

BİR TOP VE ÇUBUK SİSTEMİNİN DENETİMİ

CONTROL OF A BALL AND BEAM SYSTEM

BURCU ULUDOĞAN

PROF. DR. HÜSEYİN DEMİRCİOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

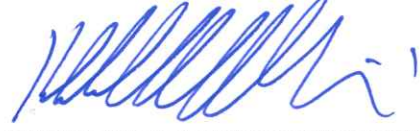
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2019

BURCU ULUDOĞAN'nın hazırladığı “**Bir Top ve Çubuk Sisteminin Denetimi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kemal LEBLEBİCİOĞLU

Başkan



Prof. Dr. Hüseyin DEMİRCİOĞLU

Danışman



Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Derya ALTUNAY

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Şölen Kumbay YILDIZ

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

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

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

beyan ederim.

24 / 09 / 2019



Burcu ULUDOĞAN

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin olarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

24 / 09 / 2019

 (İmza)
Burcu ULUDOĞAN

ÖZ

BİR TOP VE ÇUBUK SİSTEMİNİN DENETİMİ

Burcu ULUDOĞAN

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin Demircioğlu

Eylül 2019, 82 Sayfa

Bu çalışmada bir top ve çubuk sisteminin denetimi ele alınmıştır. Top ve çubuk sistemi yapısı gereği doğrusal olmayan, kararsız bir sistemdir. Bu yapısı sebebiyle doğrusal ve doğrusal olmayan denetim yöntemlerinin uygulama çalışmalarında deneysel bir sistem olarak tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında top ve çubuk sisteminin kutup atamalı ve kayan kipli denetim yöntemleri ile denetimi yapılmıştır. Sistemin denetim başarımlarının değerlendirilmesi için benzetim ve gerçek zamanlı uygulama çalışmaları kullanılmıştır. Ölçülemeyen sistem durumları için tam ve indirgenmiş mertebeli gözleyici tasarlanmıştır.

Kutup atamalı denetim ile hem sürekli zamanda hem de kesikli zamanda sistem denetlenmiş, elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Sürekli zamanda elde edilen denetim başarımlarının daha iyi olduğu gözlenmiştir. Sistemin yapısından kaynaklanan sürtünme, ölü bölge gibi doğrusal olmayan bozucu etkilerin sistem başarımına olan etkisi, bozucu kestirimi ve tümlev etkili denetim yöntemleri ile giderilmeye çalışılmıştır.

Elde edilen uygulama sonuçları, kutup atamalı ve kayan kipli denetim yöntemlerinin başarımlarının iyi olduğunu göstermiştir. Sürekli zamanda bozucu kestirimine dayalı kutup atamalı denetim yönteminin en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Top ve çubuk sistemi, doğrusal olmayan sistemler, indirgenmiş mertebeli gözleyici, durum geri beslemesi, kutup atamalı denetim, kayan kipli denetim.

ABSTRACT

CONTROL OF A BALL AND BEAM SYSTEM

Burcu ULUDOĞAN

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: PROF. DR. Hüseyin DEMİRCİOĞLU

September 2019, 82 pages

In this work control of a ball and beam system is considered. Ball and beam system is a nonlinear and unstable system by nature. For this reason, it is an often preferred experiment system in applications of linear and nonlinear control methods. In this work, pole placement control and sliding mode control methods have been applied to a ball and beam system. Simulation and real-time experiments have been used to assess the performance of the control system. Full-order and reduced-order observers have been designed for system states that could not be measured.

The system has been controlled both in continuous-time and discrete-time with pole placement control. Comparisons of these results have shown that continuous-time control yields a more desirable performance. Disturbance observer and integral action methods have been utilized to reduce the impact of nonlinear disturbances due to the nature of the system, such as friction or dead zones, on system performance.

Results obtained in this work indicate that both pole placement control and sliding mode control methods yield acceptable system performance. Among all methods employed,

continuous-time pole placement control based on disturbance estimation provides the best system performance.

Keywords: Ball and beam system, nonlinear systems, reduced order observer, state feedback, pole placement, sliding mode control.

TEŞEKKÜR

Tez alıőmamda bana her zaman büyük sabırla yol gösteren, vazgetiğim ve karamsar olduğum zamanlarda bile vazgememe izin vermeyerek her koőulda bana destek olan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Hüseyin DEMİRCİOğLU'na içtenlikle teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim sürecinde anlayıő ve destekleri için yöneticilerime ve çalışma arkadaőlarıma, baőta Onur Cem Erdoğan olmak üzere tüm servo ekibine, son zamanlara geldiğimde beni sürekli motive eden, yorgunluğumu iten destekleriyle unutturan arkadaőlarıma ve manevi destekleri için aileme, son olarak hayatımdaki varlığı için canım kedim, kızım, Yağmur'uma sonsuz teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZ.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. TOP VE ÇUBUK SİSTEMİ	4
2.1. Matematiksel Model	6
2.2. Durum Uzay Gösterimi	8
2.3. Top ve Çubuk Sisteminin Doğrusallaştırılmış Modeli	9
3. TOP VE ÇUBUK SİSTEMİNİN DENETLENMESİ.....	13
3.1. Sürekli Zamanda Tasarım.....	14
3.1.1. Kutup Atamalı Denetim	14
3.1.2. Tam Mertebeli Gözleyici	15
3.1.3. İndirgenmiş Mertebeli Gözleyici	16
3.1.4. Bozucu Etki Kestirimi	18
3.1.5. Tümlev Etkili Denetim.....	20
3.1.6. Kayan Kipli Denetim	21
3.2. Kesikli Zamanda Tasarım.....	24
3.2.1. Kutup Atamalı Denetim	24
3.2.2. Tam Mertebeli Gözleyici	25
3.2.3. İndirgenmiş Mertebeli Gözleyici	26

3.2.4.	Bozucu Etki Kestirimi	28
3.2.5.	Tümlev Etkili Denetim	29
4.	BENZETİM ÇALIŞMASI	30
4.1.	Sürekli Zaman Kutup Atama	31
4.2.	Kesikli Zaman Kutup Atama	42
4.3.	Kayan Kipli Denetim	46
5.	UYGULAMA SONUÇLARI.....	50
5.1.	Kesikli Zaman Kutup Atama	50
5.2.	Sürekli Zaman Kutup Atama	58
5.3.	Kayan Kipli Denetim	66
6.	SONUÇ.....	70
	KAYNAKLAR	73
	EKLER.....	76
	EK-1 İNGİLİZCE-TÜRKÇE TERİMLER SÖZLÜĞÜ	76
	ÖZGEÇMİŞ	79

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Top ve çubuk sistemi	4
Şekil 2.2. Top ve çubuk sisteminin şematik gösterimi.....	5
Şekil 2.3. Top ve çubuk sistem elemanları.....	7
Şekil 3.1. Bozucu terim eklenmiş sistemin blok şema gösterimi.....	19
Şekil 3.2. Tümlev alıcı eklenmiş sistemin blok şema gösterimi	20
Şekil 4.1. Örnekleme aralığının başarıma etkisi	32
Şekil 4.2. Sürekli zamanda gözleyici kullanılmadığında elde edilen benzetim sonucu	33
Şekil 4.3. Sürekli zamanda tam mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonucu	34
Şekil 4.4. Sürekli zamanda indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonucu	35
Şekil 4.5. Denetim sinyali çıkışına uygulanan ölü bölge	36
Şekil 4.6. Sürekli zamanda ölü bölge eklendiğinde benzetim sonucu	36
Şekil 4.7. Sürekli zamanda bozucu dengeleme yapılmış benzetim sonucu	37
Şekil 4.8. Sürekli zamanda tümlev etkili denetim benzetim sonucu.....	38
Şekil 4.9. Sürekli zamanda ölü bölge eklenildiğinde ve indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonucu	39
Şekil 4.10. Sürekli zamanda bozucu dengeleme yapılmış, indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında benzetim sonucu	40
Şekil 4.11. Sürekli zamanda indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında tümlev etkili denetim benzetim sonucu	41
Şekil 4.12. Kesikli zamanda gözleyici kullanılmadığında elde edilen benzetim sonucu	42
Şekil 4.13. Kesikli zamanda ölü bölge eklenildiğinde ve indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonucu	43
Şekil 4.14. Kesikli zamanda bozucu dengeleme yapılmış, indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında benzetim sonucu	44
Şekil 4.15. Kesikli zamanda, indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında tümlev etkili denetim benzetim sonucu	45
Şekil 4.16. Gözleyici kullanılmadığında kayan kipli denetim benzetim sonucu	46

Şekil 4.17. İndirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında kayan kipli denetim benzetim sonucu.....	47
Şekil 4.18. Denetim sinyali sınırlandırıldığında ve indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında kayan kipli denetim benzetim sonucu.....	48
Şekil 4.19. Ölü bölge eklendiğinde kayan kipli denetim benzetim sonucu.....	49
Şekil 5.1. Kesikli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -30$, $T = 20 ms$	51
Şekil 5.2. Kesikli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$, $T = 20 ms$	52
Şekil 5.3. Kesikli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$, $T = 5 ms$...	53
Şekil 5.4. Kesikli Zamanda Denetim: Farklı isterlerde denetim sonucu	55
Şekil 5.5. Kesikli zamanda bozucu dengeleme yapılmış denetim sonucu.....	56
Şekil 5.6. Kesikli zamanda bozucu dengeleme yapılmış farklı isterlerde denetim sonucu	57
Şekil 5.7. Kesikli zamanda tümlev etkili denetim sonucu	58
Şekil 5.8. Sürekli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -30$, $T = 20 ms$	59
Şekil 5.9. Sürekli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$, $T = 20 ms$	60
Şekil 5.10. Sürekli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$, $T = 5 ms$...	61
Şekil 5.11. Sürekli Zamanda Denetim: Farklı isterlerde denetim sonucu	62
Şekil 5.12. Sürekli zamanda bozucu dengeleme yapılmış denetim sonucu.....	64
Şekil 5.13. Sürekli zamanda bozucu dengeleme yapılmış farklı isterlerde denetim sonucu	65
Şekil 5.14. Sürekli zamanda tümlev etkili denetim sonucu	66
Şekil 5.15. Kayan kipli denetim başarımı.....	68
Şekil 5.16. Farklı isterler için kayan kipli denetim başarımı	69

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Top ve Çubuk Sistemi, sistem parametreleri.	11
---	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

m	Topun kütlesi
r	Topun yuvarlanma yarıçapı
I_b	Topun atalet momenti
I_w	Çubuğun atalet momenti
M	Çubuğun kütlesi
b	Sürme mekaniğinin sürtünme katsayısı
x	Topun konumu
α	Çubuğun açısı
x_1, x_2, x_3, x_4	Sistem durum değişkenleri
A, B, C	Sürekli zaman sistem durum matrisleri
A_D, B_D, C_D	Kesikli zaman sistem durum matrisleri
u	Denetim sinyali
g	Durağan kazanç
K	Denetim kazancı
W_c	Denetlenebilirlik matrisi
W_o	Gözlenebilirlik matrisi
L	Gözleyici kazancı
ϕ	Karakteristik çokterimli
x_d	Bozucu etmen
s	Kayma yüzeyi

Kısaltmalar

DC	Doğrusal Akım
PID	Oransal Tümlensel Türevsel

PD	Oransal Türevsel
PCI	Çevre Birim Bileşen Bağlantısı
CCD	Yük Bağlaşımlı Cihazlar

1. GİRİŞ

Günümüzde modern teknolojik sistemlerin birçoğu karmaşık, doğrusal olmayan ve genellikle de kararsız bir yapıdadır. Bu tür sistemleri denetlemek için birçok çalışma yapılmış ve denetim yöntemleri geliştirilmiştir. Çoğu zaman gerçek sistemler üzerinde çalışmak güvenli ve kolay uygulanabilir adımlardan oluşmamaktadır. Bu nedenle kolay ulaşılabilecek, gerçek karmaşık sistemlere karşılık gelebilecek, üzerinde farklı denetim yöntemlerinin güvenli bir şekilde uygulanabileceği deneysel sistemlere ihtiyaç duyulmuştur. Top ve çubuk sistemi bu amaçla kullanılabilir, doğrusal ve doğrusal olmayan denetim yöntemlerinin laboratuvar ortamında uygulanmasını sağlayan sistemlerden biridir. Kararsız yapıda oluşu ve doğrusal bir sistem olmaması nedeniyle hem doğrusal hem de doğrusal olmayan denetim yöntemlerinin uygulama çalışmalarında deneysel bir sistem olarak tercih edilmektedir.

Literatürde top ve çubuk sistemi üzerine yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda farklı sistem tasarımları ve denetim yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları şunlardır: Berkeley Robotik Laboratuvarında tasarlanmış “Denge Çubuğunda Top” isimli sistemde topun konumunun ölçülmesi için dirençli tel duyurgaç, çubuğun hareketi için dişli yapıya sahip DC motor kullanılmıştır. Sistem denetiminde PD denetim yöntemi uygulanmıştır. Sistem çok basit olduğu, çubuğun açısı okunmadığı için iyi bir denetim başarımı elde edilememiştir [1]. Lakehead Üniversitesi Elektrik-Elektronik Bölümü’nde tasarlanan “Top ve Çubuk Dengeleyici” sistemde benzer şekilde dirençli tel duyurgaç ile topun konum bilgisi elde edilmiş, çubuk denetim sinyali olarak motora gerilim uygulanmış, denetim yöntemi olarak doğrusal karesel denetleyici kullanılmış ve denetim başarımının iyi olduğu görülmüştür [2]. Quanser firmasının “Top ve Çubuk Modülü” isimli bir ticari ürünü bulunmaktadır. Topun konumu diğer sistemlerde de ölçüldüğü gibi dirençli tel duyurgaç kullanılarak ölçülmektedir. Çubuk hareketi için indirgeyici şanzımanlı DC servo motoru kullanılmıştır. PID ile sistem denetimi sağlanabilmektedir [3]. Hirsch tarafından tasarlanan top ve çubuk sisteminde topun konumunu ölçmek için ultrasonik algılayıcı kullanılmıştır. Çubuğun açısı potansiyometre kullanılarak ölçülmüştür. Şanzımanlı DC motor ile çubuk hareketi sağlanmıştır. Bu sistemin denetiminde PD yöntemi kullanılmıştır [4]. Yu ve Ortiz doğrusal olmayan sistem modeli üzerinden tasarladıkları PD denetim yöntemi ile gerçek

sistem üzerinde uygulama çalışmaları yapmışlardır [5]. Huser, Sastry ve Kokotovic doğrusal olmayan sistemlerin yaklaşık giriş-çıkış doğrusallaştırılması üzerinde çalışmışlardır. Sundukları yöntemin daha etkili olduğunu laboratuvar ortamında top ve çubuk sistemi üzerinde uygulayarak göstermişlerdir [6]. Jiang, McCorkell ve Zmood, tarafından kutup yerleştirme ve sinir ağları yöntemleri ile benzetim ve gerçek sistem uygulamaları yapılmış, topun dengelenmesi için gereken sürenin sinir ağları kullanıldığında önemli ölçüde azaldığı gösterilmiştir [7]. Marra, Boling ve Walcott genetik algoritmalara dayalı uyarlamalı denetim yöntemleri ile çalışmışlardır. Genetik algoritmalı denetleyicinin doğrusal karesel denetleyiciye benzer biçimde en iyi (optimum) denetim başarımını sağladığından bahsetmişlerdir [8]. Saber ve Megretski geri adımlamalı denetim yönteminde yeni bir yaklaşım kullanarak, öncelikle ikinci dereceden bir alt sistem için denetleyici tasarlayıp daha sonra, tüm sistemin denetimini sağlamışlardır [9]. Guo, Hill ve Jiang top ve çubuk sistemini bulanık dinamik bir model biçiminde ifade ederek, farklı alt alanlar üzerinde tanımlanan iki yerel kararlı denetim yönteminin ağırlıklı ortalamasından elde edilen yeni bir denetim yöntemi ile denetlemişlerdir. Bu yöntem ile yaklaşık giriş-çıkış doğrusallaştırma yöntemine göre daha büyük kararlılık bölgesi elde edilmiştir [10]. Voytsekhovsky ve Hirschorn kayan kipli denetim yöntemini yeni bir yaklaşımla top ve çubuk sistemine uygulamıştır [11]. Serdar model tabanlı ve model tabanlı olmayan denetim yöntemleri denemiş, model tabanlı denetim yöntemleri ile doğrusal olmayan top ve çubuk sisteminin denetim başarımının daha iyi olduğunu göstermiştir [12]. Hara, Takahashi ve Konishi sistem üzerindeki belirsizlik ve bozucu etki üzerine çalışmalar yapmışlardır. Uygulama çalışmalarında iki farklı yapıda model öngörülü denetim ile birlikte doğrusal karesel denetleyici ile elde edilen başarımları verilmişlerdir [13]. Koo, Choi ve Lim top ve çubuk sistemi denetim çalışmalarında genellikle ihmal edilen merkezkaç kuvvetini sistem modeline dahil ederek denetim çalışmaları yapmışlardır. Bu çalışmalar merkezkaç teriminin dahil edildiği denetleyicilerin başarımının daha iyi olduğunu göstermiştir [14]. Ezzabi, Cheok ve Alazabi doğrusal olmayan geri adımlamalı denetim yöntemi ile çalışmalar yapmışlardır. Doğrusal karesel denetleyici yöntemine göre başarımın daha düzgün (smooth) olduğunu ve daha az genlikli denetim sinyaline ihtiyaç duyulduğunu göstermişlerdir [15]. Bu çalışmalara ek olarak, bu tez çalışmasında kullanılan Amira sistemi üzerinde yapılan çalışmalarda literatürde bulunmaktadır. Colon, Bueno, Diniz ve Balthazar top ve çubuk sistemini doğrusal olmayan dinamiklerini de dikkate alarak sistemi modellemiş ve denetim çalışması yapmıştır [16]. Chen, Chien ve Wei sisteme etki

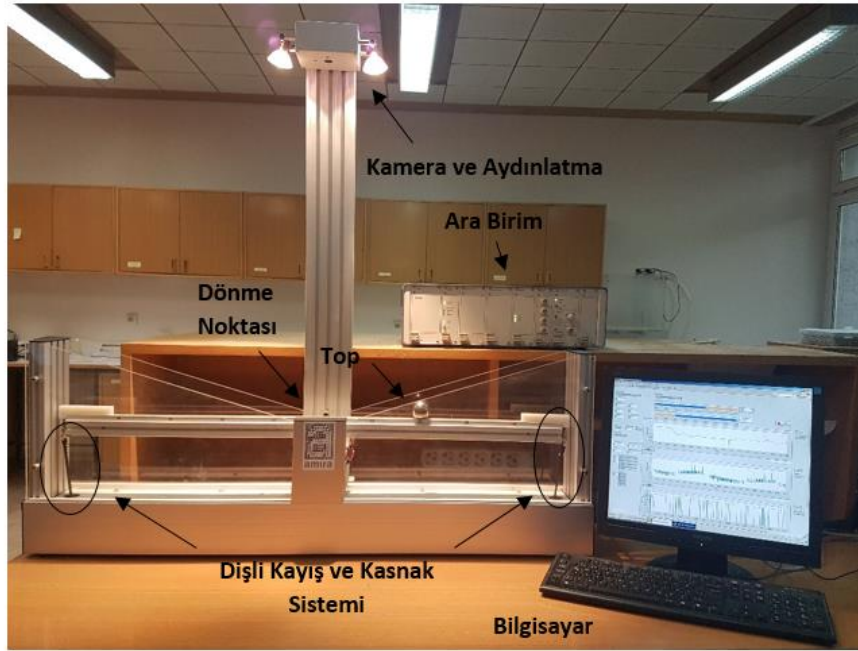
eden bozucu etkilerin giderilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır [17]. Chien, Chen, Tsai ve Chen daha önce yapılan [17] çalışmasına ek olarak bozucu etki üzerinde çalışmalarına devam etmiş ve daha başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [18].

Bu tez çalışmasında, top ve çubuk sisteminin denetimi için doğrusal ve doğrusal olmayan denetleyiciler tasarlanarak benzetim ve deneysel ortamda sonuçları elde edilmiş, başarımları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Sistemin denetimi için kutup atama ve kayan kipli denetim yöntemleri kullanılmıştır. Kutup atama yöntemi hem kesikli zaman hem de sürekli zamanda tasarlanmış, elde edilen benzetim ve uygulama sonuçları karşılaştırılmıştır. Kutup atama yönteminde, eyleyici kaynaklı doğrusal olmayan etmenler bozucu bir terim olarak modellenmiş ve kestirilmiştir. Kestirilen bozucu terim sisteme ileri besleme olarak ilave edilmiş ve denetim başarımının iyileştiği gözlenmiştir. Ayrıca kutup atamalı denetim tümlev alıcı ile genişletilmiş, denetim başarımı hem benzetim ortamında hem gerçek sistem üzerinde incelenmiştir. Sistemin ölçülemeyen durumlarının kestirimi için tam ve indirgenmiş mertebeli gözleyici tasarımı yapılmıştır. Gerçek sistem üzerinde yapılan çalışmalarda tam mertebeli gözleyicinin iyi sonuç vermediği görülmüş, bu nedenle sadece indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılmıştır.

Tez çalışmasının yapısı şu şekildedir: İkinci bölümde top ve çubuk sistemi ile birlikte test altyapısının genel tanıtımı yapılmış, karşılaşılan sorunlardan bahsedilmiştir. Dinamik hareket denklemlerinden elde edilen matematiksel model ve tasarımlarda kullanılan sistemin doğrusallaştırılmış durum uzay denklemleri verilmiştir. Üçüncü bölümde bu tez çalışmasında kullanılan kutup atama ve kayan kipli denetim yöntemleri anlatılmıştır. Gözleyici tasarımları ile birlikte bozucu kestirimi ve tümlev etkili denetim yöntemlerinden de bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, üçüncü bölümde anlatılan denetim yöntemlerinin benzetimleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde gerçek sistem üzerinde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Altıncı bölümde hem benzetim hem de uygulama çalışmalarında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

2. TOP VE ÇUBUK SİSTEMİ

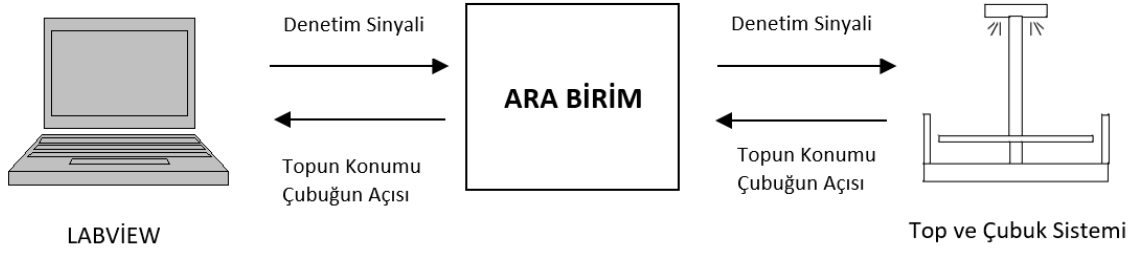
Top ve çubuk sistemi, bir çubuk ve üzerinde hareket edebilen bir toptan oluşan mekanik bir sistemdir. Kolay anlaşılabilir bir sistem olduğu, üzerinde klasik ve modern denetim yöntemleri ile çalışılabilindiği için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışma yapıları farklılık gösteren birçok top ve çubuk sistemi bulunmaktadır. Bu tez kapsamında Amira-Elwe sistemi kullanılmıştır [19]. Şekil 2.1’de ara birim ile birlikte tüm sistemin fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 2.1. Top ve çubuk sistemi

Sistemin genel yapısı, top ve çubuk sistemi, ara birim ve bilgisayardan oluşmaktadır. Ara birim ile bilgisayar arasındaki analog ve sayısal veri akışını gerçekleştirmek için National Instruments firmasının, çok fonksiyonlu veri toplama ve üretme kartı olan PCI-6221 kartı kullanılmıştır. PCI-6221 kartı toplamda 250 kS/s örnekleme hızına ulaşabilen, 16 bit çözünürlüğe sahip 16 analog girişe, kanal başı 740 kS/s hıza ulaşabilen 16 bit çözünürlüğe sahip 2 analog çıkışa sahiptir. Ayrıca hem giriş hem çıkış olarak ayarlanabilen 16 digital kanala ve 32 bit çözünürlüklü 2 adet sayıcı devresine sahiptir. Analog çıkış kanallarından biri motoru kontrol etmek için kullanılırken, sayısal kanallar kamera verisini okumak için kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra, sayıcı devrelerinden bir tanesi ile çubuğun açısı okunmaktadır. Kamera ve aydınlatma donanımları sistemin en üst noktasında

bulunmaktadır. Dönme noktası çubuğun merkezindedir. Çubuğun iki ucuna ve bir DC motora bağlı dişli kayış ve kasnak sistemi ile merkezi etrafında dönmesi sağlanmaktadır. DC motoru sistem kutusunun sol alt tarafındadır. Şekil 2.2’de sistemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.2. Top ve çubuk sisteminin şematik gösterimi

Tez çalışmasında, sistem üzerinden ölçülebilen, topun konumu ve çubuğun açısı olmak üzere iki geribesleme değeri kullanılmıştır. Topun konumu, sistem üzerine yerleştirilmiş CCD kamera algılayıcı ile elde edilmektedir. Çubuğun açısı, (360°'lik hareketin 20000 artım sayısına denk geldiği) dörtlü artımlı bir kodlayıcı tarafından ölçülmektedir.

Topun konumu ve çubuğun açısı ara birim aracılığıyla işlenerek bilgisayara iletilir. Bilgisayar ortamında MATLAB ve LABVIEW programları kullanılarak denetim algoritmaları gerçekleştirilmiştir. Bu algoritmalar kullanılarak üretilen denetim sinyali, ara birim üzerinde yer alan elektronik servo yükselteç tarafından DC motorunu süreceak akım sinyaline dönüştürülür. DC motor tarafından üretilen tork, kayış ve kasnak tarafından doğrusal harekete dönüştürülerek çubuk uçlarına kuvvet olarak uygulanır. Bu şekilde topun konum denetimi gerçekleştirilmiş olur.

CCD kamera, algılayıcı üzerine düşen ışığı gerilime çevirerek, bu gerilimi işlemci üzerinden resme dönüştürmektedir. Bu yüzden kameranın düzgün çalışabilmesi için ampullerin açık olması gerekmektedir. Çok aydınlık ya da doğrudan objektife ışık gelen ortamlarda sorun yaşanabildiği gözlenmiştir. Ampuller hareket ettirildiğinde sisteme düşen ışığın odak noktası değişeceği için ölçüm sonuçları değişebilmektedir.

Konum, gerçek zamanlı görüntü işleme teknikleri ile hesaplanarak, bilgisayara sayısal bir sinyal olarak gönderilmektedir. Sistem ölçümleri incelendiğinde bu sinyalde çok küçük gürültüler tespit edilmiştir. Bu gürültülerin denetim sinyaline etkisinin büyük olduğu gözlenmiş ve bu nedenle uygun bir filtre konularak sorun giderilmiştir.

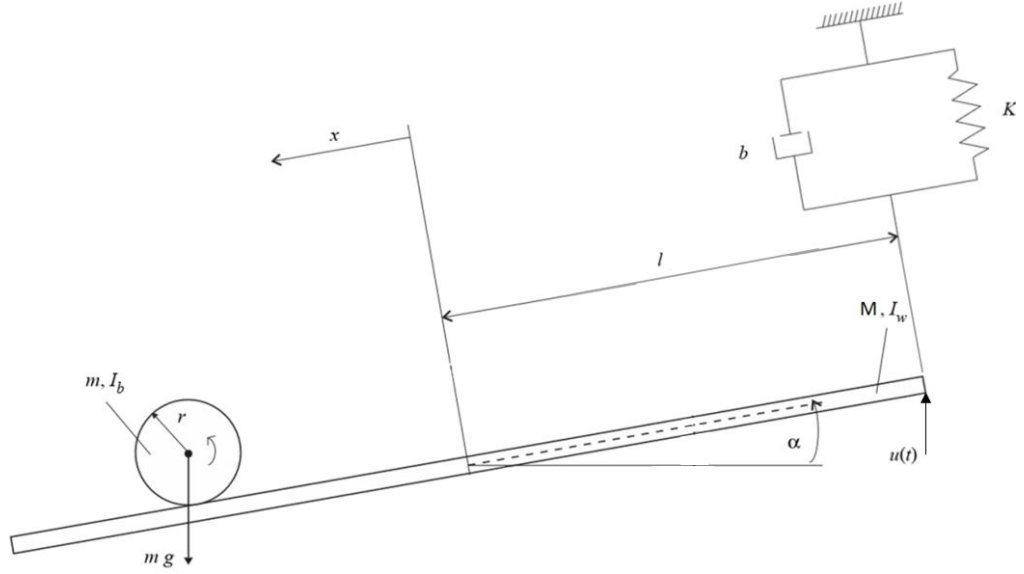
Sistem üzerindeki çalışmalarda, sistemin hareketinde doğrusal olmayan durumlar gözlenmiştir. Sistem ilk çalıştığında belli bir voltaj değerine kadar çubuk hareket etmemektedir. Bu durum incelendiğinde uygulanan voltajın yönüne göre bu değer farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca sistemin ilk hareketinden sonra bu değer azaldığı gözlenmiştir. Bunun sebebinin kayış ve kaynak sistemindeki sürtünme gibi doğrusal olmayan özelliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kayışın esnekliği sıcaklık ve rutubetle, sürtünme katsayısı toz ve rutubet ile değişebilmektedir.

