

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR DÖRT PERVANELİ İHA'NIN YÖNELİM  
KONTROLÜ İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN  
KONTROLCÜ TABANLI KAZANÇ PLANLAMA  
ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ**

**Kadircan KURTULUŞ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Onur AKBATI

Ağustos, 2023

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR DÖRT PERVANELİ İHA'NIN YÖNELİM KONTROLÜ**  
**İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN KONTROLCÜ TABANLI**  
**KAZANÇ PLANLAMA ALGORİTMASININ**  
**GELİŞTİRİLMESİ**

Kadircan KURTULUŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 11.08.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Onur AKBATI  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Onur AKBATI, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ADIGÜZEL, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Onur AKBATI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Bir Dört Pervaneli İHA'nın Yönelim Kontrolü İçin Doğrusal Olmayan Kontrolcü Tabanlı Kazanç Planlama Algoritmasının Geliştirilmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Kadircan KURTULUŞ

İmza



Bu çalışma; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından, 1001 - Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında tamamlanan 118M709 numaralı proje ile desteklenmiştir.

*Bilime ithafen*



## TEŞEKKÜR

---

Bu yüksek lisans tezimi tamamlamamda destekçilerim olan aileme en içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum. İnanmış olduğum hedefe; benimle beraber inanarak yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme minnettarım. Onların sevgisi ve güveniyle bu noktadayım. Onların sağladığı imkanlar sayesinde bu tez çalışmasını gerçekleştirebildim ve bu başarıya ulaşabildim. Onlara sonsuz teşekkür ediyorum... beni her zaman destekleyip cesaretlendirdikleri için minnettarım.

Lisans danışmanım olan Dr. Türker TÜRKER hocama teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Lisans öğrencisi olduğum dönemde beni keşfeden, yönlendiren, bana çalışma imkanı sağlayan ve ilham veren hocama minnettarım. Onun akademik bilgisi, yönlendirmesi, önerileri ve eleştirileri; beni daha iyi bir araştırmacı ve öğrenci olmaya teşvik etti. Benimle çalışma şansı verdiği için ona teşekkür ederim.

Lisans öğrenim hayatımı benimle paylaşan, beraber projeler ve çalışmalar yaptığımız Bilal BADUR ve Mehmet KILIÇ arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunmak isterim. Gerek akademik hayatımda, gerekse sosyal yaşantımda onlarla beraber olmak büyük bir mutluluktur. Onlarla beraber geçirdiğim zamanlarda elde ettiğim deneyimler ve paylaştığım anılar, lisans öğrenim hayatımı özel kılan sebeplerdendir. Onlara çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans danışmanım olan Dr. Onur AKBATI hocama teşekkürlerimi sunmak istiyorum. TÜBİTAK projesinde beraber geçirdiğimiz süre boyunca gerçek zamanlı bir uygulama üzerinde çalışma fırsatı buldum ve kendimi geliştirdim. Gerek bu proje kapsamında, gerekse diğer iş fırsatları ve projelerimizde bana çalışma fırsatı verdiği için ve yüksek lisans tezimin danışmanı olduğu için ona teşekkür ederim.

Tezimin son halinin oluşmasında büyük katkıları olan Şevval ÇELENK'e teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Onunla beraber tezimdeki yazım ve noktalama yanlışlıklarını düzeltme şansım oldu. Bu çalışma kapsamında beni motive ettiği ve bana yardımcı olduğu için ona çok teşekkür ederim.

Kadircan KURTULUŞ

# İÇİNDEKİLER

---

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xiv</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 İnsansız Hava Aracı Türleri ve Farkları . . . . .	1
1.2 Dört Pervaneli İHA'larda Yapılan Çalışmalar . . . . .	2
1.3 Kazanç Planlama Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar . . . . .	4
1.4 Motivasyon . . . . .	5
<b>2 DİNAMİK MODEL</b>	<b>7</b>
2.1 Dört Pervaneli İHA Konfigürasyonları . . . . .	7
2.2 Dört Pervaneli İHA'nın Dönüş Hareketleri . . . . .	8
2.3 Dört Pervaneli İHA'nın Çerçeve Dönüşümleri . . . . .	10
2.4 Dört Pervaneli İHA'nın Modellenmesi . . . . .	12
<b>3 KONTROLCÜ TASARIMI</b>	<b>18</b>
3.1 Geri Besleme Doğrusallaştırması . . . . .	20
3.2 Jacobian Matrisinin Eldesi . . . . .	20
3.3 Dönüşüm Kullanılarak Dinamiklerin Ayrıştırılması . . . . .	21
3.4 Yönelim PD Denetleyicisinin Tasarımı . . . . .	21
3.5 Sanal Denetleyici Sinyallerinin Geri Dönüşümü . . . . .	23
3.6 Dinamiklerin Durum Uzay Gösterimi ve Kararlılığı . . . . .	24
3.7 Kazanç Planlama Algoritması . . . . .	24
3.8 Çalışma Bölgelerinin Belirlenmesi . . . . .	28
3.9 Kontrolcü Kazanç Matrislerinin Tasarımı . . . . .	29
<b>4 BENZETİM ÇALIŞMALARI</b>	<b>33</b>

4.1	Benzetim 1	35
4.2	Benzetim 2	36
4.3	Benzetim 3	37
4.4	Benzetim 4	38
<b>5</b>	<b>SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR</b>	<b>41</b>
	<b>KAYNAKÇA</b>	<b>42</b>
	<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>46</b>



## SİMGE LİSTESİ

---

$\omega$	Açısal hız vektörü (Gövde çerçevesinde)
T	Açısal hız vektörü dönüşümünü sağlayan dönüşüm matrisi
$\eta$	Açısal konum vektörü (Dünya çerçevesinde)
J	Atalet matrisi
$\omega_n$	Doğal frekans
V	Doğrusal hız vektörü (Gövde çerçevesinde)
R	Doğrusal hız vektörü dönüşümünü sağlayan dönüşüm matrisi
$\xi$	Doğrusal konum vektörü (Dünya çerçevesinde)
l	Gövde çerçevesi yarıçapı
$\eta_d$	İstenen açısal konum vektörü (Dünya çerçevesinde)
$\Omega_d$	İstenen motor hızı
U	Kontrolcü sinyali vektörü
$\bar{u}$	Kontrolcü sinyali vektörü (Dönüştürülmüş)
m	Kütle
$\Omega$	Motor hızı
k	Motor itki kuvveti katsayısı
d	Motor sürüklenme kuvveti katsayısı
$F_m$	Motorun ürettiği itki kuvveti
Q	Motorun ürettiği sürüklenme kuvveti
$I_n$	n boyutlu birim matris
$0_n$	n boyutlu sıfır matrisi
$K_p$	Oransal kontrolcü kazanç matrisi
$T_s$	Örnekleme zamanı

$U$	Sanal kontrolcü sinyali vektörü
$k_{p4}$	Sapma açısı için oransal kontrolcü kazancı
$k_{d4}$	Sapma açısı için türevsel kontrolcü kazancı
$\zeta$	Sönümleme oranı
$T_p$	Tepe zamanı
$F_t$	Toplam itki
$\tau$	Toplam tork vektörü (Gövde çerçevesinde)
$\bar{U}$	Toplam torku denetleyen dönüştürülmüş kontrolcü sinyali vektörü (Gövde çerçevesinde)
$u$	Toplam torku denetleyen sanal kontrolcü sinyali vektörü (Gövde çerçevesinde)
$K_d$	Türevsel kontrolcü kazanç matrisi
$p$	x eksenindeki açısal hız (Gövde çerçevesinde)
$\phi$	x eksenindeki açısal konum (Dünya çerçevesinde)
$J_x$	x eksenindeki atalet (Gövde çerçevesinde)
$u$	x eksenindeki doğrusal hız (Gövde çerçevesinde)
$x$	x eksenindeki doğrusal konum vektörü (Dünya çerçevesinde)
$\phi_d$	x eksenindeki istenen açısal konum (Dünya çerçevesinde)
$x$	x eksenindeki konum (Dünya çerçevesinde)
$\tau_x$	x eksenindeki toplam tork (Gövde çerçevesinde)
$\bar{U}_2$	x eksenindeki toplam torku denetleyen dönüştürülmüş kontrolcü sinyali (Gövde çerçevesinde)
$U_x$	x eksenindeki toplam torku denetleyen sanal kontrolcü sinyali (Gövde çerçevesinde)
$q$	y eksenindeki açısal hız (Gövde çerçevesinde)
$\theta$	y eksenindeki açısal konum (Dünya çerçevesinde)
$J_y$	y eksenindeki atalet (Gövde çerçevesinde)
$v$	y eksenindeki doğrusal hız (Gövde çerçevesinde)
$y$	y eksenindeki doğrusal konum vektörü (Dünya çerçevesinde)
$\theta_d$	y eksenindeki istenen açısal konum (Dünya çerçevesinde)

$y$	y eksenindeki konum (Dünya çerçevesinde)
$\tau_y$	y eksenindeki toplam tork (Gövde çerçevesinde)
$\bar{U}_3$	y eksenindeki toplam torku denetleyen dönüştürülmüş kontrolcü sinyali (Gövde çerçevesinde)
$U_y$	y eksenindeki toplam torku denetleyen sanal kontrolcü sinyali (Gövde çerçevesinde)
$g$	Yerçekimi ivmesi (Dünya çerçevesinde)
$k_{p3}$	Yunuslama açısı için oransal kontrolcü kazancı
$k_{d3}$	Yunuslama açısı için türevsel kontrolcü kazancı
$k_{p2}$	Yuvarlanma açısı için oransal kontrolcü kazancı
$k_{d2}$	Yuvarlanma açısı için türevsel kontrolcü kazancı
$T_r$	Yükselme zamanı
$r$	z eksenindeki açısal hız (Gövde çerçevesinde)
$\psi$	z eksenindeki açısal konum (Dünya çerçevesinde)
$J_z$	z eksenindeki atalet (Gövde çerçevesinde)
$w$	z eksenindeki doğrusal hız (Gövde çerçevesinde)
$z$	z eksenindeki doğrusal konum vektörü (Dünya çerçevesinde)
$\psi_d$	z eksenindeki istenen açısal konum (Dünya çerçevesinde)
$z$	z eksenindeki konum (Dünya çerçevesinde)
$\tau_z$	z eksenindeki toplam tork (Gövde çerçevesinde)
$\bar{U}_4$	z eksenindeki toplam torku denetleyen dönüştürülmüş kontrolcü sinyali (Gövde çerçevesinde)
$u_z$	z eksenindeki toplam torku denetleyen sanal kontrolcü sinyali (Gövde çerçevesinde)

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Askeri ve bilgi toplama amacıyla kullanılan Bayraktar TB2 . . . . .	1
Şekil 1.2	Döner kanatlı (a) ve sabit kanatlı (b) insansız hava araçları [9] . . .	2
Şekil 2.1	Dört pervaneli İHA konfigürasyonları . . . . .	8
Şekil 2.2	Yuvarlanma hareketi yapan dört pervaneli İHA . . . . .	8
Şekil 2.3	Yunuslama hareketi yapan dört pervaneli İHA . . . . .	9
Şekil 2.4	Sapma hareketi yapan dört pervaneli İHA . . . . .	9
Şekil 2.5	Dünya ve gövde çerçeveleri . . . . .	10
Şekil 3.1	İki değişkene bağlı 4 çalışma bölgesinin gösterimi . . . . .	19
Şekil 3.2	Çalışma noktasının ve sınırların belirlenmesi . . . . .	26
Şekil 3.3	Çalışma bölgeleri ve tanjant fonksiyonu . . . . .	29
Şekil 4.1	Benzetim görünümü . . . . .	34
Şekil 4.2	Benzetimdeki yönelim kontrolcüleri . . . . .	34
Şekil 4.3	Benzetim 1'deki yönelimler . . . . .	36
Şekil 4.4	Benzetim 1'deki kontrol sinyalleri . . . . .	36
Şekil 4.5	Benzetim 1'deki motor hızları . . . . .	36
Şekil 4.6	Benzetim 2'deki yönelimler . . . . .	37
Şekil 4.7	Benzetim 2'deki kontrol sinyalleri . . . . .	37
Şekil 4.8	Benzetim 2'deki motor hızları . . . . .	38
Şekil 4.9	Benzetim 3'deki yönelimler . . . . .	38
Şekil 4.10	Benzetim 3'deki kontrol sinyalleri . . . . .	39
Şekil 4.11	Benzetim 3'deki motor hızları . . . . .	39
Şekil 4.12	Benzetim 4'deki yönelimler . . . . .	40
Şekil 4.13	Benzetim 4'deki kontrol sinyalleri . . . . .	40
Şekil 4.14	Benzetim 4'deki motor hızları . . . . .	40

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 3.1</b>	Çalışma noktası grafiğinde kullanılan ifadeler . . . . .	27
<b>Tablo 3.2</b>	Pozitif yöndeki çalışma bölgeleri . . . . .	28
<b>Tablo 3.3</b>	İstenen performans kriterleri ve bulunan sistem parametreleri . . .	30
<b>Tablo 4.1</b>	Benzetim parametreleri [45] . . . . .	34
<b>Tablo 4.2</b>	Benzetim 1'deki kontrol sinyallerinin RMS değerleri . . . . .	35



## **Bir Dört Pervaneli İHA'nın Yönelim Kontrolü İçin Doğrusal Olmayan Kontrolcü Tabanlı Kazanç Planlama Algoritmasının Geliştirilmesi**

Kadircan KURTULUŞ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Onur AKBATI

Bu yüksek lisans tezinde, dört pervaneli bir insansız hava aracının yönelim hareketi sırasında agresif bir performans gösterebilmesi için kazanç planlamalı bir kontrolcü tasarlanmıştır. Bu bağlamda, öncelikle dört pervaneli bir helikopterin Newton-Euler denklemleri ile modellenmesi yapılmış ve bu modelleme sonucunda öteleme ve yönelim dinamikleri elde edilmiştir. Sonrasında dört pervaneli İHA'nın çalışma aralığında kritik çalışma noktaları seçilmiştir. Kritik çalışma noktalarının seçiminde, yönelim dinamiklerinde bulunan trigonometrik ifadeler dikkate alınmıştır. Daha sonrasında da seçilen çalışma noktaları için elde edilen doğrusal modeller kullanılarak kontrolcü tasarımı ve kapalı çevrim sistemin kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kontrol yapısının cevabı, günümüzde birçok uygulamada kullanılan geleneksel PD kontrolcü cevabı ile farklı benzetim çalışmalarlarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen kontrolcünün, geleneksel kontrolcülerden işlem gücü açısından neredeyse farkı olmaksızın istenilen performans kriterlerini çok geniş bir çalışma bölgesinde sağladığı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dört pervaneli insansız hava aracı, agresif manevra, yönelim kontrolü, kazanç planlamalı kontrol

## ABSTRACT

---

# Development of a Nonlinear Controller Based Gain Scheduling Algorithm for Orientation Control of a Quadcopter UAV

Kadircan KURTULUŞ

Department of Control and Automation Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Onur AKBATI

In this master's thesis, a gain-scheduled controller is designed for aggressive performance of a quadcopter unmanned aerial vehicle during its orientation motion. In this context, the quadrotor UAV is modeled using the Newton-Euler equations to obtain translational and rotational dynamics. Then, critical operating points within the operating range of the quadcopter are selected, taking trigonometric expressions present in the orientation dynamics. Controller design and stability analysis of the closed-loop system are performed using the linear models obtained for selected operating points. The response of the obtained control structure is compared with a traditional PD controller response commonly used in many applications through simulation studies considering different initial and reference values. It is observed that the obtained controller achieves the desired performance criteria in a wide operating range with almost no difference in computational power compared to traditional controllers.

**Keywords:** Quadrotor unmanned aerial vehicle, agile maneuver, attitude control, gain scheduling control

---

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

# 1 GİRİŞ

Günümüzde kullanımı gittikçe yaygınlaşan insansız hava araçları, içerisinde kimse bulunmaksızın uzaktan kumanda edilerek ya da otonom olarak uçabilen araçlar olarak tanımlanmaktadır. İHA'lar; yetenekleri, kolay modellemesi ve ulaşılabilir olması sebebiyle hobi meraklıları ve araştırmacılar arasında çok popüler hale gelmiştir. Mikrodenetleyici, ataletsel ölçüm birimi, motor ve motor sürücüsü gibi İHA bileşenlerinin uygun maliyetli olması; İHA'ların ulaşılabilir olmasında katkıda bulunmuştur. İHA'ların oldukça geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır [1]. Lojistik [2], fotoğrafçılık [3], haritalama [4], arama-kurtarma [5] ve askeri uygulamalar [6] gibi alanlarda tercih edilmektedir ve kullanımı giderek artmaktadır.



**Şekil 1.1** Askeri ve bilgi toplama amacıyla kullanılan Bayraktar TB2

## 1.1 İnsansız Hava Aracı Türleri ve Farkları

İnsansız hava araçları, genel olarak sabit kanatlı ve döner kanatlı olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Sabit kanatlı İHA'larda yer çekimine dik açıda yerleştirilen motorun dönmesi ile itki kuvveti oluşmaktadır. Bu itki kuvvetine bağlı olarak da aracın sabit kanatlarında kaldırma kuvveti oluşmaktadır. Uçaklara benzeyen bir yapıda olmalarına rağmen boyut olarak daha küçük ve kütle olarak daha hafif

yapıdadır. Bu türdeki bir İHA, itki ve kaldırma kuvvetlerinin etkisi ve kanat yüzeylerinin değişmesiyle hareketini gerçekleştirmektedir [7]. Yüksek hızlarda hareket ederler, dayanıklılıkları ve kararlılıkları daha iyidir. Bunun yanında kalkış için bir piste ya da fırlatıcıya ihtiyaç duyarlar, agresif hareket gerçekleştiremezler ve hava durumuna daha hassastırlar.

