

**KAYAN KİP TEKNİĞİ VE YAPAY POTANSİYEL FONKSİYONLAR İLE
SÜRÜ ROBOT HAREKET DENETİMİ**

MURAT İLTER KÖKSAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2008

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Yücel Ercan

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. M.Önder Efe

Anabilim Dalı Başkanı

MURAT İLTER KÖKSAL tarafından hazırlanan KAYAN KİP TEKNİĞİ VE YAPAY POTANSİYEL FONKSİYONLAR İLE SÜRÜ ROBOT HAREKET DENETİMİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Veysel Gazi

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. M.Önder Efe

Üye : Doç. Dr. Veysel Gazi

Üye : Dr. Coşku Kasnakoğlu

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.

MURAT İLTER KÖKSAL

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Veysel Gazi
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans - Temmuz 2008

MURAT İLTER KÖKSAL

**KAYAN KİP TEKNİĞİ VE YAPAY POTANSİYEL FONKSİYONLAR İLE
SÜRÜ ROBOT HAREKET DENETİMİ**

ÖZET

Bu tez çalışmasında sürü robotlar için hareket denetimi çalışılmıştır. Tezde geliştirilen denetim stratejisi yapay potansiyel fonksiyonlar ve kayan kipli denetim tekniğinin birleşiminden oluşmaktadır. Sürünün üyeleri iki boyutlu uzayda hız-kısıtlı dinamiklerle hareket etmektedir. Tezde yapay potansiyel fonksiyonlar sürü için sanal bir itim-çekim uzayı oluşturmada kayan kipli denetim tekniği de erkinleri sanal itim çekim kuvvetlerine göre hareket etmeye zorlamada kullanılmıştır. Çalışılan davranışlar kümelenme, dizilim oluşturma ve takip davranışlarıdır. Takip davranışı hem tek bir erkin için hemde sürü erkinler için çalışılmıştır. Öngörülen denetim stratejisi yapıcı bir analitik analizle geliştirilmiş ve etkinliği benzetimlerle sınanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürü Sistemler, Yapay Potansiyel Fonksiyonlar, Kayan Kipli Denetim Tekniği, Hız-kısıtlı robotlar

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. - July 2008

MURAT İLTER KÖKSAL

**ROBOT SWARM MOTION CONTROL WITH ARTIFICIAL POTENTIAL
FUNCTIONS AND SLIDING MODE TECHNIQUE**

ABSTRACT

In this thesis motion control of a swarm of robots was studied. The control strategy developed in the thesis is a combination of artificial potential functions and sliding mode control technique. The members of the swarm move in 2-dimensional space with non-holonomic dynamics. In the thesis, artificial potential functions were used for constructing a virtual attraction-repulsion space for the swarm members and sliding mode control technique was used for forcing the agents to move according to virtual attractions and repulsions. The behaviors that were studied are aggregation, formation acquisition, and tracking. The tracking behavior was studied both for a single agent and for a swarm of agents. The proposed control strategy was developed via constructive analytical analysis and its effectiveness was tested with various simulations.

Keywords: Swarm Systems, Artificial Potential Functions, Sliding Mode Control, Non-holonomic Mobile Robots

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca yardım, katkı ve eleőtirileri ile 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,

Sürü Sistemler Laboratuvarında beraber dirsek çürüttüğüm çalışma arkadaşlarıma,

Beni her zaman destekleyen niőanlıma ve bugünlere gelmemi sağlayan aileme teőekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 104E170 sayılı proje kapsamında ve Avrupa Komisyonu tarafından 6. Çerçeve Programı 045269 sözleşme numaralı özel amaçlı araştırma projesi kapsamında desteklenmektedir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	2
2. SÜRÜ SİSTEMLER	5
2.1. Sürü Robotik Kavramı ve Kapsamı	5
2.2. Sürü Robotik Sistemler ile İlgili Tarama Çalışmaları	5
2.3. Doğadaki Sürüleri Anlama Çalışmaları	7
2.4. Sürü Robotik Sistemlerin Özellikleri	8
2.5. Sürü Eniyileme Yöntemleri	8
2.6. Sürü Robotik Sistemlerle İlgili Çalışmalar	9
2.7. Tezin Amacı ve Konusu	10
2.8. Kümelenme, Dizilim ve Hedef Takibi ile İlgili Çalışmalar	11
2.9. Yapay Potansiyel Fonksiyonlar ve Kayan Kipli Denetim	13
3. HIZ-KISITLI ERKİN MODELİ	15
4. KÜMELENME, DİZİLİM VE TAKİP PROBLEMLERİ	18
4.1. Tek Takip Probleminin Tanımı	18
4.2. Kümelenme Probleminin Tanımı	19
4.3. Dizilim Probleminin Tanımı	20
4.4. Sürü Takip Probleminin Tanımı	21

5. DENETLEYİCİ TASARIMI	23
5.1. Yapay Potansiyel Fonksiyonlar	23
5.1.1. Tek Takip	23
5.1.2. Kümelenme ve Dizilim	26
5.1.3. Sürü Takip	28
5.2. Kayan Kipli Denetim	32
5.2.1. Tek Takip	32
5.2.2. Kümelenme ve Dizilim	38
5.2.3. Sürü Takip	42
6. BENZETİM SONUÇLARI	48
6.1. Tek Takip	49
6.2. Kümelenme	52
6.3. Dizilim	56
6.4. Sürü Takip	61
7. SONUÇLAR	65
7.1. Yorumlar	65
7.2. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar	66
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Hız-kısıtlı robot yapısı.	15
Şekil 4.1. $N = 10$ elemanlı bir sürü için kümelenme problemi.	19
Şekil 4.2. $N = 6$ elemanlı bir sürü için dizilim problemi.	20
Şekil 4.3. $N = 4$ elemanlı bir sürü için takip problemi.	21
Şekil 5.1. $\bar{\epsilon} = 1$ için çizilmiş $h(\cdot)$ fonksiyonu.	25
Şekil 6.1. Birinci erkin için doğrusal hız kayma yüzeyi ($s_{v_i}, i = 1$) ile ilgili şekiller.	48
Şekil 6.2. Birinci erkin için yönelme açısı kayma yüzeyi ($s_{\theta_i}, i = 1$) ile ilgili şekiller.	49
Şekil 6.3. A robotunun ve T hedefinin yolları ($p_T(0) = [3 \ 3]^\top$).	50
Şekil 6.4. A robotu ile T hedefi arasındaki mesafe.	51
Şekil 6.5. Birinci denetim girdisi $u_1 = F_A$.	51
Şekil 6.6. İkinci denetim girdisi $u_2 = \tau_A$.	52
Şekil 6.7. $N = 16$ üyeli bir sürüde erkinlerin izlediği yollar.	53
Şekil 6.8. Sürünün üyeleri arasındaki mesafeler.	53
Şekil 6.9. Sürünün merkezinin hareketi.	54
Şekil 6.10. Sürü üyelerinin sürü merkezine ortalama uzaklığı.	54
Şekil 6.11. Sürü üyelerinin benzetim sonundaki konumları.	55
Şekil 6.12. Sürü üyelerinden birinin $u_{i1} = F_i$ denetim girdisi.	55
Şekil 6.13. Sürü üyelerinden birinin $u_{i2} = \tau_i$ denetim girdisi.	56
Şekil 6.14. İstenilen Dizilim.	57
Şekil 6.15. $N = 5$ üyeli bir sürüde erkinlerin izlediği yollar.	58
Şekil 6.16. Sürü üyelerinin sürü merkezine ortalama uzaklığı.	58
Şekil 6.17. İstenilen ve ölçülen mesafeler arasındaki fark.	59
Şekil 6.18. Sürü üyelerinin benzetim sonundaki konumları.	59
Şekil 6.19. Sürü üyelerinden birinin $u_{i1} = F_i$ denetim girdisi.	60
Şekil 6.20. Sürü üyelerinden birinin $u_{i2} = \tau_i$ denetim girdisi.	60
Şekil 6.21. Sürü üyelerinin ve T hedefinin izlediği yollar ($p_T(0) = [3 \ 3]^\top$).	61
Şekil 6.22. İstenilen ve ölçülen mesafeler arasındaki fark.	62
Şekil 6.23. Sürünün üyelerinden birinin $u_{i1} = F_i$ denetim girdisi.	63
Şekil 6.24. Sürünün üyelerinden birinin $u_{i2} = \tau_i$ denetim girdisi.	63

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Robot kelimesi ilk olarak 1920 yılında Karel Capek tarafından, Rossum'un Evrensel Robotları adlı oyunda kullanılmıştır. Kelimenin kökeni Çek dilinde zorla yaptırılan ağır veya angarya iş anlamına gelen robota kelimesidir. Daha sonra 1940'lı yıllarda, bir bilimkurgu yazarı olan Isaac Asimov tarafından Robot kelimesine yeni anlamlar kazandırılmıştır. Yazar robotları uymak zorunda oldukları 3 kuralla tanımlamaktadır. Gerçek hayatta çalıştırılan ilk prototip robot 1959 yılında yapılmış olan Unimate adlı endüstriyel koldur. Bu prototip, George Devol ve Joseph Engelberger tarafından yapılmış ve General Motors firmasına satılmıştır. Kolun görevi yüksek sıcaklıktaki otomobil parçalarını kalıp dökme makinesinden çıkartıp suya sokarak soğutmaktır. 1960 ve 1970'li yıllar robot üretimi ve kullanımı konusunda devrim niteliğinde gelişmelere sahne olmuştur ve robotlar özellikle aynı işin tekrarlandığı görevlerde insanların yerini almışlardır. Bu robotlar günümüz robotları ile karar verme kapasiteleri açısından kıyaslandıklarında çok ilkel kalırlar. Robot üretiminde eğilim daha akıllı ve daha genel amaçlı modeller geliştirmek yönündedir [1].

Günümüzde robot kelimesi kendi kendine ya da uzaktan kumanda ile çalışan ve normalde insanların yaptığı işleri yapmak amacıyla programlanabilen her cihaz için kullanılmaktadır. Bundan 50 yıl kadar önce robot dendiğinde, insan gibi davranan veya insana ait işleri yapabilen insan benzeri mekanik aygıtlar (humanoid) akla gelmekteydi. Günümüzde robotlar çok çeşitli şekil ve türlerde karşımıza çıkmaktadırlar ve otomotiv, elektronik, beyaz eşya, paketleme vb. birçok endüstri kolunda çok yaygın olarak (bir milyondan fazla aktif çalışan robot) kullanılmaktadırlar. Bu alanda kullanılan robotlar daha çok endüstriyel kol denen cinstendir. Robotların endüstride tercih edildiği işler hız, hassasiyet, güvenilirlik ve dayanıklılık gerektiren işlerdir. Endüstri dışında robotlar çok kirli ortamlarda yapılması gereken işlerde, tekdüze işlerde, fiziksel olarak bir insanın yapmasının imkansız olduğu işlerde, ev temizliğinde, volkan, okyanus, uzay keşif görevlerinde, oyuncak olarak, körlere ve yaşlılara yardımcılık görevlerinde, askeri alanda ve hastanelerde kullanılmaktadırlar. Robotlarla ilgili görevli yeni gelişen alanlar olarak nanorobotlar, yumuşak malzemeli robotlar (silikon gövdeli ve esnek iticili), otomatik veya manuel olarak yeniden yapılandırılabilir robotlar ve sürü robotlar sayılabilir [2].

Her ne kadar yukarıda sayılan robot çeşitleri içinde uzaktan kumandayla idare edilen-

ler olsa da robotların genellikle otonom olmaları beklenir. Buradaki otonomdan kasıt, robotun, yapması gereken işi en azından sürekli bir denetime ihtiyaç duymadan kendi algılayıcıları ve zekasını kullanarak yapabilmesidir. Bir robot, donanımı ne kadar iyi olursa olsun etkili algoritmalarla ve denetim teknikleriyle yönetilmedikçe verimli çalışamaz. Robot algoritmalarını diğer algoritmalarından ayıran en önemli özellik, robotun gerçek nesnelere fiziksel etkileşim içinde olması ve bu etkileşimlerden topladığı bilgileri birbirinden bağımsız birçok farklı değişkenden etkilenerek elde etmesidir. Örneğin bir algılayıcının topladığı bilgi birçok gürültü kaynağından aynı anda etkilenmiş olabilir. Robotlar yönetilirken kullanılacak denetim tekniğinin de dış etkenlere ve bozulmalara karşı dirençli olması gerekmektedir.

Robotik sistemlerin yakın zamanda ortaya çıkmış bir kolu da sürü robotik (daha genel çalışma alanı olarak sürü sistemler) sistemlerdir. Doğadaki sürüler çok çeşitlidir. Bu sürüler arasında bakteri kolonileri, balıklar, kuşlar, karıncalar, arılar ve memeliler sayılabilir. Sürülerin en önemli ortak özelliği sürü zekasıdır. Sürü zekası kavramı ilk olarak 1989 yılında Gerardo Beni ve Jin Wang tarafından ortaya atılmıştır [3]. Sürülerde bireyler ele alındığında birey zekasının çok ilkel olduğu fakat bu ilkel zekalı bireylerden oluşan sürünün karmaşık işler yapabildiği görülmektedir. Sürü olarak hareket eden biyolojik canlıların bir tehlike karşısında yaşama şanslarını arttırdıklarını aynı şekilde sürü olarak avlanan yırtıcı hayvanların da yiyecek bulma ihtimallerini arttırdıkları görülmektedir. Karınca kolonilerinin yüzlerce metre uzaktaki besin maddelerine ulaşmaları, arıların kovan inşa etmeleri, balıkların avdan kurtulmak için sürü olarak yaptıkları hareketler, memelilerin potansiyel avcılardan korunmak için geliştirdikleri teknikler sürü zekasıyla açıklanan davranışlardır [4].

Sürü robotik sistemler konusu yeni olmasına rağmen hızla gelişen bir konudur. Bu tip sistemlerin faydalı yanları esnek, gürbüz, merkezi olmayan ve kendi kendine örgütlenme özellikleridir. Tek bir robot için fazla karmaşık olan bazı görevler sürü robotlarla başarılabilir. Bir kutunun itilmesi tek bir robot için imkansız bir görev olabilir ancak sürü robotlar eşgüdümlü çalışarak aynı kutuyu rahatlıkla itebilir. Bu kadar basit özelliklerle üretilen robotlar karmaşık bir robota göre daha ucuz, daha sağlam, daha esnek, daha yüksek hata toleransına sahip ve daha güvenilir olurlar. Sürüyü oluşturan robotlardan bir veya birkaçı bozulsa dahi sürünün geri kalanı görevi sürdürebilir. Sürünün üyeleri arasındaki etkileşimin doğrudan değil de sürüyü çevreleyen ortam vasıtasıyla olması robotlar arasındaki iletişim yükünü de azaltabilir. Sürü robotik sistemlerin sorunları olarak yerel bilgi kullanımından kaynaklanan yerel minimum problemi ve bu robotların çok basit olmaları sebebiyle özel görevler için nasıl program-

lanacakları sayılabilir. Başka bir problemde, tam türdeş olmamalarından dolayı, robotların çevreden gelen etkilere farklı tepkiler verdikleri durumda ortaya çıkabilir [5].

Literatürde sürü robotların birçok uygulaması vardır. Bu uygulamalardan burda değinilebilecek bazıları, öncül çalışmalardan biri olan ve kuş sürüsü benzetiminin yapıldığı [6], böcek sürünlerinden esinlenilerek geliştirilmiş mühendislik uygulamalarının yer aldığı [5], Starlogo isimli nesne yönelimli bir programla dili ile cıvık mantar¹, karınca, trafik şıkışıklığı, termit vb. benzetimlerinin yapıldığı [7], hedef en az bir robotun görüş açısında olacak şekilde sürüye hedef gözlemi yaptırılan [8], insanlarla karşılaşma hedefli robot futbolu [9], işbirlikli nesne taşıma [10], askeri uygulama olabilecek [11], hava araçları ve mikro hava araçları ile ilgili [12–14], hareketli algılayıcılar ile ilgili [15], insanlara yardımcı robotlarla ilgili [16], uzay araçlarının hareket denetimi ile ilgili [17], mini denizaltılarda iletişim ile ilgili [18], konumlanma ve harita çıkarma [19,20], hareketli robotlar ve mikro robotlar [21,22] ve “NP-Hard” seviyesinde gerçek hayat problemleri çözen algoritmalar [23] olarak sayılabilir.