2.1. Matematiksel Model

Sistem denetlenirken topu istenen konumda tutmak için, çubuk açısı doğru bir şekilde değişmelidir. Bu, motorun elektriksel olarak doğru bir şekilde sürülmesini gerektirir. Bu nedenle, tüm bileşenler arasındaki ilişkileri ifade etmek için sistemin matematiksel bir modelini oluşturmak esastır. Genellikle, matematiksel modeli üretmek için kullanılan farklı teknikler vardır. Fizik ve elektronik yasalarını kullanmak, matematiksel modeli elde etmenin bir yoludur. Gerçek hayatta mükemmel bir model oluşturmak mümkün olmadığı için aşağıda elde edilen modelin, ideal bir model olduğunu belirtmek faydalı olacaktır.

Top ve çubuk sisteminde topun her zaman çubuk ile temasını koruyarak yuvarlandığı varsayılmıştır. Çubuğun yatay düzlem ile yaptığı büyük açılarda, topun yüksek hızlara ulaşması sebebiyle bu hareketini kayarak da yapma ihtimali vardır. Matematiksel modeli çıkarılırken kayma etkisi dahil edilmemiştir.

Sistemin matematiksel modeli elde edilirken kullanılan sistem elamanları Şekil 2.3 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Top ve çubuk sistem elemanları

Şekil 2.3'te kullanılan terimlerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

- m : topun kütlesi
- g : yerçekimi sabiti
- r : topun yuvarlanma yarıçapı
- I_b : topun atalet momenti
- I_w : çubuğun atalet momenti
- M : çubuğun kütlesi
- b : sürme mekaniğinin sürtünme katsayısı
- K : sürme mekaniğinin katılık değeri
- $u(t)$: sürme mekaniğinin uyguladığı kuvvet
- l : çubuk ucunun çubuk merkezine olan mesafesi
- x : çubuğun merkezine göre topun konumu
- α : çubuğun yatay ile yaptığı açı

b ve K terimleri ile tanımlanan yay-sönümlenme sistemi, kayış ve kasnak sistemi ve motordan oluşan sürme mekanizmasını tanımlamaktadır. Motor dinamikleri ihmal edilmiştir. Euler - Lagrange yöntemi kullanılarak, yukarıda anlatılan ve Şekil 2.3'te şematik gösterimi verilen top ve çubuk sisteminin doğrusal olmayan hareket denklemleri Denklem 2.1 ve Denklem 2.2'de verildiği gibi elde edilir [19].

$$\left(m + \frac{I_b}{r^2}\right)\ddot{x} + (mr^2 + I_b)\frac{1}{r}\ddot{\alpha} - mx\dot{\alpha}^2 = mg \sin(\alpha) \quad (2.1)$$

$$(mx^2 + I_b + I_w)\ddot{\alpha} + (2m\dot{x}x + bl^2)\dot{\alpha} + Kl^2\alpha + (mr^2 + I_b)\frac{1}{r}\ddot{x} - mgx \cos(\alpha) = u(t)l \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

2.2. Durum Uzay Gösterimi

Denklem 2.1 ve 2.2’de verilen doğrusal olmayan sistem denklemleri durum uzay gösterimi şeklinde yazılabilir. Durum değişkenleri x_1 topun konumu (x), x_2 topun hızı (\dot{x}), x_3 çubuğun açısı (α), x_4 çubuğun açısal hızı ($\dot{\alpha}$) olacak şekilde tanımlanırsa, bu tanımlanan durum değişkenlerine göre elde edilen doğrusal olmayan durum uzay gösterimi denklem 2.3’te verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{a_2[(b_2x_1x_2 + b_3)x_4 + b_4x_3 - b_6x_1 \cos(x_3)]}{a_1(mx_1^2 + b_1) - a_2b_5} + \frac{(mx_1^2 + b_1)(a_3 \sin(x_3) + mx_1x_4^2) - a_2l \cos(x_3) u(t)}{a_1(mx_1^2 + b_1) - a_2b_5}$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = \frac{-(b_2x_1x_2 + b_3)x_4 - b_4x_3 - b_6x_1 \cos(x_3)}{mx_1^2 + b_1} - \frac{b_5(a_3 \sin(x_3) + mx_1x_4^2)}{a_1(mx_1^2 + b_1) - a_2b_5} - \frac{a_2b_5[(b_2x_1x_2 + b_3)x_4 + b_4x_3 - b_6x_1 \cos(x_3)]}{(mx_1^2 + b_1)(a_1(mx_1^2 + b_1) - a_2b_5)} + \left(1 + \frac{a_2b_5}{a_1(mx_1^2 + b_1) - a_2b_5}\right) \frac{l \cos(x_3) u(t)}{mx_1^2 + b_1} \quad (2.3)$$

Durum uzay denkleminde Denklem 2.4'te verilen ifadeler kullanılmıştır.

$$\begin{aligned}a_1 &= m + \frac{I_b}{r^2} \\a_2 &= (mr^2 + I_b) \frac{1}{r} \\a_3 &= mg \\b_1 &= I_b + I_w \\b_2 &= 2m \\b_3 &= bl^2 \\b_4 &= Kl^2 \\b_5 &= (mr^2 + I_b) \frac{1}{r} \\b_6 &= mg\end{aligned}\tag{2.4}$$

Denklem 2.3'te verilen doğrusal olmayan durum denklemleri aşağıda verilen genel biçimde yazılabilir.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u)\tag{2.5}$$

Denklem 2.5'te \mathbf{x} durum vektörünü göstermekte ve $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ şeklinde ifade edilmektedir.

2.3. Top ve Çubuk Sisteminin Doğrusallaştırılmış Modeli

Doğrusal olmayan sistemler doğrusal denetim yöntemleriyle denetlenebilir. Bunun için önce sistemin doğrusal bir modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Doğrusallaştırmanın belirli bir çalışma noktasında yapılması gerekir. Çalışma noktasının (\mathbf{x}_0, u_0) olduğu varsayalım. Bu durumda Denklem 2.5 ile verilen doğrusal olmayan durum denklemi, Denklem 2.6'da verildiği şekilde doğrusal durum denklemi olarak yazılabilir.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t)\tag{2.6}$$

Denklem 2.6'da ki \mathbf{A} ve \mathbf{B} matrisleri

$$\mathbf{A} = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0, u_0}, \quad \mathbf{B} = \left. \frac{df}{du} \right|_{x_0, u_0} \quad (2.7)$$

biçiminde tanımlanmıştır [20]. Bu formüle göre doğrusallaştırılmış sistem matrisleri Denklem 2.8’de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left. \frac{df_1}{dx_1} \right|_{x_0, u_0} & \dots & \left. \frac{df_1}{dx_n} \right|_{x_0, u_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{df_n}{dx_1} \right|_{x_0, u_0} & \dots & \left. \frac{df_n}{dx_n} \right|_{x_0, u_0} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \left. \frac{df_1}{du} \right|_{x_0, u_0} \\ \vdots \\ \left. \frac{df_n}{du} \right|_{x_0, u_0} \end{bmatrix}$$

Top ve çubuk sisteminde çalışma noktası $x_0 = \mathbf{0}$, $u_0 = 0$ olarak seçilmiştir. Bu durumda \mathbf{A} ve \mathbf{B} matrisleri Denklem 2.9’deki gibi elde edilir.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.0342 & 0 & 6.592 & 0.031 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 18.898 & 0 & -0.344 & -1.713 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0633 \\ 0 \\ 3.4960 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Bu matrislerin elde edilmesinde kullanılan sistem parametreleri Çizelge 2.1’de verilmiştir [19].

Çizelge 2.1. Top ve Çubuk Sistemi, sistem parametreleri.

Tanım	İfade	Değer	Birim
Topun Kütlesi	m	0,27	kg
Çubuğun Kütlesi	M	1,122	kg
Çubuk Uzunluğunun Yarıısı	l	0,49	m
Sürtünme Değeri	b	1,0	Ns/m
Katılık Değeri	K	0,001	N/m
Topun Yuvarlanma Yarıçapı	r	0,018	m
Topun Atalet Momenti	I_b	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$kg \cdot m^2$
Çubuğun Atalet Momenti	I_w	$14,02 \cdot 10^{-2}$	$kg \cdot m^2$

Sistem çıkışı olarak topun konumu alındığında çıkış denklemi

$$y = \mathbf{C}x$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$
(2.11)

biçiminde yazılabilir.

Doğrusallaştırılmış sisteme karşılık gelen top girişten çıkışa (top konumu) olan aktarım işlemi $G(s)$ aşağıda verilmiştir.

$$G(s) = \frac{-0.06330s^2 - 0.00006s + 23.02385}{s^4 + 1.71300s^3 + 0.37819s^2 - 0.52725s - 124.56385}$$
(2.12)

A matrisinin öz değerleri (sistem kutupları) $s_1 = -3,8172$, $s_{2,3} = -0.4332 \pm 3.2859j$, $s_4 = +2.9707$ şeklindedir. Görüldüğü üzere iki tane sanal kutbu vardır. Sanal eksenin sağ tarafında da bir kararsız kutbu bulunmaktadır. Bu nedenle kararsız bir sistemdir. Ayrıca sistemin $s_1 = -19.0721$, $s_2 = +19.0712$ olmak üzere iki tane sıfırı bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi sanal eksenin sağ tarafında ve kararsız bir sıfırdır. Bu nedenle sistem minimum olmayan evreli bir sistemdir. Sistem matrisleri incelendiğinde, sistemin hem denetlenebilir hem de gözlenebilir olduğu görülmektedir.

Sürekli zamanlı bir sistem istenilen bir örnekleme aralığı seçilerek kesikli zamanda ifade edilebilir. Denklem 2.6 ve Denklem 2.11’de verilen bir sistemin kesikli zamandaki sistem denklemleri (ZOH eşdeğeri) Denklem 2.13’teki gibidir [21].

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_D \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_D u(k) \\ y(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (2.13)$$

\mathbf{A}_D ve \mathbf{B}_D matrisleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanır. Bu denklemlerde T örnekleme aralığını ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_D &= e^{AT} \\ \mathbf{B}_D &= \int_0^T e^{A\tau} \mathbf{B} d\tau \end{aligned} \quad (2.14)$$

Tez çalışmasında kullanılan 5 ms örnekleme aralığı için elde edilen \mathbf{A}_D ve \mathbf{B}_D sistem matrisleri Denklem 2.15 ve 2.16’da verilmiştir.

$$\mathbf{A}_D = \begin{bmatrix} 1 & 0.005 & 0.0001 & 0 \\ -0.0002 & 1 & 0.0330 & 0.0002 \\ 0.0002 & 0 & 1 & 0.005 \\ 0.0941 & 0.0002 & -0.0017 & 0.9915 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{B}_D = \begin{bmatrix} -7.884e^{-7} \\ -0.0003 \\ 0 \\ 0.0174 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Karşılık gelen kesikli zamanda sistem kutupları $z_1 = 0.98$, $z_{2,3} = 0.99 \pm 3.28j$, $z_4 = 1.01$ şeklindedir. Birim çember dışında sistem kutbu olduğu için kararsız bir sistem olduğu burada da gözlenmektedir.

3. TOP VE ÇUBUK SİSTEMİNİN DENETLENMESİ

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan denetim yöntemleri anlatılmıştır. Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi top ve çubuk sistemi doğrusal olmayan bir sistemdir. Bu tür sistemleri denetlemek için genelde iki yaklaşım kullanılır:

1. Sistemin belli çalışma koşullarında doğrusal modeli elde edilir ve doğrusal denetim yöntemleri kullanılır.
2. Doğrudan, sistemin denetimine uygun, doğrusal olmayan bir denetim yöntemi kullanılır.

Bu çalışmada her iki yaklaşım da kullanılmıştır. Doğrusal denetim yöntemi olarak kutup atama yöntemi, doğrusal olmayan denetim yöntemi olarak da kayan kipli denetim yöntemi seçilmiştir. Bu şekilde, her iki yaklaşımın başarımlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Her iki denetim yönteminde de sistem durumlarının bilinmesi/ölçülmesi gerekmektedir. Top ve çubuk sistemi dört durum değişkeni ile tanımlanmakta olup, bunlardan ikisi (top konumu ve çubuk açısı) ölçülebilmekte, diğer ikisi (top hızı ve çubuk açısal hızı) ise ölçülememektedir. Bu nedenle, ölçülemeyen durumların kestirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla hem tam mertebeli hem de indirgenmiş mertebeli gözleyici tasarlanmış ve kullanılmıştır.

Denetim yöntemleri hem sürekli zamanda hem de kesikli zamanda geliştirilebilmektedir. Buna, kutup atama yöntemi, eniyilemeli denetim, öngörülü denetim, v.b. örnek olarak verilebilir. Literatürde hemen hemen her denetim yönteminin her iki biçimi de mevcuttur. Bu nedenle, denetleyici tasarımında da temelde iki yaklaşım bulunmaktadır:

1. Denetlenecek sistem kesikli zamanda modellenir ve kesikli zaman bir denetim yöntemiyle denetleyici tasarlanır. Bu durumda, elde edilen denetleyici kesikli-zamanda olduğundan, denetleyici doğrudan sayısal bir ortamda gerçekleştirilebilir.
2. Denetlenecek sistem sürekli zamanda modellenir ve sürekli-zaman bir denetim yöntemiyle denetleyici tasarlanır. Bu durumda elde edilen denetleyici sürekli zamanda

olduğundan, uygun tekniklerle (sürekli-zamandan kesikli zamana bir çok teknikle geçilebilir, örneğin ZOH eşdeğeriği kullanılabilir) sayısal ortamda gerçekleşmesi gerekir.

Literatürde, ikinci yaklaşımın daha iyi sonuç verdiğine ilişkin bilgiler mevcuttur [12, 23, 24, 25]. Bu çalışmada bizim gözlemimiz de o yönde olmuştur. O nedenle sistem, hem kesikli hem de sürekli zamanda kutup atama (+gözleyici) yöntemi kullanılarak denetlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.1. Sürekli Zamanda Tasarım

Bu alt bölümde tez çalışmasında kullanılan sürekli zaman denetim yöntemleri anlatılmıştır. İlk olarak durum geri beslemesine dayalı kutup atama yöntemi ile tam ve indirgenmiş mertebeli gözleyici tasarımları sunulmuş, başarıyı iyileştirmek için bozucu terim kestirilmesi ile tümlev etkili denetim yöntemleri anlatılmıştır. Sonrasında kayan kipli denetim yöntemi verilmiştir.

3.1.1. Kutup Atamalı Denetim

Tek girişli tek çıkışlı bir sistem Denklem 3.1'de verilen durum denklemleri ile ifade edilsin.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{3.1}$$

Denklem 3.1'de x n boyutlu durum vektörünü, u sistem girişini, y sistem çıkışını göstermektedir. A , B ve C uygun boyutlu ilgili sistem matrisleridir. Bu sistem için durum geri beslemesine dayalı denetim yasası, Denklem 3.2'de verildiği gibi tanımlanabilir.

$$u(t) = gw(t) - Kx(t)\tag{3.2}$$

Bu denetim yasasıyla, sistem tamamen denetlenebilir ise kapalı döngü sistem kutupları istenilen yerlere atanabilir. Denklem 3.2'de $w(t)$ istenilen çıkışı göstermektedir. Herhangi bir sistem için K kazancı, genel Ackermann denklemi olarak bilinen, Denklem 3.3 kullanılarak bulunabilir [21].

$$K = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] W_c^{-1} p(A) \quad (3.3)$$

Bu denklemde W_c denetlenebilirlik matrisi olup aşağıdaki şekilde verilir.

$$W_c = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] \quad (3.4)$$

$(A - BK)$ matrisinin özdeğerleri istenilen kapalı döngü sistem kutuplarıdır. Bu özdeğerlere karşılık gelen karakteristik çokterimli

$$p(s) = |sI - A + BK| = s^n + p_1s^{n-1} + p_2s^{n-2} + \dots + p_n \quad (3.5)$$

olsun. Denklem 3.3'te verilen matris çokterimlisi $p(A)$, Denklem 3.5'te s yerine A matrisi konularak elde edilir. Denklem 3.2'de verilen durağan kazanç g kapalı döngü sistemin durağan (statik) kazancını 1 yapmak üzere aşağıdaki gibi seçilir.

$$g = [C(BK - A)^{-1}B]^{-1} \quad (3.6)$$

3.1.2. Tam Mertebeli Gözleyici

Durum geri beslemeli denetim yöntemlerinde, sistemin tüm durumlarının bilinmesi gerekmektedir. Sistemin durumlarının bilinmediği durumda, sistemin giriş ve çıkışı kullanılarak sistem durumları gözlenebilir ve gözlenen durumlar geri beslemede kullanılır. Sistem durumlarının gözlenebilir olması için sistemin gözlenebilir olması gerekmektedir. Denklem 3.1'de verilen sistem için tam mertebeli gözleyici denklemleri Denklem 3.7'de verilmiştir [21].

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Yukarıda verilen denklemde \hat{x} gözlenen sistem durumlarını ifade etmektedir. L gözleyici kazancı, \hat{y} ise kestirilen sistem çıkışıdır. Gözleyici hatası

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (3.8)$$

biçiminde tanımlanırsa, gözleyici hata dinamikleri aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC})\tilde{\mathbf{x}}(t) \quad (3.9)$$

Denklemden de anlaşılacağı gibi \mathbf{L} gözleyici kazancı uygun seçilerek $(\mathbf{A} - \mathbf{LC})$ matrisinin özdeğerleri istenilen yerlere atanabilir ve gözleyici hatasının istenildiği gibi sifıra gitmesi sağlanabilir. \mathbf{L} gözleyici kazancı Ackermann formülü ile bulunabilir [21].

$$\mathbf{L} = \phi(\mathbf{A})\mathbf{W}_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Bu denklemde \mathbf{W}_o sistemin gözlenebilirlik matrisi olup aşağıdaki şekilde verilir.

$$\mathbf{W}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

İstenilen gözleyici kutuplara karşılık gelen karakteristik çokterimli

$$\phi(s) = |s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{LC}| = s^n + q_1s^{n-1} + q_2s^{n-2} + \dots + q_n \quad (3.12)$$

olsun. $\phi(s)$ çokterimlisinde s yerine \mathbf{A} konularak, Denklem 3.10'daki matris çokterimlisi $\phi(\mathbf{A})$ elde edilir.

3.1.3. İndirgenmiş Mertebeli Gözleyici

Bazı durumlarda sistem durumlarının bir kısmı ölçülebilir. Bu durumda indirgenmiş mertebeli gözleyici ile sistem çıkışı yerine ölçülebilen durumlar kullanılarak, sadece ölçülemeyen durumlar kestirilebilir. Bu gözleyici tasarımında durum değişkenleri ölçülebilen ve ölçülemeyen (kestirilen) durumlar olmak üzere ayrılarak aşağıdaki gibi seçilir.

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(t) \\ \mathbf{x}_b(t) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Denklem 3.13'te $\mathbf{x}_a(t)$ (p boyutlu) ölçülebilen, $\mathbf{x}_b(t)$ ($(n - p)$ boyutlu) ölçülemeyen durum değişkenlerini ifade etmektedir. Bu ayrıma karşılık gelen \mathbf{A}_{aa} , \mathbf{A}_{ab} , \mathbf{A}_{ba} , \mathbf{A}_{bb} ve \mathbf{B}_a , \mathbf{B}_b sistem alt matrislerine göre sistem durum denklemi yeniden yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_a(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{aa} & \mathbf{A}_{ab} \\ \mathbf{A}_{ba} & \mathbf{A}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(t) \\ \mathbf{x}_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_a \\ \mathbf{B}_b \end{bmatrix} u(t) \quad (3.14)$$

Denklem 5.15'de verilen gözleyici denklemi kullanılarak ölçülemeyen $\mathbf{x}_b(t)$ durumları kestirilebilir [21].

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) = \mathbf{A}_r \boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{F}_r \mathbf{x}_a(t) + \mathbf{B}_r u(t) \quad (3.15)$$

Bu durumda kestirilen $\hat{\mathbf{x}}_b(t)$ durumları Denklem 3.16'da verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\hat{\mathbf{x}}_b(t) = \boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{L}_r \mathbf{x}_a(t) \quad (3.16)$$

Denklem 3.15'te verilen gözleyici denklemindeki matrisler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_r &= \mathbf{A}_{bb} - \mathbf{L}_r \mathbf{A}_{ab} \\ \mathbf{F}_r &= \mathbf{A}_r \mathbf{L}_r + \mathbf{A}_{ba} - \mathbf{L}_r \mathbf{A}_{aa} \\ \mathbf{B}_r &= \mathbf{B}_b - \mathbf{L}_r \mathbf{B}_a \end{aligned} \quad (3.17)$$

İndirgenmiş gözleyici hatası

$$\tilde{\mathbf{x}}_b(t) = \mathbf{x}_b(t) - \hat{\mathbf{x}}_b(t) \quad (3.18)$$

biçiminde tanımlandığında, gözleyici hata denklemi Denklem 3.19'daki gibi elde edilir.

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_b(t) = (\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{L}_r \mathbf{A}_{ab}) \tilde{\mathbf{x}}_b(t) \quad (3.19)$$

L_r indirgenmiş gözleyici kazancı olup Ackermann denklemi kullanılarak hesaplanır [21].

$$L_r = \phi_r(A_{bb})W_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

W_o ölçülemeyen durum değişkenleri için gözlenebilirlik matrisidir.

$$W_o = \begin{bmatrix} A_{ab} \\ A_{ab}A_{bb} \\ \vdots \\ A_{ab}A_{bb}^{n-p-1} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

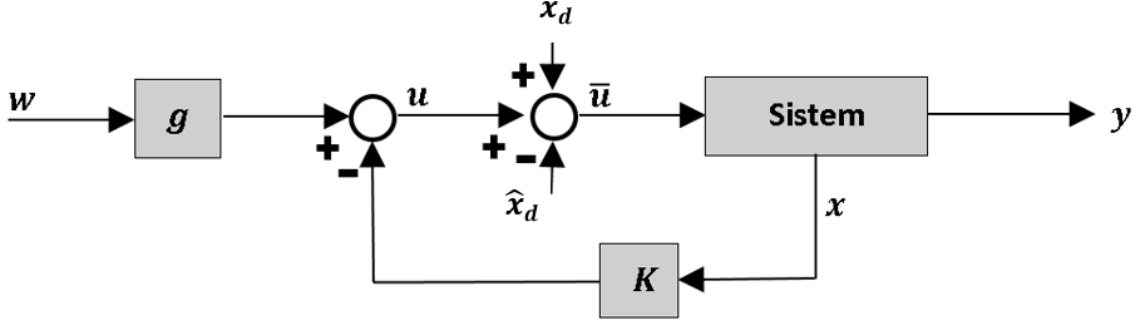
$A_{bb} - L_r A_{ab}$ matrisinin özdeğerleri istenilen indirgenmiş gözleyici kutuplarıdır. Bu gözleyici kutuplara karşılık gelen karakteristik çokterimli

$$\phi_r(s) = |sI - A_{bb} + L_r A_{ab}| = s^{n-p} + q_1 s^{n-p-1} + \dots + q_{n-p} \quad (3.22)$$

olsun. $\phi_r(s)$ çokterimlisinde s yerine A_{bb} konularak, Denklem 3.20'deki matris çokterimlisi $\phi_r(A_{bb})$ elde edilir.

3.1.4. Bozucu Etki Kestirimi

Top ve çubuk sisteminin matematiksel modeli elde edilirken sürme mekanizmasından kaynaklanan sürtünme, ölü bölge gibi etkiler ihmal edilmişti. Bu etkiler denetim başarımını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca kutup atama ile denetim tasarımı yapılırken sistemin doğrusallaştırılmış modeli kullanılmaktadır. Bu yüzden pratik uygulamalarda doğrusal olmayan bu tür etkenler de gözönüne alınmalıdır. Denetim başarımını iyileştirmek amacıyla, bu tür etkiler, sisteme etki eden bir bozucu gibi düşünülüp sistem denetimi sırasında kestirilebilir ve kestirilen bozucu terimi sisteme ileri besleme ile uygulanabilir. Bu çalışmada bu yöntem de kullanılarak denetim başarımının iyileştiği gözlenmiştir. Bu duruma karşılık gelen blok diyagram Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekilde $x_d(t)$ sisteme etki eden bozucuyu, $\hat{x}_d(t)$ ise kestirilen bozucu terimi ifade etmektedir.



Şekil 3.1. Bozucu terim eklenmiş sistemin blok şema gösterimi

Sisteme eklenen bozucu etki sonrasında sistem denklemleri Denklem 3.23'teki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(u(t) + x_d(t)) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\quad (3.23)$$

Sisteme etki eden bu tür bozucu etmenler

$$\dot{x}_d(t) = 0 \quad (3.24)$$

biçiminde modellenebilir. Bu bozucu terim ile birlikte yeni durum denklemleri Denklem 3.25'te verildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{x}_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ x_d(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (3.25)$$

$$y(t) = [\mathbf{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ x_d(t) \end{bmatrix}$$

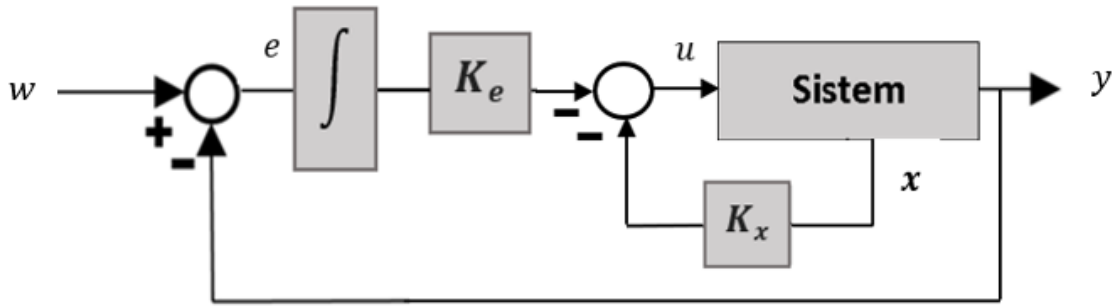
Yeni durum denklemleri ile indirgenmiş mertebeli gözleyici yapısı kullanılarak bozucu terim kestirilebilir. Kestirilen bozucu etkinin denetim sinyaline etkisi $\hat{x}_d(t)$ olarak dahil edilmiştir. Bu durumda yeni denetim sinyali Denklem 3.26'daki gibi olmaktadır.

$$\bar{u}(t) = u(t) - \hat{x}_d(t) \quad (3.26)$$

Sistemin ölçülemeyen durumlarının olduğu durumda, bozucu terim sistem durumlarına eklenerek tek bir indirgenmiş gözleyici ile hem ölçülemeyen sistem durumları hem de bozucuyu kestirmek mümkündür. Tez çalışmasında Denklem 3.13'te ikiye ayrılan sistem durumları $\mathbf{x}_a = [x_1 \ x_3]^T$, $\mathbf{x}_b = [x_2 \ x_4 \ x_d]^T$ olacak şekilde seçilerek ölçülemeyen sistem durumları ve bozucu tek bir indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılarak kestirilmiştir.

3.1.5. Tümlev Etkili Denetim

Gerçek fiziksel sistem ile sistemin modeli arasında; ihmal edilen dinamikler, doğrusal olmayan etkiler, belirsizlikler vb. sebeplerle ortaya çıkan farklılıklar denetim başarımını olumsuz etkilediği gibi, kalıcı durum hatasına da neden olmaktadır. Bu kalıcı durum hatası kapalı döngü sisteme tümlev alıcı yerleştirilerek ortadan kaldırılabilir.



Şekil 3.2. Tümlev alıcı eklenmiş sistemin blok şema gösterimi

Bunun için istenilen çıkış ile çıkış arasındaki hatanın tümlevi kullanılarak durum vektörü aşağıdaki biçimde genişletilmiştir.

$$\bar{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \int e(t) dt \\ \mathbf{x}(t) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Bu denklemde

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (3.28)$$

olup, $w(t)$ istenilen çıkışı ifade etmektedir. Denklem 3.27 kullanılarak yeni durum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{C} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} \end{bmatrix} \bar{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} w(t) \\ y(t) &= [0 \quad \mathbf{C}] \bar{x}(t)\end{aligned}\tag{3.29}$$

Bu durumda Denklem 3.3'te verilen \mathbf{K} kazancı, elde edilen yeni durum denklemleri kullanılarak hesaplanır. Yeni denetim yasası aşağıda verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}u(t) &= -\bar{\mathbf{K}} \bar{x}(t) = -[K_e \quad \mathbf{K}_x] \bar{x}(t) \\ &= -K_e \int e dt - \mathbf{K}_x x(t)\end{aligned}\tag{3.30}$$

3.1.6. Kayan Kipli Denetim

Kayan kipli denetim sistem belirsizliklerine ve bozuculara karşı duyarsız, doğrusal olmayan gürbüz bir denetim yöntemidir. Doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde klasik yöntemlere göre daha etkilidir. Bu yöntemin amacı sistem tepkisini anahtarlama sinyali ile tanımlanan kayma yüzeyinde tutmaktır. Erişme ve kayma evresi olmak üzere iki evreden oluşmaktadır. Tasarımın ilk aşamasında istenilen kapalı döngü sistem tepkisine göre durum uzayında kayma yüzeyi tanımlanır. İkinci aşamasında ise tanımlanan kayma yüzeyine göre denetim sinyali elde edilir. Sistem kayma yüzeyi Denklem 3.31'deki gibi tanımlanabilir.

$$s = \dot{\alpha} + \gamma_1 \alpha + \gamma_2 \dot{x} + \gamma_3 (x - w)\tag{3.31}$$

Denklem 3.31'de α çubuğun açısını, x çubuğun konumunu, w ise istenilen x değerini belirtmektedir. $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ kayma yüzeyini belirleyen, dolayısıyla kapalı döngü başarımı belirleyen parametrelerdir. Kayma yüzeyi, $s = 0$ olduğunda elde edilen $\dot{\alpha}$ ifadesi Denklem 2.1 ve Denklem 2.2'de verilen sistem denklemlerinde yerine yazılır ve elde edilen denklem denge noktası etrafında doğrusallaştırılırsa, doğrusal sistem karakteristik denklemi kullanılarak istenilen kapalı döngü başarımı sağlayacak parametreler ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$) hesaplanabilir [26].

