

**ÇOK ERKİNLİ BİR SİSTEM SINIFINDA UYARLANIR İÇ MODEL
TABANLI ÇIKTI DENETİMİ YÖNTEMİ İLE HAREKET VE DİZİLİM
DENETİMİ**

ESMA GÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2010

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. M. Önder EFE

Anabilim Dalı Başkanı

Esmâ GÜL tarafından hazırlanan ÇOK ERKİNLİ BİR SİSTEM SINIFINDA UYARLANIR İÇ MODEL TABANLI ÇIKTI DENETİMİ YÖNTEMİ İLE HAREKET VE DİZİLİM DENETİMİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Veysel GAZİ

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. M. Önder EFE

Üye : Doç. Dr. Veysel GAZİ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nilay Sezer UZOL

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Esmâ GÜL

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Veysel GAZİ
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans - Ağustos 2010

ESMA GÜL

**ÇOK ERKİNLİ BİR SİSTEM SINIFINDA UYARLANIR İÇ MODEL
TABANLI ÇIKTI DENETİMİ YÖNTEMİ İLE HAREKET VE DİZİLİM
DENETİMİ**

ÖZET

Bu tez çalışmasında genel doğrusal olmayan dinamiklere sahip erkinlerden oluşan çok erkinli bir sistem sınıfında dizilim oluşturma ve dizilimi koruyarak gezinge takibi problemleri ele alınmıştır. Ele alınan problem çıktı denetim problemi olarak formüle edilmiştir. Sistem dinamiklerinde ve referans gezingeyi oluşturan sanal lider dinamiklerinde bilinmeyen parametreler olduğu varsayımı altında problemin çözümü için uyarlanir iç model tabanlı bir denetim tekniği kullanılmıştır. Ele alınan ilk durum belirli bir dizilimi oluşturma ve bu dizilimde periyodik gezinmelerin takibi problemidir. Daha sonra genişleme/daralma, dönme ve yeni bir dizilim oluşturma gibi değişik dizilim görevlerini gerçekleştirerek periyodik gezinmelerin takibi sağlanmıştır. Bir sonraki çalışmada periyodik gezinmeleri oluşturan sistemler arasında anahtarlama yapılarak daha karmaşık gezinmelerin takibi sağlanmıştır. Son olarak erkinler arasında değişik komşuluk yapıları kullanılarak dağıtık uzlaşma problemi ele alınmıştır. Komşulukların belirlenmesi için çember, bütünsel, en yakın komşular ve rastgele belirleme yaklaşımları kullanılmıştır. Kullanılan yaklaşımın ele alınan problemlerin çözümü üzerindeki etkinliği sayısal benzetimler ile sınanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok Erkinli Sistemler, Dizilim Denetimi, Gezinge Takibi, Çıktı Denetimi Yöntemi, Uyarlanir İç Model

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Electrical and Electronics Engineering
Supervisor : Associate Professor Veysel GAZI
Degree Awarded and Date : M.S. - August 2010

ESMA GÜL

**MOTION AND FORMATION CONTROL OF A CLASS OF MULTI-AGENT
SYSTEMS WITH ADAPTIVE INTERNAL MODEL BASED OUTPUT
REGULATION METHOD**

ABSTRACT

In this thesis the problem of moving in a predefined formation along a reference trajectory in a class of multi-agent systems in which the agents have general nonlinear dynamics is considered. The problem is formulated as an output regulation problem. Under the assumption that the agent dynamics and the systems that generate the reference trajectories have uncertain parameters, an adaptive internal model based control method is used to solve the problem. At first the problem of moving in a predefined formation along a periodic trajectory is addressed. Then performing various formation maneuvers such as expansion/contraction, rotation, and reconfiguration (change of geometric shape) along a periodic trajectory is studied. As the next step, tracking more complex trajectories is provided by using switching in the systems which generate the periodic reference trajectories. Finally, the problem of distributed agreement is addressed with using different neighborhood topologies. Ring, fully connected, nearest neighbors and random neighborhood topologies are used to determine the agent neighborhoods. The performance of the method for the solution of the problems is verified with numerical simulations.

Keywords: Multi-agent Systems, Formation Control, Trajectory Tracking, Output Regulation, Adaptive Internal Model

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. Veysel GAZI'ye ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Her türlü zorluğa birlikte göğüs gerdiğim Sürü Sistemler Araştırma Laboratuvarı'ndaki çalışma arkadaşlarım Sabahat Duran, Abdel-Razzak Merheb, Engin Karataő, Mirbek Turduev, Murat Kırtay, Ömer Çayırpunar, Salih Burak Akat ve Murat İlter Köksal'a

Ve bana her zaman güvenen, destekleriyle beni bugünlere getiren aileme teőekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 109E175 sayılı proje kapsamında desteklenmiőtir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	2
1.1. Tezin Konusu ve İçeriği	5
2. UYARLANIR İÇ MODEL TABANLI ÇIKTI DENETİMİ YÖNTEMİ	7
2.1. Problem Tanımı	7
2.2. Denetleyici Tasarımı	9
2.3. İç Modelin Parametrizasyonu	13
2.4. Yüksek Kazançlı Gözleyici	14
3. BELİRLİ BİR DİZİLİMDE PERİYODİK GEZİNGELERİN TAKİBİ	16
3.1. Problem Tanımı	16
3.1.1. Dizilim Kısıtları	17
3.1.2. Gezinge Takibi Kısıtları	17
3.2. Benzetim Sonuçları	19
4. DEĞİŞİK DİZİLİM GÖREVLERİNİ GERÇEKLEŞTİREREK PERİYODİK GEZİNGELERİN TAKİBİ	27
4.1. Problem Tanımı	27
4.1.1. Genişleme/Daralma	28
4.1.2. Dönme	29

4.1.3. Yeni Bir Dizilim Oluşturma	29
4.2. Benzetim Sonuçları	30
5. DEĞİŞİK DİZİLİM GÖREVLERİNİ GERÇEKLEŞTİREREK KARMAŞIK GEZİNGELERİN TAKİBİ	36
5.1. Problem Tanımı	36
5.2. Benzetim Sonuçları	38
6. DAĞITIK UZLAŞMA	45
6.1. Problem Tanımı	45
6.2. Çember Komşuluk Yapısı	47
6.3. Bütünsel Komşuluk Yapısı	47
6.4. En Yakın Komşular	48
6.5. Rastgele Komşuluk	49
6.6. Benzetim Sonuçları	50
6.6.1. Çember Komşuluk Yapısı	51
6.6.2. Bütünsel Komşuluk Yapısı	52
6.6.3. En Yakın Komşular	55
6.6.4. Rastgele Komşuluk	60
7. SONUÇ	64
7.1. Yorumlar	64
7.2. Gelecek alıŐmalar	65
KAYNAKLAR	66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. 25 saniye süresince sistem cevabı.	22
Şekil 3.2. Son 15 saniyedeki sistem cevabı.	23
Şekil 3.3. Robotların son konumları.	23
Şekil 3.4. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.	24
Şekil 3.5. y ekseninde $\hat{\Psi}$ matrisinin zamana bağlı değişimi.	24
Şekil 3.6. 25 saniye süresince sistem cevabı.	25
Şekil 3.7. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.	25
Şekil 3.8. y ekseninde $\hat{\Psi}$ matrisinin zamana bağlı değişimi.	26
Şekil 4.1. 20 saniye süresince sistem cevabı.	32
Şekil 4.2. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler. (iii) Erkinler arası göreceli açılar.	32
Şekil 4.3. Farklı anlardaki dizilimler.	34
Şekil 4.4. Toplam ortalama hata.	35
Şekil 5.1. 22 saniye süresince sistem cevabı.	41
Şekil 5.2. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.	41
Şekil 5.3. 15 saniye boyunca sistem cevabı.	43
Şekil 5.4. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.	44
Şekil 6.1. Çember komşuluk yapısı (Şekil, [1]'den alınmıştır).	47
Şekil 6.2. Bütünsel komşuluk yapısı (Şekil, [1]'den alınmıştır).	48
Şekil 6.3. En yakın komşular yaklaşımı (Şekil, [1]'den alınmıştır).	49
Şekil 6.4. 15 saniye süresince sistem cevabı.	52
Şekil 6.5. Erkinlerin biraraya toplanıncaya kadar izledikleri yollar.	53
Şekil 6.6. Robotların son konumları.	53
Şekil 6.7. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.	54
Şekil 6.8. 15 saniye süresince sistem cevabı.	55
Şekil 6.9. (i) Toplam ortalama hata.	55
Şekil 6.10. 15 saniye süresince sistem cevabı.	56
Şekil 6.11. (i) Toplam ortalama hata.	57
Şekil 6.12. 15 saniye süresince sistem cevabı.	58
Şekil 6.13. Robotların son konumları.	59
Şekil 6.14. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.	59
Şekil 6.15. 14 saniye süresince sistem cevabı.	60
Şekil 6.16. Robotların son konumları.	61
Şekil 6.17. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.	61
Şekil 6.18. 14 saniye süresince sistem cevabı.	62
Şekil 6.19. Robotların son konumları.	63
Şekil 6.20. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.	63

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Birden fazla özerk erkinden oluşan çok erkinli sistemler alanı son yıllarda önem kazanmış yeni bir çalışma alanıdır [2]. Doğada sürü halinde yaşayan canlıların davranışları çok erkinli sistemlerin çıkış noktası olmuş ve bu sistemlerin temelini oluşturmuştur. Doğada canlıların sürü halinde yaşamaları avcılardan kaçınma, yiyecek bulma, sürüdeki bireyler arasında görev paylaşımı ve yuva kurma gibi konularda onlara bir çok fayda sağlamaktadır. Bu faydalar, bu davranışların çok erkinli sistemlerde de kullanılmak istenmesinin sebebi olmuştur. Bu canlıların davranışları matematiksel olarak modellenerek çok erkinli sistemlerdeki bireylere uygulanmaya çalışılmıştır. [3] ve [4] bu konudaki çalışmalara örnek olarak gösterilebilir. Bu konudaki öncü çalışmalardan biri olan [3] çalışmasında sürü halinde uçan kuşların davranışlarını modellenmiş ve benzetimleri yapılmıştır. [4] çalışmasında da karıncalarda yiyecek bulma stratejileri gibi böcek davranışlarının modellenmesi ve kompleks sistemlerin tasarımında bu modellerin nasıl kullanılabileceği anlatılmaktadır.

Tek erkinli sistemlerle kıyaslandığı zaman çok erkinli sistemler bir çok avantaja sahiptir. Tek bir erkinin yapması imkansız veya çok zor olan karmaşık görevlerin çok erkinli sistemlerle daha kolay gerçekleştirilebilir olması, gürbüzlük¹, esneklik² ve ölçeklenebilirlik³ bu avantajlardan bazılarıdır. [5] çalışmasında çok erkinli sistemlerin gürbüzlüğü, normal olmayan durumların gerçekleşmesi, bireylerde herhangi bir arızanın meydana gelmesi veya bireylerden bazılarının devre dışı kalması durumunda sistemin işlevini yerine getirebilme derecesi olarak tanımlanmıştır. Bir sistemin gürbüz olabilmesi için sisteme etkiyen bozucular olduğunda veya sistemde belirsizlikler meydana geldiğinde görevini devam ettirebilmesi gerekmektedir. Tek bir erkinle gerçekleştirilen bir görevde, bu erkinin görev yapamayacak duruma gelmesi görevin iptaline sebep olurken, çok erkinli sistemlerde arızalanan bireyin yokluğu tolere edilebilir ve görev gruptaki diğer üyeler tarafından tamamlanabilir. [5] çalışmasına göre esneklik, erkinlerin bulunduğu çevrede herhangi bir değişiklik olduğu durumda sistemin bu yeni ortama adapte olabilmeye yeteneğidir. Örneğin, robotların belirli bir dizilimde ilerlediği bir uygulamada, önlerine herhangi bir engel çıktığında dizilimi bozarak engeli aşmaları sistemin esnek olmasıyla yani değişen çevre koşullarına adapte

¹ing: robustness

²ing: flexibility

³ing: scalability

olabilmesiyle mümkündür. Birey sayısının az ya da çok olmasının görev performansını etkilememesi yeteneği ise ölçeklenebilirlik olarak tanımlanmıştır [5]. Bu avantajların yanında, istenilen görevin bir çok birey tarafından paralel olarak gerçekleştirilmesi bu görevin daha erken tamamlanmasını sağlayarak zaman anlamında da faydalı olmaktadır. Ayrıca bir görevin gerçekleştirilmesi için kompleks tek bir sistem yerine, grup içindeki görev paylaşımına göre özelleşmiş ve basit birden fazla bireyin kullanılması bu sistemleri maliyet ve işlem karmaşıklığı açısından da avantajlı hale getirmektedir.

Son yıllarda teknolojiye gelişmeler bu tür sistemlerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır ve çok erkinli sistemler bahsedilen avantajlarından dolayı günümüzde insansız hava araçları, insansız deniz araçları, uydular, uzay araçları, mobil robotlar gibi bir çok uygulamada kullanılabilir [6–12]. Çok erkinli sistemlerin bu tür uygulamalarda pratik olarak kullanılabilmesi için merkezi olmayan⁴ koordinasyon ve denetim algoritmalarının geliştirilmesi gerekmektedir.

Çok erkinli sistemlerde koordineli davranışlar ve bu davranışların denetimi konusunda bir çok problem ve yaklaşım ele alınmıştır. Bu sistemlerde incelenen temel davranışlardan bazıları dağıtık uzlaşma⁵, kümelenme⁶, toplu beslenme⁷, hareket etme⁸ ve dizilim denetimi⁹ davranışlarıdır [2]. Bu davranışlara ait matematiksel modellerin modifiye edilmesi ve bunları gerçekleştirmek için kullanılan temel denetim tekniklerinin geliştirilmesiyle yol takibi, hedef takibi gibi diğer görevlerle kıyaslandığında daha üst seviye olarak nitelendirilebilecek görevlerin de gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Bu görevleri gerçekleştirecek uygun denetim girdilerinin tasarlanması için literatürde çok farklı yöntemler kullanılmıştır. Yapay potansiyel fonksiyonlar, kayan kipli denetim, geribeslemeli doğrusallaştırma, Lyapunov ve LaSalle methodları bu yöntemlerden bazılarıdır. [13–15] çalışmalarında yapay potansiyel fonksiyonlar yöntemi kullanılarak dizilim denetimi problemi ele alınmıştır. [10] çalışmasında aynı yöntem kullanılarak bir hedefi yakalama ve etrafını sarma davranışı, [16] çalışmasında ise sürü kümelenmesi davranışı incelenmiştir. Yapay potansiyel fonksiyonlar yöntemi model belirsizlikleri veya ortamda erkin dinamiklerine etkileyen bozucuların olduğu durumlarda bu etkileri bastırmak için kayan kipli denetim gibi gürbüz tekniklerle birleştirilerek kullanılabilir.

⁴ing: decentralized

⁵ing: distributed agreement

⁶ing: aggregation

⁷ing: social foraging

⁸ing: flocking

⁹ing: formation control

[17–20] çalışmalarında sürü takip, kümelenme ve dizilim denetimi görevlerinin gerçekleştirilmesi için kayan kip ve yapay potansiyel fonksiyonlar methodları beraber kullanılmıştır. Çok erkinli sistemlerde koordineli davranışlar için [21] çalışmasında geribeslemeli doğrusallaştırma yöntemi kullanılırken, [22] çalışmasında kontrol Lyapunov fonksiyonları, [11,23] çalışmalarında ise diğer Lyapunov ve LaSalle tabanlı yöntemler kullanılmıştır. [24] çalışmasında ise farklı bir yaklaşım ele alınmış ve problem ayırık zamanda analiz edilmiştir. Bu çalışmada birden fazla erkin için yol planlaması ve istenen dizilimin oluşturulması problemlerinin çözümünde potansiyel fonksiyonlar yöntemi Newton yinelemeleriyle beraber kullanılmıştır. Çok robotlu sistemler için koordinasyon ve denetim algoritmalarının geliştirilmesinde kullanılacak diğer bir yaklaşım ise çıktı denetimi yöntemidir. [25] çalışmasında dinamikleri genel lineer olmayan denklemlerle ifade edilebilen erkinlerden oluşan bir çok erkinli sistem sınıfında dizilim denetimi ve yol takibi problemleri iç model tabanlı bir denetleyici kullanılarak çözülmüştür.

Çıktı denetimi problemi kontrol alanında uzun zamandır yaygın olarak çalışılan konulardan bir tanesidir. 1970’li yıllarda çıktı denetimi problemi lineer zamanla değişmeyen sistemler için çözülmüştür [26–28]. Bu çalışmalarda problemin çözülebilmesi için gerekli koşullar tanımlanmış ve ele alınan problemin bir kararlaştırıcı terim ve bir iç modelin paralel birleşiminden oluşan denetleyici ile çözülebileceği gösterilmiştir. İç modelin denetleyicideki görevi, hatanın sıfır noktasında tutulmasını sağlayan denetim girdilerinin kontrol kuralında dış sistemlerin çıktılarında yeniden elde edilmesini sağlamaktır. Çıktı denetimi yönteminin lineer olmayan sistemlerde çözümünün geliştirilmesi için lineer sistemlerle yapılan bu çalışmalar genişletilmiştir [29, 30]. [29] çalışmasında sisteme etkiyen dış kaynaklı girdiler olan referans sinyaller veya bozucuların sabit değerlere sahip olduğu durum ele alınırken, [30] çalışmasında sisteme sabit olmayan, zamanla değişen dış kaynaklı sinyallerin etki ettiği durum ele alınmıştır. Bu konudaki ilk çalışmalar sistem parametrelerinin tamamen bilindiği ve zaman içerisinde değişmediği varsayımı altında yapılmıştır. Daha sonra bu çalışmalar, sistemlerde bilinmeyen parametreler ve parametre değerlerinde zaman içerisinde değişim olduğu durumlarda gürbüz ve yapısal olarak kararlı¹⁰ çıktı denetimi yöntemi olarak geliştirilmiştir [31–36]. Gürbüz çıktı denetimi konusunda yapılan ilk çalışmalardan biri olan [31] çalışmasında sıfır dinamiklerine sahip olmayan tek girdili tek çıktılı, çıktı geribeslemesiyle doğrusallaştırılabilen sistemler ele alınmıştır. Bu çalışmaya göre problemin çözülebilir olması için geliştirilen iç modelin dış sistemlerin ürettiği sinyallere ek olarak

¹⁰ing: structurally stable

bilinmeyen parametrelerden kaynaklanan yüksek dereceli dinamikleri de yeniden oluşturması gerekmektedir. [33] çalışmasında [31] çalışmasında elde edilen sonuçlar asimptotik kararlı lineer olmayan sistemler için genişletilmiştir. Bu çalışmada ele alınan sistemlerin yalnızca sabit değerli bilinmeyen parametrelere bağlı olduğu ve sabit değerli bozucu girdilere maruz kaldığı varsayımı altında problem çözülmüştür. [34] çalışması gürbüz lineer olmayan çıktı denetimi problemini bilinen, lineer dış sistemler etkisinde olan tek girdili tek çıktılı, girdi-çıkıtı doğrusallaştırılabilir ve minimum faz sistemler için çözdüğünden önceki çalışmaların genelleştirilmiş hali olarak görülebilir. [36] çalışmasında ise gürbüz çıktı denetimi probleminin lineer, marjinal kararlı dış sistemler etkisinde olan minimum faz sistemlerde bütünsel alanda çözümü için geliştirilen yöntem sunulmaktadır. [37] ve [38] çalışmalarında çıktı denetimi problemi, frekansları bilinmeyen dış kaynaklı sistemlerin olduğu durumda uyarlanır iç model tabanlı yöntemler kullanılarak çözülmüştür. [37] çalışmasında problem lineer kararlaştırılabilir¹¹ ve algılanabilir¹² sistemler için çözülmüşken, [38] çalışmasında lineer olmayan minimum faz sistemler için çözülmüştür. [39] çalışmasında anahtarlamalı dış sistemlerin olduğu durumda çıktı denetimi yöntemi ele alınırken, [29, 32] çalışmalarında merkezi olmayan¹³ çıktı denetimi yöntemi ele alınmıştır.

1.1. Tezin Konusu ve İçeriği

Bu tez çalışmasında çok erkinli bir sistem sınıfında hareket ve dizilim denetimi problemleri çalışılmıştır. Bölüm 2’de ele alınan problemlerin çözümü için kullanılan [38] çalışmasında geliştirilmiş uyarlanır iç model tabanlı çıktı denetimi yöntemi anlatılmaktadır. Dış kaynaklı girdileri oluşturan sistemlerin frekanslarının bilinmediği ve erkin dinamiklerinde bilinmeyen parametreler olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayımlar altında problem, parametrelerin uygun denetim kurallarıyla güncellenmesiyle uyarlanır bir kontrol tekniği kullanılarak çözülebilmektedir. Bölüm 3’te belirli bir dizilimde periyodik gezingelerin takibi problemi ele alınmıştır. Bu bölümde [25] çalışmasında elde edilen sonuçlar [38]’deki yöntem kullanılarak geliştirilmektedir. Problem erkin sürüsünün gezingelerini üreten sanal liderin dinamiklerini oluşturan marjinal kararlı sistemin parametrelerinin gerçek değerlerinin bilinmediği, sadece temel bir değer bilindiği varsayımı altında ele alınmaktadır. Referans gezingeyi oluşturan sistem marjinal kararlı olduğu için yalnızca sabit ve periyodik gezingelerin takibi sağlanmaktadır. Bölüm 4’te

¹¹ing: stabilizable

¹²ing: detectable

¹³ing: decentralized

dizilimde genişleme/daralma, dönme ya da yeni bir dizilim oluşturma gibi değişik dizilim görevlerini gerçekleştirerek periyodik gezinmelerin takibi problemi üzerine çalışılmıştır. Benzer dizilim görevleri [13] çalışmasında incelenmiş ancak farklı bir yaklaşım kullanılarak çözülmüştür. Bölüm 5'te değişik dizilim görevlerini gerçekleştirerek karmaşık gezinmelerin takibi problemi ele alınmıştır. Karmaşık gezinmelerin oluşturulması için [39] çalışmasından esinlenilerek anahtarlamalı dış sistemler kullanılmıştır. Bölüm 6'da erkinler arasında değişik komşuluk yapıları tanımlanarak dağıtık uzlaşma problemi üzerinde çalışılmıştır. Bölüm 7'de ise kısa bir özet ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar anlatılarak tez çalışması sonuçlandırılmıştır.

BÖLÜM 2

2. UYARLANIR İÇ MODEL TABANLI ÇIKTI DENETİMİ YÖNTEMİ

Bir sistemin çıktısının referans bir sinyali takibi için uygun denetleyicinin tasarımı problemi kontrol teorisinin temel problemidir. Çıktı denetimi yöntemi de sisteme bozucuların etki ettiği bir durumda kapalı çevrimde kararlılığı sağlarken belirli bir sistem sınıfına ait referans girdilerin takibi için uygun geribeslemeli denetleyicinin tasarımını ele alır. Sisteme etkileyen bozuculara ve izlenmesi istenen referans sinyallere dış kaynaklı girdiler adı verilirken, bu sinyalleri üreten sistemlere ise dış sistem adı verilmektedir [40, 41].

2.1. Problem Tanımı

Bu çalışmada ele alınan problemlerin çözümünde [38, 41] çalışmalarında geliştirilen klasik ve uyarlanırlar iç model tabanlı çıktı denetimi yöntemi takip edilmiştir. İncelenecek olan çok erkinli sistemin gerçek boyutları ihmal edilen ve erkinlerin hareket dinamikleri

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= f_i(z_i, s_i, \omega_i, u_i), \\ y_i &= h_i(z_i, s_i, \omega_i), 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (2.1)$$

genel doğrusal olmayan denklemleri ile ifade edilebilen N adet erkinde oluştuğu varsayılmaktadır. Bu denklemlerde $z_i \in \mathbb{R}^n$ i 'nci erkinin yerel durum değişkenini, $u_i \in \mathbb{R}^m$ yerel denetim girdisini, $s_i \in \mathbb{R}^t$ yerel dış kaynaklı girdilerini, ω_i bilinmeyen parametrelerini ve $y_i \in \mathbb{R}^m$ ise sistemin çıktısını ifade etmektedir. f_i ve h_i fonksiyonlarının bilindiği ve bu fonksiyonların pürüzsüz¹ olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, (2.1) ile ifade edilen erkin dinamiklerinin iyi tanımlı vektör göreceli derecelerine $\{r_i, r_i, \dots, r_i\}$ sahip olduğu ve bu dinamiklerin uygun bir durum

¹ing: smooth

dönüşümü aracılığı ile

$$\begin{aligned}
\dot{\chi}_i &= f_{i0}(\chi_i, x_i, s_i, \omega_i, u_i) \\
\dot{x}_{i1} &= x_{i2} \\
&\dots \\
\dot{x}_{ir_i} &= f_{ir_i}(\chi_i, x_i, s_i, \omega_i) + b_i(\omega_i)u_i \\
y_i &= x_{i1}
\end{aligned} \tag{2.2}$$

normal forma dönüştürülebildiği varsayılmaktadır. Bu denklemde $x_i^\top = [x_{i1}^\top, \dots, x_{ir_i}^\top]$ şeklindedir. Ayrıca sistemin sıfır dinamiklerinin kararlı ve denklemdeki $b_i(\omega_i) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ matrisinin bilinmeyen parametrelerin bütün değerleri için pozitif ve tekil olmayan matris olduğu varsayılmaktadır. Bu model, dinamikleri

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + V_i(q_i, \dot{q}_i) + G_i(q_i) = u_i \tag{2.3}$$

denkleminde ifade edilen erkinlerden oluşan sistemler gibi bir çok robotik sistemi ifade etmek için kullanılabilir oldukça genel bir modeldir.

