



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**MEKATRONİK SİSTEMLER İÇİN YENİLİKÇİ
ÖZ-AYARLAMALI HIZ GÖZLEMCİSİ VE GÜRBÜZ
DENETLEYİCİ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ**

Doktora Tezi

Hazin İNCİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Doktora Programı

İzmir
2023

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

MEKATRONİK SİSTEMLER İÇİN YENİLİKÇİ
ÖZ-AYARLAMALI HIZ GÖZLEMCİSİ VE GÜRBÜZ
DENETLEYİCİ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

Hazin İNCİ

Danışman: Prof. Dr. Aydoğan SAVRAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Doktora Programı

İzmir
2023

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “**MEKATRONİK SİSTEMLER İÇİN YENİLİKÇİ ÖZ-AYARLAMALI HIZ GÖZLEMCİSİ VE GÜR-BÜZ DENETLEYİCİ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

26/12/2023

Hazin İNCİ

ÖZET**MEKATRONİK SİSTEMLER İÇİN YENİLİKÇİ
ÖZ-AYARLAMALI HIZ GÖZLEMCİSİ VE GÜRBÜZ
DENETLEYİCİ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ**

İNÇİ, Hazin

Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aydoğın SAVRAN

Aralık 2023, 87 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, Euler Lagrange tipi sistemlerin denetiminde kullanılabilir, doyum işlevi tabanlı, öz-ayarlamalı, yenilikçi gürbüz denetleyici ve hız gözlemcisinin tasarımları, kararlılık analizleri, benzetim ve deneysel çalışmaları sunulmuştur.

Önerilen gürbüz denetleyici ve hız gözlemcisi, özellik olarak benzer avantajlara ve güçlü yönlerle sahiptir. Her iki tasarımda da doyum işlevi kullanılmıştır. Denetlenen veya gözlemlenen sistemin model bilgisine ihtiyaç duymamaktadırlar. Geliştirilen öz-ayarlama yöntemleri sayesinde kazançların ayarlanması hususunda herhangi bir güçlük yaşatmamaktadırlar. Önerilen öz-ayarlama algoritmalarıyla ayarlamalı bir şekilde kazançları ayarlanmaktadır. Kararlılıkları, Lyapunov kararlılık kriteri ile kanıtlanmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmalarla, başarımları ortaya konmuştur.

Tasarlanan denetleyicinin başarımları, bir top-robot sistemi aracılığıyla deneysel olarak test edilmiştir. Robotun dengeleme denetimi ve sıfırdan farklı bir referans takibi denetimi, tasarlanan gürbüz denetleyici ile etkin bir şekilde sağlanmıştır. Top-robot gibi doğası gereği oldukça kararsız bir robotik sistemin denetiminde, kayan kipli denetim yöntemlerine kıyasla daha iyi başarımlar gösterdiği, elde edilen deneysel sonuçlarla ifade edilmiştir.

Önerilen hız gözlemcisi top-robot ve düzlemsel robot kolu sistemlerinde, ölçülen açı bilgilerini kullanarak hız bilgisini gözlemlemek amacıyla deneysel olarak test edilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Ayrıca, hız ölçümlerinin

olmadığı sadece açı ölçümleri olan bir dönel ters sarkaç sisteminin denetiminde kullanılan denetleyiciye, hız bilgilerini sağlamak için önerilen hız gözlemcisi kullanılmış ve sistem denetiminin başarıyla sağlanmıştır.

Anahtar sözcükler: gürbüz denetim, Lyapunov, öz-ayarlama, Euler Lagrange sistemleri, top-robot, hız gözlemcisi.



ABSTRACT**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF NOVEL SELF-TUNING
VELOCITY OBSERVER AND ROBUST CONTROLLER FOR
MECHATRONIC SYSTEMS**

İNÇİ, Hazin

Ph.D in Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Aydoğın SAVRAN

December 2023, 87 pages

In this thesis, the design, stability analysis, simulation and experimental studies of a saturation function based self-tuning novel robust controller and velocity observer have been presented that could be used in the control of Euler Lagrange type systems.

The proposed robust controller and velocity observer have similar advantages and strengths. In both designs, the saturation function has been used. They do not require model knowledge of the system being controlled or observed. Thanks to the developed self-tuning methods, they do not cause any difficulty in tuning the gains. Their gains are adaptively tuned with proposed self-tuning algorithms. Their stability is proved by Lyapunov-based arguments. Their performance is demonstrated by simulation and experimental studies.

The performance of the designed controller is experimentally tested through a ballbot system. The robot's balancing control and non-zero reference tracking control are effectively achieved with the designed robust controller. The experimental results show that the designed robust controller performs better than sliding mode control type methods in controlling a highly unstable robotic system such as a ballbot.

The proposed velocity observer is experimentally tested in ballbot and planar robot manipulator systems to observe the angular velocity informations using measured angles and the results are presented. In addition, the proposed velocity observer is used to provide velocity information to the controller used

in the control of a rotary inverted pendulum system that has no velocity measurements but only angle measurements, and it is demonstrated that the control of the system is successfully achieved.

Keywords: robust control, Lyapunov, self-tuning, Euler Lagrange systems, ballbot, velocity observer.



ÖNSÖZ

Günümüzde, Euler Lagrange tipi sistemler, çok çeşitli endüstriyel ve akademik alanlarda geniş bir kullanım bulmaktadırlar. Euler Lagrange sistemler, özellikle robotik uygulamalarda karmaşık dinamik modellerin ve denetim stratejilerinin temelini oluşturmaktadırlar. Bu sistemler, robot kolları, araç dinamikleri, havacılık sistemleri, biyomekanik sistemler gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Robotik sistemleri ele alacak olursak, tam ve eksiksiz bir model bilgisine sahip olunamaması durumunda, denetleyici tasarımı güç bir hal almaktadır. Bu sistemlerin denetiminde model belirsizlikleriyle mücadele etmek ve ölçüm eksikliklerini telafi etmek gerekmektedir. Bilimsel yazında, Euler Lagrange sistemlerinin denetiminde model belirsizlikleriyle başa çıkmak amacıyla geliştirilmiş birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak, bu çalışmaların birçoğunda bu yöün ilgiye rağmen hala geliştirilmeye açık alanlar mevcuttur.

Bu tez kapsamında, Euler Lagrange sistemlerinin denetim başarımını arttırmak hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda yenilikçi öz-ayarlamalı gürbüz denetleyici ve hız gözlemcisi tasarımları ve gerçeklenmeleri sunulmuştur.

İZMİR

26/12/2023

Hazin İNCİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK	ii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ	xvii
SİMGELEr VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
1 GİRİŞ	1
2 DENEYSEL DÜZENEKLER	7
2.1 Top-Robot	8
2.1.1 Mekanik tasarım	8
2.1.2 Elektronik bileşenler	11
2.1.3 Donanım yazılımı	13
2.2 Dönel Ters Sarkaç	17
2.3 Düzlemsel Robot Kolu	19
3 HIZ GÖZLEMCİSİ TASARIMI	21
3.1 Sistem Modeli ve Özellikleri	21
3.2 Gözlemci Tasarımı	22
3.3 Kararlılık Analizi	24

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.4	Benzetim Çalışması 27
3.5	Deneysel Çalışmalar 32
3.5.1	Top-robot 32
3.5.2	Dönel ters sarkaç 35
3.5.3	Düzlemsel robot kolu 39
3.6	Sonuçlar 43
4	GÜRBÜZ DENETLEYİCİ TASARIMI 45
4.1	Sistem Modeli ve Özellikleri 46
4.2	Denetleyici Tasarımı 47
4.3	Kararlılık Analizi 51
4.4	Deneysel Çalışmalar 53
4.4.1	Top-robot'un dengelenmesi ve kazançlarının bulunması 54
4.4.2	Yörünge takibi uygulaması 60
4.4.3	Karşılaştırma çalışması 64
4.5	Sonuçlar 68
5	SONUÇ 69
6	ÖNERİLER 71
EK AÇIKLAMALAR 72	
A	$V_1(t)$ 'nin Negatif Olmadığının İspatı 72
B	$V_q(t)$ 'nin Pozitif Olduğunun İspatı 75
KAYNAKLAR DİZİNİ 77	
TEŞEKKÜR 85	
ÖZGEÇMİŞ 86	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Top-robot	7
2.2 Top-robot dişey görünüm	9
2.3 Top-robot yanal kesit çizimi	10
2.4 Tek çizgi temaslı tüm yönlü tekerlek	11
2.5 Örnek bir sensör tümleştirme sonucu	13
2.6 NUCLEO-F746ZG Gömülü sistem kartı	14
2.7 Top-Robot'un sanal eksenlere göre yerleşimi	15
2.8 Dönel ters sarkaç ve şematik gösterimi	18
2.9 Düzlemsel robot kolu	20
3.1 Önerilen hız gözlemcisinin blok diyagram gösterimi	24
3.2 Top-robot'un şeması	28
3.3 Gerçek (q) ve gözlemlenmiş (\hat{q}) durum değişkenleri	29
3.4 Durum değişkenleri gözlem hata işareti \tilde{q}	30
3.5 Gözlemlenmiş hız işareti $\dot{\hat{q}}$	30
3.6 Gözlemci kazanç matrislerinin köşegen elemanları $\hat{\beta}(t)$ ve $K(t)$. . .	31
3.7 Ölçülen (\cdot) ve gözlemlenmiş ($\hat{\cdot}$) Euler açıları	32
3.8 Sayısal ($(\dot{\cdot})$) ve gözlemlenmiş ($(\dot{\hat{\cdot}})$) açısal hızlar	33
3.9 Top-robot için pozisyon gözlem hataları	34
3.10 $\hat{\beta}(t)$ ve $K(t)$ kazanç matrislerinin köşegen elemanları	34
3.11 Ölçülen kol açısı $\theta(t)$ ve sarkaç açısı $\alpha(t)$	36
3.12 Pozisyon gözlem hataları	36
3.13 Gözlemlenmiş kol hızı $\dot{\hat{\theta}}(t)$ ve sarkaç hızı $\dot{\hat{\alpha}}(t)$	37
3.14 Kazanç matrisi $\hat{\beta}(t)$ 'in köşegen elemanları	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.15 Kazanç matrisi $K(t)$ 'nin köşegen elemanları	38
3.16 Denetleyici girişi	38
3.17 Düzlemsel robot kolunun uç-noktasının x-y düzlemindeki hareketi .	39
3.18 Ölçülen ve gözlemlenmiş eklem açıları	40
3.19 Sayısal (\dot{q}) ve gözlemlenmiş (\hat{q}) eklem açısal hızları	41
3.20 Düzlemsel robot kol için pozisyon gözlem hataları	41
3.21 $\hat{\beta}(t)$ ve $K(t)$ kazanç matrislerinin köşegen elemanları	42
4.1 Tasarlanan denetleyicinin blok diyagramı	50
4.2 Yalpa (ψ_x) ve yunuslama (ψ_y) açıları	55
4.3 Sapma (ψ_z) açısı	55
4.4 Zamanla değişen kazançlar	57
4.5 Hata işaretleri	57
4.6 Denetleyici girişi	59
4.7 Motor hızları	60
4.8 Euler açıları için sıfırdan farklı yörünge takibi sonuçları	61
4.9 Hata işaretleri	62
4.10 Denetleyici girişi	63
4.11 Motor Hızları	63
4.12 Önerilen denetleyici aktifken hata işaretleri	66
4.13 u_{smc} (4.32) aktifken hata işaretleri	66
4.14 Önerilen denetleyici aktifken denetleyici girişleri	67
4.15 u_{smc} (4.32) aktifken denetleyici girişleri	67

TABLOLAR DİZİNİ

ÇizelgeSayfa

4.1 Karşılaştırma çalışması sonuçları 65



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ψ_x	Yalpa(Roll) açısı
ψ_y	Yunuslama(Pitch) açısı
ψ_z	Sapma(Yaw) açısı
ϕ_z	Zenit açısı
$(\hat{\bullet})$	\bullet 'nın gözlemlenmiş pozisyon vektörü
$(\dot{\bullet})$	\bullet 'nın gözlemlenmiş hız vektörü
$(\tilde{\bullet})$	\bullet 'nın pozisyon gözlem hata vektörü
u	Denetleyici girişi
x	Pozisyon bilgisi
\dot{x}	Hız bilgisi
\ddot{x}	İvme Bilgisi
K	Köşegen, pozitif tanımlı kazanç matrisi
$\hat{\beta}$	Köşegen, pozitif tanımlı kazanç matrisi
ϵ	Küçük pozitif bir sabit
p_i	i numaralı tekerleğin top ile temas ettiği noktanın, topun merkezine göre konum vektörü
s_i	i numaralı tekerleğin konumlandırıldığı pozisyona göre dönüş yönü birim vektörü
ϵ	Küçük pozitif bir sabit
R	Topun yarıçapı
ω_x	Topun x eksenindeki açısal hızı
ω	Topun x,y ve z eksenlerindeki açısal hız vektörü
v_{ix}	i numaralı tekerleğin x yönündeki dönüş hızı
v_i	i numaralı tekerleğin dönüş hızı
θ	Dönel kol açısı
α	Sarkaç açısı
q	Düzlemsel robot kolunun eklem açıları vektörü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
<i>EL</i>	Euler Lagrange
<i>BLDC</i>	Fırçasız Doğru Akım (Brushless Direct Current)
<i>IMU</i>	Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)
<i>PID</i>	Oransal-İntegral-Türev (Proportional-Integral-Derivative)
<i>RPM</i>	Dakika Başına Devir Sayısı (Revolutions per Minute)
<i>AV</i>	Ortalama Değer (Average Value)
<i>MR</i>	Maksimum Aralık (Maximum Range)
<i>Var</i>	Değişim (Variance)

1 GİRİŞ

Genellikle mekanik sistemlerin dinamiklerini modellemek için kullanılmakta olan Euler Lagrange (EL) tipi sistemler, aralarında robotik sistemler, robot kolları, araç dinamikleri, havacılık sistemleri, biyomekanik sistemler gibi çok çeşitli sistemlerin gösteriminde tercih edilmektedir. Bu sistemlerin özellikle endüstrideki çok sayıdaki uygulamaları nedeniyle, EL sistemlerinin yörünge takip denetimi oldukça önemli bir yere sahiptir (Spong et al., 2020).

Sistemlerin dinamik modellerinde belirsizlikler mevcut olduğunda denetim problemi zorlaşmaktadır. Mevcut belirsizliğin türü, kullanılacak uygun denetim çerçevesini belirlemektedir (Lewis et al., 2003). Belirsizlikler, bilinen ve ölçülebilen değişkenlerin belirsiz parametrelerle çarpımı olarak ayrıştırılabildiğinde, uyarlamalı yöntemler kullanılabilir (Sastry and Bodson, 1989; Krstic et al., 1995; Ioannou and Sun, 1996; Kokotovic, 1992; Patil et al., 2022). Parametrik belirsizliklerin diğer terimlerden ayrılması ihtiyacı, özellikle yüksek serbestlik dereceli sistemler için daha fazla hesaplama çabası gerektirmektedir. Ayrıca, bu işlemin mevcut sisteme özgü olması, genellikle standart uyarlamalı denetimin dezavantajı olarak kabul edilmekte ve özdeş olmayan sistemlere uygulanmasını engellemektedir.

Öte yandan, gürbüz denetleyiciler hem daha az model bilgisi gerektirmekte hem de ayarlamak için daha az denetleyici kazancı barındırmaktadırlar (Qu, 1998; Qu and Xu, 2002a; Khalil, 2002). Bununla birlikte, çoğu gürbüz tip denetleyici için kararlılık sonuçları ile ancak takip hatasının nihai sınırlılığı ispatlanabilir. Ayrıca denetleyici kazançlarının modelleme belirsizliklerinin tahmini üst sınırından daha yüksek olmasını da gerektirmektedir. Denetleyici kazançları artırılarak nihai sınırın boyutu azaltılabilmektedir, ancak bu durum genellikle daha yüksek denetleyici eforu ve çatırdama gibi istenmeyen sonuçlara neden olabilmektedir. Gürbüz denetimin bir türünde, takip hatasının işareti, yani takip hatasının ve zaman türevlerinin ağırlıklı bir kombinasyonu kullanılmaktadır (Young et al., 1999). Bu yaklaşım kararlılık açısından avantajlı olmasına rağmen (asimptotik veya sonlu zaman kararlılığı garanti edilebilirdi-

ğinden), denetim girişinin süreksizliği, çoğu mekanik sistemler için önemli bir sorun teşkil etmektedir.

Denetleyici eforunun süreksiz yapısıyla ilgili sorunları gidermek için, takip hatası işaretinin integralinin kullanımına dayanan yaklaşımlar önerilmiştir (Qu and Xu, 2002b; Xian et al., 2004a; Bidikli et al., 2013, 2014; Shtessel et al., 2014). Yine de çatırdama analizi, başarımların sisteme özgü olabileceğini ortaya koymaktadır (Pérez-Ventura and Fridman, 2017). Bazı güncel çalışmalarda, işaret işlevi yerine hiperbolik tanjant işlevi kullanarak denetleyici tasarımları gerçekleştirilmiştir (Dasdemir and Zergeroglu, 2015; Xian and Zhang, 2016; Bidikli and Bayrak, 2018; Onder et al., 2022). Ancak üstel işlevleri hesaplama ihtiyacı, hesaplama açısından sınırlı sistemler için sorunlara neden olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, dinamik modelinde belirsizlikler bulunan ikinci dereceden EL sistemlerin, takip denetimini sağlayacak ve mekanik sistemlere sorunsuzca uygulanabilecek bir gürbüz denetleyici tasarlanmıştır. (Pérez-Ventura and Fridman, 2017) çalışmasındaki bulgulardan hareketle, bir tür doyum işlevi uygulanarak işaret işlevinin kullanımından kaçınılmıştır. Önceki ilgili çalışmalardan yenilikçi bir şekilde ayrılarak, takip hatasının yarıçapı bir denetim parametresi aracılığıyla ayarlanabilen orijin merkezli bir küreye yakınsamasını sağlayan yeni bir kararlılık analizi oluşturulmuştur. Denetleyici kazançlarının ayarlanmasını kolaylaştıracak uyarlamalı bir kazanç ayarlama kuralı da tasarlanmıştır. Tasarlanan denetim yönteminin başarımını göstermek için, üç adet motor ile sürülen üç adet tüm yönlü tekerlek aracılığıyla bir top üzerinde dengede duran bir mobil robottan (top-robot) elde edilen deney sonuçları da sunulmuştur.

Tam eyleyicili ikinci derece EL sistemlerin takip denetimi üzerine yapılan geçmiş çalışmalarla karşılaştırıldığında, benzer bir kararlılık sonucuna ulaşmak için doyum işlevi tabanlı yeni bir sürekli gürbüz denetleyici tasarlanmıştır. Bilimsel yazında, doyum işlevi tabanlı terimler genellikle işaret işlevinin yerini almak için kullanılırken, yazarın en iyi bilgisine göre, kararlılık analizi tasarlanan çalışmanın bir yeniliğidir. Uyarlamalı kazanç ayarlama stratejisi,

tasarlanan denetleyicinin diğerk bir yenilikçi bileşenini oluşturmaktadır. Kazanç ayarlama stratejisi, denetleyicinin ayrılmaz bir parçası olarak ya da kazançları ayarladıktan sonra kapatılabilen veya ihtiyaç olması durumunda yeniden açılabilen bir eklenti olarak da kullanılabilir. Tasarlanan denetleyicinin, ağırlık merkezinin konumu değiştiğinde dinamikleri büyük ölçüde değişen kararsız bir mobil robot olan top-robot üzerinde deneysel olarak doğrulanması da gerçekleştirilerek, mekanik sistemlerin denetiminde kullanılabilceği de gösterilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan doyum işlevi tabanlı öz-ayarlamalı yenilikçi gürbüz denetleyicinin öne çıkan yönleri özetlenecek olursa;

- EL sistemleri için kolay uygulanabilir yenilikçi bir gürbüz denetleyicinin tasarımı ve kararlılık analizi sunulmuştur.
- Geleneksel yöntemlerin aksine, tasarlanan yaklaşımın uygulanması için sistem dinamikleri hakkında ön bilgi gerekmemektedir. Bu da tasarlanan denetleyiciyi son derece kullanışlı hale getirmektedir.
- Tasarlanan denetleyicinin kazançları uyarlamalı bir güncelleme algoritmasına göre ayarlanmaktadır. Böylelikle zahmetli kazanç ayarlama süreci ortadan kalkmaktadır.
- Tasarlanan denetleyici, top-robot'un denge denetiminde uygulanarak, gerçek sistemlerin denetiminde kullanıma uygun olduğu gösterilmiştir.

Mekatronik sistemlerin denetiminde kullanılan çoğu denetleyici, pozisyon ölçümlerine ek olarak genellikle hız bilgisine de ihtiyaç duymaktadır. Ancak çoğu zaman bütçe kısıtları nedeniyle, sistemler hız sensörleriyle donatılmamaktadır. Dolayısıyla hız bilgisinin elde edilmesi için alternatif bir yöntem kullanılması gerekmektedir.

Süzgeçleme benzeri yöntemler (Su et al., 2006), (Emami and Taban, 2018), (Belanger, 1992), (Chang and Perng, 1996) ve gürbüz türevleyiciler (Levant and Livne, 2020), (Jaafar and Saab, 2020) içeren az sayıdaki çalışma dışında, ilgili geçmiş araştırmaların çoğu hız gözlemcileri tasarlamaya yöneliktir. Gözlemci tabanlı yaklaşımlar, uygulama için gereken model bilgisi mik-

tarına bağı olarak sınıflandırılabilir. (Astolfi et al., 2010) çalışmasında daldırma ve değişmezlik tipi bir hız gözlemcisi tasarlanırken, (Aranovski et al., 2019) çalışmasında Luenberger tipi bir gözlemci önerilmiştir. Bu gözlemci yapılarının her ikisi de sistem dinamikleri hakkında tam ve eksiksiz bilgi gerektirmektedir. (Nicosia and Tomei, 1990) çalışmasında robotik kollar için gözlemci tabanlı tümleşik bir çıkış geri besleme denetleyicisi önerilmiştir. Bu çalışmadaki gözlemci yapısı bağımsız bir gözlemci olarak da kullanılabilir, ancak sistem dinamikleri hakkında kesin bilgi gerektirmektedir. Espindola ve Tang, uzay araçları için eylemsizlik matrisinin bilindiği kabul edilen büzülme analizine dayalı bir açılma hız gözlemcisi tasarlamıştır (Espindola and Tang, 2022). (Gutierrez-Giles and Arteaga-Perez, 2014) çalışmasında, kesin dinamik model bilgisine dayanan genelleştirilmiş oransal integral yöntemine dayalı bir hız gözlemcisi tasarlanmıştır. (Romero et al., 2021) çalışmasında, uyarlamalı bir gözlemci tasarlanmış olup bu nedenle kısmi model bilgisine ihtiyaç duyulmuştur. (Kim et al., 1997), (Kim and Lewis, 1999) ve (Dierks and Jagannathan, 2009) çalışmalarında sinir ağı tabanlı ve (Kim, 2004) çalışmasında uyarlamalı bulanık mantık tabanlı gözlemciler tasarlanmıştır, ancak hepsi dinamik model terimlerinin bazılarının kesin bilgisine ihtiyaç duymaktadır.

Diğer yandan, model bilgisine ihtiyaç duymayan çeşitli gürbüz gözlemci yapıları vardır. Ancak bunların neredeyse tamamı uygulama için modelleme belirsizliklerinin üst sınır bilgisini gerektirmektedir. Bu gürbüz gözlemcilerden bazıları tasarımlarında işaret benzeri işlevlerin gürbüzlük özelliklerinden yararlanmaktadır. (Davila et al., 2005) çalışmasında sonlu zaman yakınsamasının sağlandığı bir kayan kipli gözlemci yapısı önerilmiş ve benzer sonuçlar (Apaza-Perez et al., 2019) çalışmasında da elde edilmiştir. (Cruz-Zavala et al., 2010) çalışmasında yine kayan kipli türünde bir gözlemci ile sabit zamanlı yakınsama garanti edilmiştir. (Xian et al., 2004b) çalışmasında işaret işlevini kullanan süresiz bir gözlemci yapısı önerilmiştir. (Xian et al., 2004b) çalışmasındaki gözlemcinin gürültü ve modelleme belirsizliklerine karşı geliştirilmiş gürbüzlüğe sahip bir uzantısı (Su, 2016) çalışmasında önerilmiştir. (Dinh et al., 2011) ve (Dinh et al., 2014) çalışmalarında, (Xian et al., 2004b) gözlemcisi modelleme

belirsizliklerinin telafisi için bir sinir ağı bileşeni ile birleştirilmiştir. (Bidikli et al., 2016) çalışmasında, (Xian et al., 2004b) çalışmasının gözlemci yapısı, öz-ayarlanma özelliğine sahip zamanla değişen kazançları içerecek şekilde yeniden tasarlanmıştır. Modelleme belirsizliklerine karşı gürbüz olmasına rağmen, yukarıda bahsedilen kayan kipli türündeki gözlemcilerin tasarımında kullanılan işaret işlevi (veya çeşitleri) süresiz olmalarına neden olur ve bu da bir denetleyici tasarımının parçası olarak kullanıldıklarında çatırdamaya neden olabilmektedir.

Öte yandan, tasarımlarında işaret işlevini veya çeşitlerini kullanmayan bazı gürbüz gözlemciler de vardır. (Khalil, 2017) çalışmasındaki yüksek kazançlı gözlemci, uygulama için herhangi bir sistem dinamiği bilgisi gerektirmez, ancak daha yüksek gözlemci kazançları ve denetim tasarımının bir parçası olarak kullanıldığında, zirve fenomeni olasılığını önlemek için gözlemlenmiş işaretlerin doyuma ulaştırılması gerekmektedir. (Bayrak et al., 2015) ve (Deniz et al., 2018) çalışmalarında, gözlemci tasarımının bir parçası olarak hiperbolik tanjant işlevinden yararlanılmış ve aynı zamanda gözlemci kazançlarını ayarlamak için öz-ayarlanma mekanizması önerilmiştir. Ancak, hiperbolik tanjant işlevinin değerini hesaplamak için üstel işlevin sayısal hesaplamalarına duyulan ihtiyacın, sınırlı hesaplama gücüne sahip sistemlerde uygulanması sırasında sorunlu olabilecektir.

Bu tez çalışması kapsamında, genel bir doğrusal olmayan mekatronik sistem sınıfı için hız kestirimine yönelik, doyum işlevi tabanlı yenilikçi öz-ayarlanmalı gürbüz bir hız gözlemcisi tasarlanmıştır. Çatırdama olgusundan kaçınmak amacıyla, işaret işlevine dayanan bir gözlemci tasarımı tercih edilmemiştir. Üstel işlevi hesaplamaları gerektirdiği için hiperbolik tanjant işlevinin kullanılmasından da kaçınılmıştır. İlgili mevcut araştırmalardan farklı olarak, belirsizlik telafisi için gözlemci tasarımının bir parçası olarak doyum işlevi kullanılmıştır. Kazanç ayarlama sürecini kolaylaştırmak için, gözlemci kazançları yenilikçi uyarlanmalı güncelleme kuralları ile ayarlanmaktadır. Ayrıca bu kurallar, eklenti olarak kullanılmak yerine kararlılık analizine dahil edilmiştir (Krstic et al., 1995).

Tasarlanan doyum işlevi tabanlı öz-ayarlamalı yenilikçi gürbüz hız gözlemcisinin öne çıkan yönleri özetlenecek olursa;

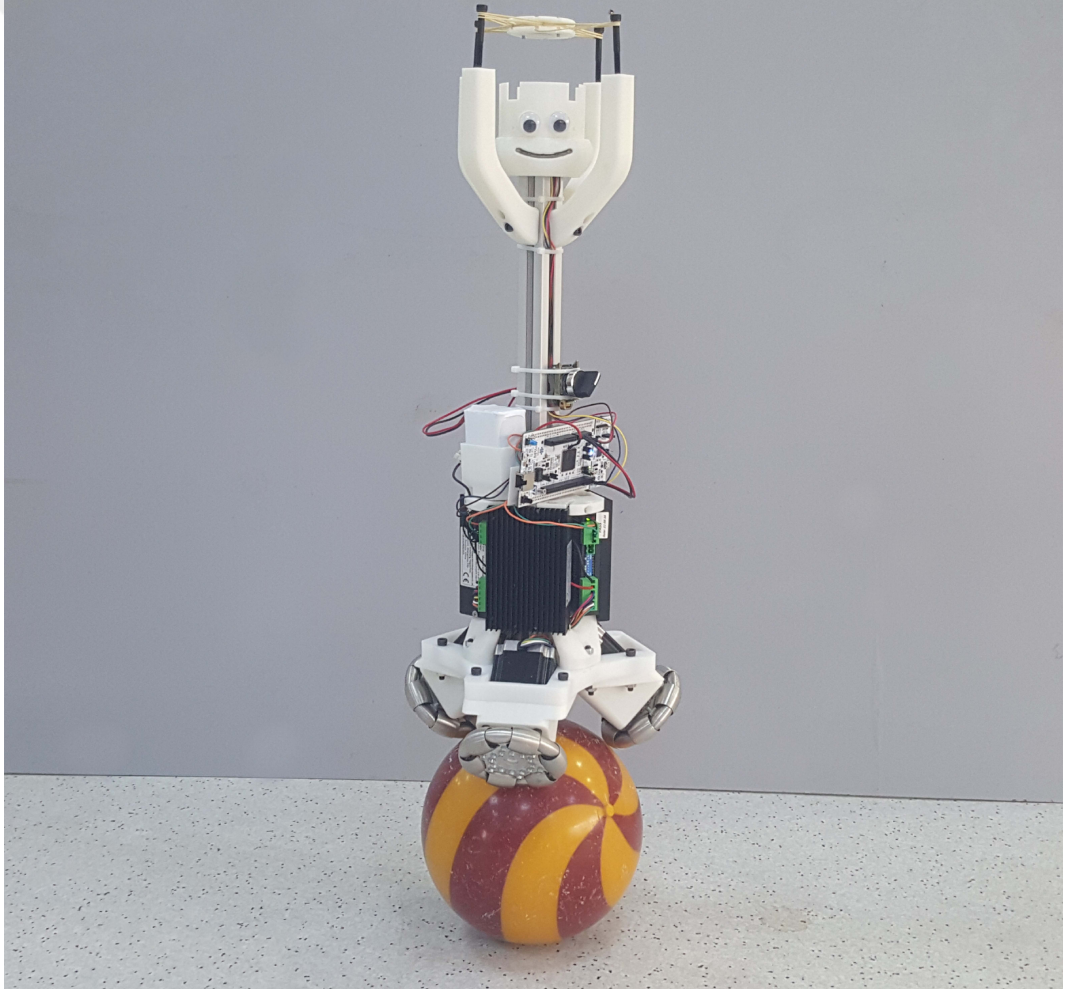
- Bu çalışma ile, doğrusal olmayan mekatronik sistemler sınıfı için yeni bir hız gözlemcisinin tasarımı ve ilgili kararlılık analizi sunulmuştur.
- Tasarlanan hız gözlemcisi, sistem dinamikleri hakkında önceden bilgi sahibi olmayı gerektirmemektedir.
- Tasarlanan hız gözlemcisinin kazançları, yorucu kazanç ayarlama sürecini ortadan kaldıran uyarlamalı bir güncelleme algoritmasına göre ayarlanmaktadır.
- Tasarlanan hız gözlemcisi, benzetim ve deneysel çalışmalarla test edilmiştir. Hız gözlemcisinin top-robot, dönel ters sarkaç ve robot kol düzeneklerinde kullanılması ile önerilen yöntemin başarımları sunulmuştur.