$\mathbf{x}(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [(x - w) \ \dot{x} \ \alpha]^T$ durumları tanımlanarak, $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ denge noktası etrafında doğrusallaştırılır [20].

$$\mathbf{A}_1 = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{b_4 + b_1 a_3}{a_1 b_1 - a_2 b_5} \\ -\gamma_1 & -\gamma_2 & -\gamma_3 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$a_1 = 0.4033$, $a_2 = 0.0073$, $a_3 = 2.6487$, $b_1 = 0.1403$, $b_4 = 0.0002$, $b_5 = 0.0007$ değerleri yerine yazıldığında, elde edilen doğrusallaştırılmış sistemin karakteristik denklemi Denklem 3.32'deki gibi elde edilir. İstenilen kapalı döngü kutuplara karşılık gelen $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ değerleri bu denklem yardımıyla hesaplanabilir.

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A}_1| = s^3 + \gamma_1 s^2 + 6.58 \gamma_2 s + 6.58 \gamma_3 \quad (3.33)$$

Kayan kipli denetim yönteminin yapısı anahtarlama fonksiyonu olarak tanımlanan kayma yüzeyine bağlıdır. Seçilen kayma yüzeyi türevi anahtarlama fonksiyonu dinamiğini doğrudan etkilemektedir. Bu tez çalışmasında kayma yüzeyi türevi Denklem 3.34'deki gibi seçilmiştir [27].

$$\dot{s} = -K_1 s - K_2 \text{sign}(s) \quad (3.34)$$

K_1 ve K_2 sabit parametreler olup sistemin kayan kipte çalışmasını sağlar ve kayma yüzeyine erişim hızını belirler. Ayrıca K_2 parametresi yüksek frekanslı denetim sinyalinin genliğini de etkilemektedir. Sistemin kayan kipte çalışabilmesi için kayma yüzeyinin Denklem 3.35'de verilen koşulu sağlaması gerekmektedir.

$$s \times \dot{s} < 0 \quad (3.35)$$

Kayma evresinde

$$s = 0, \dot{s} = 0 \quad (3.36)$$

koşulları sağlanmaktadır. Sistemin kararlılığını incelemek için Lyapunov kararlılık teoremi kullanılmıştır. Lyapunov fonksiyonu Denklem 3.37'deki gibi seçilmiştir.

$$V = \frac{1}{2}(s^2) \quad (3.37)$$

Kayma yüzeyinin türevi Denklem 3.34'deki gibi seçildiğinde Lyapunov fonksiyonun zamana göre türevi, Denklem 3.38'de görüldüğü gibi kesin negatif olduğu için sistem sonuçur kararlıdır.

$$\dot{V} = -K_1 s^2 - K_2 s \operatorname{sign}(s) \quad (3.38)$$

Denetim sinyalinin hesaplanması için öncelikle kayma yüzeyinin zamana göre türevi alınır.

$$\dot{s} = \ddot{\alpha} + \gamma_1 \dot{\alpha} + \gamma_2 \ddot{x} + \gamma_3 \dot{x} \quad (3.39)$$

Denklem 3.34'de verilen kayma yüzeyi türevi \dot{s} ile birlikte Denklem 2.3'te verilen \dot{x}_2 ve \dot{x}_4 olarak ifade edilen, \ddot{x} ve $\ddot{\alpha}$ terimleri Denklem 3.39'da yerine yazıldığında denetim sinyali Denklem 3.40'daki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} u = & \left[\frac{(b_2 \dot{x}x + b_3) \dot{\alpha} + b_4 \alpha + b_6 x \cos(\alpha)}{mx^2 + b_1} \right. \\ & + \frac{b_5 (a_3 \sin(\alpha) + mx \dot{\alpha}^2)}{a_1 (mx^2 + b_1) - a_2 b_5} \\ & + \frac{a_2 b_5 [(b_2 x \dot{x} + b_3) \dot{\alpha} + b_4 \alpha - b_6 x \cos(\alpha)]}{(mx^2 + b_1)(a_1 (mx^2 + b_1) - a_2 b_5)} \\ & - (\gamma_1 \dot{\alpha} + \gamma_3 \dot{x} + \gamma_2 \left(\frac{a_2 ((b_2 \dot{x}x + b_3) \dot{\alpha} + b_4 \alpha - b_6 x \cos(\alpha))}{a_1 (mx^2 + b_1) - a_2 b_5} \right. \\ & \left. \left. + \frac{(mx^2 + b_1) a_3 \sin(\alpha) + mx \dot{\alpha}^2}{a_1 (mx^2 + b_1) - a_2 b_5} \right) + (-K_1 s - K_2 \operatorname{sign}(s))] \right. \\ & \left. \times \left[\frac{a_1 (mx^2 + b_1)^2 - a_2 b_5 (mx^2 + b_1)}{l \cos(\alpha) (a_1 (mx^2 + b_1) - a_2 b_5 - a_2 (mx^2 + b_1))} \right] \right] \quad (3.40) \end{aligned}$$

3.2. Kesikli Zamanda Tasarım

Sürekli zamanda yapılan tasarımların, kesikli zamanda yapılmasının başarısına etkilerinin gözlenmesi için kesikli zamanda da kutup atamalı denetleyici ve gözleyiciler tasarlanmıştır.

Durum denklemleri Denklem 3.1'de verilen bir sistemin kesikli zamandaki sistem denklemleri (ZOH eşdeğeri) Denklem 3.41'deki gibidir [21].

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_D \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_D u(k) \\ y(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{A}_D &= e^{AT} \\ \mathbf{B}_D &= \int_0^T e^{A\tau} \mathbf{B} d\tau \end{aligned} \quad (3.41)$$

Burada T örnekleme aralığını ifade etmektedir. Bu bölümde tasarımların tüm detaylarından bahsedilmeyerek, sürekli zamandaki yaklaşımların ve denklemlerin kesikli zamanda nasıl ifade edildiğinden kısaca bahsedilmiştir.

3.2.1. Kutup Atamalı Denetim

Sürekli zamanda uygulanan tasarım adımları benzer şekilde uygulanarak kesikli zamanda kutup atamalı denetleyici tasarlanmıştır. Denklem 3.41'de kesikli zamanda ifade edilen bir sistem için durum geri beslemesine dayalı denetim yasası Denklem 3.42'deki gibi ifade edilir.

$$u(k) = g w(k) - \mathbf{K}_D \mathbf{x}(k) \quad (3.42)$$

\mathbf{K}_D geri besleme kazancını hesaplamak için Ackermann denklemi kullanılmıştır.

$$\mathbf{K}_D = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \mathbf{W}_c^{-1} p(\mathbf{A}_D) \quad (3.43)$$

W_c denetlenebilirlik matrisi olup Denklem 3.44'de verilmiştir.

$$W_c = [B_D \ A_D B_D \ A_D^2 B_D \ \dots \ A_D^{n-1} B_D] \quad (3.44)$$

İstenilen kapalı döngü kutuplara karşılık gelen karakteristik çokterimli

$$p(z) = |zI - A_D + B_D K_D| = z^n + p_1 z^{n-1} + \dots + p_n \quad (3.45)$$

olsun. Denklem 3.43'te verilen matris çokterimlisi $p(A_D)$, Denklem 3.45'te z yerine A_D konularak elde edilir. Denklem 3.42'de verilen durağan kazanç g kapalı döngü sistemin durağan kazancını 1 yapmak üzere Denklem 3.46'daki gibi seçilir.

$$g = [C(I - A_D + B_D K_D)^{-1} B_D]^{-1} \quad (3.46)$$

3.2.2. Tam Mertebeli Gözleyici

Sürekli zamanda anlatılan adımlar benzer şekilde uygulanarak kesikli zamanda tam mertebeli gözleyici tasarlanmıştır. Denklem 3.41'de verilen sistem dinamiğine göre elde edilen tam mertebeli gözleyici aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A_D \hat{x}(k) + B_D u(k) + L_D (y(k) - \hat{y}(k)) \\ \hat{y}(k) &= C \hat{x}(k) \end{aligned} \quad (3.47)$$

Kapalı döngü gözleyici hatası

$$\tilde{x}(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (3.48)$$

biçiminde tanımlandığında gözleyici hata dinamikleri Denklem 4.49'daki gibi elde edilir.

$$\tilde{x}(k+1) = (A_D - L_D C) \tilde{x}(k) \quad (3.49)$$

$(A_D - L_D C)$ matrisinin özdeğerlerinin istenilen yerlere atanmasını ve gözleyici hatasının sifıra gitmesini sağlayan L_D kazancı Ackermann formülü ile bulunabilir [21].

$$L_D = \phi(A_D)W_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Bu denklemde W_o sistem gözlenebilirlik matrisi olup Denklem 3.51’de verilmiştir.

$$W_o = \begin{bmatrix} C \\ CA_D \\ \vdots \\ CA_D^{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

İstenilen gözleyici kutuplara karşılık gelen karakteristik çokterimli

$$\phi(z) = |zI - A_D + L_D C| = z^n + q_1 z^{n-1} + q_2 z^{n-2} + \dots + q_n \quad (3.52)$$

olsun. Denklem 3.50’de verilen matris çokterimlisi $\phi(A_D)$, Denklem 3.52’de z yerine A_D konularak elde edilir.

3.2.3. İndirgenmiş Mertebeli Gözleyici

Sürekli zamanda anlatılan adımlar benzer şekilde uygulanarak kesikli zamanda indirgenmiş mertebeli gözleyici tasarlanmıştır. Gözleyici tasarımında durum değişkenleri Denklem 3.53’te verildiği gibi seçilir.

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(k) \\ \mathbf{x}_b(k) \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$\mathbf{x}_a(k)$ (p boyutlu) ölçülebilen, $\mathbf{x}_b(k)$ ($(n-p)$ boyutlu) ölçülemeyen durum değişkenlerini ifade etmektedir. Seçilen durum değişkenlerine göre sistem durum denklemi Denklem 3.54’de verildiği gibi yeniden yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(k+1) \\ \mathbf{x}_b(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{Daa} & A_{Dab} \\ A_{Dba} & A_{Dbb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(k) \\ \mathbf{x}_b(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{Da} \\ B_{Db} \end{bmatrix} u(k) \quad (3.54)$$

Ölçülemeyen $\mathbf{x}_b(k)$ durumlarını kestirmek için kullanılan gözleyici durum denklemi Denklem 3.55’teki gibidir [21].

$$\eta(k+1) = A_{D_r}\eta(k) + F_{D_r}x_a(k) + B_{D_r}u(k) \quad (3.55)$$

Bu durumda kestirilen $\hat{x}_b(k)$ durumları Denklem 3.56'da verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\hat{x}_b(k) = \eta(k) + L_{D_r}x_a(k) \quad (3.56)$$

Denklem 3.55'te verilen gözleyici denkleminde Denklem 3.57'deki bağıntılar geçerli olacaktır.

$$\begin{aligned} A_{D_r} &= A_{D_{bb}} - L_{D_r}A_{D_{ab}} \\ F_{D_r} &= A_{D_r}L_{D_r} + A_{D_{ba}} - L_{D_r}A_{D_{aa}} \\ B_{D_r} &= B_{D_b} - L_{D_r}B_{D_a} \end{aligned} \quad (3.57)$$

İndirgenmiş gözleyici hatası

$$\tilde{x}_b(k) = x_b(k) - \hat{x}_b(k) \quad (3.58)$$

biçiminde tanımlandığında, gözleyici hata denklemi Denklem 3.59'daki gibi elde edilir.

$$\tilde{x}_b(k+1) = (A_{D_{bb}} - L_{D_r}A_{D_{ab}})\tilde{x}_b(k) \quad (3.59)$$

İndirgenmiş gözleyici kazancı L_{D_r} Ackermann denklemleri kullanılarak hesaplanır [21].

$$L_{D_r} = \phi_r(A_{D_{bb}})W_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

W_o ölçülemeyen durum değişkenleri sistem gözlenebilirlik matrisidir.

$$W_o = \begin{bmatrix} A_{D_{ab}} \\ A_{D_{ab}}A_{D_{bb}} \\ \vdots \\ A_{D_{ab}}A_{D_{bb}}^{n-p-1} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

İstenilen indirgenmiş gözleyici kutuplara karşılık gelen karakteristik çokterimli

$$\phi_r(z) = |zI - A_{D_{bb}} + L_{DB}A_{D_{ab}}| = z^{n-p} + q_1z^{n-p-1} + \dots + q_{n-p} \quad (3.62)$$

olsun. Denklem 3.60'da verilen matris çokterimlisi $\phi_r(A_{D_{bb}})$, Denklem 3.62'de z yerine A_D konularak elde edilir.

3.2.4. Bozucu Etki Kestirimi

Sürekli zamanda anlatıldığı gibi kesikli zamanda da bozucu etki modellenerek kestirilebilir. Bu bozucu etki

$$x_d(k+1) = x_d(k) \quad (3.63)$$

biçiminde modellenir, bu durumda yeni durum denklemleri Denklem 3.64'de verildiği biçimde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x_d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_D & B_D \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_D \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.64)$$

$$y(k) = [C \ 0] \begin{bmatrix} x(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix}$$

Yeni durum denklemleri ile indirgenmiş mertebeli gözleyici yapısı kullanılarak bozucu terim kestirilebilir. Kestirilen bozucu denetim sinyaline $\hat{x}_d(t)$ olarak dahil edildiğinde, yeni denetim sinyali Denklem 3.65'te verildiği gibi elde edilir.

$$\bar{u}(k) = u(k) - \hat{x}_d(k) \quad (3.65)$$

Sistemin ölçülemeyen durumlarının olduğu durumda, bozucu terim sistem durumlarına eklenerek tek bir indirgenmiş gözleyici ile hem ölçülemeyen sistem durumları hem de bozucu kestirilmiştir. Tez çalışmasında Denklem 3.51'de ikiye ayrılan sistem durumları $\mathbf{x}_a = [x_1 \ x_3]^T$, $\mathbf{x}_b = [x_2 \ x_4 \ x_d]^T$ olacak şekilde seçilmiştir.

3.2.5. Tümler Etkili Denetim

Sürekli zamanda olduğu gibi kesikli zamanda da kalıcı durum hatası görülmektedir. Bu kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmak için kapalı döngü sisteme tümler alıcı yerleştirilmiştir. Bunun için istenilen çıkış ile çıkış arasındaki hatanın tümleri $x_e(k)$ kullanılarak durum vektörü Denklem 3.66'da verilen biçimde genişletilmiştir.

$$\bar{x}(k) = \begin{bmatrix} x_e(k) \\ \mathbf{x}(k) \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Hata denklemi

$$e(k) = w(k) - y(k) \quad (3.67)$$

olup, $w(k)$ istenilen çıkışı ifade etmektedir. Yeni durum denklemleri Denklem 3.68'deki gibi yazılabilir.

$$\bar{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & -\mathbf{C} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_D \end{bmatrix} \bar{x}(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_D \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} w(k) \quad (3.68)$$

$$y(k) = [0 \quad \mathbf{C}] \bar{x}(k)$$

Bu durumda Denklem 3.43'te verilen \mathbf{K}_D kazancı, elde edilen yeni durum denklemleri kullanılarak hesaplanır. Yeni denetim yasası aşağıda verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} u(k) &= -\bar{\mathbf{K}}_D \bar{x}(k) = -[K_{D_e} \quad \mathbf{K}_{D_x}] \bar{x}(k) \\ &= -K_{D_e} x_e(k) - \mathbf{K}_{D_x} \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (3.69)$$

Görüldüğü gibi kapalı döngü sistem bu durumda bir tümler alıcı içermektedir.

4. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu bölümde kapsamlı bir benzetim çalışması sunulmuştur. Benzetimler MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında, gerçek duruma daha yakın olması bakımından, sistemin doğrusal olmayan modeli kullanılmıştır. Bununla beraber, durum geri beslemesine dayalı kutup atamalı denetleyici ile gözleyici tasarımları sistemin doğrusallaştırılmış modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Benzetim çalışmalarında (ve gerçek uygulamada) örnekleme aralığı önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Örnekleme aralığını küçük seçilmesi de büyük seçilmesi de başarımlı olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Sistem dinamikleri ve gerçek sistemin kısıtları da dikkate alınarak farklı örnekleme aralıkları için sistem başarımları incelenmiş ve uygun örnekleme aralığı 5 ms olarak belirlenmiştir.

Kapalı döngü sisteminin başarımlı, kapalı döngü sistem kutupları ile gözleyici kutupları belirlemektedir. Kapalı döngü sistem kutupları gerçek sistem dinamikleri ve kısıtları göz önüne alınarak, deneme yanılma yöntemi ile farklı yerlerde seçilmiş, önce benzetimlerle sonra gerçek sistem üzerinde başarımları incelenmiştir. Kutupların sanal eksene çok yakın olduğu durumda sistem tepkisinin salınım göstererek denge durumuna çok geç ulaştığı, sanal eksenden çok uzak olduğu durumda ise hızlı tepki vererek kararsız olduğu gözlenmiştir. Gerçek sistem üzerindeki uygulamalarda en iyi sonuç $s_1 = -1$, $s_2 = -5$, $s_{3,4} = -20$ değerleri ile elde edilmiştir. Gözleyici kutupları, gözlem hatasının hızlı bir şekilde sifıra gitmesi ve genel başarımlı pek fazla etkilememesi için, kapalı döngü sistem kutuplarına göre oldukça hızlı seçilmiştir. Farklı değerlerle yapılan benzetimler ve gerçek sistem üzerindeki uygulama sonuçlarına göre, tam mertebeli gözleyici için $s_{1,2,3,4} = -10$ indirgenmiş mertebeli gözleyici için $s_{1,2} = -50$ değerinin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle bu bölümde sunulan benzetim çalışmalarında bu değerler kullanılmıştır.

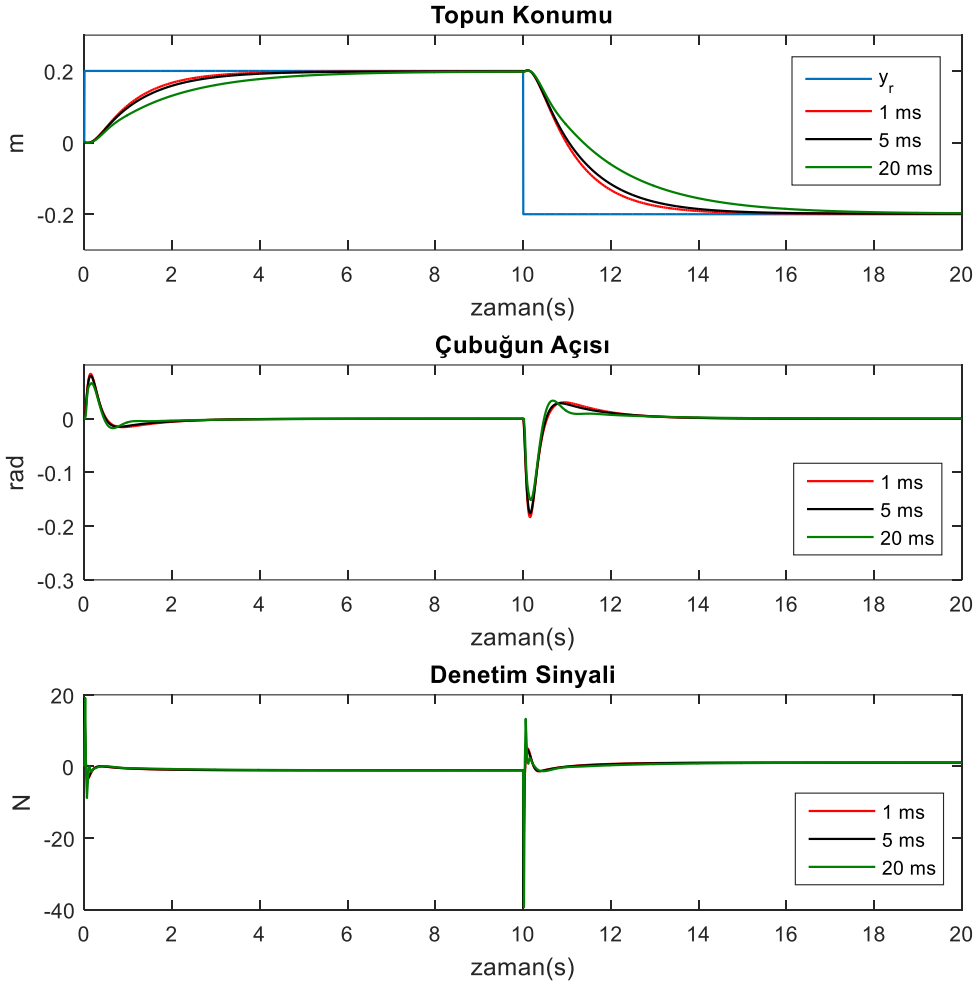
Durum geribeslemesi ile kutup atama yönteminde, önce sistemin durumlarının tamamının ölçülebildiği varsayılmış ve doğrudan (gözleyici olmadan) durum geribeslemesi kullanılmıştır. Daha sonra, durum geri beslemesi tam ve indirgenmiş mertebeli gözleyici ile birlikte kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca kesikli zaman ve sürekli zaman yöntemlerinin başarımları birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Doğrusal olmayan gürbüz bir denetim yöntemi olan kayan kipli denetim ile sistemin başarımı hem benzetim ortamında hem de gerçek sistem üzerinde incelenmiştir. Farklı kayma yüzeyi parametreleri seçilerek benzetim sonuçları elde edilmiş, gerçek sistem üzerindeki başarımları incelenerek uygun parametreler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar kutup atama yöntemi ile kıyaslanmıştır. Kayan kipli denetim yönteminde sistemin ölçülemeyen durumları indirgenmiş mertebeli gözleyici ile kestirilmiştir.

Bu çalışmalara ek olarak sisteme etki eden bozucu modellenerek, gözleyici ile kestirilmeye çalışılmıştır. Kestirilen bozucu terim ileri besleme ile sisteme uygulanmış, sistem tepkisinin başarımı incelenmiştir. Benzer şekilde kalıcı durum hatasını yok etmek için, çıkış isteri ile gerçekleşen çıkış arasındaki hata tümlevinin sisteme eklendiği durumun da benzetim sonuçları incelenmiştir. Bu benzetimlerde gerçek sisteme yakın olacak şekilde ölü bölge eklenmiş doğrusal olmayan sistem modeli kullanılmıştır.

4.1. Sürekli Zaman Kutup Atama

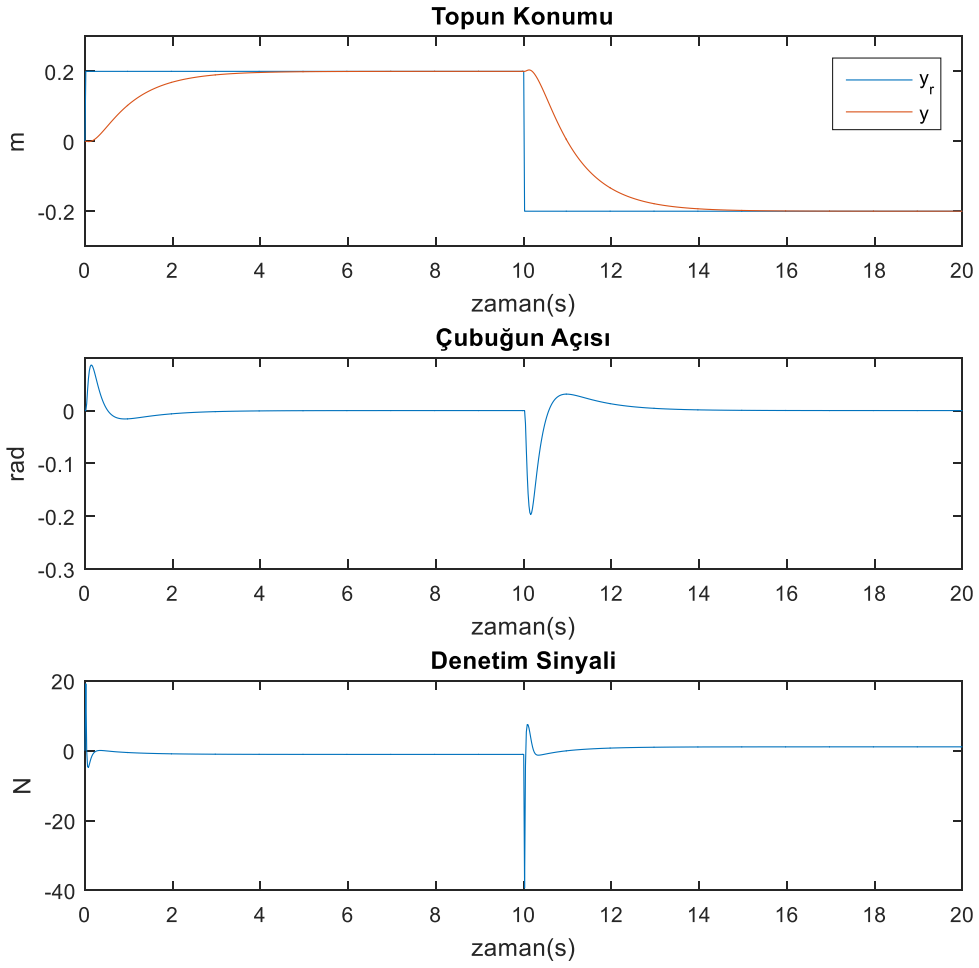
Yukarıda da bahsedildiği gibi örnekleme aralığı seçimi önemli bir konudur. Gerçek sistem üzerinde en iyi sonucun elde edildiği $s_1 = -1$, $s_2 = -5$, $s_{3,4} = -20$ kutupları kullanılarak farklı örnekleme aralıkları için sistem benzetim başarımları incelenmiş, uygun örnekleme aralığı belirlenmiştir. Bu benzetim çalışmasında kutupları $s_{1,2} = -50$ olan indirgenmiş mertebeli gözleyici ile sistemin ölçülemeyen durumları kestirilerek durum geri beslemesinde kullanılmıştır. 1ms, 5 ms, 20 ms örnekleme aralıkları için elde edilen benzetim sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Sürekli zamanda benzetim çalışmalarında kullanılacak olan g durağan kazancı 95.57 olarak hesaplanmıştır. Ancak bu kazanç sistem doğrusal olmadığı için, kapalı döngü durağan kazancını 1 yapamamaktadır. Bir miktar sapma (offset) olmaktadır. Bu sapmayı yok etmek için g kazancı ayarlanarak, 97.02 seçilmiştir.



Şekil 4.1. Örnekleme aralığının başarıma etkisi

Sonuçlara göre örnekleme aralığı azaltıldığında sistem tepkisinin daha hızlı olduğu gözlenmiştir. Örnekleme aralığı yüksek bir değer seçildiğinde ise sistem tepkisinin yavaşladığı ve denetim sinyalinin salınım yaptığı gözlenmiştir. 1 ms ve 5 ms ile çalışmanın sistem tepkisi anlamında büyük farklar oluşturmadığı gözlenmiş, gerçek zamanlı uygulama da göz önüne alınarak 5 ms uygun değer olarak seçilmiştir. Bundan sonra yapılan benzetim çalışmalarında ve gerçek sistem üzerindeki (örnekleme aralığının başarıma etkisinin gösterildiği uygulamaların dışında) uygulamalarda bu örnekleme aralığı kullanılmıştır.

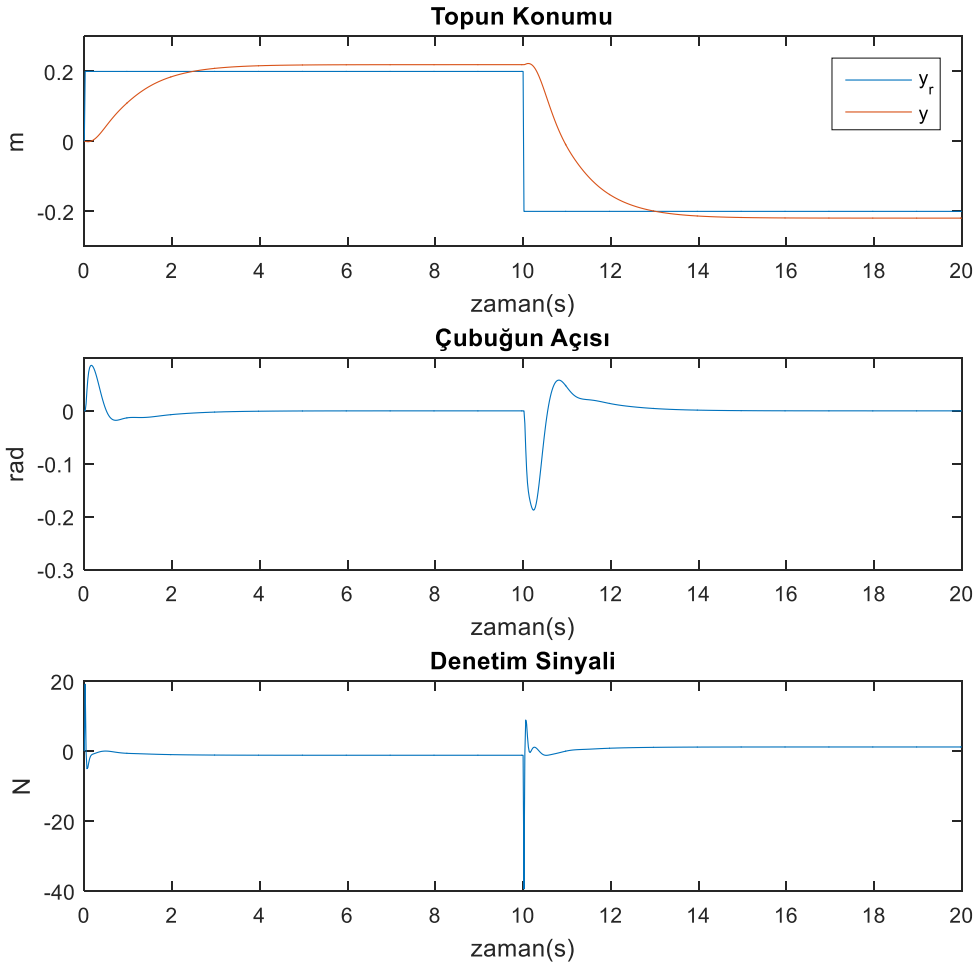
Sistemin durumlarının tamamının bilindiği varsayılarak elde edilen benzetim sonucu Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Sürekli zamanda gözleyici kullanılmadığında elde edilen benzetim sonucu

Şekilden görüldüğü gibi denetim başarımı beklenildiği gibidir; herhangi bir aşım ya da salınım görülmemektedir. Kapalı döngü sistem tepkisini büyük ölçüde $s_1 = -1$ 'deki kutup belirlemektedir.

