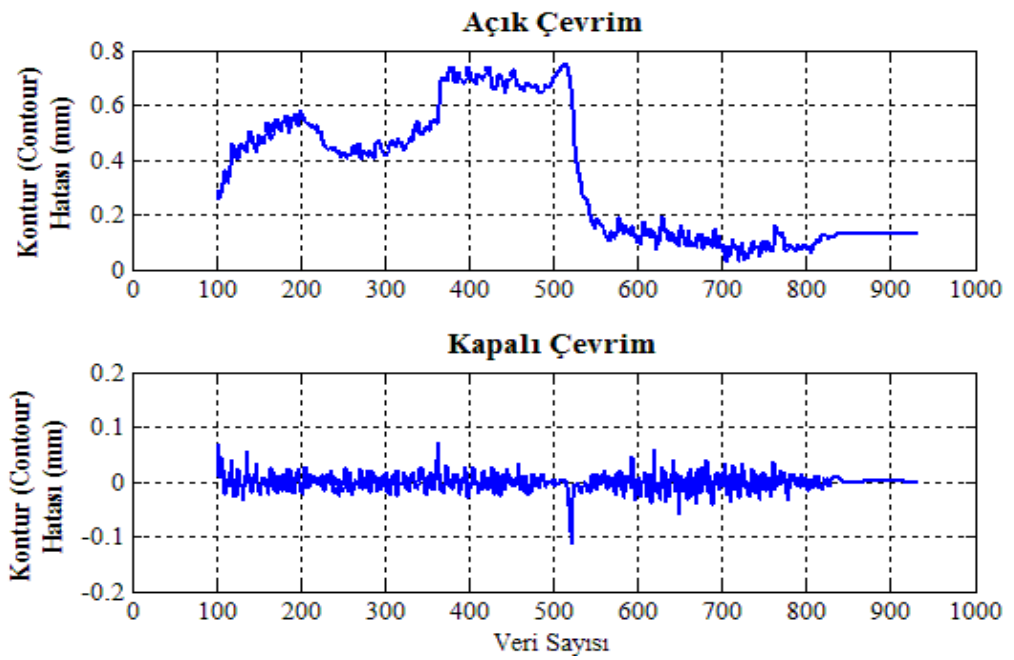
Şekil 4.34. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Şekil 4.34 incelendiğinde Y ekseninde açık çevrim izleme hatası değerinin yaklaşık 50 μm ile 800 μm aralığında olduğu görülmektedir. Kapalı çevrim denetim kullanılarak bu hata yaklaşık 40 μm 'ye indirgenirken, yön değiştirme esnasında meydana gelen hata değeri yaklaşık 120 μm olarak ölçülmüştür.

Açık çevrim durumunda Z eksenindeki izleme hatası yaklaşık 470 μm olarak ölçülürken, kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık 8 μm olarak ölçülmüş olup bu durum Şekil 4.35'ten görülmektedir. Kapalı çevrim denetim kullanıldığında yön değiştirme esnasında oluşan izleme hata değerinin yaklaşık 100 μm olduğu gözlemlenmiştir. Bu yörünge için X ve Y eksenlerinde oluşan izleme hataları kullanılarak hesaplanan kontur hatası Şekil 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.35. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları



Şekil 4.36. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası

Şekil 4.36'dan görülebileceği gibi açık çevrim denetim durumunda kontur hatası 50 μm ile 750 μm aralığında iken bu değer kapalı çevrimde yaklaşık 25 μm gibi bir değere

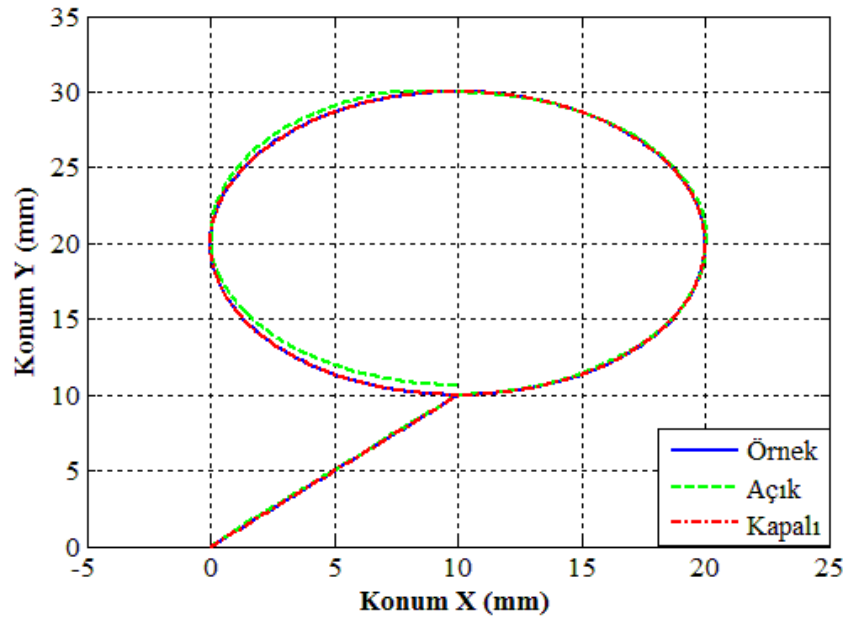
indirgenmiştir. Kontur hata değerinin en yüksek ölçüldüğü an olan yön değiştirme anında ise bu değerin yaklaşık 110 μm olduğu görülmektedir.

Şekil 4.32’de verilen yörünge farklı boyuttaki yörünge takip ve kontur performansının incelenmesi amacıyla tanımlanan diğer bir yörünge matematisel eşitlikleri Denklem 4.38 ve 4.39’da gösterildiği gibidir.

$$\left. \begin{array}{l} x = (a/5) t \\ y = (b/5) t \\ z = c \end{array} \right\} \quad t = 0:0.01:5 \quad (4.38)$$

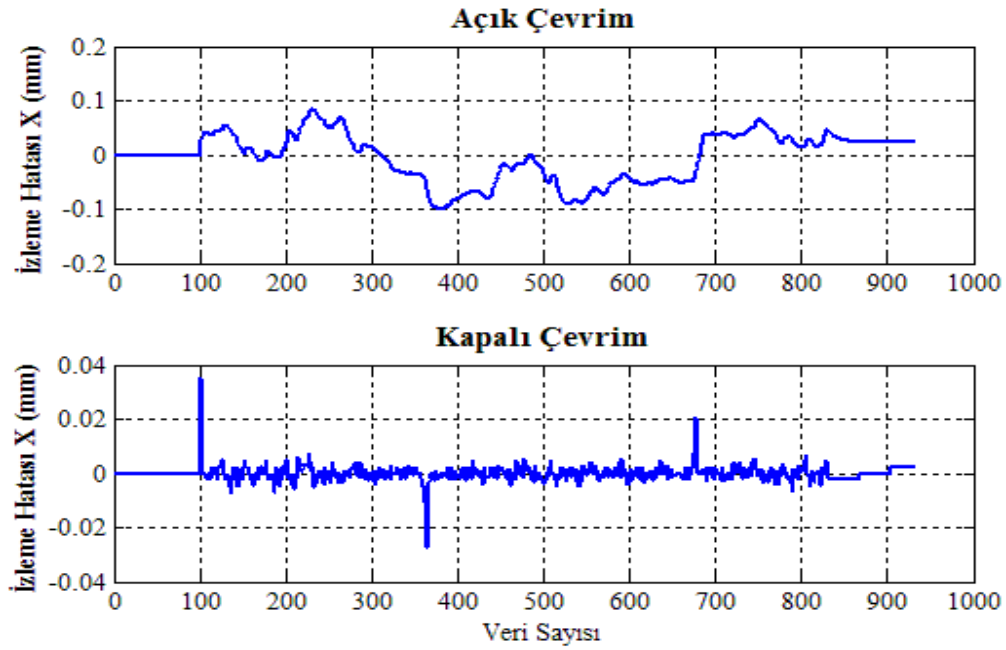
$$\left. \begin{array}{l} x = (a/5) \sin(t) \\ y = (b/5) \cos(t) \\ z = c \end{array} \right\} \quad t = 5:0.01:5 + 2\pi \quad (4.39)$$

Şekil 4.37’de, bu eşitlikler kullanılarak oluşturulan yörünge ve bu yörünge için açık çevrim/kapalı çevrim denetim durumlarındaki takibi gösterilmektedir.