Tez çalışmasının bundan sonraki kısımları şu şekilde düzenlenmiştir: Tasarlanan denetleyici ve hız gözlemcisinin başarımlarını test etmek için kullanılan sistemlerle ilgili bilgiler Bölüm 2 ile verilmiştir. Hız gözlemcisinin tasarımı, kararlılık analizi, benzetim ve deneysel çalışma sonuçları Bölüm 3 ile sunulmuştur. Önerilen denetleyici ile alakalı tasarım, kararlılık analizi, benzetim ve deneysel çalışma sonuçları Bölüm 4 ile sunulmuştur. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ve çıkarımlar, Bölüm 5 ile özetlenmiştir. Bölüm 6 ile gelecekte yapılabilecek olası devam çalışmaları önerilmiştir.

Tezin farklı bölümlerinde, genel gösterimlere uygunluk için, bazı aynı gösterime sahip semboller farklı nicelikleri göstermek için kullanılmıştır.

2 DENEYSSEL DÜZENEKLER

Tez çalışması kapsamında tasarlanan yenilikçi hız gözlemcisi ve denetleyici tasarımları, hem benzetim çalışmaları ile hem de deneysel çalışmalar ile test edilmiş ve başarımları tezin takip eden bölümlerinde gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan düzenekler şunlardır: Top-robot, dönel ters sarkaç ve düzlemsel robot kolu. Şekil 2.1 ile gösterilen top-robot, 121E296 numaralı TÜBİTAK-1005 projesi kapsamında üretilmiştir. Düzlemsel robot kol ise, 121E383 numaralı TÜBİTAK-1001 projesi kapsamında üretilmiştir. Deneysel çalışmalar daha çok top-robot eksenli ilerlediği için, top-robot ile ilgili detaylı bir tanıtım yapılacaktır. Ancak diğer düzeneklerle ilgili detaylı açıklamalardan kaçınılacak, kısa ve öz bilgiler verilecektir.



Şekil 2.1: Top-robot

2.1 Top-Robot

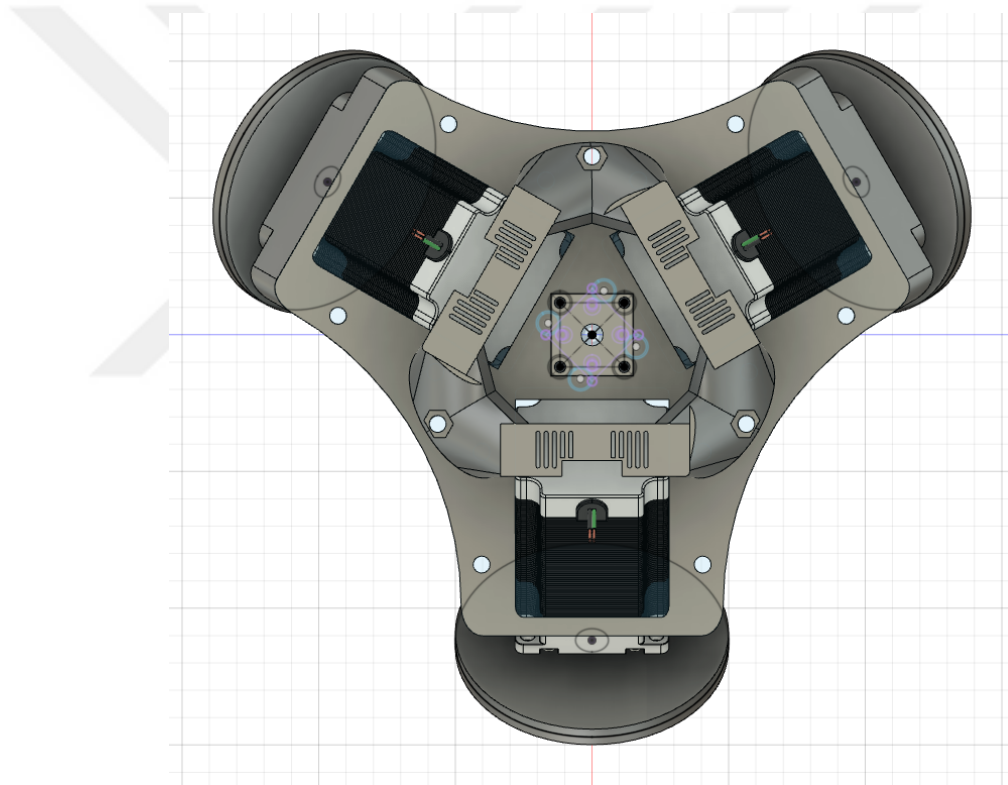
Bir tür mobil robot olan top-robotları klasik mobil robotlardan ayıran en önemli farkları yer ile temasının çok dar olmasıdır. Teorik olarak zemine tek bir noktadan temas etmektedirler ve yine teorik olarak ip gibi bir çizgi üzerinde hareket edebilirler. Bu sayede dar alanlardan geçebilir ve yüksek manevra kabiliyeti gösterebilirler. Fakat aynı zamanda bu durum robotun bir top üzerinde dengede durmasını gerektiren zorlu bir denetim problemini de beraberinde getirmektedir. Top-robot, 120° aralıklarla yerleştirilmiş üç adet tüm yönlü tekerlek kullanılarak top veya benzeri bir küresel nesne üzerinde ancak uygun bir denetleyici yardımıyla dengede durabilmektedir.

Bu bölümde, top-robotun özellikleri sunulmaktadır. Elektromekanik bir düzenek olan top-robot; mekanik tasarım, elektronik bileşenler ve donanım yazılımı alt başlıkları altında açıklanmaktadır.

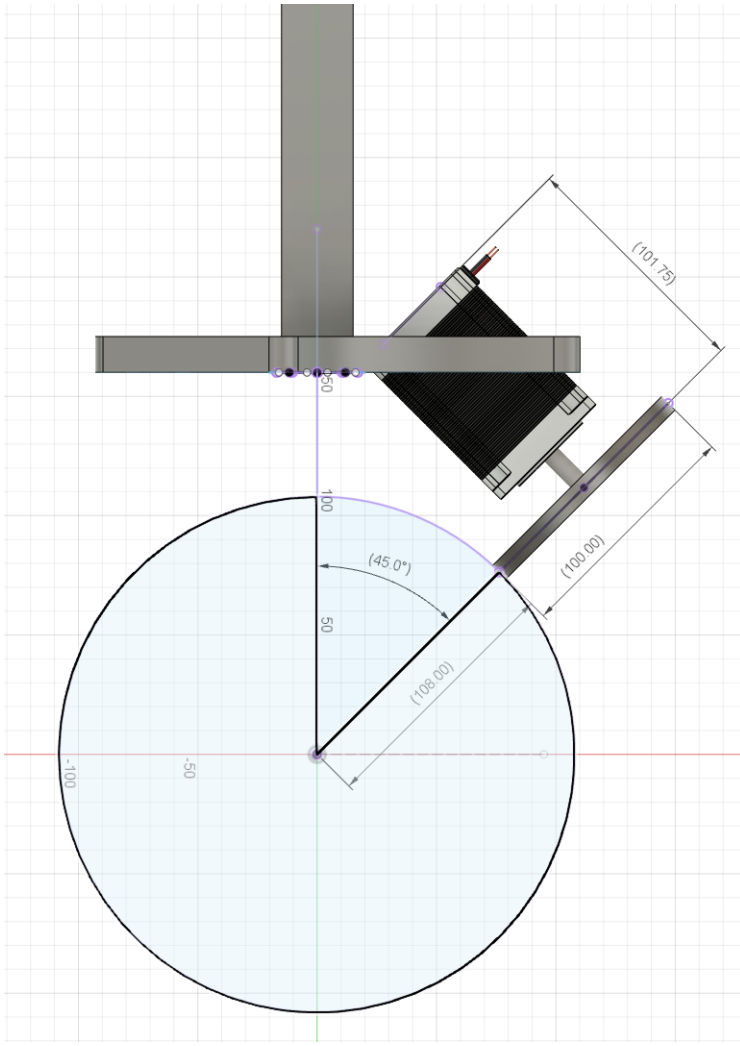
2.1.1 Mekanik tasarım

Top-robotun dengede durabilmesi için, robotun ağırlık merkezinin topun merkezinden geçen düşey eksen üzerinde olması gerekmektedir. Teorik olarak mutlak düşey simetrisinin sağlanması ve herhangi bir dış etkinin olmaması durumunda, robotun dengede durması beklenir. Ne yazık ki ideal şartlar altında değerlendirilen bu durum gerçekçi değildir. Dolayısıyla robot, olabildiğince düşey simetriyi sağlayacak şekilde tasarlanırsa da robotun dengede durması ancak asimetrik yük dağılımı ve dış etkilerin aktif bir denetleyici yardımıyla kompanse edilmesiyle dengede durması sağlanacaktır. Düşey simetri amacıyla top-robotun üç eyleyicisi 120° açı ile Şekil 2.2 ile sunulan yapıda konumlandırılmaktadır. Top-robotun, klasik mobil robotlara göre en önemli tasarım farklılığı, hareket ettiği iki boyutlu yer düzlemi ile doğrudan etkileşim halinde bulunmamasıdır. Top-robot, düzlem olmayan iki boyutlu küre yüzeyi ile temas halinde, küre yüzeyi de zemin ile noktasal temas halindedir. Bu sayede klasik mobil robotların aksine, top-robot zemin ile sadece bir noktada temas halinde kalabilmektedir. Öte yandan robot ile top arasındaki temas yüzeyinin tekerlek ile dik pozisyonlanabilmesi önemli bir tasarım kriteridir.

Tekerlek ile top yüzeyinin dik olabilmesi için top ve tekerlek çapına bağlı azimut açısı uygulanmalıdır. Azimut açısı, top, tekerlek, robotun toptan yüksekliğine bağlı olarak belirlenebileceği gibi tasarım parametresi olarak seçilerek diğer parametrelerin ona göre hesaplanması ise diğer bir seçenektir. Düşük azimut açısı motorların çok yakın olmasını gerektirmekte ve fiziksel olarak uygulanabilirliği imkansız kılmaktadır. Öte yandan büyük azimut açısı da çok büyük bir küresel yüzey kullanılmasına ihtiyaç duymaktadır. Bilimsel yazın incelendiği zaman hem fiziksel gereksinimlere uygunluğu hem de matematiksel avantajından dolayı top-robot azimut açısının 45° seçildiği görülmüştür. Sabit parametreler (top ve tekerlek çapı) ile ön tanımlı kabul edilen azimut açısına bağlı olarak robot tasarımı Şekil 2.3 ile gösterilmektedir.



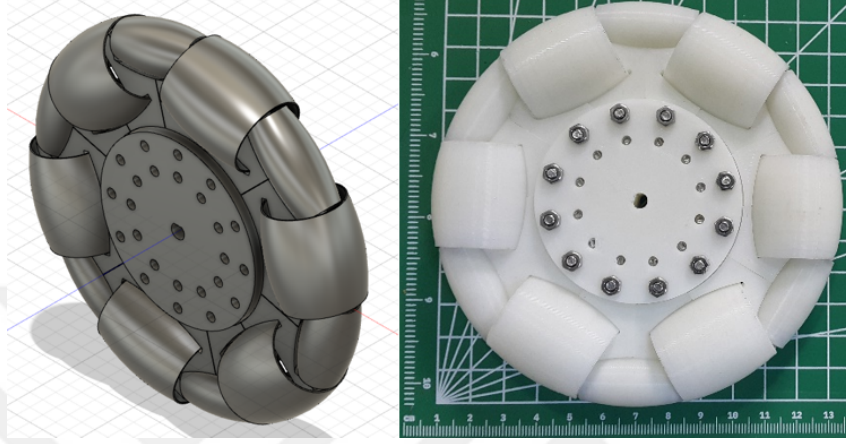
Şekil 2.2: Top-robot düşey görünüm



Şekil 2.3: Top-robot yanıl kesit çizimi

Robotun küresel yüzey üzerinde her yönde hareket edebilmesi için holonomik sürüşün sağlanması gerekmektedir. Dolayısıyla mekanum veya tüm yönlü tekerlek tercih edilmelidir. Bu robot özelinde 120° ile yerleştirilen üç tekerleğin her yöne hareket edebilmesi için tüm yönlü tekerlek kullanılması uygun olmaktadır. Tüm yönlü tekerlek, büyük bir tekerlek üzerine, serbest dönebilen küçük tekerleklerin eklendiği bir tekerlektir. Parçalı tekerleklerin zemin üzerinde teması sırasında doğası gereği süreksizlikler meydana gelmektedir. Bu süreksizlik durumu iki veya daha fazla sayıda tüm yönlü tekerleğin tek dönüş eksenini üzerinde birlikte kullanılmasıyla çözülebilmektedir. Bu durumda ise, temas yüzeyi iki paralel kesikli çizgi şeklinde görülmektedir. Top-robot özelinde, tekerlek ile topun paralel iki çizgi olması, top üzerinde

iki farklı yarıçapa sahip temas yüzeyi halkaları oluşmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla hedeflenen hareket istenildiği gibi sağlanamayacaktır. Alternatif olarak, üzerindeki serbest tekerleklerin boyut farkı sayesinde birbirinin içinde dönebildiği yenilikçi tasarıma sahip tüm yönlü tekerlek kullanılmıştır. Tek çizgi temaslı yenilikçi tüm yönlü tekerlek tasarımı (Moreno et al., 2016) Şekil 2.4 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Tek çizgi temaslı tüm yönlü tekerlek

Şekil 2.1 ile gösterilen top-robot tasarımı, üç boyutlu modelleme programları ile çizilerek üç boyutlu yazıcı ve CNC yardımıyla üretilmiştir. Küresel yüzey olarak, hem pürüzsüz yüzey hem de düşük kayma özelliklerinden dolayı bowling topu tercih edilmiştir. Fakat ataletin çok büyük olmasından dolayı robotun hızlı bir şekilde ivmelenmesini engellemektedir.

2.1.2 Elektronik bileşenler

Robotun iskeletinin ardından, eyleyicilerin ve sensörlerin konumlandırılması ve sürücü seviyesinde kontrol edilmeleri gerekmektedir.

Eyleyiciler

Robot üzerinde ihtiyaç duyulan hareket adım motorları ile sağlanmaktadır. Adım motorları, hassas pozisyon denetimi uygulamalarında sıklıkla tercih edilen elektrik motorlarıdır. Fakat yüksek hız talep edildiğinde sağlayabileceği tork büyük oranda düşmektedir. Top-robotun denge problemi dikkate

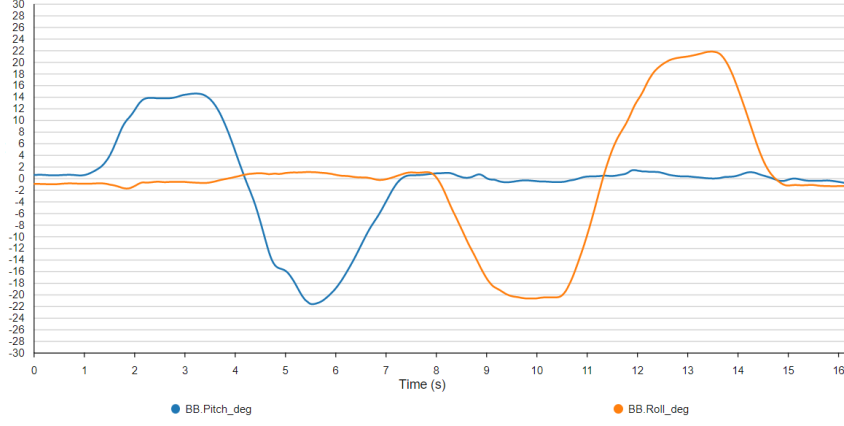
alındığında, dengede veya yakın durumlarda çalışması halinde tekerleklerin düşük hızda hassas pozisyon denetimi sağlaması gerekmektedir. Dolayısıyla adım motoru bu ihtiyaçları karşılayabilmektedir. Fakat, robotun belirli bir yönde ivmelenmesini gerektiren uygulamalarda motorların sağlayabileceği tork yetersiz kalabilmektedir.

Mekanik yapının fiziksel bilgilerine göre yapılan benzetim çalışmalarına dayalı olarak 57BHH82-300E-21BE adım motorların yeterli torku sağlayabileceği ön görülmüş ve robot için tercih edilmiştir. CWD556 adım motor sürücüsü olarak kullanılmıştır. Sürücü ayarları, bir turu 6400 adımda tamamlayacak şekilde uygulanmıştır. Bu sayede pozisyon hassasiyeti 0.05625° olmaktadır.

Sensörler

Robotun durumuna dair ölçüm IMU sensöründen elde edilmektedir. IMU sensörü olarak BMX160 tercih edilmiş ve ölçüm verileri I2C protokolü ile okunmaktadır. IMU sensörü açısal ivme ölçümü, çizgisel ivme ölçümü ve manyetik sensörden oluşmaktadır. Robotun Euler açı bilgisi sadece bir ölçüm türüne bağlı olmayıp üç farklı türdeki verinin birleşiminden elde edilmektedir. Tamamlayıcı süzgeç (Euston et al., 2008) ve genişletilmiş Kalman süzgeci (EKF) (Yuan et al., 2019) çoklu sensör verisinin tümleştirilmesine dayalı olarak yönelim ve pozisyon bulunmasını sağlayan yöntemlerdendir. Bu çalışmada robotun Euler açıları EKF temelli sensör tümleştirme yöntemi ile elde edilmektedir. EKF işlemi iki aşamada ele alınmaktadır. İlk aşama tahmin aşaması olup, bir önceki durum temel alınarak gelecekteki durum tahmin edilmektedir. İkinci aşama ise güncelleme aşaması olup, gerçek ölçümler alındığında, tahmin aşamasında elde edilen tahmin durumu ile ölçümler arasındaki fark hesaplanmaktadır. Bu fark, tahmin hatasının ve sensör ölçüm hatasının kovaryansları kullanılarak tahmin, gerçek ölçümlere daha yakın hale getirilmektedir. Sensör tümleştirme temelli Euler açı sonuçları için bir örnek Şekil 2.5 ile gösterilmektedir. Örnek ölçümde robotun dengesi için takip edilecek olan yalpa ve yunuslama açıları sırasıyla hem pozitif hem de negatif

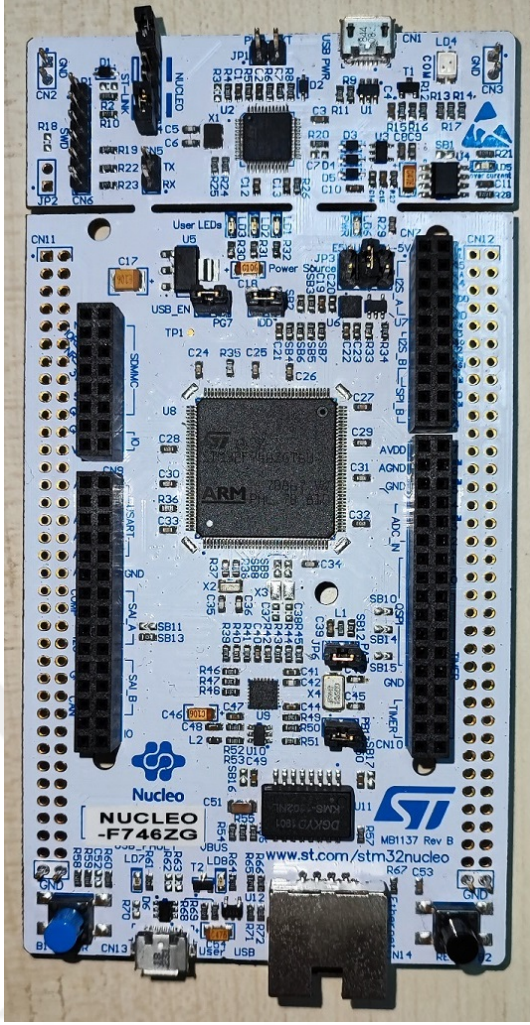
yönde eğilmiş ve değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Örnek bir sensör tümleştirme sonucu

2.1.3 Donanım yazılımı

Sensör ve eyleyicinin istenildiği gibi çalışabilmesi için gömülü sistem donanımının işlemleri zamanında ve eksiksiz gerçekleştirebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 2.6 ile gösterilen NUCLEO-F746ZG gömülü sistem kartı kullanılmıştır.

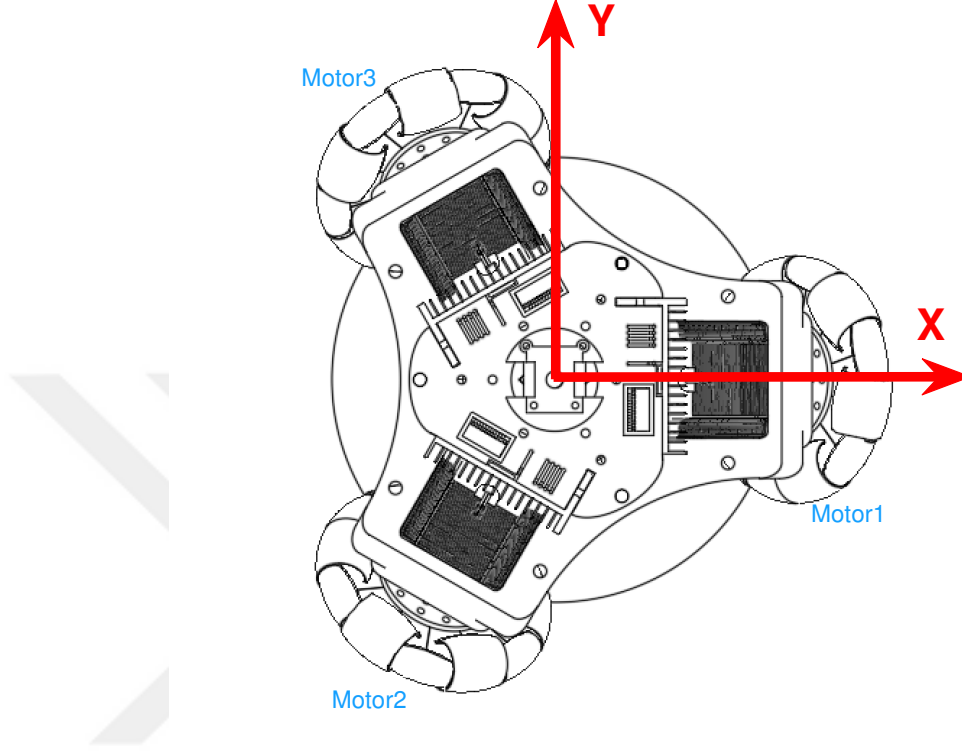


Şekil 2.6: NUCLEO-F746ZG Gömülü sistem kartı

Tez kapsamında geliştirilen denetleyici ve gözlemci yöntemlerinin de uygulanmasına altyapı oluşturmak için sürücü seviyesinde donanım yazılımı hazırlanmıştır. Sensör tümleştirme işlemi ve denetleyici algoritması 1 kHz frekansında çalışmaktadır. Fakat, adım motorların sürülmesi atım tetiklemeli olduğu için motorun döndürülmesi istenilen hıza göre uygulanacak frekans değişikliği göstermektedir. Her bir motorun atımları işlemci içerisindeki bağımsız zamanlayıcılar ile birbirinden bağımsız gerçekleşmektedir. Motorun sürülmesi istenilen dönüş hızına göre uygulanması gereken kare dalga frekansı hesaplanmakta ve bu frekansı sağlayacak zamanlayıcı ayarları yapılmaktadır. Her bir zamanlayıcı bir atımlık kare dalgayı oluşturduktan sonra yeni hedef frekans için gerekli işlemler tekrarlanmaktadır. Bu sayede zamanlayıcı ayarı otomatik

olarak sağlanmakta ve motor için hedef dönüş hızı sağlanabilmektedir.

Top-robotun hareketleri x,y ve z eksenlerine göre Şekil 2.7 ile gösterildiği gibi uygulanmaktadır. Motor hızları ile robotun eksenleri arasında kinematik dönüşüm uygulanması gerekmektedir.



Şekil 2.7: Top-Robot'un sanal eksenlere göre yerleşimi

Eğilme açısı, zenit açısı (ϕ_z) olarak da isimlendirilebilmektedir. Buna göre her bir tekerleğin top ile temas ettiği noktanın konumu, yarı çapı R olan topun merkezine göre \mathbf{p}_i vektörü ile $i = 1, 2, 3$ olmak üzere aşağıdaki yapıda gösterilmektedir

$$\mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} R \sin(\phi_z) \\ 0 \\ R \cos(\phi_z) \end{bmatrix}, \mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}R \sin(\phi_z) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}R \sin(\phi_z) \\ R \cos(\phi_z) \end{bmatrix}, \mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}R \sin(\phi_z) \\ \frac{\sqrt{3}}{2}R \sin(\phi_z) \\ R \cos(\phi_z) \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Her bir tekerleğin konumlandırıldığı pozisyona göre dönüş yönü birim vektör \mathbf{s}_i vektörü ile aşağıdaki yapıda yazılabilir

$$\mathbf{s}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{s}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{s}_3 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Topun x, y ve z eksenlerinde sırasıyla ω_x, ω_y ve ω_z açısal hızlarında döndüğü varsayılırsa üç farklı hız vektörü tanımlanabilir; $\boldsymbol{\omega}_x = [\omega_x, 0, 0]^T$, $\boldsymbol{\omega}_y = [0, \omega_y, 0]^T$ ve $\boldsymbol{\omega}_z = [0, 0, \omega_z]^T$. Topun sadece x ekseninde ω_x hızında döndüğü varsayılırsa, her bir tekerleğin x yönündeki hız vektörü \mathbf{v}_{ix} , tekerleğin dönüş yönü birim vektörüyle çarpılarak, dönüş hızı olan v_{ix} hesaplanabilir

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{1x} &= \boldsymbol{\omega}_x \times \mathbf{p}_1 \\ v_{1x} &= \mathbf{v}_{1x} \cdot \mathbf{s}_1 \\ &= R \cos(\phi_z) \omega_x \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{2x} &= \boldsymbol{\omega}_x \times \mathbf{p}_2 \\ v_{2x} &= \mathbf{v}_{2x} \cdot \mathbf{s}_2 \\ &= -\frac{1}{2} R \cos(\phi_z) \omega_x \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{3x} &= \boldsymbol{\omega}_x \times \mathbf{p}_3 \\ v_{3x} &= \mathbf{v}_{3x} \cdot \mathbf{s}_3 \\ &= -\frac{1}{2} R \cos(\phi_z) \omega_x. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dolayısıyla her bir tekerleğin x yönündeki dönüş hızı,

$$\begin{bmatrix} v_{1x} \\ v_{2x} \\ v_{3x} \end{bmatrix} = R \cos(\phi_z) \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \omega_x \quad (2.6)$$

olarak yazılabilir. Benzer yaklaşımla topun sadece y ekseninde $\boldsymbol{\omega}_y = (0, \omega_y, 0)$ açısal hızında döndüğü varsayıldığında,

$$\mathbf{v}_{iy} = (\boldsymbol{\omega}_y \times \mathbf{p}_i) \cdot \mathbf{s}_i \quad (2.7)$$

olmak üzere,

$$\begin{bmatrix} v_{1y} \\ v_{2y} \\ v_{3y} \end{bmatrix} = R \cos(\phi_z) \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \omega_y \quad (2.8)$$

ve sadece z ekseninde $\boldsymbol{\omega}_z = (0, 0, \omega_z)$ açışal hızında döndüğü varsayıldığında,

$$\mathbf{v}_{iz} = (\boldsymbol{\omega}_z \times \mathbf{p}_i) \cdot \mathbf{s}_i \quad (2.9)$$

olmak üzere,

$$\begin{bmatrix} v_{1z} \\ v_{2z} \\ v_{3z} \end{bmatrix} = R \sin(\phi_z) \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \omega_z \quad (2.10)$$

şeklinde tekerlek hızları hesaplanabilmektedir.

Topun üç farklı dönüşü tek bir matris altında birleştirilerek robotun koordinat sistemindeki hızları ile tekerleklerin dönüş hızları arasında matematiksel bir ilinti kurulabilmektedir. Daha önce detaylandırıldığı üzere tasarım kısıtı olarak zenit açısı $\phi_z = 45^\circ$ seçilmiştir. Dolayısıyla aşağıdaki ilinti elde edilir

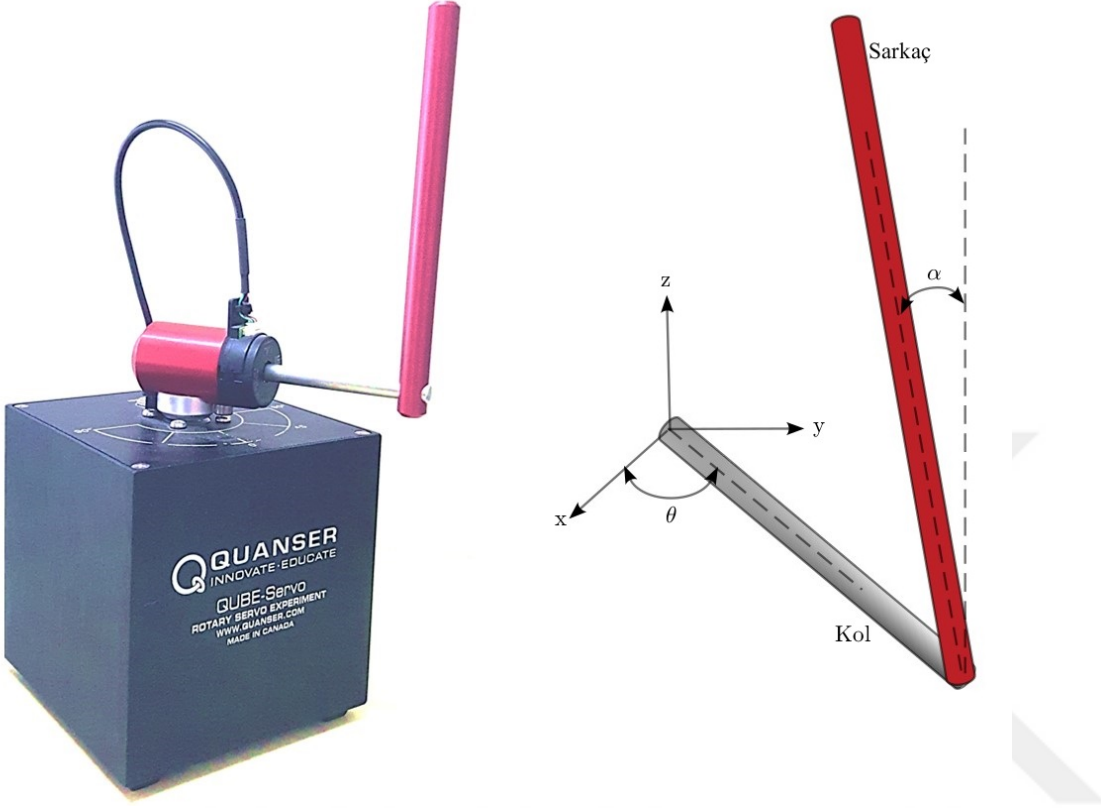
$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} R \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Denetleyici girişi olarak $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ uygulanacaktır. Denklem (2.11) kullanılarak her bir motorun dönüş hızı hesaplanacak ve robota uygulanacaktır.