Döner kanatlı İHA'larda, araç çerçevesinde bulunan motorların dönmesi ile itki kuvveti oluşmaktadır. Helikopterlere benzeyen bir yapıda olmalarına rağmen motor sayısı ve yerleşimleri konusunda farklı yapıdadır. Bu türdeki bir İHA, motorların farklı hızlarda dönmesiyle hareketini gerçekleştirir [8]. Dikey inip kalkabilirler ve herhangi bir piste ya da fırlatıcıya ihtiyaç duymazlar. Kendi eksenini etrafında agresif hareket yapabilseler de öteleme hareketleri yavaştır, kısa ömürlüdürler ve güç tüketimleri yüksektir. Döner kanatlı İHA'lar, çerçevelerinde bulunan motor sayısına göre adlandırılmaktadır. Dört motorlu bir döner kanatlı İHA, quadcopter ya da dört pervaneli İHA olarak adlandırılır. Bu yüksek lisans tezinde de bu türdeki insansız hava araçları üzerinde çalışma yapılmıştır.



Şekil 1.2 Döner kanatlı (a) ve sabit kanatlı (b) insansız hava araçları [9]

## 1.2 Dört Pervaneli İHA'larda Yapılan Çalışmalar

Hareketi için gerekli moment ve itki kuvvetleri, motor hızları değiştirilerek sağlanan dört pervaneli İHA'lar, üçü konum üçü de yönelim için olmak üzere toplam altı adet serbestlik derecesine sahiptirler. Diğer taraftan dört pervanelinin her birisi bir kontrol girişi olarak ele alındığında, kontrol girişi sayısının toplam serbestlik derecesinden daha küçük olduğu görülmektedir ki bu tür sistemler yetersiz eyleyicili dinamik sistemler olarak tanımlanmaktadır [10]. Yetersiz eyleyicili dinamik sistemlerin kontrolü tam eyleyicili dinamik sistemlere göre daha zor sağlanabilmektedir. Buna ek olarak, yönelim ve konum dinamikleri arasındaki bağlantının doğrusal olmayan terimler içeriyor olması kontrol problemini daha da zor bir hale getirmektedir. Ayrıca; yönelim problemi ele alındığında, tüm sistem durumlarının doğrudan ölçülemiyor oluşu ve ölçülen durumlar ile kontrol

edilen durumlar arasında doğrusal olmayan bir dönüşüm olması da problemin zorluk derecesini arttırmaktadır. Dolayısıyla; özellikle geniş bir çalışma aralığında uygulama gerektiren durumlarda, geleneksel kontrol yapıları istenilen hareket kabiliyetini ve performans kriterlerini sağlayamamaktadır. Bu nedenle doğrusal olmayan kontrol yapıları pratik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [11].

Gerek kullanım alanlarının genişliği gerekse kontrol probleminin zorluğu göz önüne alındığında, İHA'ların kontrolü birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir ve bu bağlamda literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır [12]. Dikey iniş kalkış yapabilen hava araçlarının ve dört pervaneli hava araçlarının kontrolü konulu yaklaşımları içeren kapsamlı derleme çalışmaları [13, 14] literatüre kazandırılmıştır. Dört pervaneli helikopterlerin yönelim kontrolü problemi özelinde ele alındığında da farklı kontrol yapılarının kullanıldığı birçok çalışmanın gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu kapsamda, Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrol [15], dayanıklı Oransal-Türevsel (PD) ve PID kontrol [16–18], doğrusal olmayan kontrol [19], kesirli mertebeli kayan kipli kontrol [20], geometrik kontrol [21], doğrusallaştırma temelli kontrol [22] ve geri adımlamalı kontrol [23] gibi kontrol yapıları çözüm için önerilmiştir. Bu çalışmaların bir kısmında [24] sadece doğrusal modeller veya bir çalışma noktası için doğrusallaştırılmış modeller kullanılmıştır.

Doğrusal olmayan dinamiklere ek olarak, bozucu etkilerin de kontrolcü performansları ve hatta kararlılık üzerinde baskın oldukları bilinmektedir. Lotufo vd. [25] bozucu etkilerini indirmek üzere, gömülü model kontrolü ile aktif bozucu sönümlemeli kontrolü birleştirerek kullanılmıştır. Zhang vd. [26] ise zamanla değişen bozucu etkileri göz önüne alarak bir bozucu gözleyici yapısı önermişler ve bu gözleyici yapısını içeren bir kontrolcü ile yönelim kontrolünü sağlamışlardır. Bozucu bastırma problemi yönelim kontrolü için de ele alınmış ve bu bağlamda doğrusal olmayan durum gözleyici içeren dayanıklı bir kontrol yapısı da ortaya konmuştur [27]. Diğer taraftan, dört pervaneli İHA'ların kullanım alanlarından bir tanesi olan yük taşıma durumunda taşınan yük hem bir bozucu etki oluşturmaktadır ve dinamikleri değiştirerek sisteme belirsizlik getirmektedir. Bu kapsamda, Hua vd. [28] yük taşıma işlemini hızlı bir şekilde sağlamak için bir uyarılma yapısı ile kazanç ayarlama önerilmiş ve bunun için iç ve dış çevrimlere sahip bir sistem önerilmiş ve PID kontrolcü kullanılmıştır.

Dört pervaneli İHA'ların yönelim kontrolünün hızlı ve olabildiğince kusursuz bir şekilde sağlanması, aracın hareket kabiliyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle bu tür araçların agresif manevra kabiliyeti yönelim kontrolünün başarımına bağlıdır. Öte yandan; Coriolis etkileri, yük değişimleri gibi bozucu etkiler aracın hareket kabiliyetini kısıtlamakta ve istenen performans kriterlerinin

sağlanmasına engel olabilmektedir. Bu bağlamda, dört pervaneli İHA'nın bozucu etkiler altında agresif manevra kabiliyetini arttırmak üzere Castillo vd. [29], bir bozucu gözleyici yapısı sunmuşlardır. Oliva-Palomo vd. [30] ise dört pervaneli İHA'nın yüksek açısız hızlarda yönelim kontrolü için dördey temelli modeli temel alınmış ve kazançları doğrusal matris eşitsizlikleri ile optimize edilmiş bir çekici elipsoit yöntemi (attractive ellipsoid method) kullanmışlardır. Pham vd. [31] tarafından önerilen bir başka yönelim kontrolcüsünde ise dört-pervanelinin doğrusal parametre değişimli modelini ele alarak, doğrusal matris eşitsizliklerinin kullanımı ile bir yapı sunulmuştur.

### 1.3 Kazanç Planlama Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar

Kazanç planlama yöntemi, havacılık, otomotiv ve endüstriyel süreç kontrolü gibi birçok alanda kullanılmakta ve geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin, havacılık endüstrisinde uçakların farklı hız ve yük durumlarına göre kontrol edilmesinde, otomotiv endüstrisinde araçların farklı yol ve sürüş koşullarında kararlılığı sağlamak için kullanılmaktadır. Ayrıca endüstriyel süreç kontrolünde de, değişken çalışma koşullarına uyum sağlamak ve istenen performansı sağlamak için de kullanılmaktadır.

Zhu vd. [32], otomatik araç yanal kontrolünün kazanç planlama yöntemi ile tasarlanmasını ele almaktadır. Bu çalışma, otomatik araç kontrol sistemlerinin farklı çalışma koşullarında güvenli ve stabil bir şekilde çalışabilmesini sağlamak için kazançların zaman içinde değiştirilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Çalışma, öncelikle otomatik araç kontrolünün önemini vurgulamaktadır ve ardından kazanç planlama yöntemi ile tasarlanan bir araç yanal kontrol sistemi sunmaktadır. Bu yöntemde, aracın çalışma koşullarını temsil eden parametrelerin kullanımıyla bir parametre uzayı oluşturulur. Bu parametre uzayı, kazançların belirlenmesi ve ayarlanması için bir referans çerçeve sağlar.

Balini vd. [33], aktif manyetik yatak (AMB) sistemi için kazanç planlamalı  $H_\infty$  kontrolcülerin tasarımını ve uygulamasını incelemektedir. AMB sistemleri, yüksek hassasiyetli kontrol gerektiren uygulamalarda (sabit disk kafaları gibi) kullanılan karmaşık sistemlerdir. Tek çalışma noktasının olduğu durumda tasarlanan kontrolcüler istenen performansı sağlarken birden çok çalışma noktası bulunduğu bu kontrolcünün performansı yetersiz kalmıştır. Bu çalışma, dinamik olarak değişen sistem koşullarına uyum sağlamak için kazanç planlamalı  $H_\infty$  kontrolcülerini ve LPV kontrol tekniklerini kullanarak AMB sisteminin performansını artırmayı amaçlamış ve bir deney düzeneği üzerinde denemiştir.

Wu vd. [34], yumuşak gövdeli bir robotun kazanç planlamalı kontrolünü ele almaktadır. Robot gövdesinin yumuşak olması bazı karmaşık doğrusal olmayan davranışlara yol açmış ve bu da yumuşak robot dinamik modellerini çıkarmada daha fazla zorluk yaratabilir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak bir yumuşak gövde robot için kazanç planlamalı kontrolcü tasarlanmış ve çalışma bölgeleri arası geçişte kararlılığın bozulmaması sağlanmıştır.

Dounis vd. [35], fotovoltaik (PV) sistemler için Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) denetleyicisi tasarımına yönelik kazanç planlama içeren bir yöntem önermektedir. Önerilen kazanç planlamalı bulanık PID kontrolcü, geleneksel bulanık mantık ve PID kontrolünün avantajlarını birleştiren iki seviyeli bir kontrol sistemi mimarisi temelinde oluşturulmuştur. PID kontrolcü kazançları, Ziegler-Nichols yöntemi ile belirlenir. Sistemin geçici ve kalıcı hal cevaplarında da kazanç planlamalı bulanık PID kullanılarak PID kontrolcünün kazançlarının düzeltilmesi sağlanır ve bununla da geçici salınımları sönümlemek, yerleşme süresini azaltmak ve sistem kararlılığını sağlamak amaçlanır.

Bu çalışmalara ek olarak dört pervaneli İHA üzerinde de yapılan kazanç planlamalı kontrolcü çalışmaları [36–38] bulunmaktadır. Nguyen vd. [39], planlama değişkeni olarak hata sinyalini kullanmış ve planlama değişkenine bağlı olarak da sistemin doğal frekansını seçmiştir. Seçilen doğal frekansı sağlayan PD kontrolcü kazançlarını kullanarak kazanç planlamayı gerçekteşirmiştir. Luna vd. [40], dört pervaneli İHA ve araç tabanına takılı 2 eksenli robotik kol sistemi üzerinde kazanç planlamalı kontrolcü tasarlamışlardır. Planlama değişkenleri olarak 2 eksenli robotik kolun eksen açılarını seçmişler ve bu eksen açılarına göre belirli kontrolcü kazançları ayarlamışlardır. Ayarladıkları bu kontrolcü kazançlarını da tasarladıkları PID kontrolcüsüne uygulamışlardır. Elkholy [41], planlama değişkeni olarak araç konumunu ve yönelimini kullanmış ve PID denetleyici kazançlarını genetik algoritma kullanarak tasarlamıştır.

## 1.4 Motivasyon

Dört-pervaneli helikopterlerin dinamik modeli ele alındığında, özellikle yönelim ve konum dinamikleri arasında bulunan ara bağlantılar ve ölçülebilen sinyaller ile kontrol edilen durum değişkenleri arasındaki dönüşümler birçok doğrusal olmayan terim içermektedir. Agresif manevra kabiliyeti gibi yüksek açı değişimleri gerektiren uygulamalar için bu doğrusal olmayan yapının hesaba katılması gerekmektedir. Dolayısı ile doğrusallaştırma sonrası askı noktası civarında etkin olan geleneksel doğrusal kontrolcülerin performansları, yüksek

açı değişimlerinde yetersiz kalmaktadır. Diğer taraftan, kolay uygulanabilen yapıları dolayısı ile pratik uygulamalarda genellikle PD, PID kontrolcüler gibi bu türdeki yapılar tercih edilmektedir. Bu çalışmada kolay uygulanabilir geleneksel kontrolcülere alternatif olabilecek kazanç planlamalı bir anahtarlamalı kontrol yapısı önerilmektedir. Bunun için öncelikle çalışma noktaları belirlenmiş ve her bir çalışma noktası için sistem dinamikleri doğrusallaştırılmıştır. Sonrasında ise yönelim dinamiklerinde bulunan üç serbestlik, bir dönüşüm matrisi yardımı ile ayrıştırılmış ve dinamiklere PD kontrolcü yapısı eklenerek tüm serbestlikler için istenilen performansı sağlayacak kazanç matrisleri elde edilmiştir. Literatürdeki benzer kontrol yapıları ile önerilen yapı arasındaki farklılıklar ve yönelim kontrolü için önerilen kontrol yapısının katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Önerilen kontrolcü ile dört pervaneli İHA'ların yönelim kontrolünde ulaşılabilir performans kriterleri doğrusal olmayan dinamiklerden bağımsız olarak sağlanabilmektedir. Dolayısı enerji tüketiminin kritik olduğu hava araçlarında, önerilen kontrolcü ile enerji optimizasyonu yapılabilmesinin önü açılmaktadır.
- Bir geri besleme ile doğrusallaştırma yapısı içeriyor olsa da, özellikle günümüzde kullanılan mikrodenetleyiciler düşünüldüğünde, önerilen kontrolcü pratik olarak kolayca uygulanabilir ve bu anlamda geleneksel PD kontrolcü ile arasında çok küçük farklılıklar bulunmaktadır.
- Dört pervaneli İHA'lar için kullanılan geleneksel PD kontrolcü yapılarında çalışma noktası genellikle tek denge noktası olarak belirlenmektedir. Bu şekilde tasarlanan PD kontrolcü performans isterlerini doğrusal olmayan bölgelerdeki çalışmada sağlayamıyor olsa da kararlılığı sağlayabilmektedir. Fakat durum değişkenleri, çalışma noktasından herhangi bir sebeple uzaklaştığında bu durum da değişebilmekte ve bazı durumlarda çalışma noktasının kararlılık özelliği kaybedilebilmektedir. Önerilen kontrolcü yapısı ile bunun önüne geçilmekte, ve hem kararlılık hem de performans açısından isterler karşılanabilmektedir.

## 2 DİNAMİK MODEL

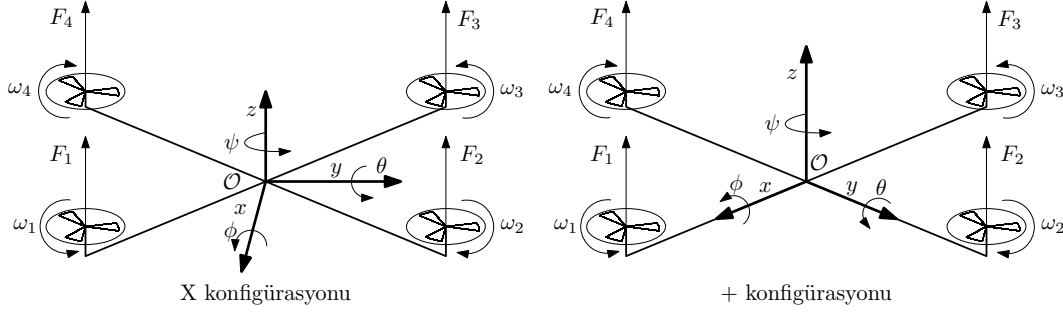
---

Dört pervaneli insansız hava araçları; öteleme ve dönme hareketlerini, gövde uçlarında bulunan dört adet motor ile sağlayan döner kanatlı insansız hava araçlarıdır. Dört pervaneli bir insansız hava aracı; motorların farklı hızlarda dönmesi ile dönme hareketini, bu dönme hareketine bağlı olarak da öteleme hareketini gerçekleştirir. Motorların dönüş yönü, çalışma süresince sabittir ve karşılıklı motorların dönüş yönü birbirine terstir.