Erkin dinamiklerine etki eden yerel dış kaynaklı girdilerin s_i (yerel referans girdileri ve bozucular) marjinal kararlı sistemler

$$\dot{s}_i = g_i(\sigma_i)s_i \tag{2.4}$$

tarafından üretildiği varsayılmaktadır. Burada σ_i sistemin parametrelerini ifade etmektedir. Bu çalışmada bu parametrelerin gerçek değerlerinin bilinmediği varsayılmaktadır. Bu sebeple denetim, bu parametrelere ait temel değerler² kullanılarak sağlanmaktadır. Marjinal kararlı sistemlerin kutupları parametrelerin bütün değerleri için basit kutuplardır ve bu kutuplar sanal eksen üzerinde bulunmaktadır. Bu sistemlerin yalnızca sabit ve periyodik işaretler üretmesinden dolayı klasik çıktı denetimi yöntemi ile yalnızca bu özellikteki bozucuların etki ettiği sistemlerde, bu özellikteki yerel referans girdilerinin takibi sağlanabilmektedir.

²ing: nominal value

2.2. Denetleyici Tasarımı

Ele alınan problemin çıktı denetimi bağlamında formüle edilebilmesi için hata ifadesinin tanımlanması gerekmektedir. Erkinlerin çıktılarının takip etmesi istenen referans sinyal $q_i(s_i, \omega_i)$ olarak tanımlansın. Buna göre i 'nci erkin için hata ifadesi

$$e_i = y_i - q_i(s_i, \omega_i) \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Klasik bir hata geribeslemeli denetleyicinin dinamik ifadesi

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \nu_i(\xi_i, e_i) \\ u_i &= \theta_i(\xi_i), 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (2.6)$$

formundadır. Bu ifadede $\dot{\xi}_i$ denetleyicinin iç durum değişkenini, u_i ise i 'nci erkin için denetim girdisini göstermektedir.

Bu tanımlamalar ışığında aşağıda belirtilen problemleri çözebilecek denetim girdilerinin tasarlanması gerekmektedir.

1) Sisteme etkiyen dış kaynaklı girdilerin olmadığı durumda kapalı çevrim sisteminin

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= f_i(z_i, 0, \omega_i, \theta_i(\xi_i)) \\ \dot{\xi}_i &= \nu_i(\xi_i, e_i), 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (2.7)$$

$(z_i, \xi_i) = (0, 0)$ denge noktası asimptotik kararlı olsun.

2) Dinamik ifadesi

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= f_i(z_i, s_i, \omega_i, \theta_i(\xi_i)) \\ \dot{\xi}_i &= \nu_i(\xi_i, e_i) \\ \dot{s}_i &= g_i(\sigma_i)s_i, 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (2.8)$$

denklemleriyle gösterilen kapalı çevrim sisteminin başlangıç noktası etrafında öyle bir

komşuluğu vardır ki bütün başlangıç koşulları ve bütün σ_i 'ler için

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_i = 0, 1 \leq i \leq N \quad (2.9)$$

sağlansın.

Erkin dinamiklerini oluşturan sistemler ile dış kaynaklı girdileri oluşturan dış sistemleri beraber düşünürsek, erkin dinamiklerini oluşturan sistemler kararlı olmasına rağmen dış sistemler marjinal kararlıdır yani özdeğerleri sanal eksen üzerindedir. Bu durumda $z_i = \pi_i(s_i, \omega_i)$ eşlemesi bir merkez manifolddur ve problemin çözülebilir olması için $\pi_i(0, \omega_i) = 0$ ve $c_i(0, \omega_i) = 0, 1 \leq i \leq N$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_i(s_i, \omega_i)}{\partial s_i} g_i(s_i) &= f_i(\pi_i(s_i, \omega_i), s_i, \omega_i, c_i(s_i, \omega_i)) \\ y_i &= q_i(s_i, \omega_i), 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (2.10)$$

eşitliklerini sağlayan $z_i = \pi_i(s_i, \omega_i)$ ve $u_i = c_i(s_i, \omega_i)$ eşlemelerinin olması gerekmektedir. Burada $\pi_i(s_i, \omega_i)$ eşlemeleri üzerinde hatanın sıfır olduğu manifoldu ifade ederken $c_i(s_i, \omega_i)$ eşlemeleri bu manifoldu değişmez yapan kontrol girdisini ifade etmektedir.

Problemin çözümü için tanımlanan bu şart erkin dinamikleri genel doğrusal olmayan dinamiklerle ifade edildiği zaman geçerlidir. Bu koşullar denklem (2.2)'deki dönüştürülmüş erkin dinamikleri için ifade edildiğinde

$$\begin{aligned} \vartheta_{i1}(s_i, \omega_i) &= q_i(s_i, \omega_i) \\ \vartheta_{ij}(s_i, \omega_i) &= \frac{\partial \vartheta_{i(j-1)}(s_i, \omega_i)}{\partial s_i} g_i(\sigma_i) s_i \\ &= L_{s_i} \vartheta_{i(j-1)}(s_i, \omega_i), j = 2, \dots, r_i \\ \frac{\partial \vartheta_{ir_i}(s_i, \omega_i)}{\partial s_i} g_i(\sigma_i) s_i &= f_{ir_i}(\zeta_i(s_i, \omega_i), \vartheta_i(s_i, \omega_i), s_i, \omega_i) + b_i(\omega_i) c_i(s_i, \omega_i) \\ \frac{\partial \zeta_i(s_i, \omega_i)}{\partial s_i} g_i(\sigma_i) s_i &= f_{i0}(\zeta_i(s_i, \omega_i), \vartheta_i(s_i, \omega_i), s_i, \omega_i, c_i(s_i, \omega_i)) \end{aligned} \quad (2.11)$$

biçiminde olur. Bu eşitlikte ilk ifade hata sıfır olduğu durumda $0 = y_i - q_i(s_i, \omega_i)$, $x_{i1} = y_i$ olacağından, diğer ifadeler ise dinamiklerin uçgensel forma dönüştürülebilmesinden

dolayı bu şekilde tanımlanabilmiştir. Bu eşitliklerde

$$L_{\dot{s}_i} \vartheta_{i(j-1)}(s_i, \omega_i) = \frac{\partial \vartheta_{i(j-1)}(s_i, \omega_i)}{\partial s_i} g_i(\sigma_i) s_i$$

ifadeleri Lie türevlerini göstermektedir.

Yukarıdaki koşulların ışığında problemin çözülebilir olduğunu temin etmek için bazı varsayımlar yapmak gerekmektedir.

Varsayım 1: Tüm $1 \leq i \leq N$ erkinleri için

$$\frac{\partial \zeta_i(s_i, \omega_i)}{\partial s_i} g_i(\sigma_i) s_i = f_{i0}(\zeta_i(s_i), \vartheta_i(s_i, \omega_i), s_i, \omega_i, c_i(s_i, \omega_i))$$

eşitliğini sağlayan $\zeta_i(s_i, \omega_i)$ eşlemeleri vardır.

Bu varsayım altında $\pi_i(s_i, \omega_i) = \begin{bmatrix} \zeta_i(s_i, \omega_i) \\ \vartheta_i(s_i, \omega_i) \end{bmatrix}$, $\vartheta_i(s_i, \omega_i) = \begin{bmatrix} q_i(s_i, \omega_i) \\ L_{\dot{s}_i} q_i(s_i, \omega_i) \\ \dots \\ L_{\dot{s}_i}^{r_i-1} q_i(s_i, \omega_i) \end{bmatrix}$ ve

$$c_i(s_i, \omega_i) = [b_i(\omega_i)]^{-1} (L_{\dot{s}_i}^{r_i} q_i(s_i, \omega_i) - f_{ir_i}(\zeta_i(s_i, \omega_i), \vartheta_i(s_i, \omega_i), s_i, \omega_i))$$

olmak üzere (2.10) ve (2.11) denklemlerinin $z_i = \pi_i(s_i, \omega_i)$ ve $u_i = c_i(s_i, \omega_i)$ eşlemeleri için çözümleri olduğunu gösterir. Bu eşitliklerdeki

$$L_{\dot{s}_i}^k q_i(s_i, \omega_i) = \frac{\partial}{\partial s_i} (L_{\dot{s}_i}^{k-1} q_i(s_i, \omega_i)) g_i(\sigma_i) s_i$$

ifadesi $k > 1$ için k 'nci derece Lie türevini göstermektedir.

Varsayım 2: Bir β_i tamsayısı ve $a_{i0}(\sigma_i)$, $a_{i1}(\sigma_i)$, \dots , $a_{i(\beta_i-1)}(\sigma_i)$ reel sayıları için $p_i(\lambda) = \lambda^{\beta_i} + a_{i(\beta_i-1)}(\sigma_i) \lambda^{\beta_i-1} + \dots + a_{i1}(\sigma_i) \lambda + a_{i0}(\sigma_i)$ polinomunun kökleri basit ve sanal ekseninde olacak şekilde

$$\begin{aligned} L_{\dot{s}_i}^{\beta_i} c_i(s_i, \omega_i) &= a_{i0}(\sigma_i) c_i(s_i, \omega_i) + a_{i1}(\sigma_i) L_{\dot{s}_i} c_i(s_i, \omega_i) \\ &+ \dots + a_{i(\beta_i-1)}(\sigma_i) L_{\dot{s}_i}^{\beta_i-1} c_i(s_i, \omega_i) \end{aligned} \quad (2.12)$$

eşitliği sağlanmaktadır.

Bu varsayım ise

$$\begin{aligned} L_{\dot{s}_i} \tau_{\sigma_i}(s_i, \omega_i) &= \Phi_i(\sigma_i) \tau_{\sigma_i}(s_i, \omega_i) \\ c_i(s_i, \omega_i) &= \Gamma_i(\sigma_i) \tau_{\sigma_i}(s_i, \omega_i) \end{aligned} \quad (2.13)$$

eşitliğini sağlayan

$$\tau_{\sigma_i}(s_i, \omega_i) = \begin{bmatrix} c_i(s_i, \omega_i) \\ L_{\dot{s}_i} c_i(s_i, \omega_i) \\ \dots \\ L_{\dot{s}_i}^{\beta_i-1} c_i(s_i, \omega_i) \end{bmatrix}$$

dönüşümünün var olduğunu gösterir. Bu dönüşüm (2.4) sistemiyle aynı çıktıları üreten doğrusal ve gözlenebilir

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \Phi_i(\sigma_i) \xi_i, \\ u_i &= \Gamma_i \xi_i, 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (2.14)$$

iç modelinin elde edilmesini sağlar. Dış kaynaklı girdileri oluşturan sistemler (2.4) bilinmemektedirler bu sebeple üzerinde hatanın sıfır olduğu manifoldu değişmez yapan $c_i(s_i, \omega_i)$ denetim girdilerinin denetim kuralında yeniden elde edilmeleri gerekmektedir. İç model kullanılarak, asıl dış sistemle aynı çıktıları yani istenilen denetim girdilerini üreten bir sistem elde edilmiş olur. Bu eşitlikteki $\Phi_i(\sigma_i) = \text{diag}(\bar{\Phi}_i(\sigma_i), \dots, \bar{\Phi}_i(\sigma_i))$ ve $\Gamma_i = \text{diag}(\bar{\Gamma}_i, \dots, \bar{\Gamma}_i)$ matrisleri sırasıyla

$$\bar{\Phi}_i(\sigma_i) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_{i0}(\sigma_i) & a_{i1}(\sigma_i) & a_{i2}(\sigma_i) & \dots & a_{i(\beta_i-1)}(\sigma_i) \end{bmatrix}$$

ve

$$\bar{\Gamma}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

formundadır. $\bar{\Phi}_i(\sigma_i)$ matrislerinin son satırını $a_{ij}(\sigma_i), 0 \leq j \leq (\beta_i - 1)$,

katsayıları oluşturmaktadır ve bu matrisin özdeğerleri incelendiğinde (2.4) sisteminin özdeğerleriyle aynı olduğu görülmektedir.

2.3. İç Modelin Parametrizasyonu

Problemin çözümü için çok önemli role sahip olan bir diğer nokta ise iç modelin parametrik biçimde ifade edilmesi gerektiğidir. $\Phi_i(\sigma_i)$ matrisinin elemanları bilinmeyen σ_i parametrelerine bağlıdır. Denetim işlevi de bu parametrelerin temel değerleri kullanarak gerçekleştirildiğinden $\Phi_i(\sigma_i)$ matrisinin güncellenebilir bir ifadeye sahip olması gerekmektedir. Bu amaçla $\Phi_i(\sigma_i)$ matrisinin parametrik biçimde ifade edilmesi gerekir. Böylece uygun bir denetim kuralıyla güncellenen parametreler sayesinde istenen denetim girdisinin elde edilmesi sağlanmış olur.

İç modelin parametrizasyonunun mümkün olduğu [38] çalışmasında bir lemma ile ifade edilmiştir. (Orada da lemma [42] çalışmasından ödünç alınmıştır).

Lemma [38], [42]: Hurwitz olan bir F matrisi ile (F,G) çiftini denetlenebilir yapan bir G vektörü verilsin. Buna göre

$$M_\sigma \Phi(\sigma) - FM_\sigma = G\Gamma \quad (2.15)$$

Sylvester eşitliğinin tekil olmayan tek bir M_σ çözümü vardır.

Bu sonucun ışığında

$$\Psi(\sigma) = \Gamma M_\sigma^{-1}$$

olarak tanımlanmasıyla

$$M_\sigma \Phi(\sigma) M_\sigma^{-1} = F + G\Psi(\sigma)$$

elde edilir. Bu eşitlikte $\Psi(\sigma)$ matrisi $\Phi(\sigma)$ matrisinin kutuplarını $F + G\Psi(\sigma)$ matrisinin kutuplarına atama problemi için tek çözümdür. Diğer bir ifadeyle, $\Phi(\sigma)$ matrisi ile $F + G\Psi(\sigma)$ matrisinin kutupları aynı olur, yani bu matrisler benzer matrislerdir.

Böylece her bir j girdi-çıkı kanalı için iç modeller parametrik biçimde

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{ij} &= (F_i + G_i \Psi_i(\sigma_i)) \xi_{ij}, \\ u_{ij} &= \Psi_i(\sigma_i) \xi_{ij}, 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (2.16)$$

denklemleriyle ifade edilebilir.

Bu çalışmada yerel dış kaynaklı girdilerin frekansını belirten σ_i parametresinin gerçek değerinin bilinmediği varsayılmaktadır. Bunun yerine parametre için temel bir değer kullanılarak $\Psi_i(\sigma_i)$ matrisinin başlangıç değerleri $\Psi_{i0}(\sigma_i)$ hesaplanmaktadır, matrisin gerçek değeri ise uyarlanır bir biçimde tahmin edilmektedir. Kullanılan ifadelerde $\Psi_i(\sigma_i)$ matrisinin tahmini $\hat{\Psi}_i$ ile temsil edilmektedir.

Bu çalışmada denetim girdisi hata geribeslemeli bir denetleyici kullanarak elde edilmektedir. Bu denetleyici sadece yerel hata bilgisini ve türevlerini kullanmaktadır. Hatanın ve türevlerinin bilindiği durumda i 'nci erkin için problemi çözen denetleyicinin ifadesi [38] çalışmasında da gösterildiği üzere her bir j girdi-çıkı kanalı için

$$\begin{aligned}
\dot{\xi}_{ij} &= (F_i + G_i \hat{\Psi}_{ij}) \xi_i - K_i G_i \theta_{ij} \\
\dot{\hat{\Psi}}_{ij} &= -\gamma_i \theta_{ij} \\
\theta_{ij} &= e_{ij}^{(r_i-1)} + k_i^{r_i-1} b_{i0} e_{ij} + \dots + k_i b_{i(r_i-2)} e_{ij}^{(r_i-2)} \\
u_{ij} &= \hat{\Psi}_{ij} \xi_{ij} - K_i \theta_{ij}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadedeki katsayılardan $k_i > 0$ sağlaması gerekirken $b_{i0}, b_{i1}, \dots, b_{i(r_i-2)}$ katsayıları ise $p_i(\lambda) = \lambda^{r_i-1} + b_{i(r_i-2)} \lambda^{r_i-2} + \dots + b_{i1} \lambda + b_{i0}$ polinomu Hurwitz olacak şekilde seçilmelidir. (2.17) denetleyici eşitliğinden görülebileceği üzere denetim girdisinin ifadesi iki terimin toplamı şeklindedir. İlk terim iç modelden gelen ve hatanın sıfır olduğu, istenen kalıcı hal durumunu oluşturur. Yani sistem üzerinde hatanın sıfır olduğu manifolda ulaştığında bu terim sistem gezinmelerinin bu manifold üzerinde kalmasını sağlar. İkinci terim ise hatanın sıfır olduğu manifolda erişmeyi sağlar.

2.4. Yüksek Kazançlı Gözleyici

Çıkı hatası e_i 'nin bilinmesi normal olmasına karşın bazı durumlarda bu hataların türevleri bilinmeyebilirler. Bu durumda (2.17) denetleyicisi kullanılamaz. Hatanın bilindiği ancak türevlerinin bilinmediği durumda hatanın türevleri yüksek kazançlı bir gözleyici kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Bu gözleyici lineer bir sistemdir ve

dinamik ifadesi

$$\dot{\hat{x}}_{ij} = M_{gi}\hat{x}_{ij} + L_{gi}e_{ij} \quad (2.18)$$

şeklindedir. Bu ifadede M_{gi} ve L_{gi} matrisleri

$$M_{gi} = \begin{bmatrix} -g_i c_{i(r_i-1)} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -g_i^2 c_{i(r_i-2)} & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \ddots & \cdot \\ -g_i^{r_i-1} c_{i1} & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -g_i^{r_i} c_{i0} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, L_{gi} = \begin{bmatrix} g_i c_{i(r_i-1)} \\ g_i^2 c_{i(r_i-2)} \\ \cdot \\ g_i^{r_i-1} c_{i1} \\ g_i^{r_i} c_{i0} \end{bmatrix}$$

şeklindedir. Bu matrislerdeki katsayılardan $g_i > 0$ sağlanması gerekirken, $c_{i0}, c_{i1}, \dots, c_{i(r_i-1)}$ katsayıları ise $p_{ic}(\lambda) = \lambda^{r_i} + c_{i(r_i-1)}\lambda^{r_i-1} + \dots + c_{i1}\lambda + c_{i0}$ polinomu Hurwitz olacak şekilde seçilmelidir. Artık denetleyici ifadesinde hata ve türevlerinin yerine bu sistemin çıktıları kullanılabilir. Bu durumda yine [38] çalışmasında geliştirilen

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_{ij} &= M_{gi}\hat{x}_{ij} + L_{gi}e_{ij} \\ \dot{\xi}_{ij} &= (F_i + G_i\hat{\Psi}_{ij})\xi_{ij} - K_i G_i \text{sat}(l_i, \hat{\theta}_{ij}) \\ \dot{\hat{\Psi}}_{ij} &= -\gamma_i \text{sat}(l_i, \hat{\theta}_{ij}) \\ \hat{\theta}_{ij} &= \hat{x}_{ijr_i} + k_i^{r_i-1} b_{i0} \hat{x}_{ij1} + \dots + k_i b_{i(r_i-2)} \hat{x}_{ij(r_i-1)} \\ u_{ij} &= \hat{\Psi}_{ij} \xi_{ij} - K_i \text{sat}(l_i, \hat{\theta}_{ij}) \end{aligned} \quad (2.19)$$

denetleyici her bir j girdi-çıkıktı kanalı için problemi çözer. Burada kullanılan sat fonksiyonu

$$\text{sat}(l, \alpha) = \begin{cases} \alpha & \text{if } |\alpha| \leq l \\ l \frac{\alpha}{|\alpha|} & \text{if } |\alpha| > l \end{cases}$$

şeklinde tanımlanan bir saturasyon fonksiyonudur. Bu fonksiyonun kullanılmasının sebebi yüksek kazançlı gözleyicilerde başlangıçta yüksek hata tahminlerinin oluşması ve sistemi kararsızlaştırabilecek bu hataların etkisinden korunmak için işaretlerin kısıtlanma gereksinimidir.

BÖLÜM 3

3. BELİRLİ BİR DİZİLİMDE PERİYODİK GEZİNGELERİN TAKİBİ

Bu bölümde erkin dinamikleri (2.1) denklemleri ile ifade edilen çok erkinli bir sistemde belirli bir dizilimde periyodik gezinmelerin takibi görevi ele alınmıştır. Problemin çözümü için uygun denetim girdileri Bölüm 2’de anlatılan Uyarlanı İç Model Tabanlı Çıktı Denetimi Yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu bölümde [25] çalışmasında ortaya atılan fikirlerin geliştirilmesiyle elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Elde edilen sonuçların bir kısmı [43,44] çalışmalarında yayınlanmıştır.

3.1. Problem Tanımı

Bu bölümde anlatılan çalışmada, erkinlerin belirli bir dizilimi oluşturmaları ve bu dizilimi koruyarak referans bir gezineyi takip etmeleri istenmektedir. Referans gezinenin marjinal kararlı dinamikleri olan ve bu dinamikler

$$\begin{aligned}\dot{s} &= g_{vl}(\sigma)s \\ y_{vl} &= c_{vl}s\end{aligned}\tag{3.1}$$

biçiminde ifade edilebilen bir dış sistem, sanal lider, tarafından oluşturulduğu varsayılmaktadır. σ sistemin bilinmeyen parametrelerini göstermektedir ve sistem bu parametrelerin her değeri için sanal eksen üzerinde basit kutuplara sahiptir. Sistemin bu özelliğinden dolayı bu bölümde kullanılan yaklaşım ile yalnızca periyodik referans gezinmelerin takibi sağlanabilmektedir.

Erkin dinamiklerine etki eden yerel dış kaynaklı girdilerin de, dinamikleri

$$\dot{\mu}_i = g_{\mu_i}(\eta_i)\mu_i, 1 \leq i \leq N,\tag{3.2}$$

şeklinde ifade edilebilen ve kutupları sanal eksen üzerinde olan marjinal kararlı dış sistemler tarafından üretildiği varsayılmaktadır.

Sanal lider dinamikleri bütün erkinler tarafından göz önünde bulundurulması gereken sinyaller ürettiğinden, bu dinamikler erkinlerin yerel dış girdilerini oluşturan sistemler

ile beraber düşünülebilir. Bu durumda i 'nci erkin için toplam dış kaynaklı sinyalleri üreten sistemin dinamikleri

$$\dot{s}_i = g_i(\sigma_i)s_i = \begin{bmatrix} g_{vl}(\sigma) & 0 \\ 0 & g_{\mu_i}(\eta_i) \end{bmatrix} s_i \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede $s_i = [s, \mu_i]$ sistemin durumlarını, $\sigma_i = [\sigma, \eta_i]$ ise bilinmeyen parametrelerini ifade etmektedir. Bu tanımlamaların ardından ele alınacak olan problem aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

Belirli Bir Dizilimde Gezinge Takibi Problemi: Her $i, i = 1, \dots, N$, erkini için u_i denetim girdileri öyle tasarlanmalıdır ki Dizilim Kısıtları ve Gezinge Takibi Kısıtları aynı anda sağlansın.

3.1.1. Dizilim Kısıtları

Dizilim kısıtları erkin çiftleri arasında tanımlanan ve istenen dizilimin oluşturulabilmesi için sağlanması gereken kısıtlardır. Dizilim kısıtları ifade edilirken her (i, j) erkin ikilisi arasında ilişki tanımlanmasına gerek yoktur. İstenilen dizilimin ifade edilebilmesi için gerekli olan minimum sayıdaki kısıtın tanımlanması yeterlidir. Dizilim kısıtları birçok uygulamada robotlar arasındaki mesafelere ve robotlar arasında olması istenen mesafeye bağlı bir ifadedir ve

$$\|y_i - y_j\| - d_{ij} = 0, 1 \leq i, j \leq N, i \neq j \quad (3.4)$$

şeklinde gösterilebilir. Bu ifadede y_i ve y_j , i 'nci ve j 'nci erkinlerin pozisyonlarını gösterirken; d_{ij} , (i, j) erkin çifti arasında olması istenen mesafeyi göstermektedir. Bu ifadenin sağlanmış olması istenen dizilimin oluşturulmuş olduğunu göstermektedir.

3.1.2. Gezinge Takibi Kısıtları

Gezinge takibi kısıtları erkinlerin sanal liderin ürettiği referans gezinge takip etmeleri için sağlanması gereken kısıtlardır. Gezinge takibi kısıtları her bir erkin ile sanal lider arasında olması gereken mesafeye göre

$$\|y_i - y_{vl}\| - d_{ivl} = 0, 1 \leq i \leq N \quad (3.5)$$

şeklinde gösterilebilir. Bu ifadede y_i , i 'nci erkinin pozisyonunu d_{ivl} ise i 'nci erkin ile sanal lider arasında olması istenen mesafeyi göstermektedir. Erkinlerin görevleri

boyunca bu kısıtı sağlayacak şekilde hareket etmeleri istenen referans gezinenin takip edildiğini göstermektedir.

Ele alınan problemin çözülebilir olması için Dizilim Kısıtlarının ve Gezinge Takibi Kısıtlarının aynı anda sağlanabiliyor olması gerekmektedir. Başka bir ifadeyle bu kısıtların birbirleriyle çelişmiyor olmaları gerekmektedir. Problemin çözülebilir olması durumunda istenen davranışın oluşturulabilmesi için denetim girdilerinin bu iki kısıtı aynı anda sağlamayı garanti edecek şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Bahsedilen kısıtların aynı anda sağlanabildikleri bir varsayımla ifade edilebilir.

Varsayım 3: Bilinen pürüzsüz $q_i(s_i, \omega_i)$, $1 \leq i \leq N$ eşlemeleri vardır öyle ki bu eşlemeler

$$\begin{aligned} \|q_i(s_i, \omega_i) - q_j(s_j, \omega_j)\| - d_{ij} &= 0, 1 \leq i, j \leq N, i \neq j \\ \|q_i(s_i, \omega_i) - y_{vl}\| - d_{i vl} &= 0, 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (3.6)$$

eşitliklerini sağlasın.