2.2 Dönel Ters Sarkaç

Quanser firmasının ürettiği dönel ters sarkaç düzeneği Şekil 2.8 ile gösterilmiştir. Ticari bir ürün olması ve bilimsel yazında sıklıkla kullanılıyor olması

gibi nedenlerden dolayı bu bölümde sadece gerekli bazı temel bilgiler kısaca verilecektir. Deneysel düzenekle ilgili ayrıntılar firma tarafından sağlanan kılavuzlardan incelenebilir (Quanser, 2014).



Şekil 2.8: Dönel ters sarkaç ve şematik gösterimi

Dönel ters sarkaçta, θ dönel kolün açısı olup, α ise sarkacın açısını temsil etmektedir. Bu değişkenler 2 adet artımlı enkoder ile ölçülmektedir. Düzenegin durum değişkenleri $x = [\theta, \alpha, \dot{\theta}, \dot{\alpha}]^T$ olacak şekilde seçilmiştir. Açısal hızlar olan $\dot{\theta}$ ve $\dot{\alpha}$ ölçülmemektedir. Sayısal veya süzgeçlenmiş türev alıcı ile ayrıca hesaplanmaları gerekmektedir. Eyleyici olarak da bir adet fırçalı DC motor mevcuttur. Enkoderden gelen açı bilgilerini almak ve denetleyici girişini eyleyiciye uygulamak için, düzenek içerisinde dahili olarak yer alan veri toplama kartı kullanılmaktadır. Bu deneysel düzenek için belirlenmiş bazı kurallar vardır:

- $\alpha = 0$ ise bu sarkacın tamamen dik olduğu anlamına gelmektedir.

Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

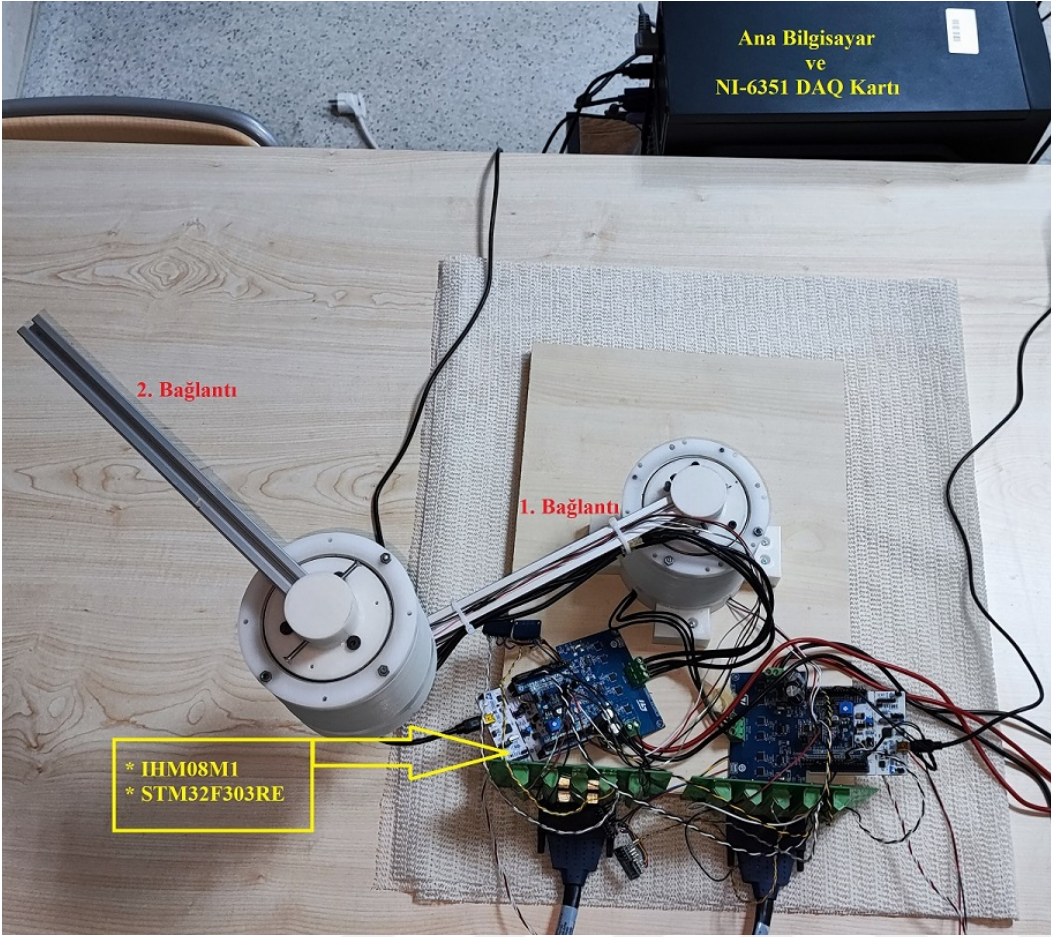
$$\alpha = \alpha_{full} \bmod(2\pi) - \pi \quad (2.12)$$

burada α_{full} enkoder tarafından ölçülen sarkaç açısıdır.

- θ ve α , saat yönünün tersine döndürüldüğünde artı işaretli olarak tanımlanmıştır.
- Motora artı işaretli bir voltaj uygulandığında, dönel kol artı yönde hareket etmektedir.

2.3 Düzlemsel Robot Kolu

Tasarlanan hız gözlemcisinin başarımını göstermek için düzlemsel robot kolu kullanılmış ve deneysel çalışma sonuçları tezin takip eden bölümünde sunulmuştur. 2 serbestlik derecesine sahip olan bu robot kolu Şekil 2.9 ile gösterilmiştir. Robot kolunun eklemlerinin hareketi için BLDC (Brushless Direct Current - Fırçasız Doğru Akım) motorları kullanılmıştır. BLDC motorları denetim uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu robot kolundaki motorun dönme hareketi, 8 : 1 redüksiyon oranına sahip bir dişli kutusu aracılığıyla robot eklemine iletilmiştir. Her iki eklem için açısal hareketinin ölçümü için yüksek çözünürlüklü manyetik enkoderler (AS5047) kullanılmıştır. BLDC motorları sürmek amacıyla her bir motor için yerel sürücüler (STM32f303RE ve IHM-08M1) kullanılmıştır. Ayrıca, denetleyici algoritmasının çalıştırıldığı ana bilgisayarda NI-6351 adlı bir veri toplama kartı bulunmaktadır. Denetleyici algoritması, ana bilgisayar ve yerel sürücüler arasındaki iletişim 1 kHz frekansında çalıştırılmıştır. Yerel sürücüler ise 16 kHz frekansında çalışmaktadır. Robot kolunun eklem açıları $q(t) = [q_1(t), q_2(t)]^T \in \mathbb{R}^2$ ile ifade edilmektedir. Bağ uzunlukları ise $l_1 = l_2 = 21 \text{ cm}$ 'dir. $x(t), y(t) \in \mathbb{R}$ ise robotun uç noktasının düzlemdeki pozisyonunu ifade etmektedir.



Şekil 2.9: Düzlemsel robot kolu

Bu bölümde deneysel testlerin gerçekleştirildiği düzenekler tanımlanmıştır.

3 HIZ GÖZLEMCİSİ TASARIMI

Bu bölümde, model belirsizlikleri içeren mekatronik sistemler için kullanılacak yenilikçi bir gürbüz uyarlamalı hız gözlemcisi tasarımı sunulmuştur. Tasarımda, çatırdama gibi olumsuz etkisinden dolayı işaret işlevi, üstel işlev hesaplamalarından kaçınmak için de tanh işlevi kullanımından kaçınılmıştır. Bilimsel yazındaki diğer gözlemci tasarımlarından farklı olarak, doyum işlevi kullanılmıştır. Bilimsel yazındaki benzer gözlemci tasarımlarına göre en önemli avantajlarından birisi ise gözlemci kazançlarının güncellenmesi için öz-ayarlı algoritmasının da sunulmuş olmasıdır. Tasarlanan hız gözlemcisinin kararlılığı, Lyapunov tabanlı yaklaşımlarla hassas bir şekilde analiz edilmiş ve hız gözlem hata işaretinin orijinin küçük bir komşuluğuna yakınsadığı matematiksel olarak ispatlanmıştır. Tasarlanan hız gözlemcisinin başarımı, detayları Bölüm 2 ile verilen top-robot, dönel ters sarkaç ve düzlemsel robot kolu sistemleri kullanılarak gösterilmiştir. Bu sistemlere yönelik elde edilen benzetim ve deneysel çalışma sonuçları ayrı başlıklar halinde sunulmuştur.

3.1 Sistem Modeli ve Özellikleri

Bu kısımda n serbestlik dereceli bir mekatronik sistemin modeli,

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= h + Gu \\ &= f\end{aligned}\tag{3.1}$$

olarak ele alınmıştır. Üstte $h(x, \dot{x}) \in \mathbb{R}^n$, $G(x, \dot{x}) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ doğrusal olmayan işlevler, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ ise denetleyici giriş vektörüdür. Çoğu mekatronik sistemde olduğu gibi $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ vektörleri sırasıyla pozisyon, hız ve ivmeyi temsil etmektedir. Dinamik modelleme terimleri h ve G 'nin belirsizlikler içerdiği düşünülmektedir. Dolayısıyla $f(x, \dot{x}, u, t) \in \mathbb{R}^n$ işlevi, sistemin dinamik modeline dair tüm belirsizlikleri içeren doğrusal olmayan birleştirilmiş bir vektördür.

Hız gözlemcisi tasarımı ile ilgili bilimsel yazınla uyumlu olarak, durum

vektörleri x , \dot{x} ve denetleyici girişi u 'nun zaman türevleri ile birlikte sınırlı oldukları varsayılmıştır (Xian et al., 2004b), (Dinh et al., 2014). Ayrıca f ve \dot{f} işlevleri de zamana bağlı olarak süreklidirler. Ayrıca, \dot{x} ölçümlerinin ya uygulanabilir olmadığı ya da fiziksel olarak mevcut olmadığı varsayılmaktadır. Bu nedenle, denetleyici girişi \dot{x} durum değişkenini, yani hız vektörünü, doğrudan kullanamaz. Önerilen yöntem hakkındaki sunumun geri kalanında, hız ölçümleri gerektirmeyen bir denetleyici girişinin mevcut olduğu ve denetleyici uygulaması veya gözlem amaçları için hız vektörünün “iyi bir temsiline” ihtiyaç duyulduğu varsayılacaktır.

3.2 Gözlemci Tasarımı

Bu çalışmanın amacı yenilikçi bir hız gözlemcisi tasarlamaktır. Gözlemlenmiş hız vektörü $\hat{\dot{x}}(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilmekte olup hız gözlemci hata vektörü,

$$\tilde{\dot{x}} \triangleq \dot{x}(t) - \hat{\dot{x}}(t) \quad (3.2)$$

olarak tanımlanmıştır. Önerilen yenilikçi tasarım ile herhangi bir model bilgisi gerektirmeden, gözlemci hata işaretinin orijin komşuluğunda küçük, kabul edilebilir sınırlı bir bölgeye sürüldüğü ve bu bölgede kaldığı gösterilecektir. Gözlemlenmiş hız işaretinin tasarımında, öz-ayarlı stratejisi kurgulanarak kazanç ayarlı sürecinin kolaylaştırılması amaçlanmıştır.

Hız gözlemcisinin alttaki yapıda tasarlanması önerilmektedir,

$$\dot{\hat{x}} = p + (K + I_n)\tilde{x} \quad (3.3)$$

$$\dot{p} = K\tilde{x} + \hat{\beta}\text{Sat}(\tilde{x}) \quad (3.4)$$

burada $p(t) \in \mathbb{R}^n$, (3.4) numaralı denkleme göre güncellenen yardımcı bir terimdir. $\hat{x}_i(0) = x_i(0) \pm \epsilon$ olmak üzere $i = 1, \dots, n$ için denklem (3.3) tanımlanmıştır. $K(t)$, $\hat{\beta}(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ zamanla değişen, köşegen, pozitif tanımlı gözlemci kazanç matrisleri olup $I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ise birim matrisi göstermektedir. $\tilde{x}(t) \triangleq x - \hat{x} \in \mathbb{R}^n$ ise pozisyon gözlem hata vektörüdür. İstenen hassasiyeti

belirlemek için seçilebilecek olan $\epsilon \in \mathbb{R}$ küçük pozitif bir sabittir ve $\text{Sat}(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ ise vektörel doyum işlevi olup alttaki yapıda tanımlanmıştır,

$$\text{Sat}(\tilde{x}) = \left[\text{sat}(\tilde{x}_1) \quad \cdots \quad \text{sat}(\tilde{x}_n) \right]^T. \quad (3.5)$$

Bu ifadenin içerisindeki her bir $\text{sat}(\tilde{x}_i)$ ifadesi ise,

$$\text{sat}(\tilde{x}_i) = \begin{cases} 1 & \tilde{x}_i > \epsilon \\ \frac{1}{\epsilon} \tilde{x}_i & \epsilon \geq \tilde{x}_i \geq -\epsilon \\ -1 & -\epsilon > \tilde{x}_i \end{cases} \quad (3.6)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Denklemler (3.3) ve (3.4) içerisinde kullanılan zamanla değişen kazanç matrisi $K(t)$ kazanç matrisinin köşegen elemanları,

$$K_i(t) = k_{c_i} + \frac{1}{2} \gamma_i \tilde{x}_i^2(t) + \gamma_i \int_0^t \tilde{x}_i^2(\sigma) d\sigma \quad (3.7)$$

kuralına göre güncellenmektedir. Denklem (3.7) ile ifade edilen öz-ayarlar kuralındaki k_{c_i} , $\gamma_i \in \mathbb{R}$ serbest seçilebilen pozitif kazançlardır. Denklem (3.4) içerisindeki $\hat{\beta}(t)$ kazanç matrisinin köşegen elemanları,

$$\hat{\beta}_i(t) = \beta_{c_i} + \kappa_i \int_{\tilde{x}_i(0)}^{\tilde{x}_i(t)} \text{sat}(\sigma) d\sigma + \kappa_i \int_0^t \tilde{x}_i(\sigma) \text{sat}(\tilde{x}_i(\sigma)) d\sigma \quad (3.8)$$

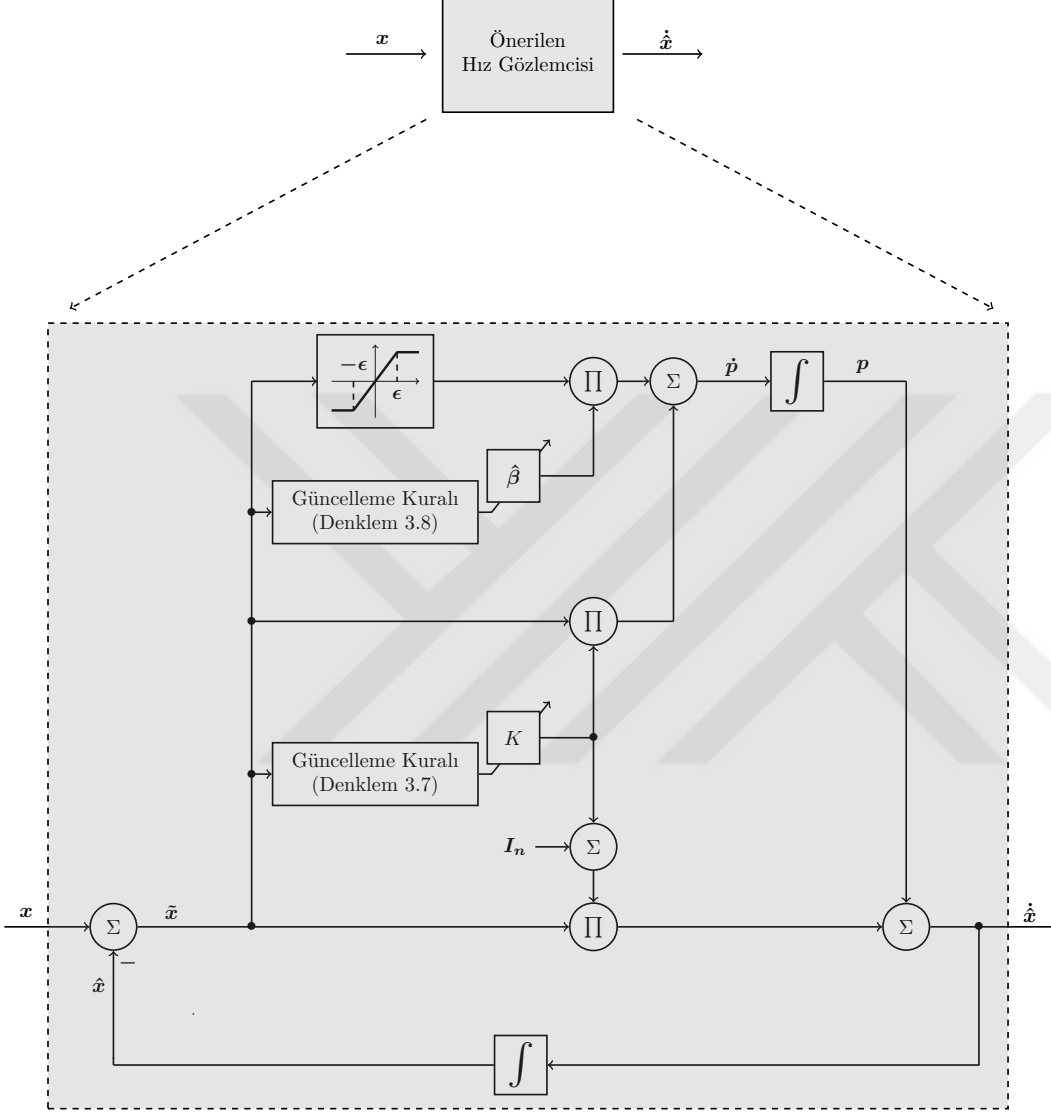
kuralına göre güncellenmektedir. Denklem (3.8) ile ifade edilen öz-ayarlar kuralındaki β_{c_i} , $\kappa_i \in \mathbb{R}$ serbest seçilebilen pozitif kazançlardır. $\hat{\beta}_i(t)$ tasarımındaki ilk integral, alternatif olarak

$$\int_{\tilde{x}_i(0)}^{\tilde{x}_i(t)} \text{sat}(\sigma) d\sigma = \begin{cases} |\tilde{x}_i(t)| - |\tilde{x}_i(0)| & |\tilde{x}_i(t)| > \epsilon \\ \frac{1}{2\epsilon} (\tilde{x}_i^2(t) - \tilde{x}_i^2(0)) & |\tilde{x}_i(t)| \leq \epsilon \end{cases} \quad (3.9)$$

şeklinde elde edilebilir.

Gözlemlenmiş pozisyon girişlerinin, başlangıçta $\hat{x}_i(0) = x_i(0) \pm \epsilon$ seçilmesi sonucunda $|\tilde{x}_i(0)| = \epsilon$ elde edilmektedir. Ayrıca $|\tilde{x}_i(t)| = \epsilon$ için $|\tilde{x}_i(t)| - |\tilde{x}_i(0)|$ ve $\tilde{x}_i^2(t) - \tilde{x}_i^2(0)$ ifadeleri sifıra eşit olup dolayısıyla da denklem (3.9) içerisinde sağ taraftaki süreksizlikten kaçınıldığı görülebilmektedir.

Şekil 3.1 ile tasarımı sunulan hız gözlemcisinin blok diyagram gösterimi verilmiştir. $K(t)$ kazancının güncellenmesi (3.7) ile verilen denklem kullanılarak sağlanırken, $\hat{\beta}(t)$ değerinin ayarlanması ise (3.8) ile verilen kurala göre yapılmaktadır.



Şekil 3.1: Önerilen hız gözlemcisinin blok diyagram gösterimi

3.3 Kararlılık Analizi

Gözlem hata vektörünün süzgeçlenmiş sürümü, $r(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilmekte olup

$$r \triangleq \dot{\hat{x}} + \tilde{x} \quad (3.10)$$

yapısında tanımlanmaktadır. $r(t)$ işaretinin orijine yaklaştığı durumda, gözlem hata işareti $\tilde{x}(t)$ 'nin de sifra yaklaşacağı doğrusal analiz teknikleri kullanılarak gösterilebilir (Kreyszig et al., 2011). Dolayısıyla analizin devamında $r(t)$ 'nin davranışının incelenmesine odaklanılacaktır.

Denklem (3.10) ile tanımlanan $r(t)$ 'nin türevini alıp, denklem (3.1) ile sunulan sistem dinamikleri, denklem (3.3) ifadesinin zamana göre türevi ve denklemler (3.4) ile (3.10) kullanılarak,

$$\dot{r} = -Kr + f - \hat{\beta}\text{Sat}(\tilde{x}) - \dot{K}\tilde{x} \quad (3.11)$$

şeklinde daha basit bir yapı elde edilir. Ayrıca (3.7) ve (3.8) numaralı denklemlerin türevleri alınarak, $\hat{\beta}_i(t)$ ve $K_i(t)$ 'nin zamana göre türevleri,

$$\dot{K}_i = \gamma_i r_i \tilde{x}_i. \quad (3.12)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_i = \kappa_i r_i \text{sat}(\tilde{x}_i) \quad (3.13)$$

olarak elde edilir.

Aşağıdaki teori, önerilen çalışmanın temel teorik bulgusunu çerçevelemektedir.

Teori 1. *Denklemler (3.3) ve (3.4) ile tasarlanan hız gözlemcisi denklemler (3.7) ve (3.8) ile tasarlanan $K_i(t)$ ve $\hat{\beta}_i(t)$ öz-ayarlı kuralları ile birlikte pratik bir yakınsamayı ve gözlemlenmiş hız olan $\hat{x}(t)$ 'nin gerçek hız olan $\dot{x}(t)$ 'yi takibini sağlamakta olup δ yarıçapında orijinde ortalanmış yeterince küçük bir hiperküre olan $d(\delta)$ için $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{x}(t)\| = d(\delta)$ garanti edilir.*

Kanıt. Negatif olmayan Lyapunov benzeri bir işlev, $V(t) \in \mathbb{R}$ ile gösterilmekte olup,

$$V \triangleq V_1 + \frac{1}{2} r^T r + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\kappa_i} \tilde{\beta}_i^2 \quad (3.14)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada $\tilde{\beta}_i(t) \triangleq \beta_i - \hat{\beta}_i$ $i = 1, \dots, n$ olup $V_1(t) \in \mathbb{R}$ ise denklem (3.15) ile tanımlanan negatif olmayan bir işlevdir

$$V_1 \triangleq \zeta - \int_0^t r^T (f - \beta \text{Sat}(\tilde{x})) d\sigma. \quad (3.15)$$

Üstte $\zeta \in \mathbb{R}$ pozitif bir sabit olup $\beta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ise pozitif tanımlı, köşegen sabit bir matrisi göstermektedir. β matrisinin Ek Açıklamalar A içerisinde sunulan koşulları sağlaması durumunda, V_1 daima pozitifdir. Dolayısıyla (3.14) ile verilen $V(t)$ ifadesi de pozitifdir.

Denklem (3.14) ile sunulan ifadenin türevi alındığında,

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + r^T \dot{r} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\kappa_i} \tilde{\beta}_i \dot{\tilde{\beta}}_i \quad (3.16)$$

elde edilir. Denklemler (3.11), (3.13) ile $V_1(t)$ 'nin zaman türevi, denklem (3.16)'de yerine yazılıp ortak terimler kısaltıldığında,

$$\dot{V} = -r^T K r + r^T (\beta - \hat{\beta}) \text{Sat}(\tilde{x}) - r^T \dot{K} \tilde{x} - \sum_{i=1}^n \tilde{\beta}_i r_i \text{sat}(\tilde{x}_i) \quad (3.17)$$

bulunur. Denklem (3.17) ile elde edilen ifadede eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terim,

$$r^T (\beta - \hat{\beta}) \text{Sat}(\tilde{x}) = \sum_{i=1}^n r_i \tilde{\beta}_i \text{sat}(\tilde{x}_i) \quad (3.18)$$

yapısında yeniden düzenlenebilir. Denklem (3.12) ile verilen $K(t)$ matrisinin zaman türevi, denklem (3.17) ile elde edilen ifadede eşitliğin sağ tarafındaki üçüncü terimde yerine yazılmasıyla,

$$r^T \dot{K} \tilde{x} = \sum_{i=1}^n \gamma_i r_i \dot{K}_i \tilde{x}_i = \sum_{i=1}^n \gamma_i \tilde{x}_i^2 r_i^2 \quad (3.19)$$

yapısında elde edilebilir. Denklemler (3.18) ve (3.19), denklem (3.17) ile beraber kullanıldığında,

$$\dot{V} = -r^T K r - \sum_{i=1}^n \gamma_i \tilde{x}_i^2 r_i^2 \leq -r^T K r \quad (3.20)$$

olduğu görünür. Denklem (3.7) dikkate alındığında da,

$$\dot{V} \leq - \sum_{i=1}^n k_{c_i} r_i^2 \leq - \min_i \{k_{c_i}\} \|r\|^2 \quad (3.21)$$

yapısına ulaşılır.

Denklemler (3.14) ve (3.21) ile elde edilen zamana göre türevinden hareketle, $V(t)$ 'nin sınırlı olduğu ispatlanır. Dolayısıyla $V_1(t)$, $r(t)$ ve $\tilde{\beta}_1(t)$ sınırlıdır. $r(t)$ 'nin sınırlı oluşu, $\tilde{x}(t)$, $\dot{\tilde{x}}(t)$ işaretlerinin de sınırlı olduğu anlamına gelir. Standart işaret takip argümanları kullanılarak, tüm kapalı döngü işaretlerinin sınırlı kaldığı gösterilebilir. Ek Açıklamalar B içerisinde sunulan koşulların sağlanması şartıyla pratik yakınsama ve dolayısıyla da gözlemlenmiş hızın gerçek hızı olabildiğince yakından takip etmesi garanti edilir.

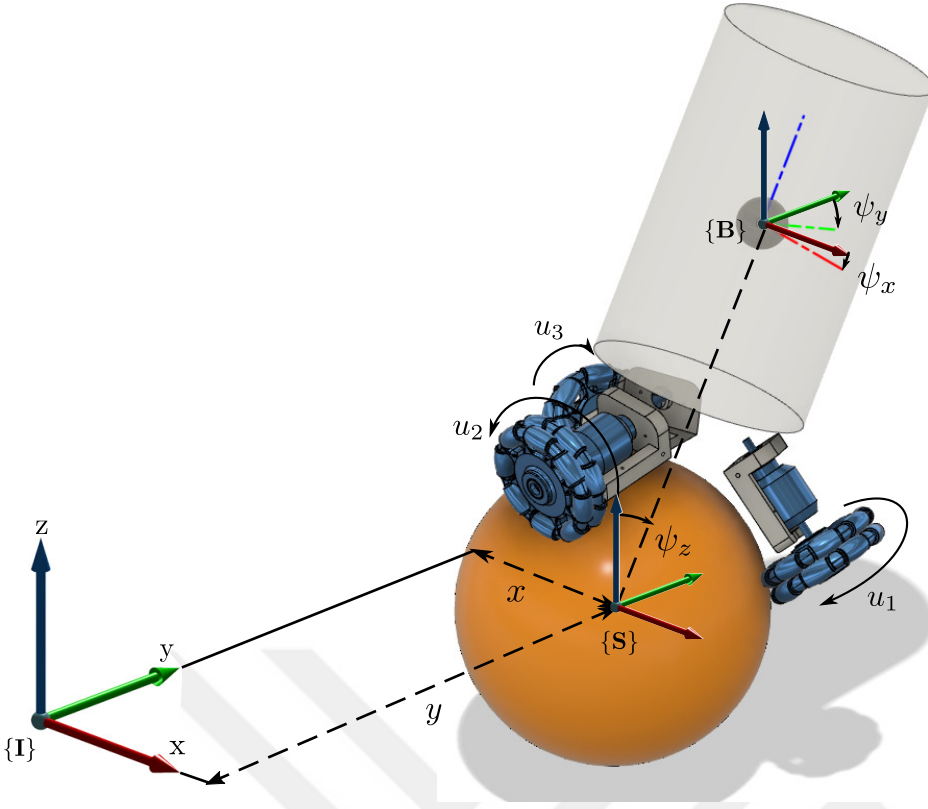
□

3.4 Benzetim Çalışması

Tasarlanan hız gözlemcisinin bilimsel yazındaki bir top-robot modeli üzerinde benzetimi yapılmıştır (Jespersen, 2019), (Iemolo, 2019). Top-robot'la ilgili konsept bilgiler Bölüm 2 içinde detaylı bir şekilde sunulmuştur.

EL denklemlerine göre, robotun dinamik modeli denklem (3.1) ile açıklandığı gibi ikinci dereceden bir mekatronik sistem olarak değerlendirilebilir. Top-robot, $q = [x, y, \psi_x, \psi_y, \psi_z]^T$ durum vektörü ile beş serbestlik derecesine sahiptir. x, y robotun konumunu, ψ_x, ψ_y, ψ_z ise Euler açılarını temsil etmektedir. Doğası gereği dikey dengeye sahip olmayan top-robot'un dengelenmesinin, bilimsel yazında kayan kipli denetleyici (Jespersen, 2019) veya doğrusal karesel düzenleyici (Iemolo, 2019) gibi denetleyiciler ile sağlandığı görülmektedir. Top-robot'un dengede tutulması için, bu benzetim çalışmasında, (Bidikli et al., 2014) ile sunulan denetleyici kullanılmıştır.

Bu benzetim çalışmasında, önerilen öz-ayarlamalı hız gözlemcisinin uygulanmasıyla, top robotun ölçülmemiş hız vektörü \dot{q} aktif çalışma esnasında doğru bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Top-robot'un, $x(0) = 3 [m]$, $y(0) = -2 [m]$ başlangıç konumundan $x = 5 [m]$, $y = -4 [m]$ hedef konumuna hareket

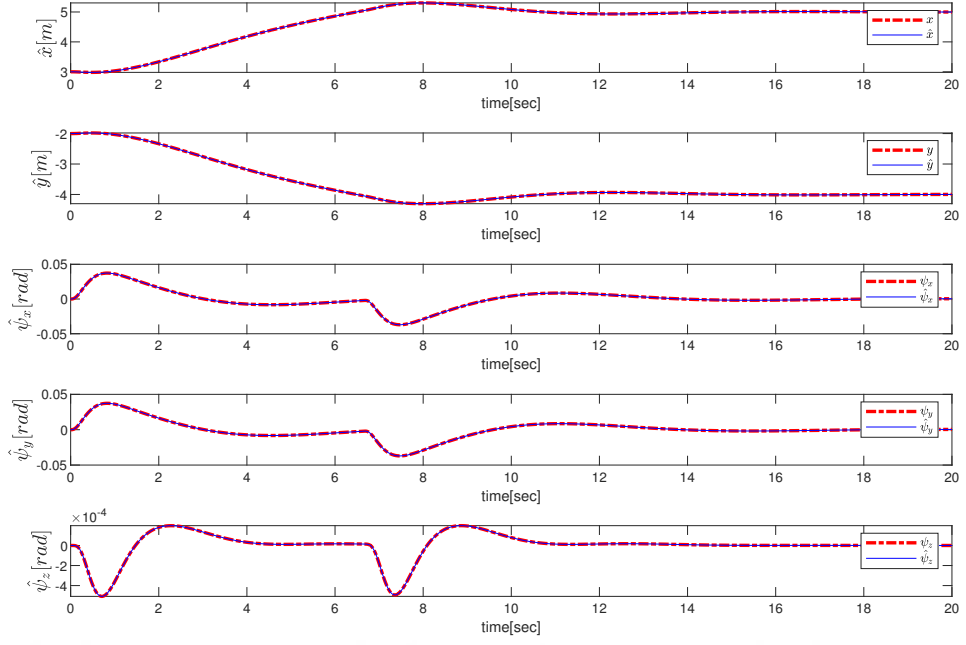


Şekil 3.2: Top-robot'un şeması

etmesi ve hareketi sırasında dengesini de koruması amaçlanmıştır. Benzetim sonuçlarında, başlangıçta ($t = 0$) robotun pozitif yönde hızlandığı ve daha sonra $t = 6.65$ sn civarında negatif yönde hızlanarak dengelendiği görülmüştür. Tasarlanan hız gözlemcisinin başarımı, bu hareket boyunca incelenmiştir. Kazançlar $k_{c_i} = \beta_{c_i} = 15$ ve $\kappa_i = \gamma_i = 2$ olarak seçilmiştir.