¹ing: slime mold

BÖLÜM 2

2. SÜRÜ SİSTEMLER

2.1. Sürü Robotik Kavramı ve Kapsamı

Sürü¹ robotlar kavramı ilk olarak [24] çalışmasında görülür fakat bu çalışmada yazarlar “sürü robotlar” ifadesi yerine “hücresele robotlar” ifadesini kullanmayı tercih etmişlerdir. Bu ifade sürü robotları tanımlamak için bir süre kullanılsada [25, 26] daha sonra bu alanı ve alanda yapılan çalışmaların niteliğini çok daha iyi anlatan “sürü robotlar” ifadesi bulunmuş ve kullanılmaya başlanmıştır [3]. Yukarıda bahsedilen “sürü” kelimesi sadece topluluk anlamına gelmemektedir. Bir topluluğun sürü olarak tanımlanabilmesi için bazı belirgin özellikleri olmalıdır. Bu özellikler merkezi olmayan denetim, eşzamanlı olmama, sadelik, hemen hemen özdeş üyelerden oluşmak ve üye sayısıdır ($10^2 - 10^{<23}$) [27]. Sürü robotik, [28] çalışmasında, çok sayıda basit robotun, istenilen bir toplu davranışı aralarındaki ve çevreleriyle olan etkileşimler vasıtasıyla gerçekleştirmek için nasıl tasarlanacağını çalışıldığı bir disiplin olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmaya göre sadece az sayıda robottan oluşan bir topluluk için geliştirilmiş ve ölçeklenebilir olmayan yöntemler ve çalışmalar sürü robot disiplini içinde kabul edilemez, sürü birkaç türdeş robot grubundan oluşabilir, robotlar göreceli olarak yetersiz veya verimsiz olmalıdır ve robotların algı ve iletişim kapasitesi sınırlı olmalıdır. Başka bir çalışmada çok-erkinli robotik sistem sınırlı etkileşimli dinamik erkinlerin oluşturduğu ağ olarak tanımlanmıştır [29]. Yazarlara göre bu tip sistemlerin ana amacı tek bir birey ile gerçekleştirmenin mümkün olmadığı görevleri daha basit bireylerden oluşmuş bir sürünün toplam zekası ile gerçekleştirmektir. Yine bu çalışmada bir sürünün öğelerinin bireyler ve bireyler arasındaki bilgi bağlantıları olduğu belirtilmiştir.

2.2. Sürü Robotik Sistemler ile İlgili Tarama Çalışmaları

Halihazırda sürü robotlar (çok-erkinli robotik sistemler, çok-robotlu sistemler) ile ilgili birçok tarama ve sınıflandırma çalışması vardır [29–35]. Sistem dinamikleri ve denetim teorisi penceresinden bakılarak oluşturulmuş bir tarama olan [29] çalışmasında sürü sistem terminolojisi ve matematiksel modeller incelenmiştir. Çalışmada sürüyü oluşturan bireylerin hareketini ifade etmede kullanılan çeşitli matematiksel modeller,

¹ing: swarm

çalışılan problemler ve çözüm yaklaşımları ve sürüler için yapılmış kararlılık, gürbüzlük ve performans analizlerinden çıkan sonuçlar incelenmiştir. Bu tezde anlatılacak olan konular denetim teorisi temelli oldukları için bu tarama çalışması kapsamında incelenebilir. Dağınık hareketli robot sistemlerinde geline seviyeyi araştıran bir çalışma olan [35] çalışmasında yazarlar çok robotlu sistemler başlığı altında yaptıkları taramada literatürdeki çalışmalarını sekiz ana araştırma kolu altında sınıflandırmışlardır. Bu konuları biyolojik esin kaynakları, iletişim, sürü mimarisi, konumlanma/haritalama/keşif, nesne taşıma ve kullanma, hareket eşgüdümü, manuel veya otomatik olarak yeniden yapılandırılabilir robotlar ve öğrenme olarak açıklamışlardır. Çalışmada bu konulardaki araştırma seviyesi incelenmiş ve araştırılması gereken yeni konularla ilgili öneriler sıralanmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalarla ilgili genel bir tarama çalışması olan [34] çalışmasında sürü davranışı ve sürü zekası ile ilgili açıklamalar, biyolojiden esinlenmiş çalışma örnekleri ve sürü sistemlerin performansı (kararlılık) ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. Bir tarama ve sınıflandırma sistemi oluşturma çalışması olan [32] çalışmasında daha verimli çok-erkinli robotik sistemler tasarlayabilmek için mümkün olan düzenlemelerin bilinmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmanın iletişime önem verdiği göze çarpmaktadır ve sınıflandırma sistemi sürüdeki eleman sayısı, iletişim menzili, iletişim ilingesi², iletişim bant genişliği, kendini uzaysal olarak yeniden düzenleyebilme hızı, herbir elemanın işleme gücü ve robotların türdeşliği/çoktürelliliği temel alınarak oluşturulmuştur. Bu çalışmalar içinde en güncel olanı [31] çalışmasıdır. Bu çalışmada yazarlar literatürdeki diğer tarama çalışmalarını da inceleyerek sürü robotlar için bir sınıflandırma sistemi oluşturmuşlar ve halihazırdaki çalışmalarını bu sınıflar altında incelemişlerdir. Çalışmalar, yazarların önem sırasına göre araştırma, modelleme, davranış tasarımı, iletişim, analitik çalışmalar, problemler eksenlerine ayrılmış ve incelenmiştir. Çok-robotlu sistemlerin çok-erkinli sistemlerin bir kolu olarak görüldüğü [30] çalışmasında sistem organizasyonu ve özellikle planlama ve tepki verme özelliklerine odaklanılarak güncel çalışmalar sınıflandırılmıştır. Çalışmada planlama, sürünün bir görevi gerçekleştirirken çevredeki değişikliklerle başatmak için strateji geliştirmesi ve gerekirse tüm üyeleri yeniden organize etmesi olarak, tepki verme ise her üyenin çevresel değişikliklerle başatmak için sadece kendi işini yeniden organize etmesi olarak açıklanmıştır. Bu çalışmada robot futbolu ortamının çok değişken olması ve karşıda alt edilmesi gereken bir rakip takım olması özelliklerinden dolayı yüksek oranda işbirliği içeren ve alanı çok geliştirebilecek bir konu olarak görülmüştür. İşbirliği yapan hareketli robotların incelendiği [33] çalışmasında daha önce yapılmış çalışmaların taraması yapılarak alandaki açık problemler

²ing: topology

ve araştırmalar ve uygulamalar sırasında ortaya çıkan teorik ve pratik sorunlar incelenmiştir. Yazarlar araştırmalarından bu alanda beş araştırma eksenini olduğu sonucunu çıkartmışlardır.

2.3. Doğadaki Sürüleri Anlama alışmaları

Sürü kavramını robotlar için kullanılmadan önce biliminsanları uzun yıllardır doğadaki sürüleri incelemekte ve sürü davranışını anlamaya çalışmaktaydılar [36, 37]. Özellikle hayvan ve böcek sürülerinin nasıl uyum içinde hareket ettikleri ve bazı görevleri gerçekleştirmek için nasıl organize olduklarıyla ilgili yoğun çalışmalar yapılmaktadır [38–50]. Bu çalışmalarda sürü davranışı ile ilgili uzaysal ve uzaysal olmayan olarak sınıflandırılabilen iki farklı yaklaşım görülmektedir [51]. Uzaysal yaklaşımlarda uzay (ortam) açıkça veya dolaylı olarak modelde veya analizde mevcuttur. Uzaysal yaklaşımlar kendi içinde iki farklı çerçevede ele alınabilir [51]. Bunlar birey tabanlı ve süreklilik tabanlı çerçevelerdir. Birey tabanlı modellerde nitelendirici herbir bireyin hareket denklemleridir. Birey tabanlı sürü modellerinde sürü üyeleri arasındaki etkileşimi uzak mesafelerde çekim ve yakın mesafelerde itim arasındaki değişimin belirlediği düşünölmektedir. Sabit ekim ve aradaki uzaklığın karesi ile ters orantılı itim içeren basit bir model öngören [37] çalışması bu alandaki en eski çalışmalardan biridir. [38] çalışması da birey tabanlı sürü modeli temelli bir çalışmadır. Bu çalışmada yazarlar bir itim/çekim fonksiyonu kümesinin uyum³ üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Süreklilik tabanlı sürü modellerinde sürü bir bütün olarak ele alınır ve uzaydaki popülasyon yoğunluğuna göre değerlendirilir. Sürüyü bu şekilde örnekleen [52] çalışması sürü üyelerinin yerel olmayan etkileşimlerini temel alır. Diğer sınıf olan uzaysal olmayan yaklaşımlarda sürü dinamikleri farklı büyüklükteki grupların sıklık dağılımıyla ifade edilir [51]. Bu yaklaşımlara göre farklı büyüklükteki topluluklar, tabiatları gereği veya çevresel etkilerle veya diğer topluluklarla karşılaşmaları sonucu bölünebilir veya diğer topluluklarla birleşebilirler. [47] çalışmasında yazarlar hayvan sürüsündeki birey sayısının dağılımını için genel ve sürekli bir model benimsemiştir. Her iki yaklaşımın da artıları ve eksileri vardır. Bu yaklaşımları karşılaştıran ve değerlendiren çalışmalar da vardır [39, 40, 46, 48]. Sürü davranışı ile ilgili fizikçiler de önemli çalışmalar yapmaktadırlar [53, 54]. Bu çalışmalardaki genel yaklaşım her bireyi bir parçacık olarak kabul ederek toplu davranışı aralarındaki etkileşimden çıkarmaktır [51]. [54] çalışmasında kendinden itmeli parçacıkların her zaman adımında komşularıyla etkileşerek yerel ortalama hareket yönünü seçmesi çalışılmış ve bu işleme gürlütünün ve boyutun teorik etkileri araştırılmıştır. Bir çok

³ing: cohesion

canlı için sürü davranışı toplu beslenme⁴ sırasında görülür. Beslenme teorisi ile ilgili daha detaylı bilgi için [55] kitabı incelenebilir.

2.4. Sürü Robotik Sistemlerin Özellikleri

Doğadaki sürülerle ilgili 2.3. kısımda anlatılan çalışmalardan elde edilen bazı sonuçlar bu sistemlerin mühendisliğe de uyarlanması konusunda motivasyon sağladı. Bu sonuçlara göre biyolojik sürüler, merkezi bir denetim mekanizması olmaksızın eşzamanlı hareket edebilmektedirler, gürbüzdürler, esnektirler ve ölçeklenebilirlerdir. Bu özellikler sürü robot sistemlerinde de olması istenilen özelliklerdir. Gürbüzlük, sürünün bazı üyeleri bozursa dahi sürünün görevi daha düşük performansla da olsa devam ettirebilmesidir [28]. Gürbüzlük bir kaç etmene bağlanabilir. Bu etmenler sayıca fazlalık, merkezi olmayan eşgüdüm, bireylerin basitliği ve algıdaki çeşitliliktir [28]. Gürbüzlüğün tanımı birçok çalışmada yapılmıştır. Gürbüzlük, [31] çalışmasında, bir sistemin kısmi arızalar ve olağan dışı koşullar varlığında çalışabilme derecesi olarak tanımlanmıştır. Bir tarama çalışması olan [30] çalışmasında gürbüzlük, bir sistemin aynı anda hem uyarlanabilir hem de arızalara dayanıklı olması olarak ifade edilmiştir. Bu arızalar iletişim veya robot arızaları olabilir. Yine bir tarama çalışması olan ve sürü sistemlere sistem dinamikleri ve denetim teorisi penceresinden bakan [29] çalışmasında gürbüzlük, kararlılık veya verimlilik özelliklerinin belirli bir üst sınırı olan belirsizlikler ve bozan etkenler varlığında korunabilmesi olarak açıklanmıştır. Esneklik, sürünün farklı görevler için modüler çözümler üretebilme yeteneğidir [28]. Esneklik [31] çalışmasında sistemin yeni, farklı veya değişen çevre koşullarına uyum sağlayabilmesi olarak açıklanmıştır. Yine bu çalışmada gürbüzlük ile esneklik özelliklerinin kısmen çatıştığı iddia edilmektedir. Sürü sistemlerde olması istenilen özelliklerden biri de ölçeklenebilirliktir. Ölçeklenebilirlik, sürüyü oluşturan bireylerin sayısındaki değişimlere rağmen sürünün göreve verimi çok etkilemeyecek şekilde devam edebilmesidir [28, 31]. Başka bir deyişle geliştirilen bir denetim yöntemi sürünün büyüklüğüne göre farklı çalışmamalıdır.

2.5. Sürü Eniyileme Yöntemleri

Burada sürü eniyileme algoritmaları için özel bir paragraf açmak gerekir çünkü sürü sistemlerin mühendislik alanındaki en başarılı uygulamaları parçacık sürü eniyileme ve karınca koloni eniyileme olarak adlandırılan eniyileme yöntemleridir [56,57]. Bu yöntemlerde parçacık ve hayali karınca sürüsü arama uzayında zamanuyumsuz ve merkezi

⁴ing: foraging

olmayan şekilde eniyileme yapar. Parçacık sürüsü eniyileme yönteminin çok robotlu sistemlerdeki güncel uygulamalarından biri [58] çalışmasıdır. Çalışmada, benzetim ortamında robotlar duman kaynağının konumunu belirlemek amacıyla parçacık sürü eniyileme yöntemi kullanarak ayrık zamanda, eşzamasız şekilde ve değişken iletişim komşuluğunda bir sonraki adımda gitmeleri gereken konumları belirlemektedirler.

2.6. Sürü Robotik Sistemlerle İlgili Çalışmalar

Sürü sistemler ile ilgili çalışmalar, uygulamaya ve teoriye yönelik olarak iki başlık altında incelenebilir. Uygulamaya yönelik çalışmalar kendi içinde de iki kola ayrılabilir. Bu kollar çalışılan problemler ve gerçek hayat uygulamaları olarak adlandırılabilir. Çalışılan problemler zorluk ve uygulama olmaya yakınlığa göre üç seviyeye ayrılabilir. Birinci seviyede en temel sürü davranışları vardır. Bunlar kümelenme⁵, floklama, buluşma, örüntü oluşturma, zincir şeklinde dizilme, yayılma, kenetlenme ve düzenli yürüyüş (marş) olarak sayılabilir. Bu problemlerin teorik analizi kolay değildir fakat bu seviyedeki problemler başlı başına görev olmaktan ziyade diğer üst seviyelerin yapıtaşlarıdır. Daha karmaşık ama yine de başlı başına görev olamayacak problemler ikinci seviyeyi oluşturur. Bunlar dizilime yakınsama/ulaşma, dizilim koruma/değiştirme, dizilimi yeniden oluşturma (robotlardan bazılarının arızalanması durumunda), toplu beslenme, dağılık uzlaşma problemleri ve birleşme (self-assembly) olarak sayılabilir. Hepsi de uygulama olarak çalışılan, son derece karmaşık ve zor ve alt seviyedeki problemleri içeren üçüncü ve en üst seviyede çok-hedef gözleme, nesne itme/çekme/taşıma, keşif, robot futbolu, trafik denetimi ve harita çıkarma problemleri vardır. Bu problemlerden bu çalışmada incelenecek olanlar ileride daha detaylı olarak anlatılacaktır. Halihazırdaki gerçek hayat uygulamaları olarak birbirine fiziksel olarak bağlanabilen robotlar SWARM-BOTS [21], $(2 \times 2 \times 1) \text{mm}^3$ hacminde 1000 adet mikro-robottan oluşan yapay sürü I-SWARM [22] ve avrupa birliği altıncı çerçeve programınca desteklenen, ziyaretçileri gezdiren robotlar URUS, hastane yardımcısı robotlar IWARD, çöp toplayan robotlar DUSTBOT, uçan robotlar μ DRONES, arama ve kurtarma robotları VIEW-FINDER ve itfayeci yardımcısı robotlar GUARDIANS sayılabilir [59].