Bu eşlemeler erkinler için iki kısıtı da aynı anda sağlayan yerel referans gezinmelerini oluşturmaktadır. Erkinler bu eşmelere uygun şekilde hareket ettiğinde hem dizilim hem de gezinge takibi kısıtları yerine getirilmiş olur. Her erkinin denetim girdisi de sistemin çıktısı ilgili eşlemeyi takip edecek şekilde tasarlanmalıdır.

Varsayım 3'ün güçlü ve zayıf yönleri vardır. $q_i(s_i, \omega_i)$ eşlemelerinin var olması zayıf bir varsayımdır çünkü bu tür fonksiyonların olmaması durumunda problem çözülemez olacaktır. Bu fonksiyonların biliniyor olması ise güçlü bir varsayımdır çünkü bu eşlemeler bazı problemlerde bilinmiyor olabilir. Ancak birçok robot uygulamalarında bu fonksiyonların robotlar arasındaki göreceli uzaklıklara göre tanımlanması mümkün olmaktadır.

Bu bölümde ele alınan problemde $q_i(s_i, \omega_i)$ eşlemeleri

$$q_i(s_i, \omega_i) = y_{vl} + r^i$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu ifadede r^i , i 'nci erkinin istenen dizilimde sanal lidere göre göreceli pozisyonunu göstermektedir. Robotların \mathbb{R}^2 'de hareket ettiği göz önünde

bulundurulursa i 'nci erkin için bu vektör

$$r^i = \mu_{i1} \begin{bmatrix} \cos(\mu_{i2}) \\ \sin(\mu_{i2}) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

şeklindedir. Bu ifadede μ_{i1} parametresi (3.5) eşitliğinde d_{ivl} olarak belirtilen istenen dizilime göre i 'nci erkinle sanal lider arasında olması gereken mesafeyi gösterirken, μ_{i2} i 'nci erkinle sanal lider arasında olması gereken göreceli açıdır.

3.2. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde Bölüm 2'de anlatılan denetim yönteminin belirli bir dizilimi koruyarak yol takibi probleminin çözümü üzerindeki etkinliğinin sınanması için yapılan benzetimlerin sonuçları verilecektir. Ele alınan sistem hareket dinamikleri

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= \mu_i + u_i \\ y_i &= x_i \end{aligned} \quad (3.8)$$

denklemleri ile ifade edilen ve \mathbb{R}^2 uzayında hareket eden $N = 6$ adet noktasal erkinden oluşmaktadır. Denklemdaki $x_i \in \mathbb{R}^2$ i 'nci robotun konumunu, $v_i \in \mathbb{R}^2$ i 'nci robotun hızını, $\mu_i \in \mathbb{R}^2$ i 'nci erkine etki eden bozucu sinyalleri, $u_i \in \mathbb{R}^2$ ise i 'nci robotun denetim girdisini belirtmektedir. Bozucuların değerleri sabittir ve tanımlı oldukları $\{0 < \omega_i < 5\}$ kümesinden erkinlere göre rastgele seçilmektedir. Robotların bir kenarı $2\sqrt{3}$ birim olan eşkenar üçgen dizilimi oluşturarak referans gezingeyi takip etmesi istenmektedir. Referans gezinge takip edilirken sanal liderin robotların oluşturduğu üçgenin merkezinde olması istenmektedir. Buna göre istenen dizilime göre göreceli konumları yani (3.4) denklemlerindeki d_{ij} değerleri $2\sqrt{3}$, $\sqrt{3}$ ve 3 olarak hesaplanabilir. Benzer şekilde (3.5) denklemlerindeki d_{ivl} değerleri ise 1 ve 2 olarak elde edilir. μ_1 ve μ_2 parametrelerinin değerleri $\mu_1 = [1, 1, 1, 2, 2, 2]$ ve $\mu_2 = [\pi/2, -\pi/6, 7\pi/6, \pi/6, 5\pi/6, 3\pi/2]$ 'dir. Robotların istenen dizilimde sanal lidere göre olması gereken bağıl konumları ise $r^1 = [0, 1]^\top$, $r^2 = [\sqrt{3}/2, -1/2]^\top$, $r^3 = [-\sqrt{3}/2, -1/2]^\top$, $r^4 = [\sqrt{3}, 1]^\top$, $r^5 = [-\sqrt{3}, 1]^\top$ ve $r^6 = [0, -2]^\top$ olarak

hesaplanabilir. Sanal liderin dinamikleri

$$g_{vl}(\sigma) = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma & 0 & 0 \\ \sigma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sigma \\ 0 & 0 & \sigma & 0 \end{bmatrix}, c_{vl} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

olmak üzere denklem (3.1)'deki sistem ile ifade edilmektedir. Denetleyici tasarımı yapılırken robotların hareket ettiği x ve y kartezyen koordinatlar ayrı ayrı ele alınmıştır. Ancak sistemin dinamikleri iki eksen de aynı olduğu için tek bir eksen için tasarlanan denetleyici biçimi diğer eksen için de kullanılmıştır.

Manifold eşitlikleri çözüldüğünde

$$\begin{aligned} \vartheta_1^i(s_i) &= s_1 + r_1^i \\ \vartheta_2^i(s_i) &= -\sigma s_2 \\ c_i(s_i) &= -\sigma^2 s_1 - \mu_i^1 \end{aligned}$$

denklemleri elde edilir. Burada

$$\tau_i^1(s_i) = \begin{bmatrix} -\sigma^2 s_1 - \mu_i^1 \\ \sigma^3 s_2 \\ \sigma^4 s_1 \end{bmatrix}$$

dönüşümü kullanılırsa sistem (2.14) denklemde gösterilen formata uygun olarak tek eksen de

$$\begin{aligned} \dot{\tau}_i^1(s_i) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\sigma^2 & 0 \end{bmatrix} \tau_i^1(s_i), \\ c_1^i(s_i) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tau_i^1(s_i) \end{aligned}$$

haline gelir. Diğer eksen de sistem aynı forma sahiptir. İç modelin parametrizasyonunda kullanılan F_i matrisi karakteristik polinomunun kökleri $\{-9, -10, -11\}$ olacak şekilde seçilmiştir. F_i , G_i ve $\Psi_{i0}(\sigma)$ matrisleri de

denetlenebilir kanonik yapıdan dengelenmiş gerçekleştirme¹ yoluyla elde edilmiştir. Dengelenmiş gerçekleştirme sistemin kontrol edilebilirlik ve gözlenebilirlik Gramian'larının eşit ve köşegen olmasını sağlayarak matris elemanlarının değerlerinin daha iyi durumda² olmasına sebep olur [38, 45]. İç model parametrik biçimde (2.16) denklemindeki gibi ifade edildikten sonra [45] çalışmada geliştirilen algoritma kullanılarak F_i , G_i ve $\Psi_{i0}(\sigma)$ matrisleri hesaplanmaktadır. Bu algoritmaya göre öncelikle sistemin kontrol edilebilirlik W_c ve gözlenebilirlik W_o Gramian'larının alt üçgensel L_c ve L_o Cholesky faktörleri hesaplanır. L_c ve L_o Cholesky faktörlerinin çarpımlarının tekil değer ayrıştırması³

$$L_o^\top L_c = U\Lambda V^\top$$

yapılır. Sistemin istenen forma getirilmesini sağlayan dönüşüm

$$T_b = L_r V \Lambda^{-1/2}$$

şeklindedir. Bu dönüşüm sisteme uygulanarak dengelenmiş formdaki sistem matrisleri

$$F_i = T_b^{-1} F_i T_b \quad G_i = T_b^{-1} G_i \quad \Psi_{i0}(\sigma) = \Psi_{i0}(\sigma) T_b$$

olarak elde edilir. σ parametresinin temel değeri 1 olarak alınarak bu algoritma kullanılmadan hesaplanan matrisler

$$F_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -990 & -299 & -30 \end{bmatrix}, G_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

ve

$$\Psi_{i0}(\sigma) = \begin{bmatrix} 990.0000 & 298.0000 & 30.0000 \end{bmatrix}$$

şeklindedir. Değerlerin bu şekilde büyük olması uyarlanır algoritmanın kararsızlığına sebep olabilmektedir. Algoritma kullanıldığında ise iç modelin parametrik ifadesinde yer alan matrisler tüm erkinler için

$$F_i = \begin{bmatrix} -23.4564 & 11.7535 & -2.8785 \\ -11.7535 & -2.9573 & 2.2460 \\ -2.8785 & -2.2460 & -3.5863 \end{bmatrix}, G_i = \begin{bmatrix} 5.5605 \\ 1.0208 \\ 0.3500 \end{bmatrix}$$

¹ing: balanced realization

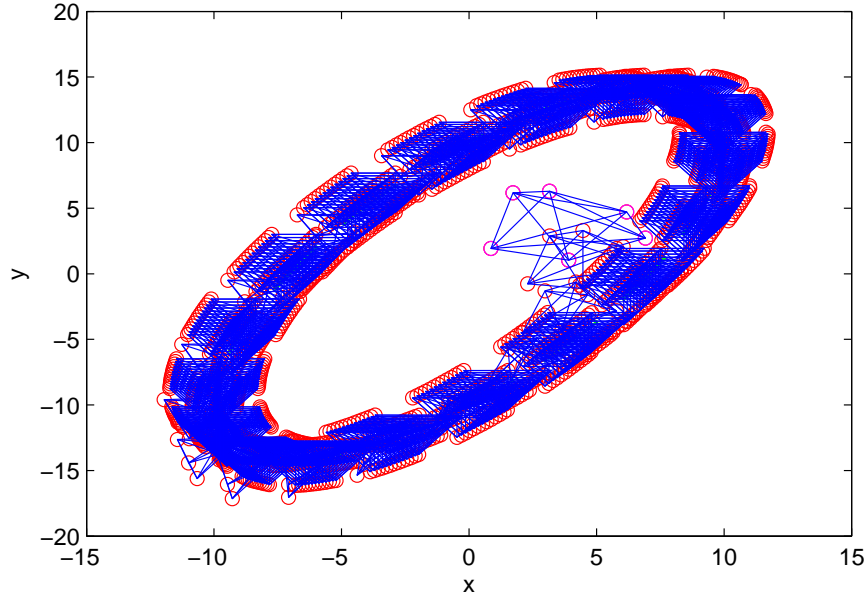
²ing: well-conditioned

³ing: singular value decomposition

ve

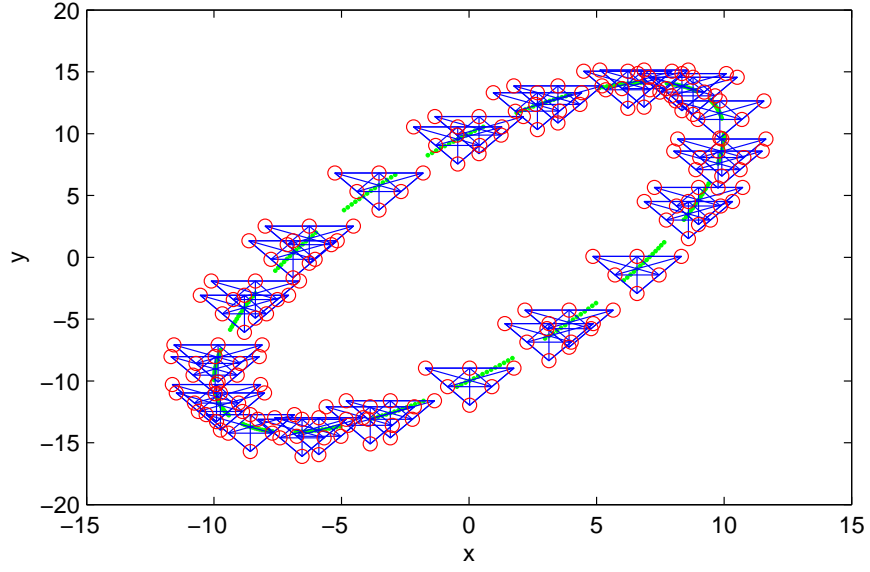
$$\Psi_{i0}(\sigma) = \begin{bmatrix} 5.5605 & -1.0208 & 0.3500 \end{bmatrix}$$

olarak hesaplanmıştır. Parametrelerin ve katsayıların değerleri tüm erkinler için aynı olacak şekilde seçilmiştir. $\hat{\theta}_i$ hesaplanırken kullanılan k_i parametrelerinin değerleri 5 ve b_{i0} parametrelerinin değerleri 0.5 olarak seçilmiştir. (2.17) ve (2.19) denklemlerinde yer alan K_i katsayılarının değerleri, γ_i katsayılarının değerleri ve l_i parametrelerinin değerleri sırasıyla 400, 1 ve 10 olarak seçilmiştir. Yüksek kazançlı gözleyicilerin sistem matrislerindeki g_i katsayılarının değerleri 50 olarak, c_{i0} ve c_{i1} katsayılarının değerleri ise $p_{ic}(\lambda)$ polinomunun kökleri her erkin için $\{-12, -13\}$ 'de olacak şekilde seçilmiştir. İç model parametreleri $\sigma = 1$ temel değeri kullanılarak ayarlanmıştır, gerçek değer olarak ise benzetimlerde $\sigma = 3.5$ değeri kullanılmıştır.

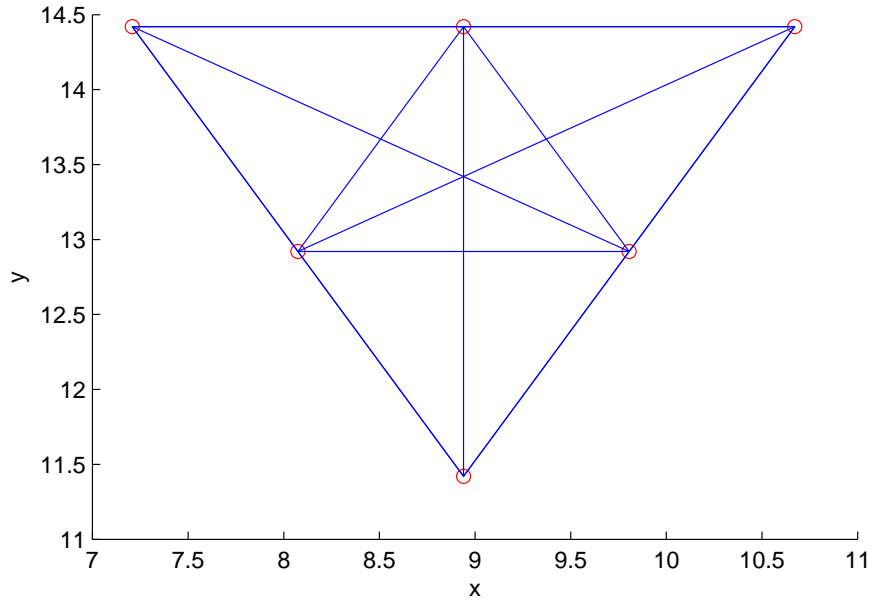


Şekil 3.1. 25 saniye süresince sistem cevabı.

İlk önce hatanın ve türevlerinin bilindiği durum için benzetimler yapılmıştır ve bu benzetimlerin sonuçları Şekil 3.1. ve Şekil 3.5. arasında gösterilmektedir. Şekil 3.1. 25 saniyelik benzetim süresince sistem cevabını, Şekil 3.2. ise son 15 saniyedeki sistem cevabını göstermektedir. Yeşil noktalar referans gezingeyi göstermektedir ve şekillerden de görülebileceği üzere robotlar sanal lider dizilimin merkezinde olacak şekilde referans gezingeyi takip etmişlerdir. Şekil 3.3. robotların son konumlarını göstermektedir. Robotların bulunduğu konumlar dairelerle gösterilmiştir ve robotlar eşkenar üçgenin kenar ve köşelerinde olacak şekilde istenilen dizilimi

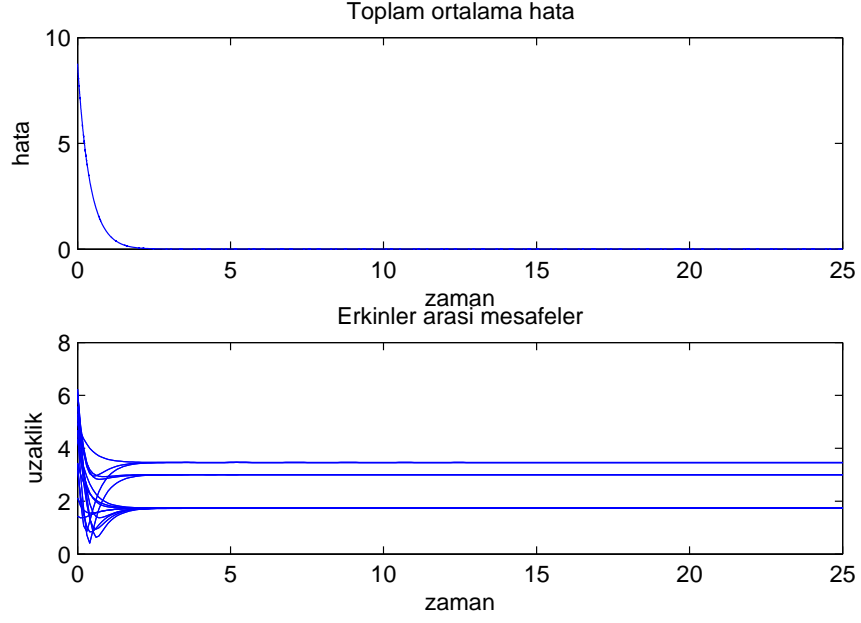


Şekil 3.2. Son 15 saniyedeki sistem cevabı.

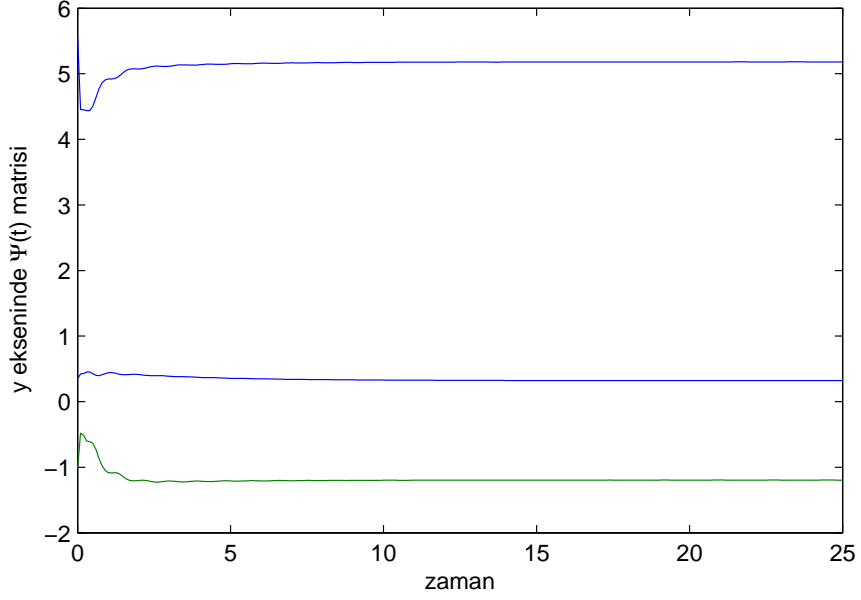


Şekil 3.3. Robotların son konumları.

oluşturmuşlardır. Şekil 3.4. toplam ortalama hatanın zamana bağlı değişimini ve robotlar arası mesafeleri göstermektedir. Şekilden de görülebileceği üzere hata sıfıra yaklaşık olarak 2.5 saniyede yakınsamaktadır ve robotlar arası mesafeler de istenen değerlere ulaşmışlardır. Şekil 3.5. y ekseninde, erkinlerden biri için $\hat{\Psi}$ matrisinin



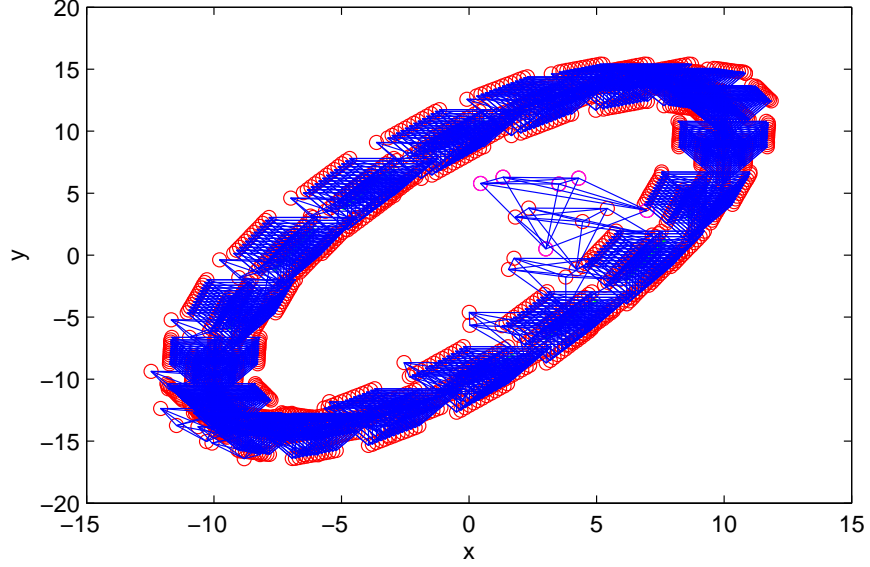
Şekil 3.4. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.



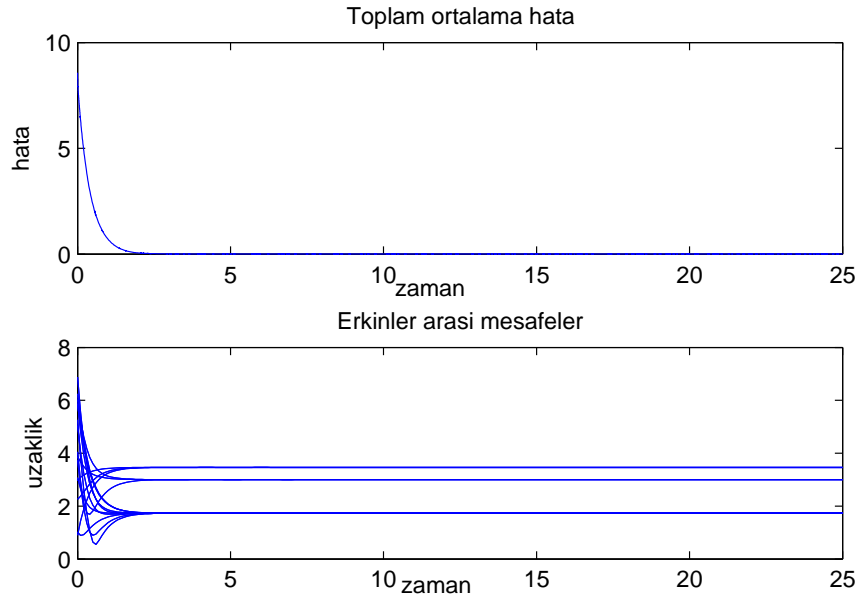
Şekil 3.5. y ekseninde $\hat{\Psi}$ matrisinin zamana bağlı değişimi.

değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. $\hat{\Psi}$ matrislerinin bu değerlerine bakılarak sistemin iç parametresi σ 'ya dönüldüğünde 25 saniyelik benzetim sonunda iç modelin frekansının x ekseninde $\sigma_x = 3.50$ ve y ekseninde $\sigma_y = 3.49$ değerine

yakınsadığı görülmüştür.

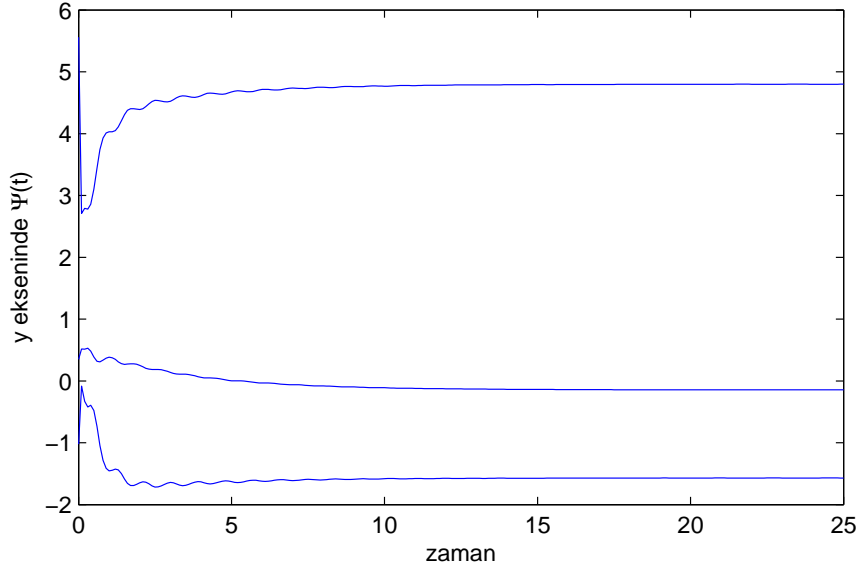


Şekil 3.6. 25 saniye süresince sistem cevabı.



Şekil 3.7. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.

Hatanın bilindiği ancak türevlerinin yüksek kazançlı gözleyici kullanılarak tahmin edildiği duruma ait benzetim sonuçları Şekil 3.6. ve Şekil 3.8. arasında gösterilmektedir. Şekil 3.6. 25 saniye süresince sistem cevabını göstermektedir.



Şekil 3.8. y ekseninde $\hat{\Psi}$ matrisinin zamana bağlı değişimi.

Şekil 3.7. ise toplam ortalama hatanın ve robotlar arası mesafelerin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Kısa bir süre içinde hata sifira yakınsamaktadır ve erkinler arası mesafeler istenilen dizilime göre olması gereken değerlere ulaşmaktadır. Şekil 3.8. ise bir erkin için y ekseninde $\hat{\Psi}$ matrisinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Bu değerlerden iç modelin frekansı hesaplandığında x ekseninde $\sigma_x = 3.50$ değerine, y ekseninde ise $\sigma_y = 3.49$ değerine yakınsadığı görülmüştür. Robotların son konumlarına ait şekil yüksek kazançlı gözleyici kullanıldığı durumda da benzer olduğu için tekrar gösterilmemiştir.