### 2.1 Dört Pervaneli İHA Konfigürasyonları

Dört pervaneli İHA'nın 2 tür konfigürasyonu (Şekil 2.1) bulunur [42]. Bu konfigürasyonlar,  $X$  ve  $+$  olarak geçer.  $+$  konfigürasyonunda;  $x$  ve  $y$  eksenini, dört pervaneli İHA'nın gövdesinden geçer.  $X$  konfigürasyonunda;  $x$  ve  $y$  eksenini,  $z$  eksenini etrafında  $45^\circ$  döndürülmüşlerdir. Bu dönüşün getirdiği avantajlar aşağıdaki gibidir:

- $x$  ve  $y$  ekseninin, dört pervaneli İHA gövdesinde çakılı olmamasından dolayı eksen üzerinde olmayan diğer motorlar da dönüş hareketine katkıda bulunmaktadır. Bu durum, dört pervaneli İHA'nın agresif hareket yapma kabiliyetini ve kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir. Örneğin dört pervaneli İHA'nın  $y$  ekseninde dönüşünde  $X$  konfigürasyonunda tüm motorlardan katkı alınırken  $+$  konfigürasyonunda sadece  $x$  eksenindeki motorlardan katkı alınmaktadır.
- Gerçek zamanlı bir uygulamada, gövde altına yerleştirilmiş kameranın baktığı doğrultu ile eksenler çakışmayacağı için temiz bir görüntü elde edilmektedir. Örneğin  $+$  konfigürasyonundaki bir dört pervaneli İHA'ya takılan ve  $x$  eksenini boyunca görüntü alan bir kamera, gövdede bulunan dört pervaneli İHA parçalarını da çekecek ve temiz bir görüntü alınamamasına neden olmaktadır.  $X$  konfigürasyonunda kullanıldığında ise kameranın önü açık olacağından dört pervaneli İHA parçaları çekilmeyecek ve temiz bir görüntü oluşmaktadır.



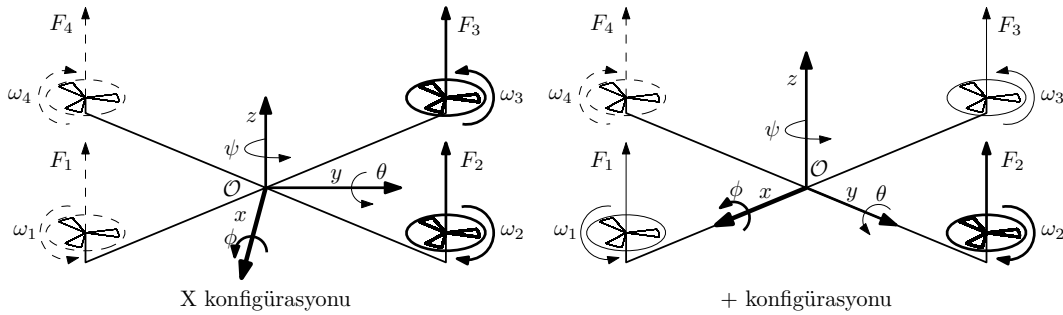
**Şekil 2.1** Dört pervaneli İHA konfigürasyonları

## 2.2 Dört Pervaneli İHA'nın Dönüş Hareketleri

Dört pervaneli insansız hava araçları, bir eksende dönme hareketini gerçekleştirebilmek için dönüş yapılacak yönde etki edecek motorların hızını artırırken ters yönde etki edecek motorların hızını azaltır. Artış ve azalışın aynı miktarda olması sağlanarak tüm motorların ürettiği toplam itkinin korunması sağlanır ve irtifa korunmuş olur.

Dört pervaneli İHA'nın eksenlerde yaptığı dönüş ve bu dönüşü hangi motorları kullanarak yaptığı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

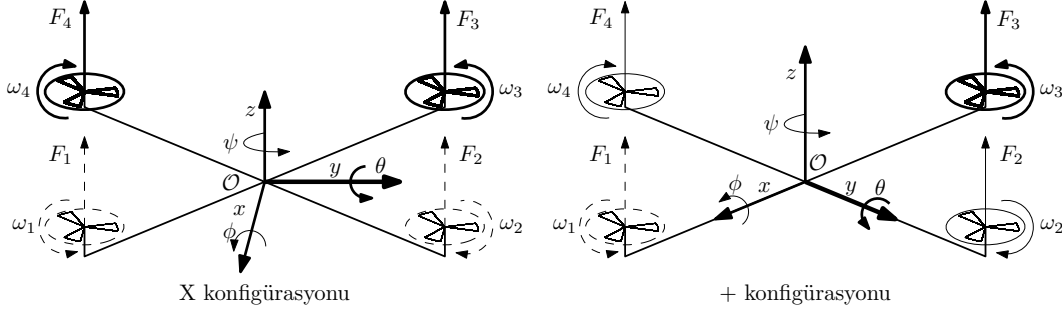
- x ekseninde yapılan dönüşler yuvarlanma hareketi (roll) olarak adlandırılır. Pozitif yönde yuvarlanma hareketi yapmak için:
  - X konfigürasyonundaki dört pervaneli İHA'nın 2. ve 3. motorları hızlandırılıp 1. ve 4. motorları yavaşlatılmalıdır.
  - + konfigürasyonundaki dört pervaneli İHA'nın 2. motoru hızlandırılıp 4. motoru yavaşlatılmalıdır.



**Şekil 2.2** Yuvarlanma hareketi yapan dört pervaneli İHA

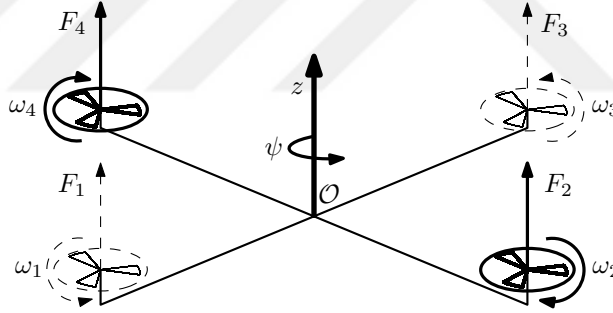
- y ekseninde yapılan dönüşler yunuslama hareketi (pitch) olarak adlandırılır. Pozitif yönde yunuslama hareketi yapmak için:

- X konfigürasyonundaki dört pervaneli İHA'nın 3. ve 4. motorları hızlandırılıp 1. ve 2. motorları yavaşlatılmalıdır.
- + konfigürasyonundaki dört pervaneli İHA'nın 3. motoru hızlandırılıp 1. motoru yavaşlatılmalıdır.



**Şekil 2.3** Yunuslama hareketi yapan dört pervaneli İHA

- z ekseninde yapılan dönüşler sapma hareketi (yaw) olarak adlandırılır. Pozitif yönde sapma hareketi için 2. ve 4. motorlar hızlandırılıp 1. ve 3. motorlar yavaşlatılmalıdır. z eksenine; konfigürasyona göre değişmediği için bu hareketin gerçekleştirilme şekli, tüm konfigürasyonlar için aynıdır.

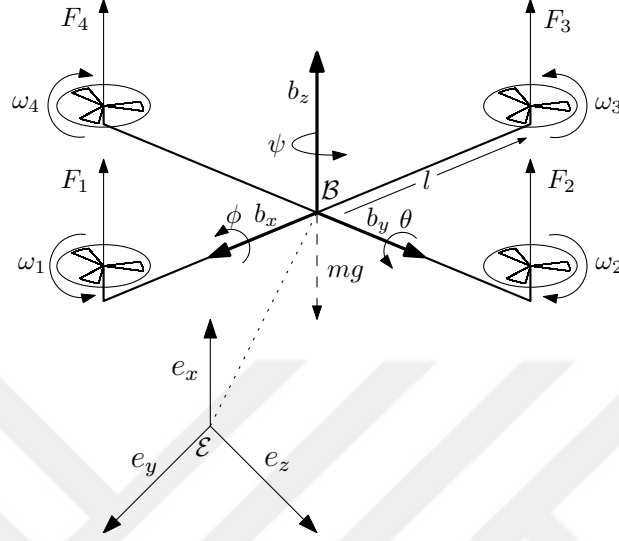


**Şekil 2.4** Sapma hareketi yapan dört pervaneli İHA

Dört pervaneli İHA'nın hareketinde, referans alınan 2 çerçeve bulunmaktadır. Bu referans çerçeveleri aşağıdaki gibidir:

- Dünya Çerçevesi  $\mathcal{E} = [x_e \ y_b \ y_z]^T$ : Bu çerçeve, dört pervaneli İHA'nın hareket ettiği 3 boyutlu uzayda referans alınan sabit bir çerçeveyi eder. Coğrafi ya da iç mekan konumlandırma sistemleri kullanılarak dört pervaneli İHA'nın konumu, yönelimi, doğrusal hızı ve açısal hızı bu çerçevede elde edilir.
- Gövde Çerçevesi  $\mathcal{B} = [x_b \ y_b \ z_b]^T$ : Bu çerçeve; dört pervaneli İHA'nın kendi gövdesiyle ilişkili hareketlerin tanımlandığı, kütle merkezinde

tanımlanmış sabit olmayan bir çerçevedir. Dört pervaneli İHA üzerindeki tüm itkiler ve momentler bu çerçeveye etki etmektedir. Bu çerçevede yapılan tanımlamaları dünya çerçevesine aktarmak için dönüşüm matrisi kullanılmalıdır.



Şekil 2.5 Dünya ve gövde çerçeveleri

### 2.3 Dört Pervaneli İHA'nın Çerçeve Dönüşümleri

Bu bölümde dört pervaneli İHA'nın tanımlandığı çerçevelerden bahsedilmiş ve aralarındaki dönüşümü sağlayan matrisler tanıtılmıştır. Daha sonra ise Newton-Euler denklemleri kullanılarak dört pervaneli İHA'nın dönel ve öteleme dinamikleri elde edilmektedir. dört pervaneli İHA'nın, çerçeve başına 3 adet dönel ve 3 adet öteleme bileşeni olmak üzere toplam 6 durumu vardır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

- Dünya çerçevesi

- Konum  $\xi = [x \ y \ z]^T$

- Yönelim  $\eta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$

- Gövde çerçevesi

- Doğrusal hızı  $V = [u \ v \ w]^T$

- Açısal hızı  $\omega = [p \ q \ r]^T$

Bu çerçeveler arasında yapılan dönüşümlerde  $R$  ve  $T$  matrisleri kullanılmaktadır.  $R$  matrisi, gövde çerçevesinde tanımlanan doğrusal hızların dünya çerçevesindeki doğrusal hız olarak ifade edilmesini sağlamaktayken  $T$  matrisi, gövde çerçevesinde tanımlanan açısal hızların dünya çerçevesindeki açısal hız olarak ifade edilmesini sağlamaktadır.

Dönüşüm matrisleri, bir koordinat sisteminin diğerine dönüşümünü sağlayan matrislerdir [43].  $R_z$ ,  $R_y$  ve  $R_x$  olarak adlandırılan temel dönüşüm matrisleri, bir çerçevedeki dönme hareketlerini temsil etmektedir.

- $R_z(\psi)$  temel dönüşüm matrisi (2.1), z ekseninde  $\psi$  kadar dönüşü gösteren matristir.

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

- $R_y(\theta)$  temel dönüşüm matrisi (2.2), y ekseninde  $\theta$  kadar dönüşü gösteren matristir.

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

- $R_x(\phi)$  temel dönüşüm matrisi (2.3), x ekseninde  $\phi$  kadar dönüşü gösteren matristir.

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$R(\phi, \theta, \psi)$  dönüşüm matrisi (2.4); sırasıyla z, y, ve x eksenlerinde yapılan  $\psi$ ,  $\theta$  ve  $\phi$  kadar yapılan dönüşlerle elde edilmektedir. Bu matris, dönüşüm matrislerinin sırayla çarpılması sonucunda oluşur. Burada,  $c\beta = \cos \beta$  ve  $s\beta = \sin \beta$  olarak tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} R(\phi, \theta, \psi) &= R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$R(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$R(\phi, \theta, \psi)$  dönüşüm matrisi (2.4) kullanılarak, gövde çerçevesindeki doğrusal hızlardan dünya çerçevesindeki doğrusal hızlara dönüşüm (2.5) sağlanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \end{bmatrix}^T = R \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^T \quad (2.5)$$

Dünya çerçevesindeki açısal hızlar ve dönüşüm matrisleri (2.1 - 2.3) kullanılarak gövde çerçevesindeki açısal hızlara (2.6) dönüşüm yapılmaktadır.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p & q & r \end{bmatrix}^T &= \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_x^T(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_x^T(\phi) R_y^T(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.6)$$

(2.6) eşitliğinde bulunan matris, dünya çerçevesindeki açısal hızları gövde çerçevesine açısal hızlara dönüştüren bir dönüşüm matrisi olup  $\omega = T^{-1}(\phi, \theta)\dot{\eta}$  denklemiyle ifade edilir. Eşitliğin her tarafı  $T(\phi, \theta)$  dönüşüm matrisi (2.7) ile çarpılırsa, gövde çerçevesindeki açısal hızları dünya çerçevesine dönüşümü (2.8) sağlayan dönüşüm matrisi elde edilmektedir.

$$T(\phi, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T = T \begin{bmatrix} p & q & r \end{bmatrix}^T \quad (2.8)$$

## 2.4 Dört Pervaneli İHA'nın Modellenmesi

Dört pervaneli İHA'nın, yöneliminden ve ötelenmesinden kaynaklanan 2 tür dinamikleri (2.9) bulunur. Bunlar dönele ve öteleme dinamikleri olarak adlandırılır ve Newton'un 2. yasası ( $F = ma$ ) kullanılarak elde edilir [44]. Burada  $I_3$ , 3 boyutlu birim matrisi ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} 0_3 & J \\ mI_3 & 0_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega \times J\omega \\ \omega \times mV \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ F \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Dört pervaneli İHA, z eksenini dışındaki öteleme hareketlerini doğrudan gerçekleştiremez. x ve y ekseninde öteleme dinamiği, dört pervaneli İHA'nın dönel dinamiklerin bir sonucu olarak oluşur.

Dört pervaneli İHA'nın modellenmesi sırasında aşağıdaki kabuller alınmıştır [45]:

- Dört pervaneli İHA gövdesi; esnek olmayan bir maddeden oluşmaktadır, simetriktir ve zamanla değişmemektedir. Üzerindeki tüm bileşenler de bu simetriyi bozmayacak şekilde konumlandırılmıştır.
- Gövde çerçevesinin orijin noktası ve dört pervaneli İHA'nın ağırlık merkezi aynı noktada bulunmaktadır.
- Motor pervaneleri esnek olmayan bir maddeden oluşmaktadır.
- Motorların ürettiği itki ve sürüklenme kuvvetleri, motor hızlarının karesiyle doğru orantılıdır.

(2.9) denkleminde verilen yönelim dinamiği, (2.10) denklemiyle yeniden yazılabilir. Burada  $\tau = \begin{bmatrix} \tau_x & \tau_y & \tau_z \end{bmatrix}^T$ , gövde çerçevesine etki eden momentleri ve  $J$  matrisi (2.11), gövde çerçevesindeki atalet bileşenlerini temsil eden atalet matrisidir. Dört pervaneli İHA'nın simetrik olduğu varsayıldığında, matris köşegeni dışındaki terimler 0 olmakta ve atalet matrisi köşegen matris olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times J \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_x & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{yx} & J_y & J_{yz} \\ J_{zx} & J_{zy} & J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$J$  atalet matrisi (2.11), dört pervaneli İHA'nın yönelim dinamiklerinde (2.10) yerine koyulduğunda gövde çerçevesindeki açısız hızların dinamiği (2.12) bulunmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_x}\tau_x + \frac{J_y - J_z}{J_x}qr \\ \frac{1}{J_y}\tau_y - \frac{J_x - J_z}{J_y}pr \\ \frac{1}{J_z}\tau_z + \frac{J_x - J_y}{J_z}pq \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

(2.9) denkleminde verilen yönelim dinamiği, (2.13) denklemiyle yeniden yazılabilir. Burada  $F = [F_x \ F_y \ F_z]^T$ , gövde çerçevesine etki eden kuvvetleri temsil etmektedir. Dört pervaneli İHA'ya sadece z eksenini boyunca 2 kuvvet uygulanmaktadır. Bu kuvvetler, dünya çerçevesinde uygulanan yerçekimi kuvveti  $G_e = [0 \ 0 \ mg]^T$  ve gövde çerçevesinde uygulanan itki kuvveti  $F_b = [0 \ 0 \ F_t]^T$  olarak adlandırılır. Bu kuvvetlerin yönü, tanımlanan çerçevelere bağlı olmak üzere birbirine terstir.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times m \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Yerçekimi ve itki kuvvetleri kullanılarak gövde çerçevesine etki eden kuvvetler yazılabilir. Bunu yapabilmek için tüm ifadelerin gövde çerçevesinde olması gerekmektedir. İtki kuvveti gövde çerçevesine etki ederken yerçekimi kuvveti dünya çerçevesinde etki etmektedir. Yerçekimi kuvvetinin gövde çerçevesinde ifade edilmesiyle gövde çerçevesine etki eden net kuvvet (2.14) bulunmaktadır. Burada  $R$  dönüşüm matrisi, gövde çerçevesinden dünya çerçevesinde dönüşümü sağlarken  $R^T$  dönüşüm matrisi, dünya çerçevesinden gövde çerçevesine dönüşümü sağlamaktadır.

$$F = F_b - R^T G_e \quad (2.14)$$

(2.14) denklemi, dört pervaneli İHA'nın öteleme dinamiklerinde (2.13) yerine koyulduğunda gövde çerçevesindeki doğrusal hızların dinamiği (2.15) bulunmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw + mg \sin \theta \\ pw - ru - mg \sin \phi \cos \theta \\ \frac{1}{m} F_t + qu - pv - mg \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Dört pervaneli İHA gövdesinde bulunan dört adet motor, dört pervaneli İHA'yı kontrol eden kuvvet ve momentleri sağlar. Motorların farklı hızlarda ve farklı yönlere dönüşü, bu kuvvet ve momentleri oluşturur. Her bir motorun hızı ve dönme yönü, dört pervaneli İHA'nın istenilen hareketi gerçekleştirilmesi için önemlidir. Bu sayede dört pervaneli İHA, istenilen yönde öteleme hareketi ya da dönele hareket yapabilir veya askıda kalabilir. Dört pervaneli İHA'nın motorları, 1. dereceden DC motor modeli (2.16) ile modellenmiş olup  $T$ , motorun zaman sabiti olarak geçmekte ve motorların karakteristiğine bağlı olarak değişmektedir [46].

$$\left( \frac{\Omega}{\Omega_d} \right) (s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (2.16)$$

Her ne kadar motorlar doğrusal olarak modellense de dönebilecekleri minimum ve maksimum hızları  $\left[ \Omega_{min} \quad \Omega_{max} \right]$  bulunmaktadır. Minimum çalışma noktasına kadar bulunulan aralığa ölü bölge ve maksimum çalışma noktasına da doyum noktası denir.