Şekil 4.37. Arzu edilen yörünge için açık ve kapalı çevrim denetim durumlarındaki takibi

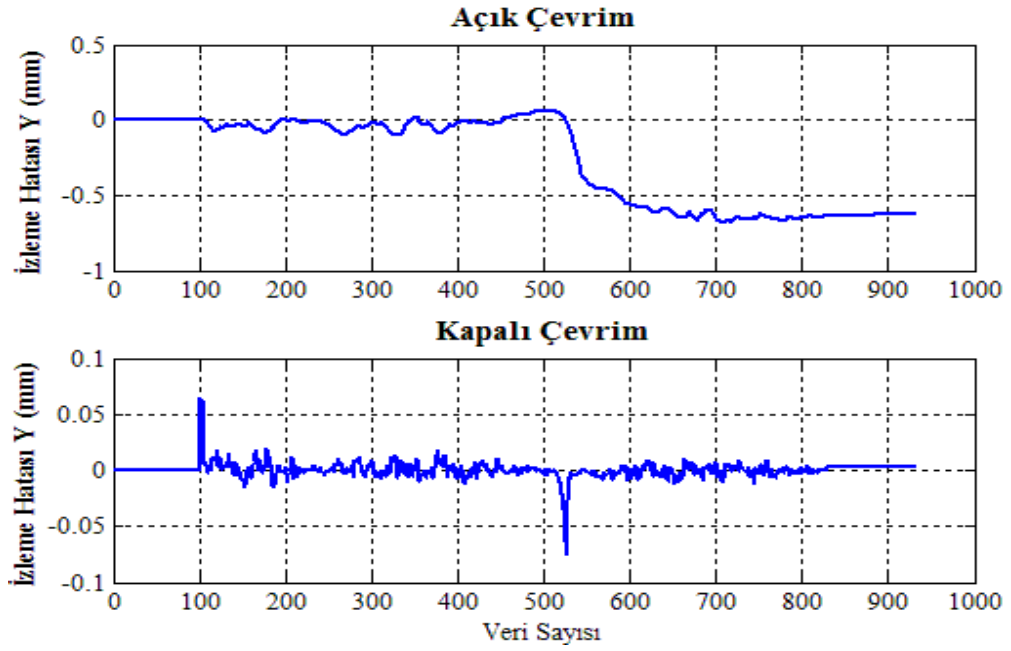
Tanımlanan bu yörüngenin takibinde açık çevrim/kapalı çevrim denetim durumlarında X, Y ve Z eksenlerinde yapılan izleme hataları sırasıyla Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40'ta gösterilmiştir.



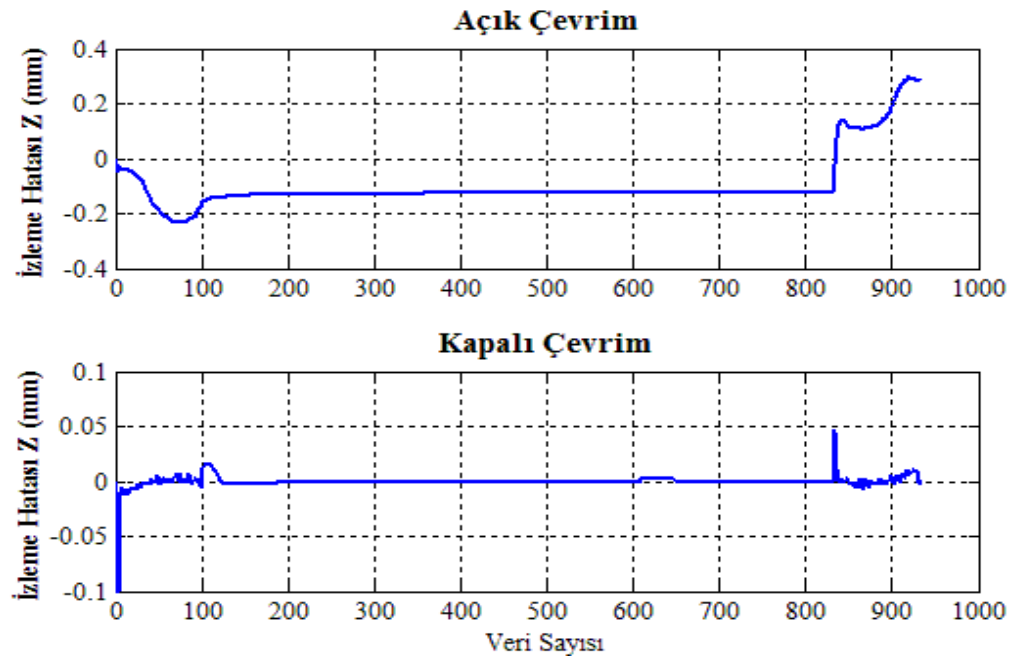
Şekil 4.38. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Şekil 4.38 incelendiğinde açık çevrim denetim yapılırken X ekseninde oluşan izleme hatasının $55\text{ }\mu\text{m}$ ile $100\text{ }\mu\text{m}$ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Kapalı çevrim denetim yapılırken bu hata yaklaşık $4\text{ }\mu\text{m}$ olarak ölçülmüş olup bu durumda oluşan en büyük hata değeri ise yaklaşık $25\text{ }\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.

Y ekseninde meydana gelen izleme hatası değeri yaklaşık $50\text{ }\mu\text{m}$ ile $680\text{ }\mu\text{m}$ aralığında iken kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık $8\text{ }\mu\text{m}$ gibi bir değere indirgenmiş olup bu durum Şekil 4.39'dan görülebilmektedir. Kapalı çevrim denetim durumunda oluşan en yüksek hata değeri yaklaşık $75\text{ }\mu\text{m}$ olarak ölçülmüş olup bu durum da yine Şekil 4.39'dan görülebilmektedir.



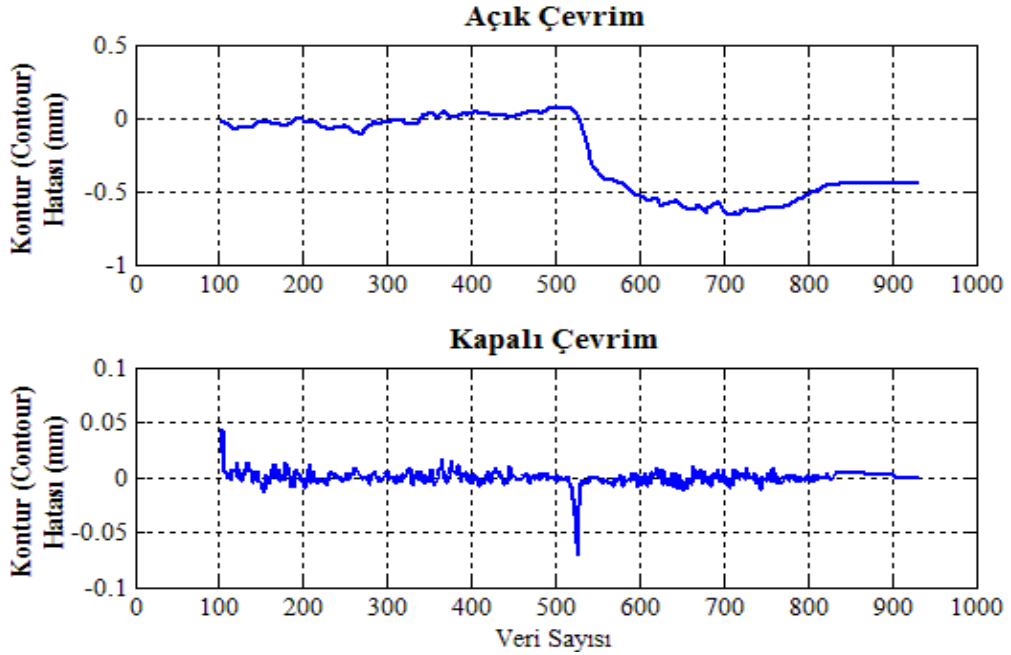
Şekil 4.39. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları



Şekil 4.40. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Z ekseninde meydana gelen izleme hatası değeri açık çevrim denetim durumunda yaklaşık 230 μm olarak ölçülürken kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık 5 μm gibi bir değere indirgenmiştir. Kapalı çevrim denetimde yön değiştirme esnasında

meydana gelen hata değeri yaklaşık 47 μm olarak ölçülmüştür. X ve Y eksenlerinde elde edilen izleme hataları kullanılarak hesaplanan kontur hatası Şekil 4.41’de gösterilmiştir.