Gerçek durum değişkenleri $q = [x, y, \psi_x, \psi_y, \psi_z]^T$ olarak, gözlemlenmiş durum değişkenleri ise $\hat{q} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{\psi}_x, \hat{\psi}_y, \hat{\psi}_z]^T$ olarak tanımlanmıştır. Gözlemlenmiş hız işaretleri $\dot{\hat{q}}$ ile durum değişkeni gözlem hata işareti ise \tilde{q} ile ifade edilmiştir.

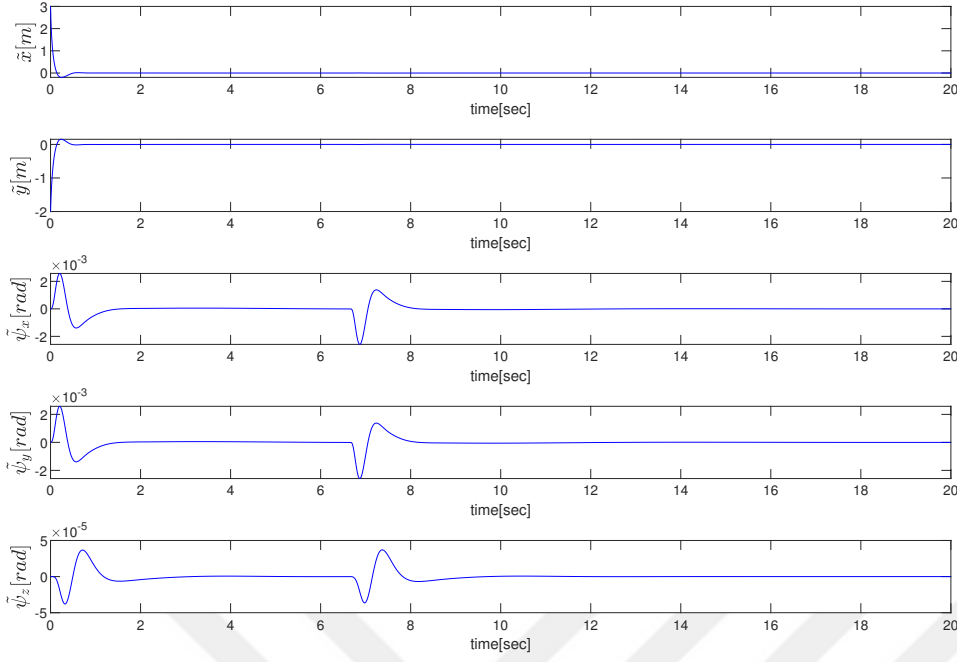
Gerçek (q) ve gözlemlenmiş (\hat{q}) durum değişkenlerinin değişimi Şekil 3.3 ile sunulmuştur.



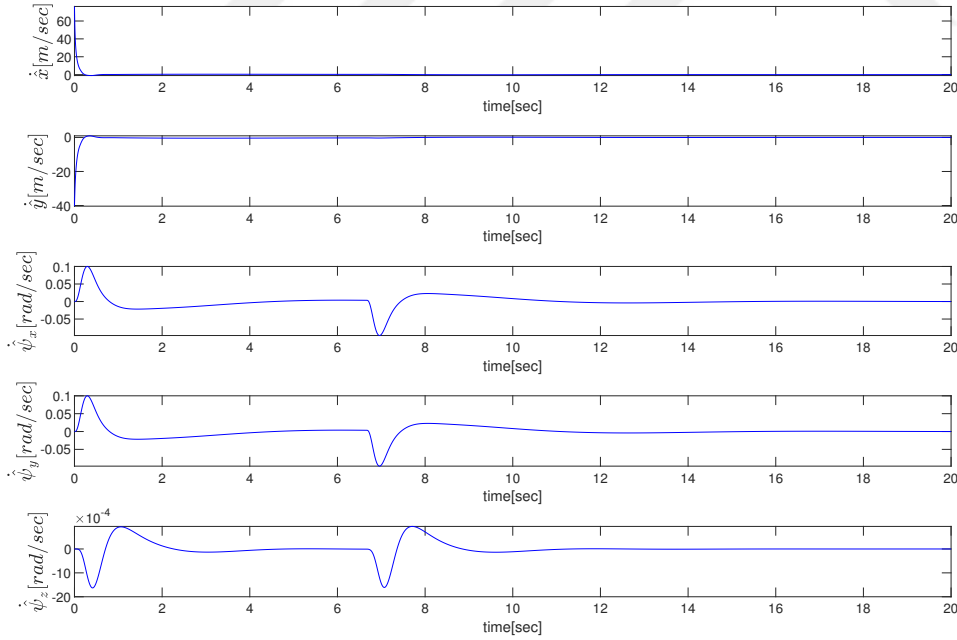
Şekil 3.3: Gerçek (q) ve gözlemlenmiş (\hat{q}) durum değişkenleri

\hat{q} olarak ifade edilen gözlemlenmiş hız işaretleri Şekil 3.5, durum değişkenleri gözlem hata işaretleri \tilde{q} ise Şekil 3.4 ile gösterilmiştir. Şekil 3.4 incelendiğinde tatmin edici bir başarımla elde edildiği görülebilmektedir.

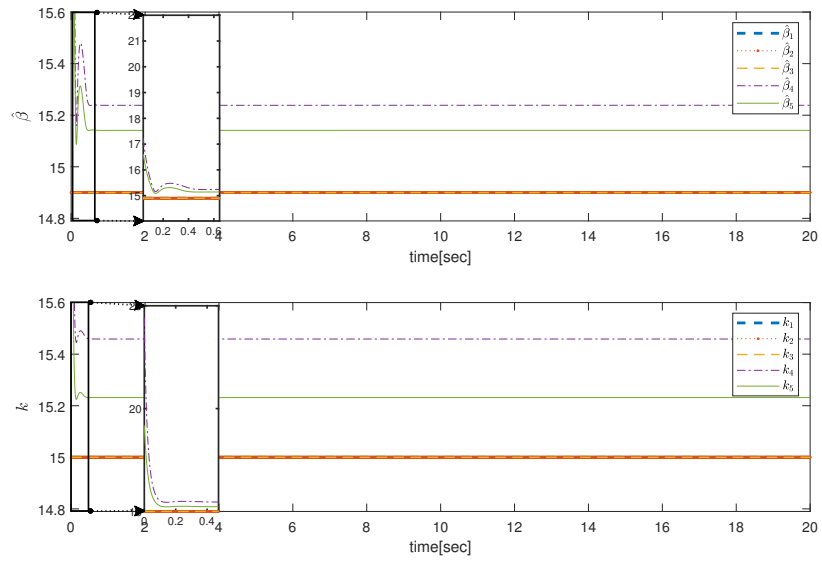
$\hat{\beta}(t)$ ve $K(t)$ ile gösterilen zamanla değişen gözlemci kazanç matrislerinin köşegen elemanlarının değişimleri ve bir süre sonra sabit değerlere yakınsadığı Şekil 3.6 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Durum değişkenleri gözlem hata işareti \tilde{q}



Şekil 3.5: Gözlemlenmiş hız işareti \dot{q}



Şekil 3.6: Gözlemci kazanç matrislerinin köşegen elemanları $\hat{\beta}(t)$ ve $K(t)$

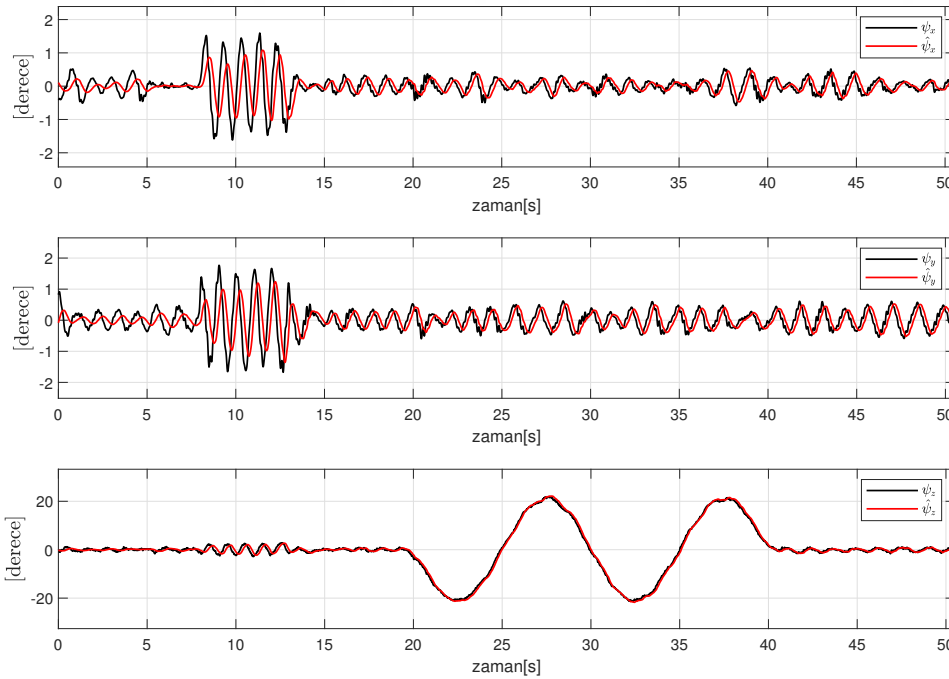
3.5 Deneysel Çalışmalar

Tasarlanan hız gözlemcisinin başarımı, detayları Bölüm 2 ile verilen üç farklı mekatronik sistem üzerinde deneysel olarak test edilmiştir. Top-robot, dönele ters sarkaç ve düzlemsel robot kolu ile gerçekleştirilen her bir çalışma ayrı başlıklar halinde sunulmuştur.

3.5.1 Top-robot

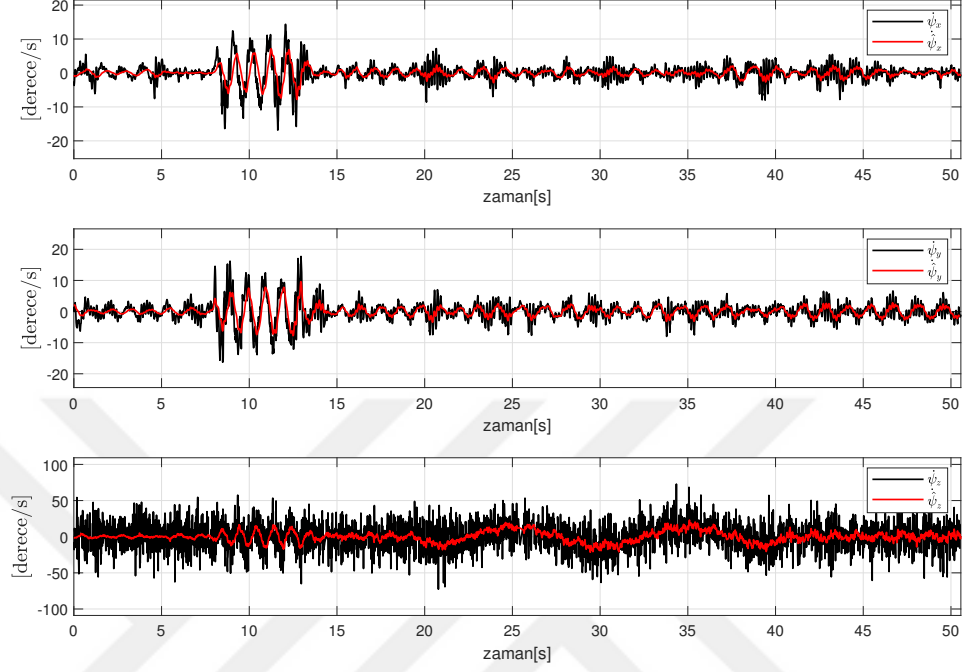
Deneysel çalışmanın bu kısmında, dik bir şekilde dengede duran ve belli zaman aralıklarında farklı hareketler yapan top-robot düzeneğinin tasarlanan gözlemci ile çalışmasından elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Kazançlar $k_{c_i} = 1$, $\beta_{c_i} = 0.1$ ve $\kappa_i = 0.1, \gamma_i = 1$ olarak seçilmiştir. $\epsilon = 0.5$ alınmıştır.

Şekil 3.7 ile gösterildiği üzere, top-robot 7 – 14 sn arasında dairesel, 20 – 40 sn arasında ise dönme hareketi yaparken, tasarlanan gözlemci robotun Euler açılarını takip etmektedir. Aradaki pozisyon hatasının biraz fazla olduğu ilk saniyelerde gözlemci, kazançlarını ayarlamakla meşgulken, daha sonra öz-ayarlar sayesinde kazançlar arttığında Euler açılarını daha iyi takip ettiği görülebilmektedir.



Şekil 3.7: Ölçülen (\cdot) ve gözlemlenmiş ($\hat{\cdot}$) Euler açıları

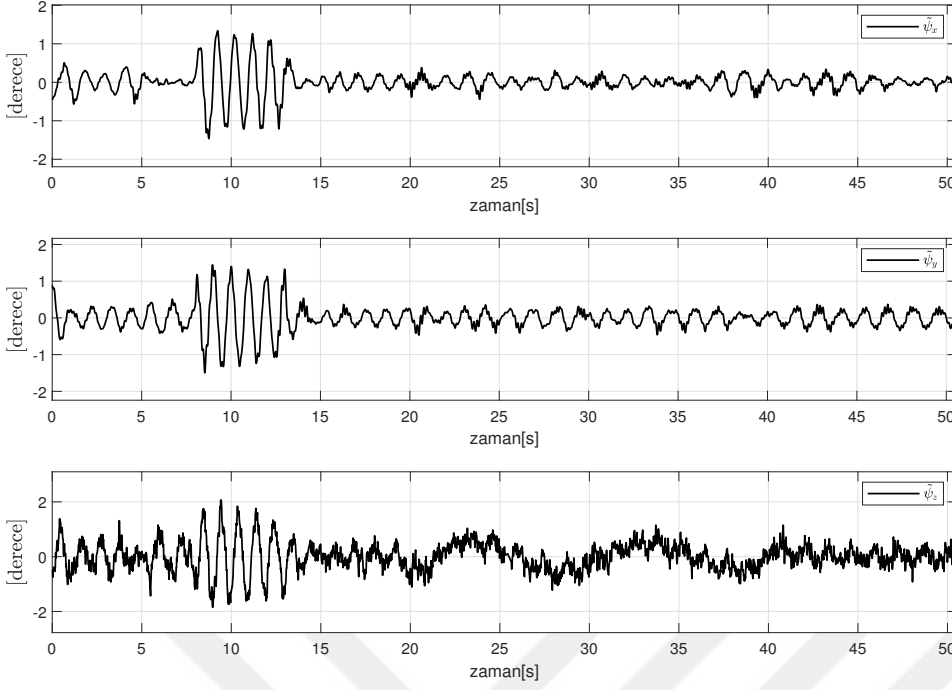
Robotun Euler açılarının sayısal türevi ile tasarlanan hız gözlemcisi aracılığıyla elde edilen hız bilgisi Şekil 3.8 ile kıyaslamalı olarak verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, tasarlanan gözlemci ile elde edilen hız bilgisi daha gürültüsüz bir haldedir.



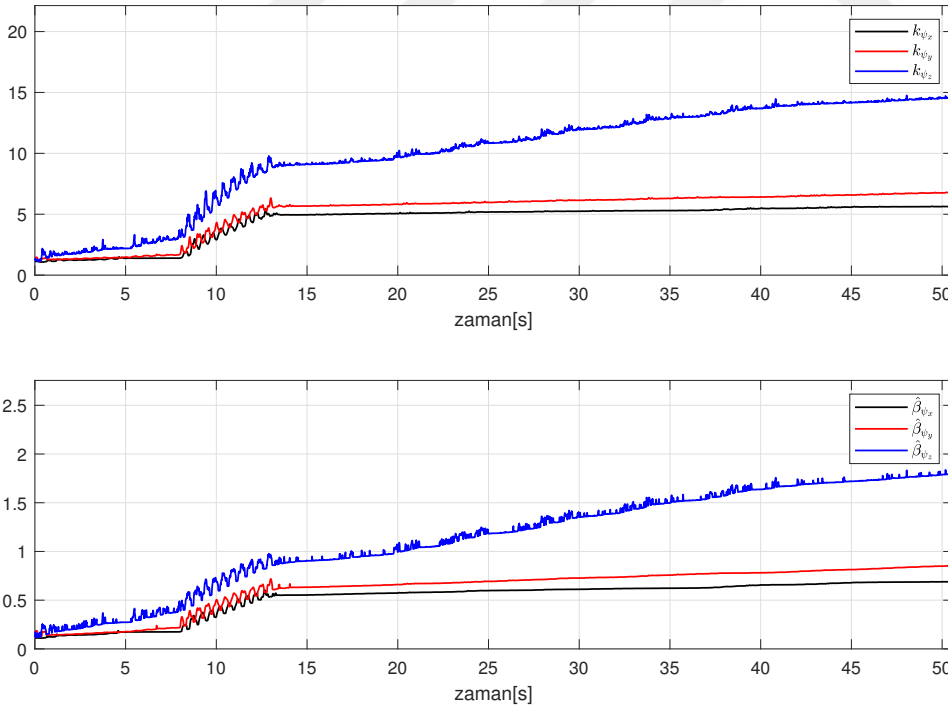
Şekil 3.8: Sayısal $((\dot{\cdot}))$ ve gözlemlenmiş $((\hat{\cdot}))$ açısal hızlar

Şekil 3.9 ile sunulan pozisyon gözlem hataları, kazançlar henüz ayarlanma sürecindeyken her ne kadar yüksek görünse de kazançlar belli bir seviyeye gelip artık pek değişmediği durumlarda oldukça küçük bir bantta kaldığı görülmektedir.

Sistem dinamiklerinin artık pek değişmediği son saniyelerde, hız gözlemcisinin kazançları daha yavaş değişmekte, deneysel çalışmanın sonlarına doğru sabitlendiği Şekil 3.10 ile anlaşılmaktadır.



Şekil 3.9: Top-robot için pozisyon gözlem hataları



Şekil 3.10: $\hat{\beta}(t)$ ve $K(t)$ kazanç matrislerinin köşegen elemanları

3.5.2 Dönel ters sarkaç

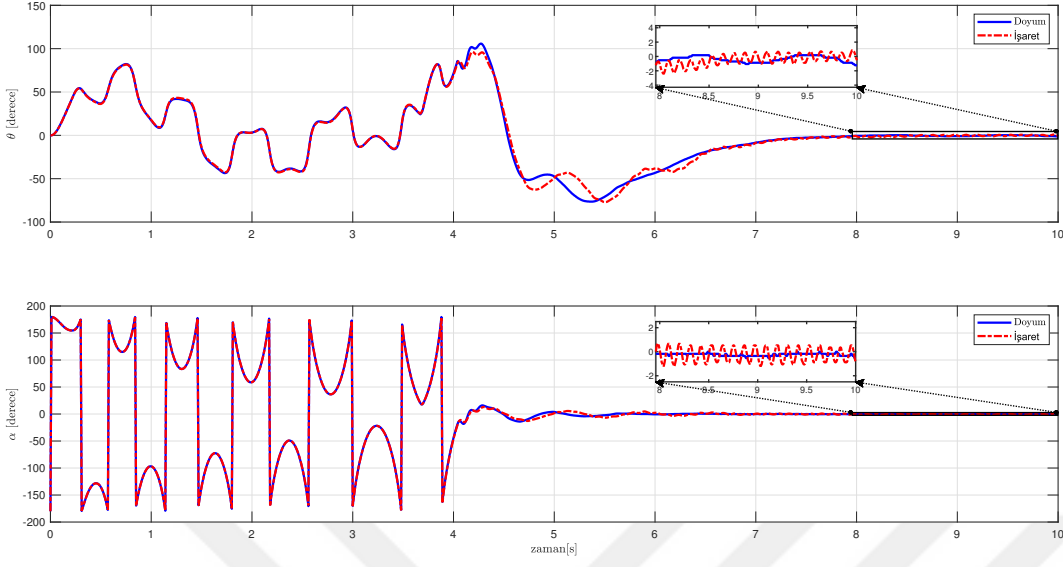
Bu deneysel çalışmada, önerilen hız gözlemcisinin başarımını daha gerçekçi bir şekilde değerlendirmek için, hız gözlemcisi denetleyici için gerekli olan hız işaretini üretmek için de kullanıldı. Sarkacı ters hale getirmek ve bu konumda tutmak için gözlemlenmiş hız işaretinin denetleyicinin bir parçası olarak kullanıldığı dönel ters sarkaç sistemi aktif olarak denetlenmiştir. Sarkacı ters çevirmek için sisteme salınımlı denetim yöntemi uygulanmış (Wang et al., 2004) ve sarkacın ters çevrilmiş halini korumak için doğrusal karesel integral denetleyici kullanılmıştır (Inci et al., 2020). Bu deneyin temel amacı önerilen hız gözlemcisinin etkinliğini test etmek olduğundan, denetleyiciden ziyade hız gözlemcisi üzerine odaklanılmıştır.

İki farklı deney yapılmıştır; ilkinde önerilen hız gözlemcisi tasarımı uygulanmış ve elde edilen gözlenen hız işaretleri denetleyici girişinde kullanılmış, diğer deneyde ise (Bidikli et al., 2016) çalışmasında tasarlanan hız gözlemcisi aynı şekilde kullanılmıştır. Her iki gözlemci tasarımının kazançları öz-ayarlı algoritmaları ile güncellenmiştir.

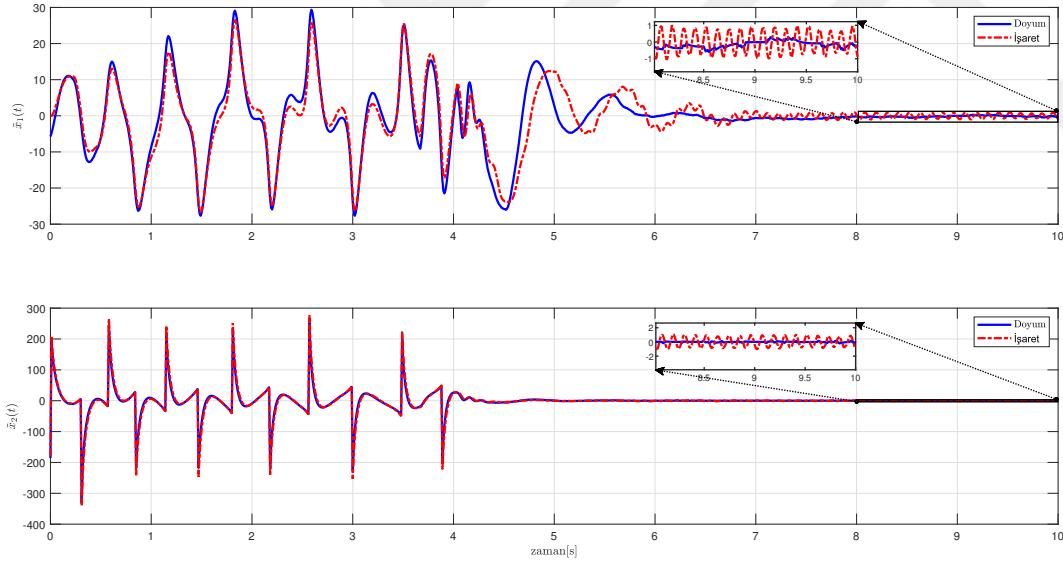
Önerilen hız gözlemcisi için zamanla değişen kazançların sabit terimleri $k_{ci} = 15$, $\beta_{ci} = 15$, uyarlılama kazançları $\kappa_i = 2$, $\gamma_i = 2$ ve $\epsilon = 0.1$ olarak seçilmiştir. (Bidikli et al., 2016) gözlemcisi için, zamanla değişen kazançların sabit terimleri $k_{ci} = 15$, $\beta_2 = 5$ olarak seçilmiştir. Her iki deney için de örnekleme zamanı $0.001sn$ olarak seçilmiştir.

Şekil 3.11 ile gösterilen ölçülen kol ve sarkaç açıları yani pozisyon değişkenlerinden görülebileceği gibi, her iki deney için de salınım aşaması yaklaşık 4 saniye sürmüş ve ardından sarkaç ters çevrilmiş şekilde kalmıştır. Şekil 3.12 ile konum gözlem hataları sunulmuştur. Gözlemlenmiş açısal hızlar Şekil 3.13 ile gösterilmiştir. Şekil 3.14 ve 3.15 ile sırasıyla $\hat{\beta}(t)$ ve $K(t)$ zamanla değişen gözlemci kazanç matrislerinin köşegen elemanlarının değişimi sunulmaktadır. Şekil 3.12 incelendiğinde her iki gözlemcinin de tatmin edici bir başarımla elde ettiği açıktır. Şekil 3.11 ve 3.13 incelendiğinde, benzer başarımlar elde edilmekle birlikte, önerilen doyum işlevi tabanlı gözlemcinin işaret işlevi tabanlı muadiline göre daha az yüksek frekanslı salınımlar ürettiği

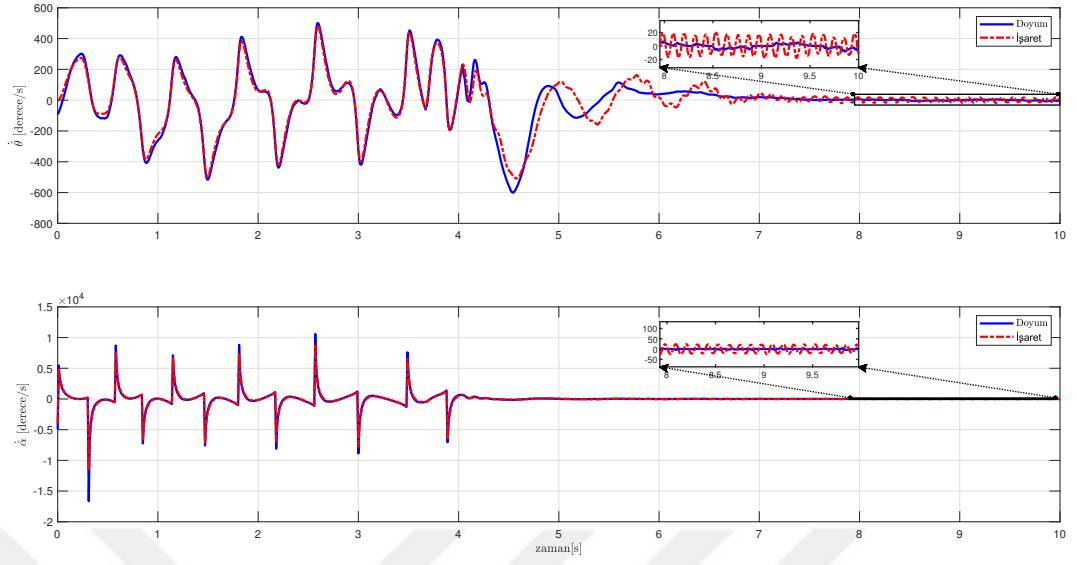
anlaşmaktadır. Şekil 3.16 incelendiğinde önerilen hız gözlemcisinin, daha az denetleyici eforuna sebebiyet verdiği de görülmektedir.