Gövde çerçevesindeki motora bağlı pervanenin dönmesiyle itki kuvveti (2.17) üretilmektedir. Bu denklemdeki  $k$  katsayısı; hava yoğunluğuna, pervane yüzey alanına ve yarıçapına bağlı olarak değişen motor itki katsayısıdır.

$$F_m = k\Omega^2 \quad (2.17)$$

Gövde çerçevesindeki motora bağlı pervanenin dönmesiyle sürüklenme kuvveti (2.18) üretilmektedir. Bu denklemdeki  $d$  katsayısı; hava yoğunluğuna, pervane yüzey alanına ve yarıçapına bağlı olarak değişen motor sürüklenme katsayısıdır.

$$Q = d\Omega^2 \quad (2.18)$$

(2.12) ve (2.15) denklemleri, dört pervaneli İHA'nın dinamiklerini içeren denklemler olup bu denklemlerde bulunan kontrol sinyalleri aşağıdaki gibidir:

- $F_t$  itki kuvveti (2.19), dört pervaneli İHA'nın z eksenindeki doğrusal hareketini kontrol etmektedir.

$$F_t = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (2.19)$$

- $\tau_x$ , dört pervaneli İHA'nın x eksenindeki dönel hareketini kontrol eder.
- $\tau_y$ , dört pervaneli İHA'nın y eksenindeki dönel hareketini kontrol eder.
- $\tau_z$ , dört pervaneli İHA'nın z eksenindeki dönel hareketini kontrol eder ve (2.20) numaralı denklem ile ifade edilir.

$$\tau_z = -Q_1 + Q_2 - Q_3 + Q_4 \quad (2.20)$$

$\tau_x$  ve  $\tau_y$  kontrol sinyalleri, dört pervaneli İHA'nın konfigürasyonuna bağlı olarak değiştiğinden iki farklı şekilde ifade edilir.

- + konfigürasyonundaki dört pervaneli İHA için

$$\tau_x = F_2 - F_4 \quad (2.21)$$

$$\tau_y = -F_1 + F_3 \quad (2.22)$$

- X konfigürasyonundaki dört pervaneli İHA için

$$\tau_x = \frac{1}{\sqrt{2}}(-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) \quad (2.23)$$

$$\tau_y = \frac{1}{\sqrt{2}}(-F_1 - F_2 + F_3 + F_4) \quad (2.24)$$

şeklinde ifade edilir.

Dört pervaneli İHA'nın yönelim kontrolünü sağlayan  $U$  vektörü (2.25), gövde çerçevesindeki itki kuvvetini ve momentleri barındıran kontrol sinyali vektörüdür ve vektörünün ilk elemanı irtifa kontrolünden sorumlu olurken son elemanları da yönelim kontrolünden sorumlu olur. Motor hızlarının karesini barındıran  $\Omega^2 = [\Omega_1^2 \ \Omega_2^2 \ \Omega_3^2 \ \Omega_4^2]^T$  vektörü ile  $U$  kontrol sinyali vektörü arasında doğrusal bir ilişki bulunur ve bu ilişki  $U = H\Omega^2$  şeklindedir.

$$U = \begin{bmatrix} F_t \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_t & \tau_x & \tau_y & \tau_z \end{bmatrix}^T \quad (2.25)$$

+ konfigürasyonundaki bir dört pervaneli İHA için motor hızlarından kontrol sinyallerine geçişi sağlayan  $H_+$  matrisi, (2.26) denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} F_t \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & k & k & k \\ 0 & kl & 0 & -kl \\ -kl & 0 & kl & 0 \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

x konfigürasyonundaki bir dört pervaneli İHA için motor hızlarından kontrol sinyallerine geçişi sağlayan  $H_x$  matrisi, (2.27) numaralı denklem ile tanımlanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} F_t \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & k & k & k \\ \frac{-kl}{\sqrt{2}} & \frac{kl}{\sqrt{2}} & \frac{kl}{\sqrt{2}} & \frac{-kl}{\sqrt{2}} \\ \frac{-kl}{\sqrt{2}} & \frac{-kl}{\sqrt{2}} & \frac{kl}{\sqrt{2}} & \frac{kl}{\sqrt{2}} \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

H matrisi ile motor hızlarının karesinden kontrol sinyallerine geçiş sağlanmaktadır. Kontrol sinyallerini temsil eden motor hızlarının karesini bulmak için bu ilişkinin tersi elde edilmelidir. Kontrol sinyallerinden motor hızlarının karesine geçiş,  $\Omega^2 = H^{-1}U$  denklemi ile sağlanmaktadır. Buna göre konfigürasyonlara göre elde edilen  $H^{-1}$  dönüşüm matrisleri, (2.28) ve (2.29) denklemleriyle elde edilmiştir.

$$H_+^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4k} & 0 & \frac{-1}{2kl} & \frac{-1}{4d} \\ \frac{1}{4k} & \frac{1}{2kl} & 0 & \frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4k} & 0 & \frac{1}{2kl} & \frac{-1}{4d} \\ \frac{1}{4k} & \frac{-1}{2kl} & 0 & \frac{1}{4d} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$H_x^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4k} & \frac{-1}{2kl\sqrt{2}} & \frac{-1}{2kl\sqrt{2}} & \frac{-1}{4d} \\ \frac{1}{4k} & \frac{1}{2kl\sqrt{2}} & \frac{-1}{2kl\sqrt{2}} & \frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4k} & \frac{1}{2kl\sqrt{2}} & \frac{1}{2kl\sqrt{2}} & \frac{-1}{4d} \\ \frac{1}{4k} & \frac{-1}{2kl\sqrt{2}} & \frac{1}{2kl\sqrt{2}} & \frac{1}{4d} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

# 3

## KONTROLCÜ TASARIMI

---

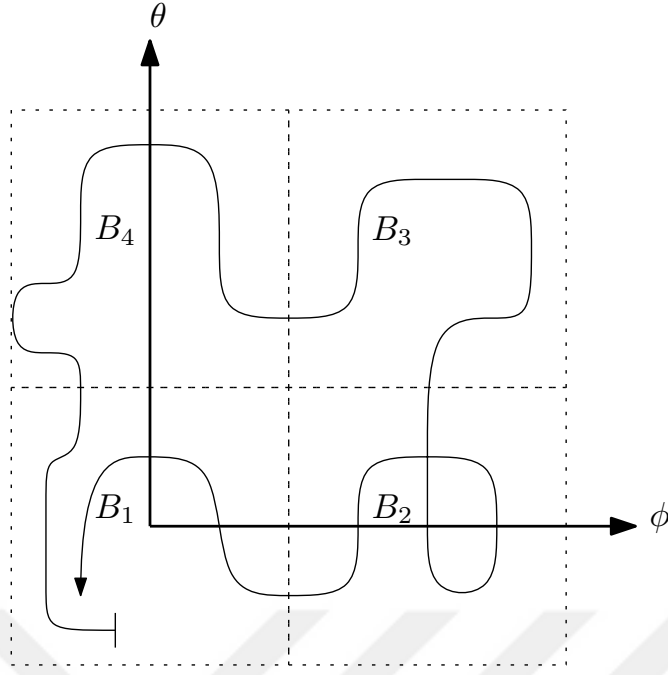
Dört pervanelinin yönelim hareketi için tasarlanan kazanç planlamalı kontrolcü yapısı bu bölümde sunulmaktadır. Bu bağlamda; öncelikle kazanç planlama yönteminin yapısından bahsedilmiş, ne olduğu, nasıl tanımlandığı, amacı, avantajları ve dezavantajları anlatılmış ve bu yöntemi kullanılarak yapılan bazı çalışmalar özetlenmiştir. Sonrasında, bu yüksek lisans tezinde kazanç planlamalı kontrol yapısının nasıl tasarlandığı anlatılmıştır.

Kazanç planlama yöntemini uygulamadan önce, yöntemi kullanılmak amacıyla dinamiklerin düzenlenmesi gerekmektedir. Bunun için; öncelikle dört pervanelinin yönelim dinamikleri geri beslemeyle doğrusal hale getirilmiştir. Sonrasında da birleşik durumları ayırmak amacıyla çalışma noktasına göre değişen bir dönüşüm matrisi kullanılarak dinamiklerin birbirinden ayrılması sağlanmıştır. Daha sonrasında ayrıştırılmış durumlar için istenen bir performans kriterini sağlayan PD kontrolcü eklenerek kapalı çevrim dinamikleri elde edilmiştir. Daha sonrasında, dört pervaneli için çalışma noktaları belirlenmiş ve seçilen farklı çalışma noktalarında sistem doğrusallaştırılarak doğrusal modeller ve bu doğrusal modellerin geçerli olduğu çalışma noktaları için kontrolcü kazançları elde edilmiş, kazanç planlama algoritmasının nasıl çalıştığı ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

Doğrusal olmayan bir sistem, farklı çalışma noktalarında farklı dinamiklere sahip bir sistemdir. Örneğin; sistemin sıcaklığı, hızı ya da konumu gibi etmenler ile doğrusal olmayan sistemin dinamiği değişebilir. Bu durumlarda, doğrusal olmayan sistemin sadece bir çalışma noktasına göre tasarlanmış bir kontrolcü, sistemin diğer çalışma noktalarında aynı performansı vermemektedir.

Kazanç planlama yöntemi; literatürde *gain scheduling* olarak geçen, doğrusal olmayan sistemlerde kullanılabilen bir yöntemdir ve sistemlerin farklı çalışma koşullarında da performansından en az ödün vererek çalışmasını sağlamaktadır.

Kazanç planlama yöntemi, bu sorunu çözmek için kontrolcü kazançlarının sistemin



**Şekil 3.1** İki değişkene bağlı 4 çalışma bölgesinin gösterimi

belirli durumlarına göre değiştirilmesini önerir. Sistem performansını farklı çalışma noktalarında iyileştirmek amacıyla kontrolcü kazançları dinamik bir şekilde ayarlanır. Bunun için, her bir çalışma bölgesindeki geçerli dinamikler üzerinden farklı kontrolcü kazançları ayarlanır. Bu yöntemle beraber, sistemin değişken çalışma noktalarında daha iyi performans göstermesi ve istenen kontrol hedeflerini sağlamacı amaçlanır.

Kazanç planlama yönteminin avantajları arasında, sistemin farklı çalışma koşullarında daha iyi performans sağlayabilmesi ve sistem kararlılığının korunabilmesi yer almaktadır. Farklı çalışma noktaları için tasarlanmış kontrolcüler kullanıldığından, sistem performansı değişmemesi ya da daha iyi olması sağlanmaktadır. Ancak, kazanç planlama yöntemi de bazı zorlukları beraberinde getirmektedir. Kazançlarının zamanla değişmesi, kontrol sistemi analizini ve tasarımını daha karmaşık hale getirebilir. Ayrıca, kazançların doğru bir şekilde zamanla değiştirilmesi için hassas bir model veya sistem tanımına ihtiyaç vardır.

Sonuç olarak kazanç planlama yöntemi, farklı çalışma koşullarında aynı ya da benzer kontrol performansı sağlamak için kullanılan bir yöntemdir. Farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, sistemin dinamik özelliklerini dikkate alarak kontrol kazançlarını zaman içinde değiştirmektedir. Bu şekilde, sistemlerin daha iyi performans göstermesi ve farklı çalışma koşullarına uyum sağlaması mümkün olmaktadır.

### 3.1 Geri Besleme Doğrusallaştırması

Gövde çerçevesindeki açısal hızların dinamiği incelendiğinde her bir eksendeki açısal hızın, diğer eksenlerdeki açısal hızlara ve ataletle bağlı olduğu görülmektedir. Bu durum, kontrolcü tasarımını karışık bir hale getirmektedir. Bu problemin aşılması adına, diğer eksenler ile ilgili ifadelerin geri beslenmesiyle gövde çerçevesindeki açısal hız dinamikleri geri besleme ile doğrusallaştırılabilir.

$\tau$  kontrolcü sinyali vektörü,  $u = [u_x \ u_y \ u_z]^T$  sanal kontrolcü sinyali vektörü kullanılarak yeniden tanımlansın (3.1).

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x - (J_y - J_z)qr + J_r\Omega_r q \\ u_y - (J_z - J_x)pr + J_r\Omega_r p \\ u_z - (J_x - J_y)pq \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Bu tanımlama yardımıyla gövde çerçevesindeki açısal hız dinamiği doğrusallaştırılmaktadır (3.2).

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tau_x + (J_y - J_z)qr \\ \tau_y + (J_z - J_x)pr \\ \tau_z + (J_x - J_y)pq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Böylece, gövde çerçevesindeki açısal hız dinamiğiyle sanal kontrolcü sinyali arasında doğrusal bir ilişki (3.3) elde edilmektedir.

$$\dot{\omega} = J^{-1}u \quad (3.3)$$

### 3.2 Jacobian Matrisinin Eldesi

$T$  dönüşüm matrisi (2.7), doğrusal olmayan bir dönüşüm matrisidir. Bu matrisin doğrusallaştırılmış halinde bile ayrılmayan durumlar bulunmaktadır ve bu problemde, kontrolcü tasarımını karmaşık bir hale getirmektedir.  $T_L$  matrisi (3.4),  $T$  matrisinin  $\eta_L = [\phi_L \ \theta_L \ \psi_L]^T$  çalışma noktasında geçerli hali olsun.

$$T_L = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi_L \tan \theta_L & \cos \phi_L \tan \theta_L \\ 0 & \cos \phi_L & -\sin \phi_L \\ 0 & \sin \phi_L \sec \theta_L & \cos \phi_L \sec \theta_L \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Elde edilen bu dönüşüm matrisi, elde edildiği çalışma noktası etrafında geçerli olup çalışma noktasından uzaklaştıkça geçerliliğini kaybedecektir. Bu matris, hesaplandığı çalışma bölgesi için dünya çerçevesine geçişte kullanılmaktadır.

$$\dot{\eta} = T_L \omega \quad (3.5)$$

### 3.3 Dönüşüm Kullanılarak Dinamiklerin Ayrıştırılması

Sistemin  $\eta_L$  çalışma noktasındaki dinamikleri, (3.3) ve (3.5) denklemleriyle ifade edilmektedir. Sanal kontrolcü sinyali vektörü  $\bar{U} = [\bar{U}_2 \ \bar{U}_3 \ \bar{U}_4]^T$  olmak üzere, bir dönüşüm denklemi (3.6) tanımlansın.

$$u = JT_L^{-1} \bar{U} \quad (3.6)$$

(3.5) denkleminin zamana göre türevi alındığında dünya çerçevesindeki açısal ivme (3.7) elde edilmektedir. Bu dinamiğin  $\eta_L$  çalışma noktası etrafında geçerli olduğu unutulmamalıdır.

$$\ddot{\eta} = T_L \dot{\omega} \quad (3.7)$$

Dönüşüm denklemi (3.6), açısal hız dinamiğinde (3.3) yerine koyulduğunda dünya çerçevesindeki açısal ivme vektörü ile dönüştürülmüş sanal kontrolcü sinyali vektörü arasında doğrusal bir ilişki (3.8) elde edilir.

$$\ddot{\eta} = \bar{U} \quad (3.8)$$

Sistem, bu dönüşümle birlikte bir çift katlı integratör sistemine indirgenmiş olur. Bu tür ikinci dereceden bir sistem için kontrolcü tasarlamak, dönüştürülmemiş sistem için kontrolcü tasarlamaktan çok daha kolaydır. Bu noktada, dönüştürülmüş sanal kontrolcü sinyalinin tasarlanmasıyla dört pervanelinin yönelim denetimi gerçekleştirilmektedir.

### 3.4 Yönelim PD Denetleyicisinin Tasarımı

Tanımlan denetim amacını sağlamak üzere; istenilen yönelim vektörü,  $\eta_d = [\phi_d \ \theta_d \ \psi_d]^T$  şeklinde tanımlansın. Dönüştürülmüş sanal kontrolcü sinyal vektörü, bir PD kontrolcü olarak tanımlandığı zaman (3.9) her bir yönelim açısının diğer yönelim açılarından bağımsız bir şekilde denetimi sağlanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{p2}(\phi_d - \phi) - k_{d2}\dot{\phi} \\ k_{p3}(\theta_d - \theta) - k_{d3}\dot{\theta} \\ k_{p4}(\psi_d - \psi) - k_{d4}\dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Tanımlama sonrasında elde edilen dinamikler (3.10), doğrudan kontrolcü çıkışlarına bağlı olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{p2}\phi_d - k_{d2}\dot{\phi} - k_{p2}\phi \\ k_{p3}\theta_d - k_{d3}\dot{\theta} - k_{p3}\theta \\ k_{p4}\psi_d - k_{d4}\dot{\psi} - k_{p4}\psi \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Bu denklemler, yönelim dinamikleri sol tarafa ve istenen yönelimler sağ tarafa toplanacak şekilde yeniden yazılsın (3.11).