Teoriye yönelik çalışmalar sürü sistemleri daha iyi anlamak için yapılan kararlılık, gürbüzlük ve performans vs. analizleridir. Sürülerin teorik analizi gelişmekte olan bir araştırma alanıdır ve halihazırda bu konuda sürülerle ilgili diğer konulardan göreceli daha az çalışma vardır. Kararlılık diğer sistemler için olduğu gibi sürü sis-

⁵ing: aggregation

temler için de çok önemli bir özelliktir. Kararlı olmayan bir sürünün herhangi bir hedefe yönlendirilmesi veya bir görevi yerine getirmesi mümkün değildir [34]. Kararlılık çok önemli bir denetim teorisi kavramıdır ve sürü sistemler için çalışılan özel probleme veya davranışa göre farklı şekillerde tanımlanabilir [29]. Sürü robot çalışmalarında kararlılık genellikle matematiksel analizlerden veya deney veya benzetim sonuçlarından çıkarılır. Kararlı olmayan bir sistemde verimden de söz edilemez [29]. Kümelenme, beslenme vb. sürü davranışları için yapılmış bazı kararlılık analizleri [51, 60–64] çalışmalarında bulunabilir. Verim (performans), bir sistemin beklenen davranışı ile gerçek davranışı arasındaki farktır. Verimi ölçebilmek için ideal davranışı niceleyen göstergelere bağlı verim göstergelerinin bulunması gerekir. Bu verim göstergeleri, kararlılıkta olduğu gibi çalışılan probleme göre farklılık gösterebilir. Verim göstergelerine yakınsama hızı, yakınsama olduktan sonra sürünün kapladığı alan örnek gösterilebilir. Bu tip analizlere yer veren bazı çalışma örnekleri için [51, 62, 65–67] incelenebilir. Daha önce çeşitli tanımları verilmiş olan gürbüzlük sadece sürü sistemlerde değil tüm denetim sistemlerinde gerekli bir özelliktir. Bir özelliğin korunabilmesi kapsamında bozan etkenler ve belirsizliklere karşı olan tolerans bir sistemin gürbüzlük ölçüsünü belirler. Sürü sistemlerde gürbüzlük ile ilgili az miktarda bulunan çalışmalara örnek olarak [68] çalışması gösterilebilir. Bu tez çalışmasında robot denetimi için kullanılacak olan kayan kip tekniği belirli bozan etkenler ve belirsizliklere karşı gürbüzlük anlamında oldukça dayanıklıdır.

2.7. Tezin Amacı ve Konusu

Bu tez çalışmasında çok robotlu bir sistemin hareket denetimi çalışılmıştır. Geliştirilen yöntem gerçek robotlardan ziyade benzetimlerle denenmiştir. Yöntemde her erkin diğer tüm erkinleri algılayabildiği için gerçek robotlarla yapılacak bir uygulamada robot sayısı artınca oluşacak iletişim yükünden dolayı ölçeklenebilirlik özelliğinin söz konusu olamayacağı açıktır. Buna rağmen yöntem geliştirilirse sınırlı komşuluk ve iletişimde de çalışacağı düşünülmektedir. Bu çalışmadaki sürü ideal bir sistemdir yine de [32] çalışmasına göre SIZE-LIM (çok robot), COM-INF (sınırsız iletişim menzili), TOP-BROAD (tüm robotlar birbiriyle haberleşebiliyor), BAND-INF (sınırsız iletişim bant genişliği), ARR-DYN (dinamik düzen), CMP-IDENT (Homojen sürü) şeklinde sınıflandırılabilir. Tezde kümelenme, dizilim⁶ oluşturma, hedef takibi ve sürü takip problemleri çalışılmıştır. Sürü denetimi bireysel temelde yapılmıştır ve her birey oldukça gerçekçi bir model olan ve 3. bölümde detaylı olarak anlatılacak olan hız-kısıtlı erkin modeliyle ifade edilmiştir. Literatürde bu model ve diğer erkin

⁶ing: formation

modelleriyle ilgili çalışmalar için [29] çalışmasının “Mathematical Models for Agent Dynamics” bölümü incelenebilir. Çalışmada kayan kip tekniği ile yapay potansiyel fonksiyonları birleştiren bir denetim yöntemi kullanılacaktır.

2.8. Kümelenme, Dizilim ve Hedef Takibi ile İlgili Çalışmalar

Kaçma-kovalama ve yörünge izleme olarak da bilinen hedef takibi problemi hareketli robotlar için oldukça fazla çalışılmış ve iyi anlaşılmış bir konudur. Konuyla ilgili özellikle yörünge izleme başlığı altında oldukça fazla çalışma vardır. Yörünge izleme probleminde hareketli bir robot, kara veya hava taşıtı zamanla değişen bir yolu izlemeye çalışır. Bu problem hız-kısıtlı araçlar için yoğun olarak çalışılmaktadır [69–76]. Bu çalışmalarda yörünge takibi için doğrusallaştırma, geribesleme ile doğrusallaştırma ve Lyapunov tabanlı yöntemler kullanıldığı görülmektedir. Literatürde hedef takibi başlığıyla yörünge takibine göre daha az çalışma vardır [8, 77–81]. [8] çalışmasında yazarlar bir veya daha fazla robotu engellerin olduğu bir çalışma alanında hareket dinamikleri bilinmeyen bir hedefi görececek/gözleyecek şekilde eşgüdümlemek için görüntü tabanlı bir hareket planlama yöntemi geliştirmişlerdir. Yapay potansiyel tabanlı [77, 78] çalışmalarında ise amaç yine engellerin bulunduğu bir ortamda hareketli bir hedefin takipçi tarafından yakalanmasıdır. [80] çalışmasında hareketli bir hedefi yakalamak için bulanık mantık tabanlı gerçek-zamanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem kızılötesi algılayıcıları olan bir hareketli robot üstünde denenmiştir. [81] çalışmasında hareketli bir robota hedef takibi görevi yaptırmak için kullanılan görüntü tabanlı yöntemlerin taraması yapılmıştır.

Kümelenme, basit bakteriler, kuş ve balık sürüleri ve memeli toplulukları vb. gibi doğadaki sürülerde de görülebilen en temel sürü davranışlarından biridir. Bu davranışı modelleme ve dinamiklerini anlama çalışmaları ilk olarak biyologlar tarafından yapılmıştır [37–40]. Biyolojik sürülerde kümelenme davranışının avcılardan kurtulma, yiyecek bulma olasılıklarını artırma gibi birçok faydasının olduğu gözlemlenmiştir [41]. Birçok toplam davranışın temelinde kümelenme vardır. Bu nedenle sürülerde görülen kümelenme davranışının dinamiklerinin ve özelliklerinin çalışılması işbirliği gerektiren çok erkinli sistemlerin geliştirilmesi için gereklidir. Sürü sistemler mühendisliği dalında çalışan bir çok araştırmacı kümelenme davranışını modellemeye ve bu davranışı sürü robotlara yaptıracak yöntemler geliştirmeye çalışmaktadır. Sürü robotik sistemlerdeki kümelenme davranışında rasgele konumlanmış otonom robotlar yerel bilgi kullanarak bir araya gelmeye çalışırlar. Literatürde kümelenme yöntemleri ile ilgili birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar incelendiğinde kümelenme yön-

temlerinin yapay potansiyel fonksiyon, olasılık ve evrim tabanlı olmak üzere üç ana başlıkta toplanabileceği görülmektedir [62, 82–87]. [63, 88, 89] çalışmalarında kümelenme davranışı eş zamanlı olmayan sürü modelleri için incelenmiştir. Kümelenme davranışının yakınsaması ve kararlılığı da derinlemesine incelenmiştir [51, 61–63, 88]. Yapay potansiyel tabanlı [62,82] çalışmalarında yapay potansiyel fonksiyonlarla robotlar arasında sanal itim-çekim kuvvetleri oluşturularak robotların kümelenmesi sağlanmıştır. [82] çalışmasında yapay potansiyel fonksiyonlar kayan kip tekniği ile birlikte kullanılmıştır. Bu çalışmalarda erkin hareketinin nokta parçacık ve tüm-eyleyici⁷ modelleriyle ifade edildiği ve erkinlerin diğer tüm erkinlerin konumlarını bildiği varsayılmış ve yakınsama zamanı ve kümelenme olduktan sonra sürünün kaplayacağı alanın büyüklüğü ile ilgili üst sınırlar bulunmuştur.

Bu tez çalışmasında dizilim denetimi, sürünün elemanlarının son konumlarının sürünün eleman sayısına göre önceden belirlenmiş bir geometrik şekil oluşturduğu, kümelenme davranışının özel bir şekli olarak ele alınacaktır. Literatürde dizilimin farklı durumları ve bu durumları gerçekleştirecek denetim yöntemleriyle ilgili oldukça fazla ve çeşitli çalışma vardır. [29] çalışmasında dizilime yakınsama/ulaşma, dizilim koruma/değiştirme, dizilimi yeniden oluşturma konularıyla ilgili geniş bir tarama yapılmıştır. Dizilim oluşturma yöntemlerini merkezi ve merkezi olmayan olarak iki ana başlıkta inceleyen ve konu ile ilgili bazı güncel çalışmaların gözden geçirildiği bir başka tarama da [90] çalışmasıdır. Sürü robot sistemlerinde dizilim davranışı üzerine çalışan araştırmacıların lider izleyen, yapay potansiyel, davranış ve çizge teorisi tabanlı stratejileri başarıyla denemiş oldukları görülmektedir [91–95]. Dizilim oluşturma/değiştirme/koruma ile ilgili gerçek robotlar üzerinde uygulama örneği olarak [96] çalışması incelenebilir. Çalışmada yazarlar geliştirdikleri yöntemin gürbüzlük deneylerini de yapmışlardır.

Dizilim ve takip davranışlarının birleşimi olarak da görülebilecek sürü takip, eşgüdümlü takip ve eşgüdümlü hareket henüz çok fazla çalışılmamış ama ümit vadeden araştırma konularından biridir [8, 11, 94, 95, 97–100]. Bu şekilde bir hareket yük taşımada, askeri görevlerde veya hava araçları için faydalar sağlayabilir. Çizge kuramı ve yapay potansiyel tabanlı [11] çalışmasında hedefi yakalayıp etrafını sarma çalışılmıştır fakat hedef hareketli değil sabittir. [94] çalışmasında sanal lider temelli, aynı anda dizilim, takip ve engel aşma görevlerini yaptıracak eşgüdüm stratejisi geliştirilmiştir. [97] çalışmasında en iyileme problemleri çözen merkezi olmayan hızlı bir algoritmayla işbirlikli uçaklar için en uygun yörüngeler çizilmiştir. [95, 98] çalışmalarında dizilimle

⁷ing: fully actuated

yapılacak hareketler ile ilgili davranış, yapay potansiyel ve sanal lider tabanlı denetim stratejileri geliştirilmiştir. Dizilimle yapılacak hareketler olarak ilerleme, dönme, uzaklaşma ve yakınlaşma sayılabilir. Son olarak [100] çalışmasında bir robot takımının bilinmeyen ve engellerin olduğu bir ortamda eşgüdümlü hedef araması yapması için davranış tabanlı bir dağınık algoritma geliştirilmiştir.

2.9. Yapay Potansiyel Fonksiyonlar ve Kayan Kipli Denetim

Kayan kip tekniği [101–103] yaklaşımı karmaşık, yüksek-dereceli dinamik sistemlere gürbüz denetleyiciler tasarlamak için kullanılan etkili bir denetim tekniği olarak bilinir. Bu alandaki çalışmalar 1960'lı yıllarda eski Sovyetler Birliğinde başlamış ve 1977 yılında Vadim Utkin tarafından yayınlanan [104] çalışmasından sonra uluslar arası ilgi görmeye başlamıştır. Tipik bir kayan kipli denetim tasarımında model belirsizliklerini ve bozan etkenleri bastırabilecek, yeterince yüksek kazançlı, anahtarlamalı bir denetleyici, sistem dinamiklerini bir kararlılaştırıcı manifold (kayma manifoldu) üzerine düşürecek ve orda kalmaya zorlayacak şekilde sisteme uygulanır. Kayan kip tekniğinin en önemli artıları sistem parametrelerindeki değişimler ve bozan etkenlerden az oranda etkilenmesi ve sistem derecesini indirgemesidir. Bozan etkenlerden az etkilenme özelliği sayesinde sistemin tam modellemesine gerek kalmaz. Bu özelliklerinden dolayı akademik çevrelerde ve endüstriyel bilim merkezlerinde kayan kipli denetim ile ilgili yoğun olarak araştırma yapılmaktadır. Kayan kip tekniği, sarkaç, doğrusal sistem, motor, robot denetiminde ve güç dönüştürücülerde [102], elektropnömatik sistem denetiminde [105], uçuş denetiminde [106], uzay araçlarında [107] kullanılmaktadır (burada geçenler vb. birçok uygulama için bkz. [108]). Kayan kip tekniğinin zayıf yanları çatırdama⁸ etkisi ve yüksek şiddetli denetim sinyallerinin ortaya çıkmasıdır [101, 102].

Yapay potansiyel alanlar/fonksiyonlar yöntemi [109, 110] hareketli erkinlerin çevreleri ile sanal itim-çekim kurallarına göre etkileşimlerini sağlayan basit ve etkili bir planlama stratejisidir. Yapay potansiyel alan kullanımında temel prensip robotları hedefe doğru çekecek ve engellerden uzaklaştıracak eğim alanı olan bir fonksiyon oluşturmaktır [111]. Yapay potansiyel fonksiyonlar sürü sistemlerin ortaya çıkmasından beri sürü içindeki etkileşimi düzenlemek için de kullanılmaktadır [11, 98, 112–115]. Yapay potansiyel fonksiyonların zayıf yanları takılma (yerel minimum), dar ve nesnelere dolu ortamlarda salınım, çok yakın nesnelere arasından geçememe olarak sayılabilir [116]. Yapay potansiyel fonksiyonlar hareketli robotlar, sürü robotlar, yürüyen

⁸ing: chattering

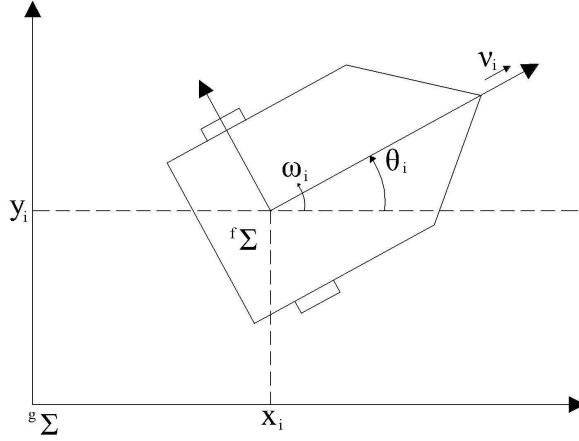
robotlar, insansız hava, kara, sualtı, suüstü araçları, uzay araçları, futbolcu robotlar için yol planlama, güdümlenme, hareket planlama görevlerinde kullanılmaktadırlar [110, 114, 117–124].

Bu çalışmada sürü robot denetimi için kullanılacak olan yapay potansiyel fonksiyonlarla kayan kip tekniğini birleştiren denetim yaklaşımı ilk olarak [125] çalışmasında hareket planlamak için geliştirilmiştir. Çalışmada robotun hız vektörü yapay potansiyel alanın eğimi boyunca yönlendirilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşımın en önemli faydası potansiyel alanın eğiminin hassas takibini sağlamasıdır ki bu yapay potansiyel alanların başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için çok önemlidir [111]. Kayan kip tekniği ve yapay potansiyel fonksiyonlar (armonik potansiyel fonksiyon), [125–127] çalışmalarında hız-kısıtlı olmayan robotlar için güdümlenme ve engel aşma görevlerinde kullanılmıştır. [70, 111, 128] çalışmalarında ise yaklaşım hız-kısıtlı robotlar için geliştirilmiştir. Kayan kip tekniği ve yapay potansiyel fonksiyonların sürü robot denetimi için kullanıldığı çalışmalara [82, 99, 121, 129, 130] örnek gösterilebilir.