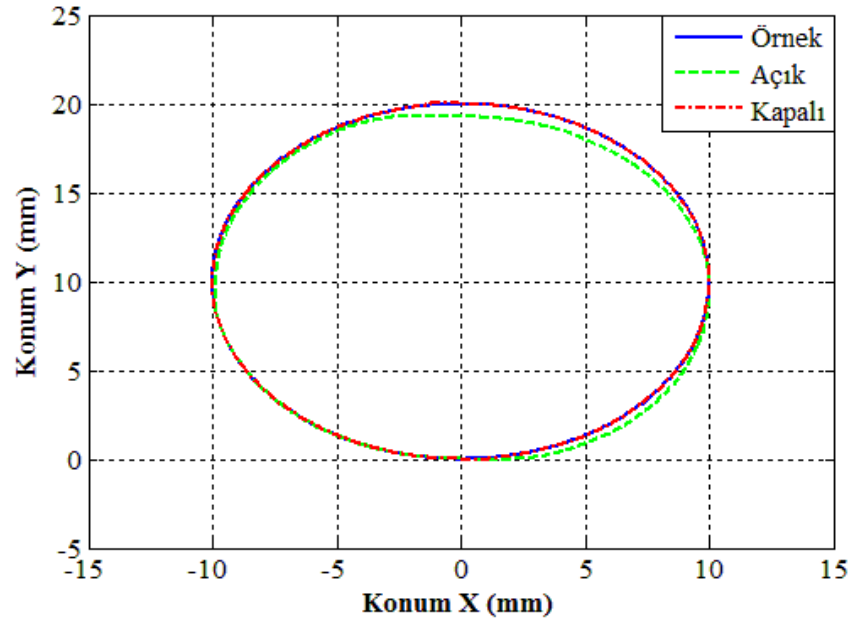
Şekil 4.41. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası

Şekil 4.41’den görülebileceği gibi açık çevrim denetim durumunda kontur hatası 50 μm ile 660 μm aralığında iken bu değer kapalı çevrimde yaklaşık 8 μm gibi bir değere indirgenmiştir. En yüksek kontur hata değerinin ölçüldüğü an olan yön değiştirme anında ise bu değer yaklaşık 70 μm olduğu görülmektedir.

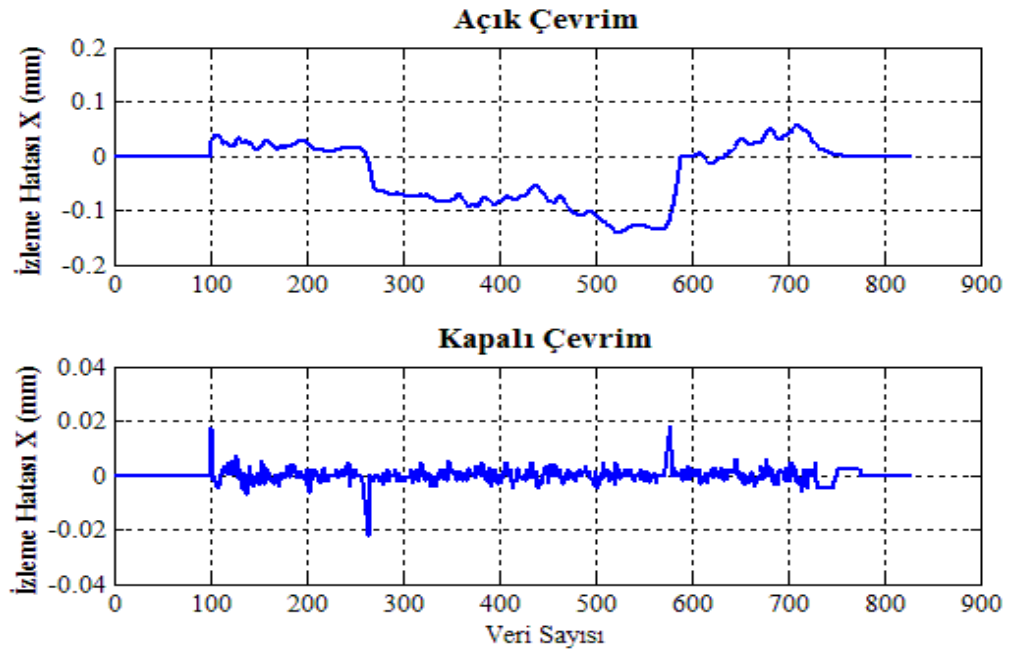
Yörünge takip ve kontur performansının incelenmesi amacıyla tanımlanan dairesel yörüngeye ait matematiksel eşitlikler Denklem 4.40’ta verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} x &= (a/5) \sin(t) \\ y &= (b/5) \cos(t) \\ z &= c \end{aligned} \right\} \quad t = 0:0.01:2\pi \quad (4.40)$$

Bu matematiksel eşitlikler kullanılarak tanımlanan arzu edilen yörünge ve açık çevrim/kapalı çevrim denetim durumlarında bu yörüngeyi takibi Şekil 4.42’de gösterilmiştir.



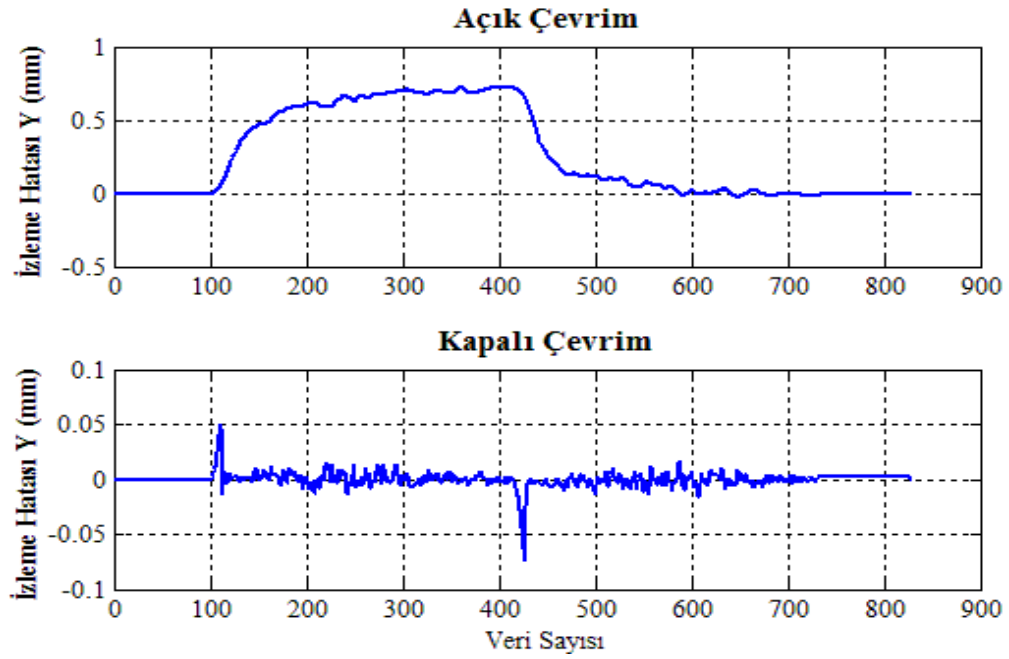
Şekil 4.42. Arzu edilen yörüngenin açık ve kapalı çevrim denetim durumlarında takibi



Şekil 4.43. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Şekil 4.43'den görülebileceği gibi açık çevrim denetim durumunda X ekseninde meydana gelen izleme hatası değeri 30 μm ile 140 μm aralığında değişirken kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık 3 μm gibi bir değere indirgenmiştir. Kapalı çevrim

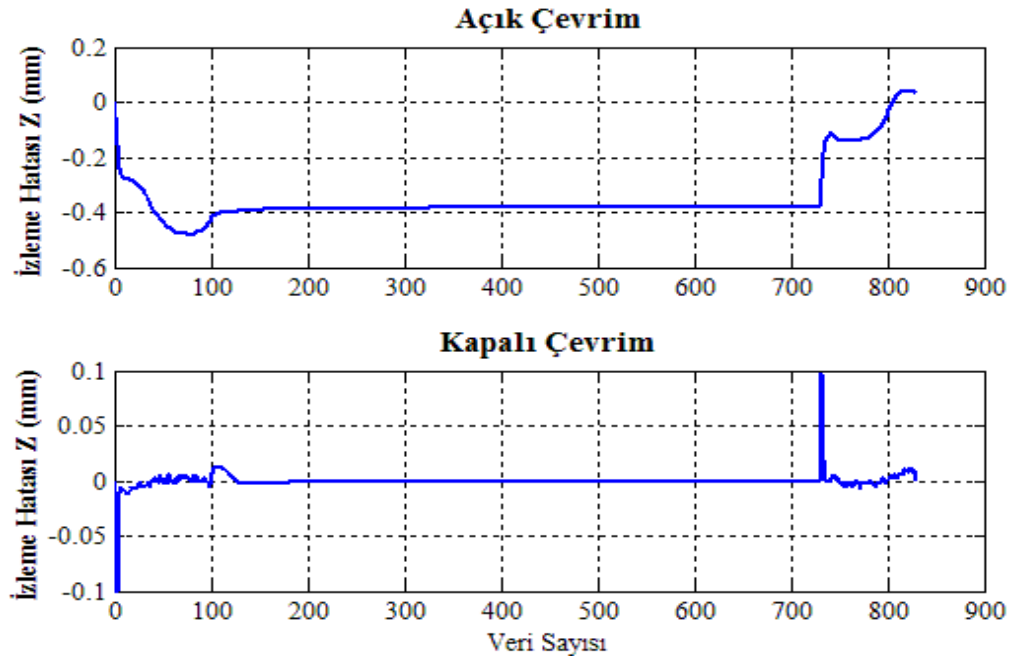
denetimde yön değiştirme esnasında meydana gelen hata değeri yaklaşık 20 μm olarak ölçölmüştür.