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} + k_{d2}\dot{\phi} + k_{p2}\phi \\ \ddot{\theta} + k_{d3}\dot{\theta} + k_{p3}\theta \\ \ddot{\psi} + k_{d4}\dot{\psi} + k_{p4}\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{p2}\phi_d \\ k_{p3}\theta_d \\ k_{p4}\psi_d \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Her bir satırın Laplace dönüşümü alındığında istenen yönelim açısından mevcut yönelim açısına geçişi veren transfer fonksiyonları elde edilmektedir (3.12).

$$\begin{bmatrix} (s^2\phi + k_{d2}s\dot{\phi} + k_{p2}\phi)(s) \\ (s^2\theta + k_{d3}s\dot{\theta} + k_{p3}\theta)(s) \\ (s^2\psi + k_{d4}s\dot{\psi} + k_{p4}\psi)(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{p2}\phi_d(s) \\ k_{p3}\theta_d(s) \\ k_{p4}\psi_d(s) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Her bir satır ayrı ayrı yazıldığında istenen yönelim açısından mevcut yönelim açısına olan transfer fonksiyonları, denklemleri gibi elde edilmektedir.

$$\left( \frac{\phi}{\phi_d} \right) (s) = \frac{k_{p2}}{s^2 + k_{d2}s + k_{p2}} \quad (3.13)$$

$$\left( \frac{\theta}{\theta_d} \right) (s) = \frac{k_{p3}}{s^2 + k_{d3}s + k_{p3}} \quad (3.14)$$

$$\left( \frac{\psi}{\psi_d} \right) (s) = \frac{k_{p4}}{s^2 + k_{d4}s + k_{p4}} \quad (3.15)$$

(3.13), (3.14) ve (3.15) denklemleriyle ifade edilen transfer fonksiyonlarının kutupları; sönümleme oranı  $\zeta$ , yüzde üst aşım  $\%OS$ , doğal frekans  $\omega_n$ , yükselme zamanı  $T_r$  ve tepe zamanı  $T_p$  gibi belirli performans kriterlerini sağlayan  $k_p$  ve  $k_d$  kontrolcü katsayılarının seçilmesiyle istenilen noktaya atanabilir.

İkinci dereceden bir sistemin transfer fonksiyonu,  $\omega_n$  ve  $\zeta$  parametrelerine bağlı olarak yazıldığında (3.16) ve (3.13), (3.14) ve (3.15) denklemlerinin katsayıları ile birbirine eşitlendiğinde oransal (3.17) ve türevsel (3.18) kontrolcü kazançları hesaplanmaktadır.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.16)$$

$$k_p = \omega_n^2 \quad (3.17)$$

$$k_d = 2\zeta\omega_n \quad (3.18)$$

### 3.5 Sanal Denetleyici Sinyallerinin Geri Dönüşümü

Sanal kontrolcü sinyallerine ait kazançların tasarımının ardından, bu sinyalleri gerçek sisteme uygulayabilmek adına dönüşüm denkleminin (3.6) tersi alınarak gerçek kontrolcü sinyallerine geçiş yapılmalıdır. Bu bağlamda (3.9) denklemi, matris formunda tekrar yazılsın.

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{p2} & 0 & 0 \\ 0 & k_{p3} & 0 \\ 0 & 0 & k_{p4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_d - \phi \\ \theta_d - \theta \\ \psi_d - \theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & k_{d3} & 0 \\ 0 & 0 & k_{d4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$K_p$  matrisi (3.20), kontrolcünün oransal kazançlarını barındıran köşegen matris olsun.

$$K_p = \begin{bmatrix} k_{p2} & 0 & 0 \\ 0 & k_{p3} & 0 \\ 0 & 0 & k_{p4} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$K_d$  matrisi (3.21), kontrolcünün türevsel kazançlarını barındıran köşegen matris olsun.

$$K_d = \begin{bmatrix} k_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & k_{d3} & 0 \\ 0 & 0 & k_{d4} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

(3.20) ve (3.21) denklemleri kullanılarak (3.19) denklemi yeniden yazılsın (3.22).

$$\bar{U} = K_p(\eta_d - \eta) - K_d\dot{\eta} \quad (3.22)$$

(3.22) denklemi; (3.5) ve (3.6) denklemleriyle beraber değerlendirildiğinde, nihai kontrolcü sinyali vektörü elde edilmektedir (3.23).

$$u = JT_L^{-1}[K_p(\eta_d - \eta) - K_dT_L\dot{\eta}] \quad (3.23)$$

$K_p$  ve  $K_d$  kazanç matrisleri istenen sistem cevabına göre atanmaktadır. Bu amaçla kazanç matrisleri, köşegen matrisler olacak şekilde pozitif bileşenlere sahip olarak seçilmiştir. Böylece sistemdeki tüm serbestlikler ayrıştırılabilir hale gelmektedir ve temel ikinci mertebe sistem yaklaşımı ile kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmektedir.

### 3.6 Dinamiklerin Durum Uzay Gösterimi ve Kararlılığı

(3.3) ve (3.5) denklemleriyle verilen dinamikler, dört pervanelinin ilgili çalışma noktasındaki doğrusallaştırılmış dinamiklerini ifade etmektedir. Bu dinamikler kullanılarak yönelim dinamikleri, durum uzayında ifade edilsin (3.24). Burada  $0_n$ ,  $n$  boyutlu bir sıfır kare matrisini ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_3 & T_L \\ 0_3 & 0_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_3 \\ J^{-1} \end{bmatrix} u \quad (3.24)$$

(3.23) numaralı denklem, (3.24) numaralı denklemde elde edilen durum vektörü kullanılacak şekilde yeniden yazılsın.

$$u = JT_L^{-1}K_p\eta_d - \begin{bmatrix} JT_L^{-1}K_p & JT_L^{-1}K_dT_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

(3.25) numaralı denklem, (3.24) numaralı denklemde yerine koyulduğunda sistemin kapalı çevrim durum uzay modeli elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_3 & T_L \\ -T_L^{-1}K_p & -T_L^{-1}K_dT_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_3 \\ T_L^{-1}K_p \end{bmatrix} \eta_d \quad (3.26)$$

Elde edilen kapalı çevrim durum uzayı modelinin kararlı olması için sistem matrisinin Hurwitz matrisi olması gerekmektedir. Hurwitz matrisi, özdeğerleri negatif olan matris olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda sistem kararlılığının sağlanması için özdeğerleri negatif yapan  $K_p$  ve  $K_d$  kontrolcü kazanç matrisleri tasarlanmalıdır [47].

$$eig \left( \begin{bmatrix} 0_3 & T_L \\ -T_L^{-1}K_p & -T_L^{-1}K_dT_L \end{bmatrix} \right) < 0 \quad (3.27)$$

### 3.7 Kazanç Planlama Algoritması

PID gibi doğrusal kontrolcülerin tasarım aşamasında belirlenen kontrolcü kazançları, genellikle dört pervanelinin askı halindeki yönelimi için elde edilmektedir. Dolayısıyla doğrusal olmayan bir sistemin doğrusallaştırılması sonrasında uygulanan doğrusal kontrolcü, tasarım aşamasında hesaba katılan performans kriterlerini sadece askı halindeki bir dört pervaneli için sağlayabilmektedir. Bu bağlamda; özellikle çok girişli ve çok çıkışlı doğrusal olmayan sistemler, farklı çalışma noktalarında doğrusal kontrolcüler ile istenilen performans kriterlerini sağlayamamaktadır. Bu performans kriterlerini her çalışma noktasında karşılamak için farklı kontrol yapılarının kullanılması gerekmektedir.

Bu yapılardan bir tanesi, birden fazla çalışma noktası seçilerek tasarlanan kazanç planlamalı kontrolcülerdir. Bu tip kontrolcülerde çalışma noktaları belirli bir kritere göre belirlendikten sonra kontrolcü kazançları her bir çalışma noktası için elde edilmekte ve çalışma noktalarının yerleşimine göre tanımlanan bölgelerde ilgili kazanç değerleri kullanılacak şekilde kontrolcünün kazançları değiştirilmektedir.

Çalışma bölgeleriyle ilgili bazı özellikler aşağıdaki gibidir:

- Çalışma bölgeleri, çalışma noktalarıyla tanımlanan bölgelerdir.
- Çalışma bölgeleri, sistemin bulunabileceği tüm koşulları kapsamalıdır.
- Çalışma bölgeleri, tanımlanmalarına bağlı olarak birbiriyle kesişebilir veya teğet geçebilir.

Dört pervaneli için çalışma bölgeleri, her bölge birbirini teğet geçecek şekilde oluşturulmuştur. Bundan dolayı yukarıdaki grafikten farklı olarak çalışma bölgeleri birbirini sadece tek noktada kestiği için bulunduğu noktada seçilebilecek kontrolcü katsayısı takımı her zaman tek olmaktadır. Daha gelişmiş bir kazanç planlama algoritması için birbiriyle kesişen çalışma bölgeleri tanımlanabilir. Bu durumda sistemin bulunduğu nokta için birden fazla kontrolcü katsayısı takımı seçme ihtimali doğacaktır.

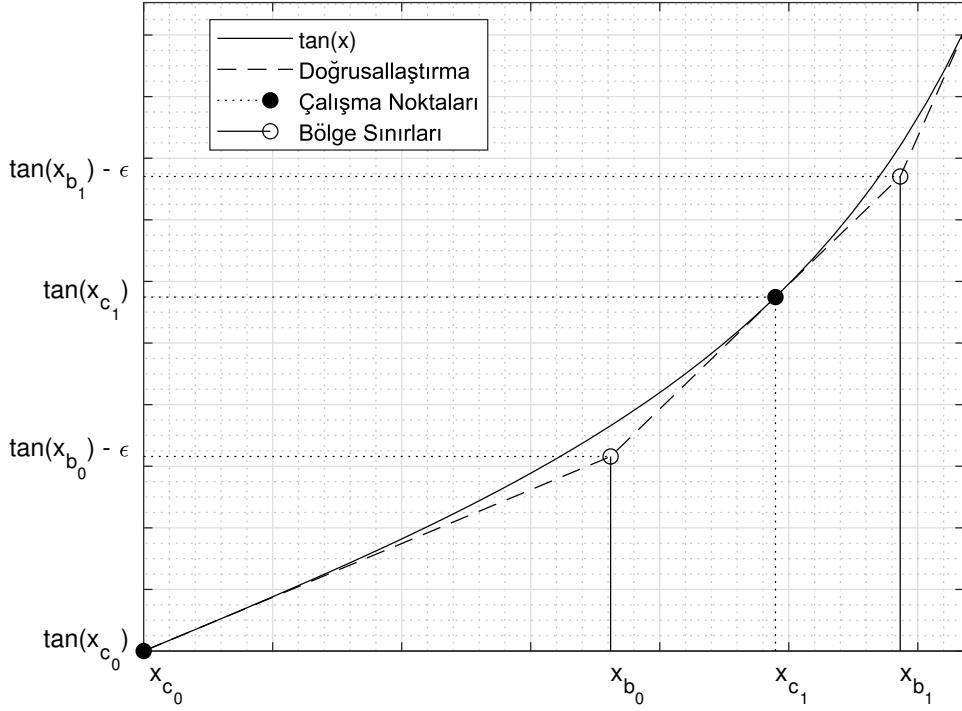
Dört pervanelinin yönelim denetimi ele alındığında, doğrusal olmayan terimlerin gövde referans çerçevesindeki açısal hızlardan dünya referans çerçevesindeki açısal hızlara dönüşümü sağlayan  $T$  matrisi içerisinde yer aldığı ve bu terimlerin trigonometrik ifadeler içerdikleri görülmektedir.

Kazanç planlamalı kontrolcünün kazanç matrislerini belirlemek üzere dört pervanelinin çalışma aralığındaki doğrusallaştırma noktalarının seçilmesi ve doğrusal olmayan trigonometrik ifadelerin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada doğrusallaştırma noktalarının seçiminde,  $T$  dönüşüm matrisinde yer alan diğer terimlere göre dört pervanelinin çalışma aralığında daha hızlı değişen tanjant fonksiyonu temel alınmıştır.  $T$  dönüşüm matrisinde yer alan trigonometrik ifadelerin tanım ve değer aralığı, (3.28), (3.29) ve (3.30) ifadelerinde verilmiştir.

$$\sin \beta : [0, 2\pi] \rightarrow [-1, 1] \quad (3.28)$$

$$\cos \beta : [0, 2\pi] \rightarrow [-1, 1] \quad (3.29)$$

$$\tan \beta : [0, 2\pi] \rightarrow [-\infty, \infty] \quad (3.30)$$



**Şekil 3.2** Çalışma noktasının ve sınırların belirlenmesi

Çalışma bölgesi merkezlerinin ve sınırlarının (Tablo 3.1) belirlenmesi, aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmektedir:

1. İlk çalışma noktası ( $x_{c_0}$ ) seçilir.
2. İlk çalışma noktasından geçen teğet doğrusu ile tanjant fonksiyonu arasında belirli bir doğrusallaştırma hatasının ( $\epsilon$ ) olduğu nokta, yeni çalışma noktası ile teğetin geçtiği çalışma noktasının ortak sınır noktası ( $x_{b_0}$ ) olarak bulunur.
3. Yeni çalışma noktası ( $x_{c_1}$ ), ortak sınır noktasından ( $x_{b_0}$ ) geçen ve tanjant fonksiyonuna teğet olan doğrunun teğet noktası olarak bulunur.
4. Yeni çalışma noktasının sağdaki sınırı ( $x_{b_1}$ ), tanjant fonksiyonu ile yeni çalışma noktasından geçen teğet doğrusu arasında belirli bir doğrusallaştırma hatasının ( $\epsilon$ ) olduğu nokta olarak bulunur.
5. Üst çalışma noktası sınırına ( $x_{max}$ ) kadar adımlar tekrarlanır.

Bu adımlara göre bu yüksek lisans tezinde kullanılan ilk 2 çalışma bölgesi merkezleri ve sınırları (Şekil 3.2) aşağıdaki adımlarla hesaplanmıştır:

$x_{c_0}$	Belirlenen ilk çalışma noktası
$x_{b_0}$	$x_{c_0}$ ve $x_{c_1}$ çalışma noktalarının ortak sınırı
$x_{c_1}$	Sonraki çalışma noktası
$x_{b_1}$	$x_{c_1}$ ve $x_{c_2}$ çalışma noktalarının ortak sınırı
$\epsilon$	Doğrusallaştırmanın hata payı

**Tablo 3.1** Çalışma noktası grafiğinde kullanılan ifadeler

1.  $\epsilon = 0.1$ ,  $x_{max} = 86$  derece ve  $x_{c_0}$  olarak dört pervanelinin askı hali olan  $x_{c_0} = 0$  radyan seçilmiştir.

**Teorem 3.1.** Bir  $y(x)$  fonksiyonunun  $x_0$  noktasından geçen teğeti,  $L[y(x), x_0] = y(x_0) + y'(x_0)(x - x_0)$  denklemiyle bulunmaktadır.

2. Tanjant fonksiyonun  $x_{c_0}$  noktasından geçen teğet doğrusu (3.31) hesaplanmaktadır.

$$L[\tan x, x_{c_0}] = \tan x_{c_0} + \sec^2 x_{c_0} (x - x_{c_0}) \quad (3.31)$$

3.  $x_{c_0}$  noktasının sayısal değeri yerine koyulduğunda nihai doğru (3.32) elde edilmektedir.

$$L[\tan x, x_0] = x \quad (3.32)$$

4. Tanjant fonksiyonu ile  $x$  doğrusu arasındaki farkı  $\epsilon$  yapan nokta, ortak sınır noktası olarak bulunmaktadır.  $\epsilon$  değeri, (3.33) denkleminde yerine koyulduğunda  $x_{b_0} = 0,6317$  radyan bulunur.

$$\tan x_{b_0} - x_{b_0} = \epsilon \quad (3.33)$$

**Teorem 3.2.**  $A(x_0, y_0)$  ve  $B(x_1, y_1)$  noktalarından geçen doğrunun eğimi  $\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$  ifadesi ile bulunur.