BÖLÜM 3

3. HIZ-KISITLI ERKİN MODELİ

Hız-kısıtlı¹ bir araç, düzlemdeki bir konumda herhangi bir yönelimle bulunabilir fakat iki tekerleğin tam ortasındaki hız vektörü her zaman yönelime teğettir [131]. Başka bir deyişle hız-kısıtlı bir araç bir yönde hızlanmak isterse o yöne dönmek zorundadır. Hız-kısıtlı modelle birçok tekerlekli araç, hareketli robotlar ve araba matematiksel olarak ifade edilebilir [131–133].



Şekil 3.1. Hız-kısıtlı robot yapısı.

Bu çalışmada hareket denetimi uygulanacak olan erkinler Şekil 3.1.'de görülen yapıdadır ve hız-kısıtlı dinamiklerle hareket etmektedir. Buna göre \mathbb{R}^2 uzayında hareket eden hız-kısıtlı A erkininin hareket denklemleri,

$$\begin{aligned}\dot{x}_A &= v_A \cos(\theta_A), \\ \dot{y}_A &= v_A \sin(\theta_A), \\ \dot{\theta}_A &= w_A, \\ \dot{v}_A &= \frac{1}{m_A} [F_A + f_{v_A}], \\ \dot{w}_A &= \frac{1}{I_A} [\tau_A + f_{w_A}],\end{aligned}\tag{3.1}$$

şeklinde olur. Yukarıdaki denklemlerde, $p_A(t) = [x_A(t) \ y_A(t)]^T$, A robotunun

¹ing: nonholonomic

t anındaki konumunu (kartezyen koordinatları cinsinden), θ_A yönelme açısını, v_A doğrusal hızını, w_A açısal hızını ve sıfırdan büyük m_A ve I_A sabitleri sırasıyla kütle ve eylemsizlik sabitini temsil etmektedir. A erkinini için kütle m_A 'nın ve eylemsizlik sabiti I_A 'nın kesin değerinin bilinmediği ancak $0 < \underline{M} < m_A < \overline{M}$ ve $0 < \underline{I} < I_A < \overline{I}$ eşitsizliklerini sağlayan \underline{M} , \overline{M} , \underline{I} ve \overline{I} üst ve alt sınırlarının bilindiği varsayılmıştır. A erkininin denetlenmesini sağlayan girdiler; doğrusal kuvvet girdisi F_A ve döndürme kuvveti girdisi τ_A 'dan oluşur. f_{v_A} ve f_{w_A} sistem dinamiklerini sırasıyla kuvvet ve tork girdilerine eklenerek etkileyen, değeri bilinmeyen fakat $|f_{v_A}| < f_v^+$ ve $|f_{w_A}| < f_w^+$ şeklinde sınırlı olduğu bilinen bozan etkenleri ya da gürültüleri belirtmektedir.

Çalışmanın sürü robotlarla ve tek bir robotla (erkinle) ilgili bölümlerinde, notasyonu kolaylaştırmak amacıyla aynı denklemin yazım açısından farklı iki türevi kullanılacaktır. Buna göre N adet erkin ya da robottan oluşan ve \mathbb{R}^2 uzayında hız-kısıtlı dinamiklerle hareket eden bir sürüde erkinler, A_i ($i = 1, \dots, N$) olarak adlandırılırlarsa, hareket denklemleri şu şekilde olur

$$\begin{aligned}
\dot{x}_i &= v_i \cos(\theta_i), \\
\dot{y}_i &= v_i \sin(\theta_i), \\
\dot{\theta}_i &= w_i, \\
\dot{v}_i &= \frac{1}{m_i} [F_i + f_{v_i}], \\
\dot{w}_i &= \frac{1}{I_i} [\tau_i + f_{w_i}],
\end{aligned} \tag{3.2}$$

(3.1) veya (3.2) denkleminde ve Şekil 3.1.'den faydalanılarak hız-kısıtlı modelin daha önce sözel olarak yapılmış olan tanımını matematiksel olarak

$$\dot{x}_i \sin(\theta_i) - \dot{y}_i \cos(\theta_i) = 0$$

şeklinde ifade edilebilir. Burdan robotun iki hareketli tekeri birleştiren doğru boyunca hareket edemeyeceği sonucu çıkar.

Not 1: Bu çalışmada θ_A dahil olmak üzere tüm açılar $(-\pi, \pi]$ aralığından değer aldıkları varsayılmıştır. Bu nedenle açılar üzerindeki tüm toplama işlemleri (mod 2π) olarak ve $-\pi$ radyan kayma ile yapılmıştır. Örneğin $\theta_1 + \theta_2$ ve $\theta_1 - \theta_2$, $[(\theta_1 + \theta_2 + \pi)(\text{mod } 2\pi) - \pi]$ ve $[(\theta_1 - \theta_2 + \pi)(\text{mod } 2\pi) - \pi]$ olarak hesaplanır. Benzer şekilde $\dot{\theta}(t)$ de

$$\dot{\theta}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\theta(t) - \theta(t - \Delta t) + \pi)(\text{mod } 2\pi) - \pi}{\Delta t}$$

şeklinde tanımlanır.

Bu çalışmada [79,82,99] çalışmalarında bulunan sonuçlar geliştirilecek ve kümelenme, dizilim, tek takip ve sürü takip davranışları ele alınacaktır. [79] ve [99] çalışmalarında robotlar

$$M(x_i)\ddot{x}_i + f_i(x_i, \dot{x}_i) = u_i \quad (3.3)$$

denkleminde hareket etmektedir. Bu denklemde, x_i ve u_i sırasıyla robotun (\mathbb{R}^n) uzayındaki konumunu ve denetim sinyalini, $M(x_i)$ ve $f_i(x_i, \dot{x}_i)$ ise sırasıyla ilgili kütle (eylemsizlik) matrisini ve toplanır bozan etkenleri/gürültüleri ifade etmektedir. (3.3) denklemindeki model tüm-eyleyici model olarak bilinir. Bu modelle bazı tüm-yönlü robotlar, bazı robot kolları hatta bazı uzay araçları ifade edilebilir [130]. Bununla birlikte gerçek hayattaki bir çok hareketli erkin (farksal hareketli robotlar, insansız hava araçları) hız-kısıtlıdır veya serbest hareket edemez ve (3.3) ile ifade edilmiş olan modele uymaz. Bu çalışmada hareket denetimi yapılacak olan erkinler de bilindiği gibi farksal hareketli ve hız-kısıtlı yapıdadır ve hareketleri (3.2) denklemleri ile ifade edilir. Bu model tüm-eyleyici (3.3) modeline göre çok daha gerçekçidir ve denetim açısından bakıldığında daha zordur.

Kümelenme, dizilim ve hedef takibi davranışlarını hız-kısıtlı erkinlere yaptırabilmek için yapay potansiyel fonksiyonlarla kayan kip tekniğini birleştiren bir denetim stratejisi uygulanacaktır [101, 102, 129]. [79, 82, 99] çalışmalarında kullanılan denetim yaklaşımı bu bölümde denetlenmek istenen erkin modeline doğrudan uygulanamayacağı için [129, 134, 135] çalışmalarında hız-kısıtlı bir robotun ve sürünün hareketli bir hedefi takip etmesi ve sürü robotların toplanma ve dizilim davranışlarını gerçekleştirmesi için geliştirilmiş olan, yapay potansiyel fonksiyonlar ve kayan kip tekniğini birleştiren denetim yaklaşımı temel olarak alınacaktır.

BÖLÜM 4

4. KÜMELENME, DİZİLİM VE TAKİP PROBLEMLERİ

Bu tez çalışmasının amacı dinamikleri (3.1) denklemleri ile ifade edilen erkinler için hareket denetimi sağlamaktır. Bu görevi gerçekleştirmek için (3.1) denklemindeki $u_1 = F_A$ ve $u_2 = \tau_A$ ve (3.2) denklemindeki $u_{i1} = F_i$ ve $u_{i2} = \tau_i$ denetim girdilerini uygun şekilde tasarlamak gerekmektedir. İncelenecek olan problemler, hedef takibi, kümelenme/dizilim ve belirli bir dizilim halinde hedef takibidir. Bu problemlerin çözümü için yapay potansiyel fonksiyonlar ve kayan kip tekniği kullanılacaktır. Çözüme geçmeden önce çalışılacak olan problemlerin tanımlarını yapmak gerekir. Bu bölümde ve sonraki bölümlerde anlatılacak olan sonuçlar [129, 134, 135] çalışmalarında yayınlanmış ve bu çalışmaların geliştirilmesiyle elde edilmiş sonuçlardır.

4.1. Tek Takip Probleminin Tanımı

Bu kısımda incelenecek olan sistem hareketli bir T hedefinden ve bu hedefi yakalaması ve takip etmesi istenilen hız-kısıtlı A erkininden oluşmaktadır. A erkininin ve T hedefinin t anındaki konumları sırasıyla $p_A(t) = [x_A(t) \ y_A(t)]^\top$ ve $p_T(t) = [x_T(t) \ y_T(t)]^\top$ ile belirtilirse takip problemi şu şekilde ifade edilebilir.

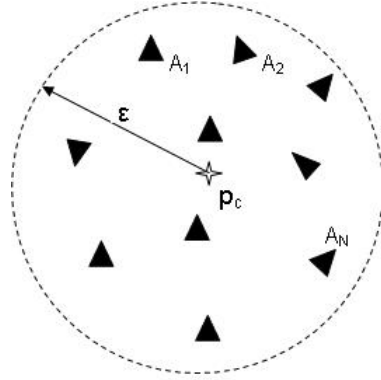
Problem 1 (Takip Problemi) *Dinamikleri (3.1) ile ifade edilmiş bir A robotu ve hareketli bir T hedefi düşünülün. Herhangi bir t anında, A robotunun kendi konumunu, $p_A(t)$, ve T hedefinin konumunu, $p_T(t)$, algılayabildiği varsayılın. Ayrıca bilinen β_{Tv} ve β_{Ta} için hedefin hızının bilindiği ve $\|\dot{p}_T\| \leq \beta_{Tv}$ şeklinde sınırlı olduğu, ivmesinin ise bilinmediği ve $\|\ddot{p}_T\| \leq \beta_{Ta}$ şeklinde sınırlı olduğu varsayılın. Bu varsayımlar ışığında problem, A robotunun $u = [u_1, u_2]^\top = [F_A, \tau_A]^\top$ denetim girdilerini,*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|p_A(t) - p_T(t)\| \leq \epsilon, \quad (4.1)$$

eşitsizliği sağlanacak şekilde tasarlamaktır. (4.1) eşitsizliğindeki $\epsilon > 0$ küçük bir tasarım sabitidir.

4.2. Kümelenme Probleminin Tanımı

Kümelenme davranışı yaptırılacak olan sistem, N adet hız-kısıtlı robottan (erkinden) oluşmaktadır (A_1, \dots, A_N). Kümelenme problemi, rasgele ilk konumlarla hareket etmeye başlayan bir sürünün bir araya gelmesidir. Buna göre, konumları $p_i(t) = [x_i(t) \ y_i(t)]^\top$ vektörleri ile belirtilmiş olan A_i ($i = 1, \dots, N$) robotlarından oluşan bir sürü için Şekil 4.1.'de görülen kümelenme problemi



Şekil 4.1. $N = 10$ elemanlı bir sürü için kümelenme problemi.

Problem 2 (Kümelenme) $A_i, i \in \{1, \dots, N\}$ şeklinde N adet üyeden oluşan ve (3.2) dinamikleriyle hareket eden bir sürü olduğu varsayılın. Sürüyü oluşturan herbir A_i erkininin (robotunun) herhangi bir t anında kendi konumunu ve hızını ve sürüdeki diğer robotların konumlarını ve hızlarını algılayabildiği varsayılın. Bu varsayımlar ışığında problem $u_i = [u_{i1}, u_{i2}]^\top = [F_i, \tau_i]^\top$ denetim girdilerini, herhangi bir $\epsilon > 0$ sabiti için, $t \rightarrow \infty$ iken

$$p_i(t) \rightarrow B_\epsilon(p_c(t)) \quad (4.2)$$

olacak şekilde tasarlamaktır. Burada $p_c(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i(t)$ sürünün merkezini belirtmektedir ve $B_\epsilon(p_c(t)) = \{p_i(t) \in \mathbb{R}^2 : \|p_i(t) - p_c(t)\| \leq \epsilon\}$ de, $p_c(t)$ etrafındaki ϵ yarıçaplı diski belirtmektedir.

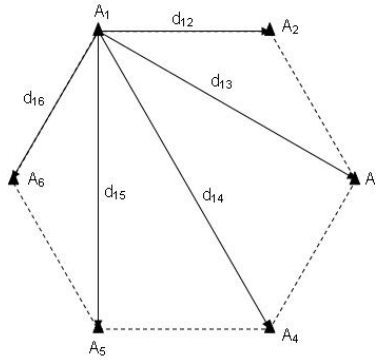
şeklinde ifade edilir. Bu problem, her i ve j için

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|p_i(t) - p_j(t)\| \leq 2\epsilon$$

şeklinde de ifade edilebilir. ϵ robot sürüsünün kümelenme hareketini tamamladığında kaplayacağı alanın büyüklüğünü belirleyen bir parametredir ve sistem tasarımcısı tarafından seçilir. Yukarıdaki problem tanımında, erkinlerin, hız-kısıtlı dinamiklerle hareket etmelerine rağmen, nokta kütle oldukları varsayılmıştır. Erkinlerin gerçek hacimleri olsaydı sürünün yakınsadığında kaplayacağı alanı belirten ϵ çok küçük seçilemezdi ve erkin sayısı ile orantılı olurdu.

4.3. Dizilim Probleminin Tanımı

Önceden belirlenmiş bir geometrik şekli oluşturma ve koruma olarak tanımlanabilecek dizilim denetimi probleminde sistem kümelenme problemindeki gibi N adet, A_1, \dots, A_N olarak adlandırılmış, hız-kısıtlı robottan (erkinden) oluşmaktadır. Buna göre Şekil 4.2.'de görülen dizilim problemi şu şekilde tanımlanır.



Şekil 4.2. $N = 6$ elemanlı bir sürü için dizilim problemi.

Problem 3 (Dizilim Problemi) $A_i, i \in \{1, \dots, N\}$ şeklinde N adet üyeden oluşan ve (3.2) dinamikleriyle hareket eden bir sürü olduğu varsayalım. Sürüyü oluşturan her bir $A_i, i \in \{1, \dots, N\}$ erkininin (robotunun) herhangi bir t anında kendi konumunu ve hızını ve sürüdeki diğer robotların konumlarını ve hızlarını algılayabildiği varsayalım. Bu varsayımlar ışığında problem $u_i = [u_{i1}, u_{i2}]^T = [F_i, \tau_i]^T$ denetim girdilerini sürü üyeleri arasındaki mesafeler, istenilen geometrik şeklin oluşması için gerekli (d_{ij})

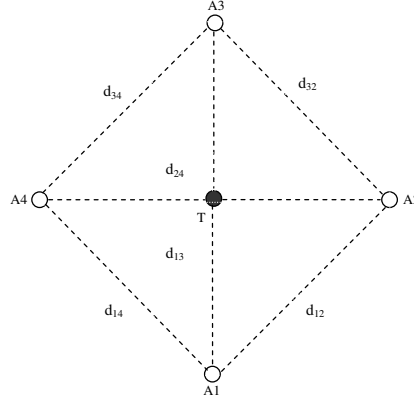
erkinler arası mesafelere ulaşacak ve öyle kalacak şekilde tasarlamaktır. Başka bir deyişle her (i, j) çifti için

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|p_i(t) - p_j(t)\| = d_{ij}, \forall i \neq j \in \{1, \dots, N\} \quad (4.3)$$

olmalıdır.