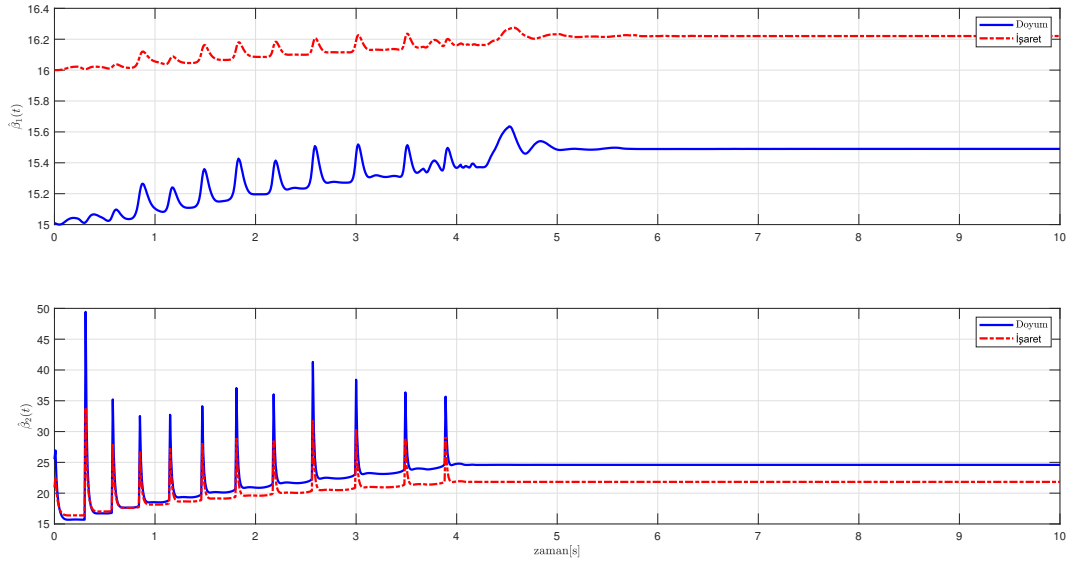
Şekil 3.11: Ölçülen kol açısı $\theta(t)$ ve sarkaç açısı $\alpha(t)$



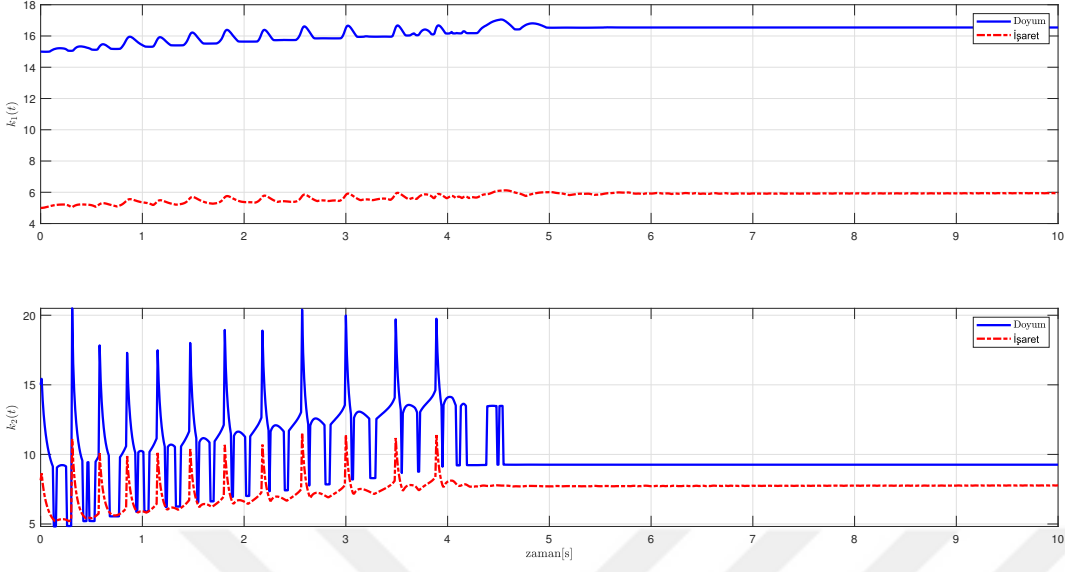
Şekil 3.12: Pozisyon gözlem hataları



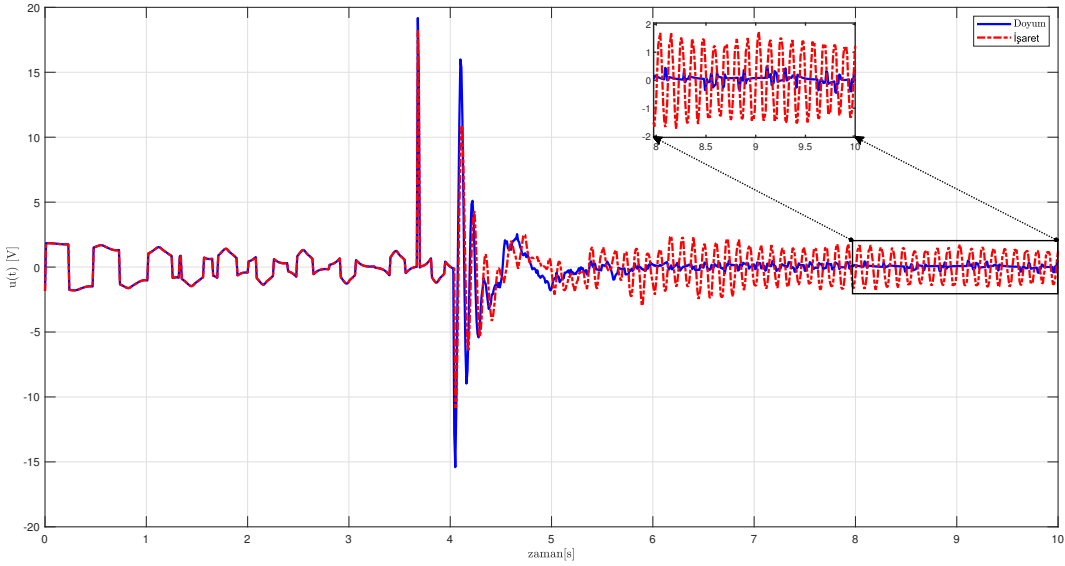
Şekil 3.13: Gözlemlenmiş kol hızı $\hat{\theta}(t)$ ve sarkaç hızı $\hat{\alpha}(t)$



Şekil 3.14: Kazanç matrisi $\hat{\beta}(t)$ 'in köşegen elemanları



Şekil 3.15: Kazanç matrisi $K(t)$ 'nin köşegen elemanları

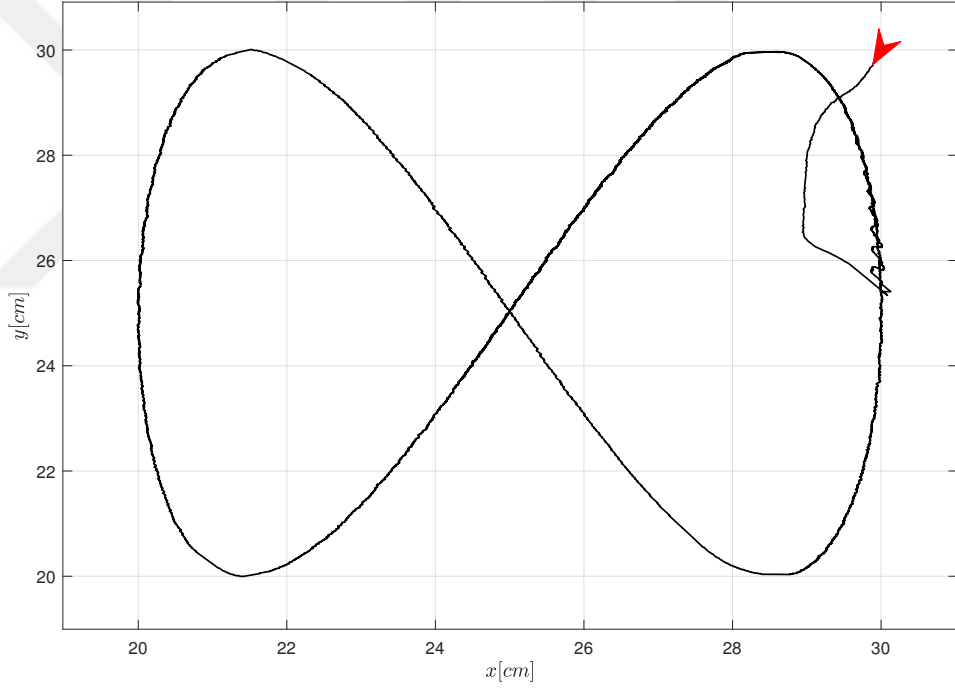


Şekil 3.16: Denetleyici girişi

3.5.3 Düzlemsel robot kolu

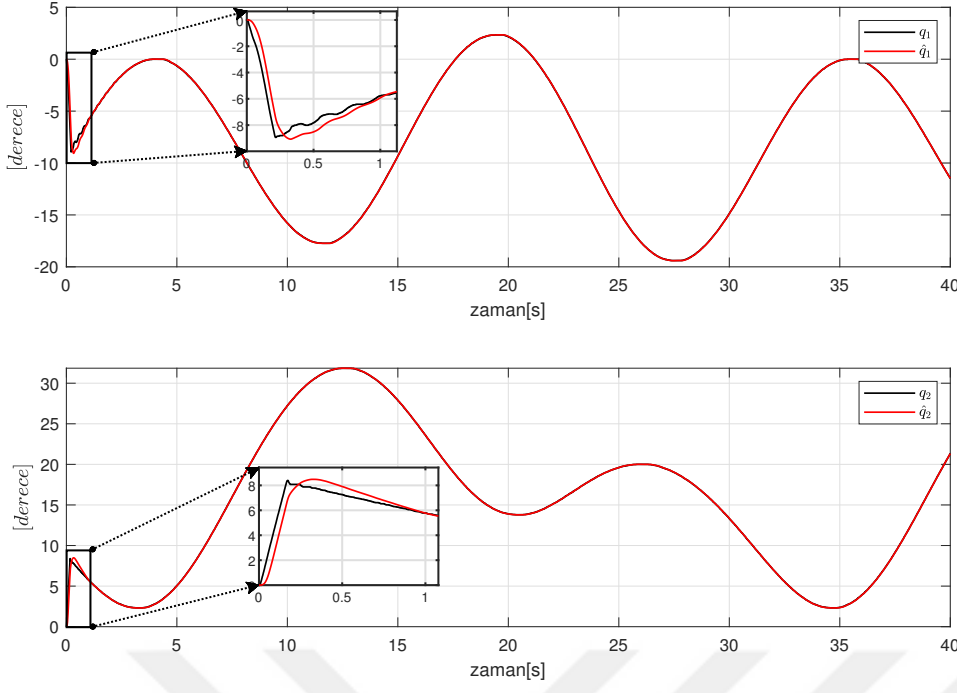
Bölüm 3.5.2 ile sunulan dönel ters sarkaç deneyinde olduğu gibi, bu deneysel çalışmada da temel hedef, gözlemcinin başarımını tespit etmek üzere düzlemsel robot kolu durum değişkenlerinin hızlarını gözlemlemektir. Robot kolu, bir gürbüz denetleyici ile görev uzayında denetlenirken, elde edilen sonuçlar hız gözlemcisinin başarımını anlamaya yönelik olarak sunulmuş, denetleyici ile ilgili detaylara yer verilmemiştir.

Şekil 3.17 incelendiğinde robot kolunun uç-noktasının $x - y$ düzlemindeki hareketi görülmektedir. Bu hareket gerçekleşirken her bir eklemin açı değerlerinin değişimi, ölçülen açı değerleriyle gözlemlenmiş açı değerleri bir arada olacak şekilde Şekil 3.18 ile gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, gözlemci 1 sn içerisinde ölçülen açıyı yakalamaktadır.



Şekil 3.17: Düzlemsel robot kolunun uç-noktasının x-y düzlemindeki hareketi

Eklemlerin gözlemlenmiş açısal hızları, sayısal türev ile elde edilen açısal hızlar ile beraber Şekil 3.19 ile sunulmuştur. Şekilden görüleceği üzere, düzlemsel robot kolu gibi mekanik bir sistem için sayısal türeve kıyasla tasarlanan hız gözlemcisinin daha uygulanabilir ve düşük frekanslı bir hız

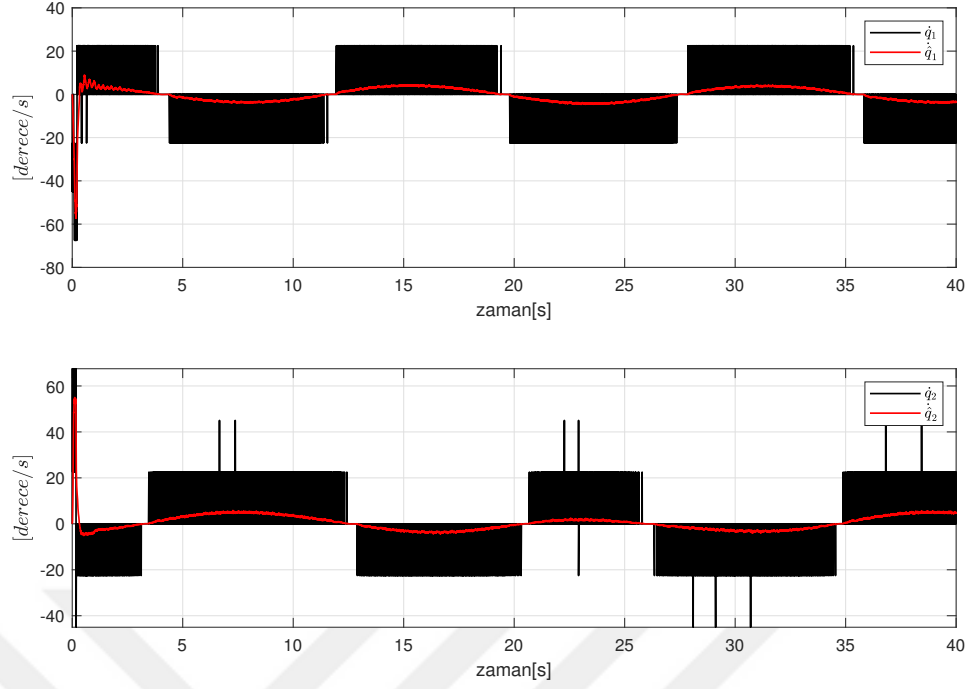


Şekil 3.18: Ölçülen ve gözlemlenmiş eklem açıları

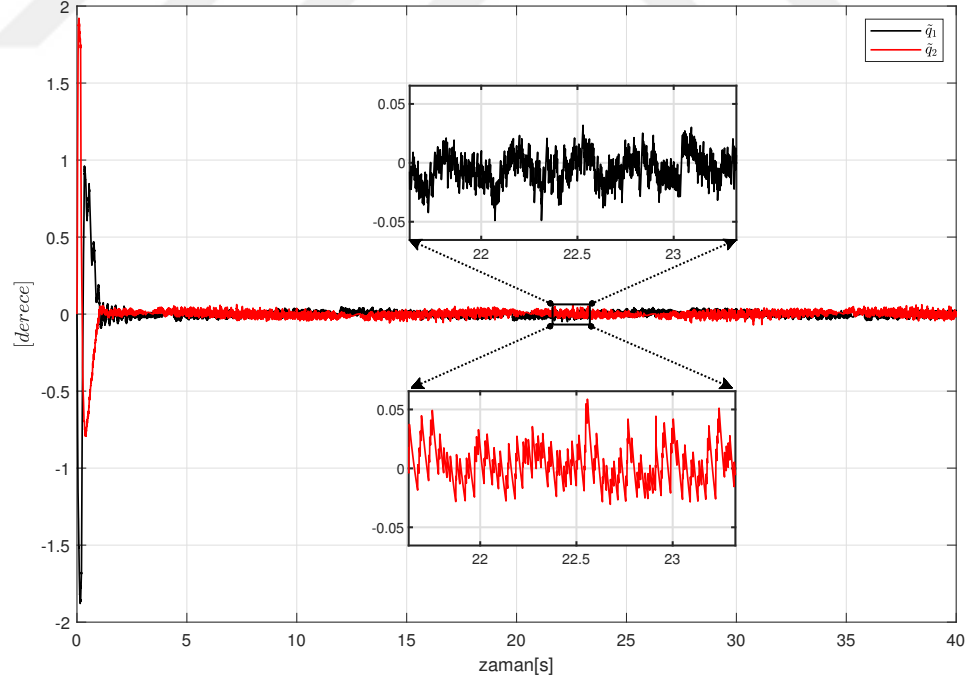
bilgisi ürettiği görülmektedir.

Şekil 3.20 incelendiğinde tasarlanan hız gözlemcisinin, pozisyon gözlem hataları 0.05° gibi oldukça düşük bir bantta kaldığı görülebilir.

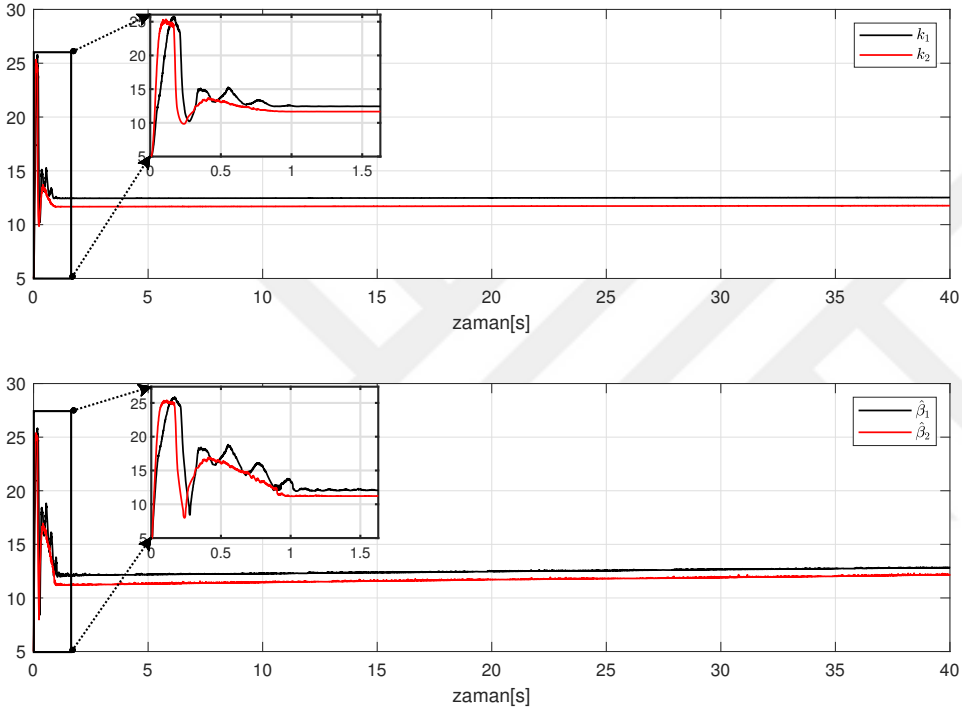
Zamanla değişen $\hat{\beta}(t)$ ve $K(t)$ gözlemci kazanç matrislerinin köşegen elemanları Şekil 3.21 ile gösterildiği gibi ilk aşamada güncellenmekte ve bir süre sonra sabit bir değere yakınsamaktadır.



Şekil 3.19: Sayısal (\dot{q}) ve gözlemlenmiş (\hat{q}) eklemler açılma hızları



Şekil 3.20: Düzlemsel robot kol için pozisyon gözlem hataları



Şekil 3.21: $\hat{\beta}(t)$ ve $K(t)$ kazanç matrislerinin köşegen elemanları

3.6 Sonuçlar

Bu b6l6mde, tez çalışması kapsamında 6z-ayarlamalı kazanç stratejisine sahip modelden bağımsız bir hız g6zlemcisinin tasarımı ve ilgili analizi sunulmuştur. Geliştirilen hız g6zlemcisi form6lasyonu sistem dinamiğini kullanmadığından, dinamik terimleri belirsiz olan sistemler için kullanılabilir. Bunun yanı sıra, kazanç ayarlama s6recini kolaylaştırmak için zamanla değişen g6zlemci kazancı form6lasyonu sunulmuştur. 6nerilen form6lasyonun etkinliğini ortaya koymak için, hız g6zlemcisi 6nce bir top-robot modeli 6zerinde sayısal benzetimlerle sınanmış ve daha sonra top-robot, d6nel ters sarkaç ve d6zlemsel robot kolu olmak 6zere 6 mekatronik d6zenek 6zerinde deneysel olarak test edilmiştir. Hem benzetim hem de deney sonuçlarından tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

şimdi 6nerilen g6zlemci tasarımının temel avantajları ve olası kullanımları ele alınmaktadır. Tasarımlarında işaret işlevi kullanan alternatif y6ntemlerle karşılaştırıldığında, 6nerilen g6zlemci, tasarımındaki doyum işlevi nedeniyle daha az titreşim 6retmeyi vaat etmektedir. Tasarımlarında hiperbolik işlev kullanan g6zlemci tasarımları ile karşılaştırıldığında, 6nerilen g6zlemci daha az hesaplama g6c6 gerektirmektedir. Dinamik davranışları hızla değişen sistemler 6zerinde uygulandığında, sabit kazançlı g6zlemci form6lasyonlarının bu değişikliklere uygun şekilde yanıt vermede başarısız olabileceğinden, 6nerilen uyarlamalı g6zlemci y6nteminin kazançları avantaj sağlamaktadır. 6nerilen g6zlemcinin sonucunu denetim girişinin bir parçası olarak kullanmak, hem denetleyici hem de g6zlemci kazançlarını ayarlamak yerine yalnızca denetleyici kazançlarını ayarlama avantajı sunmaktadır.

Tasarlanan hız g6zlemcisinin avantajlı y6nleri 6zetlenecek olursa:

- Birçok farklı sistemde kolaylıkla uygulanabilir olması,
- Lyapunov anlamında g6zlemcinin kararlılık analizinin yapılmış olması,
- Model bilgisine 6nsel olarak ihtiyaç duymaması,
- Kazançların ayarlanması gibi bir s6rece ihtiyaç duymaması,

- Sistemlerin denetiminde, gerekli olan hız bilgisini sağlayarak deneysel olarak başarımının gösterilmiş olması

şeklinde ifade edilebilir.

Tasarlanan gözlemci üç farklı şekilde kullanılabilir. Öncelikle olduğu gibi kullanılabilir. Ya da eldeki sistem durağan duruma ulaştıktan sonra, deney çalışması sırasında kazanç ayarı kapatılabilir ve gözlemci son kaydedilen kazançlarla sabit kazançlı bir hale getirilebilir. Ya da alternatif olarak, önerilen gözlemci eldeki sistemin aşırı çalışma koşulları için çalıştırılarak kazançların son değerleri kaydedilebilir ve deney, zamanla değişen kazançlar yerine bulunan bu sabit kazançlarla yeniden başlatılabilir.

4 GÜRBÜZ DENETLEYİCİ TASARIMI

Bu bölümde, model belirsizlikleri içeren ikinci dereceden EL sistemlerin takip denetimi için bir gürbüz denetleyici formülasyonu verilmiştir. Tasarlanan denetleyicinin başarımı, detayları Bölüm 2 ile verilen top-robot düzeneği kullanılarak gösterilmiştir. Top-robot düzeneğinin doğası gereği kararsız olması ve hareketini sağlamak amacıyla eğilmesi nedeniyle ağırlık merkezinin konumunun değişiyor olması denetim açısından oldukça önemli zorluklar getirmektedir. Şöyle ki, modeli kısmen veya tamamen bilinmeyen sistemlerdeki belirsizliklerle işaret tabanlı denetleyici yapılarının mücadele edebildikleri bilimsel yazında iyi bilinmekle birlikte bu tip denetleyicilerin çatırdama olgusuna sebebiyet vermeleri en önemli zayıflıklarıdır. Bu durumun top-robot düzeneğinin doğası gereği kararsız olması ile birlikte değerlendirilmesi sonucunda uygulanacak denetleyicinin bu tarz bir süreksizlik barındırmaması gerekliliği aşikardır. Bu amaç doğrultusunda bilimsel yazında hatanın işaretinin integralini kullanan bir denetleyici yapısı (Xian et al., 2004a) ele alınmıştır. Fakat her ne kadar işaret işlevinin integrali alındığı için teorik olarak sürekli olsa da uygulamalarda çatırdamanın genliğinin azaldığı ama tamamen ortadan kalkmadığı yine bilimsel yazın taramasında görülmüştür.

Bu bağlamda tez çalışması kapsamında, (Xian et al., 2004a) ile sunulan denetleyici çerçevesi ele alınmış ve işaret işlevinin yerine doyum işlevinin kullanımı önerilmiştir. Bu tarz bir değişikliğin kayan kipli denetleyicinin modifikasyonu için tercih edilmiş olması bizim bu tarz bir öneride bulunmamızın temel güdüsüdür. Bununla birlikte kayan kipli denetleyici üzerine olan bilimsel yazın incelendiğinde işaret işlevi yerine doyum işlevi kullanımının kararlılık analizleri yapılmadan diğer bir tabirle eklenti şeklinde yapıldığı gözlemlenmiştir. Fakat kararlılığın tüm denetim sistemleri için ilk ve en önemli gereklilik olduğu (Krstic et al., 1995)'teki "stability is the primary requirement for all control systems" ifadesiyle belirtilmiştir. Ek olarak, kararlılık analizleri yapılmadan diğer bir deyişle eklenti şeklinde kullanılan denetleyicilerin çok olumsuz sonuçları olduğu da bilimsel yazında gerçek hayattan alınmış örnek-

leriyle birlikte önemle vurgulanmıştır (Stein, 2003), (Dydek et al., 2010). Bu tespitler top-robot'un doğal kararsız yapısı kapsamında değerlendirildiğinde tasarlanan denetleyicinin kararlılık analizinin yapılması öncelikli hedef olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda tasarlanan denetleyici her ne kadar işaret işlevi yerine doyum işlevi içerdiği ve bu tarz değişiklikler kayan kipli denetleyiciler için iyi bilirse de kararlılık analizi aşikar veya kolay değildir. Bu kapsamda Lyapunov tarzı yenilikçi yaklaşımlar ile kapalı döngü sistemin kararlılığının sağlandığı ve ayrıca takip hatasının büyüklüğü denetleyici kazançları ile ayarlanabilen bir banda sürüldüğü ispatlanmıştır. Ayrıca, ilgili bilimsel yazından farklı olarak, denetleyici kazançlarının ayarlanması için yenilikçi uyarlamalı öz-ayarlama algoritmaları da tasarlanmış olup doğrusal olmayan denetleyici tasarımında çok zor olan kazanç ayarlama süreci, otomatize edilen bir yapı önerilerek kolaylaştırılmıştır.

4.1 Sistem Modeli ve Özellikleri

Bu çalışma boyunca ele alınan tam tahrikli n serbestlik dereceli EL sistem modelinin genel formu aşağıdaki gibi bir yapıya sahiptir,

$$M(x, \phi, t) \ddot{x} + f(x, \dot{x}, \phi, t) = u(t). \quad (4.1)$$

Burada $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ sırasıyla pozisyon, hız ve ivme vektörlerini, $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ kütle/eylemsizlik matrisini, $f \in \mathbb{R}^n$ diğer dinamik etkileri, $u(t) \in \mathbb{R}^n$ denetleyici girişini, $\phi(t) \in \mathbb{R}^p$ ise model belirsizliklerini temsil etmektedir.

Modeldeki M ve f terimleri, ikinci dereceden zaman türevlerine kadar sürekli olarak türevlenebilir ve bağımsız değişkenleri sınırlı olduğu sürece sınırlıdır. Kütle matrisi M simetriktir, pozitif tanımlıdır ve aşağıdaki koşulu sağlar,

$$m_{\min} \|\zeta\|^2 \leq \zeta^T M \zeta \leq m_{\max} \|\zeta\|^2 \quad \forall \zeta \in \mathbb{R}^n \quad (4.2)$$

burada m_{\min} , $m_{\max} \in \mathbb{R}$ pozitif sınırlardır.

4.2 Denetleyici Tasarımı

Çoğu EL sistemi için ana denetim hedefi, genelleştirilmiş konum vektörü $x(t)$ 'nin yeterince yumuşak, sınırlı istenen/referans konum yörüngesi olan $x_d(t) \in \mathbb{R}^n$ 'yi olabildiğince az hatayla izlemesini sağlamaktır. Bu çalışmada sistem durum değişkenleri $x(t)$ ve $\dot{x}(t)$ ölçülebilir olarak kabul edilmektedir. M ve f modelleme terimlerinin, yapılarında $\phi(t)$ ile gösterilen modelleme belirsizliklerinin bulunması nedeniyle kullanılamaması, denetleyici tasarımı için bir kısıttır.

Pozisyon takip hedefi, $e(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen ve aşağıdaki yapıda tanımlanan takip hatası üzerinden incelenmektedir

$$e \triangleq x_d - x. \quad (4.3)$$

$r(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen yardımcı hata işareti ise

$$r \triangleq \dot{e} + \alpha e \quad (4.4)$$

şeklinde kurgulanmıştır. Burada $\alpha \in \mathbb{R}^{n \times n}$ pozitif tanımlı, köşegen denetleyici kazanç matrisidir. $\dot{x}(t)$ ölçülebildiğinden, denklem (4.4) ile tanımlanan, $r(t)$ işareti de ölçülebilmektedir. Takip eden denetleyici tasarımı ve ilgili analizi sadece birinci dereceden zaman türevleri içerecek yapıda sunabilmek amacıyla tanımlanan, $s(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen bir başka hata işareti ise,

$$s \triangleq \dot{r} + \gamma r \quad (4.5)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada $\gamma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ pozitif tanımlı, köşegen denetleyici kazanç matrisidir. r 'nin zamana göre türevinin ivmeye bağlı olması nedeniyle s 'nin kullanılabilir bir işaret olmadığı ve denetleyici girişi tasarımında kullanılamayacağı vurgulanmıştır. Hata dinamiklerini birbirine bağlamak ve nihayetinde birinci dereceden bir analiz gerçekleştirmek için filtrelenmiş hatalar r ve s ifade edilmiştir.

Denklemler (4.4) ve (4.5) ile e ve r dinamikleri zaten oluşturulmuştur. s dinamiklerine ulaşmak için, denklem (4.5) ile sunulan ifadenin zamana

göre türevi alınır ve elde edilen ifadeye denklem (4.4) ile verilen ifadenin ikinci zaman türevi ve denklem (4.3) ile verilen ifadenin üçüncü zaman türevi eklenince

$$\dot{s} = \ddot{x}_d - \ddot{x} + \alpha\ddot{e} + \gamma\dot{r} \quad (4.6)$$

elde edilir. Denklem (4.6) ile elde edilen ifadeyi soldan M ile çarptıktan sonra denklem (4.1) ile sunulan sistem dinamiklerinin zamana göre türevinin alınıp ardından yerine yazılmasıyla,

$$M\dot{s} = \dot{M}\ddot{x} + \dot{f} - \dot{u} + M(\ddot{x}_d + \alpha\ddot{e} + \gamma\dot{r}) \quad (4.7)$$

bulunur. Belirsiz terimleri bir arada ifade edebilmek için, $h(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen terim aşağıda tanımlanmıştır

$$h \triangleq M(\ddot{x}_d + \alpha\ddot{e} + \gamma\dot{r}) + \dot{M}\left(\ddot{x} + \frac{1}{2}s\right) + \dot{f} + r \quad (4.8)$$

Üstteki tanım ışığında denklem (4.7) aşağıdaki yapıda yeniden yazılabilir

$$M\dot{s} = h - \frac{1}{2}\dot{M}s - r - \dot{u} \quad (4.9)$$

Denklem (4.8) ile tanımlanan h , belirsiz dinamik modelleme terimlerine bağlı olduğundan belirsizdir ve s dinamiklerinde ortaya çıktığı için telafi edilmesi gerekir. Bu çalışmada h , istenen yörünge ile zamana göre türevlerine ve hata işaretlerine bağlı iki terime ayrılacaktır. $h_d(t) \in \mathbb{R}^n$ istenen yörünge ile zamana göre türevlerine bağlı olup alttaki yapıda tanımlanır

$$h_d \triangleq h|_{x=x_d, \dot{x}=\dot{x}_d, \ddot{x}=\ddot{x}_d} \quad (4.10)$$

$\tilde{h}(t) \in \mathbb{R}^n$ ise büyüklüğü hata işaretlerinin büyüklüklerine bağlı olan terim olup alttaki yapıda tanımlanmıştır

$$\tilde{h} \triangleq h - h_d \quad (4.11)$$

İstenen yörünge ile zaman türevlerinin sınırlı olmalarından dolayı h_d ve onun zamana göre türevi aşağıdaki gibi $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ pozitif sınırlayıcı sabitler ile üstten sınırlandırılabilir

$$\|h_d(t)\| \leq c_1, \|\dot{h}_d(t)\| \leq c_2 \quad \forall t \quad (4.12)$$

Ortalama Değer Teoremi kullanılarak (Khalil, 2002), (Dasdemir and Zergeroglu, 2015), \tilde{h} aşağıdaki şekilde sınırlandırılabilir

$$\|\tilde{h}\| \leq \rho(\|z\|)\|z\| \quad (4.13)$$

olup burada $\rho(\cdot) \in \mathbb{R}$, bağımsız değişkeninin negatif olmayan, azalmayan bir işlevdir ve $z(t) \triangleq [e^T r^T s^T]^T \in \mathbb{R}^{3n}$, birleştirilmiş hata vektörünü temsil etmektedir. Denklem (4.11), denklem (4.9) ile birlikte kullanıldığında,

$$M\dot{s} = \tilde{h} + h_d - \frac{1}{2}\dot{M}s - r - \dot{u} \quad (4.14)$$

ifadesi elde edilir.