BÖLÜM 4

4. DEĞİŞİK DİZİLİM GÖREVLERİNİ GERÇEKLEŞTİREREK PERİYODİK GEZİNGELERİN TAKİBİ

Bu bölümde erkin dinamikleri (2.1) denklemleri ile ifade edilen çok erkinli bir sistemde belirli bir dizilim oluşturmanın yanı sıra değişik dizilim görevlerini de gerçekleştirerek periyodik referans gezinmelerin takibi görevi ele alınmıştır. Erkinlerin görevlerini gerçekleştirdikleri sırada gelen bir komuta göre dizilimin genişlemesi/daralması, dönmesi ya da erkinlerin yeni bir dizilim oluşturması istenmektedir. Problemin çözümünde ele alınan yaklaşımlardan bir tanesi [1] çalışmasından alınmıştır. Elde edilen sonuçların bir kısmı [46] çalışmasında sunulmuştur.

4.1. Problem Tanımı

Dizilimin genişlemesi/daralması, dönmesi ya da erkinlerin oluşturdukları dizilimi bozarak yeni bir dizilimi gerçekleştirmeleri görevleri değişik uygulamalarda karşılaşılabilecek görevlerdir. Erkinlerin bulunduğu ortamdaki herhangi bir değişiklik, erkinlerin önüne bir engel çıkması gibi, ya da görev değişikliği nedeniyle gelen bir komut böyle davranışların gerçekleştirilmesini zorunlu kılabilir. Böyle bir komut erkinlere etkiyen bir dış kaynaklı girdi olarak düşünülebilir ve istenen görevin gerçekleştirilmesi için parametre değerlerinin uygun şekilde ayarlanması sırasında dış kaynaklı sistemler kullanılabilir. Dizilim oluşturulması için kullanılan parametreler olan μ_1 ve μ_2 değerlerinin uygun şekilde değiştirilmesi için bu parametreler dış kaynaklı girdilere dahil edilebilirler.

μ_1 ve μ_2 parametrelerinin değerleri görev boyunca sabit olmadığı için d_{ij} ve d_{ivl} değerleri de sabit değildir. Dizilim ve gezinme takibi kısıtları yeniden ifade edilirse dizilim kısıtları

$$\|y_i - y_j\| - d_{ij}(t) = 0, 1 \leq i, j \leq N, i \neq j$$

takip kısıtları ise

$$\|y_i - y_{vl}\| - d_{ivl}(t) = 0, 1 \leq i \leq N$$

şeklinde olur. Değişik dizilim görevlerinin gerçekleştirilebilmesi için zamana bağlı olarak değişen $d_{ij}(t)$ ve $d_{ivl}(t)$ değerlerine göre tanımlanan dizilim ve takip kısıtlarının

sağlanmış olması gerekmektedir.

4.1.1. Genişleme/Daralma

Genişleme/daralma hareketi sanal lidere göre göreceli açıları sabit tutarak dizilimdeki göreceli mesafelerin değiştirilmesiyle elde edilir. Yani bu görev (3.7) eşitliğindeki μ_1 parametrelerinin değerlerinin değiştirilmesiyle ilgilidir. Bu parametrelerin değerleri iki şekilde değiştirilebilir. İlk ve basit olan yöntem parametre değerlerinin istenen göreve ait komut geldiği anda yeni dizilime göre değiştirilmesidir. t_1 anında gelen genişleme/daralma komutuna göre μ_{i1} parametresinin değeri

$$\mu_{i1}(t_1^+) = \rho_1 \mu_{i1}(t_1^-), 1 \leq i \leq N \quad (4.1)$$

şeklinde değiştirilebilir. Bu ifadede ρ_1 genişleme/daralma miktarını göstermektedir. $\rho_1 > 1$ genişleme hareketine sebep olurken, $\rho_1 < 1$ daralma hareketine sebep olacaktır.

Parametre değerlerinin bu şekilde değiştirilmesinin dezavantajı parametre değerindeki ani değişimin hatada ani bir artışa sebep olmasıdır. Erkinler yeni dizilimi oluşturana kadar kısa bir geçiş süresi yaşanmaktadır. Hatadaki bu ani artışın engellenmesi, parametre değerlerinin [47] çalışmasında anlatılan parçalı sabit girdileri¹ olan dış sistemler kullanılarak güncellenmesiyle mümkündür. Diğer bir deyişle, parametre değerlerinin istenen dizilime göre değiştirilmesi için

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{\mu}}_{i1} \\ \dot{\bar{\mu}}_{i2} \\ \dot{\bar{\mu}}_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \bar{\alpha}_{i1} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\beta}_{i1} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{i1} \\ \bar{\mu}_{i2} \\ \bar{\mu}_{i3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \varpi_{i1}$$

$$\mu_{i1} = \bar{\mu}_{i1} \quad (4.2)$$

formundaki sistemler kullanılabilir. ϖ_{i1} sistemin parçalı sabit girdilerini gösterirken, $\bar{\alpha}_{i1}$ ve $\bar{\beta}_{i1}$ ise sistemin parametrelerdir. ϖ_{i1} girdilerinin ve $\bar{\alpha}_{i1}$, $\bar{\beta}_{i1}$ parametrelerinin değerleri uygun şekilde seçildiğinde, μ_{i1} parametresinin değerinin bir başlangıç değerinden istenen bir değere belirli bir görev zaman aralığında değiştirilmesi mümkündür. Gerçekleştirilmek istenen görevde μ_{i1} ve türevlerinin hareket başlangıç ve bitiş anlarındaki değerlerine göre daha farklı boyutta ancak benzer yapıdaki sistemler de tasarlanabilir.

¹ing: piecewise constant input

4.1.2. Dönme

Dönme hareketi sanal lidere göre göreceli mesafelerin sabit tutularak yalnızca göreceli açıların değiştirilmesiyle elde edilir. Diğer bir ifadeyle dönme görevi erkinlerin oluşturduğu dizilimin, dizilimin boyutunu sabit tutarak, saat yönünde veya saat yönünün tersine dönmesidir. Yani bu görev (3.7) eşitliğindeki μ_2 parametrelerinin değerlerinin değiştirilmesiyle alakalıdır. Bir önceki bölümde bahsedildiği üzere parametre değerlerini değiştirmek için iki yöntem kullanılabilir.

Dönme görevinin gerçekleştirilmesi için komutun t_2 anında geldiği varsayılırsa μ_{i2} parametresinin değeri

$$\mu_{i2}(t_2^+) = \rho_2 + \mu_{i2}(t_2^-), 1 \leq i \leq N \quad (4.3)$$

eşitliğine göre değiştirilebilir. ρ_2 dönme miktarını belirleyen parametredir. $\rho_2 < 0$ saat yönünde dönmeye sebep olurken, $\rho_2 > 0$ saat yönünün tersinde bir dönmeye sebep olur.

Genişleme/daralma hareketinde olduğu gibi dönüş hareketi boyunca daha pürüzsüz geçişler elde etmek için

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{\mu}}_{i1} \\ \dot{\tilde{\mu}}_{i2} \\ \dot{\tilde{\mu}}_{i3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \tilde{\alpha}_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{i2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mu}_{i1} \\ \tilde{\mu}_{i2} \\ \tilde{\mu}_{i3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \varpi_{i2} \\ \mu_{i2} &= \tilde{\mu}_{i1} \end{aligned} \quad (4.4)$$

formundaki dinamik sistemler kullanılabilir. Bu ifadede ϖ_{i2} sistemin parçalı sabit girdilerini, $\tilde{\alpha}_{i2}$ ve $\tilde{\beta}_{i2}$ ise parametrelerini göstermektedir. İstenen dönüş hareketinin elde edilebilmesi için μ_{i2} ve türevlerinin hareket başlangıç ve bitiş anlarındaki değerlerine göre ϖ_{i2} , $\tilde{\alpha}_{i2}$ ve $\tilde{\beta}_{i2}$ 'nin değerlerinin uygun şekilde hesaplanması gerekmektedir.

4.1.3. Yeni Bir Dizilim Oluşturma

Yeni bir dizilim oluşturma görevi erkinlerin oluşturduğu geometrik bir şeklin bozulup yeni bir şeklin oluşturulmasıdır. Yani dizilimdeki hem göreceli açıların hem de göreceli mesafelerin değiştirilmesiyle alakalıdır. Bu görevin gerçekleştirilebilmesi için

de (3.7) eşitliğindeki hem μ_1 hem μ_2 parametrelerinin değiştirilmesi gerekmektedir. Örneğin bir sürü robot sisteminde herhangi bir dizilimden düz çizgi dizilimine (4.1) ve (4.3) eşitlikleri kullanılarak geçilmek istendiğinde, μ_{i1} ve μ_{i2} parametrelerinin orjinal değerleri $\mu_{i1} = id$ ve $\mu_{i2} = \pi$ şeklinde değiştirilmelidir. Burada d düz çizgi diziliminde robotlar arasında olması istenen mesafedir [1]. Yukarıda bahsedildiği gibi parametrelerde bu şekilde yapılan ani bir değişim hatada ani bir yükselmeye sebep olacaktır. Diğer bir seçenek ise parametreler ve parçalı sabit girdiler için uygun değerlerin seçilmesiyle (4.2) ve (4.4) dinamik denklemlerinin kullanılmasıdır.

4.2. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde Bölüm 2’de anlatılan denetim yönteminin ele alınan problem çözümünde kullanıldığında elde edilen benzetimlerin sonuçları verilecektir. Ele alınan sistem \mathbb{R}^2 uzayında hareket eden $N = 6$ adet robottan oluşmaktadır. Robotların hareket dinamikleri

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= d_i + \omega_i u_i \\ y_i &= x_i \end{aligned} \tag{4.5}$$

şeklinindedir. Bu denklemlerde $x_i \in \mathbb{R}^2$ i 'nci robota ait pozisyon bilgisini, $v_i \in \mathbb{R}^2$ hız bilgisini, $u_i \in \mathbb{R}^2$ denetim girdisini, $d_i \in \mathbb{R}^2$ i 'nci robot üzerine etkiyen periyodik bozucuları, ω_i ise bilinmeyen parametreleri göstermektedir. ω_i parametrelerinin değerleri sabittir ve her robot için $\{0 < \omega_i < 5\}$ kümesinden rastgele seçilmektedir. $d_i = [d_{i1}, d_{i2}]^\top$ periyodik bozucularının

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_{ij} \\ \dot{d}_{ij2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_j \\ \alpha_j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{ij} \\ d_{ij2} \end{bmatrix}$$

formunda marjinal kararlı sistemler tarafından üretildiği varsayılmaktadır. Bu sistem rastgele başlangıç değerlerine sahiptir ve α parametrelerinin gerçek değerleri bilinmemektedir. Kullanılan bu model basit olmasına karşın bir çok uygulamada kullanılan güncel ve bu çalışmada kullanılan yöntemin varsayımlarını sağlayan bir modeldir. Ayrıca uygun geribeslemeli doğrusallaştırıcı dış döngü denetleyiciler² kullanılarak bir çok erkin modeli noktasal erkin modeline dönüştürülebilmektedir.

²ing: feedback linearizing outer loop controller

x ve y koordinatlarındaki dinamikler aynı ve birbirinden bağımsız olduğu için bu koordinatlar ayrı ayrı incelenmiş ve tek koordinat için tasarlanan denetleyici diğer koordinat için de kullanılmıştır.

Tek bir ekseninde sanal liderin dinamiklerindeki matrisler

$$g_{vl}(\sigma) = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma \\ \sigma & 0 \end{bmatrix}, c_{vl} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

şeklinde dir. Manifold eşitlikleri çözüldüğünde

$$\begin{aligned} \vartheta_{j1}^i(s_i, \omega_i) &= s_j + r_j^i \\ \vartheta_{j2}^i(s_i, \omega_i) &= -\sigma s_2 \\ c_{ij}(s_i, \omega_i) &= \frac{1}{\omega_{ij}}[-\sigma^2 s_1 - d_{i1}] \end{aligned}$$

ifadeleri elde edilmektedir. Dış sistemle aynı çıktıları elde etmek için 4 boyutlu bir iç model (2.14) kullanılmıştır. $a_{i0}(\sigma_i), a_{i1}(\sigma_i), a_{i2}(\sigma_i), a_{i3}(\sigma_i)$ parametreleri sırasıyla $-4, 0, -5, 0$ olarak hesaplanmıştır. İç model parametreleri $\sigma = 1$ ve $\alpha = 2$ temel değerleri kullanılarak ayarlanmıştır. İç modelde kullanılan F_i matrisi karakteristik polinomunun kökleri $\{-9, -10, -11, -12\}$ noktalarında olacak şekilde tanımlanmıştır. F_i, G_i ve $\Psi_{i0}(\sigma)$ matrisleri Bölüm 3'te anlatılan dengeli gerçekleştirme kullanılarak her erkin için

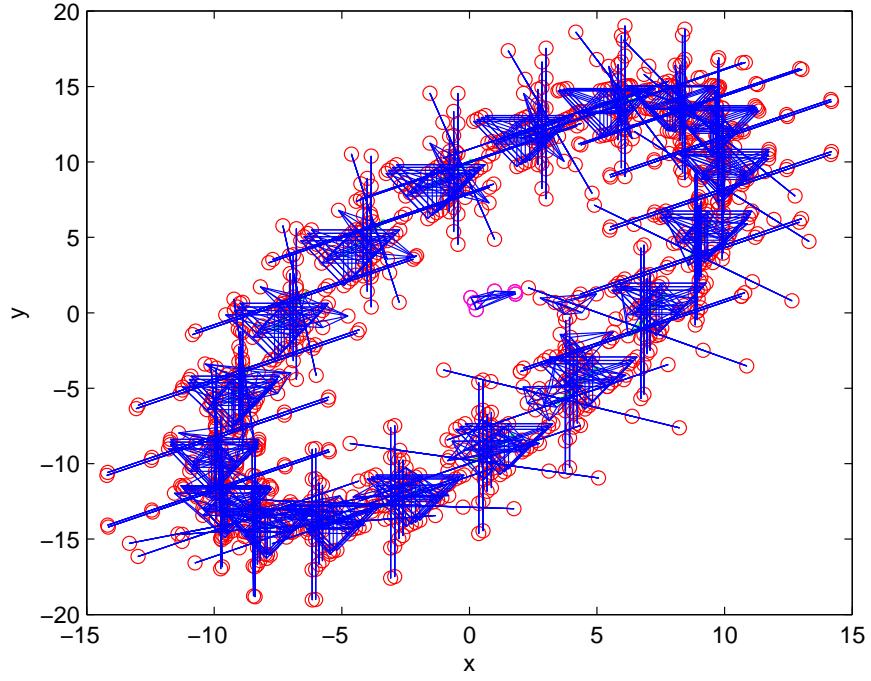
$$F_i = \begin{bmatrix} -31.0098 & -16.9074 & 5.2290 & -1.3228 \\ 16.9074 & -3.1251 & 3.6332 & -0.7182 \\ 5.2290 & -3.6332 & -4.5549 & 2.3637 \\ 1.3228 & -0.7182 & -2.3637 & -3.3102 \end{bmatrix}, G_i = \begin{bmatrix} -6.5662 \\ 1.1984 \\ 0.5834 \\ 0.1395 \end{bmatrix}$$

ve

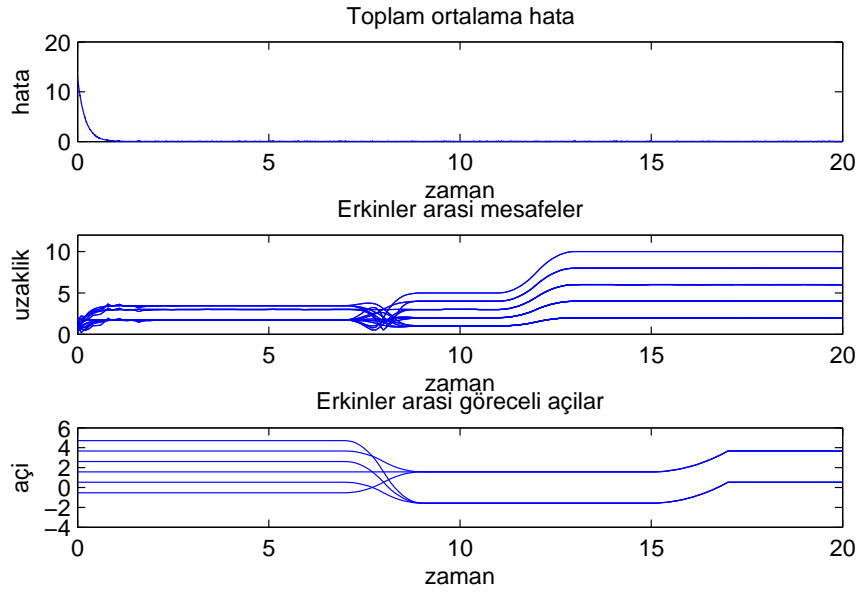
$$\Psi_{i0}(\sigma_i) = \begin{bmatrix} -6.5662 & -1.1984 & 0.5834 & -0.1395 \end{bmatrix}$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu benzetimde de robotların istenen dizilimi oluşturmaları ve sanal lideri dizilimin merkezinde tutarak referans gezineyi takip etmeleri gerekmektedir. İstenen dizilim sabit olduğu durumda, denetim kuralında da μ_{i1} ve μ_{i2} parametrelerinin değerleri sabit



Şekil 4.1. 20 saniye süresince sistem cevabı.



Şekil 4.2. : (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler. (iii) Erkinler arası göreceli açılar.

olarak kullanılmaktadır. Diğer dizilim görevlerine ait bir komut geldiği zaman bu parametrelerin değerleri istenen dizilime göre anahtarlanmalı ya da dinamik olarak değiştirilmelidir. Parametre değerlerini değiştirmek için hem (4.1), (4.3) eşitlikleri hem de (4.2), (4.4) formundaki sistemler kullanılmış ve iki durum için yapılan benzetim sonuçları kıyaslanmıştır. Bu benzetimde eşkenar üçgen ve çizgi dizilimleri kullanılmıştır ancak μ_{i1} ve μ_{i2} parametrelerinin değerleri uygun şekilde değiştirilerek farklı dizilimler de elde edilebilir. Eşkenar üçgenden çizgi dizilimine geçilmesi için komut geldiği zaman parametrelerin değerleri $\mu_1 = [0.5, 1.5, 2.5, 0.5, 1.5, 2.5]$ ve $\mu_2 = [\pi/2, \pi/2, \pi/2, -\pi/2, -\pi/2, -\pi/2]$ olacak şekilde ayarlanmalıdır. Dış sistem parametreleri her görevde geçiş süresi 2 saniye olacak şekilde tasarlanmıştır. Genişleme/daralma ve yeni bir dizilim oluşturma görevlerinde μ_{i1} parametrelerinin değerlerini ayarlamak için

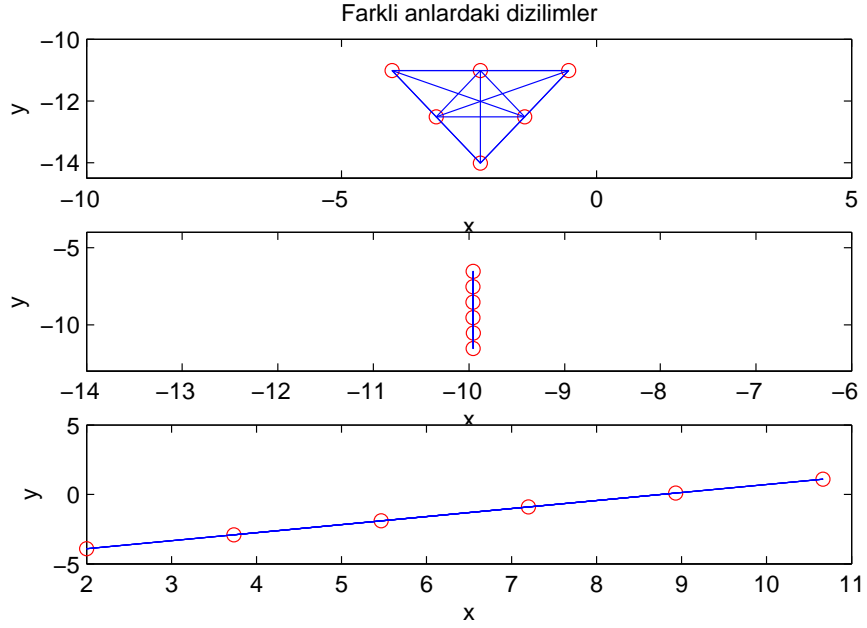
$$\begin{aligned}\dot{\bar{\mu}}_{i1} &= \bar{\alpha}_{i1}\bar{\mu}_{i2} \\ \dot{\bar{\mu}}_{i2} &= \varpi_{i1}\end{aligned}\tag{4.6}$$

sistemi kullanılmıştır. Görev başlamadan önce ϖ_{i1} parametrelerinin değerleri 0, görevin ilk bir saniyesi boyunca 1 ve görevin son bir saniyesi boyunca ise -1 olarak ayarlanmıştır. Görev bittikten sonra değerleri yeniden 0'a atanmıştır. İstenen görevin t_1 anında başlayıp $t_1 + 2$ anında bittiği varsayılarak $\bar{\alpha}_{i1}$ parametresi hesaplandığında

$$\bar{\alpha}_{i1} = \bar{\mu}_{i1}(t_1 + 2) - \bar{\mu}_{i1}(t_1)$$

şeklinde bir ifade elde edilmektedir. Yapılan benzetimde robotların $t = 7$ 'nci saniyede eşkenar üçgen diziliminden çizgi dizilimine geçmeleri, $t = 11$ 'inci saniyede ise genişleme hareketi gerçekleştirmeleri istenmektedir. Robotlar bu görevleri gerçekleştirmediği zaman süresince $\bar{\alpha}_{i1}$ parametresinin değeri 1 olarak ayarlanmıştır. $t = 7$ 'nci saniyedeki dizilim değiştirme komutu geldikten sonra bu parametrenin değerleri geçiş süresi boyunca $\bar{\alpha}_1 = [-0.5, 0.5, 1.5, -1.5, -0.5, 0.5]$ olarak ayarlanmıştır. $t = 11$ 'inci saniyede gelen genişleme komutundan sonra ise geçiş süresi boyunca bu parametrenin değerleri $\bar{\alpha}_1 = [0.5, 1.5, 2.5, 0.5, 1.5, 2.5]$ olarak atanmıştır. Bu değerler daha önce oluşturulmuş çizgi dizilimini iki kat genişletmek için hesaplanan değerlerdir. Benzer şekilde dizilimi yeniden oluşturma ve dönme hareketleri boyunca μ_{i2} parametrelerinin değerlerini değiştirmek için de (4.4) formunda 2 boyutlu sistemler kullanılmıştır. $t = 7$ saniyesinde gerçekleşen dizilimi yeniden oluşturma görevi için $\tilde{\alpha}_{i2}$ parametreleri

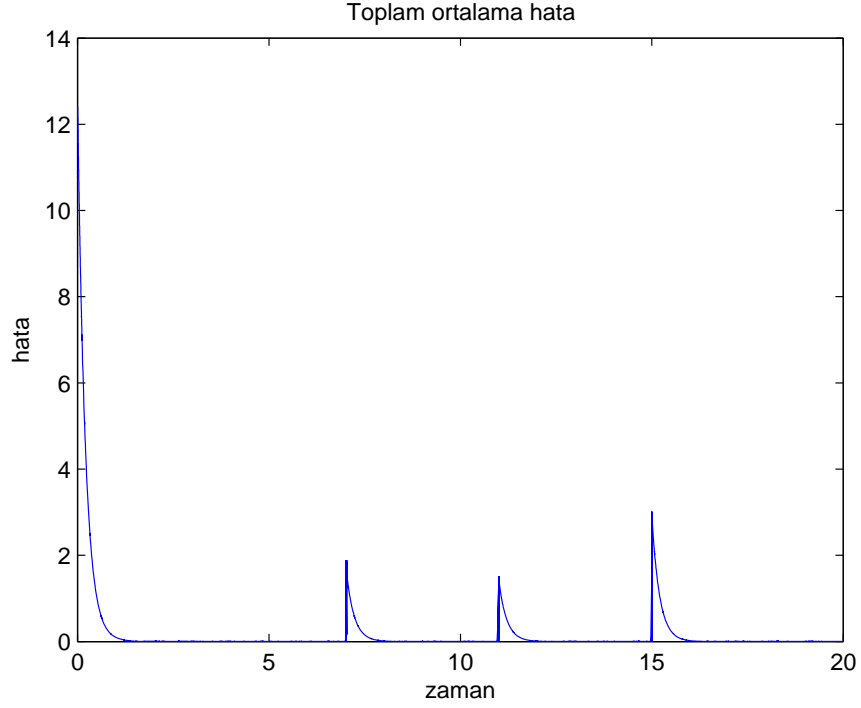
0, 2.0944, -2.0944, -2.0944, -4.1888, -6.2832 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca $t = 15$ 'inci saniyede dizilimin saat yönünün tersine $\pi/3$ radyan dönmesi istenmiştir. Bu görevin gerçekleştirilmesi için de $\tilde{\alpha}_{i2}$ parametresinin değeri bütün robotlar için $\pi/3$ olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.3. Farklı anlardaki dizilimler.

Yüksek kazançlı gözleyicide kullanılan g_i parametresi 50, c_{i0} ve c_{i1} katsayılarının değerleri ise $p_{ic}(\lambda)$ polinomlarının kökleri $\{-12, -13\}$ 'de olacak şekilde seçilmiştir. k_i , b_{i0} , K_i , γ_i ve l_i parametrelerinin değerleri her erkin için sırasıyla 10, 0.5, 300, 1 ve 10 olarak seçilmiştir. Sonuçlar benzer olduğu için yalnızca hatanın bilindiği ve türevlerinin yüksek kazançlı gözleyici kullanılarak tahmin edildiği duruma ait benzetim sonuçları gösterilmektedir.