4.4. Sürü Takip Probleminin Tanımı

Bu kısımda incelenecek olan sistem, N adet hız-kısıtlı erkinden oluşan bir sürü ve bir T hedefinden oluşmaktadır. Sürü takip problemi, sürünün (A_1, \dots, A_N) , kaçan bir hedefi yakalaması, hedefin etrafını sarması ve etrafında dizilim oluşturarak takip etmesidir. Herhangi bir t anında, $p_i(t) = [x_i(t) \ y_i(t)]^T$, A_i erkininin, $p_T(t) = [x_T(t) \ y_T(t)]^T$ de T hedefinin konumunu belirtiyor olsun. Buna göre Şekil 4.3.'de görülen sürü takip problemi şu şekilde ifade edilir.



Şekil 4.3. $N = 4$ elemanlı bir sürü için takip problemi.

Problem 4 (Sürü Takip Problemi) $A_i, i \in \{1, \dots, N\}$ şeklinde N adet üyeden oluşan ve (3.2) dinamikleriyle hareket eden bir sürü ve hareketli bir T hedefi olduğu varsayıl-sın. Sürüyü oluşturan her bir $A_i, i \in \{1, \dots, N\}$ robotunun herhangi bir t anında sürüdeki her A_j robotunun konumunu ve hızını ve T hedefinin de konumu algılaya-bildiği varsayıl-sın. Ayrıca bilinen β_{T_v} ve β_{T_a} sınırları için, T hedefinin hızının bilindiği ve $\|\dot{p}_T(t)\| \leq \beta_{T_v}$ şeklinde sınırlı olduğu, ivmesinin ise bilinmediği ve $\|\ddot{p}_T(t)\| \leq \beta_{T_a}$ şeklinde sınırlı olduğu varsayıl-sın. Bu varsayımlar varlığında problem A_i robotu için

$u_i = [u_{i1} \quad u_{i2}]^\top = [F_i \quad \tau_i]^\top$ denetim girdilerini,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_T(t) \in \text{conv}\{p_1(t), \dots, p_N(t)\} \quad (4.4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| \|p_i(t) - p_j(t)\| - d_{ij} \right| \leq \epsilon, \quad \forall i \neq j \in \{1, \dots, N\} \quad (4.5)$$

sağlanacak şekilde tasarlamaktır. Yukarıdaki denklemlerde $\{d_{ij} | i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j\}$, robotlar istenilen dizilimi oluşturduklarında aralarında olması gereken mesafeleri, $\text{conv}\{p_1, \dots, p_N\}$ sürüyü oluşturan robotların konumları ile belirlenen dışbükey yüzeyi/zarfı¹ belirtmektedir. ϵ parametresi de $\epsilon > 0$ şeklinde bir tasarım sabitidir.

Problem 4'te , (4.5) denklemi dizilim oluşturma/dizilimi koruma alt-görevini, (4.4) denklemi de hedefi takip etme/hedefin etrafını sarma alt-görevini ifade etmektedir.

Problem 1 ve Problem 4'ü çözmek için T hedefinin gerçek konumuna değil, görel konumuna ihtiyaç vardır. Başka bir deyişle $p_T(t)$ değerinin değil $(p_i(t) - p_T(t))$ değerinin bilinmesi yeterlidir.

Hedefin ve diğer robotların hızlarını bilmek kuvvetli bir varsayım olsa da, bağıl hızları, $\dot{p}_A - \dot{p}_T$, $\dot{p}_i - \dot{p}_T$ ve $\dot{p}_i - \dot{p}_j$, tahmin etmeyi sağlayacak görüntü işleme temelli yöntemler vardır [136] ki algoritmanın gerçekleşmesi için görel hızlar da yeterlidir. Hedef takibi ile ilgili gerçek bir uygulamada hedefin hızının yanı sıra ivmesi de tahmin edilmeye çalışılabilirdi, ancak hatalar katlanarak artacağından ve yöntemin gerçekleşmesi için ivmenin üst sınırının bilinmesi yeterli olduğundan bu şekilde bir yaklaşıma ihtiyaç yoktur.

¹ing: convex hull

BÖLÜM 5

5. DENETLEYİCİ TASARIMI

5.1. Yapay Potansiyel Fonksiyonlar

Problem 1, Problem 2, Problem 3 ve Problem 4'ün çözümünde kullanılacak olan yapay potansiyel fonksiyonlarla erkinler arasında ve erkinlerle hedef arasında sanal itim-çekim kuvvetleri oluşturulacaktır. Kullanılacak olan potansiyel fonksiyon uzak mesafelerde çeken yakın mesafelerde iten yapıda olacaktır. Böylece sürü istenilen davranışları gerçekleştirirken çarpışmalar da önlenmiş olacaktır.

5.1.1. Tek Takip

Bu kısımda hedef takibi için kullanılacak olan yapay potansiyel fonksiyon hedef ve takipçi arasındaki uzaklığın ya da hedef ve takipçinin konumlarının fonksiyonu olmalıdır. Ayrıca kullanılacak olan potansiyel fonksiyonun tek minimumu $p_A = p_T$ noktasında olmalıdır. Bu bölümde [79] çalışmasına benzer şekilde

$$J(p_A, p_T) = J(\|p_A - p_T\|) = \frac{1}{2}\|p_A - p_T\|^2 \quad (5.1)$$

fonksiyonu takipçi ve hedef arasındaki çekim kuvvetini hesaplamada kullanılacaktır.

Görüldüğü gibi bu potansiyel fonksiyon takipçi A ve hedef T arasındaki uzaklığa bağlıdır ve $p_A = p_T$ olması dışında her zaman $J > 0$ şartını sağlar. Lyapunov fonksiyonu olarak da kabul edilebilecek bu fonksiyon bir çok olası aday arasından sadeliği sebebiyle seçilmiştir.

(4.1) denklemini sağlayabilmek için seçilmiş olan potansiyel fonksiyonun zamanla azalan bir fonksiyon olması gerekmektedir. Potansiyel fonksiyonun zamanla azalan bir fonksiyon olması için zamana göre türevi $\dot{J} \leq 0$ şartını sağlamalıdır. J 'nin zamana göre türevi

$$\dot{J} = \nabla_{p_A} J^\top(p_A, p_T)(\dot{p}_A - \dot{p}_T) \quad (5.2)$$

olur. Bu türevi bulmak için

$$\nabla_{p_A} J(p_A, p_T) = -\nabla_{p_T} J(p_A, p_T)$$

bilgisinden faydalanılmıştır. Eğer A robotu [79] çalışmasındaki gibi

$$\dot{p}_A = -\sigma \nabla_{p_A} J(p_A, p_T) - \beta \operatorname{sgn}(\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)) \quad (5.3)$$

denklemini sağlayacak şekilde hareket etmeye zorlanırsa ($\sigma > 0$ bir sabit)

$$\dot{J} \leq -\sigma \|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\|_2^2 - \beta \|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\|_1 + \beta_{T_v} \|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\|_1, \quad (5.4)$$

elde edilir. Yukarıdaki denklemden ($\beta \geq \beta_{T_v}$) kullanılarak

$$\dot{J} \leq -\sigma \|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\|_2^2$$

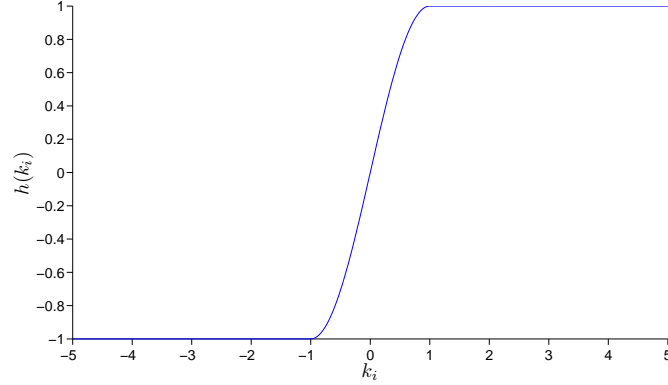
sonucu elde edilir. Bu J fonksiyonunu azalan bir fonksiyon yapar ve $t \rightarrow \infty$, $\nabla_{p_A} J(p_A, p_T) \rightarrow 0$ ve $\dot{J} \rightarrow 0$ olur. Burdan $J \rightarrow s$ (s sabit) sonucu çıkar ve fonksiyonun genel minimumu da $\nabla_{p_A} J(p_A, p_T) = p_A - p_T = 0$ noktası olduğu için $s = 0$ olur. Bu yöntemin bir eksikliği $\operatorname{sgn}(\nabla_{p_A} J(p_A, p_T))$ teriminin türevinin $\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)$ işaret değiştirdiği anlarda sınırsız olmasıdır (İleride anlatılacağı gibi kayan kipli denetleyici geliştirilirken (5.3) eşitliğinin sağ tarafının türevine ihtiyaç olacaktır). Bu sorunu ortadan kaldırmak için sgn fonksiyonunun sürekli ve türevlenebilir bir benzeri kullanılacaktır. Başka bir deyişle A erkininin (robotunun) (5.3) yerine

$$\dot{p}_A = -\sigma \nabla_{p_A} J(p_A, p_T) - \beta h(\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)) \quad (5.5)$$

denklemini sağlayacak şekilde hareket etmesi gerekmektedir. $h : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu, sayıl bir $k_i \in \mathbb{R}$ için,

$$h(k_i) = \begin{cases} -1, & k_i < -\bar{\epsilon} \\ \sin\left(\frac{\pi k_i}{2\bar{\epsilon}}\right), & |k_i| \leq \bar{\epsilon} \\ 1, & k_i > \bar{\epsilon} \end{cases} \quad (5.6)$$

şeklinde tanımlansın. Burada $\bar{\epsilon} > 0$ küçük bir sabittir. Benzer şekilde $k \in \mathbb{R}^n$ olan bir $k = [k_1 \dots k_n]^\top$ vektörü için $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ fonksiyonu $h(k) = [h(k_1) \dots h(k_n)]^\top$ şeklinde tanımlansın. Dikkat edilecek olursa, bu fonksiyonun bir sınır katmanı oluşturduğu ve $[-\bar{\epsilon} \ \bar{\epsilon}]$ aralığı dışında sgn fonksiyonu ile tamamen aynı davranışı gösterdiği görülür. Bu, $\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)$ eğiminin bileşenleri $[-\bar{\epsilon} \ \bar{\epsilon}]$ aralığının dışındayken, (5.3)



Şekil 5.1. $\bar{\epsilon} = 1$ için çizilmiş $h(\cdot)$ fonksiyonu.

ve (5.5) denklemlerinin denk olduğu, dahası (5.4) denkleminin sağlandığı ve J potansiyel fonksiyonunun azalan olduğu anlamına gelmektedir. $\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)$ 'nin bileşenleri $[-\bar{\epsilon} \ \bar{\epsilon}]$ aralığının içindeyken ise potansiyel fonksiyonunun zamana göre türevi

$$\begin{aligned}
\dot{J} \leq & -\sigma \|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\|_2^2 \\
& -\beta \nabla_{p_A} J^\top(p_A, p_T) \sin\left(\frac{\pi \nabla_{p_A} J(p_A, p_T)}{2\bar{\epsilon}}\right) \\
& +\beta_{T_v} \|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\|_1.
\end{aligned} \tag{5.7}$$

olur. Bu denklemin sağ tarafındaki ikinci terim her zaman

$$\beta \nabla_{p_A} J^\top(p_A, p_T) \sin\left(\frac{\pi \nabla_{p_A} J(p_A, p_T)}{2\bar{\epsilon}}\right) \geq 0$$

şartını sağlar. Bu denkleme göre, (5.7) denklemindeki ilk iki terimin toplamının değeri üçüncü terimden küçük olana kadar potansiyel fonksiyon azalan olmaya devam eder. Ancak, potansiyel fonksiyonun eğiminin değeri bir yerden sonra o kadar küçük olur ki (5.7) denkleminde üçüncü terim ilk iki terimin toplamından büyük olur ve potansiyel fonksiyonunun azalan olması daha fazla garanti edilemez. Bununla birlikte, her zaman bu bölge çok küçüktür ve bileşenleri $[-\bar{\epsilon} \ \bar{\epsilon}]$ aralığının içindedir ($[-\bar{\epsilon} \ \bar{\epsilon}] \times [-\bar{\epsilon} \ \bar{\epsilon}]$ bölgesi içindedir).

Belirtilmesi gereken önemli bir konu da denetim yöntemi ile ilgilidir. Hedef takibi

görevi için uygun bir denetim yöntemi

$$\dot{p}_A = -\sigma \nabla_{p_A} J(p_A, p_T) + \dot{p}_T \quad (5.8)$$

olabilir ki erkinler bu denklemi sağlayacak şekilde hareket ettiklerinde potansiyel fonksiyon zamanla azalan fonksiyon olur. Bu stratejinin seçilmemesinin sebebi, 5.2.1. kısmında denetleyici tasarlanırken hedefin ivmesi \ddot{p}_T ile ilgili kesin bilgiye ihtiyaç duyulmasıdır. Bu konu belirtilen bölümde daha detaylı açıklanacaktır.

5.1.2. Kümelenme ve Dizilim

Kümelenme ve dizilim görevlerini gerçekleştirmek için [51, 61, 62] çalışmalarında görülen yapıda bir potansiyel fonksiyon kullanılacaktır.

[61, 62] çalışmalarında, belirli bir $J(p)$ potansiyel fonksiyon sınıfı için eğer robotlar \mathbb{R}^n uzayında

$$\dot{p}_i = -\nabla_{p_i} J(p), \quad (5.9)$$

denklemini sağlayacak şekilde hareket ederlerse Problem 2'de belirtilen kümelenme davranışının sağlanacağı gösterilmiştir. (5.9) denkleminde, $J : \mathbb{R}^{nN} \rightarrow \mathbb{R}$ potansiyel fonksiyonu, $p = [p_1^\top, \dots, p_N^\top]^\top \in \mathbb{R}^{nN}$ de A_i ($i = 1, \dots, N$) erkinlerinin $p_i \in \mathbb{R}^n$ konum vektörlerinden oluşan vektörü belirtmektedir. [61, 62] çalışmalarında görülen potansiyel fonksiyonlar

$$\nabla_{p_i} J(p) = \sum_{j=1, j \neq i}^N g(p_i - p_j), \quad i = 1, \dots, N, \quad (5.10)$$

denklemini sağlamaktadır. Bu denklemdeki $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ her bir erkinle başka bir erkin arasındaki itim-çekimi göstermektedir. Dahası herhangi bir $\bar{p} \in \mathbb{R}^n$ için $g(\bar{p})$

$$g(\bar{p}) = -\bar{p}[g_a(\|\bar{p}\|) - g_r(\|\bar{p}\|)],$$

denklemini sağlamaktadır. Burada uzak mesafelerde etkin olan $g_a(\|\bar{p}\|)$ potansiyelin çekim kısmını, yakın mesafelerde etkin olan $g_r(\|\bar{p}\|)$ de itim kısmını temsil etmektedir. Bu özellikleri sağlayan ve [51, 61] çalışmalarında da kullanılmış olan

$$J(p) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left[\frac{a}{2} \|p_i - p_j\|^2 + \frac{bc}{2} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c}\right) \right], \quad (5.11)$$

potansiyel fonksiyonu bu çalışmada da kullanılacaktır. Bu fonksiyon için $g(p_i - p_j)$

$$g(p_i - p_j) = (p_i - p_j) \left[a - b \exp \left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c} \right) \right] \quad (5.12)$$

olarak bulunur. Burada a , b ve c tasarımı ilgili, dikkatli seçilmesi gereken sıfırdan büyük sabitlerdir. Yakın mesafelerde itim kısmının etkin olması için $b > a$ seçilmesi gerekmektedir. (5.11) denkleminde verilen potansiyel fonksiyon için sürünün kaplayacağı alan

$$\epsilon = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{c}{2}} \exp \left(-\frac{1}{2} \right)$$

olarak bulunur. Yukarıda bulunmuş olan ϵ değeri Lyapunov analiziyle elde edilmiştir ve zayıf bir sınırdır [61]. Gerçekte, robot sürüsünün kaplayacağı alan ϵ 'dan daha küçük olacaktır. Bu nedenle, sürünün kaplayacağı alan ile ilgili bilgi verebilecek ϵ dışında bir başka parametre de potansiyel fonksiyonun itim ve çekim kısımlarının dengelendiği mesafedir. (5.11) denklemini ifade edilen potansiyel fonksiyon için bu mesafe

$$\delta \triangleq \sqrt{c \ln \left(\frac{b}{a} \right)},$$

olur ki bu değer (5.12) denklemini sıfıra eşitleyerek bulunur. Kümelenme ve dizilim problemlerinin çözümünde (5.11) ile ifade edilmiş olan potansiyel fonksiyon kullanılmıştır fakat geliştirilen denetim tekniği [61, 62] çalışmalarında belirtilen şartları sağlayan başka potansiyel fonksiyonlar kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Dizilim denetiminde kullanılacak olan yapay potansiyel fonksiyon da (5.11) denklemini ile belirtilmiş olan fonksiyondur. Bu potansiyel fonksiyonda a , b ve c , sırasıyla a_{ij} , b_{ij} ve c_{ij} olarak değiştirilip, parametreler fonksiyonun minimumunun istenilen dizilimde olacağı şekilde seçileceklerdir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta birçok yapay potansiyel fonksiyonda yerel minimum problemi olmasıdır. Bu nedenle sürünün hareketine istenilen dizilime “yeterince yakın” ilk konumlarla başlaması gerekmektedir. (5.11) ile belirtilmiş olan yapay potansiyel fonksiyon yeniden düzenlendiğinde

$$J(p) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left[\frac{a_{ij}}{2} \|p_i - p_j\|^2 + \frac{b_{ij} c_{ij}}{2} \exp \left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}} \right) \right] \quad (5.13)$$

olur. A_i ve A_j robotları arasındaki itim-çekim kuvvetinin sıfırlandığı uzaklık da

$$\delta_{ij} \triangleq \sqrt{c_{ij} \ln \left(\frac{b_{ij}}{a_{ij}} \right)} = d_{ij}. \quad (5.14)$$

olarak bulunur. a_{ij} , b_{ij} , ve c_{ij} , yukarıdaki denkleme göre $\delta_{ij} = d_{ij}$ olacak şekilde seçilirse $J(p)$ potansiyel fonksiyonunun global minimumu istenilen dizilimde olur. Daha sonra kümelenme davranışı için geliştirilmiş olan denetim yordamı ile dizilim denetimi de sağlanır.