Elde edilen açık döngü hata dinamikleri ve devamındaki kararlılık analizi ışığında, denetleyici girişi,

$$u = (K + I_n) \left[r(t) - r(0) + \gamma \int_0^t r(\sigma) d\sigma \right] + \beta \int_0^t \text{Sat}(r(\sigma)) d\sigma \quad (4.15)$$

şeklinde tasarlanmıştır. Bu tasarımda, $K, \beta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ pozitif tanımlı, köşegen denetleyici kazanç matrisleridir. $\text{Sat}(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ise vektörel doyum işlevi olup elemanları alttaki yapıda

$$\text{sat}(r_i) = \begin{cases} 1 & r_i > \epsilon \\ \frac{1}{\epsilon} r_i & \epsilon \geq r_i \geq -\epsilon \\ -1 & -\epsilon > r_i \end{cases} \quad (4.16)$$

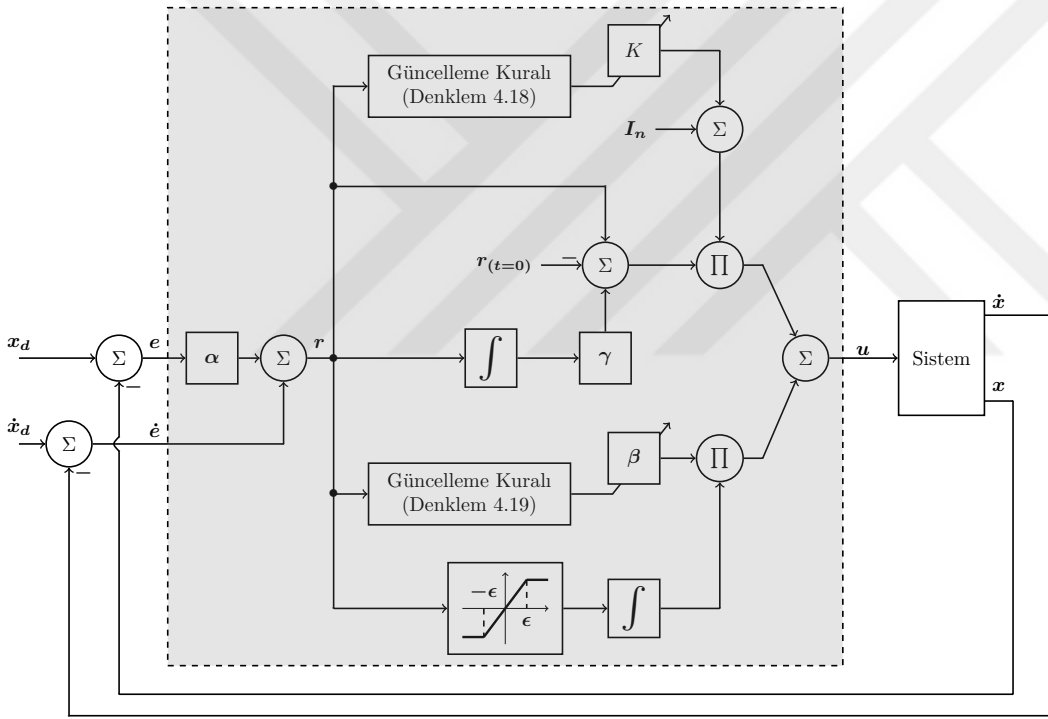
olarak tanımlanmıştır. Üstte, $\epsilon \in \mathbb{R}$ istenen hassasiyet değeridir. Yumuşak bir başlangıç için gerekli olan $u(0) = 0_{n \times 1}$ koşulu sağlanmaktadır. Denetleyici girişi süreklidir ve yalnızca r ölçümlerine ihtiyaç duymaktadır.

Dolayısıyla mevcut olan pozisyon ve hız ölçüleriyle elde edilebilir. Denklem (4.4) ışığında denklem (4.15) ile sunulan denetleyici tasarımının PID ve doyumdan geçirilmiş PD'den oluştuğu görülebilir. Denklem (4.15) ile sunulan kontrol girişinin zamana göre türevinin denklem (4.14) içerisinde yerine yazılmasıyla s 'nin kapalı döngü dinamiği

$$M\dot{s} = h_d + \tilde{h} - \frac{1}{2}\dot{M}s - r - (K + I_n)s - \beta\text{Sat}(r) \quad (4.17)$$

olarak elde edilir. Bu ifadenin elde edilmesinde denklem (4.5) de kullanılmıştır.

Şekil 4.1, denklem (4.15) ile tanımlanan denetleyicinin, blok diyagram gösterimini göstermektedir.



Şekil 4.1: Tasarlanan denetleyicinin blok diyagramı

Denetleyici kazançlarını ayarlama sürecini kolaylaştırmak amacıyla, aşağıdaki güncelleme kurallarının bir eklenti olarak kullanılması önerilmiştir. K matrisinin köşegen elemanları,

$$k_i(t) = k_{c_i} + \mu_i \frac{1}{2} r_i^2(t) + \mu_i \gamma_i \int_0^t r_i^2(\sigma) d\sigma \quad (4.18)$$

şeklinde tasarlanabilir. Burada $\mu_i \in \mathbb{R}$, uyarlama oranını ayarlayan pozitif bir sabit olup, $k_{c_i} \in \mathbb{R}$ ise zamanla değişen k_i 'nin sabit kısmı olarak kullanılmaktadır. β matrisinin köşegen elemanları,

$$\beta_i(t) = \beta_{c_i} + \kappa_i \beta_{t_i}(t) + \kappa_i \int_0^t \gamma_i r_i(\sigma) \text{sat}(r_i(\sigma)) d\sigma \quad (4.19)$$

kullanılarak güncellenmektedir. $\kappa_i \in \mathbb{R}$, uyarlama oranını ayarlayan pozitif bir sabit olup $\beta_{c_i} \in \mathbb{R}$ ise zamanla değişen $\beta_i(t)$ 'nin sabit kısmı olarak kullanılmaktadır. Yukarıdaki $\beta_{t_i}(t)$ ifadesi ise,

$$\beta_{t_i}(t) = \begin{cases} |r_i(t)| - |r_i(0)| & |r_i(t)| \geq \epsilon \\ \frac{1}{2\epsilon} (|r_i^2(t)| - |r_i^2(0)|) & |r_i(t)| < \epsilon \end{cases} \quad (4.20)$$

şeklinde elde edilmektedir.

4.3 Kararlılık Analizi

Bu bölümde, kapalı çevrim sistemin kararlılığı Lyapunov tabanlı yöntemler kullanılarak incelenecektir.

Teori 2. *Denklem (4.15) ile sunulan denetleyici girişi, istenen pozisyon yörüngesi olan x_d 'nin pratik olarak izlenmesini garanti eder. Matematiksel olarak, orijin etrafında δ yarıçaplı yeterince küçük bir hiperküre olan $d(\delta)$ için $\lim_{t \rightarrow +\infty} \|e(t)\| = d(\delta)$ ispatlanır. Kararlılık sonucunun sağlanması için denetleyici kazançlarının aşağıdaki koşulları sağlayacak şekilde seçilmesi gerekir,*

$$\alpha_{\min} \geq \frac{1}{2} \quad (4.21)$$

$$\gamma_{\min} \geq \frac{1}{2} \quad (4.22)$$

$$\beta_i \geq \frac{\epsilon^2}{\delta^2} \max\{2c_1, c_1 + \frac{c_2}{\gamma_i}\} \quad (4.23)$$

Yukarıda $\alpha_{\min}, \gamma_{\min} \in \mathbb{R}$, sırasıyla α, γ matrislerinin en küçük özdeğerleridir. β_i, γ_i , sırasıyla β, γ matrislerinin i 'nci köşegen elemanını temsil eder. K matrisinin en küçük özdeğeri, $k_{\min} \in \mathbb{R}$ ile gösterilmektedir ve sistemin başlangıç koşullarına nazaran yeterince büyük seçilmesi gerekmektedir.

Kanıt. $V(t) \in \mathbb{R}$ ile gösterilen negatif olmayan Lyapunov işlevinin tasarımıyla kanıtı başlanmıştır

$$V \triangleq V_q + \frac{1}{2}e^T e + \frac{1}{2}r^T r + \frac{1}{2}s^T M s \quad (4.24)$$

Yukarıda $V_q(t) \in \mathbb{R}$,

$$V_q \triangleq \zeta_q - \int_0^t s^T(\sigma) [h_a(\sigma) - \beta \text{Sat}(r(\sigma))] d\sigma \quad (4.25)$$

şeklinde tanımlanmıştır. $\zeta_q \in \mathbb{R}$ pozitif bir sabittir. Denklem (4.23) ile sunulan kazanç koşulunun sağlanması durumunda, $V_q(t)$ işlevinin pozitif olduğu Ek Açıklamalar B ile gösterilmiştir.

Denklem (4.24) ile sunulan ifadenin türevi alındığında,

$$\dot{V} = \dot{V}_q + e^T \dot{e} + r^T \dot{r} + s^T M \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s \quad (4.26)$$

elde edilir ve (4.25) denkleminin zamana göre türevi, \dot{e} için denklem (4.4), \dot{r} için denklem (4.5), $M\dot{s}$ için denklem (4.17) yerine yazıldığında ve sadeleştirildiğinde,

$$\dot{V} = e^T r - e^T \alpha e - r^T \gamma r + s^T \tilde{h} - s^T (K + I_n) s \quad (4.27)$$

ifadesi elde edilir. İşareti belirsiz olan terimleri üstten sınırlayıp ardından Young eşitsizliğinden yararlanarak (Marquez, 2003) denklem (4.28) ile verilen üst sınıra ulaşılabilir

$$\dot{V} \leq \frac{1}{2}\|e\|^2 + \frac{1}{2}\|r\|^2 - e^T \alpha e - r^T \gamma r + \|s\|\rho\|z\| - s^T K s - s^T s. \quad (4.28)$$

Denklem (4.28) ile verilen eşitsizliğin sağ tarafı için denklem (4.29) ile verilen üst sınır oluşturulmuştur,

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & - \left(\alpha_{\min} - \frac{1}{2} \right) \|e\|^2 - \left(\gamma_{\min} - \frac{1}{2} \right) \|r\|^2 - \|s\|^2 \\ & + \rho \|z\| \|s\|^2 - k_{\min} \|s\|^2. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Denklem (4.29) ifadesinin son iki terimi için (Kokotovic, 1992) çalışmasındaki doğrusal olmayan sönümleme argümanını kullanmanın sonucunda,

$$\dot{V} \leq - \left[\min \left\{ \left(\alpha_{\min} - \frac{1}{2} \right), \left(\gamma_{\min} - \frac{1}{2} \right), 1 \right\} - \frac{\rho^2}{4k_{\min}} \right] \|z\|^2 \quad (4.30)$$

elde edilir. Denklemler (4.21) ve (4.22) ile sunulan koşulların sağlanması ve k_{\min} 'in yeterince büyük seçilmesi durumunda

$$\dot{V} \leq -\lambda \|z\|^2 \quad (4.31)$$

eşitsizliği elde edilir. Denklem (4.31)'de $\lambda \in \mathbb{R}$ pozitif bir sabittir.

Denklemler (4.24) ve (4.31) kullanılarak $V(t)$ 'nin sınırlı kaldığı ve dolayısıyla $e(t)$, $r(t)$, $s(t)$, $V_q(t)$ terimlerinin de sınırlı olduğu sonucuna varılır. $e(t)$, $r(t)$, $s(t)$ 'in sınırlılığı, denklemler (4.4) ve (4.5) ile kullanıldığında $\dot{e}(t)$, $\dot{r}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ kanıtlanır. Bu sınırlılık sonuçları istenen yörünge ve onun türevlerinin sınırlılığı ile birlikte kullanılarak $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ garantilenir. Tüm bu sınırlılık sonuçları M , f ve $u(t)$ 'nin sınırlı kaldığını göstermek için kullanılabilir. Standart doğrusal işaret takip yöntemleri kullanılarak kapalı döngü altında kalan tüm işaretlerin sınırlılığı garanti edilebilir.

Denklemler (4.24) ve (4.31) ile V_q teriminin negatif olmaması birlikte kullanıldığında, takip hatasının, orijinin etrafında, yarıçapı denklem (4.23)'deki denetleyici kazancının arttırılmasıyla azaltılabilen bir hiperküreye sürülebilir.

□

4.4 Deneysel Çalışmalar

Bu deneysel çalışmada tasarlanan yenilikçi doyum işlevi tabanlı denetleyicinin Bölüm 2 içinde detaylı açıklamaları verilen top-robot'un denetlenmesi ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

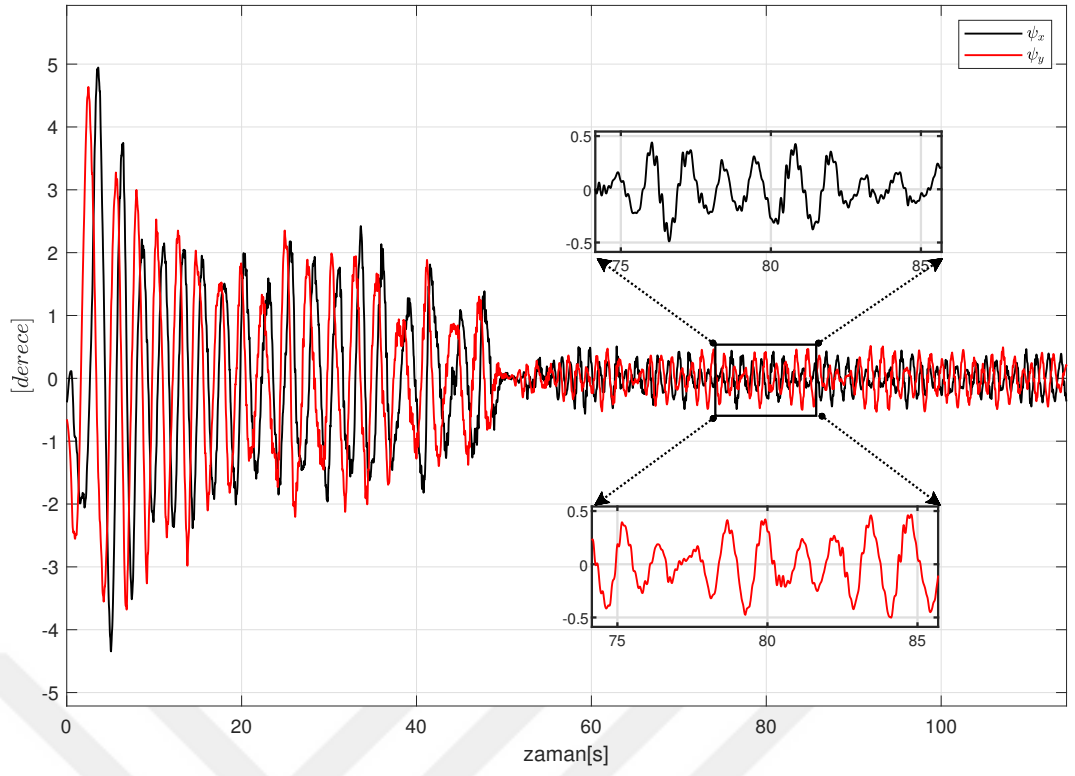
Top-robot üzerindeki gömülü sistem kartına tasarlanan denetleyici algoritması kodlanmıştır ve denetleyici 1 kHz frekansta çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Dolayısıyla örnekleme zamamı 1 ms 'dir. Top-robot'u denetlemek

için belli başlı kodların harcadığı zaman ölçülmüştür. Sensör tümleştirme algoritması Euler açılarını yaklaşık olarak $200 \mu s$ 'de hesaplayabilmiştir. Denetleyici algoritması, öz-ayarlama algoritması kapalıyken yaklaşık $30 \mu s$, açıkken ise yaklaşık $50 \mu s$ sürmüştür. Sinüzoidal bir referans işareti üretmek ise yaklaşık $60 \mu s$ sürmüştür. Sonuç olarak, denetim sistemi bir çevrimi tanımlanan örnekleme süresinden daha kısa bir sürede, yani en fazla $310 \mu s$ sürede tamamlamıştır.

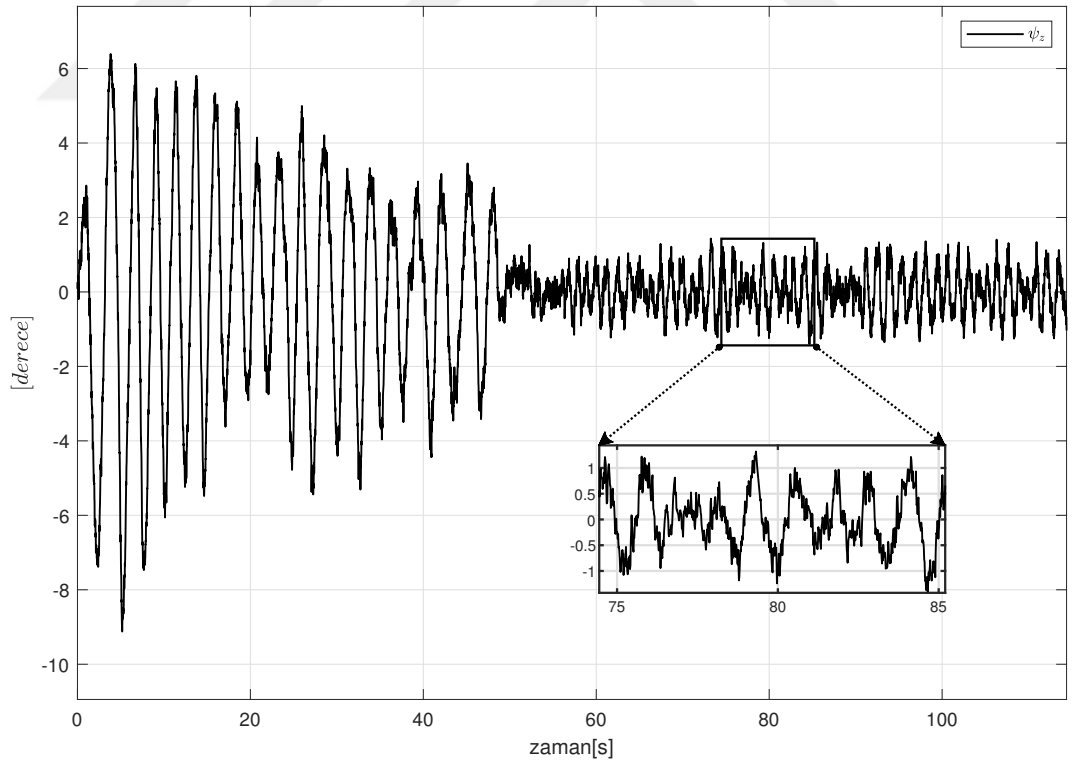
Deneysel çalışma 3 alt bölümde sunulmuştur. İlk alt bölümde, top-robot'u dengelemek için gerekli olan denetleyici kazançları bulunmuş ve sonuçlar sunulmuştur. İkinci alt bölümde, denetleyicinin sıfır olmayan bir referansı takip etmedeki başarımı sunulmuştur. Son alt bölümde ise önerilen denetleyici tasarımındaki son terim adım adım işaret işlevine yaklaştırılarak kayan kipli denetleyicinin neden top-robot'u denetlemek için uygun olmadığı gösterilmiş ve ilgili sonuçlar farklı başarımları içeren bir çizelge ile özetlenmiştir.

4.4.1 Top-robot'un dengelenmesi ve kazançlarının bulunması

Tasarlanan doyum işlevi tabanlı denetleyici, Euler açıları olan yalpa (ψ_x), yunuslama (ψ_y) ve sapma (ψ_z) açılara göre top-robot'un dikey dengesini sağlamak için kullanılmıştır. Yani yalpa ve yunuslama açılarının sıfırda tutulması sağlanmıştır. Ayrıca robotun yönelimini ifade eden sapma açısı da aynı denetleyici kullanılarak sıfırda tutulmaya çalışılmıştır. Euler açıları için elde edilen sonuçlar Şekil 4.2 ve 4.3 ile sunulmuştur.



Şekil 4.2: Yalpa (ψ_x) ve yunuslama (ψ_y) açıları

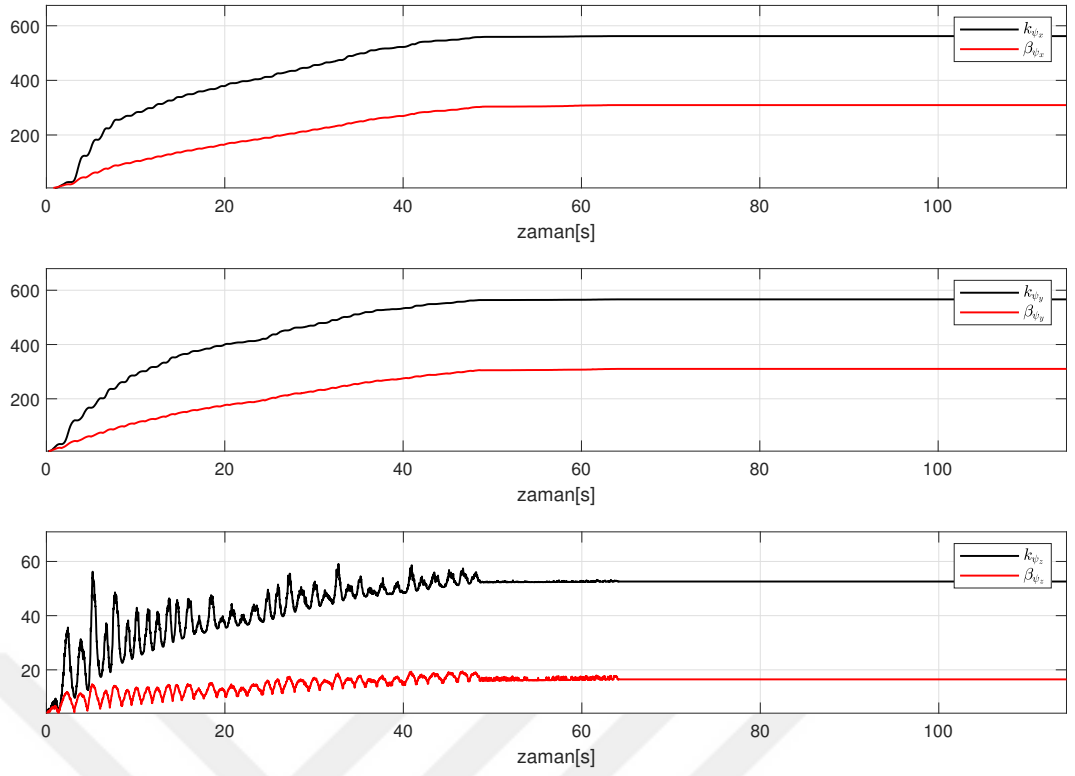


Şekil 4.3: Sapma (ψ_z) açısı

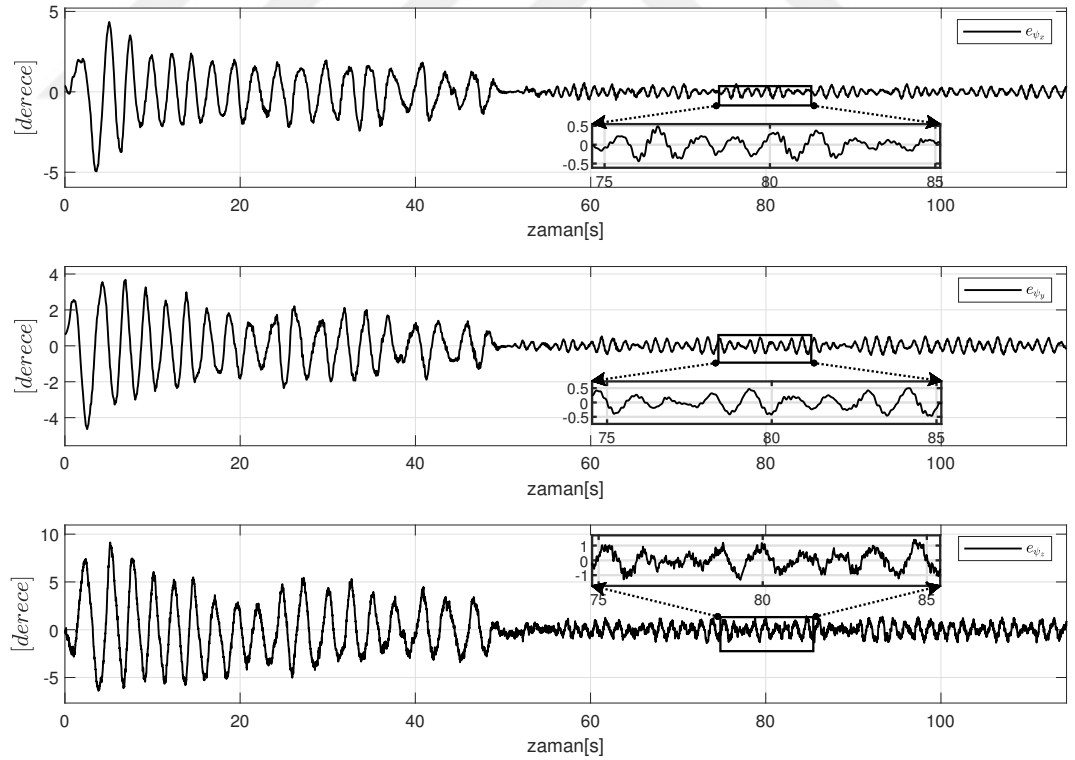
Tasarlanan denetleyicinin çalışması üç farklı senaryolarla test edilebilmektedir. Öncelikle olduğu gibi kullanılabilir. Ya da eldeki sistem durağan duruma ulaştıktan sonra, deney çalışması sırasında kazanç ayarı kapatılabilir ve denetleyici son kaydedilen kazançlarla sabit kazançlı bir hale getirilebilir. Ya da alternatif olarak, önerilen denetleyici eldeki sistemin aşırı çalışma koşulları için çalıştırılarak kazançların son değerleri kaydedilebilir ve deney, zamanla değişen kazançlar yerine bulunan bu sabit kazançlarla yeniden başlatılabilir.

Bu deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada tasarlanan denetleyicinin kazançlarının öz-ayarlı algoritması ile güncellenmesi devreye sokulmuş ve top-robot'un dengede kalabilmesi için gerekli kazançlar bu aşamada bulunmuştur. Top-robot için gerekli kazançları bulmak amacıyla, robot hafifçe tutularak dairesel hareketler yapması için yönlendirilmiştir. Bu işlem 48 saniyeye kadar yapılmış ve ardından robot serbest bırakılmıştır.

Şekil 4.4 ile verilen sonuçlarda görülebileceği gibi, top-robot için gerekli kazançlar sabit bir değer civarına yerleşmektedir. 48. saniyeden sonra robotun kendi kendine dengede durabildiği ve 48. saniyeden sonra kazançların yavaşça değiştiği gözlemlenmiştir. Kazançlar yaklaşık olarak yalpa açısı denetimi için $k_{\psi_x} = 562$, $\beta_{\psi_x} = 310$, yunuslama açısı denetimi için $k_{\psi_y} = 566$, $\beta_{\psi_y} = 310$ ve sapma açısı denetimi için $k_{\psi_z} = 53$, $\beta_{\psi_z} = 17$ civarında seyretmiştir. Hata işaretleri sonuçları Şekil 4.5 ile sunulmuştur. Durağan durumda, hata işaretinin yalpa ve yunuslama açıları için $\pm 0.5^\circ$, sapma açısı için $\pm 1^\circ$ bandında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4: Zamanla değişen kazançlar



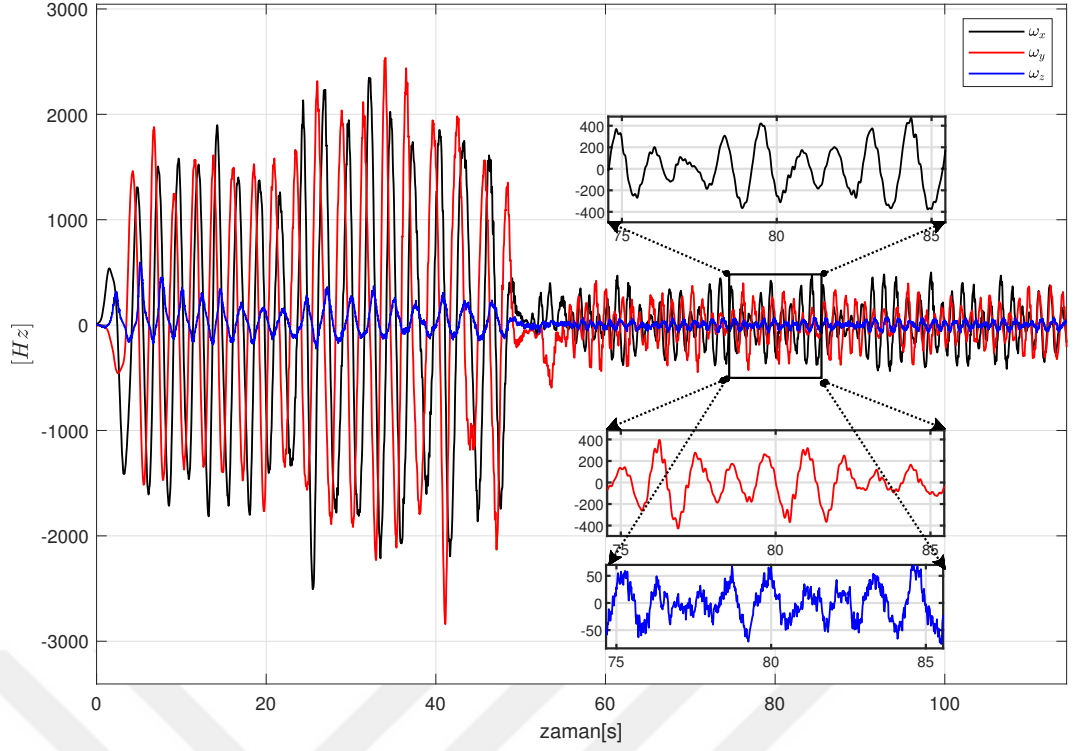
Şekil 4.5: Hata işaretleri

Önerilen doyum tabanlı denetleyicinin $k_i(t)$ ve $\beta_i(t)$ kazançlarının sabit kısımları şu şekilde seçilmiştir: $k_{c_i} = 5$, $\beta_{c_i} = 5$, $\mu_i = 1$, $\kappa_i = 1$. γ_i sapma açısı denetimi için 0.5, yalpa ve yunuslama açılarının denetimi için 5 olarak ayarlanmıştır. ϵ ise 0.5 olarak tanımlanmıştır.

Deneyin ikinci aşamasında 64. saniyede öz-ayarlama algoritması kapatılmış ve ilk aşamada elde edilen sabit kazançlar kullanılmıştır. Bu sabit kazançlar ile top-robot'un başarılı bir şekilde dik durduğu gözlemlenmiştir.

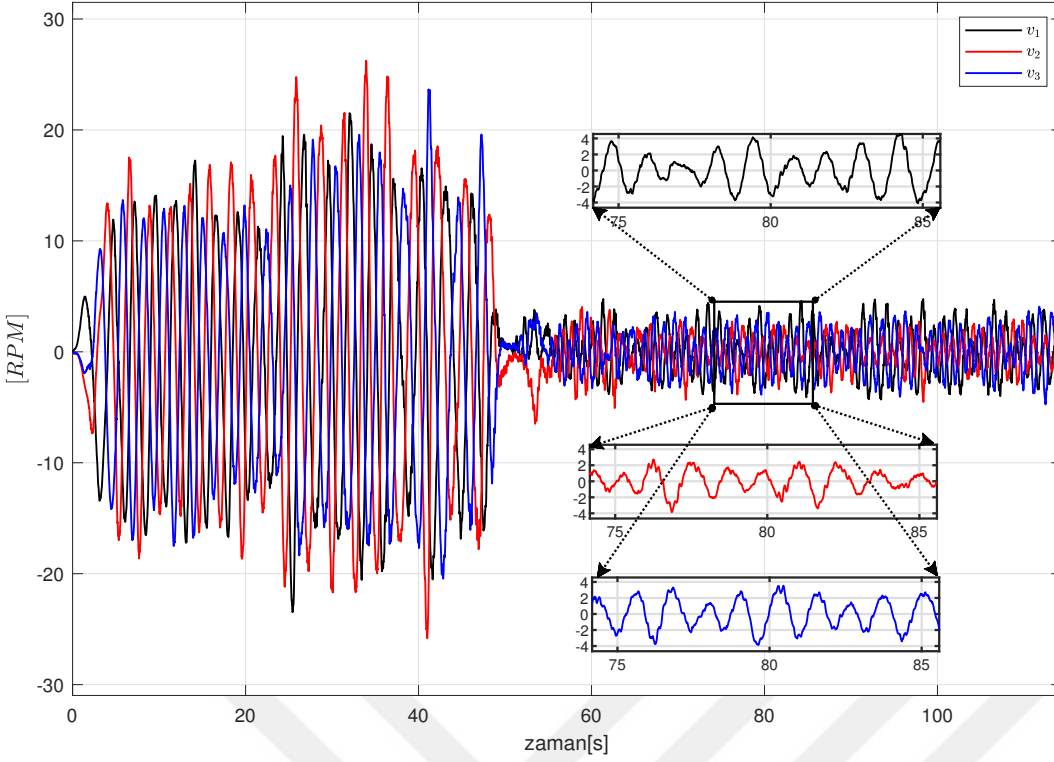
Önerilen denetleyici sabit kazançlarla kullanılabilir ve top-robot için gerekli kazançlar bulunduğu için sonraki kullanımlarda tekrar öz-ayarlama algoritması çalıştırılarak kazanç bulmaya gerek yoktur.