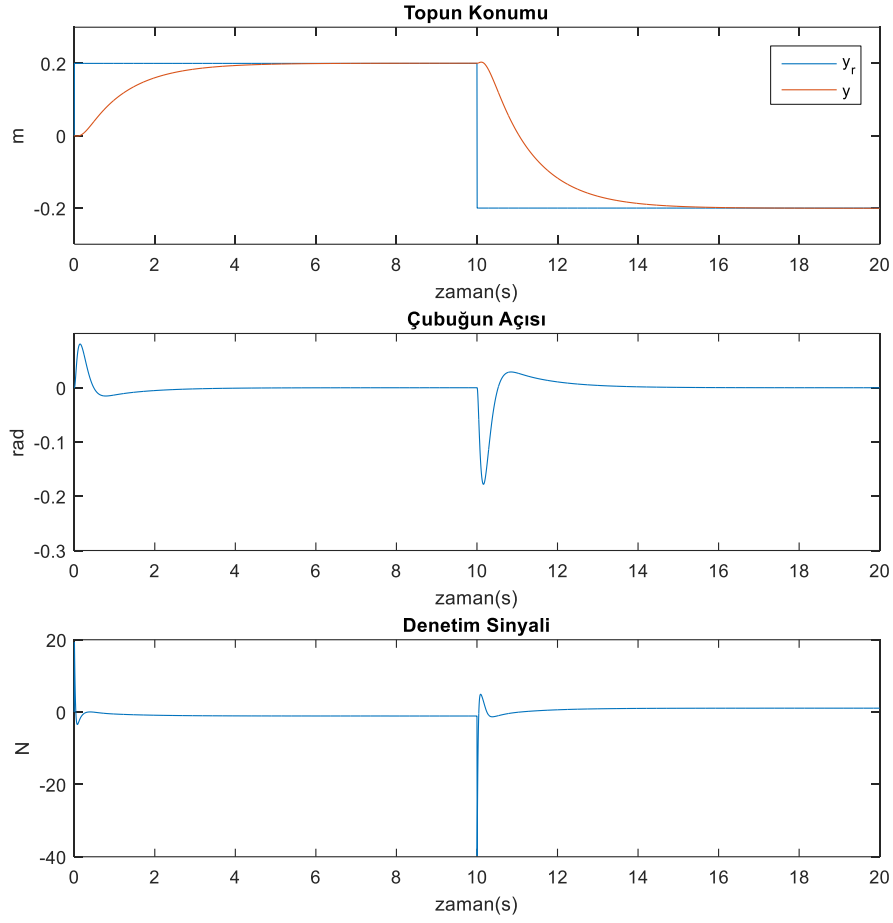
Sistemin durumlarının tamamının tam mertebeli gözleyici kullanılarak kestirildiği kutup atamalı denetim sonucu Şekil 4.3'te verilmiştir. Gözleyici kutupları $s_{1,2,3,4} = -10$ seçilmiştir.



Şekil 4.3. Sürekli zamanda tam mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonucu

Görüldüğü gibi gözleyici kullanıldığında kalıcı durum hatası oluşmuştur. Bu, sistemin doğrusal olmayışından kaynaklanmaktadır. Gözleyici kutupları oldukça hızlı seçildiğinden, sistemin geçici tepkisine hemen hemen hiç etkisi olmamıştır.

Sistemin ölçülemeyen durumlarının indirgenmiş mertebeli gözleyici ile kestirildiği benzetim sonucu Şekil 4.4'te verilmiştir. Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$ kullanılmıştır.

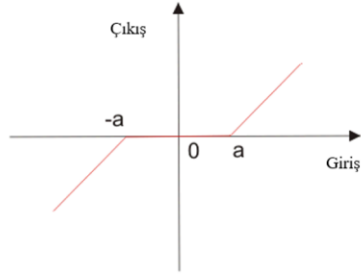


Şekil 4.4. Sürekli zamanda indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonucu

İndirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılarak elde edilen sistem tepkisi Şekil 4.2 ile karşılaştırıldığında sistem tepkisi anlamında önemli bir fark görülmemektedir; denetim başarımının oldukça iyi olduğu söylenebilir. Tam mertebeli gözleyici kullanıldığı durumda oluşan kalıcı durum hatasının burada görülmemesinin sebebi, indirgenmiş mertebeli gözleyici ile sistem durumlarının kestiriminin daha iyi yapılmasındandır.

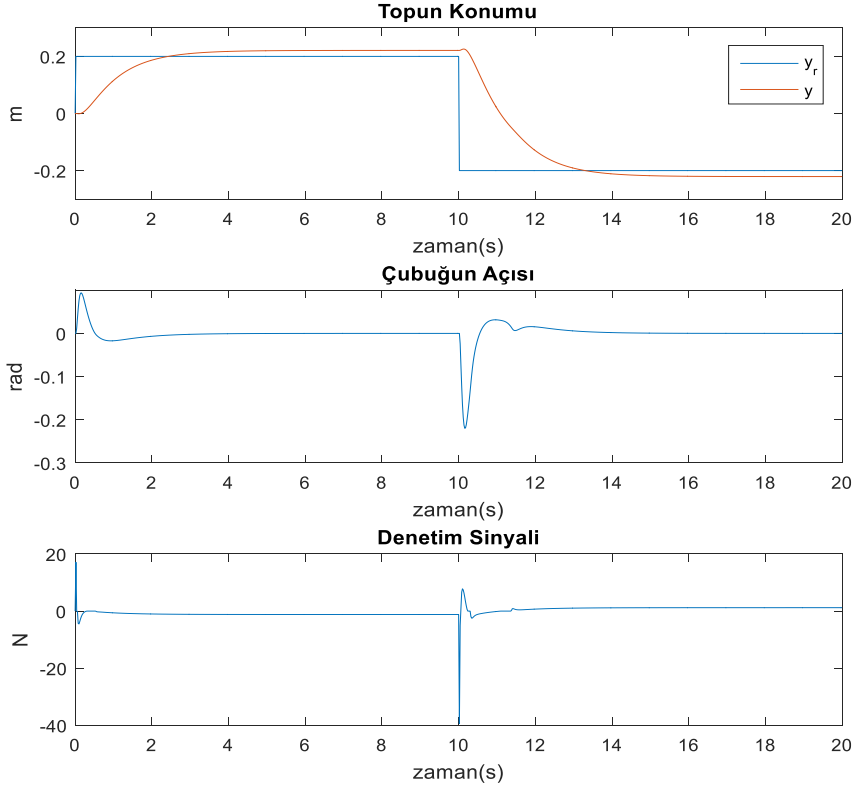
Sistemin tüm durumlarının bilindiği durumda, bozucu gözleyicinin sistem tepkisine etkisini incelemek için sistem denetim sinyali çıkışına ölü bölge eklenmiştir. Eklenen ölü bölgenin karakteristiği Şekil 4.5'teki gibi verilmiştir. Ölü bölge eklenmiş benzetim sonuçları ile bozucu dengeleme yapılmış benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Şekilde görülen a değeri gerçek sistem üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda gözlenen değere yakın olacak şekilde 2 N olarak seçilmiştir.



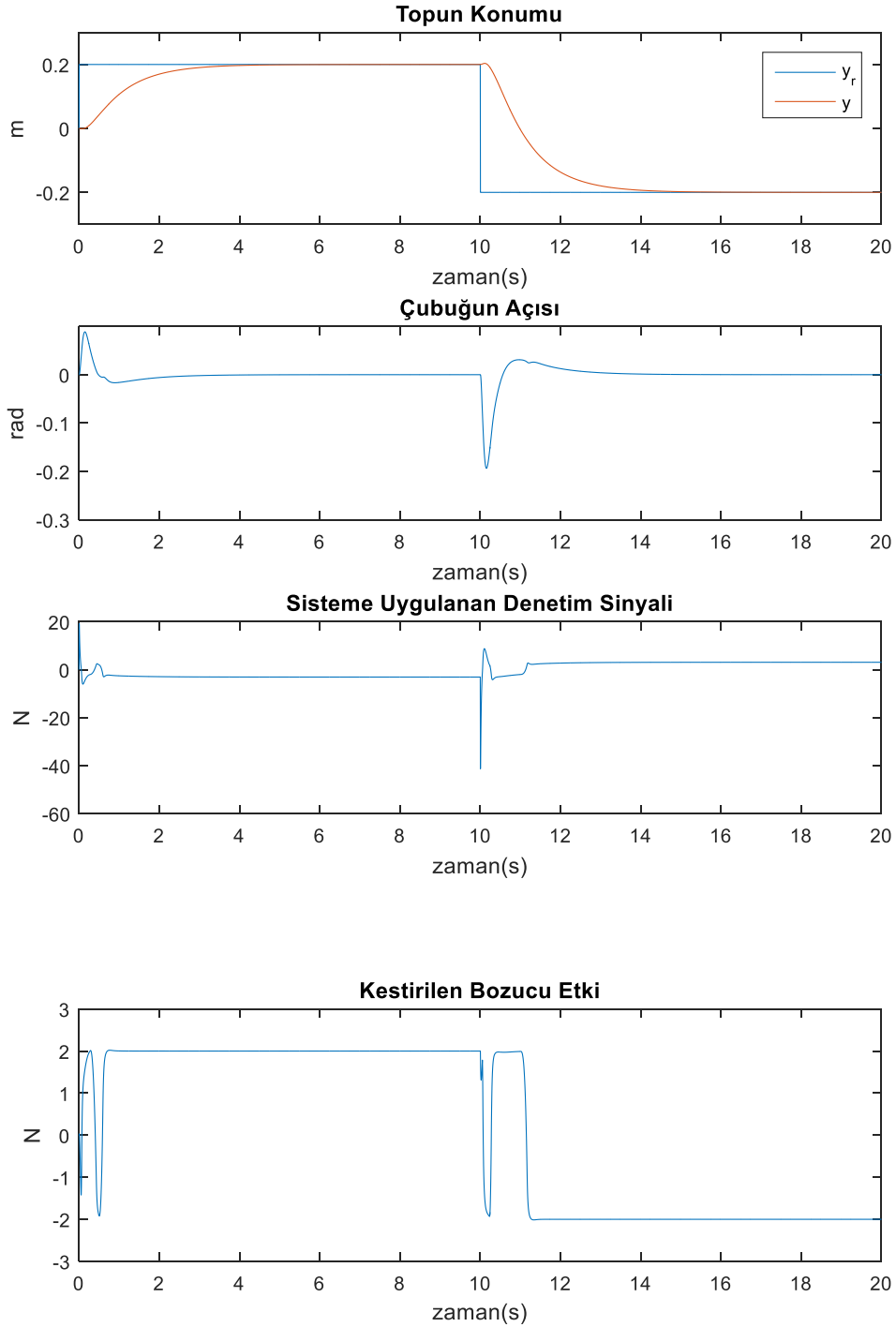
Şekil 4.5. Denetim sinyali çıkışına uygulanan ölü bölge

Ölü bölgenin eklenildiği ve bozucu terim ile dengeleme yapılmadığı durumda elde edilen benzetim sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi sistem denetim başarımında kalıcı durum hatası gözlenmektedir. Bu durum bozucu gözleyi kullanılmasının gerekliliğini göstermektedir.



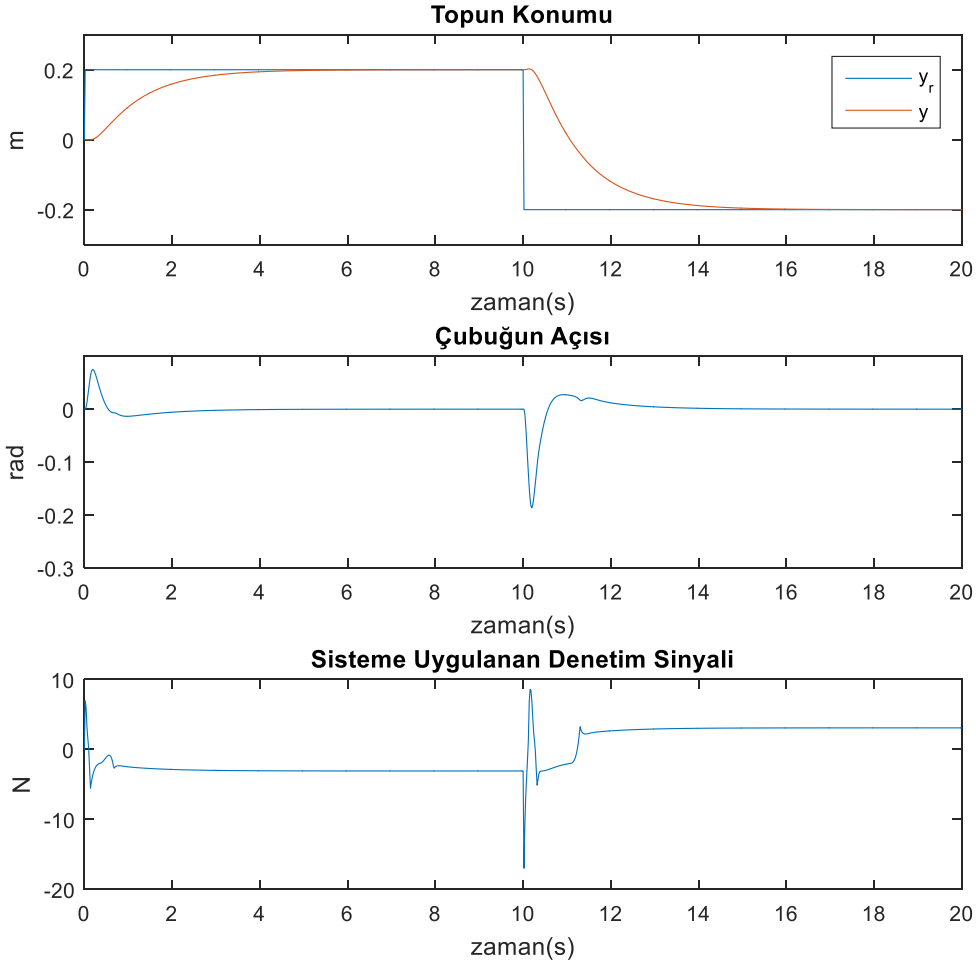
Şekil 4.6. Sürekli zamanda ölü bölge eklendiğinde benzetim sonucu

Yukarıda verilen ölü bölge dahil edilmiş sistemde, kestirilen bozucu terimin sisteme ileri besleme olarak uygulanması ile elde edilen benzetim sonucu Şekil 4.7’de verilmiştir. Sistemin kalıcı durum hatasını giderdiği ve sistem denetimini iyileştirdiği görülmüştür. Gerçek sistem uygulamalarında bozucu değişken bir yapıda olacağı için gözleyici kullanımının sistem başarımına etkisi uygulama sonuçlarında daha iyi görülecektir.



Şekil 4.7. Sürekli zamanda bozucu dengeleme yapılmış benzetim sonucu

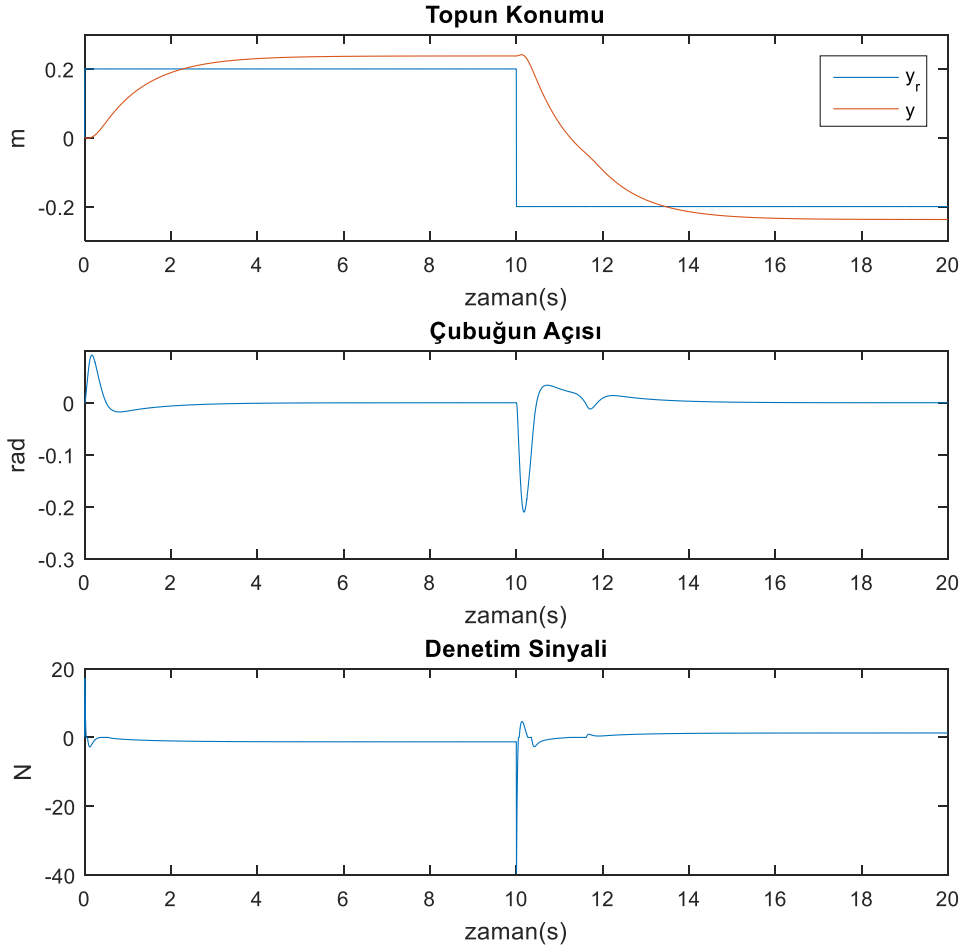
Kalıcı durum hatasını gidermek için kullanılan diğer bir yöntem olan hata tümlevinin sistem durumlarına eklendiği durumda sistem tepkisinin sonucu Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi kalıcı durum hatası giderilerek sistem başarımında iyileşme olmuştur. Bu yöntemde denetim sinyalinin büyüklüğünde azalma görülmüştür. Şekil 4.7 ile kıyaslandığında her iki yöntemin ölü bölgeden kaynaklanan kalıcı durum hatasını başarıyla giderdiği görülmektedir.



Şekil 4.8. Sürekli zamanda tümlev etkili denetim benzetim sonucu

Sisteme ölü bölge eklenildiği durum için tam mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonuçları, gözleyici olmadığı duruma çok benzer olduğundan, tam mertebeli ile elde edilen benzetim sonuçları verilmemiştir. Gerçek sistemdeki uygulama da göz önüne alınarak, sadece indirgenmiş mertebeli gözleyici ile yapılan benzetim sonuçları verilmiştir.

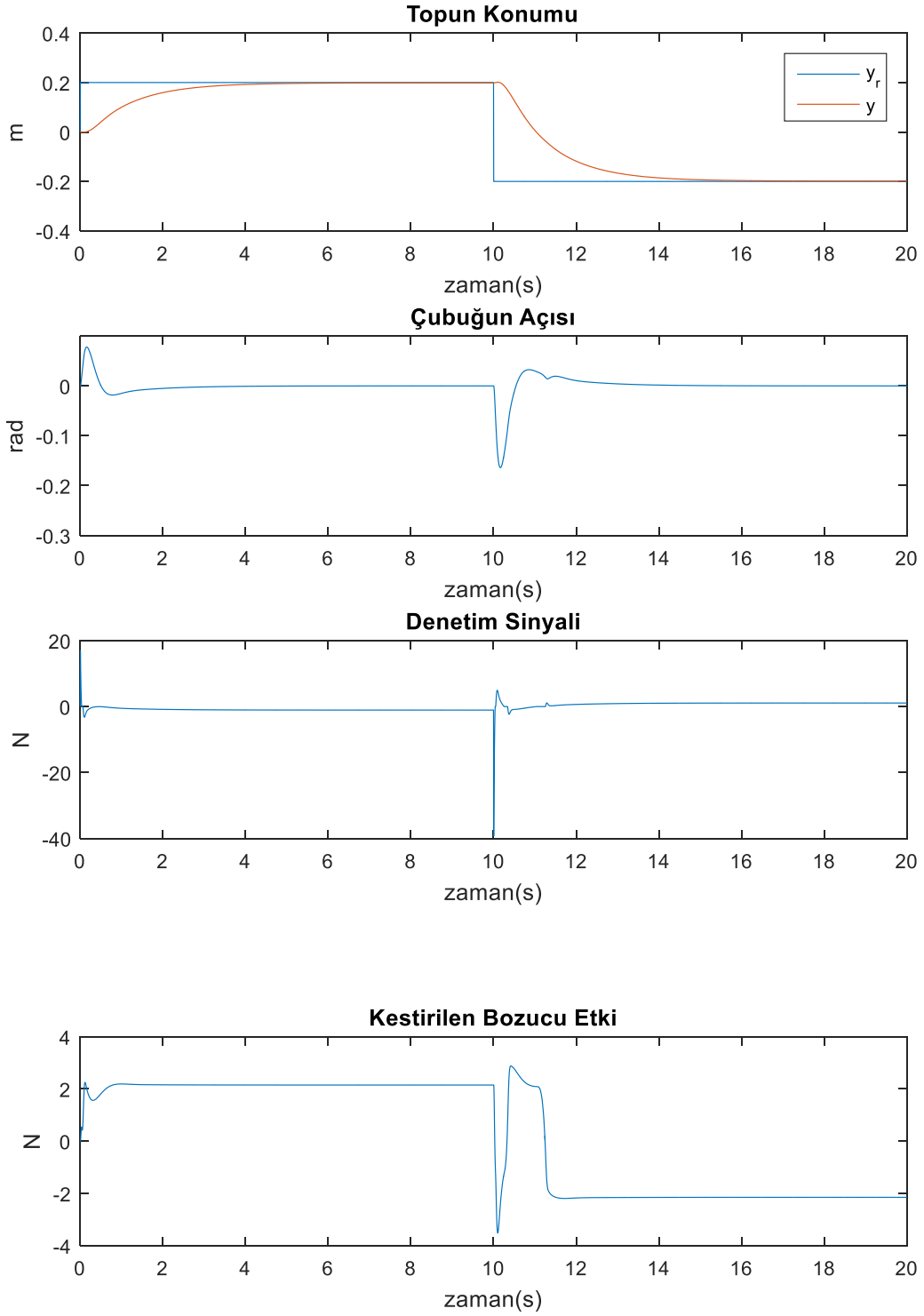
İndirgenmiş mertebeli gözleyici ile sistem durumlarının kestirildiği, sistem denetim sinyali çıkışına ölü bölge eklenildiği ve kestirilen bozucu terimin sisteme dahil edilmediği durumdaki benzetim sonuçları Şekil 4.9’da verilmiştir. Eklenen ölü bölge aynı olmasına rağmen kalıcı durum hatasının Şekil 4.6’da tüm sistem durumlarının bilindiği (gözleyici kullanılmadığı) duruma göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise sisteme eklenen ölü bölgenin sistem durum kestirimlerini de olumsuz etkileyerek, hatayı artırmasıdır.



Şekil 4.9. Sürekli zamanda ölü bölge eklenildiğinde ve indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonucu

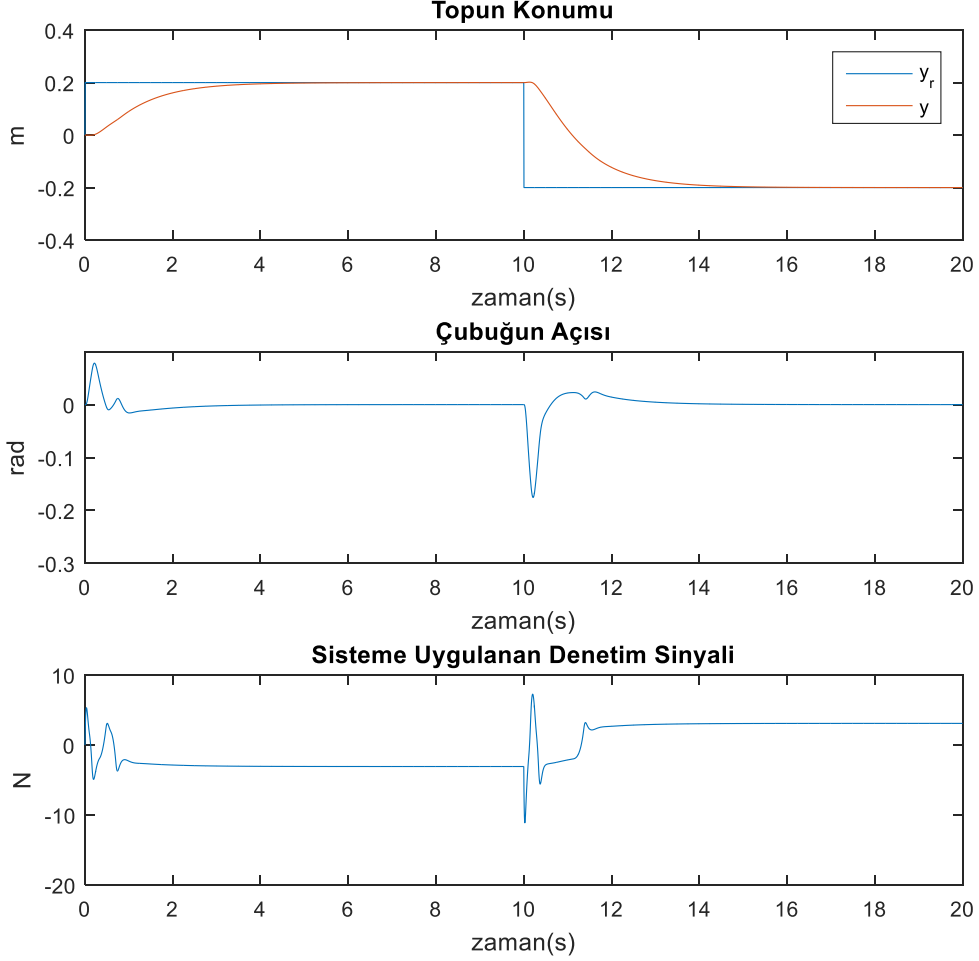
Yukarıda verilen ölü bölge dahil edilmiş, indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılan sistemde kestirilen bozucu terimin, sisteme ileri besleme olarak uygulandığı benzetim

sonucu Şekil 4.10'da verilmiştir. Elde edilen benzetim sonucunda kalıcı durum hatasının giderildiği görülmüştür.



Şekil 4.10. Sürekli zamanda bozucu dengeleme yapılmış, indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında benzetim sonucu

İndirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılan sistemde, hata tümlevinin sistem durumlarına eklendiği sistem tepkisinin sonucu Şekil 4.11’de verilmiştir. Benzer şekilde kalıcı durum hatasının giderildiği görülmektedir.

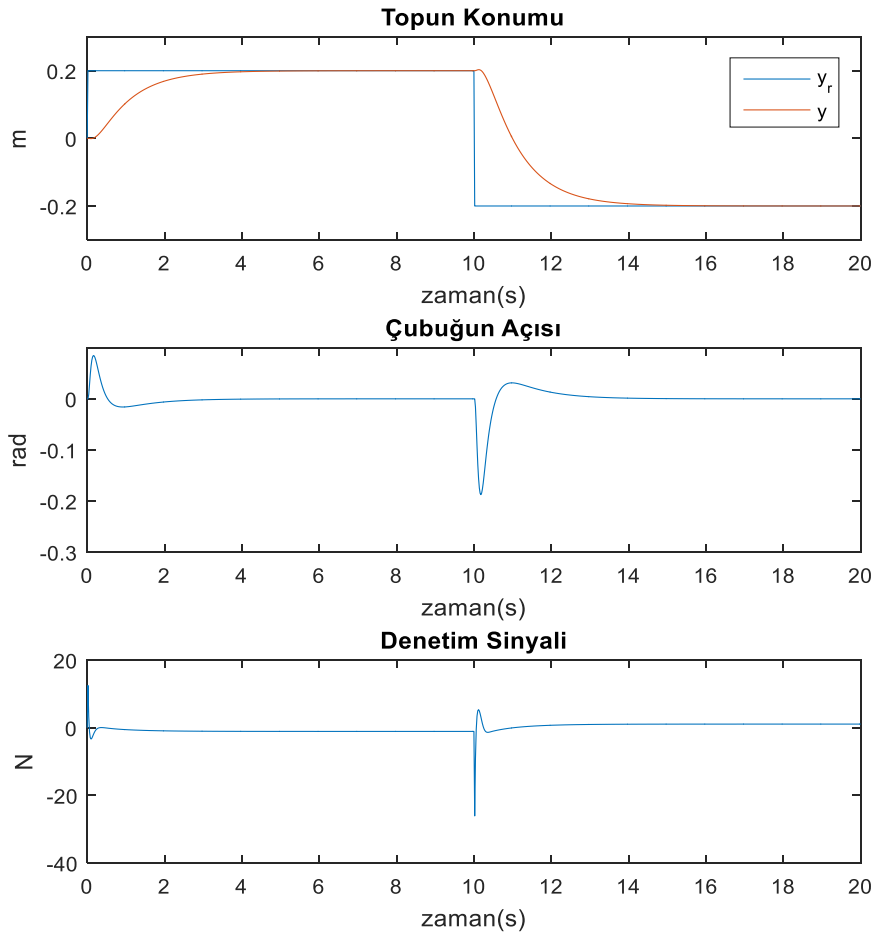


Şekil 4.11. Sürekli zamanda indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında tümlev etkili denetim benzetim sonucu

Benzetimlerde bozucu etki kestirimi ile tümlev alıcı yöntemin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Her iki yöntemle de kalıcı durum hatası giderilebilmektedir. Ancak gerçek uygulamada, bozucu terim kestiriminin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

4.2. Kesikli Zaman Kutup Atama

Bu bölümde sürekli zamanda seçilen kapalı döngü kutup ve gözleyici kutup değerleri 5 ms örnekleme aralığına göre kesikli zamandaki karşılıkları hesaplanarak benzetim çalışmalarında kullanılmıştır. Sürekli zamanda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmasında kolaylık sağlanması için seçilen değerler sürekli zamanda ifade edilmiştir. Kapalı döngü kutupları $s_1 = -1$, $s_2 = -5$, $s_{3,4} = -20$ olarak seçildiğinde, sistemin durumlarının tamamının bilindiği varsayılarak elde edilen benzetim sonucu Şekil 4.12’de verilmiştir. Sürekli zamanda olduğu gibi, kesikli zaman benzetim çalışmalarında da g durağan kazancının ayarlanması gerekmektedir. 85.72 olarak hesaplanan g kazancı, kalıcı durum hatasını gidermek üzere 87.00 olarak ayarlanmıştır.