5.1.3. Sürü Takip

Sürü takip görevinde kullanılacak olan potansiyel fonksiyon takip ve dizilim alt-görevlerinin aynı anda gerçekleştirilmesini sağlamak zorundadır. Başka bir deyişle, denetleyici tasarım yordamında temel alınacak olan yapay potansiyel fonksiyon iki bölümden oluşur. Bu bölümler dizilim ve hedef takibi bölümleridir. Bu çalışmada, [51, 61, 62, 82, 99, 129] çalışmalarında kullanılan fonksiyonlar tipinde bir potansiyel fonksiyon kullanılmıştır.

Kullanılan fonksiyon

$$\begin{aligned}
 J(p_1, \dots, p_N, p_T) &= J_T(p_1, \dots, p_N, p_T) + J_F(p_1, \dots, p_N), \\
 J_T(p_1, \dots, p_N, p_T) &= k_T \sum_{i=1}^N J_{iT}(\|p_i - p_T\|), \\
 J_F(p_1, \dots, p_N) &= k_F \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N J_{ij}(\|p_i - p_j\|),
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

yapısındadır.

Yukarıdaki denklemlerde, $J_{iT}(\|p_i - p_T\|)$, A_i erkini ve hedef arasındaki potansiyeli, $J_{ij}(\|p_i - p_j\|)$ de A_i erkini ve A_j erkini arasındaki potansiyeli belirtmektedir. Sıfırdan büyük k_T ve k_F sabitleri potansiyel fonksiyondaki alt-görevlerin (dizilim ve takip) erkinler açısından önemini (ağırlığını) belirlemektedir.

Yukarıdaki açıklamalar ışığında, (5.15)'deki potansiyel fonksiyonlar

$$J_{iT}(\|p_i - p_T\|) = \frac{1}{4} \|p_i - p_T\|^4 \tag{5.16}$$

$$J_{ij}(\|p_i - p_j\|) = \frac{1}{2} \left[a_{ij} \|p_i - p_j\|^2 + b_{ij} c_{ij} \exp \left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}} \right) \right] \tag{5.17}$$

(5.17) denkleminde, a_{ij} , b_{ij} ve c_{ij} , sıfırdan büyük, tasarımla ilgili sabitlerdir. Görüldüğü gibi dizilim alt-görevini gerçekleştirmek için, 5.1.2. kısmında kullanılan

potansiyel fonksiyon kullanılmıştır.

Potansiyel fonksiyonun p_i ve p_T etrafındaki eğimi hesaplanırsa

$$\nabla_{p_i} J(p_1, \dots, p_N, p_T) = k_T \nabla_{p_i} J_{iT}(\|p_i - p_T\|) + k_F \sum_{j=1, j \neq i}^N \nabla_{p_i} J_{ij}(\|p_i - p_j\|) \quad (5.18)$$

$$\nabla_{p_T} J(p_1, \dots, p_N, p_T) = -k_T \sum_{i=1}^N \nabla_{p_i} J_{iT}(\|p_i - p_T\|) \quad (5.19)$$

ve (5.18) ve (5.19) denklemleri birleştirilirse

$$\begin{aligned} \nabla_{p_T} J(p_1, \dots, p_N, p_T) = & - \sum_{i=1}^N \nabla_{p_i} J_{iT}(\|p_i - p_T\|) \\ & + k_F \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \nabla_{p_i} J_{ij}(\|p_i - p_j\|) \end{aligned} \quad (5.20)$$

bulunur. Dizilim kısmında kuvvetlerin karşılıklılık özelliğinden dolayı $(\nabla_{p_i} J_{ij}(\|p_i - p_j\|) = -\nabla_{p_j} J_{ij}(\|p_i - p_j\|))$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \nabla_{p_i} J_{ij}(\|p_i - p_j\|) = 0$$

olur. Bu sonuca göre (5.20) denklemini yeniden düzenlenirse

$$\nabla_{p_T} J(p_1, \dots, p_N, p_T) = - \sum_{i=1}^N \nabla_{p_i} J(p_1, \dots, p_N, p_T) \quad (5.21)$$

olur. (5.21) denkleminde faydalanılarak 5.1.1. bölümüne benzer şekilde yapay potansiyel fonksiyonun zamana göre türevi hesaplanırsa

$$\dot{J} = \sum_{i=1}^N \nabla_{p_i} J^\top(p_1, \dots, p_N, p_T) \dot{p}_i - \sum_{i=1}^N \nabla_{p_i} J^\top(p_1, \dots, p_N, p_T) \dot{p}_T$$

bulunur. \dot{p}_T 'nin, $\|\dot{p}_T\| \leq \beta_{T_v}$ şeklinde üstten sınırlı olduğu daha önce belirtilmişti.

Eğer robotlar 5.1.1. kısmındaki gibi

$$\dot{p}_i = -\sigma \nabla_{p_i} J(p_1 \dots p_N, p_T) - \beta \text{sgn}(\nabla_{p_i} J(p_1 \dots p_N, p_T)) \quad (5.22)$$

denklemini sağlayacak şekilde hareket ederlerse yine aynı kısımda gösterildiği gibi potansiyel fonksiyon azalan olur ve minimumuna yakınsar. Eğer seçilen potansiyel fonksiyonun tek bir minimumu varsa dizilim ve takip koşulları sağlanır. Bununla birlikte çoğu yapay potansiyel fonksiyonda yerel minimum problemi olduğu için robotların harekete ulaşılacak istenilen minimuma “yeterince yakın” ilk konumlarla başlaması gerekir. sgn fonksiyonunun türevindeki sorundan dolayı bu kısımda da robotlar

$$\dot{p}_i = -\sigma \nabla_{p_i} J(p_1 \dots p_N, p_T) - \beta h(\nabla_{p_i} J(p_1 \dots p_N, p_T)) \quad (5.23)$$

denklemini sağlayacak şekilde hareket etmeye zorlanacaktır. Robotlar bu şekilde hareket ettiklerinde $\nabla_{p_i} J(p_1 \dots p_N, p_T)$ 'nin bileşenleri $[-\bar{\epsilon} \quad \bar{\epsilon}]$ bölgesinin içinde çok küçük bir değer alana kadar potansiyel fonksiyonun azalacağı kesindir. Yukarıdaki denklemde kullanılmış olan $h : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonunun tanımı 5.1.1. kısmındaki (5.6) denkleminde verilmiştir.

Potansiyel fonksiyonun (5.15), takip bölümü J_T 'ye (5.16) dikkat edilecek olursa, herhangi bir $y \in \mathbb{R}^2$ ve

$$h_{iT}(\|y\|) = \|y\|^2 \quad (5.24)$$

için

$$\nabla_y J_{iT}(\|y\|) = y h_{iT}(\|y\|) \quad (5.25)$$

olduğu görülür. Bu denklemdeki $h_{iT}(\|y\|)$, $\|y\| = 0$ dışındaki tüm y 'ler için sıfırdan büyüktür. Eğer tüm i değerleri için $\nabla_{p_i} J(p_1, \dots, p_N, p_T) = 0$ olursa, $\sum_{i=1}^N \nabla_{p_i} J(p_1, \dots, p_N, p_T) = 0$ ve (5.17) denkleminde itim-çekim kuvvetlerinin karşılıklılık özelliğinden $\sum_{i=1}^N \nabla_{p_i} J_F(p_1, \dots, p_N) = 0$ olacağı için

$$\sum_{i=1}^N \nabla_{p_i} J_T(p_1, \dots, p_N, p_T) = \sum_{i=1}^N (p_i - p_T) h_{iT}(\|p_i - p_T\|) = 0$$

bulunur [99]. Bu denklem yeniden düzenlenerek

$$\sum_{i=1}^N p_i h_{iT}(\|p_i - p_T\|) = p_T \sum_{i=1}^N h_{iT}(\|p_i - p_T\|).$$

elde edilir. Tüm p_i ve p_T değerleri için $h_{iT}(\|p_i - p_T\|) \geq 0$ olması, sadece $p_i = p_T$ olduğunda $h_{iT}(\|p_i - p_T\|) = 0$ olması ve (5.17) denklemine göre robotlar arasında oluşan itme kuvvetleri dolayısıyla, herhangi bir t anında robotların tamamı hedefle aynı konumda olamaz ve $p_i \neq p_T$ olacak en az bir A_i robotu vardır (A_i için $h_{iT}(\|p_i - p_T\|) > 0$ olması anlamına gelir). Burdan çıkan sonuç $\sum_{i=1}^N h_{iT}(\|p_i - p_T\|) \neq 0$ eşitsizliğinin her zaman sağlandığıdır. Bu bilinenler ışığında yukarıdaki denklem yeniden düzenlenerek

$$p_T = \frac{\sum_{i=1}^N p_i h_{iT}(\|p_i - p_T\|)}{\sum_{i=1}^N h_{iT}(\|p_i - p_T\|)}.$$

elde edilir. $\eta_i, i = 1, \dots, N$ için

$$\eta_i \triangleq \frac{h_{iT}(\|p_i - p_T\|)}{\sum_{i=1}^N h_{iT}(\|p_i - p_T\|)}, i = 1, \dots, N$$

olarak tanımlanırsa denklem

$$p_T = \sum_{i=1}^N \eta_i p_i. \quad (5.26)$$

şekline dönüşür. Tanım gereği $\sum_{i=1}^N \eta_i = 1$ olur. Ayrıca her bir $i \in \{1, \dots, N\}$ için $h_{iT}(\|y\|) \geq 0$ olduğundan, $0 \leq \eta_i \leq 1$ bulunur. Bu analizden, $t \rightarrow \infty$ giderken, eğer tüm i değerleri için $\nabla_{p_i} J(p_1, \dots, p_N, p_T) \rightarrow 0$ sağlanırsa $p_T \rightarrow \text{conv}\{p_1, \dots, p_N\}$ olacağı sonucu çıkar. Başka bir deyişle, $t \rightarrow \infty$, tüm i değerleri için $\nabla_{p_i} J(p_1, \dots, p_N, p_T) = 0$ sağlanırsa Problem 4'teki (4.4) denklemi sağlanmış olur ve erkinler hedefi çevreler.

Sonuç olarak eğer robotlar (5.23) denklemini sağlayacak şekilde hareket ederlerse (5.15), (5.16) ve (5.17) denklemleri ile ifade edilmiş olan potansiyel fonksiyonun, $\nabla_{p_i} J(p_1, \dots, p_N, p_T)$ 'nin bileşenleri $[-\bar{\epsilon} \ \bar{\epsilon}]$ aralığının içinde çok küçük bir değer alana kadar azalacağı kesindir ve Problem 4'de (4.4) ve (4.5) denklemleriyle ifade edilmiş olan takip ve dizilim şartları sağlanır. Başka bir deyişle sürü hedefi yakalayıp etrafını sarar ve hedef etrafında dizilim oluşturur.

5.2. Kayan Kipli Denetim

Bu kısımda, dinamikleri (3.1) ve (3.2) denklemleriyle ifade edilen erkinleri (5.5), (5.9) ve (5.23) denklemlerini sağlayacak şekilde hareket etmeye zorlayacak kayan kipli denetleyicinin tasarımı anlatılacaktır. Bilindiği gibi erkinler (robotlar) bu şekilde hareket ettiklerinde istenilen davranışları gerçekleştireceklerdir. Robotlar için $\|\nabla_{p_i} J(p)\|$ ($\|\nabla_{p_A} J(p)\|$) değerine göre iki adet denetleyici tasarlanacaktır. Bir denetleyici $\|\nabla_{p_i} J(p)\| \neq 0$ ($\|\nabla_{p_A} J(p)\| \neq 0$) durumunda etkin iken diğer denetleyici $\|\nabla_{p_i} J(p)\| = 0$ ($\|\nabla_{p_A} J(p)\| = 0$) iken etkin olacaktır. Bundan böyle, $\|\nabla_{p_i} J(p)\| \neq 0$ ($\|\nabla_{p_A} J(p)\| \neq 0$) (**Durum 1**) olarak, $\|\nabla_{p_i} J(p)\| = 0$ ($\|\nabla_{p_A} J(p)\| = 0$) ise (**Durum 2**) olarak anılacaktır.

5.2.1. Tek Takip

Denklemlerin sadeliği açısından $p \triangleq [p_A^\top, p_T^\top]^\top$ tanımı yapılmış olsun. Amaç robotları (5.5) denklemini sağlayacak şekilde hareket ettirmektir. (5.5) denkleminin sağlanması için

$$-\sigma \nabla_{p_A} J(p) - \beta h(\nabla_{p_A} J(p)) = \begin{bmatrix} v_A \cos(\theta_A) \\ v_A \sin(\theta_A) \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

olmasına ihtiyaç vardır. Buradaki $J(p)$, (5.1) denklemi ile ifade edilmiş olan fonksiyondur.

$$-Z \triangleq -\sigma \nabla_{p_A} J(p) - \beta h(\nabla_{p_A} J(p)) \triangleq \begin{bmatrix} -Z_x \\ -Z_y \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

olarak tanımlansın. Yukarıdaki denklemlerden yola çıkarak takipçi robotun doğrusal hızı ve yönelme açısı hesaplanırsa

$$v_A = \|Z\|, \theta_A = \angle([-Z_x, -Z_y]^\top) \quad (5.29)$$

sonucu bulunur. (5.29) denkleminde $\angle[x, y]^\top$ ifadesi, kartezyen koordinatları cinsinden herhangi bir $[x, y]^\top \in \mathbb{R}^2$ vektörü için x eksenine ile $[x, y]^\top$ vektörü arasındaki açıyı temsil etmektedir.

(3.1) denklemi ile ifade edilmiş olan hız-kısıtlı erkin modelinde girdiler $u_1 = F_A$ ve $u_2 = \tau_A$ olduğu için, v_A ve θ_A için bulunan değerler robota doğrudan uygulanamaz.