5.  $x_{b_0}$  noktası ile  $x_{c_1}$  noktasından geçen doğrunun eğimi ile tanjant fonksiyonuna  $x_{c_1}$  noktasında teğet olan doğrunun eğimi ( $\sec^2 x_{c_1}$ ) birbirine eşittir. (3.34) denklemini kullanarak  $x_{c_1} = 0,8546$  radyan olarak bulunur.

$$\frac{\tan x_{c_1} - \tan x_{b_0} + \epsilon}{x_{c_1} - x_{b_0}} = \sec^2 x_{c_1} \quad (3.34)$$

6. Tanjant fonksiyonuna  $x_{c_1}$  noktasında teğet olan doğrunun eğimi ( $\sec^2 x_{c_1}$ ) ile  $x_{c_1}$  noktası ile  $x_{b_1}$  noktasından geçen doğrunun eğimi birbirine eşittir. (3.35) eşitliği kullanılarak  $x_{b_1} = 1,0234$  radyan olarak bulunur.

$$\sec^2 x_{c_1} = \frac{\tan x_{b_1} - \epsilon - \tan x_{c_1}}{x_{b_1} - x_{c_1}} \quad (3.35)$$

7. Bu adımların tekrar edilmesiyle  $x_{max}$  noktasına kadar toplamda 9 tane çalışma noktası bulunur.

$\epsilon$  parametresi, dört pervanelinin çalışma noktaları sayısını belirleyen bir parametredir. Parametrenin, seçilen değerden daha büyük olması halinde daha az çalışma noktası belirlenecektir. Bu durumda planlanacak daha az kazanç olmasına rağmen dört pervanelinin performansı olumsuz yönde etkilenecektir. Parametrenin, seçilen değerden daha küçük olması halinde daha fazla çalışma noktası belirlenecektir. Bu durumda dört pervanelinin performansı olumlu yönde etkileneceğine rağmen planlanacak daha fazla kazanç olacaktır.

### 3.8 Çalışma Bölgelerinin Belirlenmesi

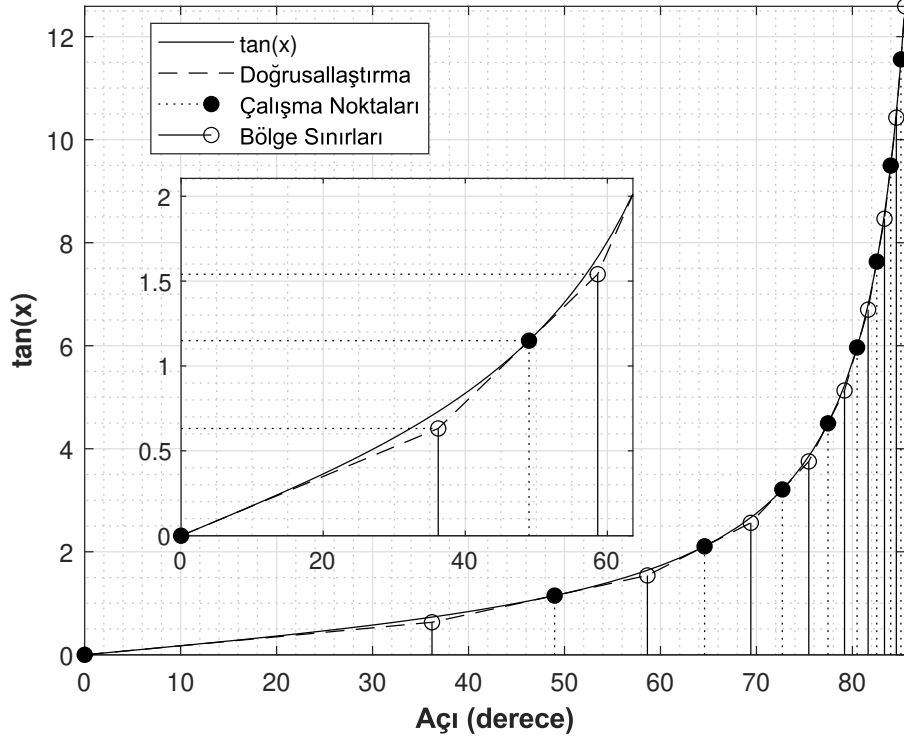
Bir önceki bölümde verilen adımlar uygulandığında, çalışma noktaları ve geçerli oldukları bölgenin sınırları bulunabilmektedir. Buna göre bu yüksek lisans tezinde kullanılan pozitif yöndeki çalışma noktaları ve sınırları (3.2) numaralı tabloda verilmiştir. Doğrusallaştırma hatasının 0.1 seçilmesiyle, üst çalışma noktası sınırına kadar toplam 9 çalışma noktası elde edilir. Bu çalışma noktalarının 8 tanesi pozitif iken 1 tanesi orijindedir. Dört pervanelinin bir eksendeki çalışma aralığını kapsamak amacıyla pozitif taraftaki çalışma noktalarının simetriği alındığında bir eksenle tanımlanabilecek toplam 17 çalışma noktasına ulaşılır.

Sol Sınır	Çalışma Noktası	Sağ Sınır
-36,1914°	0°	36,1914°
36,1914°	48,9673°	58,6367°
58,6367°	64,5922°	69,4133°
69,4133°	72,6948°	75,4528°
75,4528°	77,4524°	79,1770°
79,1770°	80,4848°	81,6346°
81,6346°	82,5364°	83,3411°
83,3411°	83,9891°	84,5740°
84,5740°	85,0552°	85,4938°

**Tablo 3.2** Pozitif yöndeki çalışma bölgeleri

Dört pervaneli yöneliminin 3 ayrı eksenle tanımlanmasına rağmen  $T$  dönüşüm matrisinde sadece 2 eksene ( $\phi$  ve  $\theta$ ) ait açıların trigonometrik terimleri bulunur. Bu durumdan dolayı bir eksene düşen 17 çalışma noktası, 2 eksene genişletildiğinde toplamda  $17^2 = 289$  çalışma noktası bulunur. Pozitif bölgedeki çalışma noktaları, sınırları ve doğrusallaştırılmış tanjant fonksiyonunun grafikleri; (3.3) numaralı grafikte verilmiştir.

(3.6) numaralı denklem incelendiğinde, çalışma noktalarına göre değişen tek terimin  $T_L$  matrisi ve ters matrisi olduğu görünür. Diğer bir deyişle, farklı çalışma noktaları için kontrolcü kazançlarının değişmesini sağlayan terim  $T_L$  matrisidir.



Şekil 3.3 Çalışma bölgeleri ve tanjant fonksiyonu

### 3.9 Kontrolcü Kazanç Matrislerinin Tasarımı

Yönelim sistemine uygulanan dönüşüm sonucu elde edilen sistemlere PD kontrolcü uygulandığında, 2. dereceden alt sistemler elde edilmektedir (Bölüm 3.4). Elde edilen alt sistemlerin kontrolcü kazançları da (3.17) ve (3.18) denklemleriyle sönümlenme oranı ve doğal frekans üzerinden hesaplanabilmektedir. Bu yüksek lisans tezinde, yönelim açıları için performans kriteri olarak alt sistemlerin kritik sönümlü bir davranışa ve belirli bir oturma zamanına sahip olmaları istenmektedir (Tablo 3.3). Buna göre (3.17) ve (3.18) denklemleri, belirli bir oturma zamanına sahip kritik sönümlü sistem cevabı (3.36) sağlayacak şekilde yeniden yazıldığında (3.37) ve (3.38) denklemleri elde edilmektedir. Bu kontrolcü kazançlarına denk gelen kritik sönümlü sistem kutupları da oturma zamanına bağlı olarak 3.39 denklemi ile hesaplanmaktadır.

$\eta$	$T_s$	$k_p$	$k_d$	$p_{1,2}$
$\phi$	0.5	136.1189	23.3340	-11.667
$\theta$	0.7	69.4484	16.6671	-8.3336
$\psi$	0.9	42.0120	12.9633	-6.4817

**Tablo 3.3** İstenen performans kriterleri ve bulunan sistem parametreleri

$$T_s = \frac{5.8335}{\omega_n} \quad (3.36)$$

$$k_p = \frac{34.0297}{T_s^2} \quad (3.37)$$

$$k_d = \frac{11.667}{T_s} \quad (3.38)$$

$$p_{1,2} = -\frac{5.8335}{T_s} \quad (3.39)$$

(3.20) denkleminde verilen  $K_p$  kazanç matrisi, istenen performans kriterlerine göre belirlenmiş olur.

$$K_p = \begin{bmatrix} 136.1189 & 0 & 0 \\ 0 & 69.4484 & 0 \\ 0 & 0 & 42.0120 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

(3.21) denkleminde verilen  $K_d$  kazanç matrisi, istenen performans kriterlerine göre belirlenmiş olur.

$$K_d = \begin{bmatrix} 23.3340 & 0 & 0 \\ 0 & 16.6671 & 0 \\ 0 & 0 & 12.9633 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Kullanılan bu denetleyicinin kararlılık analizini yapmak amacıyla aşağıdaki noktalar için A ve B matrisleri (3.26) elde edilmiştir.

$$l_1 = \begin{bmatrix} -82.5364^\circ & 80.4848^\circ \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$l_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ & 0^\circ \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$l_3 = \begin{bmatrix} 77.4524^\circ & -72.6948^\circ \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$l_4 = \begin{bmatrix} -77.4524^\circ & 48.9673^\circ \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$A_{l_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 7.5686 & -0.9915 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1299 & 0.9915 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -7.6333 & \\ -136.1189 & 0 & -41.6561 & -23.3340 & -78.4914 & 10.2828 \\ 0 & -9.0210 & 5.4109 & 0 & -13.0258 & -0.4770 \\ 0 & -68.8600 & -0.7089 & 0 & -0.4770 & -16.6046 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$B_{l_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 136.1189 & 0 & -41.4340 \\ 0 & 9.021 & -6.8861 \\ 0 & 68.8600 & 0.9021 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$A_{l_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -136.1189 & 0 & 0 & -23.3340 & 0 & 0 \\ 0 & -69.4484 & 0 & 0 & -16.6671 & 0 \\ 0 & 0 & -42.0120 & 0 & 0 & -12.9633 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$B_{l_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 136.1189 & 0 & 0 \\ 0 & 69.4484 & 0 \\ 0 & 0 & 42.0120 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$A_{l_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -3.1329 & -0.6973 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2173 & -0.9761 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.2815 & 0.7303 \\ -136.1189 & 0 & -40.1103 & -23.3340 & 32.4907 & 7.2313 \\ 0 & -15.0877 & -12.1985 & 0 & -13.1381 & 0.7854 \\ 0 & 67.7897 & -2.7150 & 0 & 0.7854 & -16.4923 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$B_{l_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 136.1189 & 0 & 40.1103 \\ 0 & 15.0877 & 12.1985 \\ 0 & -67.7897 & 2.7150 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$A_{l_4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -1.1216 & 0.2496 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2173 & -0.9761 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.4869 & 0.3309 \\ -136.1189 & 0 & 31.6911 & -23.3340 & 11.6317 & -2.5888 \\ 0 & -15.0877 & 26.9217 & 0 & -13.1381 & -0.7854 \\ 0 & 67.7897 & -5.9919 & 0 & -0.7854 & -16.4923 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$B_{l_4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 136.1189 & 0 & -31.6911 \\ 0 & 15.0877 & -26.9217 \\ 0 & 67.7897 & 5.9919 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Elde edilen sistem matrislerinin özdeğerleri incelendiğinde, özdeğerlerin daha önce tasarlanan kontrolcü kazançlarına denk gelen kutup noktalarında olduğu görülür (Tablo 3.3). Böylece değişen sistem dinamiklerine rağmen, kontrolcünün sistem kutuplarını aynı noktada tuttuğu görülmüş olur. Bu kutuplar, (3.27) denkleminde verilen eşitsizliği sağladığından kararlılığın bozulmadığı ve sağlandığı ispatlanmıştır.

# 4

## BENZETİM ÇALIŞMALARI

---

Tasarlanan kontrolcü yapısının işlevselliğini göstermek amacı ile bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. Bu ortamda gerçekleştirilen benzetim çalışmalarıyla, tasarlanan kontrolcü yapısı cevapları ile geleneksel PD kontrolcü cevabı karşılaştırılmıştır ve tartışılmış.

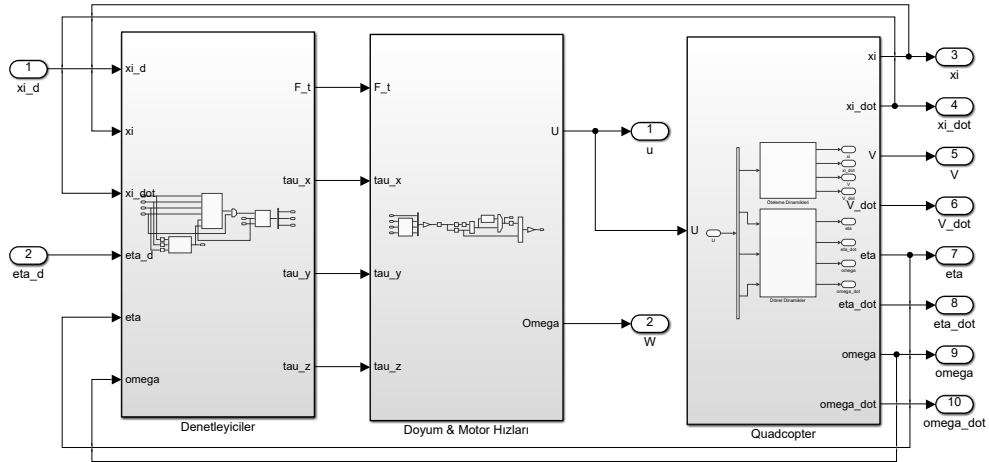
Benzetim çalışmaları, Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup benzetimde kullanılan katsayılar ve matrisler de MATLAB ortamında tanımlanmıştır. Benzetim öncesinde gerçekleştirilen adımlar aşağıdaki gibidir:

1. Modelin katsayıları tanımlanır.
2. Dört pervaneli İHA'nın çalışma bölgeleri belirlenir
3. Çalışma noktaları için  $T_L$  matrisleri hesaplanır.
4.  $K_p$  ve  $K_d$  kontrolcü kazanç matrisleri belirlenir.
5. Modelin başlangıç durumları belirlenir.
6. Benzetim çalışması başlar.

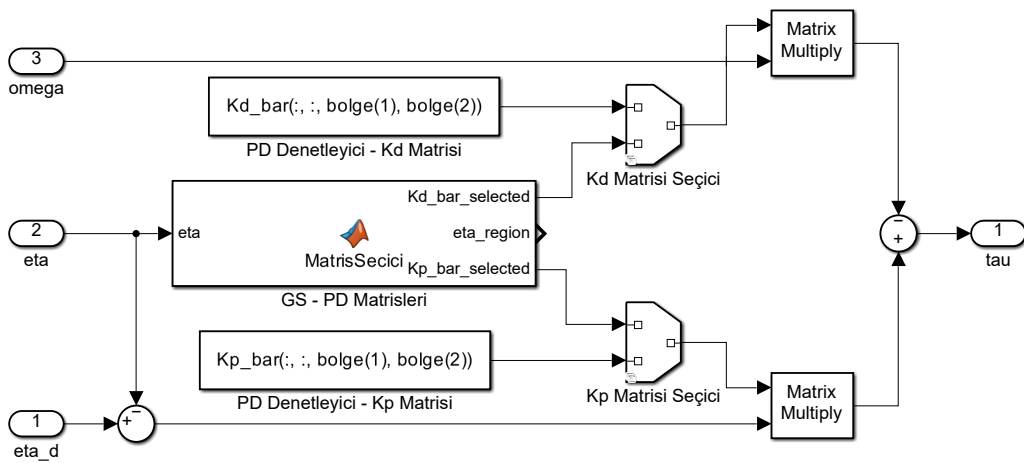
Kontrolcü performansını analiz edebilmek amacıyla, her bir kontrolcünün için farklı başlangıç ve istenen değerlerin olduğu benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Geleneksel PD kontrolcü olarak, dört pervanelinin askı halinde geçerli olan kazanç planlamalı kontrolcü seçilmiş ve tüm çalışma aralığı içerisinde sabit kalması sağlanarak tek bir kontrolcünün çalışması sağlanmıştır. Diğer tarafta ise, bu yüksek lisans tezi kapsamında tasarlanmış olan kazanç planlamalı kontrolcü çalıştırılmıştır.

İfade	Açıklama	Değer	Birim
$T_s$	Örnekleme zamanı	1	ms
$J_x$	x eksenindeki atalet	0.0075	$kgm^2$
$J_y$	y eksenindeki atalet	0.0075	$kgm^2$
$J_z$	z eksenindeki atalet	0.013	$kgm^2$
m	Kütle	0.65	kg
k	İtki katsayısı	$3.13e-5$	$Ns^2$
d	Sürüklenme katsayısı	$7.5e-7$	$Nms^2$
l	Gövde çerçevesi uzunluğu	0.23	m
g	Yerçekimi ivmesi	9.8	$m/s^2$
$\Omega_{min}$	Minimum motor hızı	200	<i>rpm</i>
$\Omega_{max}$	Minimum motor hızı	2550	<i>rpm</i>
T	Motor zaman sabiti	0.01	

**Tablo 4.1** Benzetim parametreleri [45]



**Şekil 4.1** Benzetim görünümü



**Şekil 4.2** Benzetimdeki yönelim kontrolcüsü

## 4.1 Benzetim 1

Bu benzetimde, + konfigürasyonundaki bir dört pervaneli İHA'nın başlangıç yönelimi (4.1) denkleminde ve istenen yönelimi (4.2) denkleminde verilmiştir.