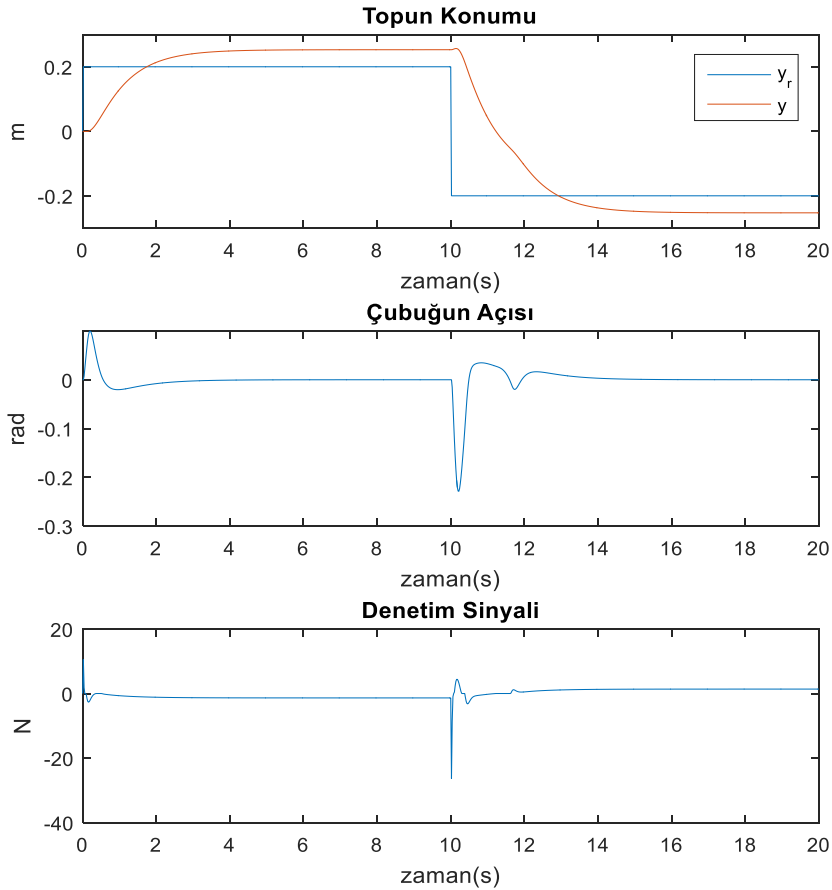


Şekil 4.12. Kesikli zamanda gözleyici kullanılmadığında elde edilen benzetim sonucu

Kesikli zamanda elde edilen benzetim sonucu Şekil 4.2 ile karşılaştırıldığında sonuçların hemen hemen aynı olduğu söylenebilir. Sadece denetim sinyalinin büyüklüğünün ve

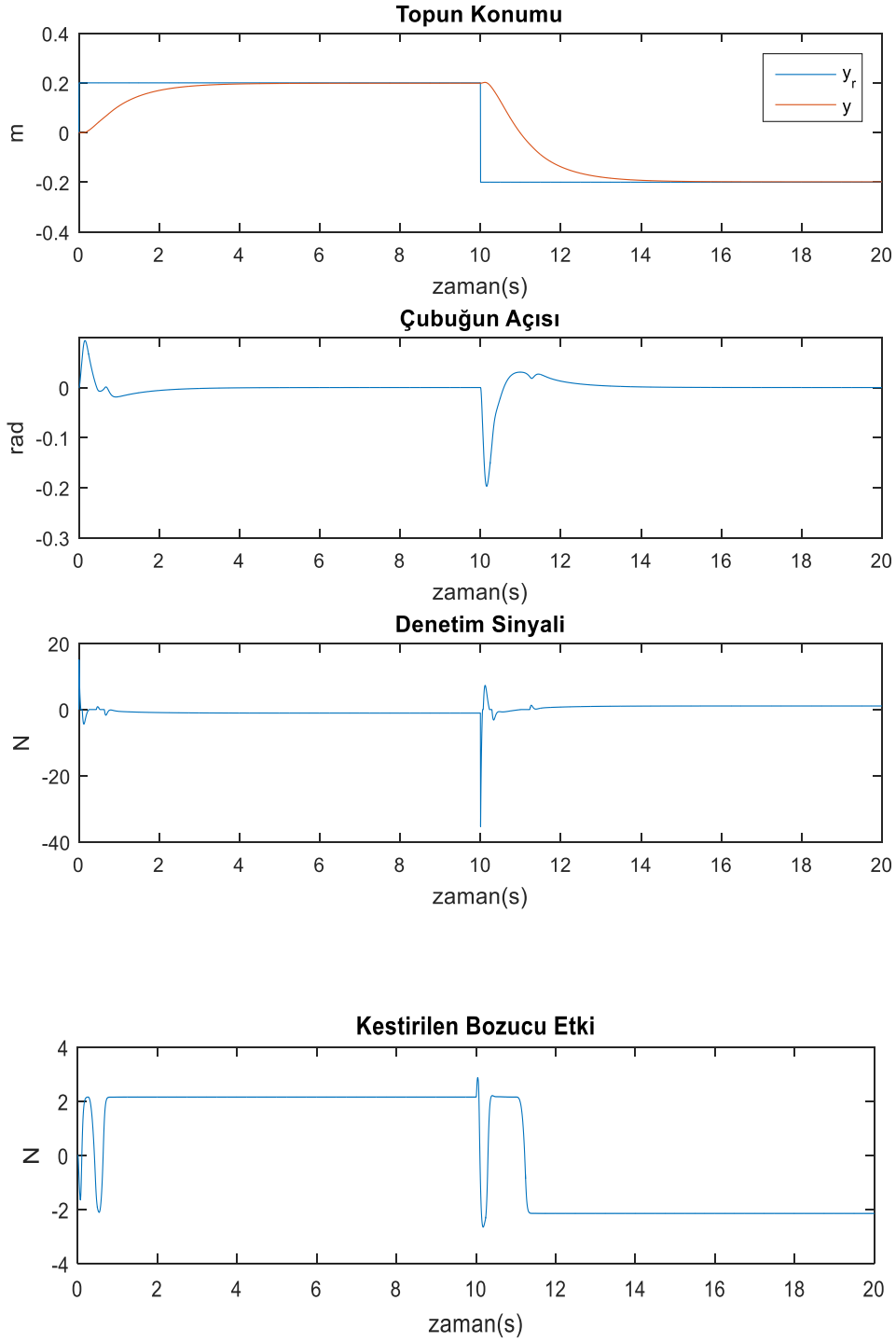
etkinliğinin biraz azaldığı görülmektedir. Kesikli zamanda tam ve indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında da, sürekli zamanda elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar alınmıştır. Örnekleme aralığı uygun seçildiğinde benzetim ortamında her iki yaklaşımın benzer sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu nedenle kesikli zamanda elde edilen benzetim sonuçlarının tamamı verilmemiş, sadece indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığı ve ölü bölge eklenildiği ve kalıcı durum hatasının giderildiği benzetim sonuçları verilmiştir.

İndirgenmiş mertebeli gözleyici ile sistem durumlarının kestirildiği durumda, ölü bölge eklenmiş benzetim sonucu Şekil 4.13'te verilmiştir. Sürekli zamanda da görüldüğü gibi kalıcı durum hatası burada da görülmektedir. Şekil 4.9 ile karşılaştırıldığında sistem tepkisi benzer olmakla beraber kalıcı durum hatasının bir miktar arttığı, denetim sinyalinin büyüklüğünde bir miktar azaldığı görülmektedir.



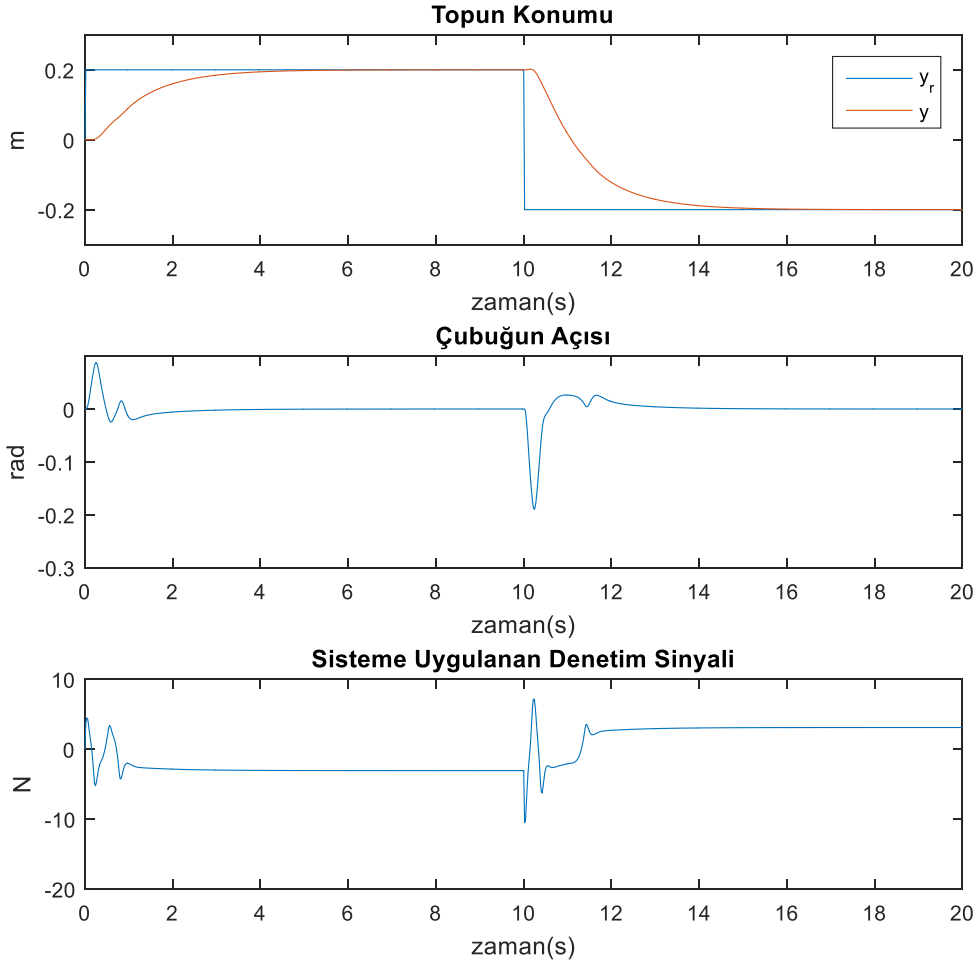
Şekil 4.13. Kesikli zamanda ölü bölge eklenildiğinde ve indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonucu

Yukarıda verilen ölü bölge dahil edilmiş, indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılan sistemde, kestirilen bozucu terimin, sisteme ileri besleme olarak uygulanması ile edilen benzetim sonucu Şekil 4.14'te verilmiştir. Elde edilen benzetim sonucunda kalıcı durum hatasının giderildiği görülmüştür.



Şekil 4.14. Kesikli zamanda bozucu dengeleme yapılmış, indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında benzetim sonucu

İndirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılan sistemde, hata tümlevinin sistem durumlarına eklendiği benzetim sonucu Şekil 4.15'te verilmiştir.

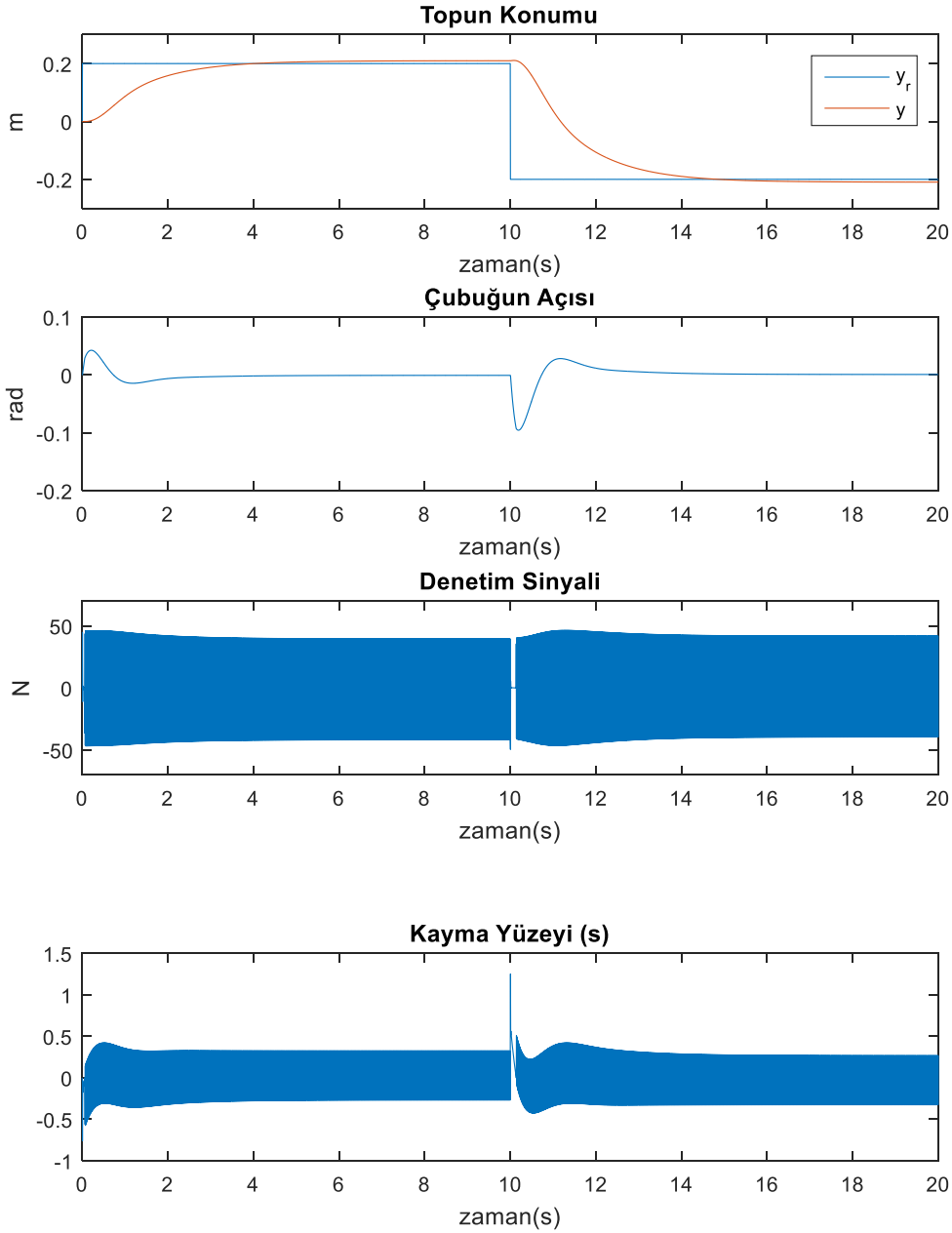


Şekil 4.15. Kesikli zamanda, indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında tümlev etkili denetim benzetim sonucu

Sürekli zamanda da görüldüğü gibi bozucu etki kestirimi ile tümlev alıcı yöntemi benzer sonuçlar vermektedir. Her iki yöntemle de kesikli zamanda da kalıcı durum hatası giderilebilmektedir. Ayrıca, örnekleme aralığı uygun seçildiği için sonuçlar sürekli zaman sonuçlara oldukça benzerdir.

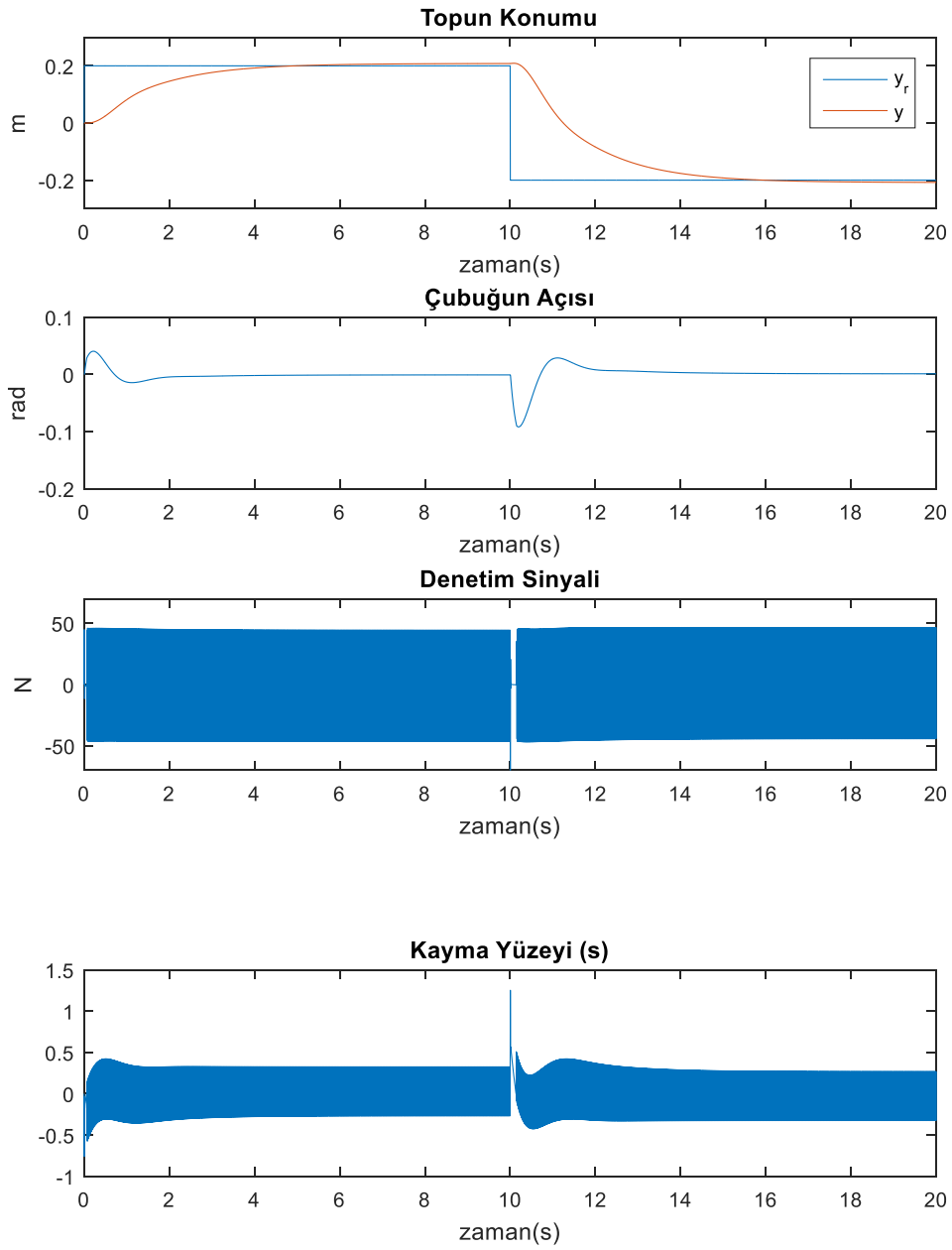
4.3. Kayan Kipli Denetim

Kayan kipli denetim yönteminde Bölüm 3.1.6’da anlatıldığı gibi sistem kayan kipte çalışırken doğrusallaştırıldığında elde edilen karakteristik denklem kullanılarak $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ parametreleri belirlenmiştir. İstenilen $s_1 = -1, s_{2,3} = -5$ kutuplarına karşılık, $\gamma_1 = 11, \gamma_2 = 5.3213, \gamma_3 = 3.8009$ olarak hesaplanmıştır. Farklı K_1, K_2 kazançları denenerek sistem tepkileri incelenmiş, $K_1 = 10, K_2 = 5$ olarak belirlenmiştir. Sistem durumlarının tamamının bilindiği durumda elde edilen sistem tepkisi Şekil 4.16’da verilmiştir.



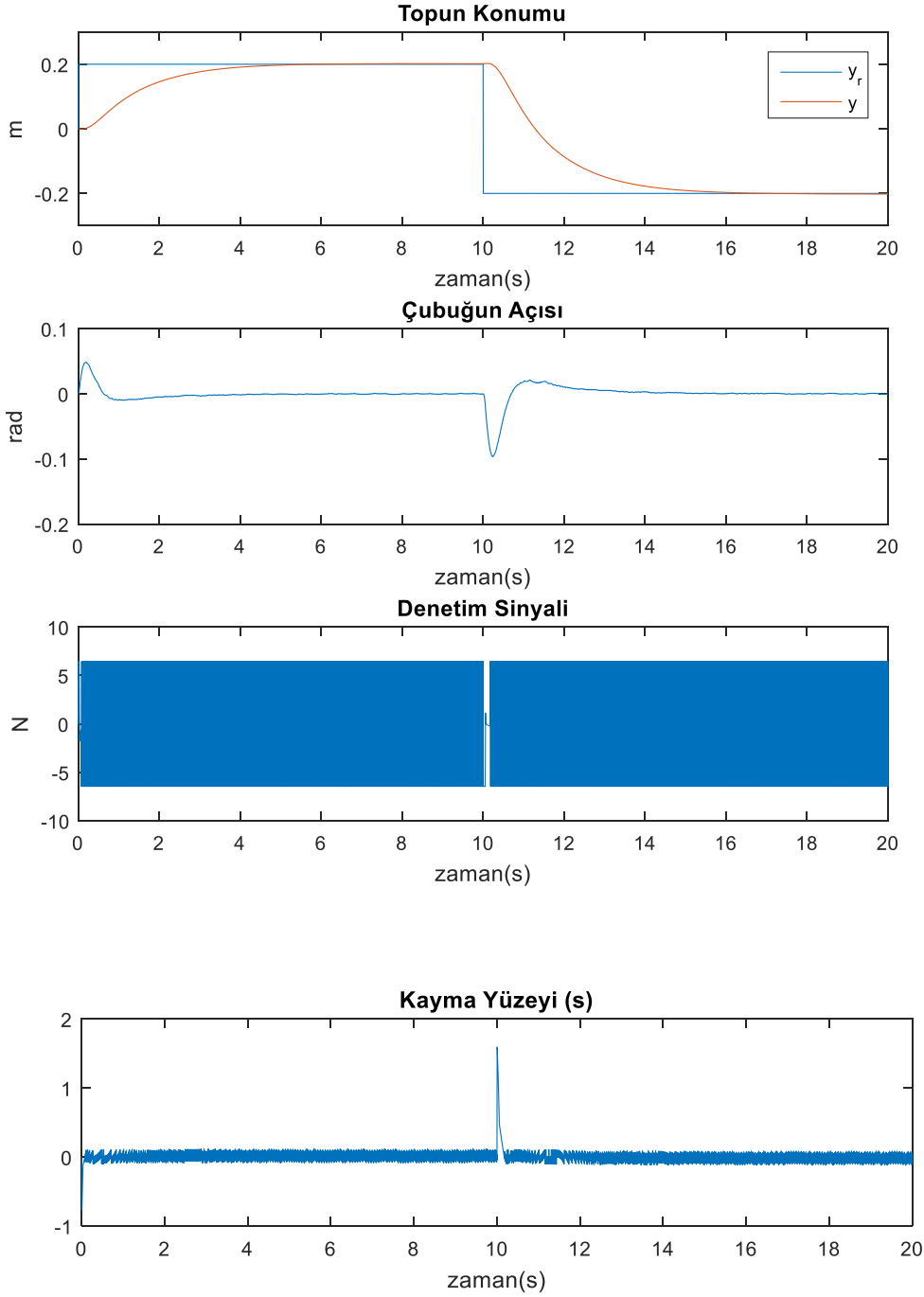
Şekil 4.16. Gözleyici kullanılmadığında kayan kipli denetim benzetim sonucu

Sistemin başarımlı sonucu beklenildiği gibidir. Herhangi bir aşım ya da salınım görülmemektedir. Sistemin doğrusal olmayan yapısından kaynaklı bir miktar sapma (offset) görülmektedir. Kayma yüzeyi tepkisi incelendiğinde, sistemin kayan kipe girmesinin oldukça hızlı olduğu görülmektedir. İndirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında elde edilen benzetim sonucu Şekil 4.17’de verilmiştir. Sistemin tüm durumlarının bilindiği benzetim sonuçları ile hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Burada doğrusal gözleyici kullanılmış olmasının sonucu pek etkilemediği görülmüştür.



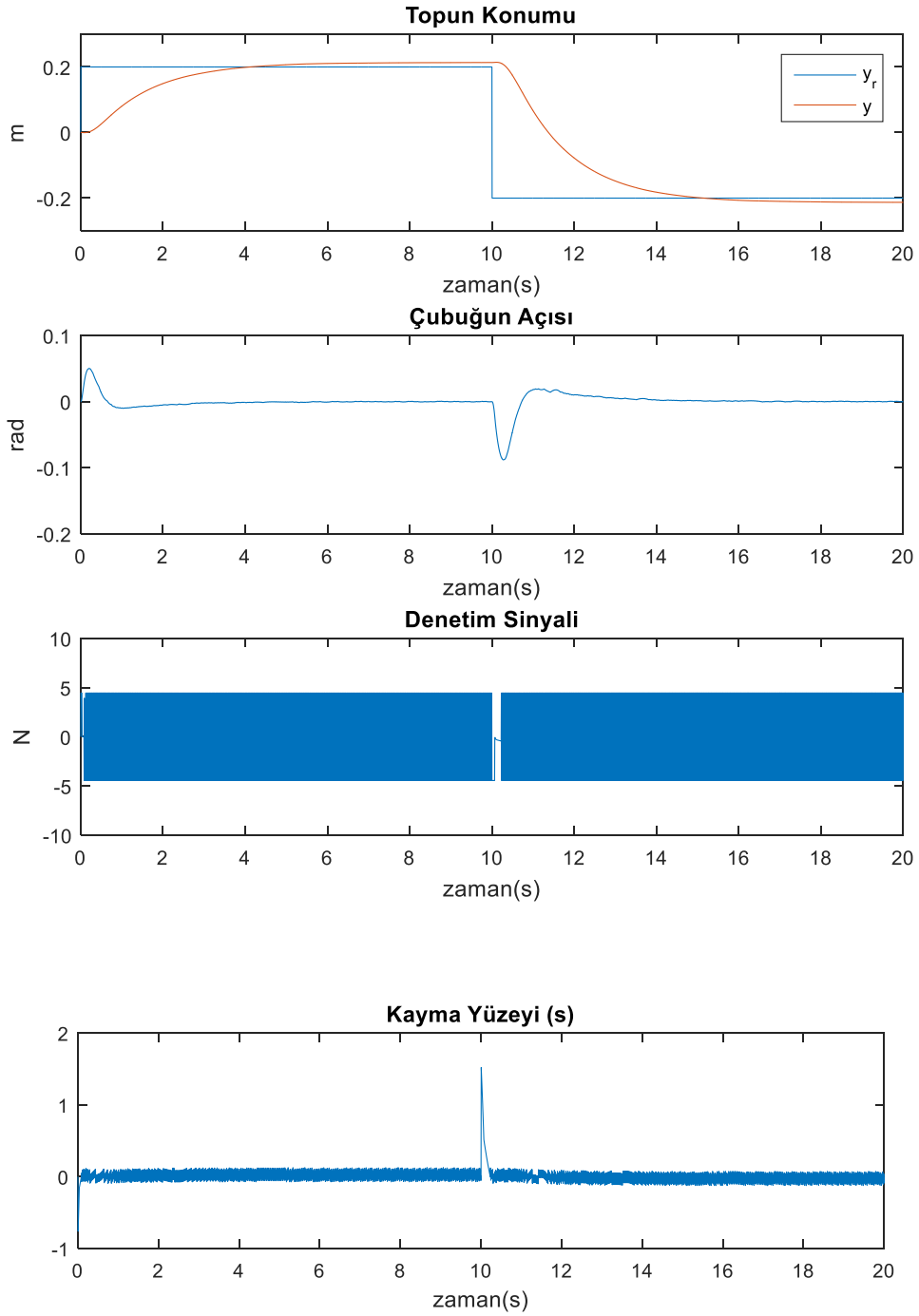
Şekil 4.17. İndirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında kayan kipli denetim benzetim sonucu

Denetim sinyali gerçek sisteme verilebilecek sınır değer olan ± 6.45 değeri ile sınırlandırıldığında elde edilen sistem tepkisi Şekil 4.18’de verilmiştir. Denetim sinyalini bu değerlerle sınırlandırmak denetim başarımını olumsuz etkilememiştir; sistem tepkisi oldukça benzerdir. Hatta sapma yok olmuştur. Denetim sinyalinin sınırlandırılması kayma yüzeyindeki çattırının genliğini de azaltmıştır.