Bu nedenle

$$v_d \triangleq \|Z\|, \theta_d \triangleq \angle([-Z_x, -Z_y]^\top), \quad (5.30)$$

v_A ve θ_A için ulaşılmaması gereken hedef değerler olarak düşünülmelidir.

Bu durumda amaç, A erkini (robotu) için $|v_A - v_d|$ ve $|\theta_A - \theta_d|$ farklarını sıfıra (sıfırın komşuluğunda küçük bir değere) götürmektir. Bu amaçla [70, 111, 128] ve [129] çalışmalarındaki gibi biri doğrusal hız v_A için, diğeri de yönelme açısı θ_A için olmak üzere iki adet kayma yüzeyi

Durum 1: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| \neq 0$)

$$s_v = v_A - v_d \quad (5.31)$$

$$s_\theta = c_\theta(\dot{\theta}_A - \dot{\theta}_d) + (\theta_A - \theta_d), \quad (5.32)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| = 0$)

$$s_v = v_A \quad (5.33)$$

$$s_\theta = c_\theta \dot{\theta}_A + \theta_A, \quad (5.34)$$

şeklinde tanımlansın. (5.32) denklemindeki c_θ , $c_\theta > 0$ şeklinde bir sabit, v_A ve θ_A robotun güncel doğrusal hızı ve yönelim açısı, v_d ve θ_d ise (5.30) denkleminde belirtildiği gibi ulaşılmak istenilen doğrusal hız ve yönelme açısıdır. Bu tanımlarla amaç denetim girdileri u_1 ve u_2 'yi, sınırlı zamanda $s_v \rightarrow 0$ ve $s_\theta \rightarrow 0$ olacak şekilde tasarlamaya dönüşür ki $s_v \rightarrow 0$ ve $s_\theta \rightarrow 0$ olduğunda $v_A \rightarrow v_d$ ve $\theta_A \rightarrow \theta_d$ olur. (5.32) denklemindeki ek $c_\theta(\dot{\theta}_A - \dot{\theta}_d)$ terimi, θ_A ile $u_2 = \tau_A$ arasındaki çift integrasyon ilişkisinden kaynaklanır.

Kayan kipli denetim teorisinden bilindiği gibi eğer ulaşma koşulları

$$s_v \dot{s}_v \leq -\varepsilon_1 |s_v| \quad (5.35)$$

$$s_\theta \dot{s}_\theta \leq -\varepsilon_2 |s_\theta| \quad (5.36)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$ sabitleri için sağlanırsa sınırlı zamanda $s_v = 0$ ve $s_\theta = 0$ olur [101, 102].

(5.35) koşulunu sağlayabilmek için A robotunun birinci denetim girdisi $u_1 = F_A$

$$u_1 = -K_1 \text{sgn}(s_v) \quad (5.37)$$

şeklinde seçilsin. Bu denklem kullanılarak s_v 'nin zamana göre türevi hesaplanırsa

Durum 1: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| \neq 0$)

$$\dot{s}_v = -\frac{K_1}{m_A} \text{sgn}(s_v) + \frac{1}{m_A} f_{v_A} - \dot{v}_d$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| = 0$)

$$\dot{s}_v = -\frac{K_1}{m_A} \text{sgn}(s_v) + \frac{1}{m_A} f_{v_A}$$

olur ve **Durum 1** için

$$\begin{aligned} s_v \dot{s}_v &= s_v \left(-\frac{K_1}{m_A} \text{sgn}(s_v) + \frac{1}{m_A} f_{v_A} - \dot{v}_d \right) \\ &= -\frac{K_1}{m_A} |s_v| + \frac{1}{m_A} s_v f_{v_A} - s_v \dot{v}_d \\ &\leq -\left(\frac{K_1}{\underline{M}} - \frac{1}{\underline{M}} f_v^+ - \bar{v}_d \right) |s_v| \end{aligned} \quad (5.38)$$

olur (**Durum 2** için \bar{v}_d olmayacak). Yukarıdaki denklemlerde \bar{v}_d , \dot{v}_d 'nin $|\dot{v}_d| \leq \bar{v}_d$ şeklinde üst sınırını belirtmektedir ve

$$\begin{aligned} |\dot{v}_d| &\leq \|\dot{Z}\| \\ &\leq \sigma \left\| \frac{d}{dt} (\nabla_{p_A} J(p)) \right\| + \beta \left\| \frac{d}{dt} h(\nabla_{p_A} J(p)) \right\| \\ &\leq \sigma \alpha_1(p) + \beta h_1(p) = \bar{v}_d \end{aligned} \quad (5.39)$$

olarak bulunur. (5.39) denkleminde $\alpha_1(p)$ ve $h_1(p)$ ilgili değişkenlerin üst sınırlarını belirtmektedir. $\alpha_1(p)$ 'nin varlığı ve özellikleri tasarımcı tarafından seçilen potansiyel fonksiyonun özelliklerine bağlıdır. Daha yalın anlatımla, istenilen bir $\alpha_1(p)$ olacak

şekilde bir potansiyel fonksiyon seçilebilir. (5.1)'deki potansiyel fonksiyon için $\alpha_1(p)$

$$\left\| \frac{d}{dt}(\nabla_{p_A} J(p)) \right\| = \|\dot{p}_A - \dot{p}_T\| \leq \|\dot{p}_A\| + \beta_{T_v} \triangleq \alpha_1(p).$$

olarak bulunur. Eğer $\nabla_{p_A} J(p) = [J_x(p) \quad J_y(p)]^\top$ olacak şekilde bir tanım yapılırsa $h_1(p)$ de

$$\frac{d}{dt}h(\nabla_{p_A} J(p)) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} (\frac{\pi}{2\bar{\epsilon}}) \cos\left(\frac{\pi J_x(p)}{2\bar{\epsilon}}\right) \frac{d}{dt}(J_x(p)), |J_x(p)| \leq \bar{\epsilon} \\ 0, |J_x(p)| > \bar{\epsilon} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} (\frac{\pi}{2\bar{\epsilon}}) \cos\left(\frac{\pi J_y(p)}{2\bar{\epsilon}}\right) \frac{d}{dt}(J_y(p)), |J_y(p)| \leq \bar{\epsilon} \\ 0, |J_y(p)| > \bar{\epsilon} \end{array} \right. \end{cases} \quad (5.40)$$

eşitliği kullanılarak bulunur.

Eğer K_1 kazancı,

Durum 1: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| \neq 0$)

$$K_1 \geq \frac{\bar{M}}{\underline{M}} [\underline{M}\bar{v}_d + \underline{M}\varepsilon_1 + f_v^+] \quad (5.41)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| = 0$)

$$K_1 \geq \frac{\bar{M}}{\underline{M}} [\underline{M}\varepsilon_1 + f_v^+] \quad (5.42)$$

şeklinde seçilirse (5.35) eşitsizliğinin sağlanması garantilenmiş olur ve sınırlı zamanda $s_v = 0$ olur.

Benzer şekilde (5.36) denklemini sağlamak için ikinci denetim girdisi $u_2 = \tau_A$

$$u_2 = -K_2 \text{sgn}(s_\theta) \quad (5.43)$$

şeklinde seçilirse s_θ 'nın zamana göre türevi

Durum 1: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| \neq 0$)

$$\dot{s}_\theta = -c_\theta \frac{K_2}{I_A} \text{sgn}(s_\theta) + \frac{c_\theta}{I_A} f_{w_A} - c_\theta \ddot{\theta}_d + \omega_A - \dot{\theta}_d \quad (5.44)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| = 0$)

$$\dot{s}_\theta = -c_\theta \frac{K_2}{I_A} \text{sgn}(s_\theta) + \frac{c_\theta}{I_A} f_{w_A} + \omega_A \quad (5.45)$$

olur ve **Durum 1** için

$$\begin{aligned} s_\theta \dot{s}_\theta &= s_\theta \left(-\frac{c_\theta K_2}{I_A} \text{sgn}(s_\theta) + \frac{c_\theta}{I_A} f_{w_A} - c_\theta \ddot{\theta}_d + \omega_A - \dot{\theta}_d \right) \\ &\leq - \left(\frac{c_\theta K_2}{\underline{I}} - \frac{c_\theta}{\underline{I}} f_w^+ - c_\theta \bar{\ddot{\theta}}_d - |\dot{\theta}_d| - |\omega_A| \right) |s_\theta| \end{aligned}$$

olur (**Durum 2** için $\bar{\ddot{\theta}}_d$ ve $|\dot{\theta}_d|$ olmayacak). Eğer K_2

Durum 1: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| \neq 0$)

$$K_2 \geq \frac{\bar{I}}{c_\theta} \left(\frac{c_\theta}{\underline{I}} f_w^+ + c_\theta \bar{\ddot{\theta}}_d + |\dot{\theta}_d| + |\omega_A| + \varepsilon_2 \right), \quad (5.46)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_A} J(p_A, p_T)\| = 0$)

$$K_2 \geq \frac{\bar{I}}{c_\theta} \left(\frac{c_\theta}{\underline{I}} f_w^+ + |\omega_A| + \varepsilon_2 \right), \quad (5.47)$$

sağlanacak şekilde seçilirse (5.36) denklemi sağlanmış olur ve yönelme açısı için tanımlanmış ve (5.32) denklemi ile ifade edilmiş olan kayma yüzeyi sınırlı zamanda $s_\theta = 0$ olur. (5.46) denkleminde $\bar{\ddot{\theta}}_d$, $|\dot{\theta}_d| \leq \bar{\ddot{\theta}}_d$ şeklinde bir üst sınırdır. Ayrıca $|\dot{\theta}_d|$ terimi de üstten sınırlıdır.

s_θ teriminin değerini hesaplayabilmek için θ_d istenilen yönelme açısının zamana göre türevinin bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu türev

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_d &= \frac{\frac{d}{dt} \left(\frac{Z_y}{Z_x} \right)}{1 + \left(\frac{Z_y}{Z_x} \right)^2} \\ &= \frac{\frac{d}{dt} (Z_y) \cdot Z_x - \frac{d}{dt} (Z_x) \cdot Z_y}{(Z_x)^2 \left(1 + \left(\frac{Z_y}{Z_x} \right)^2 \right)} \\ &= \frac{\frac{d}{dt} (Z_y) \cdot Z_x - \frac{d}{dt} (Z_x) \cdot Z_y}{(Z_x)^2 + (Z_y)^2} \end{aligned} \quad (5.48)$$

olarak bulunur. Z_x ve Z_y terimlerinin türevleri (5.40) denklemi ve

$$\frac{d}{dt} (J_x) = \dot{x}_A - \dot{x}_T$$

$$\frac{d}{dt}(J_y) = \dot{y}_A - \dot{y}_T$$

kullanılarak bulunur.

Yönelme açısı için kayma yüzeyi (5.32) denklemi ile tanımlandıktan ve istenilen yönelim açısının türevi (5.48) denklemi ile hesaplandıktan sonra (5.8) ile ifade edilmiş olan denetim stratejisinin neden uygulanmadığı açıklanabilir. Bu strateji uygulansaydı (5.48) denkleminde, $\frac{d}{dt}(Z_y)$ ve $\frac{d}{dt}(Z_x)$ terimlerini hesaplayabilmek için $\ddot{p}_T(t) = [\ddot{x}_T(t) \quad \ddot{y}_T(t)]^\top$ ile ilgili kesin bilgiye ihtiyaç olacaktı ki bu Problem 1'deki varsayımlara ters düşer. Başka bir deyişle bu bölümde kullanılan ve (5.5) ile ifade edilmiş olan denetim stratejisi (5.8) stratejisine göre daha gerçekçi varsayımlara dayanır.

Belirtildiği gibi K_2 teriminin değerini hesaplayabilmek için istenilen yönelim açısının ivmesi ile ilgili ($\bar{\theta}_d \geq |\ddot{\theta}_d|$) şeklindeki üst sınırın bilinmesi gerekmektedir. Bu sınır

$$|\ddot{\theta}_d| \leq \frac{\|\ddot{Z}\|}{\|Z\|} + 2 \left(\frac{\|\dot{Z}\|}{\|Z\|} \right)^2 \leq \bar{\theta}_d.$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemde karesi alınan terim $|\dot{\theta}_d|$ 'ın da üst sınırını belirtmektedir. Ayrıca, $\|Z\|$ teriminin değeri hesaplanabilmektedir ve hiç bir zaman sıfır olmaz çünkü **Durum 1** iken $\|\nabla_{p_A} J(p)\| \neq 0$ eşitsizliği sözkonusudur. Dolayısıyla, $\|Z\| \neq 0$ olur ($\bar{\theta}_d$ ve $\dot{\theta}_d$ terimlerinin değeri sadece **Durum 1** için hesaplanmaktadır). $\|\dot{Z}\|$ 'nin üst sınırı da \bar{v}_d olarak $|\dot{v}_d|$ 'nin üst sınırını hesaplarken bulunmuştu (5.39). Kalan $\|\ddot{Z}\|$ terimi

$$\begin{aligned} \|\ddot{Z}\| &\leq \sigma \left\| \frac{d^2}{dt^2}(\nabla_{p_A} J(p)) \right\| + \beta \left\| \frac{d^2}{dt^2}h(\nabla_{p_A} J(p)) \right\| \\ &\leq \sigma \alpha_2(p) + \beta h_2(p) \end{aligned} \quad (5.49)$$

şeklinde üstten sınırlı olup ilgili terimlerin üst sınırlarını belirten $\alpha_2(p)$ ve $h_2(p)$

$$\alpha_2(p) = \frac{K_1}{M} + \frac{f_v^+}{M} + |v_A| |w_A| + \beta T_a$$

olarak ve

$$\frac{d^2}{dt^2}h(\nabla_{p_A}J(p)) \leq \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\pi}{2\bar{\epsilon}}\right) \alpha_2(p) + \left(\frac{\pi j_x(p)}{2\bar{\epsilon}}\right)^2, |J_x(p)| \leq \bar{\epsilon} \\ 0, |J_x(p)| > \bar{\epsilon} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\pi}{2\bar{\epsilon}}\right) \alpha_2(p) + \left(\frac{\pi j_y(p)}{2\bar{\epsilon}}\right)^2, |J_y(p)| \leq \bar{\epsilon} \\ 0, |J_y(p)| > \bar{\epsilon} \end{array} \right. \end{cases} \quad (5.50)$$

eşitsizliği kullanılarak bulunur. Bu denklemlerde T hedefinin ve A robotunun ivmeleri yerine sırasıyla $\|\ddot{p}_T\| \leq \beta_{Ta}$ ve

$$\|\ddot{p}_A\| \leq \frac{K_1}{M} + \frac{f_v^+}{M} + |v_A|w_A,$$

üst sınırları kullanılmıştır.

5.2.2. Kümelenme ve Dizilim

Denklemlerin sade görünmesi için bu kısımda $p = [p_1^\top, \dots, p_N^\top]^\top \in \mathbb{R}^{2N}$ tanımı yapılmış olsun ($p_i = [x_i, y_i]^\top \in \mathbb{R}^2$ ($i = 1, \dots, N$)). (5.9) denkleminin sağlanması için

$$-Z_i \triangleq \begin{bmatrix} -Z_{ix} \\ -Z_{iy} \end{bmatrix} \triangleq -\nabla_{p_i}J(p) = \begin{bmatrix} v_i \cos(\theta_i) \\ v_i \sin(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

olması gerekmektedir. Buradaki $J(p)$ potansiyel fonksiyonu kümelenme ve dizilim için sırasıyla (5.11) ve (5.13) denklemleriyle tanımlanmıştır.

5.2.1. kısmında olduğu gibi doğrusal hız ve yönelme açısı için ulaşılmak istenilen değerler

$$v_{id} \triangleq \|Z_i\|, \quad \theta_{id} \triangleq \angle([-Z_{ix} - Z_{iy}]^\top) \quad (5.52)$$

olarak seçilir. Bu durumda kayma yüzeyleri de benzer şekilde

Durum 1: ($\|\nabla_{p_i}J(p)\| \neq 0$)

$$s_{v_i} = v_i - v_{id} \quad (5.53)$$

$$s_{\theta_i} = c_\theta(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{id}) + (\theta_i - \theta_{id}), \quad (5.54)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| = 0$)

$$s_{v_i} = v_i \quad (5.55)$$

$$s_{\theta_i} = c_{\theta} \dot{\theta}_i + \theta_i, \quad (5.56)$$

olarak tanımlanabilir.