Şekil 4.1. hareket boyunca erkin gezinmelerini göstermektedir. Robotlar tarafından oluşturulan değişik dizilimler şekilden görülebilmektedir. Şekil 4.2. toplam ortalama hatanın, robotlar arası mesafelerin ve göreceli açılarının zaman içindeki değişimini göstermektedir. Şekilden de görülebileceği üzere $t = 7$, $t = 11$ ve $t = 15$ saniyelerinde gerçekleştirilmesi istenen görevler hatada herhangi bir artışa sebep olmadan başarıyla tamamlanmıştır. Robotlar öncelikle eşkenar üçgen dizilimini oluşturmuşlar, $t = 7$ saniyesinde ise dizilimi yeniden oluşturma görevi başlamış ve çizgi dizilimine geçmişlerdir. Robotlar arası olması gereken mesafe ve açılar



Şekil 4.4. Toplam ortalama hata.

istenen değerlere yakınsamıştır. $t = 11$ 'inci saniyede başlayan genişleme hareketi ile oluşturulan çizgi diziliminin boyutu iki katına çıkarılmıştır. Son olarak $t = 17$ 'nci saniyede başlayan dönme hareketi ile dizilim $\pi/3$ radyan dönmüş ve robotlar görevlerini başarılı bir şekilde tamamlamışlardır. Şekil 4.3. $t = 6$, $t = 10$ ve $t = 20$ saniyelerinde robotların oluşturduğu dizilimleri göstermektedir. Şekil 4.4. ise aynı benzetim parametre değişimi, sırasında yerel dış sistemler kullanılmadan, (4.1) ve (4.3) eşitliklerine göre gerçekleştirildiğinde gözlenen hata grafiğini göstermektedir. Hatadaki ani artışlar referans pozisyonlardaki ani değişimlerden dolayı dizilim görevlerinin gerçekleştirilmesi için komutların geldiği anlarda oluşmuştur. Hatada ani artışlar olmasına rağmen, hata kısa sürede sifira yakınsamış ve istenen görev gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 5

5. DEĞİŞİK DİZİLİM GÖREVLERİNİ GERÇEKLEŞTİREREK KARMAŞIK GEZİNGELERİN TAKİBİ

Bu bölümde erkinlerin belirli bir dizilim oluşturma, herhangi bir komut geldiğinde ya da ihtiyaç oluştuğunda değişik dizilim görevlerini gerçekleştirme davranışlarını periyodik olmayan karmaşık gezinmelerin takibi sırasında gerçekleştirmeleri istenmektedir. Karmaşık referans gezinmelerin elde edilebilmesi için [39] çalışmasında ele alınan yöntemden esinlenilerek anahtarlamalı dış sistemler kullanılmaktadır. Bu bölümde elde edilen sonuçların bir kısmı [46] çalışmasında sunulmuştur.

5.1. Problem Tanımı

Klasik çıktı denetimi yönteminde sistemlerin takip etmesi istenen referans gezinmelerin marjinal kararlı dış sistemler tarafından üretildiği varsayılmaktadır. Bu sistemlerin yalnızca sabit ve periyodik sinyaller üretebilmesinden dolayı yöntem klasik haliyle kullanıldığında yalnızca sabit ve periyodik referans gezinmelerin takibi sağlanabilmektedir. Bu bölümde, bahsedilen kısıtı ortadan kaldırarak daha karmaşık gezinmelerin takibi problemi ele alınmıştır. Daha karmaşık gezinmeler ise referans sinyalleri oluşturan marjinal kararlı sistemler arasında anahtarlama yapılarak elde edilmiştir.

Referans sinyalleri üreten anahtarlamalı dış sistemler

$$\begin{aligned}\dot{s} &= g_{vl}^p(\sigma^p)s \\ y_{vl} &= c_{vl}^p s\end{aligned}\tag{5.1}$$

dinamik denklemlerle gösterilebilir. Bu denklemde σ^p bilinmeyen parametreleri, p ise anahtarlama anlarına ait indeks dizisini ifade etmektedir. Her indekse ait dış sistemin marjinal kararlı olması gerekmektedir. Her indekse ait sistem belli bir zaman aralığı boyunca etkin olmaktadır. i 'nci erkine etkiyen toplam dış kaynakları girdileri üreten

dış sistemlerin dinamik ifadesi

$$\dot{s}_i = g_i^p(\sigma_i^p) s_i = \begin{bmatrix} g_{vl}^p(\sigma^p) & 0 \\ 0 & g_{\mu_i}(\eta_i) \end{bmatrix} s_i \quad (5.2)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada $s_i = [s, \mu_i]$ sistemin durumunu, $\sigma_i^p = [\sigma^p, \eta_i]$ ise sistemin bilinmeyen parametrelerini göstermektedir. Denetleyici tasarımı sırasında elde edilen bütün eşitliklerin de anahtarlama indekslerine göre yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Buna göre problemin çözülebilir olması için sağlanması gereken koşullar

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_i(s_i, \omega_i)}{\partial s_i} g_i^p(s_i) &= f_i(\pi_i(s_i, \omega_i), s_i, \omega_i, c_i(s_i, \omega_i)) \\ y_i &= q_i(s_i, \omega_i), 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (5.3)$$

şeklinde olurken, dinamikler normal forma dönüştürüldüğünde ifade edilen koşullar p indisine bağlı şekilde tanımlandığında

$$\begin{aligned} \vartheta_{i1} &= q_i \\ \vartheta_{ij} &= \frac{\partial \vartheta_{i(j-1)}}{\partial s_i} g_i^p(\sigma_i^p) s_i \\ &= L_{\dot{s}_i} \vartheta_{i(j-1)}, j = 2, \dots, r_i \\ \frac{\partial \vartheta_{ir_i}}{\partial s_i} g_i^p(\sigma_i^p) s_i &= f_{ir_i}(\zeta_i, \vartheta_i, s_i, \omega_i) + b_i(\chi_i, x_i, \omega_i) c_i \\ \frac{\partial \zeta_i}{\partial s_i} g_i^p(\sigma_i^p) s_i &= f_{i0}(\zeta_i, \vartheta_i, s_i, \omega_i, c_i) \end{aligned} \quad (5.4)$$

halini alır. Bölüm 2’de tanımlanan Varsayım 1 ve Varsayım 2 de indislere bağlı şekilde ifade edildiğinde, marjinal kararlı

$$\begin{aligned} \dot{s}_i &= g_i^p(\sigma_i^p) s_i, \\ u_i &= c_i(s_i, \omega_i), 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (5.5)$$

dış sistemleriyle aynı çıktıları üreten, lineer ve gözlenebilir iç modeller

$$\begin{aligned}\dot{\xi}_i &= \Phi_i(\sigma_i^p)\xi_i, \\ u_i &= \Gamma_i\xi_i, 1 \leq i \leq N\end{aligned}\tag{5.6}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu iç modeller parametrik biçimde ifade edildikten sonra ise p indisine bağlı olarak her j boyutu için diğer bir ifadeyle her j girdi-çıkıtı kanalında

$$\begin{aligned}\dot{\xi}_{ij} &= (F_i + G_i\Psi_i(\sigma_i^p))\xi_{ij}, \\ u_{ij} &= \Psi_i(\sigma_i^p)\xi_{ij}, 1 \leq i \leq N\end{aligned}\tag{5.7}$$

denklemleriyle gösterilebilir. $\Psi_i(\sigma_i^p)$ matrisinin $\Psi_{i0}(\sigma_i^p)$ başlangıç değerleri parametrelerin temel değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır ve gerçek $\Psi_i(\sigma_i^p)$ değerleri tahmin edilmektedir. Denetleyici ifadesinde $\Psi_i(\sigma_i^p)$ tahminleri $\hat{\Psi}_i$ ile gösterilmektedir. Denetleyici denklemleri ise Bölüm 2'de (2.17) ve (2.19) denklemlerindeki gibidir.

Dış sistemler arası anahtarlama iki şekilde yapılabilir. İlk durum anahtarlamamın benzer sistemler arasında olduğu durumdur. Bu durumda denetleyiciyi anahtarlamaya gerek yoktur çünkü uyarlanır denetleyici parametrelerini otomatik olarak güncelleyecektir. Bu durumda anahtarlama zamanının önceden bilinmesine gerek yoktur. Ancak anahtarlama yapısal olarak farklı dış sistemler arasında gerçekleşiyorsa (farklı boyutlara sahip dış sistemler gibi) istenen dizilim ve gezinge takibi görevlerinin gerçekleştirilebilmesi için iç modelin de uygun şekilde anahtarlanması gerekmektedir. Bu durumda iç modelin uygun anlarda anahtarlanabilmesi için anahtarlama zamanının önceden bilinmesi ve iç modelin de aynı anda değiştirilmesi gerekmektedir.

5.2. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde referans gezinge anahtarlmalı dış sistemler tarafından üretildiğinde dizilim oluşturma, değiştirme ve yol takibi probleminin Bölüm 2'de anlatılan yöntem kullanılarak çözümüne ilişkin benzetim sonuçları sunulacaktır. Bu benzetim hedef bir cismin yakalanmayı engellemek için dinamiklerini belirli zamanlarda anahtarladığı bir uygulamayı modelleyebilir.

Erkin dinamikleri bir önceki bölümde benzetim sonuçları kısmında kullanılan dinamiklerle aynıdır ve

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= d_i + \omega_i u_i \\ y_i &= x_i\end{aligned}\tag{5.8}$$

şeklindedir. $x_i \in \mathbb{R}^2$ i 'nci robotun pozisyonunu, $v_i \in \mathbb{R}^2$ hızını, $u_i \in \mathbb{R}^2$ denetim girdisini, $d_i \in \mathbb{R}^2$ i 'nci robot üzerine etkiyen periyodik bozucuları, ω_i sistemdeki bilinmeyen parametreleri göstermektedir. ω_i parametrelerinin değerleri sabittir ve her robot için $\{0 < \omega_i < 5\}$ kümesinden rastgele seçilmektedir. $d_i = [d_{i1}, d_{i2}]^\top$ periyodik bozucularının, özdeğerleri sanal eksen üzerinde bulunan ve bilinmeyen parametrelere sahip marjinal kararlı

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_{ij} \\ \dot{d}_{ij2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_j \\ \alpha_j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{ij} \\ d_{ij2} \end{bmatrix}$$

formunda sistemler tarafından üretildiği varsayılmaktadır. Diğer uygulamalarda olduğu gibi bu sistem rastgele başlangıç değerlerinden başlatılmıştır ve α sistemin bilinmeyen parametrelerini göstermektedir.

Anahtarlamanın benzer ve benzer olmayan sistemler arasında olduğu iki duruma ait benzetimler yapılmıştır. İlk olarak ele alınan durum anahtarlamanın benzer dış sistemler arasında olduğu durumdur. Çözüm yönteminde kullanılan uyarlanırlı algoritma sayesinde istenen görevin gerçekleştirilebilmesi için denetleyicide herhangi bir anahtarlama yapmaya gerek yoktur, kısa bir geçiş süresinden sonra denetleyici takip görevini başarıyla gerçekleştirebilmektedir. Sanal liderin dinamikleri tek eksende $p=1$ ve $p=2$ indisleri için

$$g_{vl}^1(\sigma) = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma_1 \\ \sigma_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad g_{vl}^2(\sigma) = \begin{bmatrix} 0 & \sigma_2 \\ -\sigma_2 & 0 \end{bmatrix},$$

ve $c_{vl} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$ şeklindedir. Daha karmaşık referans gezinimler farklı σ değerlerine sahip sistemlerin belirli sürelerle aktif olmasıyla elde edilebilmektedir.

Farklı dizilim görevlerinin gerçekleştirilebilmesi için μ_{i1} parametrelerinin değerlerini

ayarlanmasında

$$\begin{aligned}\dot{\bar{\mu}}_{i1} &= \bar{\alpha}_{i1}\bar{\mu}_{i2} \\ \dot{\bar{\mu}}_{i2} &= \varpi_{i1}\end{aligned}\tag{5.9}$$

sistemi kullanılmıştır. Dizilim görevlerini gerçekleştirmek için kullanılan senaryo bu benzetimlerde de aynıdır. Her bir dizilim görevinin gerçekleştirilmesi için harcanan süre iki saniyedir. Görev başlamadan önce ϖ_{i1} parametrelerinin değerleri 0, görevin ilk bir saniyesi boyunca 1 ve görevin son bir saniyesi boyunca ise -1 olarak ayarlanmıştır. Görev bittikten sonra değerleri yeniden 0'a atanmıştır. Aynı şekilde istenen görevin t_1 anında başlayıp $t_1 + 2$ anında bittiği varsayılarak $\bar{\alpha}_{i1}$ parametresi hesaplandığında

$$\bar{\alpha}_{i1} = \bar{\mu}_{i1}(t_1 + 2) - \bar{\mu}_{i1}(t_1)$$

elde edilir. μ_{i2} parametre değerlerinin ayarlanması için ise

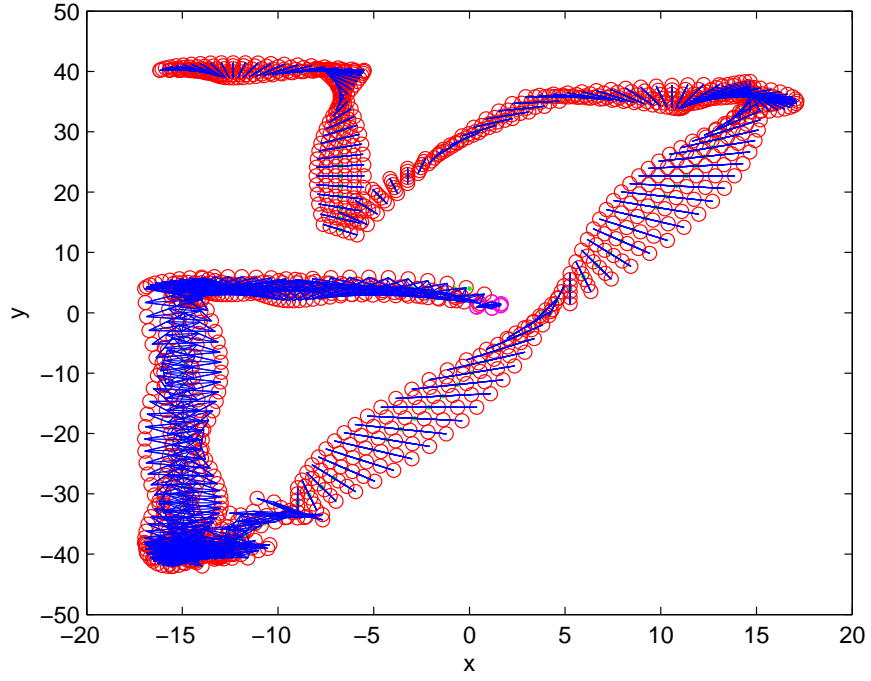
$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\mu}}_{i1} \\ \dot{\tilde{\mu}}_{i2} \\ \dot{\tilde{\mu}}_{i3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \tilde{\alpha}_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{i2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mu}_{i1} \\ \tilde{\mu}_{i2} \\ \tilde{\mu}_{i3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \varpi_{i2} \\ \mu_{i2} &= \tilde{\mu}_{i1}\end{aligned}$$

sistemi kullanılmıştır. Buradan $\tilde{\alpha}_{i2}$ ve $\tilde{\beta}_{i2}$ değerleri hesaplandığında

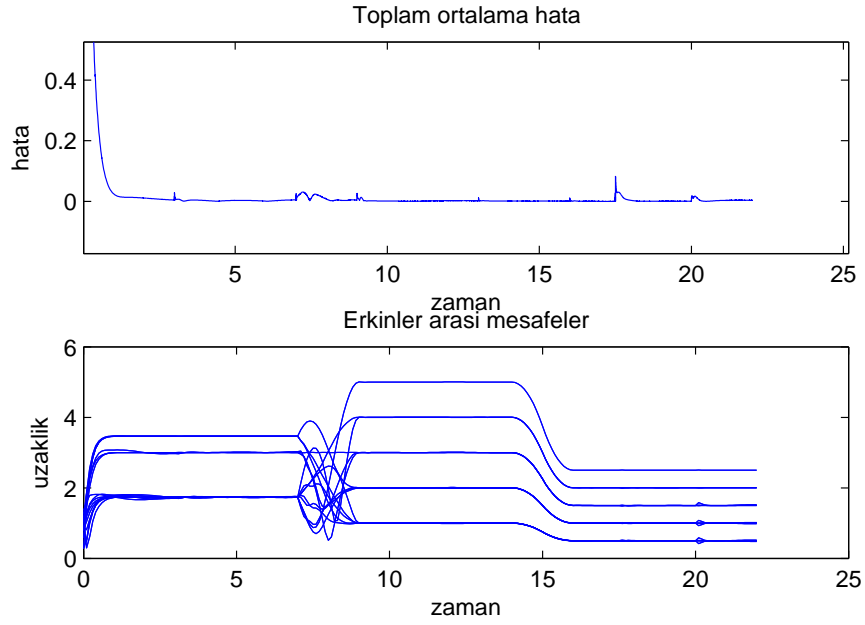
$$\begin{aligned}\tilde{\beta}_{i2} &= \tilde{\mu}_{i2}(t_1 + 2) - \tilde{\mu}_{i2}(t_1) \\ \tilde{\alpha}_{i2} &= \frac{\tilde{\mu}_{i1}(t_1 + 2) - \tilde{\mu}_{i1}(t_1)}{4\tilde{\beta}_{i2}/3 + 2\tilde{\mu}_{i2}(t_1)}\end{aligned}\tag{5.10}$$

şeklinde elde edilir.

Bu benzetimde robotların sanal liderin etrafında dizilim oluşturması ve referans gezeinge boyunca sanal liderin etrafında dönerek ilerlemeleri istenmektedir. Robotların $t = 7$ 'nci saniyede üçgen dizilimden çizgi dizilime geçmeleri, $t = 14$ 'üncü saniyede ise daralma görevi gerçekleştirmeleri gerekmektedir. $t = 7$ ve



Şekil 5.1. 22 saniye süresince sistem cevabı.



Şekil 5.2. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.

$t = 9$ saniyeleri arasında gerçekleşen dizilimi yeniden oluşturma görevi için

$\tilde{\alpha}_{i2}$ parametresinin değerleri $-3.5, -2.8333, -4.1667, -4.1667, -4.8333, -5.5$ olarak hesaplanmıştır. Sürekli bir dönme hareketi istendiği için $\tilde{\mu}_{i2}$ parametresinin başlangıç değeri $\pi/2$ olarak ayarlanmış ve $\tilde{\alpha}_{i2}$ değerleri de bu hareketi sürekli olarak sağlayacak şekilde hesaplanmıştır. $t = 14$ saniyesinde başlayan daralma hareketini gerçekleştirmek için $\bar{\alpha}_{i1}$ parametresinin değerleri $\bar{\alpha}_1 = [-0.25, -0.75, -1.25, -0.25, -0.75, -1.25]$ olarak hesaplanmıştır. Dizilimin boyutunun başlangıçtaki boyutunun yarısına küçülmesi istenmektedir. 6 boyutlu bir iç model kullanılmıştır ve $a_{i0}(\sigma_i), a_{i1}(\sigma_i), \dots, a_{i5}(\sigma_i)$ parametrelerinin değerleri sırasıyla $-39.4784, 0, -53.3480, 0, -14.8696, 0$ olarak hesaplanmıştır. F_i matrisi karakteristik polinomunun kökleri $\{-9, -10, -11, -12, -13, -14\}$ noktalarında olacak şekilde seçilmiştir. İç model parametrik biçimde ifade edildikten sonra F_i, G_i ve $\Psi_{i0}(\sigma)$ matrisleri her robot için

$$F_i = \begin{bmatrix} -47.11 & 27.75 & -10.21 & 3.90 & -1.16 & -0.26 \\ -27.75 & -3.32 & 6.16 & -1.51 & 0.48 & 0.10 \\ -10.21 & -6.16 & -6.50 & 5.26 & -1.32 & -0.30 \\ -3.90 & -1.51 & -5.26 & -4.74 & 3.21 & 0.63 \\ -1.16 & -0.48 & -1.32 & -3.21 & -4.16 & -1.99 \\ 0.26 & 0.10 & 0.30 & 0.63 & 1.99 & -3.15 \end{bmatrix}, G_i = \begin{bmatrix} 8.37 \\ 1.43 \\ 1.00 \\ 0.34 \\ 0.10 \\ -0.02 \end{bmatrix}$$

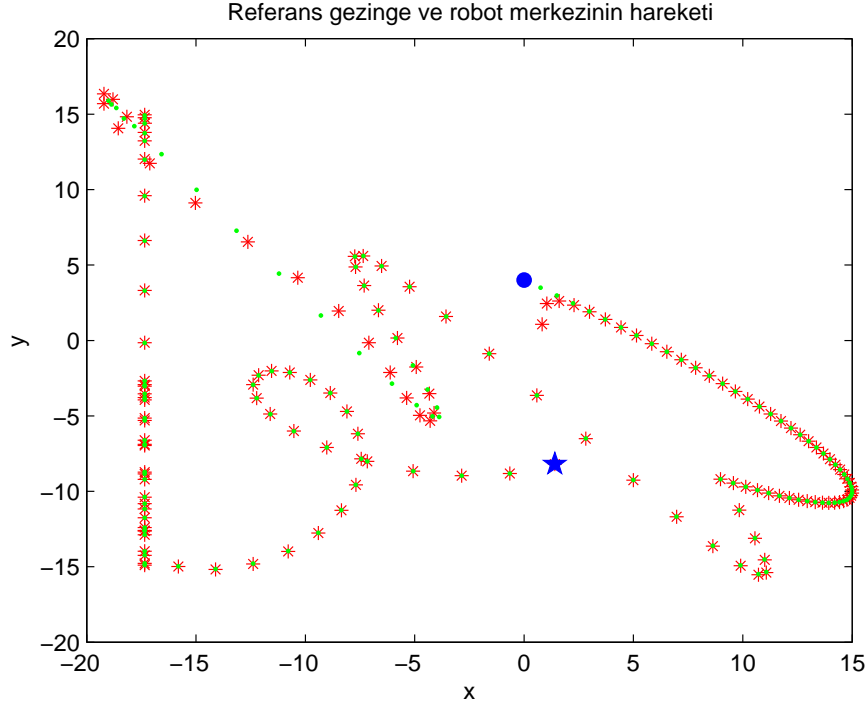
ve

$$\Psi_{i0}(\sigma_i) = \begin{bmatrix} 8.37 & -1.43 & 1.00 & -0.34 & 0.10 & 0.02 \end{bmatrix}$$

şeklinde elde edilmiştir. Benzetim sonuçları verilirken yalnızca yüksek kazançlı gözleyiciye ait sonuçlar sunulacaktır. Yüksek kazançlı gözleyicinin g_i parametresi 50, c_{i0} ve c_{i1} katsayılarının değerleri ise $p_{ic}(\lambda)$ polinomlarının kökleri $\{-12, -13\}$ 'de olacak şekilde seçilmiştir. $k_i, b_{i0}, K_i, \gamma_i$ ve l_i parametrelerinin değerleri her erkin için sırasıyla 10, 0.5, 300, 1 ve 10 olarak seçilmiştir.

şekil 5.1. 22 saniye hareket süresi boyunca robotların gezingesini göstermektedir. Robotlar dairelerle gösterilmektedir ve şekilden de görülebileceği üzere robotlar periyodik olmayan bir referans yolun takibini gerçekleştirmişlerdir. şekil 5.2. ise toplam ortalama hatanın ve erkinler arası mesafelerin zaman içindeki değişimini göstermektedir. Hata grafiği değerlerin daha iyi görülmesi için y ekseninde $0 - 0.5$ aralığında yakınlıştırılmıştır. $t = 7$ ve $t = 14$ saniyelerindeki dizilim görevleri hatada herhangi bir artışa sebep olmadan gerçekleşirken, sanal lider dinamiklerinin anahtarlandığı anlarda hatada küçük artışlar meydana gelmiştir. Uyarlanır algoritma sayesinde hatanın kısa sürede sıfıra yakınsaması sağlanmıştır. Anahtarlama benzer

dış sistemler arasında gerçekleştiğinden denetleyicide herhangi bir anahtarlama ya da denetleyici parametrelerinde herhangi bir değişim yapılmadan istenen görev başarıyla tamamlanmıştır.



Şekil 5.3. 15 saniye boyunca sistem cevabı.

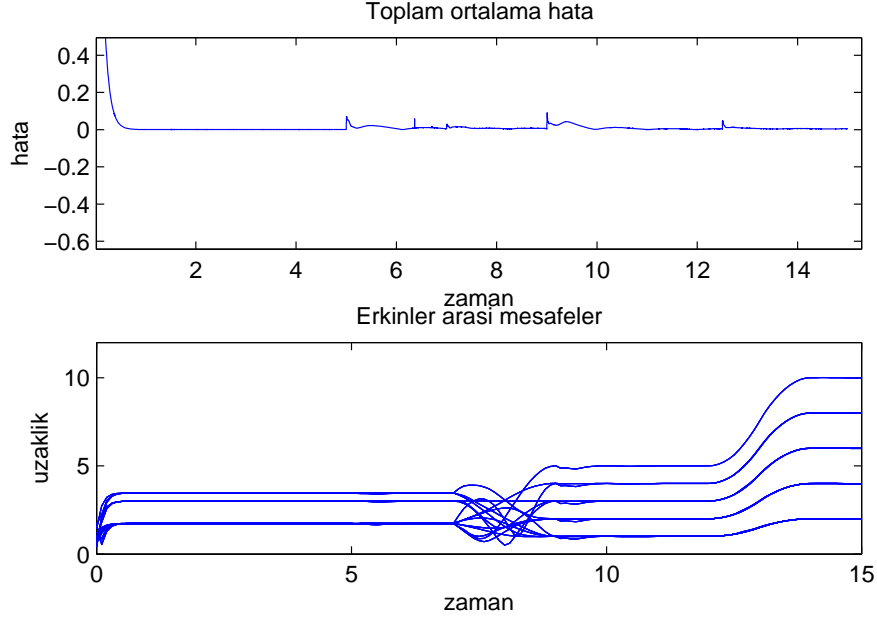
Ele alınan ikinci durumda ise anahtarlamanın yapısal olarak büyük farklılıklara sahip sistemler arasında gerçekleştiği durumdur. Bu durumda iç modelin dolayısıyla denetleyicinin de anahtarlması gerekmektedir. Sanal liderin dinamiklerindeki matrisler tek ekseninde $p=1$ ve $p=2$ indisleri için

$$g_{vl}^1(\sigma) = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma_1 \\ \sigma_1 & 0 \end{bmatrix}, c_{vl} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ve

$$g_{vl}^2(\sigma) = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma_2 & 0 & 0 \\ \sigma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sigma_3 \\ 0 & 0 & \sigma_3 & 0 \end{bmatrix}, c_{vl} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

şeklinde gösterilebilir. Referans gezinge 1 indisli sistem tarafından üretildiği zaman 4 boyutlu bir iç model kullanılmıştır. Referans gezinge $t = 5$ 'inci saniyeden sonra



Şekil 5.4. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.

indisi 2 olan sistem tarafından üretilmeye başlanmış ve bu saniyeden sonra 6 boyutlu bir iç model kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan yüksek kazançlı gözleyicinin parametreleri bir önceki durumla aynıdır. Ayrıca genişleme/daralma, dizilimi yeniden oluşturma gibi görevler için de bir önceki durumla aynı sistemler kullanılmıştır. k_i , b_{i0} , K_i , γ_i , g_i ve l_i parametrelerinin değerleri sırasıyla 10, 1, 300, 2, 50 ve 10 olarak seçilmiştir.