Şekil 4.18. Denetim sinyali sınırlandığında ve indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanıldığında kayan kipli denetim benzetim sonucu

Sınırlanmış denetim sinyaline ek olarak ölü bölge dahil edildiğinde elde edilen sistem tepkisi Şekil 4.19’da görüldüğü gibi olmaktadır. Bir miktar kalıcı durum hatası burada da gözlenmektedir. Ancak denetim sinyali sadece (± 6.45) iki değer aldığı ve ölü bölge bu değerler arasında kaldığı için ölü bölgeden kaynaklı oluşan kalıcı durum hatası kutup atamalı denetime göre biraz daha az olmaktadır. Genel olarak kayan kipli denetim ile, kutup atamalı denetime benzer sonuçlar elde edildiği söylenebilir.



Şekil 4.19. Ölü bölge eklendiğinde kayan kipli denetim benzetim sonucu

5. UYGULAMA SONUÇLARI

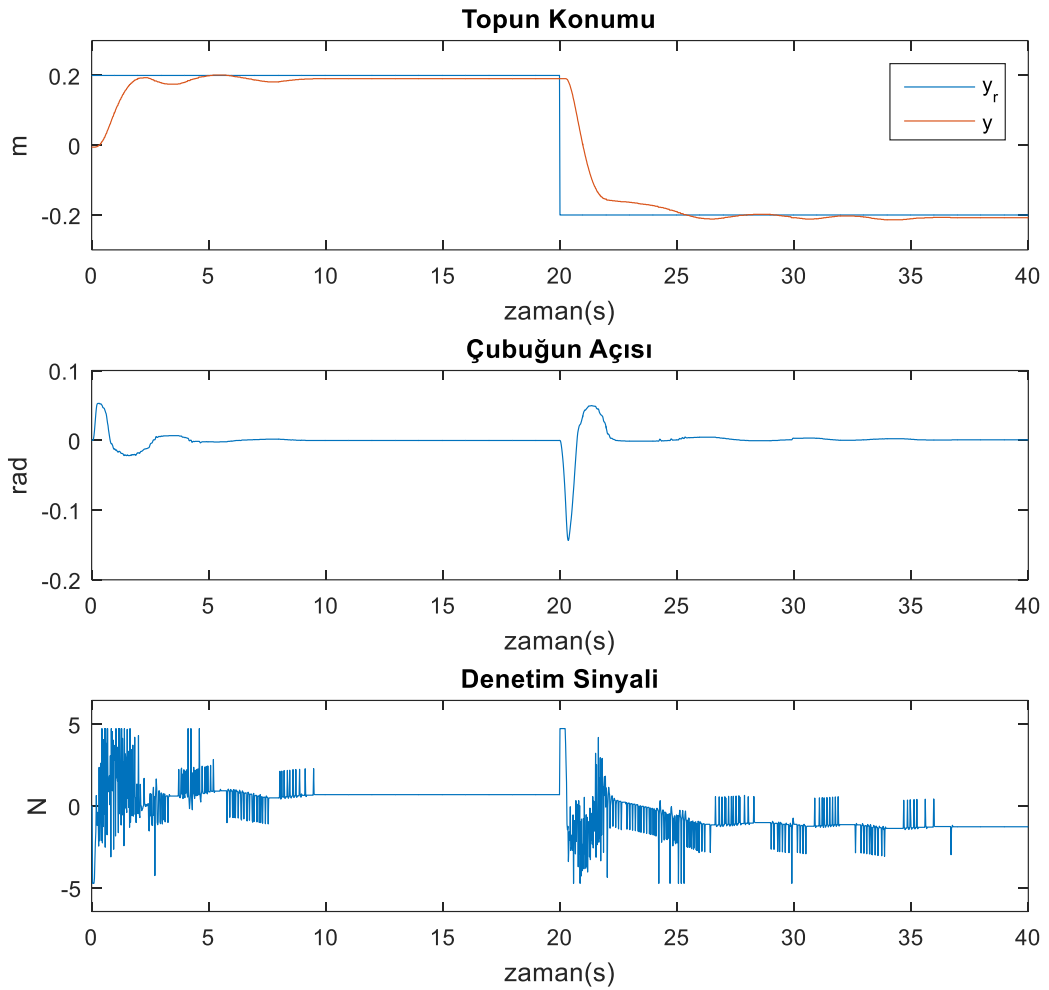
Bu bölümde top ve çubuk sisteminin kutup atamalı ve kayan kipli denetim yöntemleri ile gerçek zamanlı denetimi incelenmiş, uygulama sonuçları verilmiştir. Sistemin ölçülemeyen durumları hem tam mertebeli gözleyici hem de indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılarak, gerçek uygulama üzerinden kestirilmeye çalışılmıştır. Tam mertebeli gözleyici kullanılarak elde edilen kestirim sonuçlarında, sistemin modellenemeyen dinamik özellikleri ve doğrusal olmayan etkilerinden dolayı istenilen başarımlar elde edilememiştir. Bu nedenle sistemin ölçülemeyen durumlarını kestirmek için uygulama çalışmalarında indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılmıştır. Ayrıca sürme mekanizmasından kaynaklı sisteme etki eden bozucu da, ölçülemeyen sistem durumları ile birlikte bu indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılarak kestirilmiştir. Uygulama çalışmalarında kullanılacak olan uygun örnekleme aralığı ve gözleyici kutupları, kutup atamalı denetim ile sistem başarımları incelenerek belirlenmiştir.

5.1. Kesikli Zaman Kutup Atama

Kutup atamalı denetim ile farklı kapalı döngü sistem kutupları ve farklı gözleyici kutupları seçilerek gerçek sistem tepkileri incelenmiş, sistem başarımları için en uygun olan değerler belirlenmiştir. 4. Bölüm'de de bahsedildiği gibi kutup değerleri sürekli zamanda seçilmiş, kesikli zamandaki karşılıkları kullanılan örnekleme aralıklarına göre hesaplanarak uygulama çalışmalarında kullanılmıştır. Öncelikle farklı kapalı döngü sistem kutupları için kesikli zamanda gerçek sistem tepkileri incelenerek çalışmaların yapılacağı kutup değerleri belirlenmiştir. Sanal eksene yakın seçilen değerlerde sistem tepkisi çok yavaş kalmaktadır. Bu sebeple sanal eksenden daha uzak olacak şekilde, kapalı döngü sistem kutupları $s_1 = -1$, $s_2 = -5$, $s_{3,4} = -20$ seçilerek sistem tepkisinin kısıtlar dahilinde hızlı olması sağlanmıştır. Daha sonra seçilen bu kutup değerleri kullanılarak gözleyici kutuplarının ve örnekleme aralığının seçiminin gerçek sistem başarımlarına etkileri gözlenmiş, uygun çalışma değerleri seçilmiştir. Newton biriminde hesaplanan denetim sinyalinin sisteme Volt biriminde verilmesi gerekmektedir. Sisteme verilebilecek sınır değerler (± 3 V) ± 6.45 N'dur. Kamera ölçümlerinin gürültülü gelmesi ve yeterince hassas ölçüm alınamamasından dolayı denetim sinyalinde anlık sıçramalar olmaktadır. Bu sıçramalar ile birlikte sınır değerlere yakın denetim sinyali geldiğinde sistem hızlı bir şekilde tepki vermektedir. Bu anlık tepkiler başarımları etkilediği

için denetim sinyali anlık tepkilerden daha az etkileneceği bir değer olan ± 2.2 V arasında sınırlandırılmıştır.

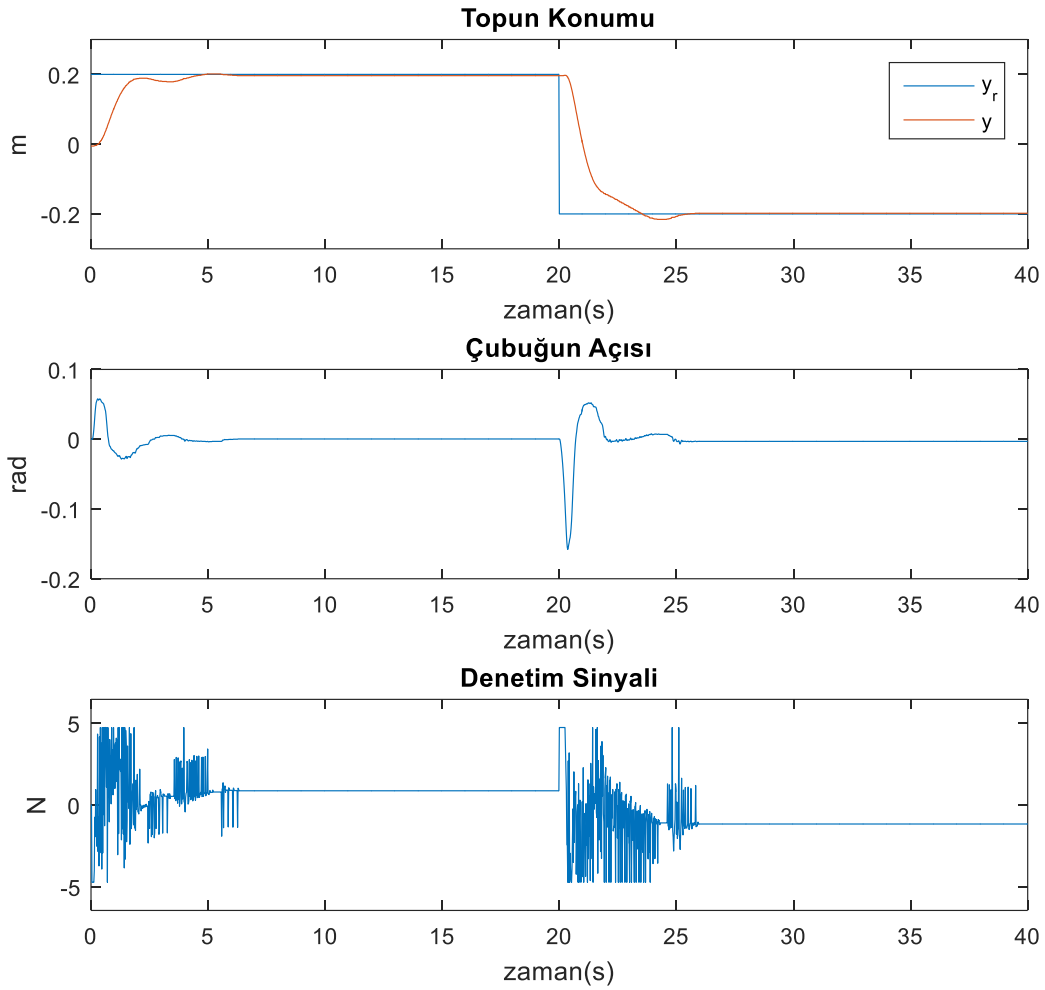
Kamera verisi 20 ms örnekleme aralığı ile veri işleme kartına gelmektedir. Bu sebeple ilk uygulama çalışmaları 20 ms örnekleme aralığı kullanılarak yapılmış, indirgenmiş gözleyici kutupları $s_{1,2} = -30$ olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuç Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Kesikli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -30$, $T = 20$ ms

Gözleyici kutup seçiminin, kapalı döngü başarımına etkisini incelemek için farklı gözleyici kutupları seçilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sanal eksene yakın seçilen kutuplarda sistem salınımlarının arttığı, sanal eksenden uzak kutuplarda kestirim başarımının arttığı ve sistem tepkisinin iyileştiği gözlenmiştir. Daha uzak kutuplar

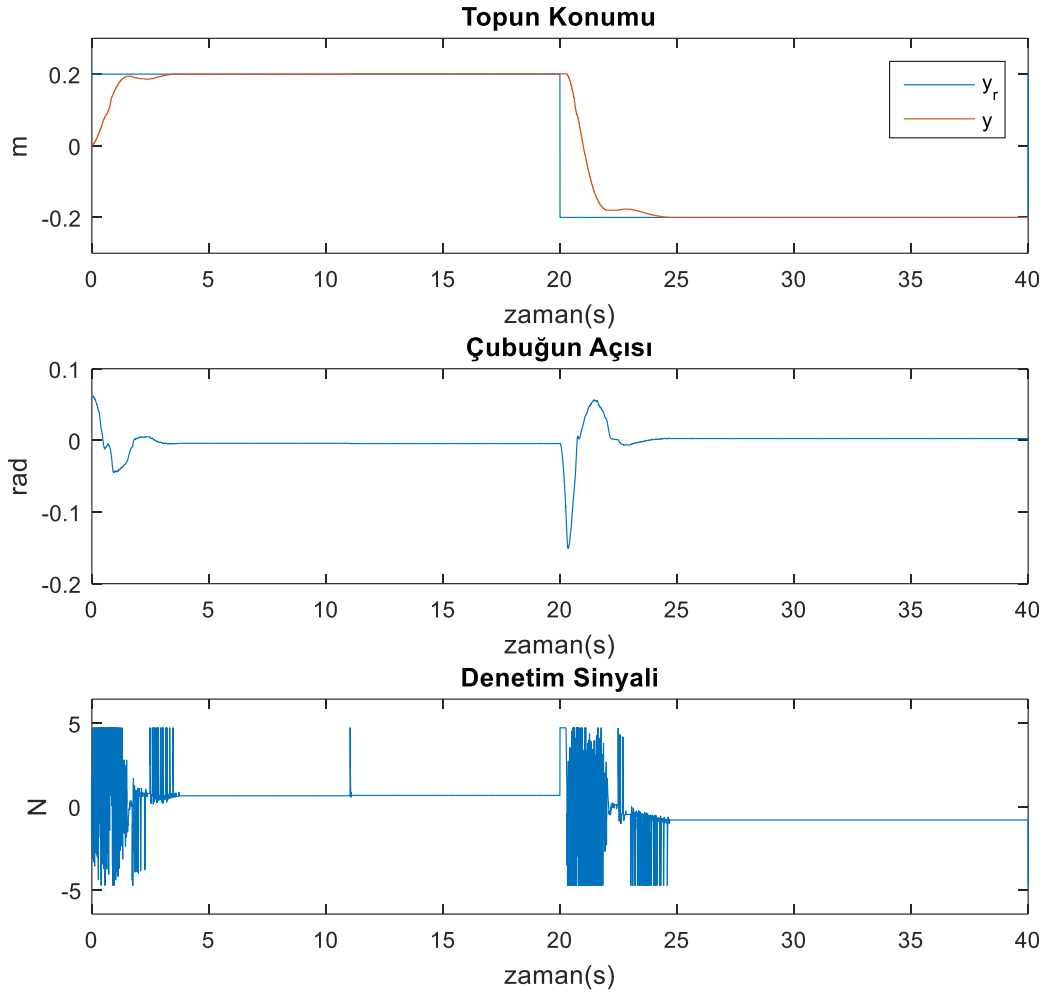
seçildiğinde kestirimin başarımının bir miktar daha arttığı gözlenmiştir. Ancak kameradan gelen verilerde duyargaç gürültüsü olduğu ve gözleyici kutuplarının çok uzak seçilmesinin, bu gürültülerin denetim sinyaline olan etkilerini de artırdığı gözleendiği için daha uzak kutuplar seçilmemiştir. Gözlenen bu tepkilere göre uygun gözleyici kutup değerleri $s_{1,2} = -50$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen sistem kapalı döngü sonucu Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kestirim başarımı arttığı için salınım azalmış ve sistem tepkisi iyilemiştir.



Şekil 5.2. Kesikli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$, $T = 20$ ms

Yukarıda verilen uygulama sonuçlarında görüldüğü gibi kutup atamalı denetim ile istenilen kapalı döngü sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilmektedir. Ancak kayan kipli denetim yönteminde örnekleme aralığının küçük olması önemlidir. Seçilen örnekleme aralığı sistem kapalı döngü başarımını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple kayan kipli

denetim yöntemi ile uygulama çalışması yapılmadan önce örnekleme aralığı daha küçük seçilerek, kutup atamalı denetim ile sistem sonuçları incelenmiştir. Bu çalışmada daha küçük örnekleme aralıklarında çalışıldığı için; kameradan yeni veri alınana kadar, en son alınan veri kullanılmıştır. Şekil 5.3'te verilen uygulama sonucu incelendiğinde örnekleme aralığının küçük seçilmesinin sistem tepkisini bir miktar hızlandırmasına rağmen, bir önceki sonuca benzer bir sonuç olduğu görülmektedir. Buna göre 20 ms örnekleme aralığının kutup atama yöntemi için yeterli olduğu söylenebilir.



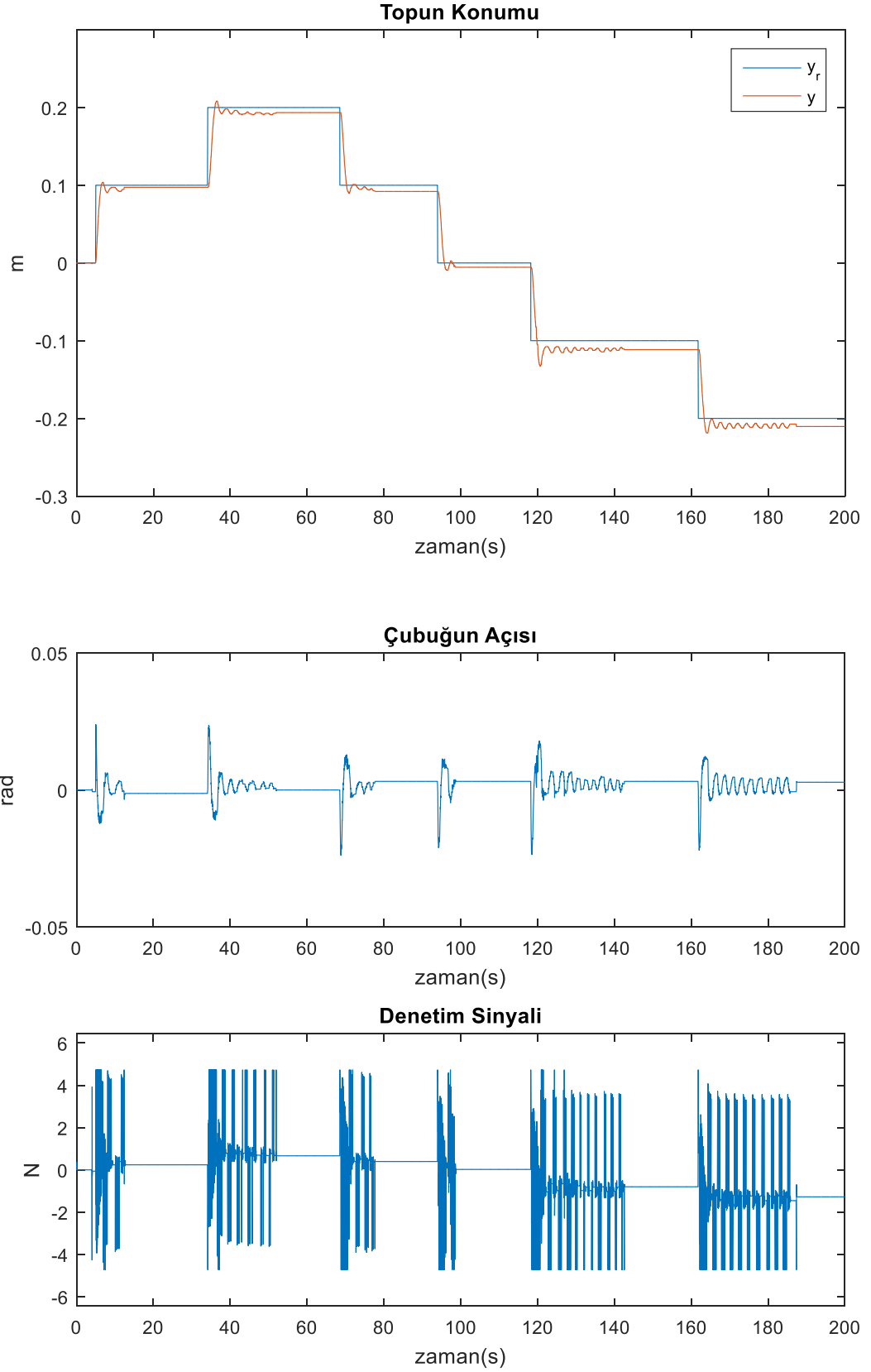
Şekil 5.3. Kesikli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$, $T = 5 \text{ ms}$

Farklı örnekleme aralığı ve farklı gözleyici kutupları için verilen uygulama sonuçlarına göre gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$, örnekleme aralığı 5 ms olarak seçilmiş, bundan sonraki çalışmalarda bu değerler kullanılmıştır. Farklı isterler için elde edilen uygulama sonuçları Şekil 5.4'te verilmiştir. İsterler belirli bir aralıkta verilmemiş, top denge

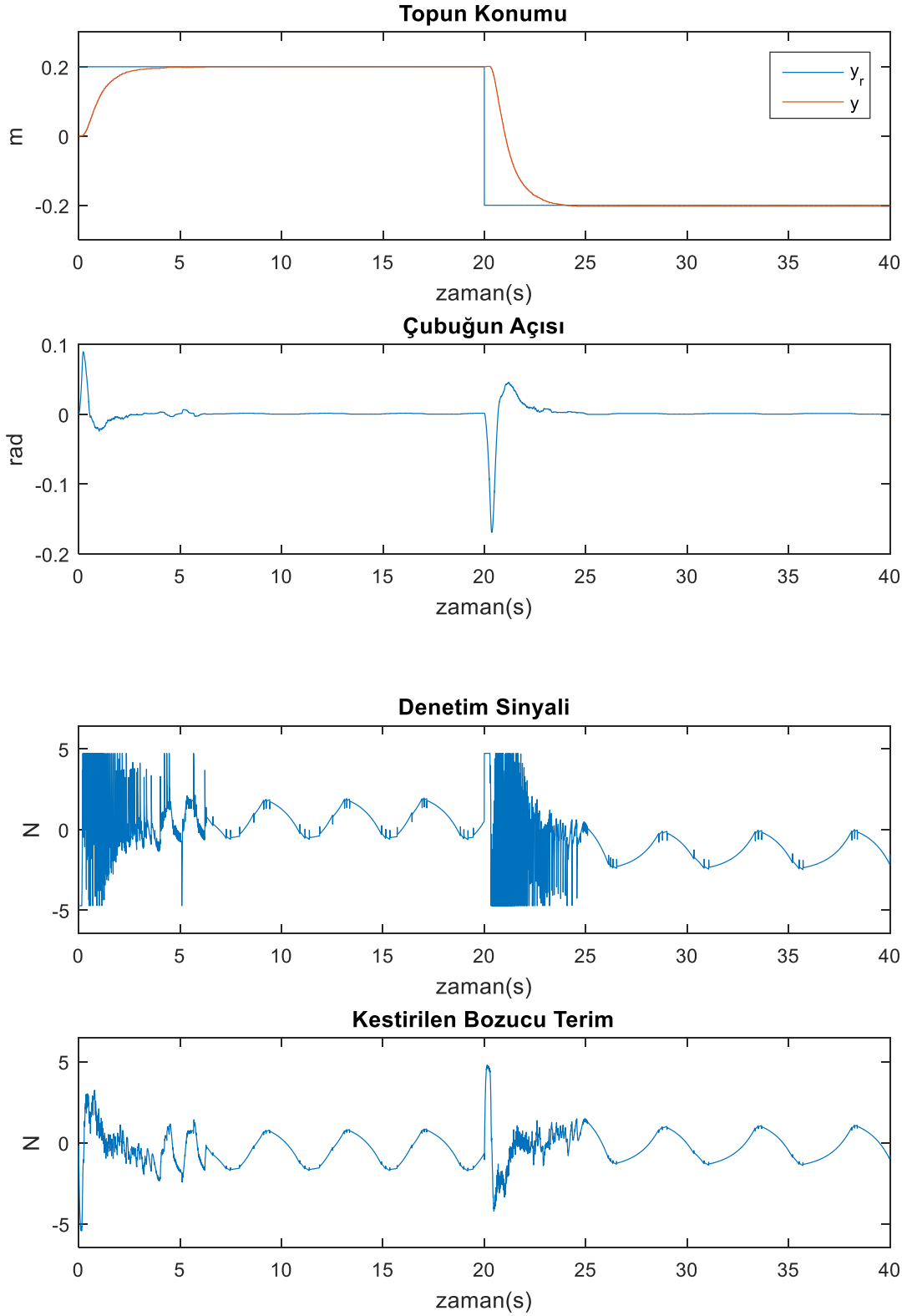
durumuna geldikten sonra yeni ister verilmiştir. Sistem tepkileri detaylı incelendiğinde; bazı durumlarda kameradan kaynaklı top değerinin düzgün okunamadığı ve bu nedenle daha uzun süre ufak salınımlar yaptığı gözlenmiştir. Ayrıca sistemin merkezine göre çubuk hareketinin sağ (eksi) ve sol (artı) bölgede ufak farklılıklar gösterdiği gözlenmiştir. Bu farklılık sebebiyle sağ bölgede alınan sonuçlarda sistem kalıcı durum hatası daha fazla olmaktadır.

İndirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılarak, sistemin ölçülemeyen durumları ile birlikte Bölüm 3'te açıklandığı gibi başarıyı iyileştirmek amacıyla bozucu terim kestirilmiş ve sisteme ileri besleme olarak uygulanmıştır. Elde edilen sistem tepkisi Şekil 5.5'te verilmiştir. Bozucu gözleyici kutup seçiminin sistem başarımına etkisini incelemek için farklı gözleyici kutupları seçilerek sistem başarımları gözlenmiştir. Sanal eksene yakın seçilen kutuplarda bozucu kestirimi yavaş olmakta ve sistem salınıma girmektedir. Farklı değerlerde uygulama sonuçları incelenerek, indirgenmiş mertebeli gözleyici kutup seçiminde bahsedilen benzer sebeplerden dolayı, bozucu gözleyici kutbu $s_3 = -51$ olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuç Şekil 5.3 ile karşılaştırıldığında bozucu teriminin sisteme ileri besleme olarak uygulanmasının sistem tepkisini hızlandırarak, sistem başarımını iyileştirdiği görülmektedir. Bozucu kestirilen sonuçlarda sistem kalıcı duruma eriştikten sonra, denetim sinyali üzerinde salınımlar gözlenmektedir. Bu salınımlar kestirilen bozucunun salınımlarından kaynaklı olup, ölü bölge arasında gidip geldiği için top konumuna etkisi olmamaktadır.

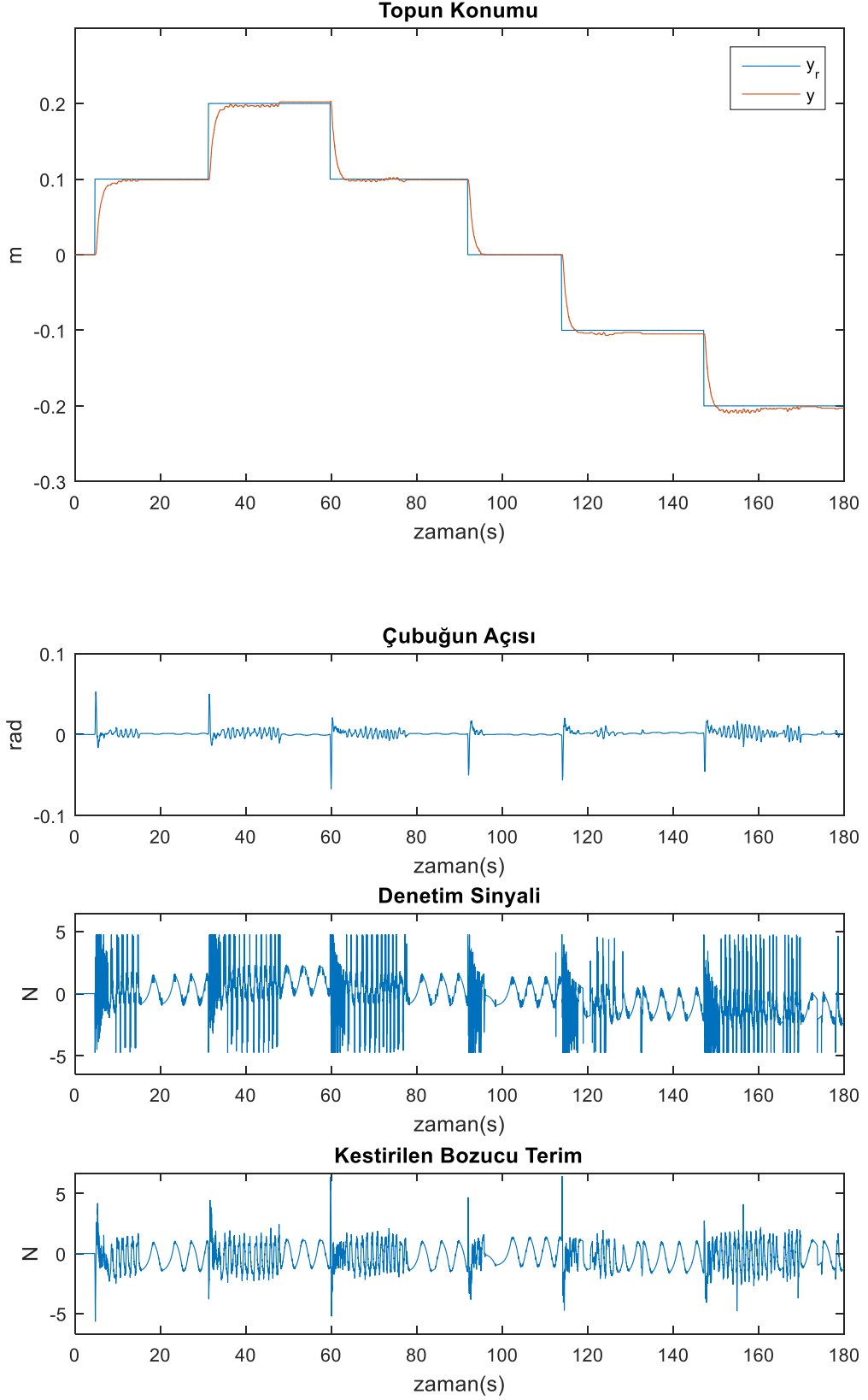
Bozucu etki kestiriminin sistem başarımına olan etkisini daha iyi gözlemek için Şekil 5.6'daki gibi verilen isterler ile kapalı döngü sistem başarımları incelenmiştir. İsterler aynı aralıklarda verilmemiş, her yeni ister değeri verilmeden önce topun denge noktasına ulaşması beklenmiştir. Şekil 5.4 ile kıyaslandığında, kalıcı durum hatasının ve salınımlarının azaldığı ve denetim başarımının oldukça iyileştiği görülmektedir.