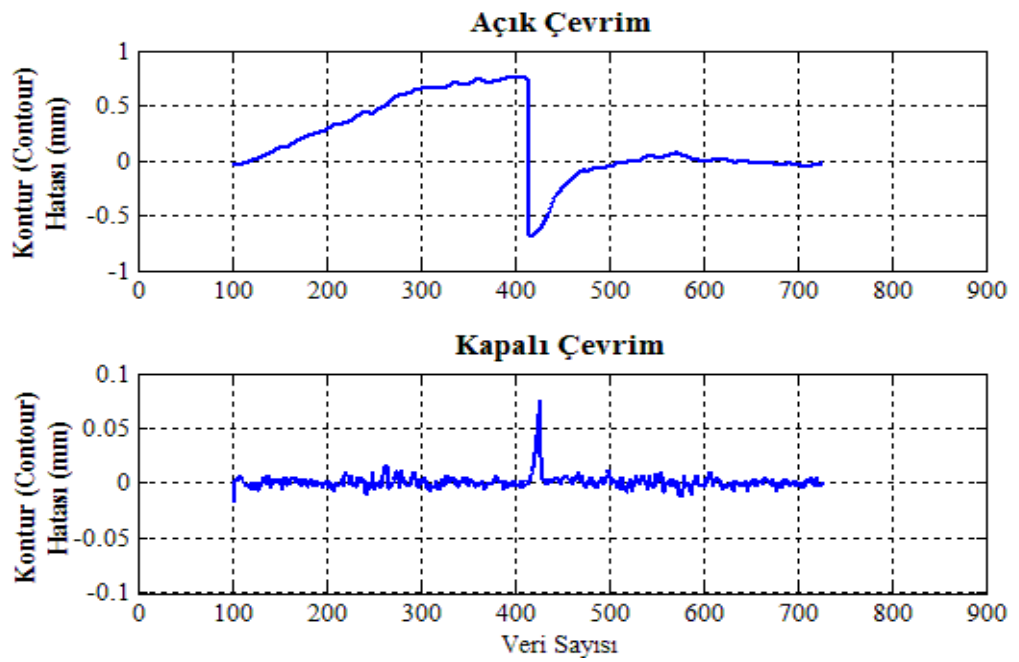
şekil 4.44. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Y ekseninde meydana gelen izleme hatası değeri yaklaşık 700 μm iken kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık 10 μm gibi bir değere indirgenmiş olup bu durum şekil 4.44'ten görölebilmektedir. Kapalı çevrim denetimde yön değiştirme esnasında meydana gelen hata değeri yaklaşık 50 μm 'dir.

şekil 4.45'te Z ekseninde meydana gelen izleme hatası değerinin yaklaşık 480 μm olduğu görölmektedir. Kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık 5 μm gibi bir değere indirgenmiş ve yön değiştirme esnasında meydana gelen değeri yaklaşık 100 μm olarak ölçölmüştür. Bu yörünge için hesaplanan kontur hatası şekil 4.46'da gösterilmiştir.



Şekil 4.45. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları



Şekil 4.46. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası

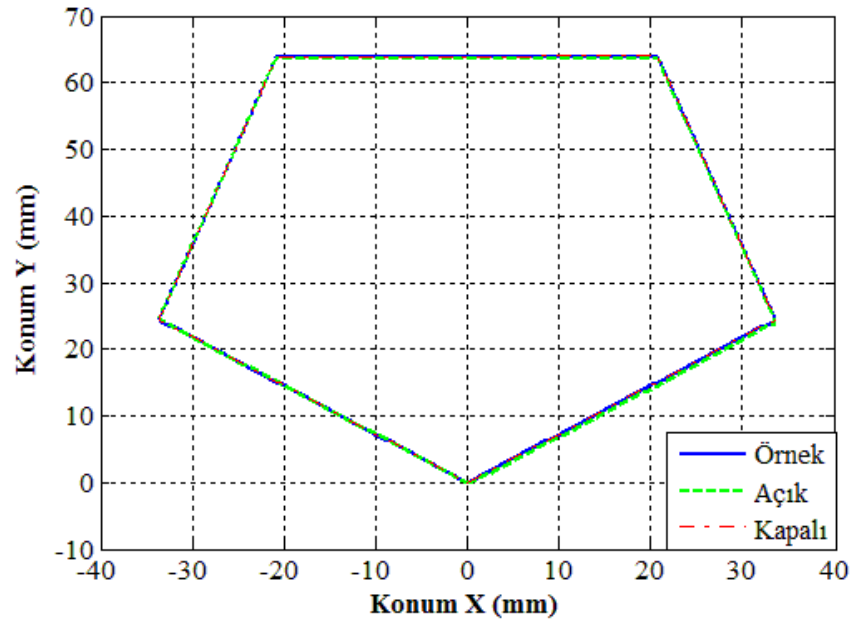
Şekil 4.46'dan görülebileceği gibi açık çevrim denetim durumunda kontur hatası 60 μm ile 750 μm aralığında iken bu değer kapalı çevrimde yaklaşık 7 μm gibi bir değere

indirgenmiştir. Kontur hata değerinin en yüksek ölçüldüğü an olan yön değiştirme anında ise bu değerin yaklaşık 75 μm olduğu görülmektedir.

Denklem 4.41’de verilen eşitlikler kullanılarak beşgen yörünge tanımlanmış ve sistemin yörünge takip ve kontur performansı incelenmiştir.

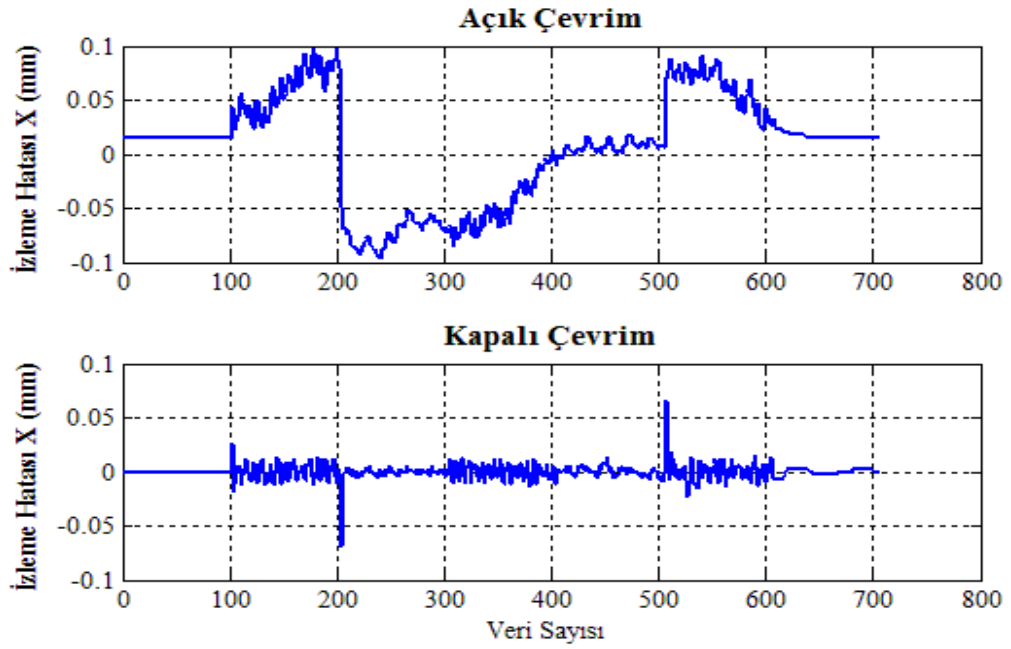
$$\left. \begin{array}{l} x = a \sin(t) \\ y = b \cos(t) \\ z = c \end{array} \right\} \quad t = 0: 2\pi/k: 2\pi, \quad k = 5 \quad (4.41)$$

Şekil 4.47’de, Denklem 4.41’de verilen eşitlikler kullanılarak tanımlanan arzu edilen yörünge ve bu yörünge için açık çevrim/kapalı çevrim denetim durumlarındaki takibi gösterilmiştir.