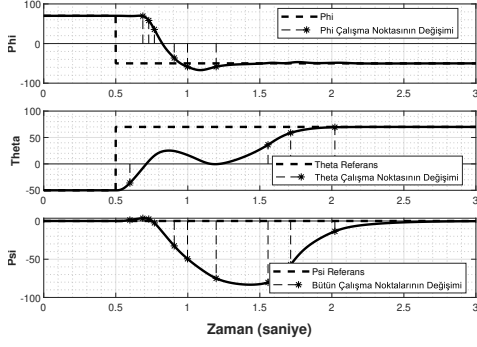
$$\eta_0 = \begin{bmatrix} 60^\circ & -40^\circ & -60^\circ \end{bmatrix}^T \quad (4.1)$$

$$\eta_d = \begin{bmatrix} -40^\circ & 60^\circ & 40^\circ \end{bmatrix}^T \quad (4.2)$$

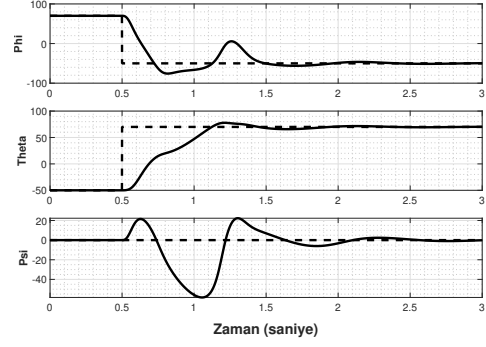
Yapılan benzetim çalışması sonucunda; dört pervaneli İHA'nın GS-PD kontrolcü altındaki yönelimi (4.3a), kontrol sinyalleri (4.4a), motor hızları (4.5a) ve PD kontrolcü altındaki yönelimi (4.3b), kontrol sinyalleri (4.4b), motor hızları (4.5b) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yönelim grafiklerine bakıldığında iki kontrolcünün de kararlılığı sağladığı görülmektedir. Yuvarlanma performanslarına bakıldığında GS-PD kontrolcünün performans kriterini sağladığı fakat PD kontrolcünün performans kriterini sağlamadığı ve istem dışı bir hareket sağladığı görülmüştür. Yunuslama performanslarına bakıldığında yuvarlanma açısından PD kontrolcünün istenen performans kriterini sağladığı görülürken GS-PD kontrolcünün performansı sağlamadığı görülmüştür. Sapma performanslarına bakıldığında GS-PD kontrolcünün performans kriterini sağladığı fakat PD kontrolcünün istenen performansı sağlamadığı görülmüştür. Buna ek olarak sapma hareketinin, GS-PD kontrolcü sayesinde diğer yönelimleri etkilemediği fakat PD kontrolcünün bunu diğer yönelimlere yansıttığı görülmüştür. Yuvarlanma ve yunuslama hareketlerinin, sapma hareketini etkilediği fakat iki kontrolcünün de bunu korumakta etkisiz ve yavaş kaldığı gözlenmiştir. Bu gözlemlere ek olarak her iki kontrolcüye ait kontrolcü sinyallerinin RMS değerleri (Tablo 4.2) incelenmiştir. İnceleme sonucunda GS-PD kontrolcünün, sapma kontrolü dışında daha az enerji harcadığı sonucuna varılmıştır.

Kontrolcü	$U_2$	$U_3$	$U_4$
GS-PD	0.1791	0.0494	0.1272
PD	0.2187	0.1074	0.1389

**Tablo 4.2** Benzetim 1'deki kontrol sinyallerinin RMS değerleri

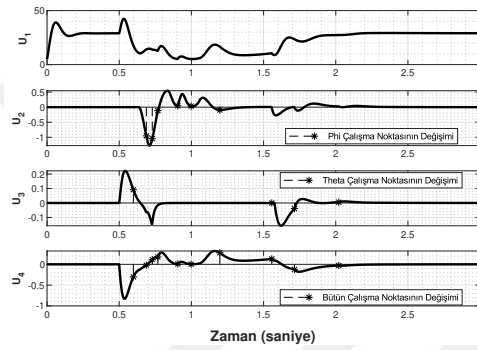


(a) GS-PD kontrolcü

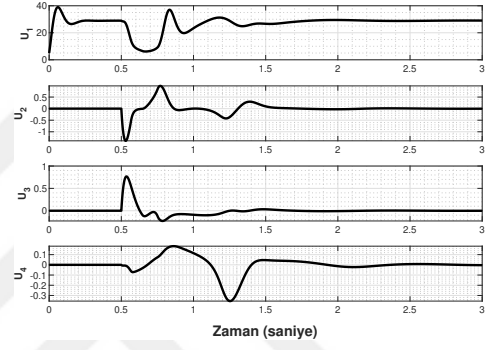


(b) PD kontrolcü

Şekil 4.3 Benzetim 1'deki yönelimler

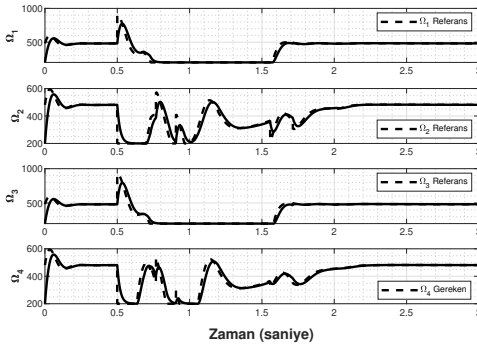


(a) GS-PD kontrolcü

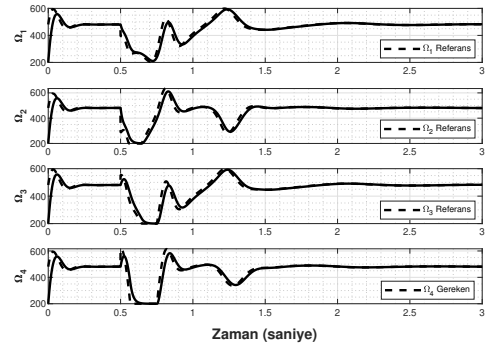


(b) PD kontrolcü

Şekil 4.4 Benzetim 1'deki kontrol sinyalleri



(a) GS-PD kontrolcü



(b) PD kontrolcü

Şekil 4.5 Benzetim 1'deki motor hızları

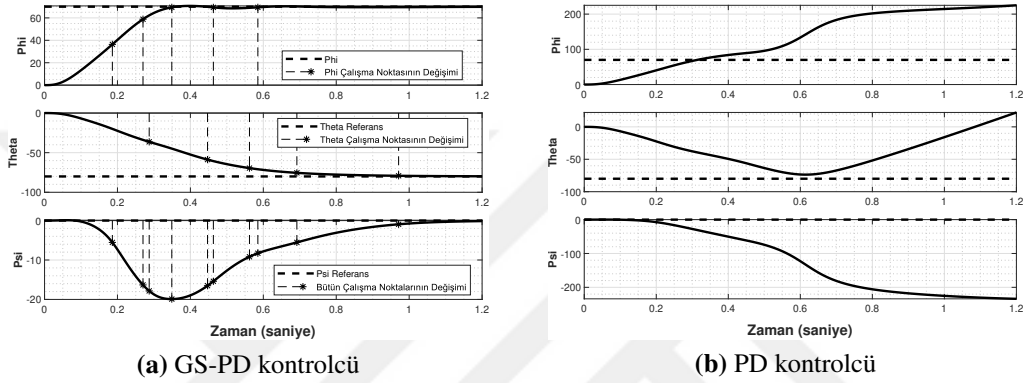
## 4.2 Benzetim 2

Bu benzetimde, X konfigürasyonundaki bir dört pervaneli İHA'nın başlangıç yönelimi (4.3) denkleminde ve istenen yönelimi (4.4) denkleminde verilmiştir.

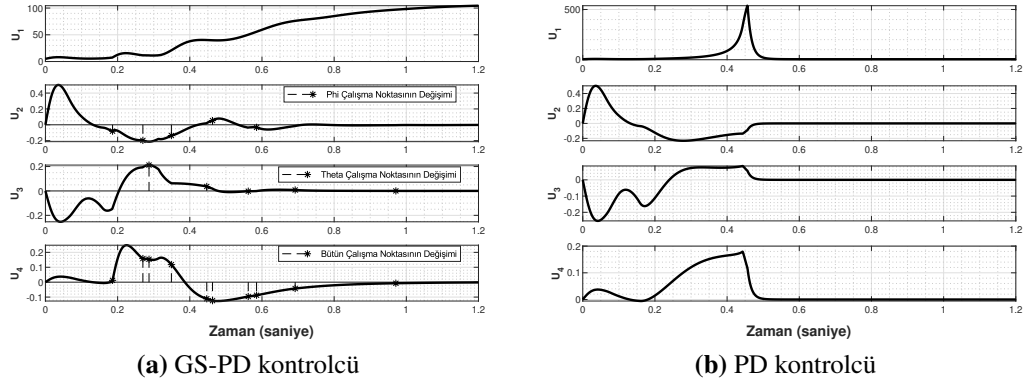
$$\eta_0 = \begin{bmatrix} 0^\circ & 0^\circ & 0^\circ \end{bmatrix}^T \quad (4.3)$$

$$\eta_d = \begin{bmatrix} 70^\circ & -80^\circ & 0^\circ \end{bmatrix}^T \quad (4.4)$$

Yapılan benzetim çalışması sonucunda; dört pervaneli İHA'nın GS-PD kontrolcü altındaki yönelimi (4.6a), kontrol sinyalleri (4.7a), motor hızları (4.8a) ve PD kontrolcü altındaki yönelimi (4.6b), kontrol sinyalleri (4.7b), motor hızları (4.8b) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yönelim grafiklerine bakıldığında GS-PD kontrolcünün kararlılığı sağladığı görülürken PD kontrolcünün kararlılığı sağlayamadığı görülmektedir. Buna ek olarak GS-PD kontrolcünün istenen performans kriterlerine göre çalıştığı gözlenmiştir. Bu benzetimle; GS-PD kontrolcünün, PD kontrolcüye oranla dört pervaneli İHA'yı daha geniş bir çalışma aralığında çalışmasını sağladığı görülmüştür.



Şekil 4.6 Benzetim 2'deki yönelimler



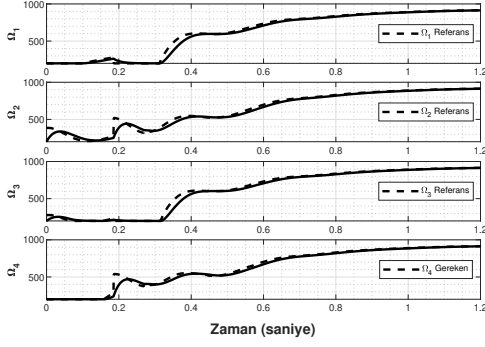
Şekil 4.7 Benzetim 2'deki kontrol sinyalleri

### 4.3 Benzetim 3

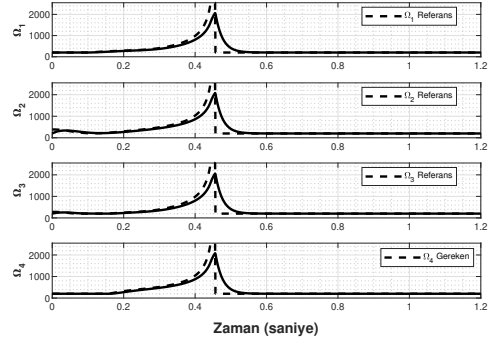
Bu benzetimde, X konfigürasyonundaki bir dört pervaneli İHA'nın başlangıç yönelimi (4.5) denkleminde ve istenen yönelimi (4.6) denkleminde verilmiştir.

$$\eta_0 = \begin{bmatrix} 0^\circ & 0^\circ & 0^\circ \end{bmatrix}^T \quad (4.5)$$

$$\eta_d = \begin{bmatrix} -80^\circ & 0^\circ & 0^\circ \end{bmatrix}^T \quad (4.6)$$



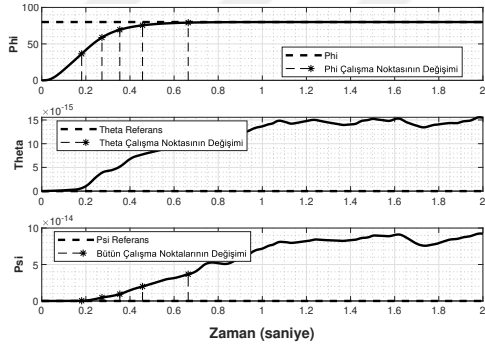
(a) GS-PD kontrolcü



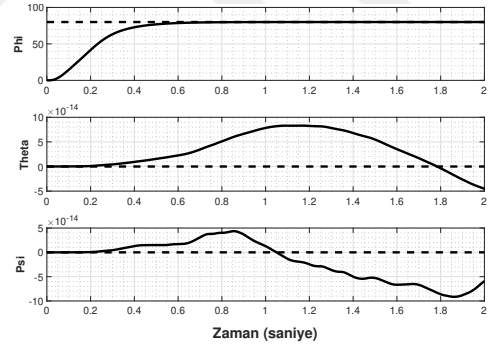
(b) PD kontrolcü

Şekil 4.8 Benzetim 2'deki motor hızları

Yapılan benzetim çalışması sonucunda; dört pervaneli İHA'nın GS-PD kontrolcü altındaki yönelimi (4.9a), kontrol sinyalleri (4.10a), motor hızları (4.11a) ve PD kontrolcü altındaki yönelimi (4.12b), kontrol sinyalleri (4.10b), motor hızları (4.11b) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yönelim grafiklerine bakıldığında iki kontrolcünün de kararlılığı sağladığı ve tek eksenle yapılan hareketin performans kriterine uygun olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu benzetimle iki kontrolcünün de tek eksenle yapılan harekette aynı performansı gösterdiği ve birbirinden farklı olmadığı görülmüştür.



(a) GS-PD kontrolcü



(b) PD kontrolcü

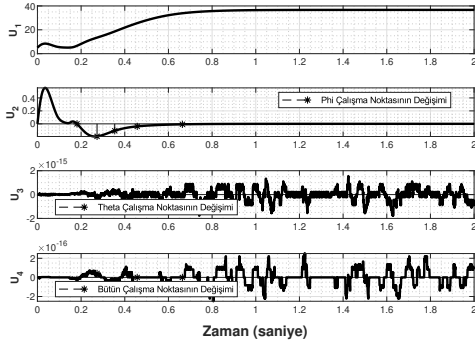
Şekil 4.9 Benzetim 3'deki yönelimler

#### 4.4 Benzetim 4

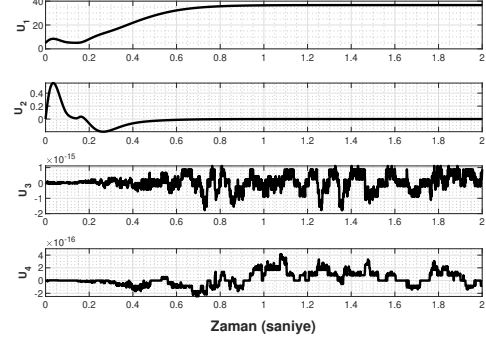
Bu benzetimde, X konfigürasyonundaki bir dört pervaneli İHA'nın başlangıç yönelimi (4.7) denkleminde ve istenen yönelimi (4.8) denkleminde verilmiştir.

$$\eta_0 = \begin{bmatrix} 0^\circ & 0^\circ & 90^\circ \end{bmatrix}^T \quad (4.7)$$

$$\eta_d = \begin{bmatrix} -80^\circ & 0^\circ & 0^\circ \end{bmatrix}^T \quad (4.8)$$

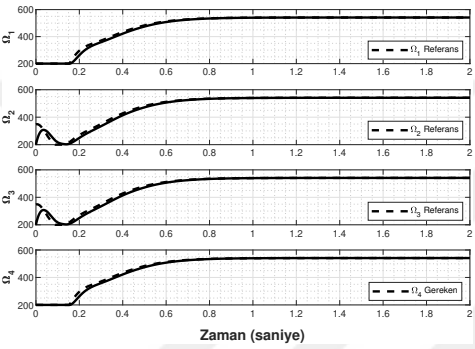


(a) GS-PD kontrolcü

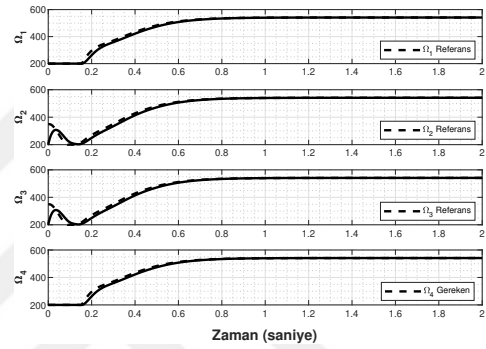


(b) PD kontrolcü

Şekil 4.10 Benzetim 3'deki kontrol sinyalleri



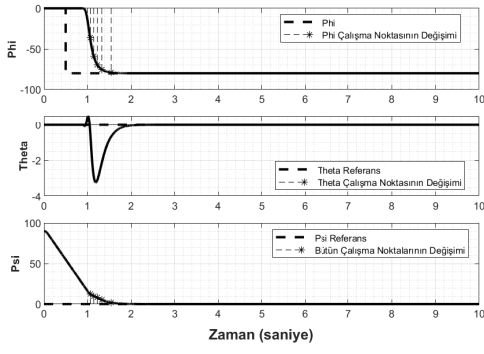
(a) GS-PD kontrolcü



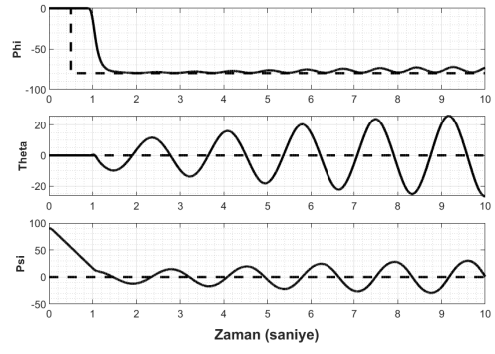
(b) PD kontrolcü

Şekil 4.11 Benzetim 3'deki motor hızları

Yapılan benzetim çalışması sonucunda; dört pervaneli İHA'nın GS-PD kontrolcü altındaki yönelimi (4.12a), kontrol sinyalleri (4.13a), motor hızları (4.14a) ve PD kontrolcü altındaki yönelimi (4.12b), kontrol sinyalleri (4.13b), motor hızları (4.14b) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yönelim grafiklerine bakıldığında GS-PD kontrolcünün kararlılığı sağladığı görülürken PD kontrolcünün kararlılığı sağlayamadığı görülmektedir. Buna ek olarak GS-PD kontrolcünün istenen performans kriterlerine göre çalıştığı gözlenmiştir. PD kontrolcü ise sapma hareketinden sonra hiçbir yönelim açısında kararlılığı sağlayamamış ve salınımlar gözlenmiştir. Bu benzetimle; GS-PD kontrolcünün, PD kontrolcüye oranla dört pervaneli İHA'da aynı anda gelebilecek yönelim isterlerini başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür.