Şekil 5.4. Kesikli Zamanda Denetim: Farklı isterlerde denetim sonucu

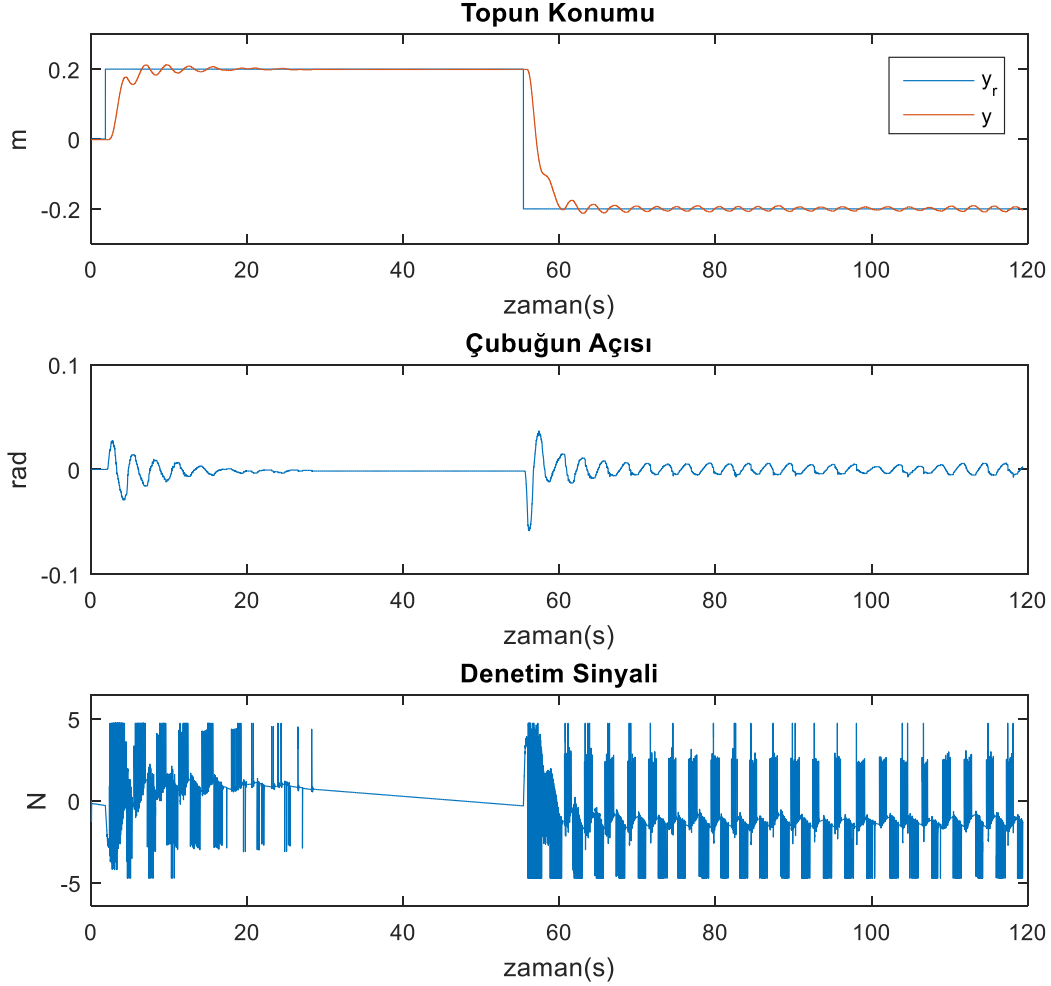


Şekil 5.5. Kesikli zamanda bozucu dengeleme yapılmış denetim sonucu



Şekil 5.6. Kesikli zamanda bozucu dengeleme yapılmış farklı isterlerde denetim sonucu

Tümlev etkili denetim ile kesikli zamanda elde edilen uygulama sonucu Şekil 5.7’de verilmiştir. Benzetim sonuçlarında bozucu kestirimi ile önemli bir fark görülmemesine rağmen, uygulama sonuçlarında tümlev etkili denetim iyi sonuç vermemiştir.

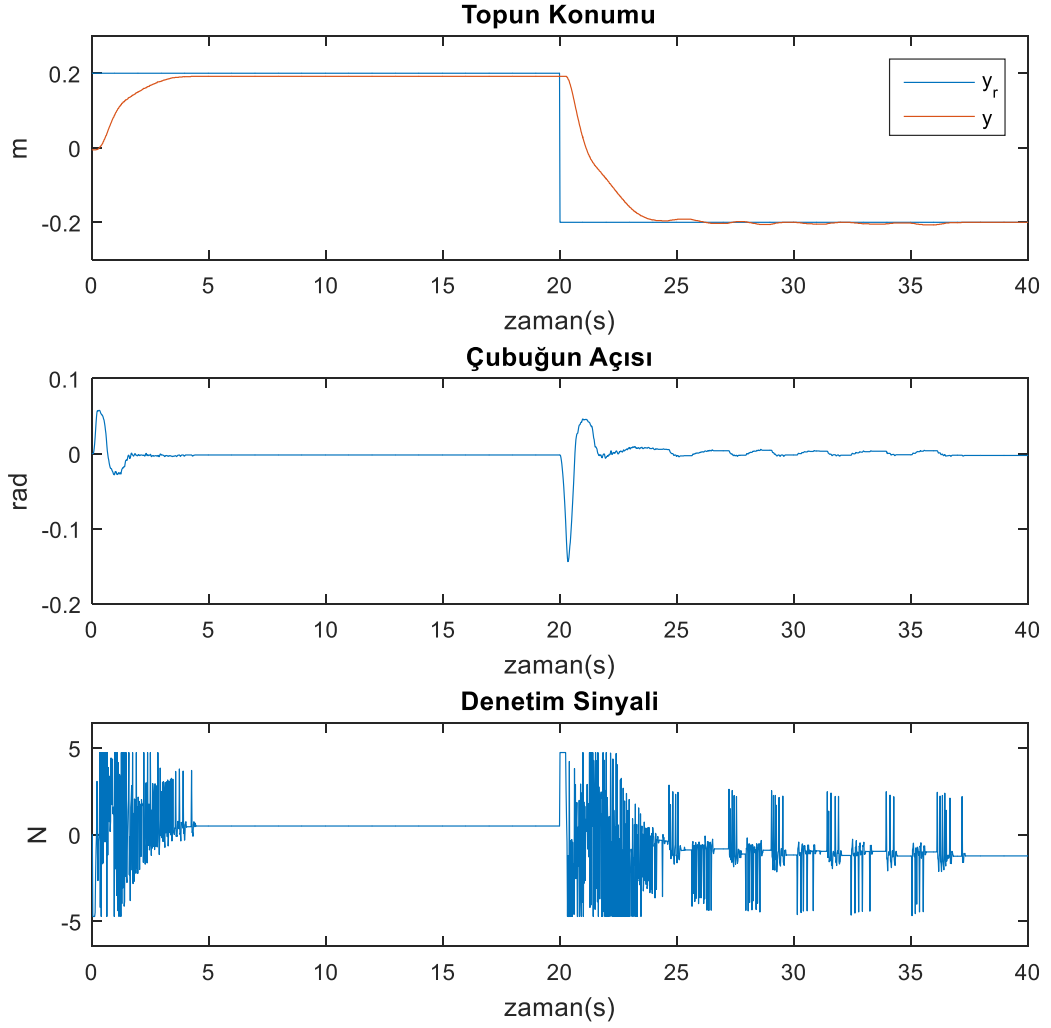


Şekil 5.7. Kesikli zamanda tümlev etkili denetim sonucu

5.2. Sürekli Zaman Kutup Atama

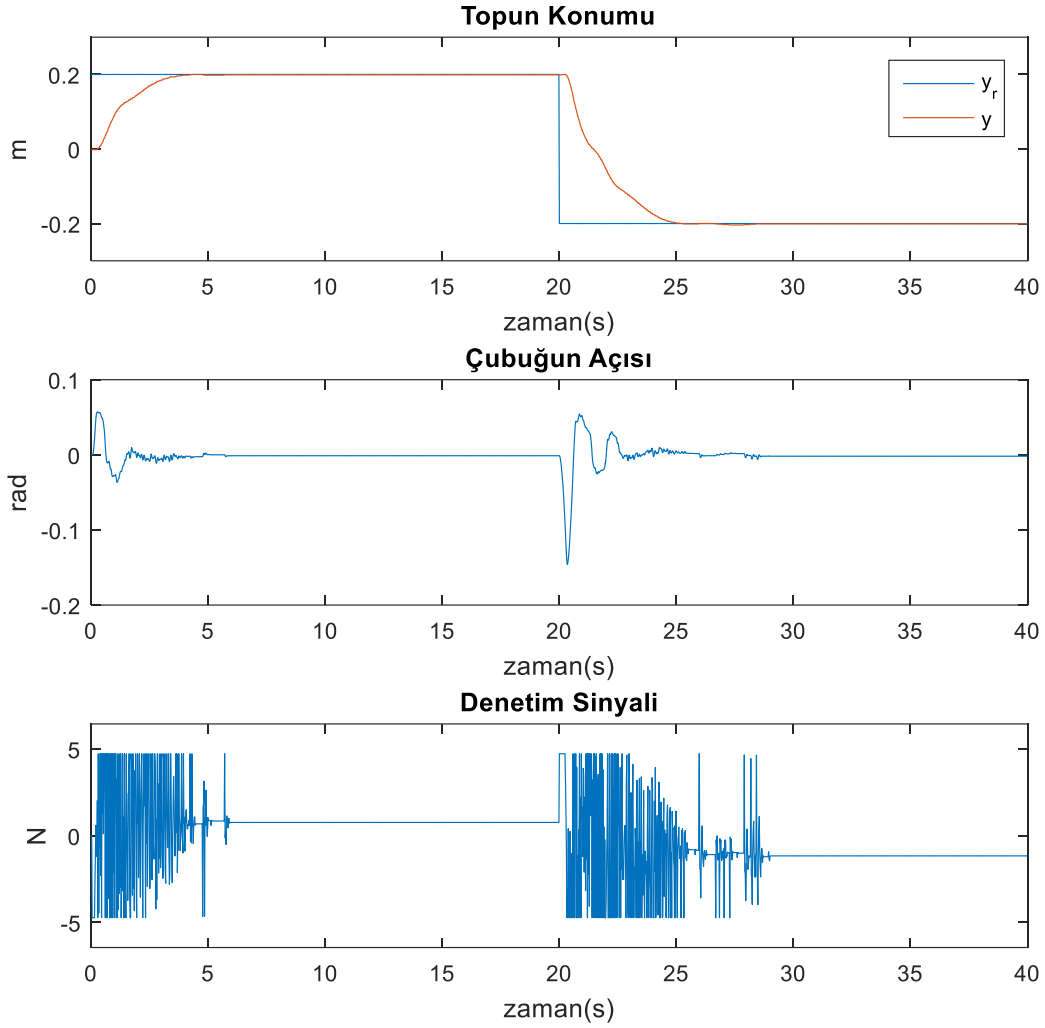
Bu bölümde sürekli zaman kutup atamalı denetim ile elde edilen uygulama sonuçları verilmiştir. Bir önceki bölümde, sürekli zamanda seçilen, kapalı döngü sistem kutup ve gözleyici kutup değerleri kullanılmıştır. Bu değerler kullanılarak elde edilen uygulama sonuçları, bir önceki bölümde verilen uygulama sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Öncelikle 20 ms örnekleme aralığı ve gözleyici kutupları $s_{1,2} = -30$ seçilerek uygulama sonucu alınmıştır. Elde edilen kapalı döngü sistem sonucu Şekil 5.8’de verilmiştir. Sistem başarımı Şekil 5.1’de verilen kesikli zaman kutup atamalı denetim sonucu ile karşılaştırıldığında salınımların azaldığı ve denetim başarımının iyileştiği görülmektedir.



Şekil 5.8. Sürekli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -30$, $T = 20$ ms

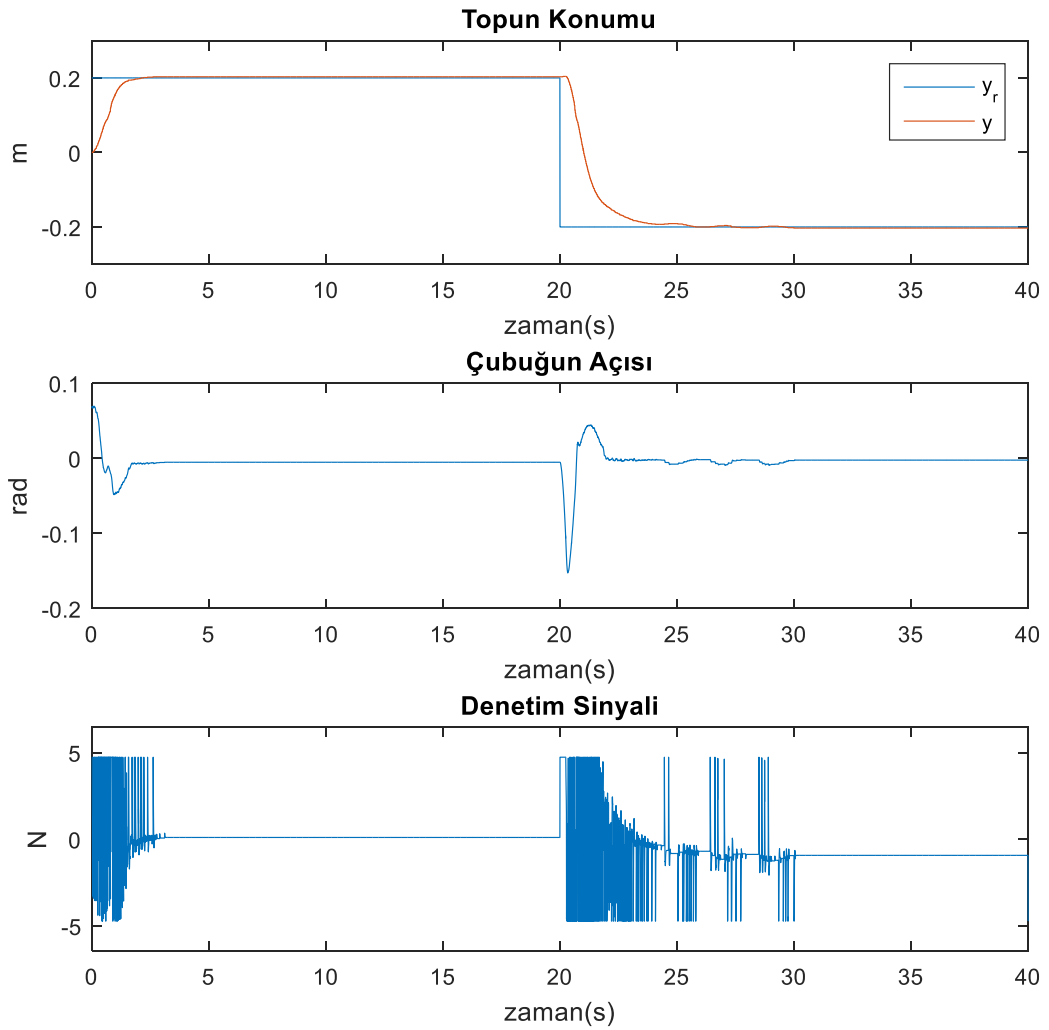
Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$ seçildiğinde elde edilen sistem tepkisi Şekil 5.9’da verilmiştir. Kesikli zamandaki uygulama sonuçlarında da görüldüğü gibi gözleyici kutupları uzak seçildiğinde sistem tepkisinde iyileşme olmaktadır. Şekil 5.2’deki kesikli zamanda elde edilen uygulama sonucu ile karşılaştırıldığında sürekli zamanda elde edilen başarımın daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9. Sürekli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$, $T = 20$ ms

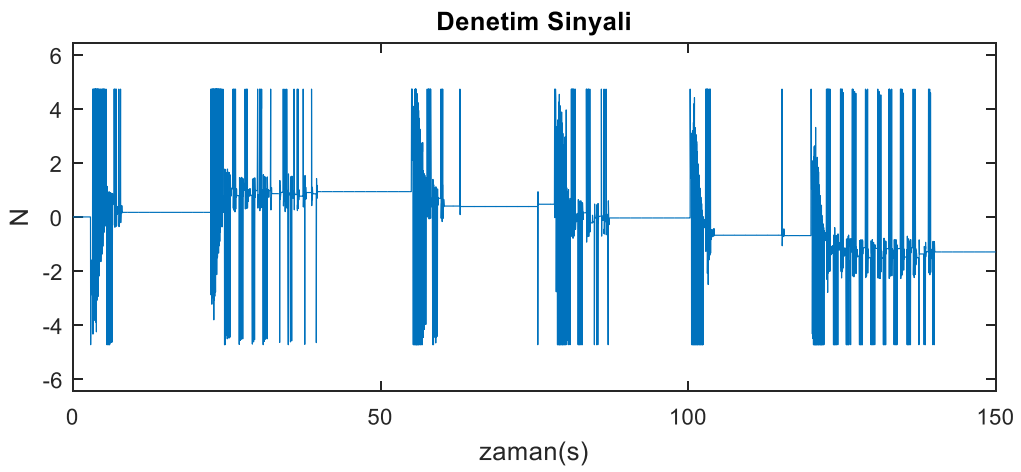
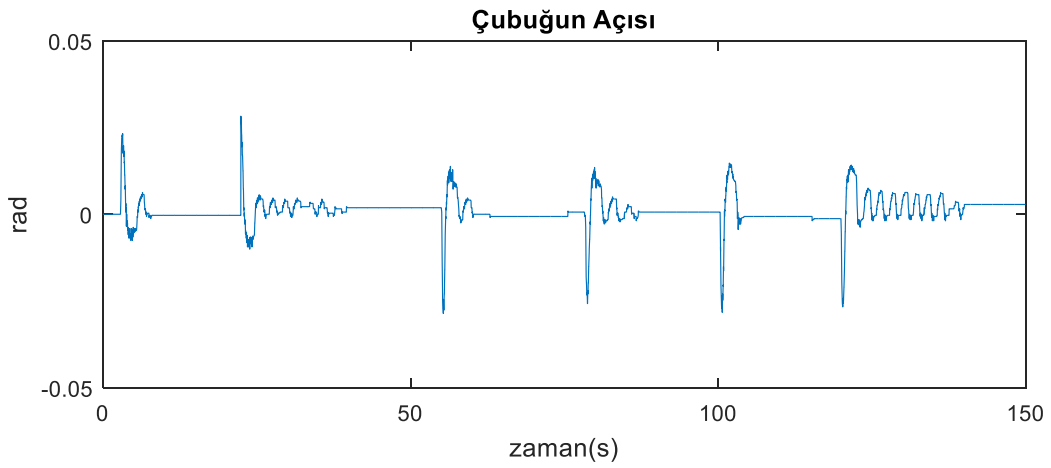
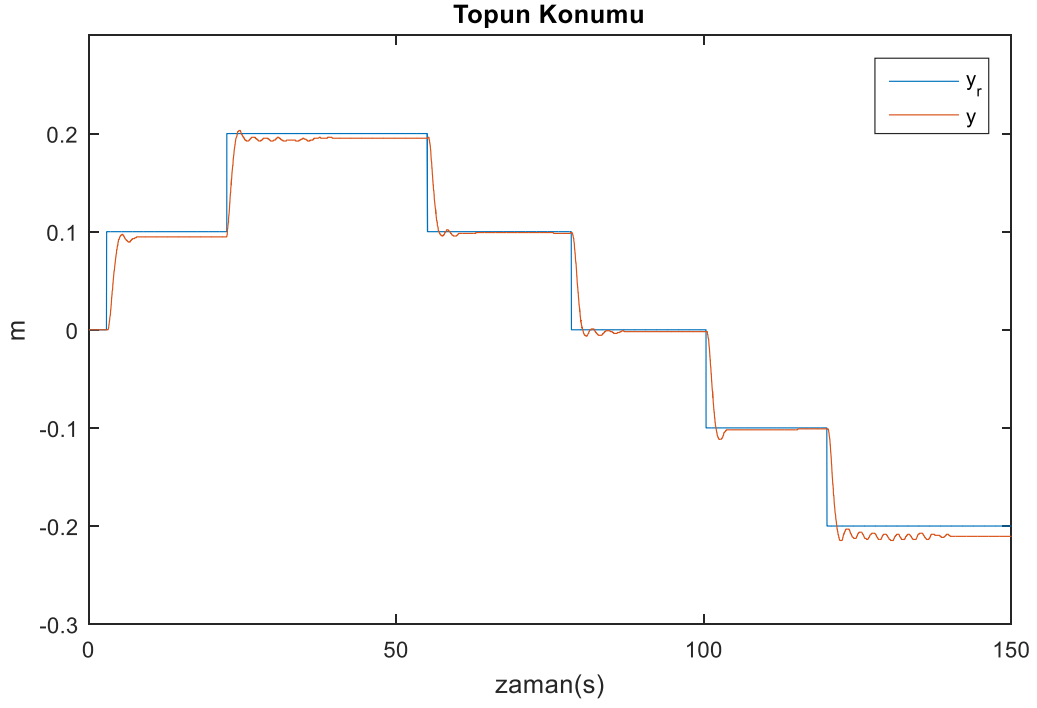
Örnekleme aralığı 5 ms seçilerek elde edilen uygulama sonucu Şekil 5.10’da verilmiştir. Kesikli zamanda elde edilen uygulama sonucunda da gözlemediği gibi sistem tepkisi bu örnekleme aralığında daha hızlı olmaktadır. Şekil 5.3’teki kesikli zamanda elde edilen sistem tepkisi ile karşılaştırıldığında sürekli zamanda sistem başarımının daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki yaklaşımda 20 ms örnekleme aralığı seçilerek elde edilen sonuçlar, 5 ms ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Örnekleme aralığının daha küçük seçilmesi ile kesikli zaman ve sürekli zaman sistem tepkilerinin birbirine daha benzer olduğu görülmüştür. Örnekleme aralığının seçiminin önemli olduğu bilinmektedir; örnekleme aralığının belli bir değerden daha küçük seçilmesinin başarıma

önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca örnekleme aralığının gereğinden küçük seçilmesi, kesikli zamanda başarıyı olumsuz etkileyebilmektedir.



Şekil 5.10. Sürekli Zamanda Denetim: Gözleyici kutupları $s_{1,2} = -50$, $T = 5$ ms

Şekil 5.4'teki gibi sisteme verilen farklı isterler, aynı şekilde verilerek uygulama sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.11'de verilmiştir. Kesikli zamanda elde edilen uygulama sonucu ile karşılaştırıldığında sürekli zamanda elde edilen sonuçlarda sistem başarımının daha iyi olduğu, salınımların ve kalıcı durum hatalarının azaldığı görülmüştür. Çubuk hareketinde gözlenen farklılık burada da görülmektedir. Sağ bölgede alınan sonuçlarda kalıcı durum hatası daha fazla olmaktadır.

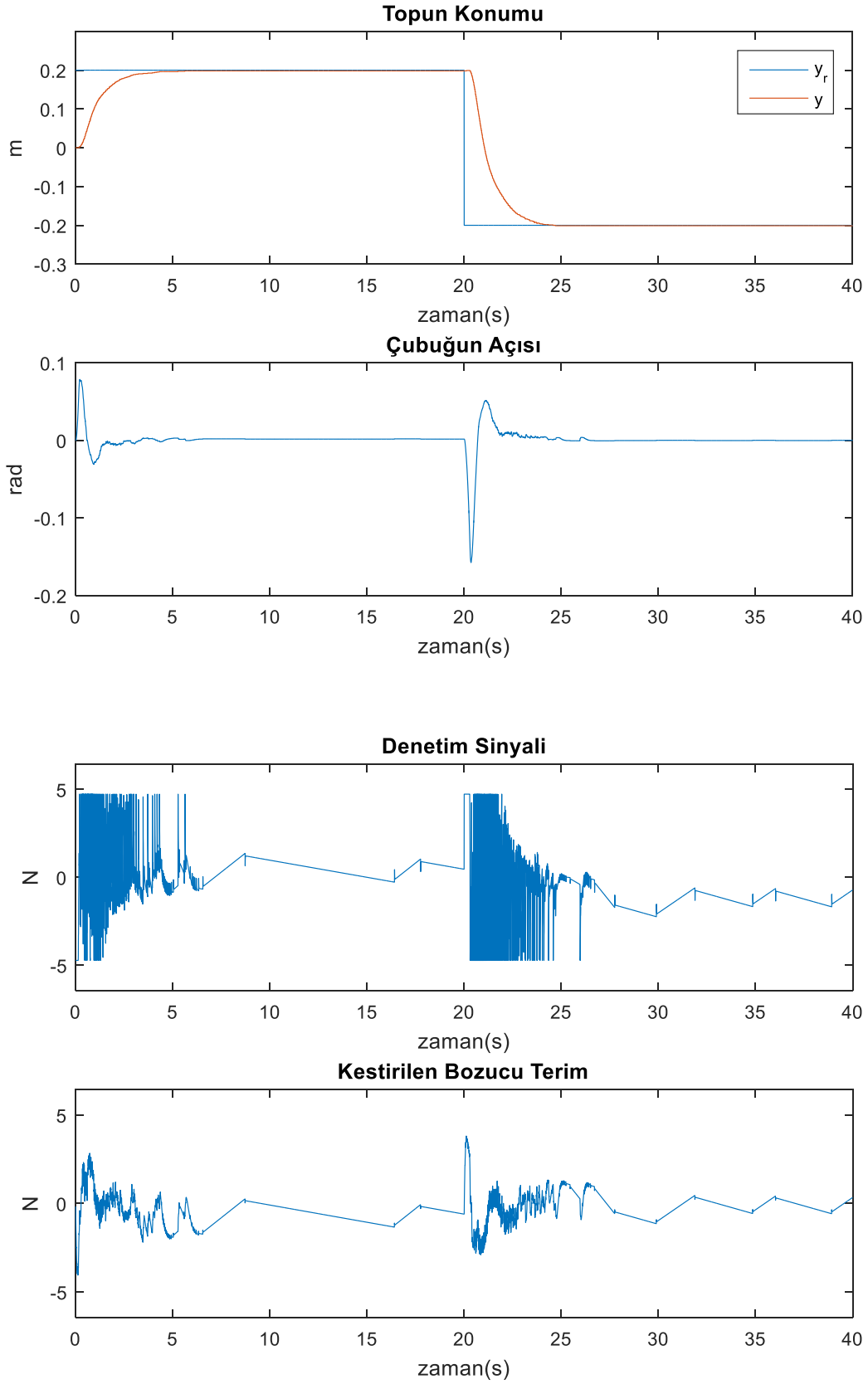


Şekil 5.11. Sürekli Zamanda Denetim: Farklı isterlerde denetim sonucu

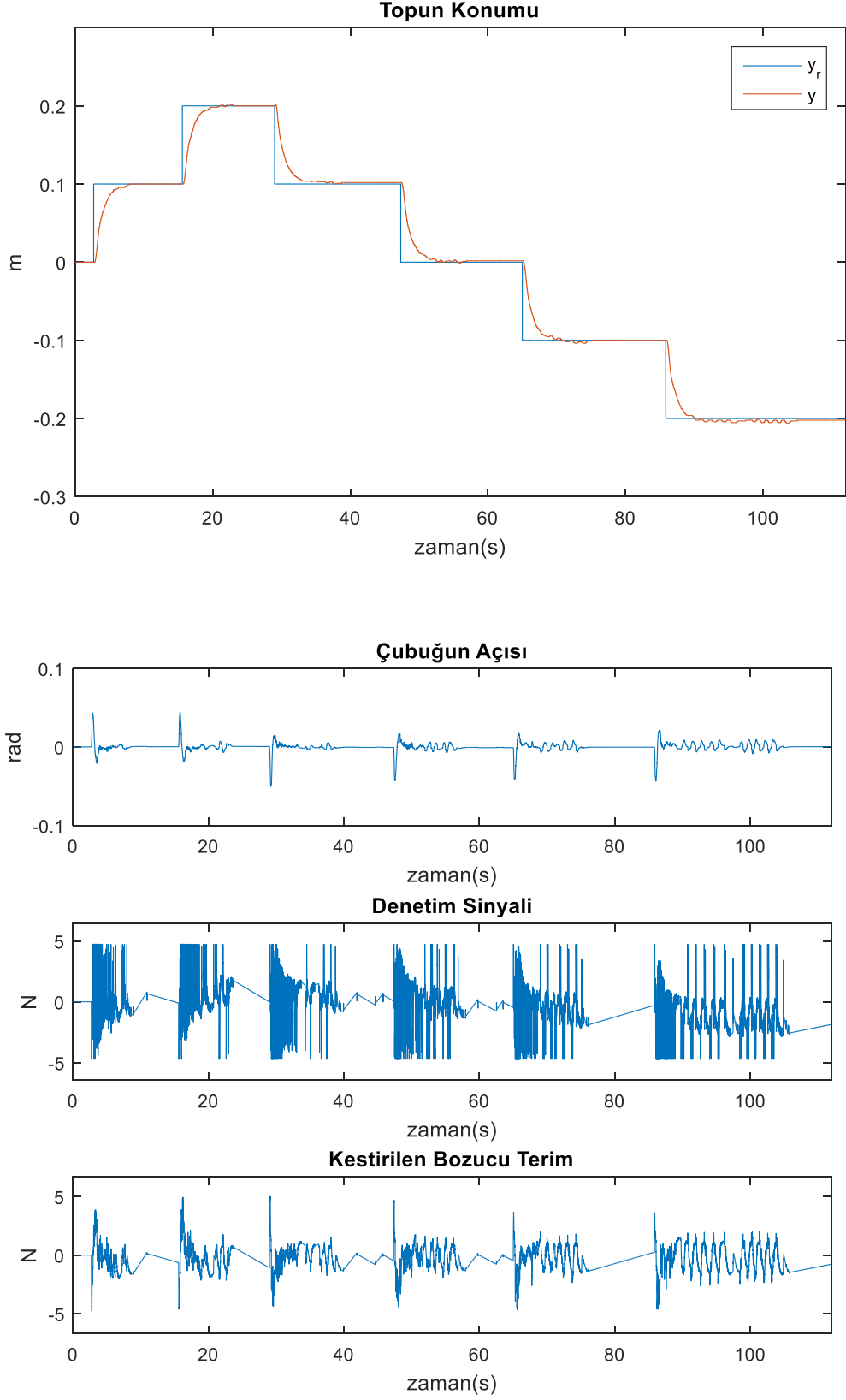
Bozucu terimin sürekli zamanda kestirilerek sisteme ileri besleme olarak uygulandığı uygulama sonucu Şekil 5.12’de verilmiştir. Bozucu terimin sisteme eklenmesi ile daha başarılı denetim sonucu elde edilmiştir.