Şekil 5.3. referans gezingeyi ve robotların merkezlerinin hareketini göstermektedir. Referans yolun başlangıcı noktayla, bitişi ise yıldızla gösterilmiştir. Bu durumda diğer duruma göre daha karmaşık referans gezinmeler elde edilebilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi robotların merkezi referans yolu takip etmiştir. Şekil 5.4. ise hatanın ve robotlar arası uzaklıkların zaman içindeki değişimini göstermektedir. Hata grafiğinde değerlerin daha iyi görülebilmesi için y eksenini $0 - 0.5$ aralığında yakınlaştırılmıştır. Sanal lider dinamiklerinin anahtarlandığı anlarda hatada küçük artışlar görülmüş ancak kısa sürede sifıra yakınsamıştır. Değişik dizilim görevleri için (4.2) ve (4.4) formundaki sistemler kullanıldığından $t = 7$ zamanında başlayan yeniden dizilim ve $t = 12$ anında başlayan genişleme görevleri boyunca hatada herhangi bir artış gözlenmemiştir.

BÖLÜM 6

6. DAĞITIK UZLAŞMA

Bu bölümde erkinler arasında değişik komşuluk yapıları tanımlanarak dağıtık uzlaşma problemi ele alınmıştır. Dağıtık uzlaşma probleminde erkinlerin rastgele konumlardan başlayarak ve sadece komşusu olan erkinlerden bilgi alarak veya kısacası sadece yerel bilgi kullanarak bütünsel bilgiye sahip olmadan aynı çıktıya ulaşmaları istenmektedir. Bu durum ele alınan sistemde erkinlerin aynı noktada toplanmaları ve sonrasında aynı yöne doğru hareket etmeleri anlamına gelmektedir. Erkinler arasında tanımlanan komşuluk ilişkilerine göre komşuluklar sabit olabileceği gibi zamanla değişken de olabilir. Diğer bir ifadeyle bir zaman aralığında komşu olan iki erkin, başka bir zaman aralığında komşu olmayabilirler. Komşulukların belirlenmesi için çember, bütünsel, en yakın komşular ve rastgele belirleme yapıları kullanılmıştır. Problemin çözümü için Bölüm 2’de anlatılan uyarlamalı iç model tabanlı çıktı denetimi yöntemi kullanılmış ve yöntemin etkinliği farklı komşuluk yapıları için sayısal benzetimlerle sınanmıştır.

6.1. Problem Tanımı

Dağıtık uzlaşma problemi erkin çıktılarının aynı noktada birleşmesi ve erkinlerin toplu olarak bir güzergahı takip etmesi diğer bir ifadeyle bir senkronizasyon problemidir. Bu problemde önemli olan nokta robotların birleştiği noktanın ve birleştikten sonra toplu olarak izleyecekleri güzergahın önceden belirli olmamasıdır. Erkinlerin bir araya geldikleri nokta ve izledikleri yol erkinlerin harekete başladıkları noktalara ve komşuluk yapısına göre değişmektedir.

Dağıtık uzlaşma probleminin çözümü için erkin dinamikleri (2.1) ile ifade edilen çok erkinli bir sistem sınıfında denetim girdileri öyle tasarlanmalıdır ki erkin çıktıları

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y_i(t) - y_j(t)\| = 0, 1 \leq i, j \leq N \quad (6.1)$$

eşitliğini sağlasın. Bu eşitlik sağlandığı zaman i 'nci erkinin çıktısının

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_i(t) = \phi(t), 1 \leq i, j \leq N \quad (6.2)$$

eşitliğine göre izlediği $\phi(t)$ gezinesine senkron gezege ya da uzlaşma gezinesi¹ adı verilir [48, 49].

Geçmiş bölümlerde erkinler için hata ifadesi tanımlanırken erkinlerin sanal lidere göre göreceli konumları kullanılmıştır. Bu bölümde diğerlerinden farklı olarak, erkinlerin hatası sanal lidere göre değil erkinler arasındaki komşuluk ilişkilerine göre belirlenmektedir. Çünkü az önce de belirtildiği gibi dağıtık uzlaşma probleminde önceden tanımlanmış bilinen bir referans gezege yoktur. Bu durumda i 'nci erkin için hata ifadesi

$$e_i = \sum_{j=1}^N k_{i,j}(y_i - y_j) \quad (6.3)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu ifadede $k_{i,j}$ erkinler arasındaki komşuluk yapısına bağlı olarak belirlenen bir katsayıdır. Robotlar arasında bu şekildeki bir karşılıklı etkileşim yönlü çizgelerle ifade edilebilir. Yönlü bir çizge sıralı (N, ε) çiftlerinden oluşur. $N = 1, \dots, N$ düğümlerinin her biri sistemdeki bir erkini ifade ederken $\varepsilon \subset N \times N$ çizgedeki sıralı düğümlerden oluşmakta ve erkinler arasındaki bilgi akışını ifade etmektedir. Örneğin (i, j) çiftinde j erkininden i erkinine bilgi akışı oluyorsa bu düğümler komşudur ve $(i, j) \in \varepsilon$ şeklinde ifade edilebilir, buna ek olarak (i, j) çiftinde i düğümü ebeveyn düğüm² olarak isimlendirilirken j düğümüne çocuk düğüm³ olarak isimlendirilir [50]. Çizgedeki bilgi akışı ise düğümlerin komşuluk durumlarına göre belirlenmektedir. Yönlü bir çizge K komşuluk matrisi ile

$$K = [k_{i,j}], k_{i,j} = \begin{cases} 1 & (i,j) \text{ komşu ise} \\ 0 & (i,j) \text{ komşu değil ise} \end{cases}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Erkinler arasındaki komşuluk yapısının belirlenmesi için ise çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmada çember, bütünsel, en yakın komşular ve rastgele belirleme komşuluk yapıları kullanılmıştır. Kullanılan yapıya göre erkinler arasında tek yönlü ve çift yönlü komşuluklar olabilir. Çift yönlü komşuluk yapısında erkinler arasında karşılıklı olarak bilgi alışverişi yapılabilirken, tek yönlü komşuluk yapısında bilgi alışverişi de tek yönlüdür.

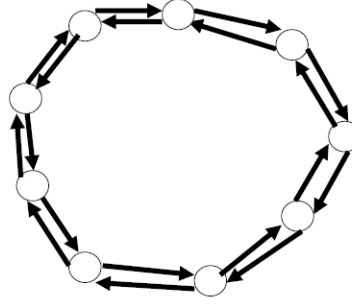
¹ing: synchronous/consensus trajectory

²ing: parent node

³ing: child node

6.2. Çember Komşuluk Yapısı

Çember komşuluk yapısı zaman içinde değişmeyen, sabit komşuluk yapılarından biridir. Bu komşuluk yapısı erkinler göreve başlamadan önce tanımlanır ve görev boyunca da sabit kalır. Erkinler arasındaki komşuluklar bu şekilde tanımlandığında bilgi akışının herhangi bir dış etkiden etkilenmediği varsayılmaktadır. Çember komşuluk yapısında her erkinin iki adet komşusu vardır. Erkinlerin $i = 1$ 'den N 'e kadar etiketlendiğini varsayarsak her erkin kendinden bir önceki ve bir sonraki etikete sahip erkinle komşudur ve bu erkinlerle arasında bilgi akışı gerçekleşebilmektedir. Çember komşuluk yapısı Şekil 6.1. 'de gösterildiği gibidir. i 'nci etikete sahip olan



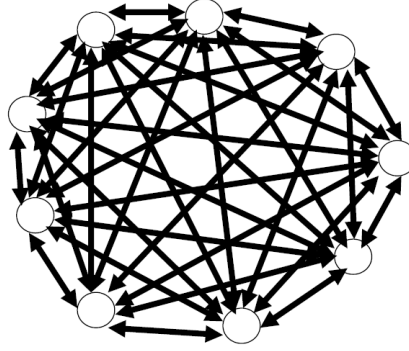
Şekil 6.1. Çember komşuluk yapısı (Şekil, [1]'den alınmıştır).

erkin $i + 1$ 'inci ve $i - 1$ 'inci etiketlere sahip olan erkinlerle komşudur ve bu erkinlerle bilgi alışverişi yapabilmektedir. Her erkin bilgi aldığı erkinlere kendi bilgilerini de göndermektedir. Yani çember komşuluk yapısı çift yönlü bir komşuluk yapısıdır.

6.3. Bütünsel Komşuluk Yapısı

Bütünsel komşuluk yapısı da çember komşuluk yapısına benzer olarak zaman içinde değişmeyen komşuluk yapılarından biridir. Bütünsel komşuluk yapısında bütün erkinler birbirinin komşusudur yani her robottan her robota bilgi akışı vardır. Bütünsel komşuluk yapısı Şekil 6.2. 'de gösterildiği gibidir.

Şekilden görülebileceği gibi her erkin ile diğer bütün erkinler arasında bağlantı vardır yani komşudurlar ve aralarında bilgi paylaşımı gerçekleşmektedir. Bütünsel komşuluk yapısı da çift yönlü bir komşuluk yapısıdır.



Şekil 6.2. Bütünsel komşuluk yapısı (Şekil, [1]'den alınmıştır).

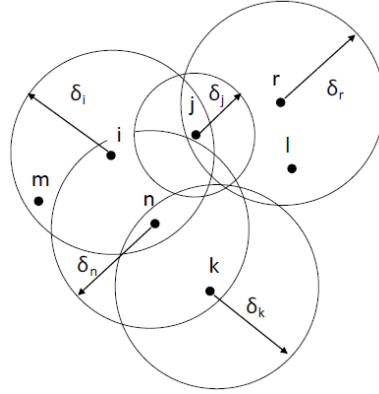
6.4. En Yakın Komşular

En yakın komşular yaklaşımı diğer iki komşuluk yapısından farklı olarak zaman içinde değişen, dinamik bir komşuluk belirleme yöntemidir. Bu yöntem robotlar arasındaki mesafelere göre belirlenmektedir. Bu yöntemde her erkinin bir haberleşme alanına sahip olduğu ve sadece bu haberleşme alanının içinde bulunan erkinler ile haberleşebildiği varsayılmaktadır. Erkinin haberleşebildiği erkinler komşuları olarak düşünülmektedir. i 'nci erkinin haberleşme alanı yarıçapı $\delta_i > 0$ olduğu düşünülürse, matematiksel olarak t zamanında i 'nci erkinin komşuluğu

$$N_i(t) = \{j, j \neq i \mid \|x_i(t) - x_j(t)\| \leq \delta_i\} \quad (6.4)$$

şeklinde tanımlanabilir [51].

Bu yöntem Şekil 6.3. 'teki gibi gösterilebilir. δ_i parametresi sistemdeki bütün erkinler için aynı değere sahip olmayabilir. Bazı erkinler daha yakın mesafelerde birbirleriyle haberleşebilirken, bazıları daha uzak mesafelerdeki erkinlerle de haberleşebilmektedirler. δ_i parametresinin değeri bütün erkinler için aynı ise erkinler arasındaki komşuluk ilişkileri karşılıklıdır. Yani bir (i, j) çifti için i 'nci erkin j 'nci erkenden bilgi alabiliyorsa, tam tersi de gerçekleşebilmektedir. Ancak δ_i erkinlere göre farklılık gösteriyorsa bu ilişki karşılıklı olmayabilir, i 'nci robot j 'nci robottan bilgi alabiliyorken j 'nci robot i 'nci robottan bilgi alamayabilir. Bu yaklaşım robot uygulamalarında çember ve bütünsel komşuluk yapılarına göre daha gerçekçi bir yaklaşımdır.



Şekil 6.3. En yakın komşular yaklaşımı (Şekil, [1]'den alınmıştır).

6.5. Rastgele Komşuluk

Rastgele komşuluk yaklaşımı da en yakın komşular yaklaşımında olduğu gibi dinamik bir komşuluk belirleme yöntemidir. Bu yöntemde komşulukların belirlenmesi için olasılıksal bir eşik değer ϵ kullanılmaktadır ve bu değer bütün erkinler için aynıdır. Daha sonra her (i, j) erkin çifti için ϵ_{ij} rastgele sayısı üretilir ve bu değer eşik değerle kıyaslanması sonucunda (i, j) erkin çiftinin komşuluğu belirlenir. Bu komşuluk yönteminin matematiksel ifadesi

$$N_i(t) = \{j, j \neq i | \epsilon_{ij} < \epsilon\} \quad (6.5)$$

şeklinde [1]. Bu ifade aslında gerçek uygulamalarda rastgele oluşan herhangi bir komşuluk ilişkisi için matematiksel bir model göstermektedir. Ayrıca (i, j) erkin çifti için rastgele olarak atanan ϵ_{ij} değeri ϵ_{ji} değerinden bağımsız olduğu için komşuluk ilişkisi karşılıklı olmayabilir. Yani bir erkin diğerinden bilgi alabilirken, diğer erkin aynı bilgiyi alamayabilir.

Ele alınan bu problemlerin çözümü Bölüm 2'de anlatılan çıktı denetimi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Problemin çözümünün olabilmesi için bütün erkinlere ait kapalı çevrim sistemlerinin aynı çıktıları üreten iç modellere sahip olmaları gerekmektedir. [49] çalışmasında bütün gezinlerin aynı w limit kümesinde bulunan bazı gezinlerle zaman içerisinde çakışacağı varsayımı altında erkin çıktılarının

senkronizasyonu probleminin çözülebilir olduğu ve $1 \leq i \leq N$ için

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_i(t) = \phi(t)$$

eşitliğine göre

$$\dot{s} = g_*(s)$$

$$\phi = c_*(s)$$

şeklinde bir sistemin var olduğu gösterilmiştir. Bu sistem erkinlerin izleyeceği gezintileri üreten sanal bir dış sistemdir. Bu tanımlamalar yapıldıktan sonra Bölüm 1’de anlatılan uyarlamalı iç model tabanlı çıktı denetimi yöntemi kullanılarak ve Bölüm 2’de anlatılan denetleyici tasarımı yaklaşımı kullanılarak değişik komşuluk yapıları için dağıtık uzlaşma problemi çözülmüştür.

6.6. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde dağıtık uzlaşma problemini çözmek için kullanılan çıktı denetimi yönteminin problemin çözümü üzerinde etkinliğini doğrulamak için yapılan benzetim sonuçları sunulacaktır. Erkinler arasında değişik komşuluk yapılarının görevin başarımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Ele alınan sistem $N = 6$ erkinden oluşmaktadır. Erkinlerin dinamikleri diğer bölümlerde kullanıldığı gibi

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= d_i + \omega_i u_i \\ y_i &= x_i \end{aligned} \tag{6.6}$$

denklemleriyle ifade edilebilmektedir. $x_i \in \mathbb{R}^2$ i ’nci robotun pozisyonunu, $v_i \in \mathbb{R}^2$ hızını, $u_i \in \mathbb{R}^2$ denetim girdisini, $d_i \in \mathbb{R}^2$ i ’nci robot üzerine etkiyen periyodik bozucuları, ω_i sistemdeki bilinmeyen parametreleri göstermektedir. ω_i değer aralığı $\{0 < \omega_i < 5\}$ kümesi olan sabit parametreleri göstermektedir. $d_i = [d_{i1}, d_{i2}]^T$ bozucuları ise

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_{ij} \\ \dot{d}_{ij2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_j \\ \alpha_j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{ij} \\ d_{ij2} \end{bmatrix}$$

formundaki marjinal kararlı sistemler tarafından üretildiği varsayılan periyodik

bozucuları göstermektedir.

6.6.1. Çember Komşuluk Yapısı

İlk benzetim robotlar arasındaki komşuluklar çember komşuluk yapısına göre belirlendiği durum için yapılmıştır. Komşuluk matrisinin elemanlarını oluşturan $k_{i,j}$ değerleri çember komşuluk yapısına göre belirlenmektedir. Bu komşuluk yapısına göre her robot iki adet robotla bilgi alışverişi yapabildiğinden bu robota ait hata ifadesi hesaplanırken iki adet robottan elde edilen pozisyon bilgisi kullanılabilir. Buna göre i 'nci robot için hata ifadesi

$$e_i = \sum_{j=1}^N k_{i,j}(y_i - y_j) = (y_i - y_{i-1}) + (y_i - y_{i+1})$$

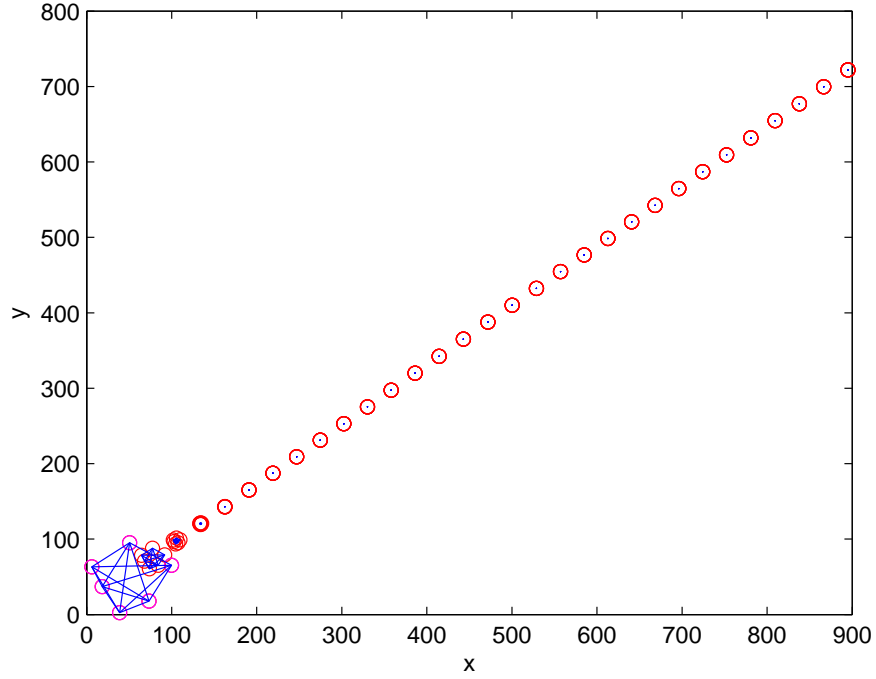
şeklinde gösterilebilir. Çember komşuluk yapısı zaman içinde değişmeyen bir komşuluk yapısı olduğundan her robotun bilgi aldığı robotlar benzetim boyunca sabit kalmaktadır. Erkinler hareketlerine rastgele konumlardan başlamaktadırlar. Robotların bu rastgele konumlardan başlayarak bir noktada toplanmaları ve hareketlerine bu şekilde devam etmeleri istenmektedir. Robotların toplanacağı nokta ve izleyecekleri yol önceden belirli olmadığı için iç model parametreleri de rastgele değerlerle hesaplanmaktadır. 4 boyutlu bir iç model kullanılmıştır. Yapılan benzetimde F_i matrisi karakteristik polinomunun kökleri $\{-9, -10, -11, -12\}$ noktalarında olacak şekilde seçilmiştir. İç model parametrik biçimde ifade edildikten sonra F_i , G_i ve $\Psi_{i0}(\sigma)$ matrisleri her robot için

$$F_i = \begin{bmatrix} -30.8373 & -16.7997 & 5.1667 & -1.2441 \\ 16.7997 & -3.0328 & 3.5109 & -0.6656 \\ 5.1667 & -3.5109 & -4.5081 & 2.1961 \\ 1.2441 & -0.6656 & -2.1961 & -3.6217 \end{bmatrix}, G_i = \begin{bmatrix} -6.5650 \\ 1.1904 \\ 0.5793 \\ 0.1320 \end{bmatrix}$$

ve

$$\Psi_{i0}(\sigma_i) = \begin{bmatrix} -6.5650 & -1.1904 & 0.5793 & -0.1320 \end{bmatrix}$$

şeklinde elde edilmiştir. Benzetim sonuçları verilirken yalnızca yüksek kazançlı gözleyiciye ait sonuçlar sunulacaktır. Yüksek kazançlı gözleyicinin g_i parametresi 100, c_{i0} ve c_{i1} katsayılarının değerleri ise $p_{ic}(\lambda)$ polinomlarının kökleri $\{-12, -13\}$ 'de olacak şekilde seçilmiştir. k_i , b_{i0} , K_i , γ_i ve l_i parametrelerinin değerleri her erkin için sırasıyla 5, 0.5, 100, 1 ve 10 olarak seçilmiştir.

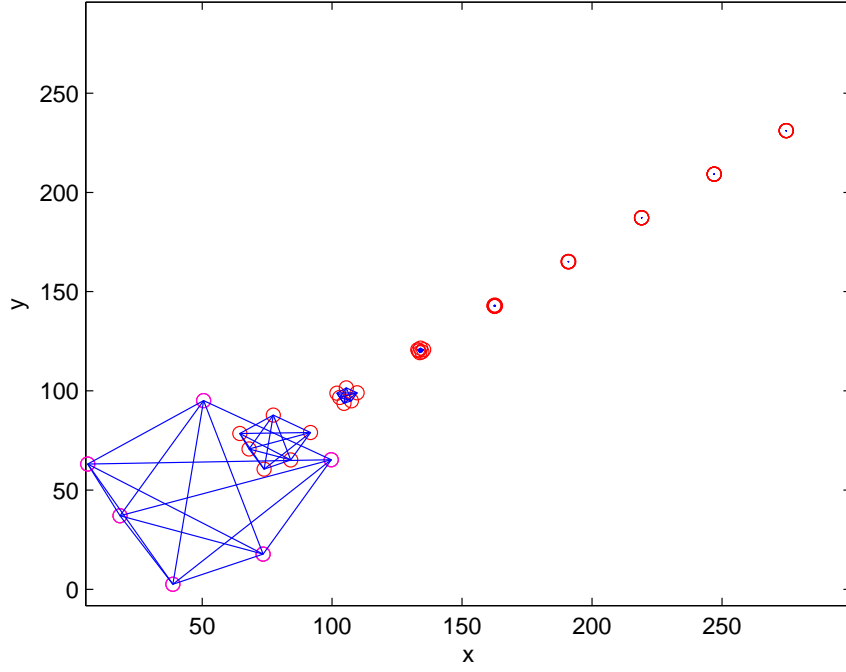


Şekil 6.4. 15 saniye süresince sistem cevabı.

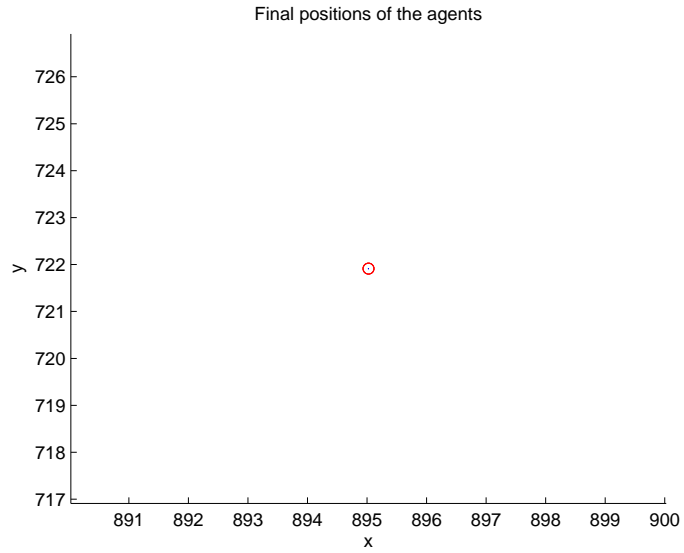
Şekil 6.4. 15 saniye boyunca robotların hareketlerini ve izledikleri yolları, Şekil 6.5. ise robotların hareketlerine ilk başladıkları zamanki konumlarını, hareketlerini ve izledikleri yolları daha yakından göstermektedir. Robotların pozisyonları halkalarla gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere robotlar harekete başladıktan kısa bir süre sonra toplanmışlar ve hareketlerine toplu olarak devam etmişlerdir. Robotların izlediği yol daha önceden belirli değildir ve kullanılan uyarlanabilir denetim tekniğinin parametreleri sürekli olarak güncellendiğinden farklı gezintiler elde edilebilmektedir. Şekil 6.6. robotların son konumunu göstermektedir. İstenilen şekilde bir noktada toplanmışlardır. Şekil 6.7. ise toplam ortalama hatanın ve robotlar arasındaki mesafenin zamana göre değişimini göstermektedir. Hata yaklaşık olarak 2 saniye içerisinde sifıra yakınsamaktadır. Robotlar arasındaki mesafe de yine 2 saniye içerisinde sifıra yakınsamış yani robotlar bir noktada toplanarak hareketlerine bu şekilde devam etmişlerdir.