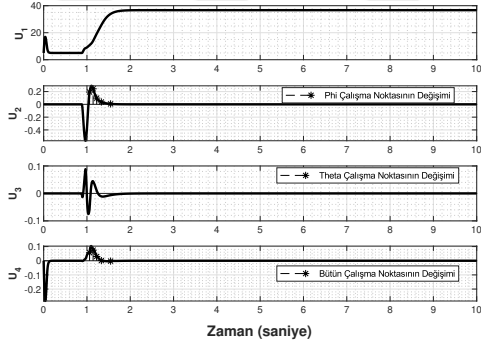


(a) GS-PD kontrolcü

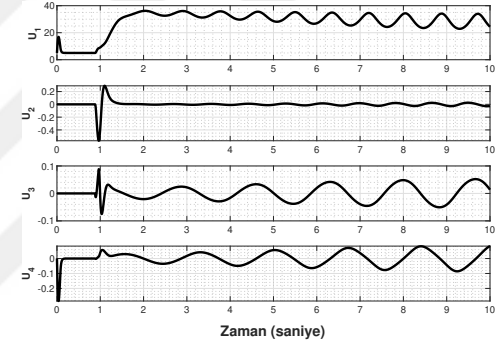


(b) PD kontrolcü

Şekil 4.12 Benzetim 4'deki yönelimler

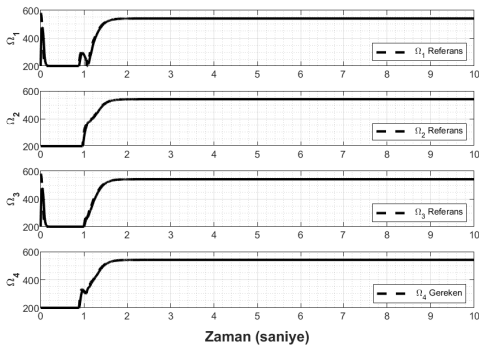


(a) GS-PD kontrolcü

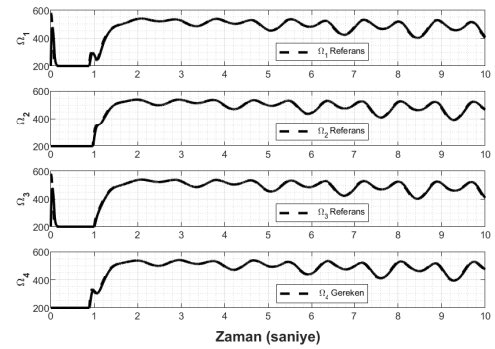


(b) PD kontrolcü

Şekil 4.13 Benzetim 4'deki kontrol sinyalleri



(a) GS-PD kontrolcü



(b) PD kontrolcü

Şekil 4.14 Benzetim 4'deki motor hızları

## 5 SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

---

Dört pervaneli insansız hava araçlarında, yönelim kontrolünün agresif manevraları içerecek şekilde geniş bir çalışma aralığında sağlanabilmesi için kazanç planlamalı bir kontrolcü yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolcünün başarısı, sayısal benzetim çalışmaları ile denenmiş ve geleneksel PD kontrolcüye göre sistem cevabı ve kararlılığı açılarından farkları ortaya konulmuştur. Önerilen kontrol yapısının kolay uygulanabilirliği, performans isterlerinin geniş bir çalışma aralığında sağlanması ve geliştirilmeye müsait olması gibi özellikleri ön plana çıkmaktadır.

Dört pervaneli insansız hava aracının öteleme hareketini (dünya çerçevesindeki bir noktadan başka bir noktaya hareketini) başarıyla sağlanması için öncelikle yönelim hareketinin başarıyla ve hassasiyetle yapılması gerekmektedir. Yapılan bu çalışma ile dört pervaneli İHA'nın agresif yönelim hareketi gerçekleştirilmişse de öteleme hareketinden bahsedilmemiştir. Yüksek performanslı bir öteleme hareketinin gerçekleştirilmesi için buna uygun olacak şekilde yüksek performansa sahip bir konum kontrolcüsü gerekmektedir. Bu bağlamda, dört pervanelinin konum kontrolünün bu çalışmada önerilen yönelim kontrolcüsünü içeren bir yapıda oluşturulması gelecek çalışma olarak planlanmaktadır. Ayrıca, yönelim kontrolcüsünün performansını artırmak adına kazanç planlama algoritmasının iyileştirilmesi de planlanmaktadır.

- [1] M. Idrissi, M. Salami, F. Annaz, “A review of quadrotor unmanned aerial vehicles: Applications, architectural design and control algorithms,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 104, no. 2, p. 22, Jan. 2022, issn: 1573-0409. doi: 10.1007/s10846-021-01527-7.
- [2] Y. Li, M. Liu, D. Jiang, “Application of unmanned aerial vehicles in logistics: A literature review,” *Sustainability*, vol. 14, no. 21, 2022, issn: 2071-1050. doi: 10.3390/su142114473. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/14473>.
- [3] E. Semsch, M. Jakob, D. Pavlicek, M. Pechoucek, “Autonomous uav surveillance in complex urban environments,” in *2009 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, vol. 2, 2009, pp. 82–85. doi: 10.1109/WI-IAT.2009.132.
- [4] F. Nex, F. Remondino, “Uav for 3d mapping applications: A review,” *Applied Geomatics*, vol. 6, no. 1, pp. 1–15, Mar. 2014, issn: 1866-928X. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x.
- [5] D. Erdos, A. Erdos, S. E. Watkins, “An experimental uav system for search and rescue challenge,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 32–37, 2013. doi: 10.1109/MAES.2013.6516147.
- [6] A. Utsav, A. Abhishek, P. Suraj, R. K. Badhai, “An iot based uav network for military applications,” in *2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2021, pp. 122–125. doi: 10.1109/WiSPNET51692.2021.9419470.
- [7] G. Cai, K.-Y. Lum, B. M. Chen, T. H. Lee, “A brief overview on miniature fixed-wing unmanned aerial vehicles,” in *IEEE ICCA 2010*, 2010, pp. 285–290. doi: 10.1109/ICCA.2010.5524453.
- [8] S. Hanford, L. Long, J. Horn, “A small semi-autonomous rotary-wing unmanned air vehicle (uav),” in *Infotech@Aerospace*. doi: 10.2514/6.2005-7077.
- [9] S. A. H. Mohsan, Q. u. A. Zahra, M. A. Khan, M. H. Alsharif, I. A. Elhaty, A. Jahid, “Role of drone technology helping in alleviating the covid-19 pandemic,” *Micromachines*, vol. 13, no. 10, 2022, issn: 2072-666X. doi: 10.3390/mi13101593. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/10/1593>.

- [10] T. Turker, H. Gorgun, G. Cansever, “Stabilization of a class of 2-dof underactuated mechanical systems via lyapunov’s direct approach,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 14, pp. 1128–1133, 2010, 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, issn: 1474-6670. doi: 10 . 3182/20100901-3-IT-2016.00256.
- [11] E. Zerzeroğlu, İ. Kandemir, M. Şeker, E. Eroğlu, “Kontrol sistemlerinde belirsizlikle baş etme yöntemleri: Lyapunov tarzı yaklaşımlar,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 21, no. 3, 2006.
- [12] I. Lopez-Sanchez, J. Moreno-Valenzuela, “Pid control of quadrotor uavs: A survey,” *Annual Reviews in Control*, vol. 56, p. 100900, 2023, issn: 1367-5788. doi: 10.1016/j.arcontrol.2023.100900.
- [13] M.-D. Hua, T. Hamel, P. Morin, C. Samson, “Introduction to feedback control of underactuated vtolvehicles: A review of basic control design ideas and principles,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 33, no. 1, pp. 61–75, 2013. doi: 10.1109/MCS.2012.2225931.
- [14] N. S. Özbek, M. Önkol, M. Ö. Efe, “Feedback control strategies for quadrotor-type aerial robots: A survey,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 38, no. 5, pp. 529–554, 2016. doi: 10.1177/0142331215608427.
- [15] P. Wang, Z. Man, Z. Cao, J. Zheng, Y. Zhao, “Dynamics modelling and linear control of quadcopter,” in *2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)*, 2016, pp. 498–503. doi: 10.1109/ICAMechS.2016.7813499.
- [16] H. Liu, D. Liu, Z. Zuo, “Robust attitude control for uncertain quadrotors with input time delays,” in *2016 European Control Conference (ECC)*, 2016, pp. 2312–2315. doi: 10.1109/ECC.2016.7810636.
- [17] G. Bo, L. Xin, Z. Hui, W. Ling, “Quadrotor helicopter attitude control using cascade pid,” in *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2016, pp. 5158–5163. doi: 10.1109/CCDC.2016.7531919.
- [18] J. Zhou, R. Deng, Z. Shi, Y. Zhong, “Robust cascade pid attitude control of quadrotor helicopters subject to wind disturbance,” in *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 2017, pp. 6558–6563. doi: 10.23919/ChiCC.2017.8028397.
- [19] E. Fresk, G. Nikolakopoulos, “Full quaternion based attitude control for a quadrotor,” in *2013 European Control Conference (ECC)*, 2013, pp. 3864–3869. doi: 10.23919/ECC.2013.6669617.
- [20] C. Izaguirre-Espinosa, A. J. Muñoz-Vázquez, A. Sánchez-Orta, V. Parra-Vega, P. Castillo, “Attitude control of quadrotors based on fractional sliding modes: Theory and experiments,” *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, no. 7, pp. 825–832, 2016. doi: 10.1049/iet-cta.2015.1048.
- [21] B. Vang, R. Tron, “Geometric attitude control via contraction on manifolds with automatic gain selection,” in *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, 2019, pp. 6138–6145. doi: 10.1109/CDC40024.2019.9029723.

- [22] S. Spedicato, G. Notarstefano, H. H. Bühlhoff, A. Franchi, “Aggressive maneuver regulation of a quadrotor uav,” in *Robotics Research: The 16th International Symposium ISRR*, M. Inaba, P. Corke, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 95–112, isbn: 978-3-319-28872-7. doi: 10.1007/978-3-319-28872-7\_6.
- [23] A. Honglei, L. Jie, W. Jian, W. Jianwen, M. Hongxu, “Backstepping-based inverse optimal attitude control of quadrotor,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 5, p. 223, 2013. doi: 10.5772/56337.
- [24] J.-J. Xiong, E.-H. Zheng, “Position and attitude tracking control for a quadrotor uav,” *ISA Transactions*, vol. 53, no. 3, pp. 725–731, 2014, issn: 0019-0578. doi: 10.1016/j.isatra.2014.01.004.
- [25] M. A. Lotufo, L. Colangelo, C. Perez-Montenegro, E. Canuto, C. Novara, “Uav quadrotor attitude control: An adrc-emc combined approach,” *Control Engineering Practice*, vol. 84, pp. 13–22, 2019, issn: 0967-0661. doi: 10.1016/j.conengprac.2018.11.002.
- [26] R. Zhang, Q. Quan, K.-Y. Cai, “Attitude control of a quadrotor aircraft subject to a class of time-varying disturbances,” *IET control theory & applications*, vol. 5, no. 9, pp. 1140–1146, 2011.
- [27] K. Zhao, J. Zhang, D. Ma, Y. Xia, “Composite disturbance rejection attitude control for quadrotor with unknown disturbance,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 6894–6903, 2020. doi: 10.1109/TIE.2019.2937065.
- [28] H. Hua, Y. Fang, X. Zhang, C. Qian, “Auto-tuning nonlinear pid-type controller for rotorcraft-based aggressive transportation,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 145, p. 106858, 2020, issn: 0888-3270. doi: 10.1016/j.ymsp.2020.106858.
- [29] A. Castillo, R. Sanz, P. Garcia, W. Qiu, H. Wang, C. Xu, “Disturbance observer-based quadrotor attitude tracking control for aggressive maneuvers,” *Control Engineering Practice*, vol. 82, pp. 14–23, 2019, issn: 0967-0661. doi: 10.1016/j.conengprac.2018.09.016.
- [30] F. Oliva-Palomo, A. Sanchez-Orta, P. Castillo, H. Alazki, “Nonlinear ellipsoid based attitude control for aggressive trajectories in a quadrotor: Closed-loop multi-flips implementation,” *Control Engineering Practice*, vol. 77, pp. 150–161, 2018, issn: 0967-0661. doi: 10.1016/j.conengprac.2018.05.009.
- [31] T. H. Pham, S. Mammam, “Quadrotor l<sub>p</sub>v control using static output feedback,” in *2019 IEEE 16th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 2019, pp. 74–79. doi: 10.1109/ICNSC.2019.8743181.
- [32] S. Zhu, S. Y. Gelbal, B. Aksun-Guvenc, L. Guvenc, “Parameter-space based robust gain-scheduling design of automated vehicle lateral control,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 10, pp. 9660–9671, 2019. doi: 10.1109/TVT.2019.2937562.

- [33] H. Balini, J. Witte, C. W. Scherer, "Synthesis and implementation of gain-scheduling and lqv controllers for an amb system," *Automatica*, vol. 48, no. 3, pp. 521–527, 2012, issn: 0005-1098. doi: 10.1016/j.automatica.2011.08.061.
- [34] K. Wu, G. Zheng, "Fem-based gain-scheduling control of a soft trunk robot," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 3081–3088, 2021. doi: 10.1109/LRA.2021.3061311.
- [35] A. I. Dounis, P. Kofinas, C. Alafodimos, D. Tseles, "Adaptive fuzzy gain scheduling pid controller for maximum power point tracking of photovoltaic system," *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 202–214, 2013, issn: 0960-1481. doi: 10.1016/j.renene.2013.04.014.
- [36] A. Ataka *et al.*, "Controllability and observability analysis of the gain scheduling based linearization for uav quadrotor," in *2013 International Conference on Robotics, Biomimetics, Intelligent Computational Systems*, 2013, pp. 212–218. doi: 10.1109/ROBIONETICS.2013.6743606.
- [37] Sawyer, Shaun, "Gain-scheduled control of a quadcopter uav," M.S. thesis, 2015. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10012/9488>.
- [38] J. Qiao, Z. Liu, Y. Zhang, "Gain scheduling pid control of the quad-rotor helicopter," in *2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, 2017, pp. 1594–1601. doi: 10.1109/ICUS.2017.8278414.
- [39] S. Hong, N. Nguyen, "Position control of a hummingbird quadcopter augmented by gain scheduling," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 11, pp. 1485–1498, Jan. 2018.
- [40] A. L. Luna, I. C. Vega, J. M. Carranza, "Gain-scheduling and pid control for an autonomous aerial vehicle with a robotic arm," in *2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/CCRA.2018.8588145.
- [41] H. T. M. Elkholy, "Dynamic modeling and control of a quadrotor using linear and nonlinear approaches," Ph.D. dissertation, American University in Cairo, 2014.
- [42] X. Zhang, X. Li, K. Wang, Y. Lu, "A survey of modelling and identification of quadrotor robot," *Abstract and Applied Analysis*, vol. 2014, p. 320526, Oct. 2014, issn: 1085-3375. doi: 10.1155/2014/320526.
- [43] G. G. Slabaugh, "Computing euler angles from a rotation matrix," *Retrieved on August*, vol. 6, no. 2000, pp. 39–63, 1999.
- [44] D. McLean, *Automatic Flight Control Systems* (Phaidon Cultural Guide). Prentice Hall, 1990, isbn: 9780130540089. [Online]. Available: <https://books.google.com.tr/books?id=cJNTAAAAMAAJ>.
- [45] S. Bouabdallah, "Design and control of quadrotors with application to autonomous flying," Jan. 2007. doi: 10.5075/epfl-thesis-3727.
- [46] N. S. Nise, *Control systems engineering*. John Wiley & Sons, 2020.
- [47] C. Briat, "Linear parameter-varying and time-delay systems," *Analysis, observation, filtering & control*, vol. 3, pp. 37–41, 2014.

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### Proje

1. Dört Rotorlu İnsansız Hava Araçları İçin Askıda Kalma ve Agresif Manevra Kabiliyetleri İçin Optimal Yörünge Oluşturulması, Kontrolcü Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Uygulanması, TÜBİTAK Projesi, 118M709