Top-robot'un yalpa, yunuslama ve sapma açısı denetimi için sırasıyla x, y ve z yönlerindeki sanal motorların hızları belirlenmelidir (Alyousify et al., 2022). Top-robot'un dengeleme denetimi için önerilen denetleyici tarafından üretilen ω_x ve ω_y sanal motor hızları ve sapma denetimi için üretilen ω_z denetleyici girişleri Şekil 4.6 ile gösterilmiştir. Top-robot dengelenmiş durumdayken, ω_x ve ω_y denetleyici girişleri $\pm 500 \text{ Hz}$ bandında, ω_z ise $\pm 80 \text{ Hz}$ bandında kalmıştır.



Şekil 4.6: Denetleyici girişi

Denetleyici girişlerini adım motorlarına uygulamak için, tasarlanan denetleyici tarafından üretilen sanal motor hızları, gerçek motor hızlarına dönüştürülmelidir. Gerekli formülasyonlar ve açıklamalar Bölüm 2.1.3 ile sunulmuştur. Gerçek motor hızlarının daha kolay anlaşılması için grafikler, Şekil 4.7 ile Hz yerine RPM birimiyle sunulmuştur. Gerçek motor hızları olan v_1, v_2, v_3 'ün, top-robot dengelenmiş durumdayken $\pm 4 RPM$ bantlarında kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7: Motor hızları

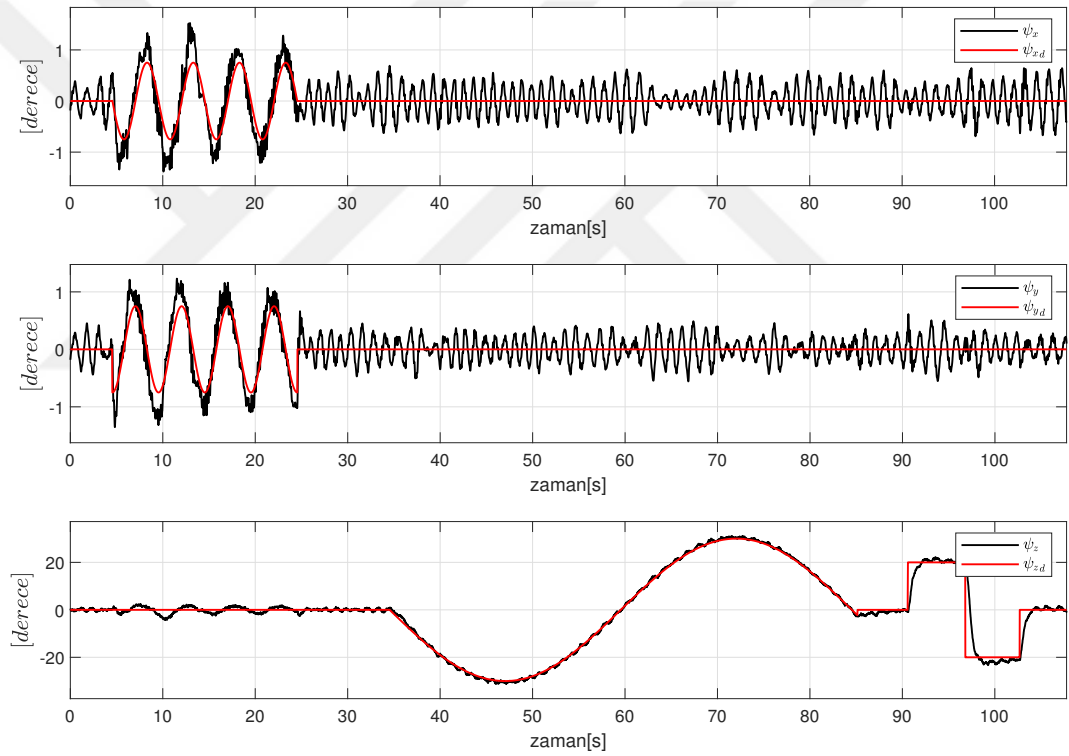
4.4.2 Yörünge takibi uygulaması

Öz-ayarlama algoritmasının koşturulması ile elde edilen denetleyici kazançları, sabit kazançlar olarak alınmış ve top-robot'un sıfırdan farklı bir referansı Euler açıları için takip etmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

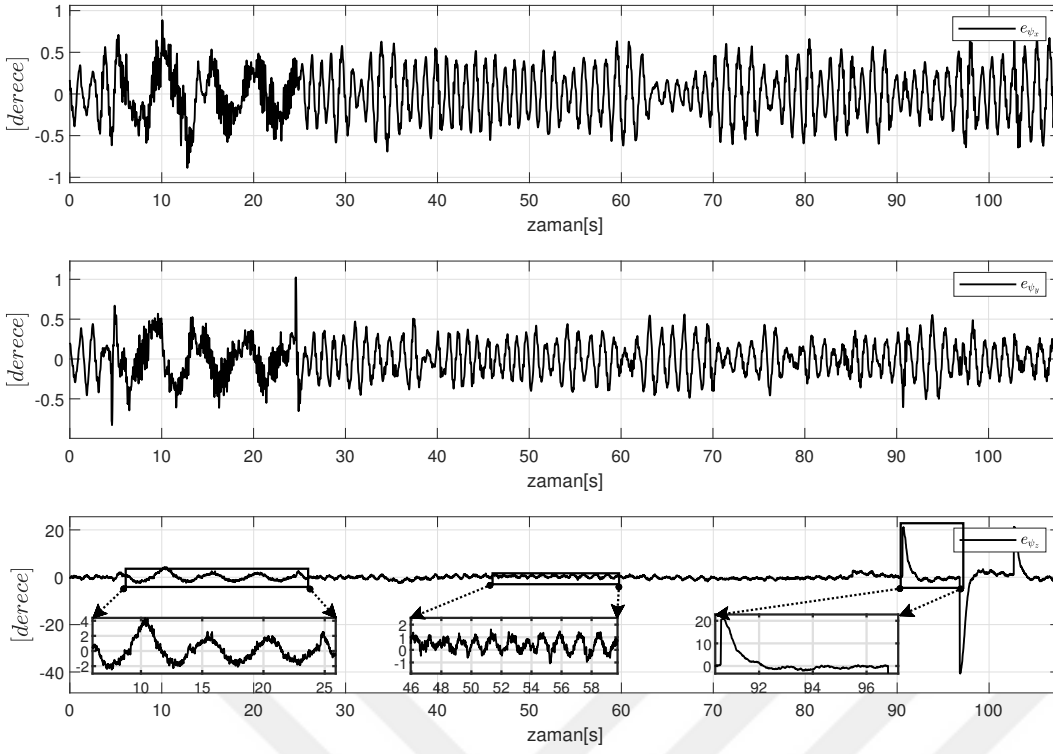
Top-robot, her üç durumda 0° 'den başlayacak şekilde dik durma pozisyonunda başlatılmıştır. Yalpa ve yunuslama açıları için referans yörüngeler, deney çalışmasının 5 ile 25'inci saniyeleri arasında $0, 75^\circ$ büyüklüğünde ve 5 saniye periyodunda sinüzoidal işaretler olarak seçilmiştir ve çalışmanın geri kalanı için 0° olarak seçilmiştir. Bu referans yörünge seçimi, top-robot'un dairesel bir hareket sergilemesine neden olmuştur. Referans sapma açısı için, yalpa ve yunuslama açılarının takip başarımlarının gösterilmesini çok fazla etkilememek amacıyla, başlangıçta 0° referans tercih edilmiştir. Deney çalışmasının 35'inci saniyesinden başlayarak, 30° büyüklüğünde ve 50 saniye periyodunda bir sinüzoidal referans seçilmiş ve bunu çalışmanın geri kalanı için $0^\circ, 20^\circ, -20^\circ, 0^\circ$ sabit adım referansları takip etmiştir. Zamanla değişen referans izleme

sonuçları Şekil 4.8 - 4.11 ile gösterilmiştir.

Euler açılarının ve takip hatalarının zaman içindeki değişimi sırasıyla Şekil 4.8 ve 4.9 ile sunulmuştur. Regülasyon için ayarlanmış denetleyici kazançları kullanılmasına rağmen, yalpa ve yunuslama açıları için izleme hatalarının $\pm 0.5^\circ$ civarında kalması ve sapma açısı takip hatasının yaklaşık $\pm 1^\circ$ bandında kalması sağlanarak, benzer bir başarımla elde edilmiştir. Sapma açısı denetimi için denetleyicinin geçici durum başarımı, önceki bölümde anlatılan kazanç ayarlama sürecinde kazanç ayarlama süresinin artırılması ve kazanç ayarlanırken robotun döndürülmesi ile iyileştirilebilir. Bu sayede top-robot'un sapma açısı denetimi için gerekli olan kazançların daha uygun başarımla sağlanması için ayarlanması sağlanabilir.

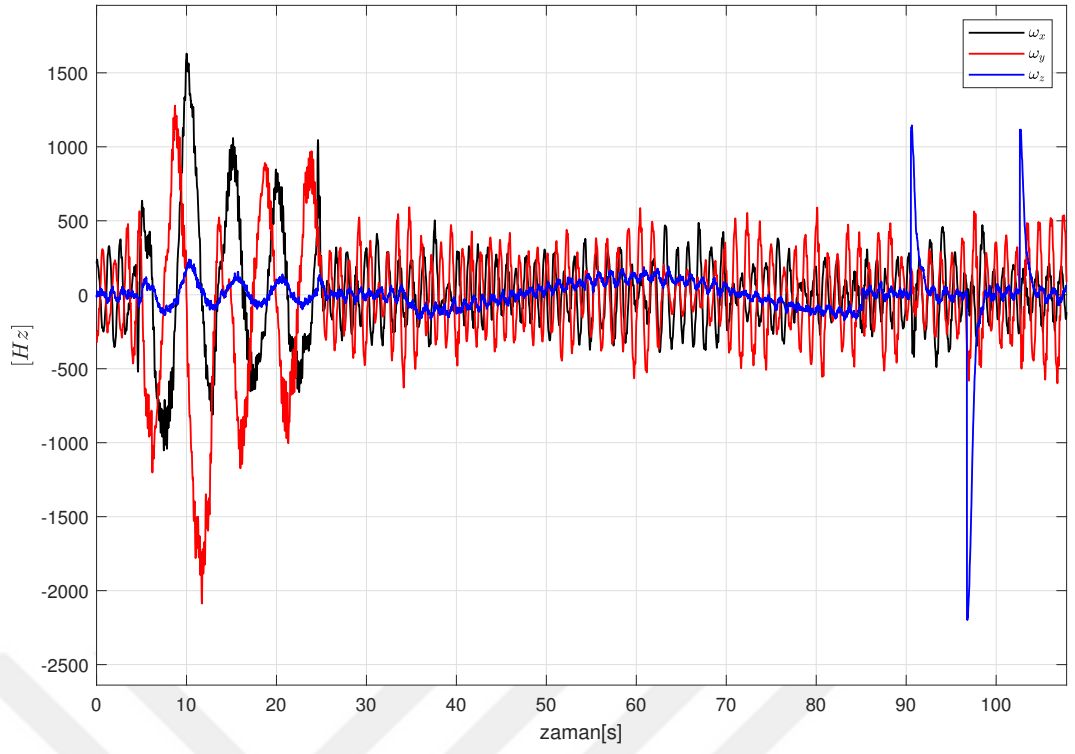


Şekil 4.8: Euler açıları için sıfırdan farklı yörünge takibi sonuçları

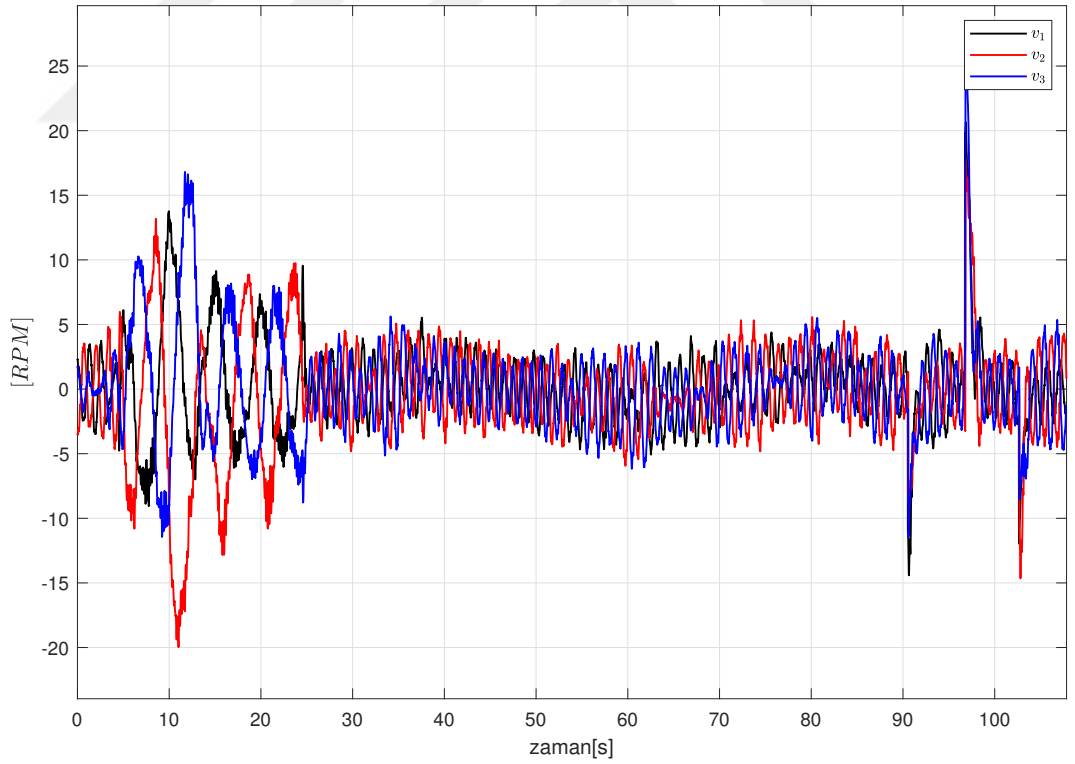


Şekil 4.9: Hata işaretleri

Önerilen denetleyici tarafından üretilen sanal motor hızları Şekil 4.10 ile gösterilirken, adım motorlarının hızları Şekil 4.11 ile gösterilmektedir. Tasarlanan denetleyicinin uygulanabilir motor hızları ürettiği görülmektedir.



Şekil 4.10: Denetleyici girişi



Şekil 4.11: Motor Hızları

4.4.3 Karşılaştırma çalışması

Tasarlanan denetleyicideki son terim model belirsizliklerinin üstesinden gelinmesine hizmet etmektedir. Bu terim, hatanın doyumunun integrali ile önerilen bir öz-ayarlama algoritması tarafından güncellenen $\beta(t)$ kazancının çarpımı olarak sunulmaktadır. Bu son terim hatanın işareti olarak tasarlanırsa, yani doyum işlevi işaret işlevi ile değiştirilseydi ve integral alınmasaydı, denetleyici aşağıdaki formda bir kayan kipli denetleyici olurdu,

$$u_{\text{smc}} = (K + I_n) \left[r(t) - r(0) + \gamma \int_0^t r(\sigma) d\sigma \right] + \beta \text{Sgn}(r(t)). \quad (4.32)$$

Burada $\text{Sgn}(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ vektör işaret işlevidir. Çatırdama olgusu nedeniyle, işaret işlevi genellikle doyum işlevine benzetilerek aşağıdaki formda bir denetleyici elde edilir,

$$u_{\text{sat}} = (K + I_n) \left[r(t) - r(0) + \gamma \int_0^t r(\sigma) d\sigma \right] + \beta \text{Sat}(r(t)). \quad (4.33)$$

Önerilen (4.15) denetleyicisini, denklem (4.32) ile ifade edilen kayan kipli denetleyici ve denklem (4.33) ile ifade yaklaşık sürümü ile karşılaştırmak için çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin hepsinde denge denetimi hedeflenmiş ve denetleyici kazançları Bölüm 4.4.1 altında sonuçları sunulan çalışmada elde edilen sabit değerler olarak seçilmiştir. Bu denetleyicilerin başarımlarını değerlendirmek için bazı denetleyici girişi ve takip hatası ölçütleri tanıtılmıştır. Ortalama değer, $AV(\bullet) = \frac{1}{t_f} \int_{t=0}^{t_f} \|(\bullet)\|$ aracılığıyla deney süresi için hesaplanmaktadır. Burada t_f deneyin son zamanını göstermektedir. Maksimum aralık, $MR(\bullet) = \max\{\|(\bullet)\|_\infty\}$ olarak değerlendirilmektedir. Bir işaretin yumuşaklığını değerlendirmek için iyi bir gösterge olarak kabul edilen değişim, $Var(\bullet) = \max\left\{\left\|\frac{d(\bullet)}{dt}\right\|\right\}$ olarak hesaplanmaktadır (Skogestad, 2003).

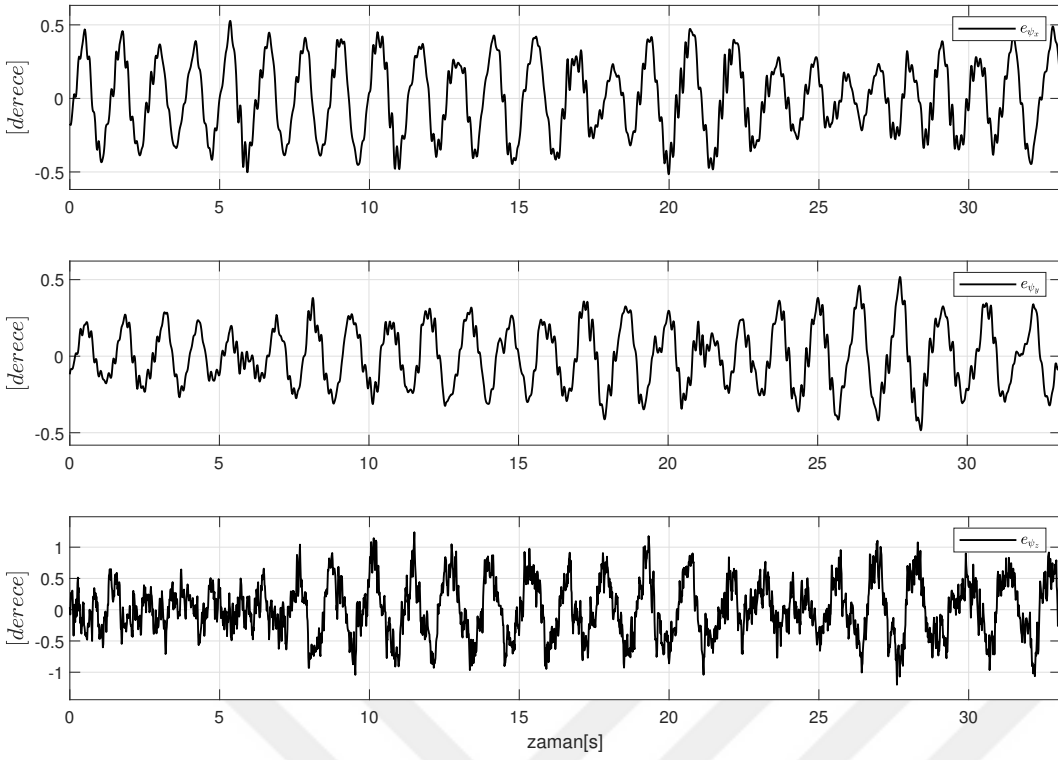
Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1 ile özetle sunulmuştur. Sonuçlardan, önerilen denetleyicinin hem denetleyici girişi hem de hata işaretleri için daha az ortalama, aralık ve değişim sağladığı görülmektedir. Hesaplanan değişim sonuçlarından, önerilen denetleyicinin nispeten daha yumuşak sonuçlar sağladığı da anlaşılmaktadır.

Denetleyici	AV(u)	MR(u)	Var(u)	AV(e)	MR(e)	Var(e)
$u \Rightarrow (4.15)$ ($\epsilon = 0.5$)	368.90	483.33	35.799	0.7426	1.2388	0.17362
$u_{\text{sat}} \Rightarrow (4.33)$ ($\epsilon = 0.5$)	847.51	1204.3	273.28	1.3182	2.4363	0.41675
$u_{\text{sat}} \Rightarrow (4.33)$ ($\epsilon = 0.1$)	1118.7	1705.3	311.53	1.5426	3.6822	0.46349
$u_{\text{smc}} \Rightarrow (4.32)$	1164.4	1570.2	312.77	1.5877	3.6748	0.46167

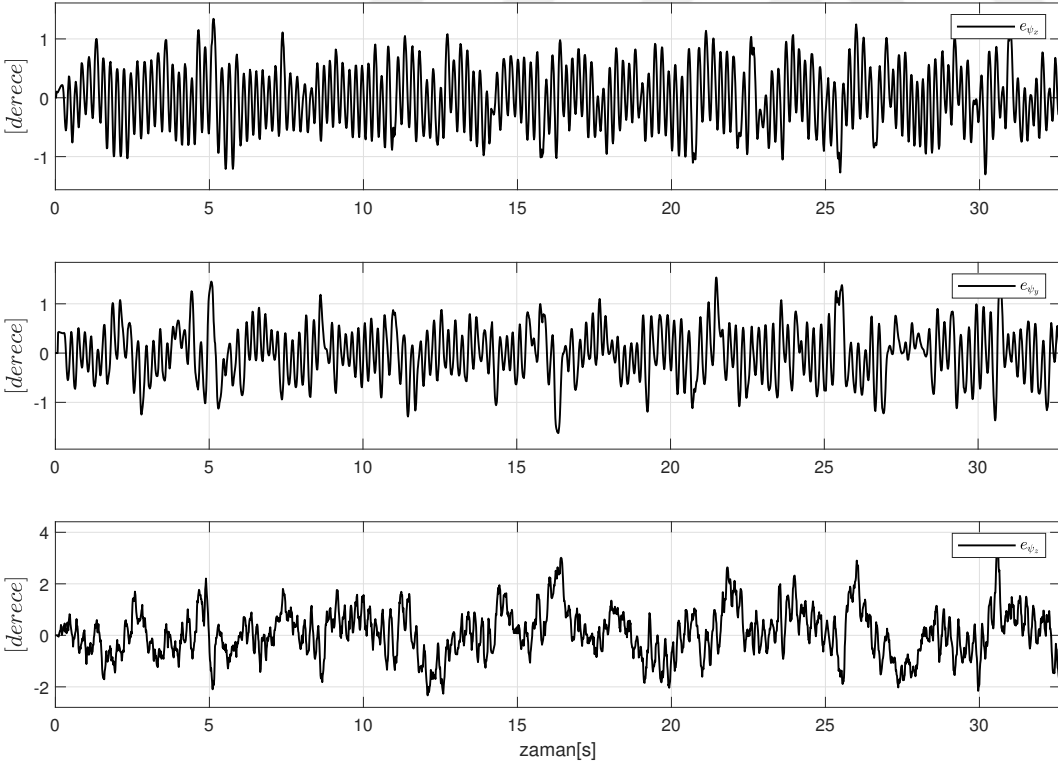
Tablo 4.1: Karşılaştırma çalışması sonuçları

Önerilen denetleyici kayan kipli denetleyiciye yaklaştıkça hata ve denetleyici girişlerinde çatırdama olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 4.1 ile sunulan son 2 durum birbirine çok benzediğinden, bunlar için elde edilen sonuçlar da birbirine benzerdir. Önerilen yöntemin son teriminin, başarımlar kriterleri açısından önemli bir iyileşme sağladığı açıktır.

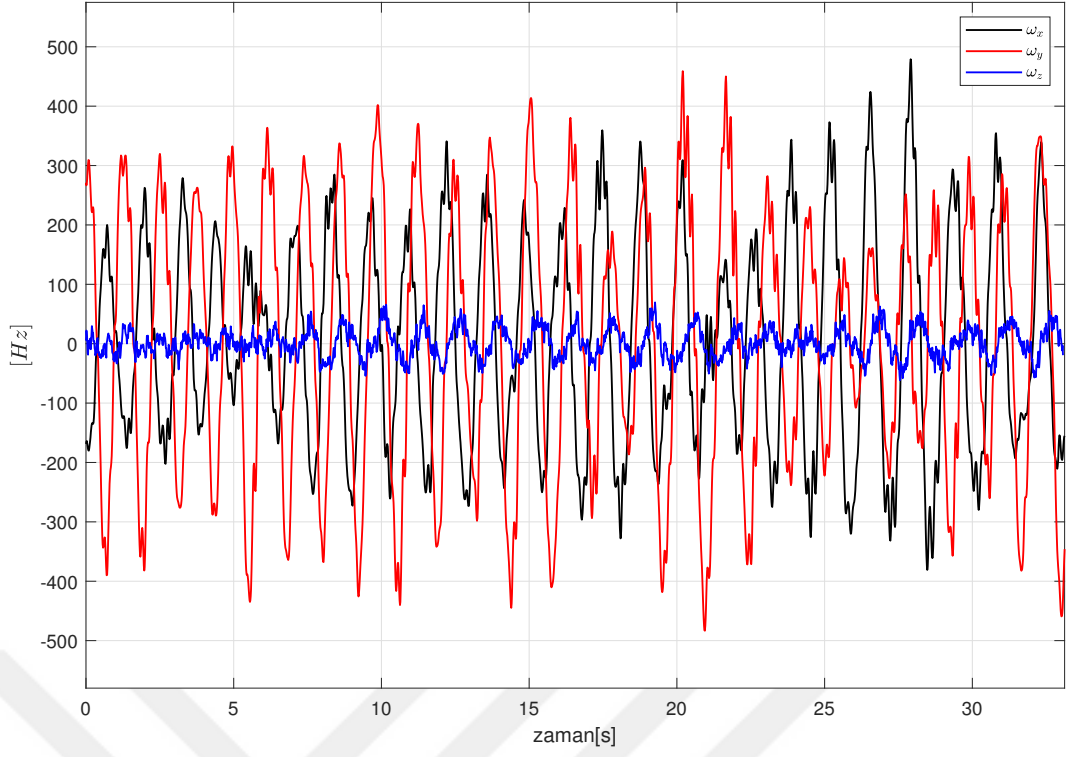
Çizelge 4.1 ile sonuçları verilen deneysel çalışmanın grafik bilgileri Şekiller 4.12 - 4.15 ile gösterilmiştir.



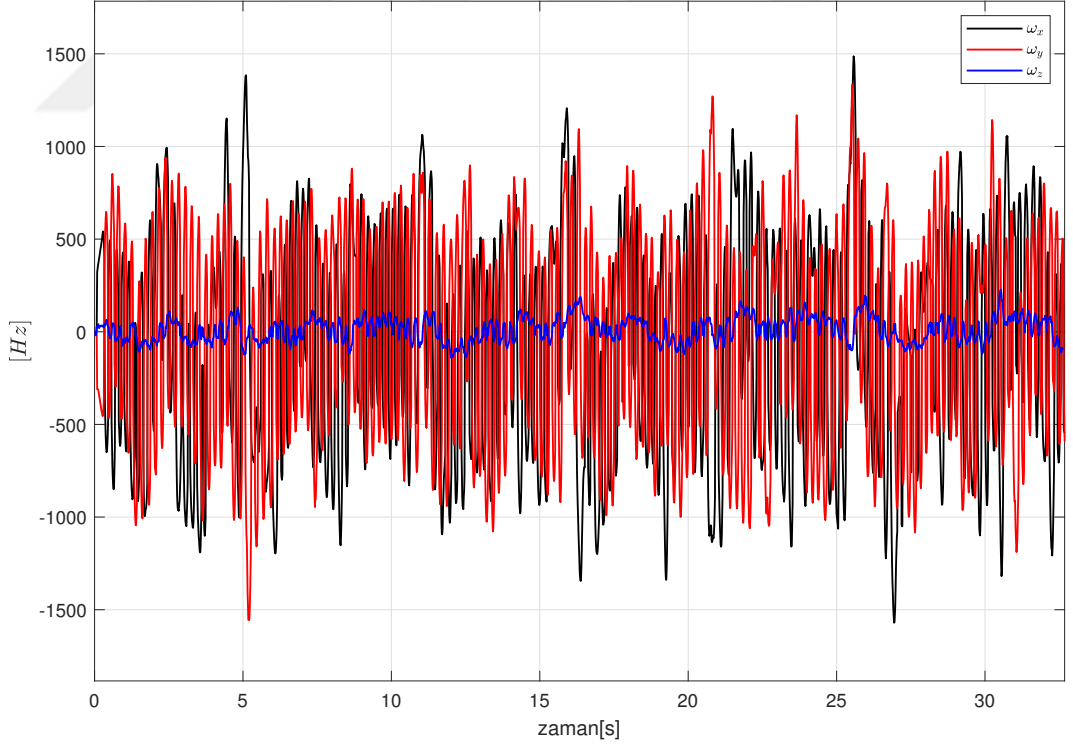
Şekil 4.12: Önerilen denetleyici aktifken hata işaretleri



Şekil 4.13: u_{smc} (4.32) aktifken hata işaretleri



Şekil 4.14: Önerilen denetleyici aktifken denetleyici girişleri



Şekil 4.15: u_{smc} (4.32) aktifken denetleyici girişleri

4.5 Sonuçlar

Tez alışması kapsamında doyum işlevi tabanlı yenilikçi bir gürbüz denetleyici tasarlanmış ve kararlılık analizi sunulmuştur. Tasarlanan denetleyici için herhangi bir model bilgisine ihtiyaç duyulmaması, modeli bilinmeyen sistemlerin denetiminde herhangi bir kazanç ayarlama zahmetine girilmeden kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Doğası gereği kararsız ve ayrıca oldukça hassas olan top-robot düzeneği kullanılarak elde edilen sonuçlar, doyum işlevi tabanlı denetleyicinin dengeleme denetiminde etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. z-ayarlama algoritmasının belirli bir süre çalıştırılması ve top-robota sağ-sol, ileri-geri ve dönme hareketlerinin yapılması, sistem dinamiklerine uygun denetleyici kazançlarının elde edilmesini sağlamıştır. Bu süre uzatılarak ve robota farklı hareketler yaptırılarak daha iyi sonuçları verecek denetleyici kazançlarının bulunması da mümkündür. Deneysel çalışmada top-robot'a dairesel hareketler yaptırılarak öz-ayarlama süreci hızlandırılmış ve gerekli kazançlar bulunmuştur. Yalpa ve yunuslama açılarının yanı sıra sapma açısının sıfırdan farklı referansların takibi denetiminde de başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla gelecek çalışmalarda top-robot'un düzlemdeki konum denetimini sağlayacak bir kaskat denetleyicinin sağlayacağı referans yalpa, yunuslama ve sapma açılarını takip edebileceği gösterilmiştir. Son olarak tasarlanan denetleyicinin kayan kipli denetleyicilere kıyasla daha iyi başarım gösterdiği, karşılaştırmalı olarak izelge şeklinde sunulmuştur. Tasarlanan gürbüz denetleyicinin güçlü yanları:

- Kolay uygulanabilir olması,
- Kararlılık analizinin yapılmış olması,
- Model bilgisine önsel olarak ihtiyaç duymaması,
- Kazançların ayarlanmasına ihtiyaç duymaması,
- Doğası gereği kararsız ve oldukça hassas olan top-robot düzeneğinin dengeleme denetiminde başarıyla uygulanabilmiş olması

şeklinde özetlenebilir.