Bozucu etkinin kestirilmesinin farklı isterlerdeki başarımını görmek için Şekil 5.4’te verilen isterler aynı şekilde sisteme verilmiştir. Elde edilen uygulama sonucu Şekil 5.13’te verilmiştir. Sistem tepkisi incelendiğinde bozucu kestiriminin sistem tepkisini iyileştirdiği, sistemin kalıcı durum hatasının azaldığı görülmüştür. Kesikli zamandaki sistem sonucu Şekil 5.6 ile karşılaştırıldığında denetim başarımında bir miktar iyileşme olduğu gözlenmektedir; salınımlar ve kalıcı durum hatası bir miktar daha azdır. Kesikli zaman sonuçlarına benzer şekilde kalıcı durumda denetim sinyalinde salınımlar gözlenmektedir, ancak bu salınımlar ölü bölge içinde kaldığı için topun konumu etkilenmemektedir.

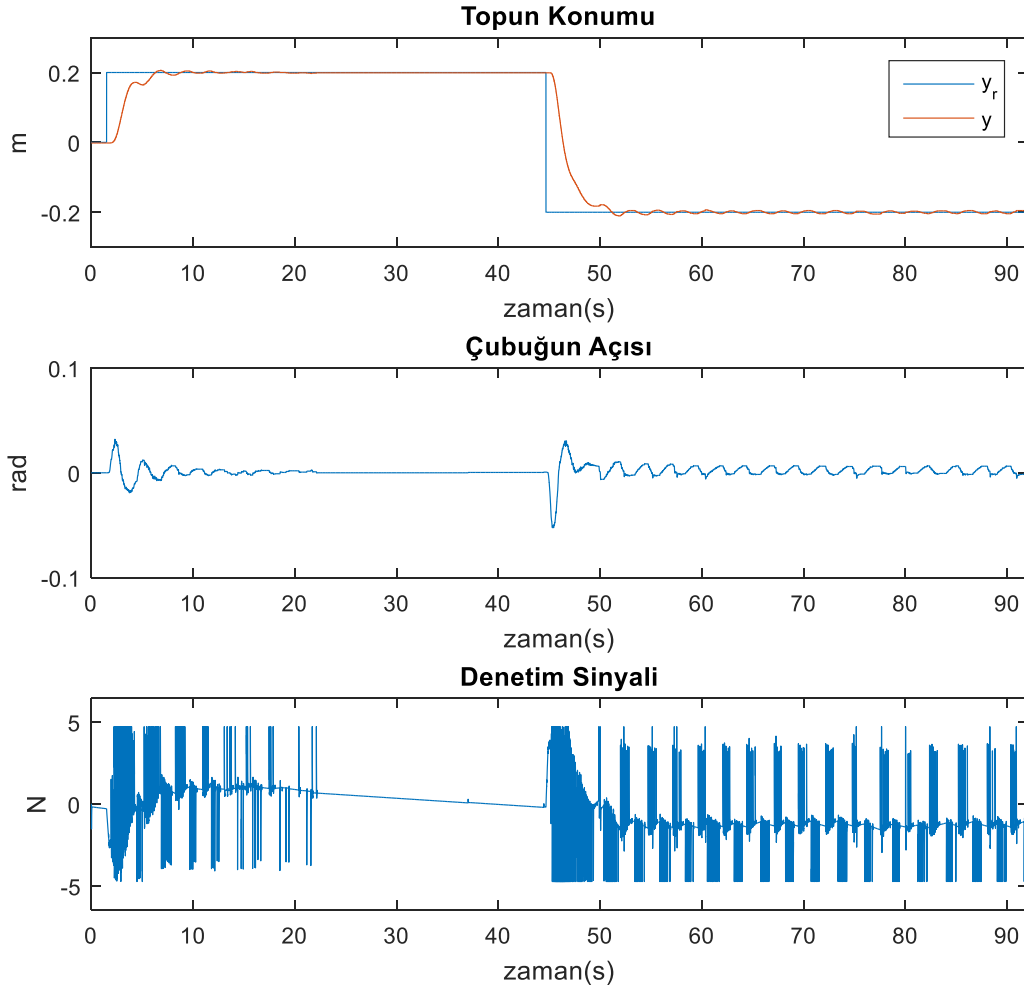
Tümlev etkili denetim ile sürekli zamanda elde edilen uygulama sonucu Şekil 5.14’te verilmiştir. Benzetim sonuçlarında bozucu kestirimi ile önemli bir fark görülmemesine rağmen, uygulama sonuçlarında tümlev etkili denetim iyi sonuç vermemiştir.



Şekil 5.12. Sürekli zamanda bozucu dengeleme yapılmış denetim sonucu



Şekil 5.13. Sürekli zamanda bozucu dengeleme yapılmış farklı isterlerde denetim sonucu



Şekil 5.14. Sürekli zamanda tümlev etkili denetim sonucu

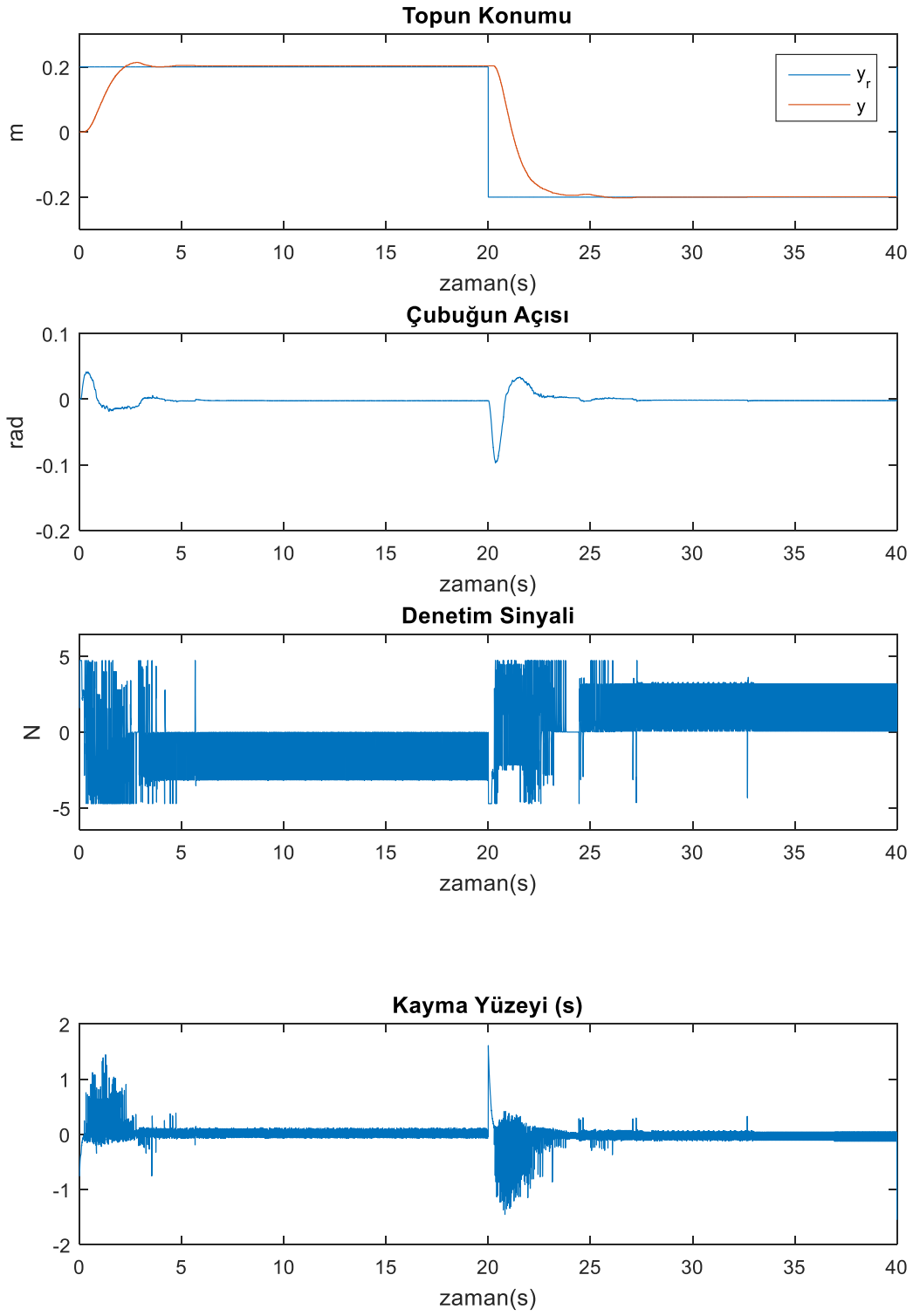
5.3. Kayan Kipli Denetim

Top ve çubuk sisteminin kayan kipli denetim ile farklı parametre değerleri kullanılarak kapalı döngü sistem başarımları incelenmiştir. Modellenemeyen doğrusal olmayan durumlar nedeniyle uygun değerler gerçek sistem üzerinde deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. $\gamma_1 = 11$, $\gamma_2 = 5.3213$, $\gamma_3 = 3.8009$ ve $K_1 = 10$, $K_2 = 5$ parametreleri ile uygulama sonuçları elde edilmiştir. Kayan kipli denetimde kutup atamalı denetim yönteminden farklı olarak çatırtı sorununun sisteme zarar vermesine engel olmak için denetim sinyali çıkışına alçak geçiren filtre eklenmiştir. Filtre bant genişliği denetim başarımını etkilemeyecek şekilde, gerçek sistem üzerinde denenerek 20 Hertz olarak seçilmiştir. Elde edilen kapalı döngü sonucu ve seçilen kayma yüzeyinin sistem denetimi sırasındaki değişimi Şekil 5.15'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ufak bir aşım

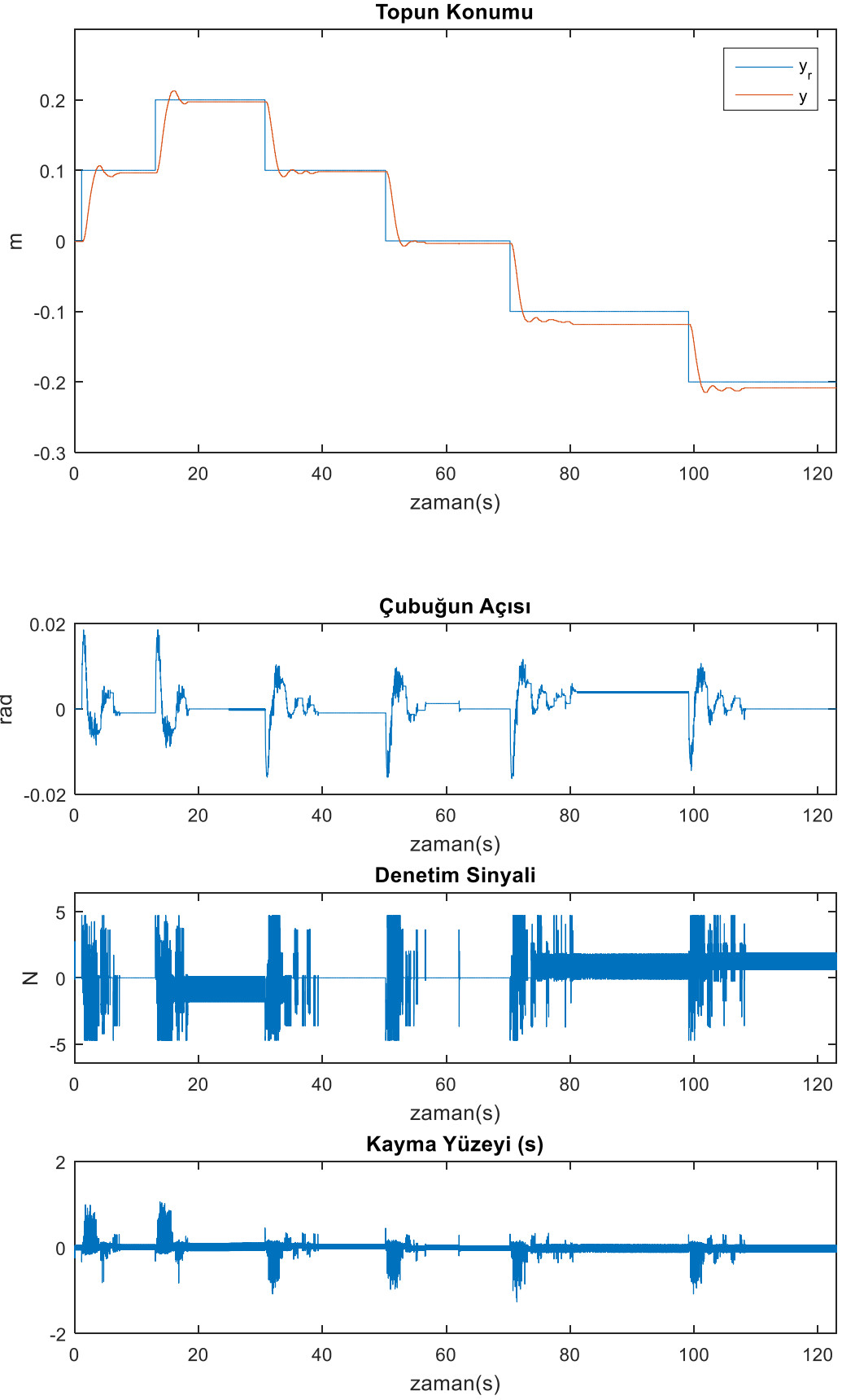
dışında sistem başarımı beklenildiği gibidir. Kayma yüzeyi tepkisi incelendiğinde, sistemin yaklaşık 3 sn sonra kayan kipe girdiği görülmektedir.

Ayrıca kayan kipli denetimde de Şekil 5.4'te olduğu gibi farklı isterlerin verildiği uygulama sonucu Şekil 5.16'da verilmiştir. Her verilen farklı isterden önce topun denge noktasına ulaşması beklenmiştir. Kutup atamalı denetim sonuçlarında da görüldüğü gibi bu denetim yönteminde de çubuğun merkez noktasının sağ tarafındaki uygulama sonuçları, sol taraftakilere göre farklılık göstermektedir.

Genel olarak doğrusal olmayan top ve çubuk sisteminin, doğrusal olmayan bir denetim yöntemi olan kayan kipli denetim ile daha iyi denetlenebileceği düşünülebilir. Ancak yapılan uygulamalarda başarımda belirgin bir iyileşme görülmemiş ve doğrusal bir yöntem olan gözleyiciye dayalı kutup atamalı denetim yöntemi ile benzer sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bununla beraber, sürekli zaman bozucu kestirimine dayalı yöntemin en iyi sonuç verdiği söylenebilir. Öte yandan sürekli zaman yöntemlerin kesikli zaman yöntemlere göre daha iyi başarımlar gösterdiği söylenebilir.



Şekil 5.15. Kayan kipli denetim başarımı



Şekil 5.16. Farklı isterler için kayan kipli denetim başarımı

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, top ve çubuk sisteminin doğrusal ve doğrusal olmayan denetim yöntemleri ile denetimi yapılmıştır. Doğrusal denetim yöntemi olarak kutup atamalı, doğrusal olmayan denetim yöntemi olarak da kayan kipli denetim yöntemi kullanılmıştır. Denetim, hem benzetim çalışmalarıyla hem de gerçek sistem üzerinde yapılan uygulamalarla gerçekleştirilmiş, başarımları kıyaslanmıştır. Çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Top ve çubuk sistemi yapısı gereği doğrusal olmayan, kararsız ve hızlı bir sistemdir. Ayrıca kararsız sifıra sahip olduğu için minimum olmayan evreli yapıdadır. Bu yapısı sebebiyle denetim yöntemlerinin sınanması ve başarımlarının incelenmesi için uygun bir sistemdir. Sistem yapısında sürme mekanizmasından kaynaklanan sürtünme, ölü bölge gibi doğrusal olmayan bozucu etkiler bulunmaktadır. Sistemin matematiksel modeli elde edilirken bu etkiler dahil edilmemiştir. Gerçek sistem üzerinde yapılan çalışmalar ile benzetim sonuçları karşılaştırılırken bu etkiler göz önünde bulundurulmuştur.

Örnekleme aralığının seçimi için 5 ms ve 20 ms değerleri seçilerek benzetim ve uygulama çalışmalarında sistem tepkileri incelenmiştir. Örnekleme aralığının 5 ms veya 20 ms seçilmesinin uygulama sonuçlarında büyük farklar oluşturmadığı görülmüştür; 20 ms örnekleme aralığında sistem tepkisi biraz yavaşlamaktadır. Ancak kayan kipli denetim yönteminde örnekleme aralığının küçük olması önemli olduğu için 5 ms uygun değer olarak seçilmiş ve bu örnekleme aralığı ile çalışılmıştır.

Sistemin ölçülemeyen durumlarının (top hızı ve çubuk açısal hızı) kestirimi için tam ve indirgenmiş mertebeli gözleyiciler tasarlanmış ve kullanılmıştır. Benzetim ile elde edilen sistem tepkileri karşılaştırıldığında, sistem tepkisi anlamında önemli bir fark görülmemiştir. Ancak gerçek sistem üzerinde yapılan çalışmalarda tam mertebeli gözleyici kullanıldığında, sistemin modellenemeyen dinamik özellikleri ve doğrusal olmayan etkilerinden dolayı istenilen başarımlar elde edilememiştir. Bu nedenle uygulama çalışmalarında indirgenmiş mertebeli gözleyici kullanılmıştır.

Kutup atamalı denetimde, hem benzetim hem uygulama ortamında farklı kutuplar ile çalışılarak kutup değerleri belirlenmiştir. Benzetim çalışmalarında sistemin doğrusal

olmamasından kaynaklı, kalıcı durum hatası görülmüştür. Kutup atamalı denetimde, bu kalıcı durum hatasını gidermek için bozucu kestirimi ve tümlev etkili denetim yöntemleri uygulanmıştır. Uygulama çalışmalarında da benzer şekilde kalıcı durum hatası gözlenmiştir. Ayrıca algılayıcı gürültüsü ve kameranın yeterince hassas ölçüm alamaması sebebiyle istenen konum değerine ulaşmak için ufak salınımlar yaptığı gözlenmiştir. Sistemin merkezine göre çubuğun hareketinde ufak farklılıklar olduğu için, sağ (eksi) bölgede alınan sonuçlarda sistem kalıcı hatasının daha fazla olduğu görülmüştür.

Kutup atamalı denetim ile hem sürekli zamanda hem de kesikli zamanda sistem denetimi gerçekleştirilerek sistem başarımları karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, sistem tepkisi anlamında benzer olmasına rağmen, uygulama sonuçlarında sürekli zaman sistem başarımlarının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bozucu kestirimi ve tümlev etkili denetim yöntemlerinin başarımlarının incelenmesi için benzetim ortamında, gerçek sisteme yakın olacak şekilde ölü bölge dahil edilmiştir. Ölü bölge dahil edilmiş sonuçlarda kalıcı durum hatasının gözlendiği görülmüştür. Bozucu dengeleme ve tümlev etkili denetim yöntemi ile bu kalıcı durum hatasının başarılı bir şekilde giderildiği görülmüştür. Gerçek sistem uygulamalarında da bu yöntemler ile sonuçlar elde edilmiş, bozucu dengelemenin tümlev etkili denetim yöntemine göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

Son olarak kayan kipli denetim ile sistem denetimi gerçekleştirilmiştir. Farklı denetim parametreleri seçilerek benzetim ve gerçek uygulama çalışmalarında sistem başarımları incelenmiştir. Kutup atamalı denetim yönteminde de görüldüğü gibi bir miktar kalıcı durum hatası görülmüştür. Kutup atamalı denetim ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, doğrusal olmayan bir denetim yöntemi olmasına rağmen başarımda belirgin bir iyileşme görülmemiştir. Ancak kayan kipli denetimin, ölü bölgeye rağmen bozucu dengeleme yapılmamış kutup atamalı denetim yöntemine göre biraz daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Kayan kipli denetimin yapısı gereği, örnekleme aralığının küçük seçilmesi ve denetim sinyali üzerinde görülen çattırtı, kayan kipli denetimin olumsuz özellikleri olarak görülebilir.

Elde edilen uygulama sonuçları genel olarak incelendiğinde, uygulanan denetim yöntemleri içinde en başarılı sonucu sürekli zamanda bozucu dengeleme yapılmış kutup atamalı denetimin verdiği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Arroyo, S., Ball on Balancing Beam, **December 2006**.
- [2] Ambalavanar, S., Moinuddin, H. M. & Malyshev, A., Ball and Beam Balancer, BA Thesis, Lakehead University, **2006**.
- [3] Quanser, Q4 hardware in the loop board, **September 2006**.
- [4] Hirsch, R. Ball on Beam Instructional system, Shamdor Motion systems, **1999**.
- [5] W. Yu, F. Ortiz, “Stability Analysis of PD Regulation for Ball and Beam System”, Proceedings of IEEE Conference on Control Applications, **2005**, pp. 517 - 522
- [6] J. Hauser , S. Sastry, P. Kokotovic, “Nonlinear Control via Approximate Input-Output Linearization: The Ball and Beam Example”, IEEE Transactions on Automatic Control, **1992**, vol 37, issue. 3, pp. 392 – 398
- [7] Y. Jiang, C. McCorkell, R. B. Zmood, “Application of Neural Networks for Real Time Control of a Ball-Beam System”, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, **1995**. Vol. 5, pp. 2397 - 2402
- [8] M. A. Marra, B. E. Boling, B. L. Walcott, “Genetic Control of a Ball - Beam System”, Proceedings of the - IEEE International Conference on Control Applications, **1996**, pp. 608 – 61
- [9] R. O. Saber, A. Megretski, “Controller Design for the Beam and Ball System”, Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, **1998**, Vol. 4, pp. 4555 - 4560
- [10] Y. Guo, D. J. Hill, Z. P. Jiang , “Global Nonlinear Control of the Ball and Beam System” Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, **December 1996**, pp. 2818-2823,
- [11] D. A. Voytsekhovskiy, R. M. Hirschorn, “Stabilization of Single Input Nonlinear Systems Using Higher Order Compensating Sliding Mode Control”, Proceedings of 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference, **2005**, pp. 566 – 571

- [12] Y. Serdar, "Construction and Control of a Beam and Ball Experimental System", Orta Doğu Teknik Üniversitesi, **1998**, Ms Thesis
- [13] Hara N., Takahashi M., Konishi K., "Experimental Evaluation of Model Predictive Control of Ball and Beam Systems", American Control Conference, **2011**.
- [14] M.S. Koo, H.L. Choi and J.T. Lim, "Adaptive Nonlinear Control of A Ball and Beam System Using the Centrifugal Force Term," International Journal of Innovative Computing, Information and Control, vol. 8, no. 9, pp. 5999-6009, Sep. **2012**.
- [15] A. A. Ezzabi, K. C. Cheok and F. A. Alazabi. "A nonlinear backstepping control design for ball and beam system". IEEE 56th International Midwest symposium on circuits and systems (MWSCAS), pp 1318-1321, **2013**.
- [16] Colon, D., Bueno, A.M., Andrade, Y.S., Diniz, I.S., & Balthazar, J.M. Nonlinear ball and beam control system identification. Applied Mechanics and Materials, 706, 69-80, **2015**.
- [17] C. C. Chen & T. L. Chien & C. L. Wei, "Application of Feedback Linearization to Tracking and Almost Disturbance Decoupling Control of the AMIRA Ball and Beam System," Journal of Optimization Theory and Applications, Springer, vol. 121(2), pages 279-300, May, **2004**.
- [18] Ting-Li Chien, Chung-Cheng Chen, Ming-Chun Tsai and Ying-Chen Chen. "Control of AMIRA's ball and beam system via improved fuzzy feedback linearization approach" Applied Mathematical Modeling, Vol. 34, pp. 3791-3804, **2010**.
- [19] Amira, Handbook of Laboratory Equipment Ball and Beam System, **1999**.
- [20] J.J. E. Slotine, W. Li, Applied nonlinear control. Prentice Hall, **1991**.
- [21] K. Ogata, Modern control engineering. Prentice-Hall, **2010**.
- [22] P. J. Gawthrop, Continuous-Time Self-Tuning Control, Vol. 1: Design, **1987**.
- [23] H. Demircioğlu, E. Karasu, "Generalized Predictive Control, A Practical Application and Comparison of Discrete-and Continuous-Time Versions", IEEE Contr. Syst. Mag., vol. 20, no. 5, pp. 36-47, **2000**.
- [24] P.J. Gawthrop, "A continuous-time approach to discrete-time self-tuning control" Opt. Contr. App. Methods, vol.3, no.4, pp.399-414, **1982**.

[25] K.J. Astrom, P. Hagender, and J. Sternby, “Zeros of sampled systems” *Automatica*, vol. 20, no.1, pp. 31-38, **1984**.

[26] N. B. Almutairi and M. Zribi, “On the sliding mode control of a ball on a beam system,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 59, no. 2, pp. 406–407, **Jan. 2010**.

[27] A. M. Khan, A. I. Bhatti, S. U. Din, and Q. Khan, “Static & dynamic sliding mode control of ball and beam system,” in *Proceedings of the 9th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST '12)*, pp. 32–36, Islamabad, Pakistan, **January 2012**.

EKLER

EK-1 İNGİLİZCE-TÜRKÇE TERİMLER SÖZLÜĞÜ

Angle	: Açı
Centrifigual	: Merkezkaç
Closed loop	: Kapalı döngü
Componenet	: Bileşen
Control	: Denetim
Controller	: Denetleyici
Continuous time	: Sürekli zaman
Dead zone	: Ölü bölge
Disturbance	: Bozucu
Discrete time	: Kesikli zaman
Driving mechanic	: Sürme mekanizması
Equilibrium point	: Denge noktası
Error	: Hata
Estimation	: Kestirim
Feedback	: Geribesleme
Feedforward	: İleribesleme
Force	: Kuvvet
Friction	: Sürtünme
Full	: Tam
Gain	: Kazanç
Inertial	: Atalet
Input	: Giriş
Integral	: Tümlev
Linear	: Doğrusal
Lowpass	: Alçak geçirgen
Noise	: Gürültü

Nonlinear	: Doğrusal olmayan
Nonminimum phase	: Minimum olmayan evreli
Observer	: Gözleyici
Open loop	: Açık döngü
Order	: Mertebe
Oscillation	: Salınım
Output	: Çıkış
Overshoot	: Aşma
Performance	: Başarım
Pole	: Kutup
Pole Placement	: Kutup Atama
Position	: Konum
Reduced	: İndirgenmiş
Response	: Tepki
Robust	: Gürbüz
Sample	: Örnekleme
Sensor	: Duyargaç
Simulation	: Benzetim
Sliding mode	: Kayan kip
Sliding surface	: Kayan yüzey
Stability	: Kararlılık
State Space	: Durum uzay
Steady state	: Kalıcı durum
Step	: Basamak
State	: Durum
Theoretical	: Kuramsal
Torque	: Tork, moment
Transpose	: Devrik
Uncertainty	: Belirsizlik
Unstable	: Kararsız



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 04/10/2019

Tez Başlığı / Konusu: Bir Top ve Çubuk Sisteminin Denetimi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 81 sayfalık kısmına ilişkin, 04/10/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Burcu ULUDOĞAN

Öğrenci No: N12120641

Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

04.10.2019

B. Uluoğlu

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Hüseyin DEMİRCİOĞLU

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Burcu ULUDOĞAN
Doğum yeri : Ankara
Doğum tarihi : 04.06.1989
Medeni hali : Bekar
Elektronik posta adresi : brculudogan@hotmail.com
Yabancı dili : İngilizce, iyi

EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi (2007-2012)
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi (2012-2019)

İş Tecrübesi

2012 - ... ASELSAN, Ankara