Şekil 4.47. Arzu edilen yörünge için açık ve kapalı çevrim denetim durumlarında takibi

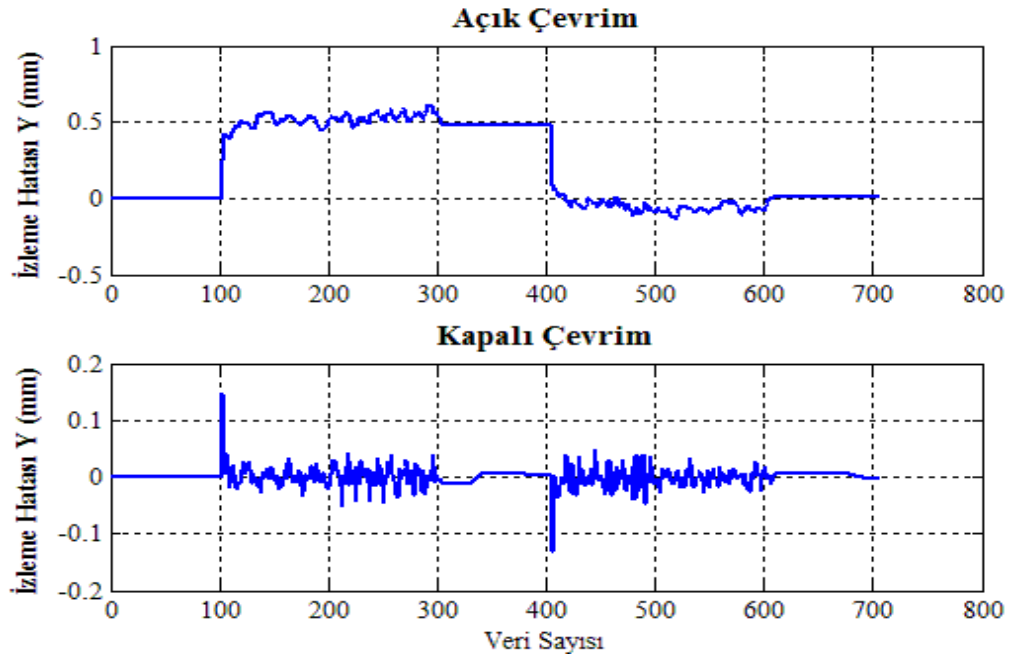
Her iki denetim durumu için tanımlanan bu yörünge için takibinde X, Y ve Z eksenlerinde yapılan izleme hataları sırasıyla Şekil 4.48, 4.49 ve 4.50’de gösterilmiştir.



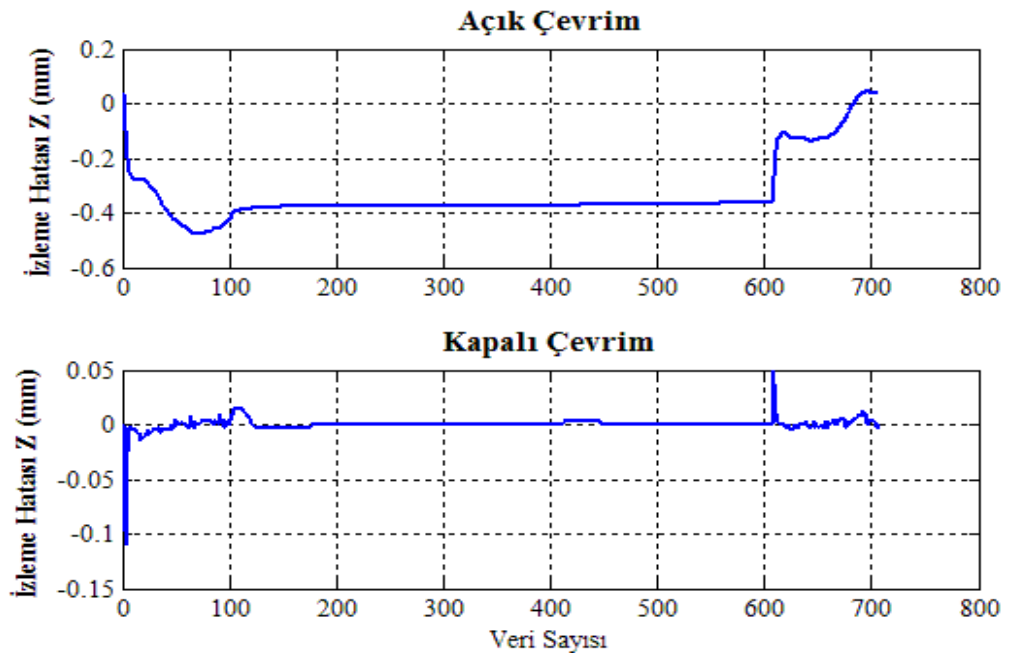
Şekil 4.48. X ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Açık çevrim denetim durumunda X ekseninde meydana gelen izleme hatası değerinin $50\ \mu\text{m}$ ile $100\ \mu\text{m}$ aralığında değiştiği görülmüştür. Kapalı çevrim denetim yapılırken yön değiştirme esnasında meydana gelen hata değeri yaklaşık $66\ \mu\text{m}$, aynı yönde ilerlerken ise bu hata yaklaşık $8\ \mu\text{m}$ civarına indirgenmiş olup bu değerler Şekil 4.48’de gösterilmiştir.

Şekil 4.49’dan, Y ekseninde meydana gelen açık çevrim izleme hatasının yaklaşık $80\ \mu\text{m}$ ile $600\ \mu\text{m}$ arasında değiştiği ancak kapalı çevrim denetim kullanılarak hatanın yaklaşık $30\ \mu\text{m}$ ’ye indirgendiği görülebilmektedir. Kapalı çevrim denetimde en büyük hata yine yön değiştirme esnasında oluşmuş ve yaklaşık $130\ \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.



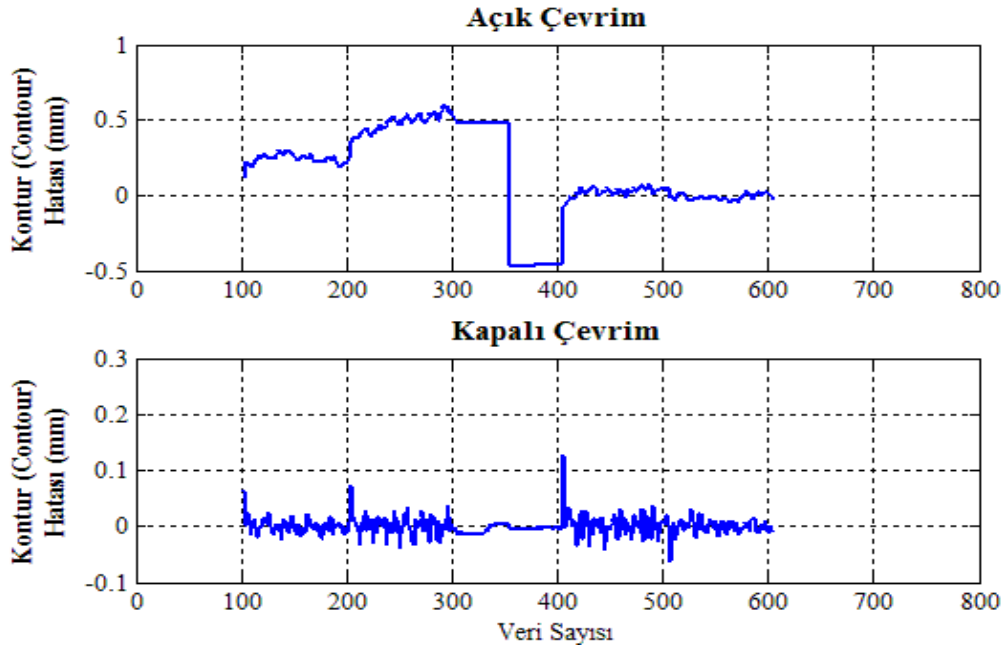
Şekil 4.49. Y ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları



Şekil 4.50. Z ekseninde açık ve kapalı çevrim denetim durumundaki izleme hataları