5 SONUÇ

Tez çalışması kapsamında tasarlanan, doyum işlevi tabanlı öz-ayarlamalı yenilikçi bir hız gözlemcisi tasarımı, kararlılık analizi ile beraber sunulmuştur. Önerilen hız gözlemcisi model bilgisine ihtiyaç duymamaktadır. Tasarım esnasında sistem dinamiklerini kullanmadığından, belirsiz dinamik terimlere sahip sistemlere uygulanabilecek yapıdadır. Ayrıca, kazanç ayarlama sürecini kolaylaştırmak için, zamanla değişen gözlemci kazancı formülasyonu sunulmuştur. Önerilen tasarımın etkinliğini göstermek için, hız gözlemcisi önce bir top-robot modeli üzerinde benzetim çalışmasıyla doğrulanmıştır. Tasarlanan hız gözlemcisi, top-robot düzeneği üzerinde deneysel olarak da uygulanmıştır ve sayısal türevle hız değişkeninin belirlenmesi durumuna göre başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca dönel ters sarkaç sisteminin denetiminde, denetleyici için gerekli olan hız bilgisi önerilen hız gözlemcisi ile sağlanmış ve ilgili sistem başarılı bir şekilde denetlenebilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tasarlanan hız gözlemcisinin, mekatronik sistemlerin denetiminde kullanılabileceği de gösterilmiştir. Son olarak düzlemsel robot kolunun eklem açısız hızlarının gözlemlenmesinde de önerilen hız gözlemcisi kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Tezde ayrıca, doyum işlevi tabanlı yenilikçi öz-ayarlamalı bir gürbüz denetleyici tasarlanmış ve kararlılık analizi sunulmuştur. Tasarlanan denetleyici, tasarım aşamasında herhangi bir model bilgisine ihtiyaç duymamaktadır. Dolayısıyla, modeli bilinmeyen sistemlerin denetiminde herhangi bir kazanç ayarlama gereksinimi olmadan tasarlanan denetleyici kullanılabilmektedir. Doyum işlevi tabanlı denetleyicinin etkin bir şekilde kullanılabileceği, doğası gereği kararsız ve oldukça hassas olan top-robot'un denge denetiminde başarılı bir şekilde kullanılmasıyla gösterilmiştir. Yalpa ve yunuslama açılarının yanı sıra sapma açısının, sıfırdan farklı yörünge takibi denetiminde de başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla önerilen denetleyicinin sadece regülatör problemlerinde değil yörünge takip uygulamalarında da kullanılabileceği gösterilmiştir. Öz-ayarlama algoritmasının başarılı bir şekilde çalıştığı, aşama

aşama deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca nerilen denetleyicinin, kayan kipli denetleyicilere kıyasla, EL sistemlerin denetiminde daha düşük denetim eforu ve daha küçük hata ile başarım göstereceği karşılaştırmalı bir şekilde ortaya konulmuştur. Hata ve denetim işaretleri için ortalama değer, maksimum aralık ve değişim ltleri kullanılarak elde edilen sonuçlar izelge 4.1 ile sunulmuştur. Önerilen gürbüz denetleyicinin başarımı deneysel olarak gösterilmiştir.



6 ÖNERİLER

Gelecekteki önemli bir araştırma, Denklem (3.1) ile sunulan sistem sınıfı için, (Aksoy et al., 2017), (Hosseini-Pishrobat and Keighobadi, 2019), (Stefanovic and Zhang, 2012) çalışmalarında olduğu gibi, tez çalışması kapsamında tasarlanan hız gözlemcisini entegre ederek bir çıkış geri besleme denetleyicisi tasarlamak olacaktır. Aslında, dönele ters sarkaç üzerinde yapılan deneysel çalışmada, tasarlanan gözlemci, denetim girişinin bir parçası olarak kullanılmıştır. Ancak bu bir eklenti olarak yapılmıştır. Çünkü denetleyici-gözlemci çiftinin kararlılığı analiz edilmemiştir ve bu da doğrusal olmayan sistemler için ayrıştırma ilkesini sağlamadıkları için sorunludur (Krstic et al., 1995). Bu nedenle gelecekteki araştırmalarda, önerilen gözlemci yapısını kullanan bir çıkış geri besleme denetleyicisi tasarlamaya odaklanılacaktır.

Top-robot'un modellenmesi için bir sistem tanımlama yöntemi üzerinde, robotun denetimi için de model tabanlı bir denetleyici üzerinde çalışılması mümkündür.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen denetleyici ile top-robot'un dengede tutulması ve gelecekteki bir çalışma olarak robotun yatay düzlemdeki konumunu denetlemek için başka bir durum geri beslemesi tabanlı denetleyici kullanılması da mümkündür.

Birden fazla top-robot'un, işbirliği içinde ve uzaktan denetimi için uygulamaya yönelik çalışmalar yapmak da mümkündür.

EK AÇIKLAMALAR

A $V_1(t)$ 'nin Negatif Olmadığının İspatı

Önerme 1. *Artı tanımlı, sabit, köşegen bir matrisi β 'nin köşegen elemanları olan β_i , yeterince büyük seçilmesi koşuluyla, denklem (3.15) ile tanımlanan $V_1(t)$ negatif değildir.*

Kanıt. Aşağıda tanımı verilen $L(t) \in \mathbb{R}$ için

$$L \triangleq r^T [f - \beta \text{Sat}(\tilde{x})] \quad (\text{A.1})$$

denklem (3.15) ile tanımlanan $V_1(t)$ aşağıdaki yapıda yeniden ifade edilebilir,

$$V_1 = \zeta - \int_0^t L(\sigma) d\sigma. \quad (\text{A.2})$$

Kanıt, pozisyon gözlemci hatasının değerine göre iki farklı alt durum için yürütülecektir. $|\tilde{x}_i(t)| \geq \epsilon$ olduğunda, denklem (3.6) dikkate alındığında, $\text{sat}(\tilde{x}_i) = \text{sgn}(\tilde{x}_i)$ olacaktır. Bu durumda $V_1(t) \geq 0$ olduğu bilinmektedir (Xian et al., 2004b). Dolayısıyla analize $|\tilde{x}_i(t)| < \epsilon$ $i = 1, \dots, n$ durumu için devam edilecektir. Bu durum için, denklem (3.6)'ten, $\text{sat}(\tilde{x}_i) = \frac{1}{\epsilon} \tilde{x}_i$ olduğu bilinmektedir. Bu ve denklem (3.10)'daki r tanımı denklem (A.1)'de yerine yazılırsa ve sonra da elde edilen ifadenin integrali alınırsa,

$$\begin{aligned} \int_0^t L(\sigma) d\sigma &= \sum_{i=1}^n \left[\int_0^t \dot{\tilde{x}}_i(\sigma) \left(f_i(\sigma) - \frac{\beta_i}{\epsilon} \tilde{x}_i(\sigma) \right) d\sigma \right] \\ &+ \sum_{i=1}^n \left[\int_0^t \tilde{x}_i(\sigma) \left(f_i(\sigma) - \frac{\beta_i}{\epsilon} \tilde{x}_i(\sigma) \right) d\sigma \right] \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

elde edilir. Birinci integralin içerisindeki integrallerin hesaplanmasının sonucunda,

$$\int_0^t L(\sigma) d\sigma = \sum_{i=1}^n \left[\tilde{x}_i(t) f_i(t) - \tilde{x}_i(0) f_i(0) - \frac{\beta_i}{2\epsilon} \tilde{x}_i^2(t) + \frac{\beta_i}{2\epsilon} \tilde{x}_i^2(0) + \int_0^t \tilde{x}_i(\sigma) \left(f_i(\sigma) - \frac{df_i(\sigma)}{d\sigma} - \frac{\beta_i}{\epsilon} \tilde{x}_i(\sigma) \right) d\sigma \right] \quad (\text{A.4})$$

bulunur. Benzer terimleri yeniden gruplamak, denklem (A.4) ile verilen ifadenin sağ tarafını alttaki şekilde üstten sınırlanmasını sağlar,

$$\int_0^t L(\sigma) d\sigma \leq \sum_{i=1}^n \int_0^t |\tilde{x}_i(\sigma)| \left(|f_i(\sigma)| + \left| \frac{df_i(\sigma)}{d\sigma} \right| - \frac{\beta_i}{\epsilon} |\tilde{x}_i(\sigma)| \right) d\sigma + \sum_{i=1}^n \left(|\tilde{x}_i(t)| |f_i(t)| - \frac{\beta_i}{2\epsilon} \tilde{x}_i^2(t) \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\beta_i}{2\epsilon} \tilde{x}_i^2(0) - \tilde{x}_i(0) f_i(0) \right). \quad (\text{A.5})$$

$\delta \leq |\tilde{x}_i(t)|$ koşulu için, denklem (A.5) ile elde edilen eşitsizliğin sağ tarafı için aşağıdaki üst sınır elde edilebilir,

$$\int_0^t L(\sigma) d\sigma \leq \sum_{i=1}^n \int_0^t \left(\epsilon |f_i(\sigma)| + \epsilon \left| \frac{df_i(\sigma)}{d\sigma} \right| - \frac{\beta_i \delta^2}{\epsilon} \right) d\sigma + \sum_{i=1}^n \left(\epsilon |f_i(t)| - \frac{\beta_i \delta^2}{2\epsilon} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\beta_i}{2\epsilon} \tilde{x}_i^2(0) - \tilde{x}_i(0) f_i(0) \right). \quad (\text{A.6})$$

Üstteki ifadenin elde edilmesinde $|\tilde{x}_i(t)| \leq \epsilon$ bilgisi de kullanılmıştır. β 'nin köşegen elemanlarının,

$$\beta_i > \frac{\epsilon^2}{\delta^2} \max \{ 2|f_i(t)|, |f_i(t)| + |\dot{f}_i(t)| \} \quad i = 1, \dots, n, \quad \forall t \quad (\text{A.7})$$

koşulunu sağlaması halinde, (A.6) denkleminin birinci ve ikinci satırları negatif olacaktır. Dolayısıyla,

$$\int_0^t L(\sigma) d\sigma \leq \zeta \quad \forall \quad |\tilde{x}_i(t)| \geq \delta \quad (\text{A.8})$$

ifadesi (A.5) denkleminin üçüncü satırına eşit olacak şekilde tanımlanan sabit $\zeta \in \mathbb{R}$ değerleri için sağlanmaktadır. Dolayısıyla (3.15) denkleminde tanımlanan $V_1(t)$ 'nin pozitif olduğu sağlanmaktadır.

Denklem (A.7) ile sunulan kazanç koşulu yüksek bir kazanç şartını gerektirmekte olup özellikle $|\tilde{x}_i(t)|$ gittikçe küçüldüğünde, β_i 'nin artması gerekir ve sonunda $|\tilde{x}_i(t)|$, δ yarıçaplı hiperkürenin içine girmesinin ardından β_i maksimum değerine ulaşır. Bu nedenle hiperkürenin büyüklüğünü belirleyen δ sabitinin seçimi, kazanç değerini sınırlamak için önemlidir. \square



B $V_q(t)$ 'nin Pozitif Olduğunun İspatı

Sunum kolaylığı açısından $q(t) \in \mathbb{R}$ ile gösterilen terim

$$q \triangleq \int_0^t s^T(\sigma) [h_d(\sigma) - \beta \text{Sat}(r(\sigma))] d\sigma \quad (\text{B.1})$$

yapısında tanımlanmıştır. Bu tanımın kullanılmasıyla denklem (4.25),

$$V_q = \zeta_q - q \quad (\text{B.2})$$

şeklinde yeniden yazılabilir.

V_q teriminin negatif olmadığını analiz ederken iki durum incelenecektir. $|r_i(t)| \geq \epsilon$ olduğu zaman $\text{sat}(r_i) = \text{sgn}(r_i)$ olur. Dolayısıyla V_q 'nin eksi olmayışı (Xian et al., 2004b) içerisindeki Önerme 1'den gelir. Bu sebeple $|r_i(t)| < \epsilon$ durumu incelenecektir. Bu durumda, $\text{sat}(r_i(t)) = \frac{1}{\epsilon} r_i(t)$ olur ve bunu, denklem (4.5) ile birlikte denklem (B.1) içinde kullanarak,

$$q = \sum_{i=1}^n \left[\int_0^t \dot{r}_i(\sigma) h_{d_i}(\sigma) d\sigma - \frac{\beta_i}{\epsilon} \int_0^t \dot{r}_i(\sigma) r_i(\sigma) d\sigma + \gamma_i \int_0^t r_i(\sigma) h_{d_i}(\sigma) d\sigma - \frac{\gamma_i \beta_i}{\epsilon} \int_0^t r_i^2(\sigma) d\sigma \right] \quad (\text{B.3})$$

ifadesi elde edilir. Birinci ve üçüncü integraller hesaplandığında,

$$q = \sum_{i=1}^n \left[(r_i(\sigma) h_{d_i}(\sigma)) \Big|_{\sigma=0}^{\sigma=t} - \int_0^t r_i(\sigma) \frac{dh_{d_i}(\sigma)}{d\sigma} d\sigma - \frac{\beta_i}{2\epsilon} (r_i^2(\sigma)) \Big|_{\sigma=0}^{\sigma=t} + \gamma_i \int_0^t r_i(\sigma) h_{d_i}(\sigma) d\sigma - \frac{\gamma_i \beta_i}{\epsilon} \int_0^t r_i^2(\sigma) d\sigma \right] \quad (\text{B.4})$$

ifadesine ulaşılır. Denklem (B.4)'in sağ tarafı yeniden yazılırsa,

$$q = \sum_{i=1}^n \left[r_i(t) h_{d_i}(t) - r_i(0) h_{d_i}(0) - \frac{\beta_i}{2\epsilon} r_i^2(t) + \frac{\beta_i}{2\epsilon} r_i^2(0) + \int_0^t \left(\gamma_i r_i(\sigma) h_{d_i}(\sigma) - r_i(\sigma) \frac{dh_{d_i}(\sigma)}{d\sigma} - \frac{\gamma_i \beta_i}{\epsilon} r_i^2(\sigma) \right) d\sigma \right] \quad (\text{B.5})$$

bulunur. Yukarıdaki ifadenin sağ tarafı üstten sınırlandırıldığında,

$$q \leq \sum_{i=1}^n \left[|r_i(t)| |h_{d_i}(t)| - \frac{\beta_i}{2\epsilon} r_i^2(t) + \frac{\beta_i}{2\epsilon} r_i^2(0) - r_i(0) h_{d_i}(0) \right. \\ \left. + \gamma_i \int_0^t |r_i(\sigma)| \left(|h_{d_i}(\sigma)| + \frac{1}{\gamma_i} \left| \frac{dh_{d_i}(\sigma)}{d\sigma} \right| - \frac{\beta_i}{\epsilon} |r_i(\sigma)| \right) d\sigma \right] \quad (\text{B.6})$$

elde edilir. Bu durumda, $|r_i(t)| < \epsilon$ ve $\delta < |r_i(t)|$ alt sınırını değerlendirdikten sonra denklem (B.6)'deki sağ tarafı aşağıdaki biçimde üstten daha da sınırlandırılabilir,

$$q \leq \sum_{i=1}^n \left[\epsilon |h_{d_i}(t)| - \frac{\beta_i}{2\epsilon} r_i^2(t) + \frac{\beta_i}{2\epsilon} r_i^2(0) - r_i(0) h_{d_i}(0) \right. \\ \left. + \gamma_i \int_0^t \left(\epsilon |h_{d_i}(\sigma)| + \frac{\epsilon}{\gamma_i} \left| \frac{dh_{d_i}(\sigma)}{d\sigma} \right| - \frac{\beta_i \delta^2}{\epsilon} \right) d\sigma \right]. \quad (\text{B.7})$$

Denklem (B.7) ile verilen ifadenin sağ tarafındaki kısımdan, ζ_q ,

$$\zeta_q \triangleq \frac{\beta_i}{2\epsilon} r_i^2(0) - r_i(0) h_{d_i}(0) \quad (\text{B.8})$$

olarak tanımlandığında ve β_i 'nin denklem (4.23) şartını karşılayacak şekilde seçilmesi koşuluyla, $\zeta_q \geq q(t) \forall t$ olur ve dolayısıyla $V_q(t)$ 'nin eksi olmadığı kanıtlanmış olur.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aksoy, O., Zergeroglu, E., and Tatlicioglu, E.,** 2017, On adaptive output feedback control robotic manipulators with online disturbance estimation, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 85, 633–649.
- Alyousify, M.A., Abbas, H.S., Hassan, M.M.M., and Amin, M.H.,** 2022, Parameter Identification and Control of a Ball Balancing Robot, in *International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*, pages 91–97.
- Apaza-Perez, W.A., Moreno, J.A., and Fridman, L.,** 2019, Global sliding mode observers for some uncertain mechanical systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 65(3), 1348–1355.
- Aranovskiy, S., Ortega, R., Romero, J.G., and Sokolov, D.,** 2019, A globally exponentially stable speed observer for a class of mechanical systems: Experimental and simulation comparison with high-gain and sliding mode designs, *International Journal of Control*, 92(7), 1620–1633.
- Astolfi, A., Ortega, R., and Venkatraman, A.,** 2010, A globally exponentially convergent immersion and invariance speed observer for mechanical systems with non-holonomic constraints, *Automatica*, 46(1), 182–189.
- Bayrak, A., Tatlicioglu, E., Zergeroglu, E., and Deniz, M.,** 2015, A new continuous velocity observer formulation for a class of uncertain nonlinear mechanical systems, in *IEEE Conference on Control Applications*, pages 1278–1283.
- Belanger, P.,** 1992, Estimation of angular velocity and acceleration from shaft encoder measurement, in *IEEE Conference on Robotics & Automation*, pages 585–592.
- Bidikli, B. and Bayrak, A.,** 2018, A self-tuning robust full-state feedback control design for the magnetic levitation system, *Control Engineering Practice*, 78, 175–185.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bidikli, B., Tatlicioglu, E., Bayrak, A., and Zergeroglu, E.,** 2013, A new Robust ‘Integral of Sign of Error’ feedback controller with adaptive compensation gain, in *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, pages 3782–3787.
- Bidikli, B., Tatlicioglu, E., and Zergeroglu, E.,** 2014, A self tuning RISE controller formulation, in *American Control Conference*, pages 5608–5613.
- Bidikli, B., Tatlicioglu, E., and Zergeroglu, E.,** 2016, A self-tuning velocity observer formulation for a class of nonlinear systems, in *IEEE Conference on Decision and Control*, pages 3751–3756.
- Chang, S.B. and Perng, M.H.,** 1996, State estimation from incremental sensor data corrupted by track miscounts and a detection delay, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 4(1), 65–71.
- Cruz-Zavala, E., Moreno, J.A., and Fridman, L.,** 2010, Uniform second-order sliding mode observer for mechanical systems, in *International Workshop on Variable Structure Systems*, pages 14–19.
- Dasdemir, J. and Zergeroglu, E.,** 2015, A new continuous high-gain controller scheme for a class of uncertain nonlinear systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 25(1), 125–141.
- Davila, J., Fridman, L., and Levant, A.,** 2005, Second-order sliding-mode observer for mechanical systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(11), 1785–1789.
- Deniz, M., Bayrak, A., Tatlicioglu, E., and Zergeroglu, E.,** 2018, A model-free continuous velocity observer formulation with self-tuning for mechatronic systems, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 140(5), 054501.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dierks, T.** and **Jagannathan, S.**, 2009, Output feedback control of a quadrotor UAV using neural networks, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 21(1), 50–66.
- Dinh, H.T., Kamalapurkar, R., Bhasin, S., and Dixon, W.E.**, 2011, Dynamic neural network-based robust observers for second-order uncertain nonlinear systems, in *IEEE Conference on Decision and Control*, pages 7543–7548.
- Dinh, H.T., Kamalapurkar, R., Bhasin, S., and Dixon, W.E.**, 2014, Dynamic neural network-based robust observers for uncertain nonlinear systems, *Neural Networks*, 60, 44–52.
- Dydek, Z.T., Annaswamy, A.M., and Lavretsky, E.**, 2010, Adaptive control and the NASA X-15-3 flight revisited, *IEEE Control Systems Magazine*, 30(3), 32–48.
- Emami, M. and Taban, M.R.**, 2018, A novel intelligent adaptive Kalman filter for estimating the submarine’s velocity: With experimental evaluation, *Ocean Engineering*, 158, 403–411.
- Espíndola, E. and Tang, Y.**, 2022, A new angular velocity observer for attitude tracking of spacecraft, *ISA Transactions*, 130, 377–388.
- Euston, M., Coote, P., Mahony, R., Kim, J., and Hamel, T.**, 2008, A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV, in *2008 IEEE/RSJ international conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 340–345.
- Gutierrez-Giles, A. and Arteaga-Perez, M.A.**, 2014, GPI based velocity/force observer design for robot manipulators, *ISA Transactions*, 53(4), 929–938.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hosseini-Pishrobat, M.** and **Keighobadi, J.**, 2019, Robust vibration control and angular velocity estimation of a single-axis MEMS gyroscope using perturbation compensation, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 94(1), 61–79.
- Iemolo, R.**, 2019, *Considerations about the development of a Ballbot*, Master's thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
- Inci, H., Alci, M., and Savran, A.**, 2020, An Application of Offset-Free Linear Quadratic Optimal Control, in *Proceedings of 4th International Students Science Congress*, pages 218–228.
- Ioannou, P.** and **Sun, J.**, 1996, *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Jaafar, R.H.** and **Saab, S.S.**, 2020, Approximate differentiator with varying bandwidth for control tracking applications, *IEEE Control Systems Letters*, 5(5), 1585–1590.
- Jespersen, T.K.**, 2019, *Kugle-Modelling and Control of a Ball-balancing robot*, Master's thesis, Aalborg University, Aalborg, Denmark.
- Khalil, H.K.**, 2002, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, New York, NY, USA.
- Khalil, H.K.**, 2017, *High-gain observers in nonlinear feedback control*, SIAM, Philadelphia, PA, USA.
- Kim, E.**, 2004, Output feedback tracking control of robot manipulators with model uncertainty via adaptive fuzzy logic, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 12(3), 368–378.
- Kim, Y.H., Lewis, F.L., and Abdallah, C.T.**, 1997, A dynamic recurrent neural-network-based adaptive observer for a class of nonlinear systems, *Automatica*, 33(8), 1539–1543.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kim, Y.H.** and **Lewis, F.L.**, 1999, Neural network output feedback control of robot manipulators, *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 15(2), 301–309.
- Kokotovic, P.V.**, 1992, The joy of feedback: Nonlinear and adaptive, *IEEE Control Systems Magazine*, 12(3), 7–17.
- Kreyszig, E.**, **Kreyszig, H.**, and **Norminton, E.J.**, 2011, *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley and Sons, Inc. 10th edition.
- Krstic, M.**, **Kokotovic, P.V.**, and **Kanellakopoulos, I.**, 1995, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.
- Levant, A.** and **Livne, M.**, 2020, Robust exact filtering differentiators, *European Journal of Control*, 55, 33–44.
- Lewis, F.L.**, **Dawson, D.M.**, and **Abdallah, C.T.**, 2003, *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*, CRC Press.
- Marquez, H.J.**, 2003, *Nonlinear control systems: analysis and design*, volume 161, John Wiley Hoboken, NJ, USA.
- Moreno, J.**, **Clotet, E.**, **Lupiañez, R.**, **Tresanchez, M.**, **Martínez, D.**, **Pallejà, T.**, **Casnovas, J.**, and **Palacín, J.**, 2016, Design, implementation and validation of the three-wheel holonomic motion system of the assistant personal robot (APR), *Sensors*, 16(10), 1658.
- Nicosia, S.** and **Tomei, P.**, 1990, Robot control by using only joint position measurements, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(9), 1058–1061.
- Onder, M.**, **Bayrak, A.**, and **Aksoy, S.**, 2022, RISE-based backstepping control design for an electro-hydraulic arm system with parametric uncertainties, *International Journal of Control*, 95(10), 2815–2827.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Patil, O.S., Sun, R., Bhasin, S., and Dixon, W.E.**, 2022, Adaptive control of time-varying parameter systems with asymptotic tracking, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(9), 4809–4815.
- Pérez-Ventura, U. and Fridman, L.**, 2017, Is It Reasonable to Substitute Discontinuous SMC by Continuous HOSMC?, doi:10.48550/arXiv.1705.09711.
- Qu, Z.**, 1998, *Robust Control of Nonlinear Uncertain Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.
- Qu, Z. and Xu, J.X.**, 2002a, Model-based learning controls and their comparisons using Lyapunov direct method, *Asian Journal of Control*, 4(1), 99–110.
- Qu, Z. and Xu, J.X.**, 2002b, Model-Based Learning Controls And Their Comparisons Using Lyapunov Direct Method, *Asian Journal of Control*, 4(1), 99–110.
- Quanser**, 2014, *QUBE-Servo User Manuals*.
- Romero, J.G., Moreno, J.A., and Aguilar, A.A.M.**, 2021, An adaptive speed observer for a class of nonlinear mechanical systems: Theory and experiments, *Automatica*, 130(109710).
- Sastry, S. and Bodson, M.**, 1989, *Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., and Levant, A.**, 2014, *Sliding mode control and observation*, Springer.
- Skogestad, S.**, 2003, Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning, *Journal of Process Control*, 13(4), 291–309.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Spong, M.W., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M.**, 2020, *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons.
- Stefanovic, M. and Zhang, H.**, 2012, Results on the robust observer-based position controller for parallel kinematic machines, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 66, 417–428.
- Stein, G.**, 2003, Respect the unstable, *IEEE Control Systems Magazine*, 23(4), 12–25.
- Su, Y.X., Zheng, C.H., Mueller, P.C., and Duan, B.Y.**, 2006, A simple improved velocity estimation for low-speed regions based on position measurements only, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(5), 937–942.
- Su, Y.**, 2016, A simple global asymptotic convergent observer for uncertain mechanical systems, *International Journal of Systems Science*, 47(4), 903–912.
- Wang, Z., Chen, Y., and Fang, N.**, 2004, Minimum-time swing-up of a rotary inverted pendulum by iterative impulsive control, in *American Control Conference*, pages 1335–1340.
- Xian, B., Dawson, D.M., de Queiroz, M.S., and Chen, J.**, 2004a, A continuous asymptotic tracking control strategy for uncertain nonlinear systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(7), 1206–1211.
- Xian, B., de Queiroz, M.S., Dawson, D.M., and McIntyre, M.L.**, 2004b, A discontinuous output feedback controller and velocity observer for nonlinear mechanical systems, *Automatica*, 40(4), 695–700.
- Xian, B. and Zhang, Y.**, 2016, A new smooth robust control design for uncertain nonlinear systems with non-vanishing disturbances, *International Journal of Control*, 89(6), 1285–1302.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Young, K.D., Utkin, V.I., and Ozguner, U., 1999, A control engineer's guide to sliding mode control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 7(3), 328–342.

Yuan, Q., Asadi, E., Lu, Q., Yang, G., and Chen, I.M., 2019, Uncertainty-based IMU orientation tracking algorithm for dynamic motions, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 24(2), 872–882.



TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım boyunca verdiği destek, tecrübe, motivasyon ve danışmanlık için kıymetli hocam, danışmanım Sayın Prof. Dr. Aydoğan SAVRAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca desteklerini, katkılarını esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Enver TATLICIOĞLU, Sayın Prof. Dr. Serdar İPLİKÇİ, Sayın Prof. Dr. Musa ALCI ve Sayın Doç Dr. Barış BİDİKLİ'ya şükranlarımı sunuyorum.

Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a 121E296 numaralı proje ile doktora tezimi desteklediği için teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması süresince her türlü desteğiyle, katkısıyla her zaman yanımda olan Dr. Erman SELİM'e çok teşekkür ederim. Dostluklarıyla her daim motivasyonumu yükselten, destek olan arkadaşlarım Dr. Bayram Melih YILMAZ'a ve Arş. Gör. Şükrü ÜNVER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca bana güven ve destek veren aileme, bilhassa anneme derinden minnet duyuyorum, çok teşekkür ediyorum. Sonsuz sabrı, anlayışı ve desteği için eşime çok teşekkür ediyorum. Bu doktora tezimi, canımdan çok sevdiğim sevgili çocuklarım Furkan ve Yusuf'a ithaf ediyorum.

26/12/2023

İmzası

Hazin İNCİ

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Nuriye Çelebi Eser İlköğretim okulunda, lise öğrenimini ise Namık Kemal Lisesi'nde tamamladı. 2008 yılında Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nde lisans eğitimine başladı. 2011-2012 yıllarında Erasmus Öğrenci Değişim programı aracılığıyla Hollanda'nın Eindhoven şehrinde yer alan Fontys University of Applied Sciences üniversitesinde bulundu. 2013 yılında Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2014 yılında Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) ile Adıyaman Üniversitesi'ne araştırma görevlisi olarak atandı. 2014 yılında Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hem araştırma görevlisi olarak çalışmaya hem de lisansüstü eğitimini almaya başladı. 2017 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamasının hemen akabinde, aynı üniversite ve anabilim dalında doktora eğitimine başladı. Evli ve 2 çocuk babasıdır.

Yayınlar;

- **Inci, H., Alci, M., and Savran, A.,** 2020, An Application of Offset-Free Linear Quadratic Optimal Control, in *Proceedings of 4th International Students Science Congress, pages 218–228.*
- **Inci, H., Selim, E., Tatlicioglu, E., Zengeroglu, E., and Savran, A.,** 2023, A saturation based self-tuned robust control design for Euler Lagrange systems, in *ISA Transactions (incelemede)*
- **Inci, H., Selim, E., Tatlicioglu, E., Zengeroglu, E., and Savran, A.,** 2023, A new self-tuned velocity observer design for mechatronic systems, in *IET Control Theory & Applications (revizyon aşamasında)*

Görev alınan projeler;

- Top-Robot Geliştirilmesi ve İşbirlikçi Uygulama Senaryolarında Kullanılması, TÜBİTAK 1005, Bursiyer:Hazin İnci, Yürütücü:Enver Tatlicioglu, Araştırmacı:Erman Selim, Araştırmacı:Bayram Melih Yılmaz, 11/07/2021 - 04/05/2023 (ULUSAL)

- Kontrol Laboratuvarı Deney Setleri Altyapı Projesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Yürütücü: Aydoğan Savran, Araştırmacı: Hazin İnci, Araştırmacı: Erman Selim, 06/12/2016 - 20/04/2020 (ULUSAL)
- Endüstriyel Sistemlerin Model Öngörülü Kontrolü, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Yürütücü: Aydoğan Savran, Araştırmacı: Hazin İnci, 07/06/2016 - 27/09/2019 (ULUSAL)
- Veri Odaklı Modelleme Temelli Durum Uzayında Kontrol Sistemi Tasarımı Ve Gerçeklenmesi, TÜBİTAK 1001, Yürütücü:Aydoğan Savran,Bursiyer:Hazin İnci,Bursiyer:Kemal Büyükkabasakal,Bursiyer:Yusuf Atalay, 01/04/2015 - 26/01/2017 (ULUSAL)