6.6.2. Bütünsel Komşuluk Yapısı

Bu benzetimde robotlar arasındaki komşuluk yapısı bütünseldir yani bütün robotlar birbirleriyle bilgi alışverişi yapabilmektedir. Robotlar için hata ifadesi hesaplanırken

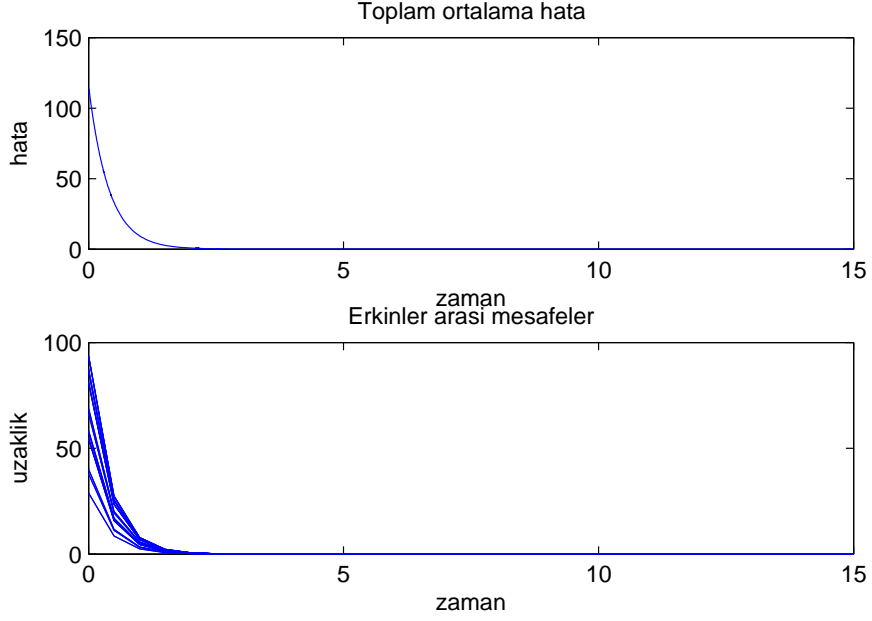


Şekil 6.5. Erkinlerin biraraya toplanıncaya kadar izledikleri yollar.



Şekil 6.6. Robotların son konumları.

6 robota ait pozisyon bilgisi de kullanılabilir. 4 boyutlu bir iç model kullanılmıştır. Rastgele parametre değerleri ile ayarlanan iç modelin parametrik



Şekil 6.7. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.

biçimde ifade edilmesi için kullanılan matrisler her robot için

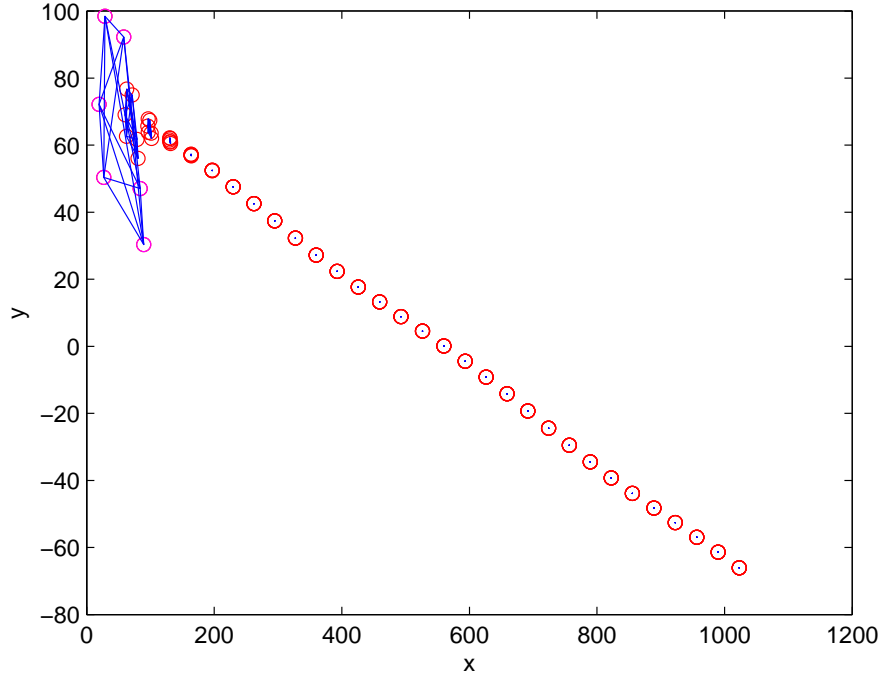
$$F_i = \begin{bmatrix} -30.8531 & -16.8096 & 5.1724 & -1.2515 \\ 16.8096 & -3.0413 & 3.5221 & -0.6705 \\ 5.1724 & -3.5221 & -4.5122 & 2.2111 \\ 1.2515 & -0.6705 & -2.2111 & -3.5934 \end{bmatrix}, G_i = \begin{bmatrix} -6.5651 \\ 1.1912 \\ 0.5796 \\ 0.1327 \end{bmatrix}$$

ve

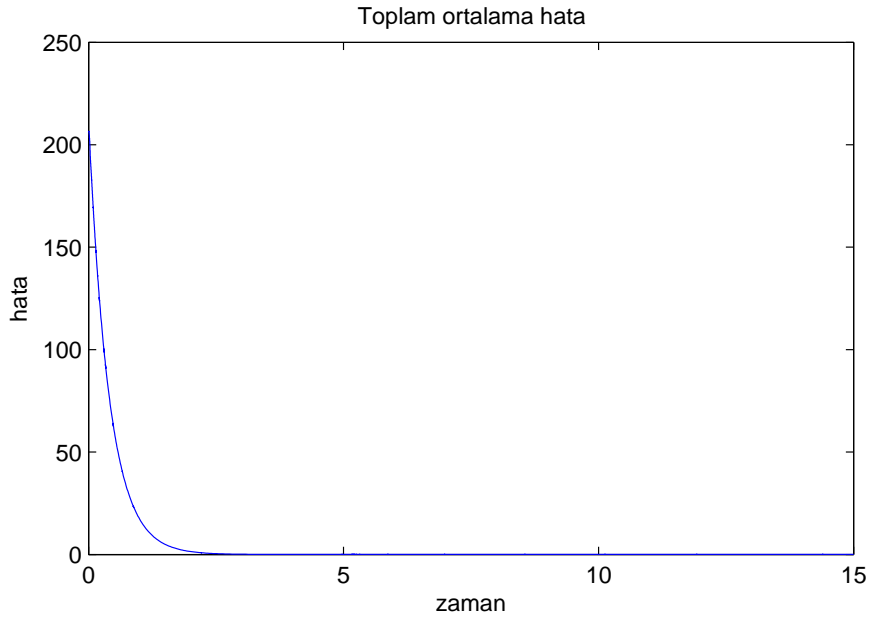
$$\Psi_{i0}(\sigma_i) = \begin{bmatrix} -6.5651 & -1.1912 & 0.5796 & -0.1327 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilmiştir. Yüksek kazançlı gözleyiciye ait katsayı ve parametre değerleri ile denetleyicide kullanılan parametrelerin değerleri bir önceki benzetimde kullanılan değerler ile aynıdır.

Şekil 6.8. robotların hareketleri boyunca takip ettikleri yolu göstermektedir. Robotlar rastgele başlangıç konumlarından başlayarak bir süre sonra aynı noktada toplanmışlardır. Daha sonra hareketlerine toplu halde devam etmişlerdir. Şekil 6.9. toplam ortalama hatayı göstermektedir. Hata kısa süre içinde sıfıra yakınsamıştır yani robotlar istenen davranışı gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 6.8. 15 saniye süresince sistem cevabı.

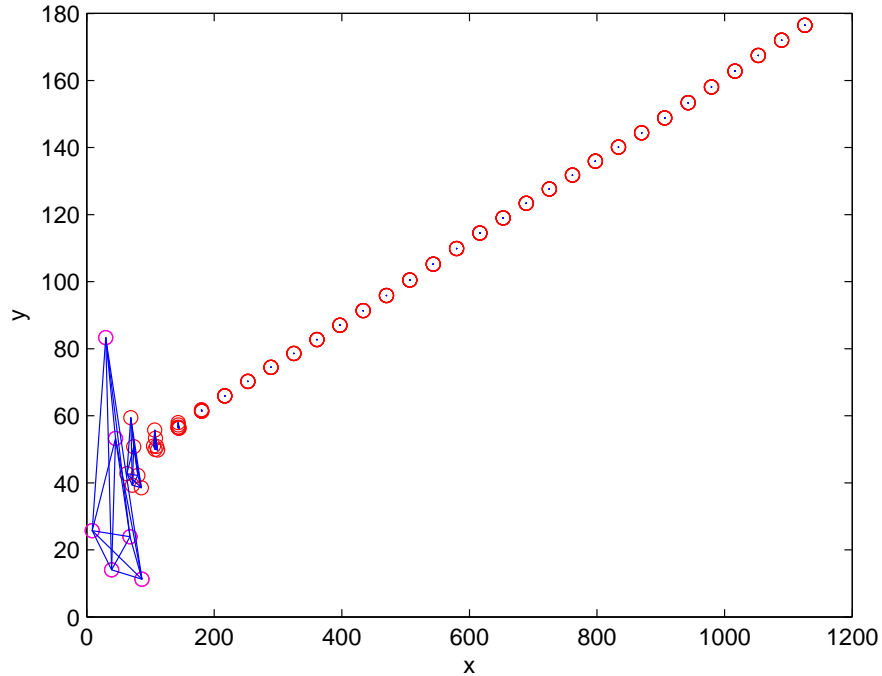


Şekil 6.9. (i) Toplam ortalama hata.

6.6.3. En Yakın Komşular

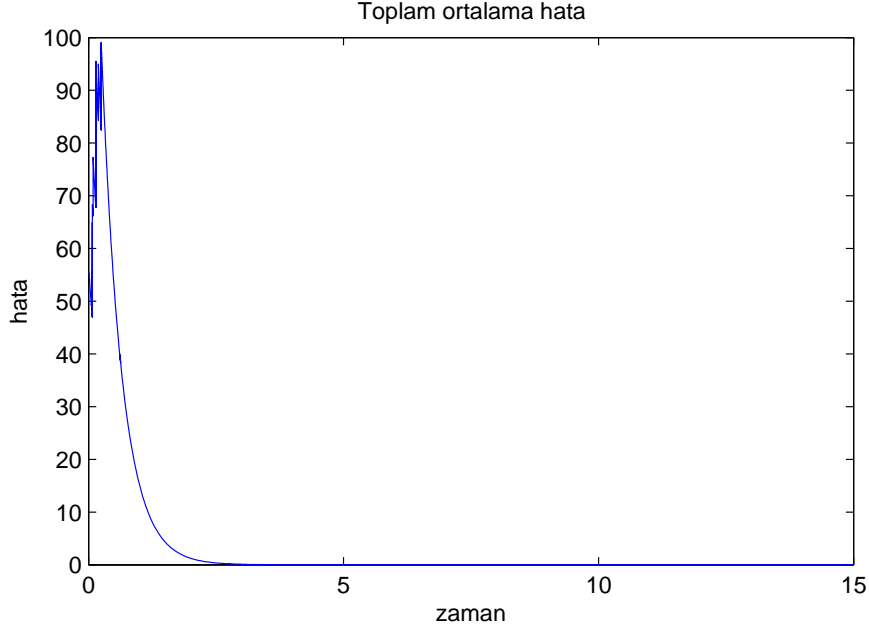
Bu bölümde robotlar arasındaki komşuluk yapısı en yakın komşular yaklaşımına göre belirlendiği durumda yapılan benzetim sonuçları sunulacaktır. Bu yöntemde

komşuluklar robotlar arasındaki mesafeye bağlı olarak belirlendiğinden benzetimin her adımında komşuluk matrisi güncellenmiş yani her adımda robotların bilgi alışverişi yapabildiği robotlar değişmiştir. Robotların hata ifadesi hesaplanırken farklı benzetim adımlarında farklı indise sahip ve farklı sayıdaki robotlardan elde edilen pozisyon bilgisi kullanılmıştır. Burada robotların bilgi alışverişi yapabileceği robot sayısını belirleyen parametre haberleşme alanı yarıçapı olan δ_i 'dir. Robotlar arasındaki mesafe bu değerden fazla olduğunda robotlar pozisyon bilgilerini diğer robotlara aktaramamaktadırlar. Yani robotların görevin başında aralarında bulunan mesafe yani başlangıç pozisyonları ve bu parametrenin değeri benzetimin başarısını büyük ölçüde etkilemektedir. Eğer başlangıçta robotlar hareketlerine birbirlerine çok uzak pozisyonlardan başlarsa ve bu parametre küçük bir değere sahipse robotlar birbirlerinin haberleşme yarıçapına girememiş olurlar ve aralarında bilgi alışverişi gerçekleşmez. Robotlar bireysel olarak hareket ettiklerinden aynı noktaya toplanamazlar ve istenen görev gerçekleştirilememiş olur. Tam tersine, robotlar çok yakın noktalardan harekete başlamışken bu parametrenin değeri büyük seçilirse bütün robotlar birbirleriyle haberleşebilir ve aralarında bütünsel komşuluk yapısı oluşabilir.



Şekil 6.10. 15 saniye süresince sistem cevabı.

İlk olarak yapılan benzetimde robotların başlangıç konumları $[0, 100]$ değer aralığından



Şekil 6.11. (i) Toplam ortalama hata.

rastgele seçilirken, haberleşme alanı yarıçapı bütün robotlar için $\delta_i = 50$ olarak seçilmiştir. 4 boyutlu bir iç model kullanılmıştır. F_i , G_i ve Ψ_{i0} matrisleri

$$F_i = \begin{bmatrix} -30.8640 & -16.8163 & 5.1763 & -1.2565 \\ 16.8163 & -3.0472 & 3.5300 & -0.6738 \\ 5.1763 & -3.5300 & -4.5146 & 2.2212 \\ 1.2565 & -0.6738 & -2.2212 & -3.5742 \end{bmatrix}, G_i = \begin{bmatrix} -6.5652 \\ 1.1917 \\ 0.5799 \\ 0.1332 \end{bmatrix}$$

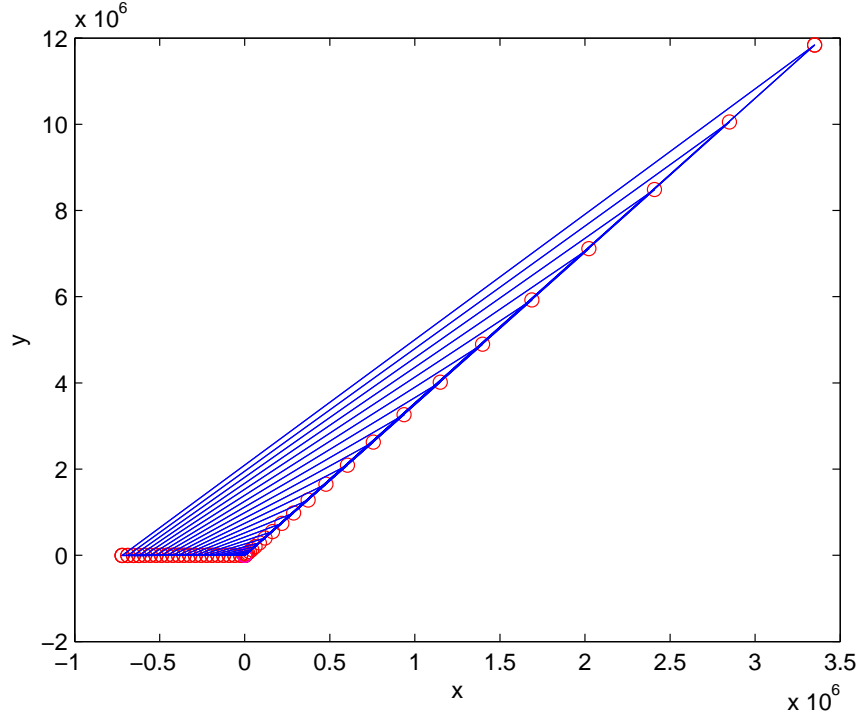
ve

$$\Psi_{i0}(\sigma_i) = \begin{bmatrix} -6.5652 & -1.1917 & 0.5799 & -0.1332 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilmiştir. Yüksek kazançlı gözleyiciye ait katsayı ve parametre değerleri ile denetleyicide kullanılan parametrelerin değerleri bir önceki benzetimde kullanılan değerler ile aynıdır.

Şekil 6.10. robotların hareketleri boyunca takip ettikleri yolu göstermektedir. Robotlar rastgele başlangıç konumlarından başladıktan sonra aynı noktada toplanmışlar ve hareketlerine bu şekilde devam etmişlerdir. Şekil 6.11. toplam ortalama hatayı göstermektedir. İstenen şekilde hata kısa süre içinde sıfıra yakınsamıştır.

Diğer bir benzetim ise robotların başlangıç konumları $[0, 100]$ değer aralığından rastgele seçilirken, haberleşme alanı yarıçapı bütün robotlar için $\delta_i = 30$ olarak



Şekil 6.12. 15 saniye süresince sistem cevabı.

seçildiği durum için yapılmıştır. F_i , G_i ve Ψ_{i0} matrisleri

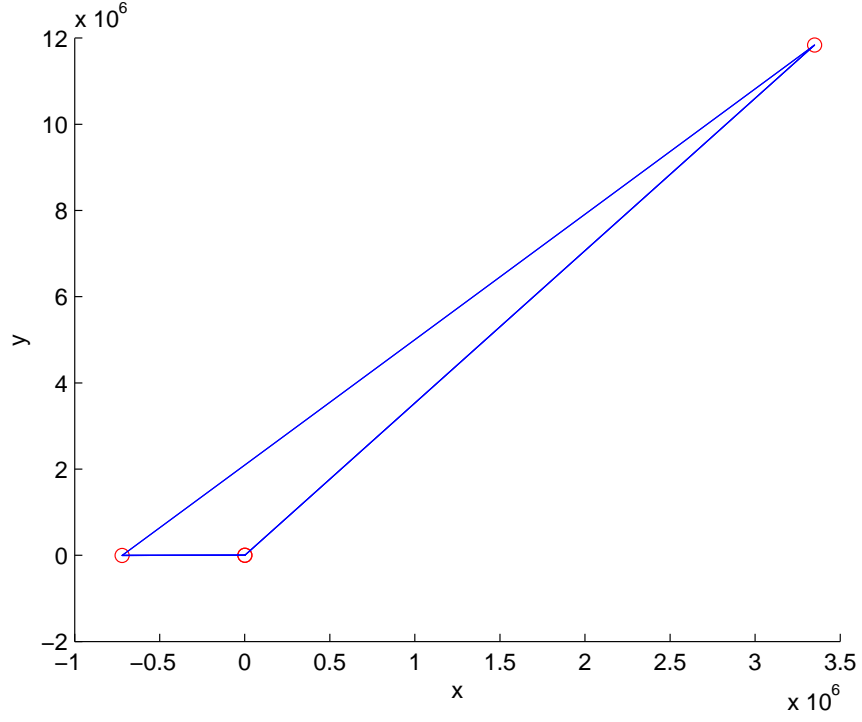
$$F_i = \begin{bmatrix} -30.8355 & -16.7986 & 5.1661 & -1.2433 \\ 16.7986 & -3.0319 & 3.5096 & -0.6651 \\ 5.1661 & -3.5096 & -4.5077 & 2.1944 \\ 1.2433 & -0.6651 & -2.1944 & -3.6249 \end{bmatrix}, G_i = \begin{bmatrix} -6.5650 \\ 1.1903 \\ 0.5792 \\ 0.1319 \end{bmatrix}$$

ve

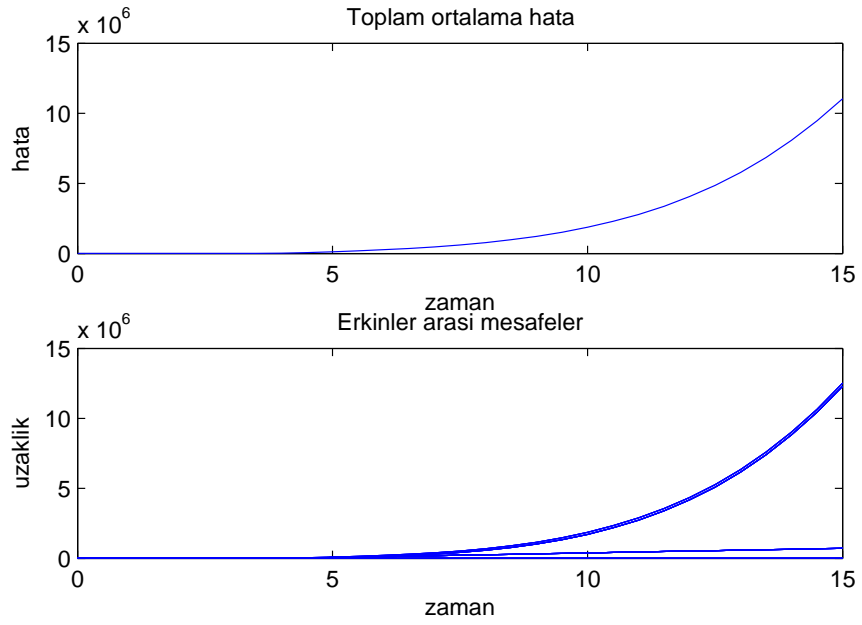
$$\Psi_{i0}(\sigma_i) = \begin{bmatrix} -6.5650 & -1.1903 & 0.5792 & -0.1319 \end{bmatrix}$$

değerlerine sahiptir. Yüksek kazançlı gözleyiciye ait katsayı ve parametre değerleri ile denetleyicide kullanılan parametrelerin değerleri diğer durumlarla aynıdır.

Şekil 6.12. robotların görevleri boyunca izledikleri yolları göstermektedir. Robotların haberleşme yarıçapları düşük olduğu için bilgi alabildikleri robot sayısı daha az olduğundan istenilen şekilde aynı noktada toplanamamışlardır. Şekil 6.13. robotların son konumlarını göstermektedir. Şekilden görülebildiği üzere robotlar 3 ayrı noktada bulunmaktadır. Şekil 6.14. ise toplam ortalama hatayı ve robotlar arasındaki mesafelerin zamana göre değişimini göstermektedir. Robotlardan bazıları



Şekil 6.13. Robotların son konumları.



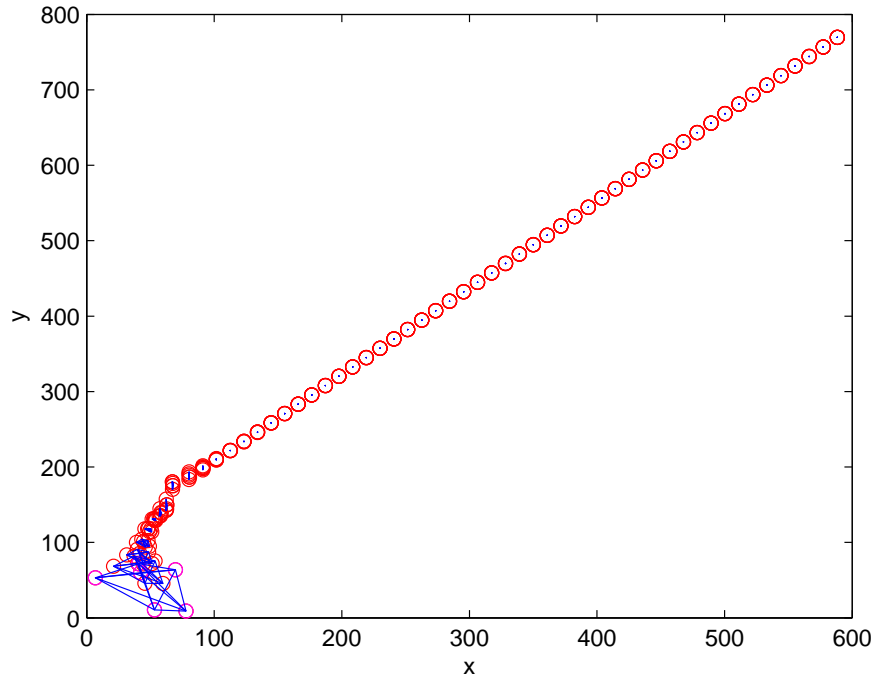
Şekil 6.14. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.

diğer robotların pozisyon bilgilerini alamadığı için gruptan ayrı olarak hareket etmişler

ve hata değerleri 10^6 seviyelerine çıkmıştır.

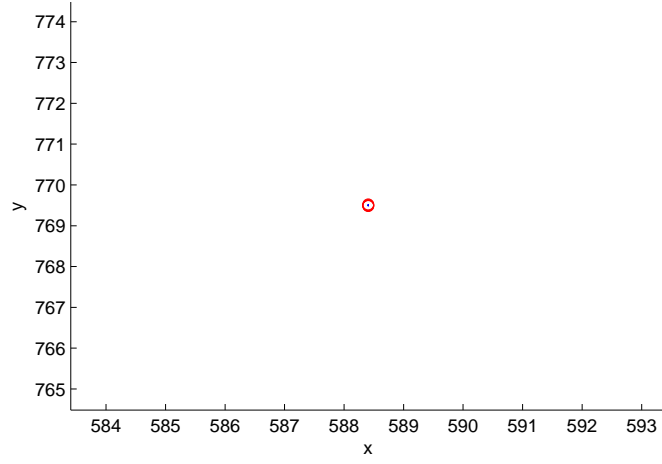
6.6.4. Rastgele Komşuluk

Bu bölümde erkinler arası komşulukların rastgele komşuluk yaklaşımına göre belirlendiği durumda benzetimlerden elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Rastgele komşuluk da dinamik bir yaklaşım olduğu için robotların bilgi alışverişi yapabildiği robotlar da sürekli olarak değişmektedir. Bu çalışmada benzetimin her 2 saniyesinde bir komşuluk matrisi güncellenmektedir. Görevin başarıyla gerçekleştirilebilmesi için tüm görev boyunca belirlenen komşuluklar bir araya geldiğinde elde edilen çizgenin tekdüze bağlantılı⁴ olması gerekmektedir. Bunun için ϵ eşik değerinin yanı sıra erkin sayısı da önemlidir. ϵ eşik değerinin büyük seçilmesi robotların daha fazla komşusunun olmasına yani bilgi alışverişinin daha fazla olmasına sebep olacağından istenen görev gerçekleştirilme olasılığı daha fazladır. Bu eşik değerin küçük olması ise robotların daha az komşuya sahip olmasına sebep olacak ve bu durumda robotlar daha bireysel hareket edeceklerinden görevin gerçekleştirilme olasılığı azalacaktır.