Z ekseninde meydana gelen açık çevrim izleme hatası değeri Şekil 4.50’de yaklaşık 475 μm olarak gözlemlenirken kapalı çevrim denetim durumunda bu hata yaklaşık 8 μm olarak gözlemlenmiştir. Kapalı çevrim denetimde meydana gelen en büyük hata değeri

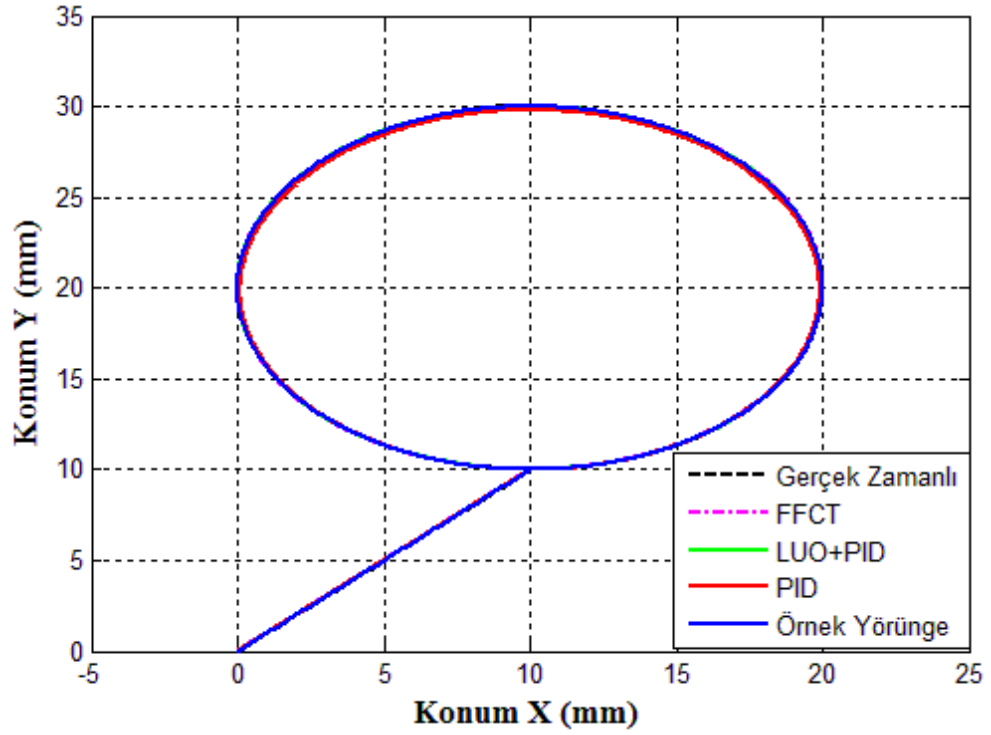
yaklaşık 50 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.51, X ve Y eksenlerinde elde edilen izleme hataları kullanılarak hesaplanan kontur hatasını göstermektedir.



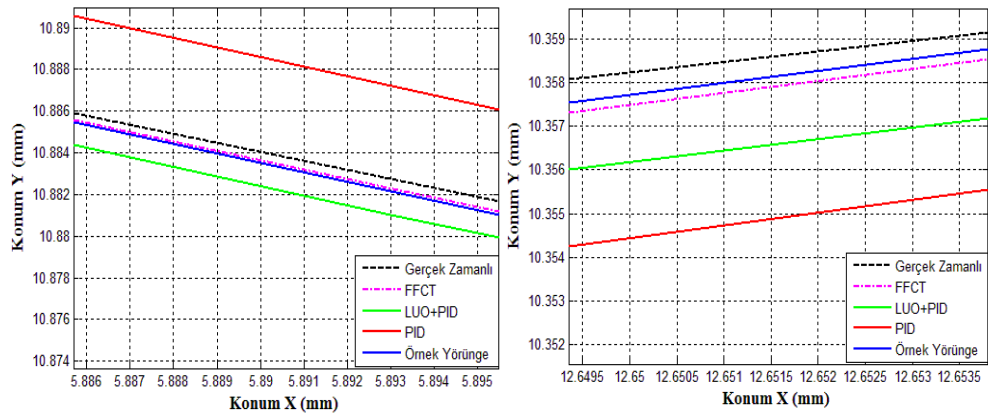
Şekil 4.51. Tanımlanan yörüngede meydana gelen kontur (contour) hatası

Açık çevrim denetim durumunda 50 μm ile 600 μm arasında oluşan kontur hatası, kapalı çevrim denetim yapılmasıyla yaklaşık 20 μm olarak elde edilmiştir. En yüksek kontur hatası yön değiştirme anında yaklaşık 125 μm olarak ölçülmüştür.

Kartezyen robotun bilgisayar benzetimlerinden elde edilen sonuçlar ile yapılan gerçek zamanlı deneylerden elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla Şekil 4.37’de tanımlanan yörünge kullanılmıştır. Şekil 4.52’de bu çalışmada göz önüne alınan her bir denetleyici için elde edilen yörünge takip başarımı gösterilmiştir. Tanımlanmış olan örnek yörünge ve tasarlanmış olan denetleyicilerin bu yörüngeyi takip edebilme yaklaşımına ait detaylar Şekil 4.53’te sunulmuştur.



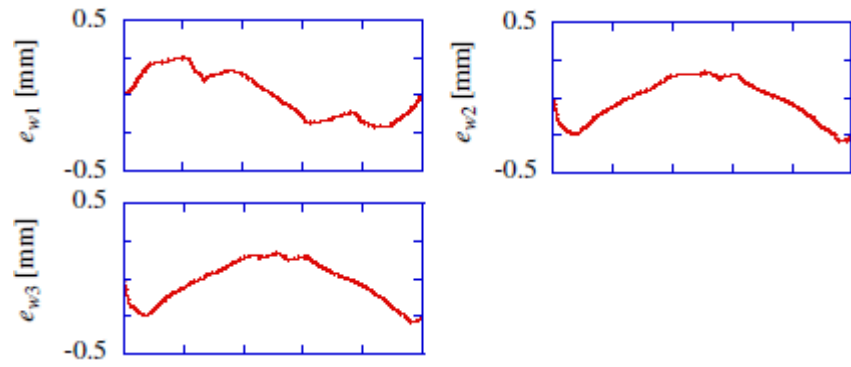
Şekil 4.52. Bilgisayar benzetimi ve gerçek zamanlı deney sonuçlarının karşılaştırılması



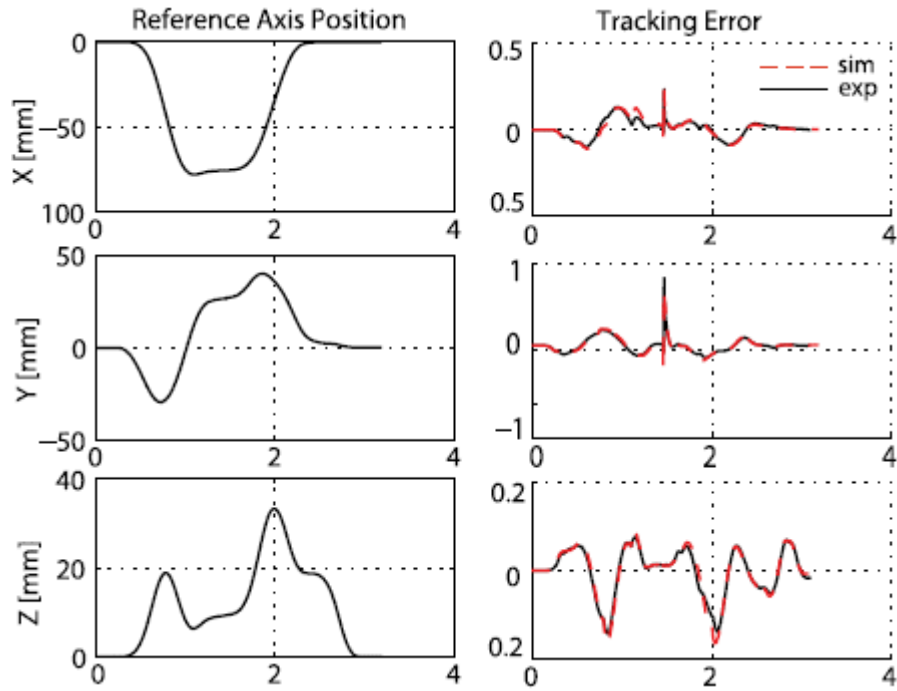
Şekil 4.53. Farklı denetleyicilerin tanımlanan örnek yörüngeyi takip başarımının detay analizi

Şekil 4.53'ten görülebileceği gibi bilgisayar benzetim sonuçları ile yapılan gerçek zamanlı deneylerden elde edilen sonuçlar büyük bir yakınlık derecesi ile örtüşmektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların performans analizini yapabilmek amacıyla literatürde Uchiyama *et al.* (2009) ve Khoshdarregi *et al.* (2014) tarafından yapılan

çalışmalar ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalarda her bir eksenin takip etmesi gereken yörünge ve bu yörüngelerin takibinde yapılan izleme hataları sırasıyla Şekil 4.54 ve 4.55'te gösterilmiştir. Şekil 4.54'ten tanımlanan dairesel yörüngenin takibinde her bir ekseninde oluşan en büyük izleme hatası değerinin yaklaşık $250\ \mu\text{m}$ olduğu görülmektedir. Burada e_{w1} , e_{w2} ve e_{w3} sırasıyla X, Y ve Z eksenlerinde meydana gelen izleme hatalarının değişimini göstermektedir.



Şekil 4.54. Tanımlanan dairesel yörüngenin takibinde oluşan izleme hatalarının değişimi (Uchiyama *et al.* 2009)



Şekil 4.55. Tanımlanan yörünge için eksenlerin izlemesi gereken referans yörüngeler ve bu yörüngelerin takibinde oluşan izleme hatalarının değişimi (Khoshdarregi *et al.* 2014)

X eksenindeki hareket için tanımlanan referans yörüngenin takibindeki maksimum izleme hata değerinin yaklaşık 250 μm olduğu Şekil 4.55'ten görülmektedir. Yine benzer yaklaşımla Y ve Z eksenlerinde tanımlanan yörüngelerin takibinde meydana gelen maksimum izleme hatalarının sırasıyla 800 μm ve 180 μm olduğu görülmektedir. Bu hata değerleri sırasıyla Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40 ile karşılaştırıldığında birim uzunluk başına yapılan hata değerlerinin iyileştirildiği gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında üç serbestlik dereceli bir kartezyen robotun tüm matematiksel analizleri yapılmış olup farklı tip eyleyici ve kontrol yapıları kullanılarak kartezyen robot uç işlevcisinin yörünge takip ve kontur kontrolü gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bunun için öncelikle tasarlanan kartezyen robotun kinematik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Tasarlanan sistemin dinamik analizi yapılırken Lagrange eşitliklerinden faydalanılmıştır. Her bir eksen için elde edilen tork değerleri benzetim çalışmalarında DC eyleyicilere yük torku olarak etki ettirilmiştir. Tasarlanan kartezyen robotun uygulaması için kesme kuvvetlerinin her bir eksen için ayrı ayrı analizleri yapılarak eksenler üzerine uygulanan toplam kuvvetler belirlenmiş ve tasarımda kullanılacak mekanik malzemeler bu hesaplamalara göre seçilmiştir.

Yapılan bu analizlerin doğruluğunun belirlenmesi ve tasarlanan kartezyen robotun yörünge ve kontur kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla PID kontrol, gözleyici tabanlı PID kontrol ve ileri beslemeli hesaplanan tork kontrol yöntemlerinden yararlanılmıştır. Yapılan benzetim sonuçlarına göre kartezyen robotun yörünge ve kontur kontrolünde gözleyici tabanlı PID kontrol yapısının PID kontrol yapısına göre çok daha iyi performans gösterdiği ancak en yüksek performansın ileri beslemeli hesaplanan tork kontrol yönteminin kullanıldığı durumda elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca her bir kontrol yönteminden yararlanılarak yapılan benzetimlerde benzetimlerin gerçekleşme süreleri ölçülmüştür. İleri beslemeli hesaplanan tork kontrol yönteminin benzetim süresinin diğer kontrol yöntemlerine göre daha uzun olduğu gözlemlenmiştir. Gerek toplamda ve gerekse noktasal bazda yapılan hata değerleri göz önüne alındığında bu yöntem kullanılarak elde edilen performans iyileştirmesi ile kullanılan malzemenin çok daha hassas bir şekilde işleneceği açıktır.

Söz konusu kartezyen robotun gerçek zamanlı yörünge ve kontur kontrolü ise hazırlanan bir arayüz programı üzerinden 32 bitlik bir mikro denetleyici kullanılarak yazılım tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan gerçek zamanlı açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol deneylerinde robotun yörünge takip ve kontur performansları analiz edilmiştir. Elde

edilen sonuçlara göre özellikle kapalı çevrim kontrol yönteminin kullanılması durumunda yörünge izleme hataları X ekseninde %63 ile %93 aralığındaki oranlarda ve Y ekseninde %20 ile %92 aralığındaki oranlarda azaltılmıştır. Ayrıca kontur hatalarında da %50 ile %88 aralığındaki oranlarda iyileşme sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında kartezyen robotlar üzerinde detaylı analizi henüz yapılmamış olan Luenberger gözleyici tabanlı PID ve ileri beslemeli hesaplanan tork kontrol yöntemlerinin yörünge takip ve kontur kontrolü üzerindeki etkisinin detaylı analizinin yapılması noktasında literatüre katkıda bulunulmaya çalışılmıştır. Tasarlanan kartezyen robot yapısı sadece akademik değil aynı zamanda teknolojik katkıya da sahip özelliktedir. Teknolojik katkılarının birisi endüstriyel anlamda olup, esnek üretim sistemleri içerisine kolaylıkla entegre edilebilir olması ve geliştirilen yazılım sayesinde konum sezicilerden aldığı bilgileri kullanarak çok daha hassas malzeme şekillendirme işlemlerinin yapılabilmesidir.

Kartezyen robotun bilgisayar benzetimlerinden elde edilen sonuçlara göre, kontrolcü yapısına eklenen gözleyici, yörünge izleme ve kontur performansını artırmaktadır. Ancak sistemde var olan bozucu etkilerin varlığı nedeni ile bu artış sınırlı değerlerde kalmaktadır. Sistemde var olan bozucu etkilerin yine sistem içerisinde tasarlanacak algoritmalarla yok edilmesi en iyi yörünge takip ve kontur kontrolünü sağlamaktadır. Söz konusu kontrol yöntemlerinden olan ileri beslemeli hesaplanan tork kontrol yöntemi kullanılarak sistemin yörünge takip ve kontur performansı artırılmıştır. Yapılan gerçek zamanlı deneylerde robot uç işlevcisinin yörünge ve kontur performans analizi açık ve kapalı çevrim denetim yöntemleri kullanılarak yapılmıştır.

Gelecek çalışmalarda sistem alt tablasına yönelim hareketi yapabilme kabiliyetine sahip parça ilave edilerek eksen sayısı artırılmaya çalışılacaktır. Kartezyen koordinatlarda hareket eden yapının küresel ve silindirik koordinat sistemlerinde de hareket edebilmesi için gerekli tasarımların yapılması planlanmaktadır. Ayrıca tasarlanan sistemde farklı eyleyici tipleri ve farklı denetim yapıları kullanılarak yörünge izleme ve kontur hatalarının azaltılmasına çalışılacaktır.

KAYNAKLAR

- Acarnely P., 2007. Stepping Motors a Guide to Theory and Practice. The Institution of Engineering and Technology, pp 153, London, United Kingdom.
- Astarloa A., Bidarte U. and Zuloaga A., 2003. Reconfigurable microstepping control of stepper motors using FPGA embedded RAM. in Proc. IEEE IECON, SPAIN.
- Akkurt, M., 2006. Makina Bilgisi. Birsen Yayınevi, 408s, İstanbul.
- Akkurt, M., 2006. Makina Elemanları Problemleri. Birsen Yayınevi, 448s, İstanbul.
- Akkurt, M., 2010. Talaş Kaldırma Bilimi ve Teknolojisi CNC Takım Tezgahları ve Üretim Otomasyonu. Birsen Yayınevi, 533s, İstanbul
- Austin, D., 2005. Generate Stepper Motor Speed Profiles in Real Time. EE Times-India.
- Bal G., 2006. Bölüm 5, Özel Elektrik Makinaları. Seçkin Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 99-123.
- Bellini, A., Concarri C., Franceschini G., and Toscani A., 2007. Mixed-Mode PWM for high performance stepping motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54(6), 3167-3177.
- Bingöl Z. ve Küçük S., 2008. Robot Dinamiği ve Kontrolü. Birsen Yayınevi, 418s, Türkiye.
- Bingöl Z. ve Küçük S., 2009. Robot Kinematiği. Birsen Yayınevi, 341s, Türkiye.
- Benjamin C.K., Bir A., 1999. Bölüm 4-4, Otomatik Kontrol Sistemleri. Literatür Yayınevi, İstanbul, Türkiye., 142-236.
- Büyükaşahin, U., 2006. Üç Eksenli CNC Tezgah Tasarımı ve Uygulaması. Y Lisans Tezi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Douglas T. R., 1958. Automatic Programming for Numerically Controlled Machine Tools. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Efe M. Ö., 2012. Otomatik Kontrol Sistemleri Matlab Tabanlı Analiz ve Yaklaşımı ile., Seçkin Yayınevi, 392s, Ankara, Türkiye.
- Ellis G., 2002. Observers in Control System A practical Guide. Academic Press An Imprint of Elsevier Science, pp. 244, United States of America.
- Emerald P. And Kadrmas K., 2001. Smart Constant Torque Microstepping Drive Circuitry. Application Information., pp 1-14.
- Erkorkmaz K. and Altintas Y., 2001. High speed CNC system design part III: High speed tracking and contouring control of feed drives, Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 41, no. 11, pp. 1637–1658.
- Frank, H., Barteit, D., Meyer, M., Novak, G., Mahlknecht, S., 2008. Optimized Control Methods for Capturing Flying Objects with a Cartesian Robot. Robotics, Automation and Mechatronics.
- Garciaherreros I., Kestelyn X., Gomand J., Barre P.-J., 2010. Decoupling Basis Control of Dual-Drive Portal Stages for Path-Tracking Applications. Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium, France.
- Grimbleby G., 2008. Stepping Motors. System Engineering, University of Reading., England.
- Hu C., Yao B., Wang Q., 2010. Coordinated Adaptive Robust Contouring Control of an Industrial Biaxial Precision Portal With Cogging Force Compensations. IEEE Transactions On Industrial Electronics., 57., 5, 1746-1754.