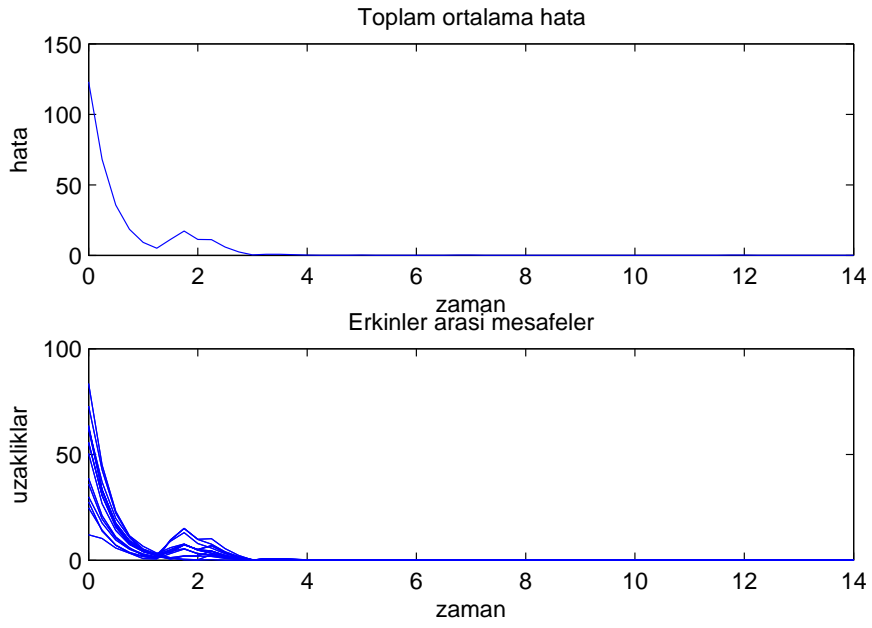


şekil 6.15. 14 saniye süresince sistem cevabı.

⁴ing: uniformly connected



Şekil 6.16. Robotların son konumları.



Şekil 6.17. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.

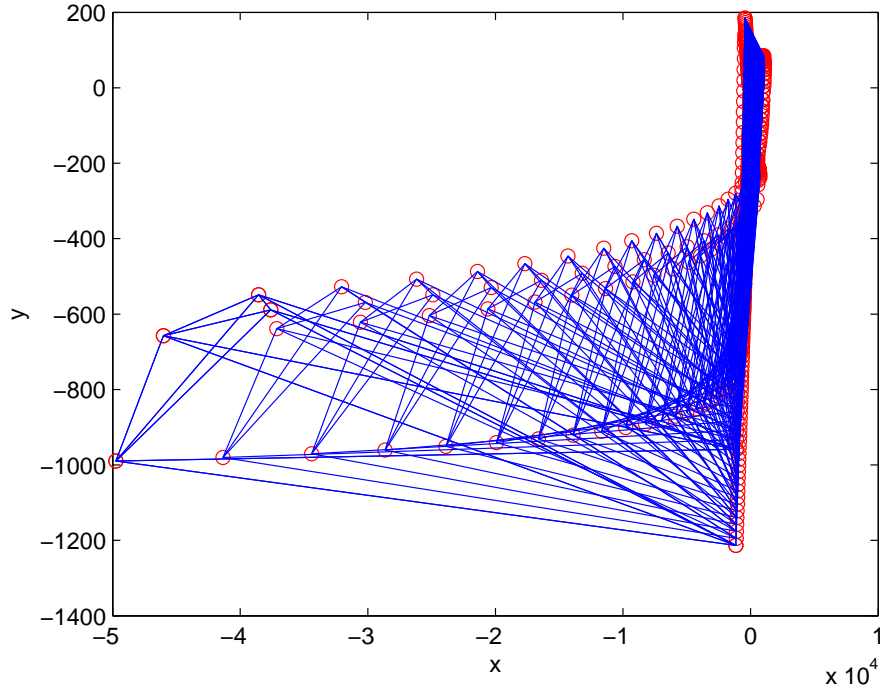
İlk olarak yapılan benzetimde $\epsilon = 0.5$ olarak seçilmiştir. F_i , G_i ve Ψ_{i0} matrisleri

$$F_i = \begin{bmatrix} -30.8488 & -16.8069 & 5.1709 & -1.2494 \\ 16.8069 & -3.0390 & 3.5191 & -0.6692 \\ 5.1709 & -3.5191 & -4.5110 & 2.2069 \\ 1.2494 & -0.6692 & -2.2069 & -3.6012 \end{bmatrix}, G_i = \begin{bmatrix} -6.5651 \\ 1.1910 \\ 0.5795 \\ 0.1325 \end{bmatrix}$$

ve

$$\Psi_{i0}(\sigma_i) = \begin{bmatrix} -6.5651 & -1.1910 & 0.5795 & -0.1325 \end{bmatrix}$$

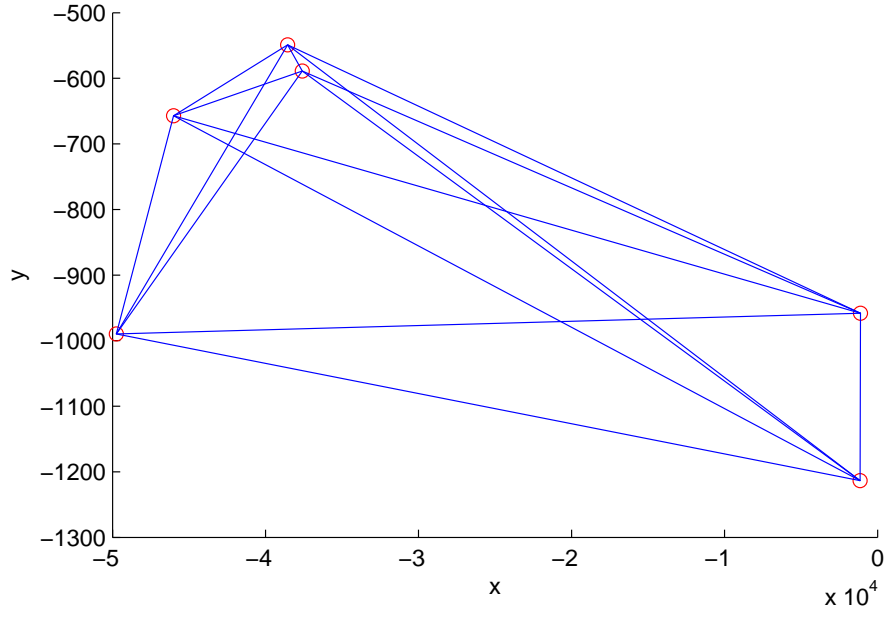
değerlerine sahiptir. Yüksek kazançlı gözleyiciye ait g_i parametresi 50 olarak seçilmiştir. Diğer katsayı ve parametre değerleri ise önceki bölümlerde kullanılan değerlerle aynıdır.



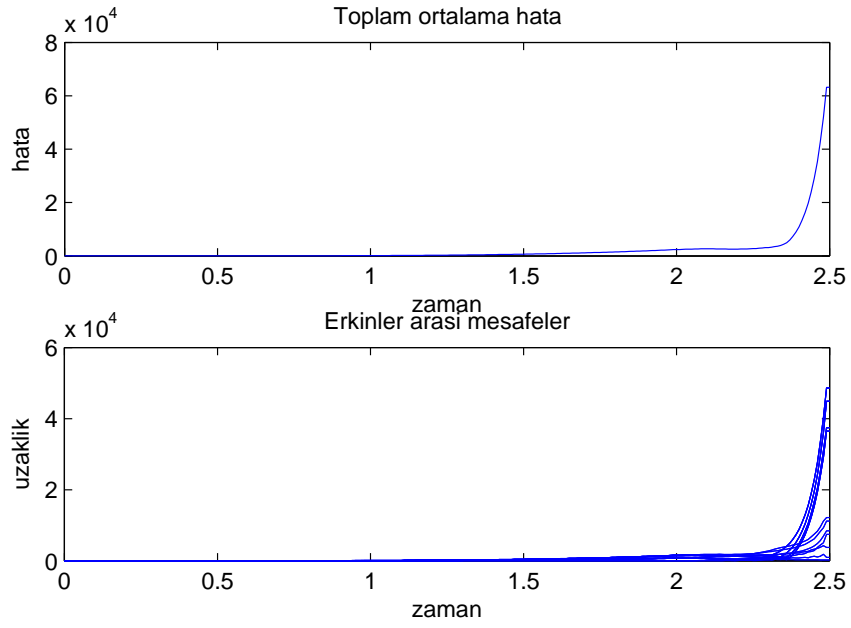
Şekil 6.18. 14 saniye süresince sistem cevabı.

Şekil 6.15. robotların hareketleri boyunca izledikleri yolları göstermektedir. Şekil 6.16. ise son konumlarını göstermektedir. Şekillerden görülebileceği üzere robotlar istenen görevi gerçekleştirmişlerdir. Şekil 6.15. 'de de hatanın ve robotlar arası mesafenin sıfıra yakınsadığı görülebilmektedir.

Diğer bir benzetim ϵ değeri 0.2 olarak seçildiği durum için yapılmıştır. ϵ parametresinin değeri küçük olduğu için robotların komşu olma olasılıkları da çok küçüktür. Şekil 6.18. 'den görülebileceği üzere robotlar arasında veri alışverişi yeterince yapılamadığından ayrı ayrı noktalara dağılmışlar, istenen toplanma hareketini gerçekleştirememişlerdir. Şekil 6.19. robotların son konumlarını göstermektedir. Robotlar bireysel hareket ederek ayrı ayrı noktalara gitmişlerdir. Şekil 6.20. ise toplam ortalama hatayı ve robotlar arası mesafeyi göstermektedir.



Şekil 6.19. Robotların son konumları.



Şekil 6.20. (i) Toplam ortalama hata. (ii) Erkinler arası mesafeler.

Hata ve robotlar arası mesafeler 2.5 saniye içerisinde 10^4 seviyelerine ulaşmıştır. Yani istenen görev gerçekleştirilememiştir.

BÖLÜM 7

7. SONUÇ

7.1. Yorumlar

Bu tez çalışmasında çok erkinli bir sistem sınıfında dizilim ve hareket denetimi problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü için [38] çalışmasında geliştirilen uyarlamalı iç model tabanlı çıktı denetimi yöntemi kullanılmıştır. Referans sinyalleri ve sisteme etkileyen bozucuların marjinal kararlı dış sistemler tarafından üretildiği varsayılmaktadır. Ayrıca sistemde dinamiklerinde ve marjinal kararlı dış sistemlerde bilinmeyen parametreler olduğu varsayılmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak erkinlerin belirli bir dizilimi oluşturarak bir referans gezingeyi takip etmesi istenmektedir. Referans gezinenin marjinal kararlı dış sistemler tarafından üretildiği varsayılmaktadır. Bu sebeple yalnızca sabit ve periyodik gezinmelerin takibi sağlanabilmektedir. Dış sistemler bilinmeyen parametreler içerdiğinden denetim kuralında bu parametrelere ait temel değerler kullanılmıştır.

Daha sonra ele alınan durumda erkinlerin dizilimi koruyarak gezinge takibi yapmasının yanısıra gelen bir komuta göre değişik dizilim görevlerini de gerçekleştirmeleri istenmektedir. Bu görevler, dizilimin genişlemesi, daralması, dönmesi ve yeniden oluşturulmasıdır. Böyle görevler erkinlerin hareket ettiği ortamda herhangi bir değişiklik olması durumunda görevin tamamlanabilmesi için gerçekleştirmeleri gereken görevler olabilir. Bu dizilim görevlerinin gerçekleştirilebilmesi için komut geldikten sonra dizilimle alakalı parametrelerin değerlerinin istenen göreve göre güncellenmesi gerekmektedir. Güncelleme için kullanılan ilk yöntem parametre değerlerinin komut geldiği anda anahtarlanmasıdır. Bu yöntem basit olmasına karşın hatada ani yükselişlere sebep olmaktadır. Kullanılan diğer yöntem ise parametrelerin parçalı sabit girdileri olan dış sistemler kullanılarak güncellenmesidir. Bu yöntem kullanıldığında hatada herhangi bir artış olmadan görev değişimi boyunca pürüzsüz geçişler elde edilebilmektedir. Her iki yöntem kullanıldığında da istenen görevler başarıyla gerçekleştirilmiştir yani sistemin esnek olduğu söylenebilir.

Yapılan diğer bir çalışma ise kompleks gezinmelerin elde edilebilmesi için dış

sistemlerde anahtarlama yapılmasıdır. Bu şekilde yalnızca sabit ve periyodik referans sinyallerinin takip edilebilmesi limiti ortadan kaldırılmış olur. Belirli zaman aralıklarında farklı dış sistemlerin aktif olmasıyla daha karmaşık güzergahlar elde edilebilmektedir. Burada iki durum incelenebilir. İlk durumda anahtarlamanın benzer dış sistemler arasında olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda, uyarlanır denetleyici parametrelerini yeni sisteme göre otomatik olarak ayarlayacağından denetleyicide anahtarlama yapmaya gerek yoktur ve anahtarlama anlarının da bilinmesi gerekmemektedir. Anahtarlamanın benzer olmayan, yapısal olarak büyük farklılıklar içeren sistemler arasında olduğu durumda ise anahtarlama anlarında denetleyicide de anahtarlama gerçekleştirilmelidir ve anahtarlama anlarının bilinmesi gerekmektedir.

Ele alınan son problem robotlar arasında dağıtık uzlaşma veya senkronizasyon problemidir. Bu bölümde robotlar arasında farklı komşuluk yapıları tanımlanarak, bu komşuluk yapılarının görevin tamamlanması üzerine etkileri incelenmiştir. Çember ve bütünsel komşuluk yapılarında görev başarıyla gerçekleştirilebilirken, dinamik yöntemler olan en yakın komşular ve rastgele komşuluk yaklaşımları kullanıldığında görevin başarıyla gerçekleştirilebilmesi olasılığı parametrelerin değerleriyle ilgilidir.

Kullanılan yöntemin bahsedilen problemlerin çözümü üzerindeki etkililiği benzetimlerle sınıanmıştır. Yapılan benzetimlerde erkinlerin takip ettiği güzergahlar, hatanın ve robotlar arasındaki mesafelerin zamana bağlı değişimleri, robotların son konumları incelenerek denetim yönteminin istenilen görevleri gerçekleştirecek şekilde başarıyla çalıştığı gözlemlenmiştir.

7.2. Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmayı geliştirmek için gelecekte yapılabilecek çalışmalardan biri yöntemin analitik olarak daha derin incelenmesi ve teorik analizlerle desteklenmesidir. Yapılabilecek bir diğer geliştirme yöntemin daha karmaşık ve daha gerçekçi erkin dinamikleri için uyarlanması ve etkinliğinin ilk aşamada benzetimlerle sınıanmasıdır. Kullanılan model literatürde sıkça kullanılan bir model olmasına karşın, günlük hayatta karşılaşılan sistemler çok daha karmaşık dinamiklere sahiptirler. Daha sonra yöntem gerçek robot sistemleri üzerine uygulanarak, pratik uygulamalarda da kullanılabilir şekilde geliştirilebilir. Yöntemin sistemde bilinmeyen parametreler ve bozuculara karşı gürbüz olması yöntemi pratik uygulamalarda kullanmaya açık hale getirmektedir. Yapılabilecek başka bir çalışma farklı sürü davranışları ve koordinasyon problemlerinin ele alınması ve yöntemin bu problemlerin çözümünde

de kullanılabilir şekilde geliştirilmesidir. Ayrıca robotlar arasında daha gerçekçi komşuluk senaryolarının denenmesi ve sınırlı iletişim koşullarında da yöntemin etkinliğinin sınanması ele alınabilecek çalışma konularındandır.

KAYNAKLAR

- [1] V. Gazi ve K. M. Passino, *Swarm Stability and Optimization*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, yayına kabul edildi.
- [2] V. Gazi ve B. Fidan, "Coordination and control of multi-agent dynamic systems: Models and approaches," *Proceedings of the SAB06 Workshop on Swarm Robotics*, ser. Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 4433, E. Sahin, W. M. Spears, ve A. F. T. Winfield, Eds. , 71–102, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [3] J. Reynolds, "Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model," *Comp. Graph.*, 21(4), 25–34, 1987.
- [4] E. Bonabeau, M. Dorigo ve G. Theraulaz, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York: Oxford University Press, 1999.
- [5] L. Bayındır ve E. Sahin, "A review of studies in swarm robotics," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 15(2), 115–147, 2007.
- [6] X. Chen, A. Serrani ve H. Özbay, "Control of leader-follower formations of terrestrial uavs," *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, 498–503, Hawaii, USA, Aralık 2003.
- [7] F. Hadaegh, W. Lu ve P. Wang, "Adaptive control of formation flying spacecraft for interferometry," *Large Scale Systems: Theory and Applications*, Patras, Greece, Temmuz 1998.
- [8] J. Lawton, R. Beard ve F. Hadaegh, "An adaptive control approach to satellite formation flying with relative distance constraints," *American Control Conference*, 3, 1545–1549, San Diego, USA, Haziran 1999.
- [9] J. Fowler ve R. D. Andrea, "A formation flight experiment," *IEEE Control Systems Magazine*, 23, 35–43, Ekim 2003.
- [10] H. Yamaguchi, "A cooperative hunting behavior by mobile-robot troops," *International Journal of Robotics*, 18(9), 931–940, 1999.
- [11] J. Desai, J. Ostrowski ve V. Kumar, "Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(6), 905–908, Aralık 2001.
- [12] R. Somaraju ve F. Schill, "A communication module and tdma scheduling for a swarm of small submarines," 15(2), 283–306, Temmuz 2007.
- [13] P. Ogren, E. Fiorelli ve N. Leonard, "Formations with a mission: Stable coordination of vehicle group maneuvers," *Proc. 15th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, Ağustos 2002.

- [14] M. Egerstedt ve X. Hu, "Formation constrained multi-agent control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(6), 947–951, Aralık 2001.
- [15] R. Olfati-Saber ve R. Murray, "Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions," *Proc. IFAC World Congress*, Barcelona, Spain, Haziran 2002.
- [16] V. Gazi ve K. Passino, "A class of attraction/repulsion functions for stable swarm aggregations," *International Journal of Control*, 77, 1567–1579, Aralık 2004.
- [17] V. Gazi, "Swarm aggregations using artificial potentials and sliding mode control," *IEEE Transactions on Robotics*, 21(6), 1208–1214, Aralık 2005.
- [18] J. Yao, R. Ordóñez ve V. Gazi, "Swarm tracking using artificial potentials and sliding mode control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 129(5), 749–754, Eylül 2007.
- [19] V. Gazi, M. . Köksal ve B. Fidan, "Aggregation in a swarm of non-holonomic agents using artificial potentials and sliding mode control," *European Control Conference*, 1485–1491, Kos, Greece, Temmuz 2007.
- [20] V. Gazi, B. Fidan, Y. Hanay ve M. I. Köksal, "Aggregation, foraging, and formation control of swarms with non-holonomic agents using potential functions and sliding mode techniques," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 15(2), 149–168, Temmuz 2007.
- [21] J. Lawton, R. Beard ve B. Young, "A decentralized approach to formation maneuvers," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(6), 933–941, Aralık 2003.
- [22] P. Ogren, M. Egerstedt ve X. Hu, "A control lyapunov function approach to multi-agent coordination," *Proc. Conference on Decision and Control*, 1150–1155, Orlando, FL, Aralık 2001.
- [23] J. Desai, J. Ostrowski ve V. Kumar, "Controlling formations of multiple mobile robots," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2864–2869, Leuven, Belgium, Mayıs 1998.
- [24] Y. Hanay, H. Hünerli, M. Koksall, A. Samiloğlu ve V. Gazi, "Formation control with potential functions and newton's iteration," *European Control Conference*, 4584–4590, Kos, Greece, Temmuz 2007.
- [25] V. Gazi, "Formation control of a multi-agent system using nonlinear servomechanism," *International Journal of Control*, 78(8), 554–565, 20 Mayıs 2005.
- [26] E. Davison, "The robust control of a servomechanism problem for linear time-invariant multivariable systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 21(1), 25–34, Şubat 1976.

- [27] B. Francis ve W. Wonham, “The internal model principle of control theory,” *Automatica*, 12, 457–465, 1976.
- [28] B. Francis, “The linear multivariable regulator problem,” *1976 IEEE Conference on Decision and Control including the 15th Symposium on Adaptive Processes*, 15, 873–878, 1976.
- [29] J. Huang ve W. Rugh, “On a nonlinear multivariable servomechanism problem,” *Automatica*, 26(6), 963–972, 1990.
- [30] A. Isidori ve C. Byrnes, “Output regulation of nonlinear systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(2), 131–140, 1990.
- [31] H. Khalil, “Robust servomechanism output feedback controllers for feedback linearizable systems,” *Automatica*, 30(10), 1587–1599, 1994.
- [32] J. Huang ve C. Lin, “On a robust nonlinear servomechanism problem,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(7), 1510–1513, Temmuz 1994.
- [33] N. Mahmoud ve H. Khalil, “Asymptotic regulation of minimum phase nonlinear systems using output feedback,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(10), 1402–1412, Ekim 1996.
- [34] ———, “Robust control for a nonlinear servomechanism problem,” *Int. J. Control*, 66(6), 779–802, 1997.
- [35] A. I. C.I. Byrnes, F.D. Priscoli ve W. Kang, “Structurally stable output regulation of nonlinear systems,” *Automatica*, 33(3), 369–385, 1997.
- [36] A. Serrani ve A. Isidori, “Global robust output regulation for a class of nonlinear systems,” *Systems/Control Letters*, 39, 133–139, 1999.
- [37] R. Marino ve P. Tomei, “Output regulation for linear systems via adaptive internal model,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(12), 2199–2202, Aralık 2003.
- [38] A. Serrani, A. Isidori ve L. Marconi, “Semiglobal nonlinear output regulation with adaptive internal model,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(8), 1178–1194, Ağustos 2001.
- [39] V. Gazi, “Output regulation of a class of linear systems with switched exosystems,” *International Journal of Control*, 80(10), 1665–1675, Ekim 2007.
- [40] J. Huang, *Nonlinear Output Regulation, Theory and Applications*. SIAM, 2004.
- [41] A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, 3.baskı, Springer Verlag, 1995.
- [42] V. Nikiforov, “Adaptive nonlinear tracking with complete compensation of unknown disturbances,” *European Journal of Control*, 4, 132–139, 1998.

- [43] E. Gül ve V. Gazi, “Çok erkinli bir sistem sınıfında uyarlamalı dizilim denetimi,” *Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı (TOK)*, İstanbul, Türkiye, Ekim 2009.
- [44] —, “Adaptive internal model based formation control in a class of multi-agent systems,” *American Control Conference (ACC)*, Baltimore, Maryland, USA, Haziran 2010.
- [45] A. Laub, M. Heath, C. Paige ve R. Ward, “Computation of system balancing transformations and other applications of simultaneous diagonalization algorithms,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-32(2), 115–122, Şubat 1987.
- [46] E. Gül ve V. Gazi, “Adaptive internal model based formation control in a class of multi-agent systems with switched exosystems,” *IEEE Transactions on Robotics*’e gönderildi.
- [47] A. J. Krener, “The construction of optimal linear and nonlinear regulators,” in *Systems, Models, and Feedback: Theory and Applications*, A. Isidori ve T. J. Tarn, Eds. , 301–322 Birkhauser, 1992.
- [48] P. Wieland ve F. Allgöwer, “An internal model principle for consensus in heterogeneous linear multi-agent systems,” *1st IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems*, Venice, Italy, Eylül 2009.
- [49] —, “An internal model principle for synchronization,” *IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*.
- [50] J. Xiang, W. Wei ve Y. Li, “Synchronized output regulation of linear networked systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(6), 1336–1341, Ekim 2009.
- [51] S. B. Akat, 2009, “Dinamik komşuluklu eş zamansız dağılık parçacık sürü eniyileme yöntemi ve Çok robotlu arama görevinde uygulanması,” Master Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : Gül, Esmâ
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum tarihi ve yeri : 07.04.1986 Amasya
Medeni hali : Bekar
e-mail : egul@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-	TUSAŞ	Asistan Tasarım Mühendisi
2008-2010	TOBB ETÜ	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce, İspanyolca

Yayınlar

Gül E., Gazi V., Adaptive Internal Model Based Formation Control in a Class of Multi-Agent Systems, American Control Conference (ACC), Baltimore, Maryland, USA, Haziran 2010.

Gül E., Gazi V., Çok Erkinli Bir Sistem Sınıfında Uyarlamalı Dizilim Denetimi, Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı (TOK), İstanbul, Türkiye, Ekim 2009.

Gül E., Control of Ball-and-Beam System with PD, Fuzzy, and Adaptive PD Controllers, 1st International Fuzzy Systems Symposium (FUZZYSS), Ankara, Türkiye, Ekim 2009.

Gül E., Duran S., Köksal M.İ., Şamiloğlu A.T., Gazi V., Sürü Robot Sistemleri Üzerine Bazı Deneysel Çalışmalar, Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı (TOK), İstanbul, Türkiye, Kasım 2008.