- Jee S, Koren Y., 2004. Adaptive fuzzy logic controller for feed drives of a CNC machine tool. *Mechatronics*;14(3):299–326.
- Kenjo, T., 1984. *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*. Oxford Monographs in Electrical Engineering, pp.243, Newyork, United States of America.
- Kim, W., Yang, C., and Chung C., 2011. Design and implementation of simple field-oriented control for permanent magnet stepper motors without DQ transformation. *IEEE Transaction on Magnet*, 47(10), 4231-4234.
- Koivo A. J. , 1989. *Fundamentals for Control of robotic manipulators*, John Wiley & Sons INC., Purdue University,
- Koren Y., 1980. Cross-coupled biaxial computer for manufacturing systems. *ASME J. Dyn. Syst., Meas. Control*, vol. 102, no. 4, pp. 265–272.
- Koren Y. and C. C. Lo, 1991 Variable gain cross coupling controller for contouring. *CIRP Ann.*, vol. 40, no. 1, pp. 371–374.
- Khoshdarregi M. R., Tappe S., and Altintas Y., 2014. Integrated five-axis trajectory shaping and contour error compensation for high-speed CNC machine tool. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 6, 1859-1871.
- Lewis D., Abdallah C., and Dawson D., 1993. *Control of Robot Manipulators*. Mac Millan Publishing Company.
- Luenberger, D. G., 1966. Observers for multi-variable systems. *IEEE Transaction Automatic Control.*, AC-11, 2, p. 190
- Luenberger D. G., 1963. Observing the state of a linear system. *IEEE Trans. on Military Electronics* vol. 1. MIL-8, pp. 74-80.
- Luenberger D. G., 1971. An Introduction to observers. *IEEE Trans. On Automatic Control* vol. 16, no. 6, pp. 596-602.
- Mannava A, Balakrishnan SN. Tang L, and Landers RG., 2012. Optimal Tracking Control of Motion Systems. *IEEE Trans. Contr. Sys. Techn.* 20(6):1548-1558.
- Mendi, F., 2006. *Takım Tezgahları Teori ve Hesapları*. Gazi Kitabevi, 325, Ankara
- Masory O., 1986. Improving contouring accuracy of NC/CNC systems with additional velocity feed forward loop. *J Eng Ind* 108:227–30.
- Matsu, N., Nakomura M., and Kosako T., 1996. Instantaneous torque analysis of hybrid stepping motor. *IEEE Transcations on Industry applications*, 32(5), 1176-1996.
- McDonough J. C., Susskind A.W., 1969. *A Numerically Controlled Milling Machine*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Megep, 2006. “CNC Lazerle Kesme” Ankara.
- Megep, 2006 “CNC Freze Tezgâhları,” Ankara.
- Michael H. H., 2006 . “Hassas kalıpların yüksek prodüktivite ile üretilme usulleri” *Makine İhtisas Dergisi* Nisan, İstanbul.
- Oral A., 2012. *CNC Takım Tezgahları ve CNC Programlama*, Balıkesir Üniv., Balıkesir.
- Ouyang PR, Dam T, Huang J, Zhang WJ., 2012. Contour tracking control in position domain. *Mechatronics*;22(7):934–44.
- Pasin F., 1994. *Mekanik Sistemler Dinamiği*, İTÜ Rekt., Sayı 1540, Türkiye.
- Paul RP., 1981. *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*. MIT press., pp 273 , Cambridge, London, England.
- Sabbagh QS. and Mahdi AS., 2010. Pulse Width Modulation for High Performance Hybrid Stepper Motor. *Journal of Engineering.*, vol.16 no.4, 6028-6047

- Sanchez PS. and Cortes FR., 2010. Chapter 8, Cartesian Control for Robot Manipulators. Robot Manipulators, Trends and Development., China 166-212.
- Sciavicco, L., Siciliano, B., 1996. Modeling And Control of Robot Manipulators. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 11-26.
- Sencer B, Altintas Y., 2009 Modeling and control of contouring errors for five-axis machine tools part ii precision contour controller design. J Manuf Sci Eng 131-139.
- Siripala P. J. and Sekercioglu Y.A., 2013. A Generalized Solution for Generating Stepper Motor Speed Profiles in Real Time. Mechatronics, 23, 541-547
- Spong M. W., Hutchinson S. and Vidyasagar M., 2006. Robot Modeling and Control. John Willey & Sons, Inc., United States of America.
- Su KH and Cheng MY., 2008 Contouring accuracy improvement using cross-coupled control and position error compensator. Int J Mach Tools Manuf;48(12-13):1444-53.
- Suh, S. H., Kang, S. K., Chung, D. H. and Stroud I. I., 2008. Theory and Design of CNC Systems. Springer Publishing., Ph.D.,
- Tan K. K., Lim S. Y., Huang S., Dou H. F., Giam T. S., 2004. Coordinated Motion Control of Moving Portal Stages for Precision Applications Based on an Observer-Augmented Composite Controller. IEEE Transactions on Control Systems Technology,12, 6, 984-991.
- Tang L, Landers RG., 2012. Predictive contour control with adaptive feed rate. IEEE Trans Mechatronics; vol.17 no. 4 pp .669-79.
- Teo C.S.,Tan K.K., Lim S.Y., Huang S., Tay E.B.,2007. Dynamic modeling and adaptive control of a H-type portal stage. ELSEVIER Mechatronics,17, 361-367.
- Teo C.-S.,Tan K.-K., Lim S.-Y., 2008. Dynamic Geometric Compensation for Portal Stage Using Iterative Learning Control. IEEE Transactions on Instrumentation Measurement, 57, 2, 413-419.
- Tomizuka M., Chen M. S., Renn S., and Tsao T.-C., 1987. Tool positioning for noncircular cutting with lathe. ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control, vol. 109, no. 2, pp. 176-179.
- Uchiyama N, Nakamura T, Yanagiuchi H., 2009. The effectiveness of contouring control and a design for three-dimensional machining. Int J Mach Tools Manuf; 49(11): 876-884.
- Wang L, Jin F., Sun Y., 2009. Contour Control for Direct Drive XY Table. Proceedings of the 2009 IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation, China.
- Yongkai X., 2006. Robust proximate-time-optimal command shaping for motion control: Scanning probe microscope application., Ph.D., Prude University, West Lafayette, Indiana.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Erzurum’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum’da tamamladı. Lisans öğrenimini 1999 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği bölümünden 2003 yılında mezun olarak tamamladı. 2003-2006 yılları arasında Atatürk Üniversitesi’ne 2006 yılından sonra Erzincan Üniversitesi’ne bağlanan Tercan Meslek Yüksekokulu Elektrik Bölümü’nde 2009 yılına kadar öğretim elemanı olarak görev yaptı. Yüksek lisans öğrenimini 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde tamamlayarak yine aynı yıl Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliğinde doktora eğitimine başladı. 2009 yılından itibaren Atatürk Üniversitesi Erzurum Meslek Yüksekokulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü’nde öğretim elemanı olarak görev yapan Muhammed Fatih ÇORAPSIZ evli ve bir çocuk babasıdır.