Sınırlı zamanda $s_{v_i} = 0$ ve $s_{\theta_i} = 0$ olması için ulaşma koşulları

$$s_{v_i} \dot{s}_{v_i} \leq -\varepsilon_1 |s_{v_i}| \quad (5.57)$$

$$s_{\theta_i} \dot{s}_{\theta_i} \leq -\varepsilon_2 |s_{\theta_i}| \quad (5.58)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$ sabitleri için sağlanmalıdır.

(5.57) denkleminin sağlanması için birinci denetim girdisi $u_{i1} = F_i$,

$$u_{i1} = -K_{i1} \text{sgn}(s_{v_i}) \quad (5.59)$$

şeklinde seçilirse s_{v_i} değişkeninin zamana göre türevi

Durum 1: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| \neq 0$)

$$\dot{s}_{v_i} = -\frac{K_{i1}}{m_i} \text{sgn}(s_{v_i}) + \frac{f_{v_i}}{m_i} - \dot{v}_{id}$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| = 0$)

$$\dot{s}_{v_i} = -\frac{K_{i1}}{m_i} \text{sgn}(s_{v_i}) + \frac{f_{v_i}}{m_i}$$

olur. **Durum 1** için $s_{v_i} \dot{s}_{v_i}$ çarpımı da

$$s_{v_i} \dot{s}_{v_i} \leq -\left(\frac{K_{i1}}{M} - \frac{f_{v_i}}{M} - \bar{v}_{id}\right) |s_{v_i}|$$

olur (**Durum 2** için \bar{v}_{id} olmayacak). Yukarıdaki denklemlerde $\bar{v}_{id}, \dot{v}_{id}$ için $|\dot{v}_{id}| \leq \bar{v}_{id}$ şeklinde bir üst sınırdır ve (5.11) potansiyel fonksiyonu için

$$\bar{v}_{id} = \|\dot{p}_i - \dot{p}_j\| \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N \|G(p_i - p_j)\| \right)$$

ve

$$G(p_i - p_j) = aI + b \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c}\right) \left(\frac{2}{c}(p_i - p_j)(p_i - p_j)^\top - I\right)$$

olarak bulunur. Bu sonuca göre K_{i1} ,

Durum 1: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| \neq 0$)

$$K_{i1} \geq \frac{\overline{M}}{\underline{M}} (f_v^+ + \underline{M}\bar{v}_{id} + \underline{M}\varepsilon_1) \quad (5.60)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| = 0$)

$$K_{i1} \geq \frac{\overline{M}}{\underline{M}} (f_v^+ + \underline{M}\varepsilon_1) \quad (5.61)$$

denklemini sağlayacak şekilde seçilirse, (5.57) denklemini sağlanır, kayan kip oluşur ve sınırlı zamanda $s_{v_i} = 0$ olur.

Benzer şekilde ikinci kayma yüzeyi için denetim girdisi

$$u_{i2} = -K_{i2} \text{sgn}(s_{\theta_i}) \quad (5.62)$$

şeklinde seçilirse s_{θ_i} değişkeninin zamana göre türevi

Durum 1: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| \neq 0$)

$$\dot{s}_{\theta_i} = -c_\theta \frac{K_{i2}}{I_i} \text{sgn}(s_{\theta_i}) + c_\theta \frac{f_{w_i}}{I_i} - c_\theta \ddot{\theta}_{id} + \omega_i - \dot{\theta}_{id} \quad (5.63)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| = 0$)

$$\dot{s}_{\theta_i} = -c_\theta \frac{K_{i2}}{I_i} \text{sgn}(s_{\theta_i}) + c_\theta \frac{f_{w_i}}{I_i} + \omega_i \quad (5.64)$$

olur. **Durum 1** için $s_{\theta_i} \dot{s}_{\theta_i}$ çarpımı da

$$s_{\theta_i} \dot{s}_{\theta_i} \leq -\left(\frac{c_\theta K_{i2}}{\underline{I}} - c_\theta \frac{f_w^+}{\underline{I}} - c_\theta \bar{\theta}_{id} - |\dot{\theta}_{id}| - |\omega_i|\right) |s_{\theta_i}| \quad (5.65)$$

olur (**Durum 2** için $\bar{\theta}_{id}$ ve $|\dot{\theta}_{id}|$ olmayacak). K_{i2} denetim girdisi kazancı

Durum 1: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| \neq 0$)

$$K_{i2} \geq \frac{\bar{I}}{c_\theta} \left(c_\theta \bar{\theta}_{id} + |\dot{\theta}_{id}| + |\omega_i| + c_\theta \frac{f_w^+}{\underline{I}} + \varepsilon_2\right) \quad (5.66)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| = 0$)

$$K_{i2} \geq \frac{\bar{I}}{c_\theta} \left(|\omega_i| + c_\theta \frac{f_w^+}{\bar{I}} + \varepsilon_2 \right) \quad (5.67)$$

şeklinde seçilerek (5.58) denkleminin sağlanacağı garantilenir ve sınırlı zamanda $s_{\theta_i} = 0$ olur. Bu denklemlerde $\bar{\theta}_{id}$, 5.2.1. kısmına benzer şekilde $\bar{\theta}_{id}$ için üst sınırı ifade etmektedir ve $|\dot{\theta}_{id}|$ da aynı şekilde üstten sınırlıdır.

Daha önce olduğu gibi s_{θ_i} 'nin değerini hesaplamak için θ_{id} değişkeninin zamana göre türevine ihtiyaç vardır. Bu türev

$$\dot{\theta}_{id} = \frac{\frac{d}{dt}(Z_{iy}) \cdot Z_{ix} - \frac{d}{dt}(Z_{ix}) \cdot Z_{iy}}{(Z_{ix})^2 + (Z_{iy})^2}$$

olarak bulunur. Z_{ix} ve Z_{iy} terimlerinin zamana göre türevleri, (5.11) denklemi kullanılarak

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(J_{x_i}) = \sum_{j=1, j \neq i}^N & \left[\left[\frac{2b(x_i - x_j)(y_i - y_j)}{c} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c}\right) \right] (\dot{y}_i - \dot{y}_j) \right. \\ & \left. - \left[a - b \left(1 - \frac{2(x_i - x_j)^2}{c} \right) \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c}\right) \right] (\dot{x}_i - \dot{x}_j) \right] \end{aligned}$$

ve

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(J_{y_i}) = \sum_{j=1, j \neq i}^N & \left[\left[\frac{2b(x_i - x_j)(y_i - y_j)}{c} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c}\right) \right] (\dot{x}_i - \dot{x}_j) \right. \\ & \left. - \left[a - b \left(1 - \frac{2(y_i - y_j)^2}{c} \right) \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c}\right) \right] (\dot{y}_i - \dot{y}_j) \right] \end{aligned}$$

olarak bulunur.

(5.66) denklemde $\ddot{\theta}_{id}$ 'in üst sınırını belirten $\bar{\ddot{\theta}}_{id}$ 'in değeri

$$|\ddot{\theta}_{id}| \leq \frac{\|\ddot{Z}_i\|}{\|Z_i\|} + 2 \left(\frac{\|\dot{Z}_i\|}{\|Z_i\|} \right)^2 \triangleq \bar{\ddot{\theta}}_{id}$$

denklemi ile hesaplanır. Bu denklemdeki $\|\dot{Z}_i\|$ teriminin üst sınırı \bar{v}_{id} olarak bulunmuştu. $\|\ddot{Z}_i\|$ terimi de $\|\ddot{Z}_i\| \leq \alpha_2(p)$ şeklinde üstten sınırlıdır ve bu üst sınır

$$\alpha_2(p) = \|\dot{p}_i - \dot{p}_j\| \sum_{j=1, j \neq i}^N \|\dot{G}(p_i - p_j)\| + 2 \left(\frac{K_{i1}}{M} + \frac{f_v^+}{M} + |v_i| |w_i| \right) \sum_{j=1, j \neq i}^N \|G(p_i - p_j)\|$$

olarak bulunur. Yukarıdaki denklemde $\dot{G}(p_i - p_j)$

$$\dot{G}(p_i - p_j) = -2 \frac{b_{ij}}{c_{ij}} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}}\right) \left[2(\dot{p}_i - \dot{p}_j)^\top (p_i - p_j) \left(\frac{2}{c_{ij}} (p_i - p_j)(p_i - p_j)^\top - I \right) - 2(\dot{p}_i - \dot{p}_j)(p_i - p_j)^\top \right]$$

olarak hesaplanır.

5.2.3. Sürü Takip

Denklemlerin sadeliği açısından $p_S \triangleq [p_1^\top, \dots, p_N^\top]^\top$ ve $p \triangleq [p_S^\top, p_T^\top]^\top$ tanımları yapılmış ve (5.15), (5.16) ve (5.17) ile belirtilmiş olan yapay potansiyel fonksiyonun, p_i etrafındaki eğimi

$$\nabla_{p_i} J(p) = \begin{bmatrix} J_{x_i}(p) \\ J_{y_i}(p) \end{bmatrix},$$

$$\nabla_{p_i} J_T(p) = \begin{bmatrix} J_{Tx_i}(p) \\ J_{Ty_i}(p) \end{bmatrix}, \quad \nabla_{p_i} J_F(p) = \begin{bmatrix} J_{Fx_i}(p) \\ J_{Fy_i}(p) \end{bmatrix}$$

ile belirtilmiş olsun. (5.15) denkleminden

$$\nabla_{p_i} J(p) = \nabla_{p_i} J_T(p) + \nabla_{p_i} J_F(p)$$

olduğu bilinmektedir. Bu kısımda kullanılan potansiyel fonksiyon (5.15), (5.16) ve (5.17) denklemleri ile tanımlanmıştır ve J_{Tx_i} , J_{Ty_i} , J_{Fx_i} ve J_{Fy_i} bu denklemlerden

$$J_{Tx_i} = w_T \|p_i - p_T\|^2 (x_i - x_T), \quad (5.68)$$

$$J_{Ty_i} = w_T \|p_i - p_T\|^2 (y_i - y_T), \quad (5.69)$$

$$J_{Fx_i} = k_F \sum_{j=1, j \neq i}^N (x_i - x_j) \left[a_{ij} - b_{ij} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}}\right) \right], \quad (5.70)$$

$$J_{Fy_i} = k_F \sum_{j=1, j \neq i}^N (y_i - y_j) \left[a_{ij} - b_{ij} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}}\right) \right]. \quad (5.71)$$

olarak bulunur.

Erkin modelinden (3.2) görüldüğü gibi erkinkerin (robotların) (5.23) denklemini sağlayacak şekilde hareket etmeleri için

$$-Z_i \triangleq \begin{bmatrix} -Z_{ix} \\ -Z_{iy} \end{bmatrix} \triangleq -\sigma \nabla_{p_i} J(p) - \beta h(\nabla_{p_i} J(p)) = \begin{bmatrix} v_i \cos(\theta_i) \\ v_i \sin(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (5.72)$$

olması gerekir.

Bu kısımda geliştirilecek olan kayan kipli denetleyici için doğrusal hız ve yönelme açısı referans değerleri (5.52), kayma yüzeyleri ifadeleri de (5.53), (5.54), (5.55) ve (5.56) denklemlerinde belirtildiği gibidir.

Önceki 5.2.1. ve 5.2.2. kısımlarındaki gibi $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$ sabitleri için ulaşma koşulları

$$s_{v_i} \dot{s}_{v_i} \leq -\varepsilon_1 |s_{v_i}| \quad (5.73)$$

$$s_{\theta_i} \dot{s}_{\theta_i} \leq -\varepsilon_2 |s_{\theta_i}| \quad (5.74)$$

sağlanırsa, sınırlı zamanda $s_{v_i} = 0$ ve $s_{\theta_i} = 0$ olur.

(5.73) denklemini sağlamak için birinci denetim girdisi $u_{i1} = F_i$

$$u_{i1} = -K_{i1} \text{sgn}(s_{v_i}) \quad (5.75)$$

şeklinde seçilirse ve K_{i1} kazancı da

Durum 1: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| \neq 0$)

$$K_{i1} \geq \frac{\bar{M}}{\underline{M}} (\underline{M} \bar{v}_{id} + \underline{M} \varepsilon_1 + f_v^+), \quad (5.76)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| = 0$)

$$K_{i1} \geq \frac{\bar{M}}{\underline{M}} (\underline{M} \varepsilon_1 + f_v^+), \quad (5.77)$$

denklemlerine göre hesaplanırsa (5.73) denklemi sağlanmış olur ve doğrusal hız için seçilmiş olan kayma yüzeyi sınırlı zamanda $s_{v_i} = 0$ olur. (5.76) denklemindeki \bar{v}_{id} üst

sınırı

$$\begin{aligned}
|\dot{v}_{id}| &\leq \|\dot{Z}_i\| \\
&\leq \sigma \left\| \frac{d}{dt}(\nabla_{p_i} J(p)) \right\| + \beta \left\| \frac{d}{dt} h(\nabla_{p_i} J(p)) \right\| \\
&\leq \sigma \alpha_1(p) + \beta h_1(p) = \bar{v}_{id}
\end{aligned} \tag{5.78}$$

olarak bulunur. Bu denklemdaki $\alpha_1(p)$, [129] çalışmasındaki çıkarım bu kısımda kullanılan (5.15) fonksiyonu için geliştirilerek

$$\alpha_1(p) = k_F \|\dot{p}_i - \dot{p}_j\| \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N \|G_F(p_i - p_j)\| \right) + k_T \|\dot{p}_i - \dot{p}_T\| (\|G_T(p_i - p_T)\|) \tag{5.79}$$

olarak yazılabilir. (5.79) denkleminde

$$G_F(p_i - p_j) = a_{ij} I + b_{ij} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}}\right) \left(\frac{2}{c_{ij}}(p_i - p_j)(p_i - p_j)^\top - I\right),$$

ve

$$G_T(p_i - p_T) = 2(p_i - p_T)(p_i - p_T)^\top + \|p_i - p_T\|^2 I$$

olur. $h_1(p)$ de

$$\frac{d}{dt} h(\nabla_{p_i} J(p)) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\pi}{2\bar{\epsilon}}\right) \cos\left(\frac{\pi Jx_i(p)}{2\bar{\epsilon}}\right) \frac{d}{dt}(Jx_i(p)), |Jx_i(p)| \leq \bar{\epsilon} \\ 0, |Jx_i(p)| > \bar{\epsilon} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\pi}{2\bar{\epsilon}}\right) \cos\left(\frac{\pi Jy_i(p)}{2\bar{\epsilon}}\right) \frac{d}{dt}(Jy_i(p)), |Jy_i(p)| \leq \bar{\epsilon} \\ 0, |Jy_i(p)| > \bar{\epsilon} \end{array} \right. \end{cases} \tag{5.80}$$

eşitliği kullanılarak bulunur.

Benzer şekilde yönelme açısı için tanımlanmış olan kayma yüzeyi ile ilgili $u_{i2} = \tau_i$ denetleyicisi,

$$u_{i2} = -K_{i2} \text{sgn}(s_{\theta_i}) \tag{5.81}$$

olarak ve denetim girdisi kazancı K_{i2} de

Durum 1: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| \neq 0$)

$$K_{i2} \geq \frac{\bar{I}}{c_\theta} \left(\frac{c_\theta}{\underline{I}} f_w^+ + c_\theta \bar{\theta}_{id} + |\dot{\theta}_{id}| + |\omega_i| + \varepsilon_2 \right), \quad (5.82)$$

Durum 2: ($\|\nabla_{p_i} J(p)\| = 0$)

$$K_{i2} \geq \frac{\bar{I}}{c_\theta} \left(\frac{c_\theta}{\underline{I}} f_w^+ + |\omega_i| + \varepsilon_2 \right), \quad (5.83)$$

sağlanacak şekilde seçilirse (5.74) denklemi sağlanmış olur ve yönelme açısı için seçilmiş olan kayma yüzeyi sınırlı zamanda $s_{\theta_i} = 0$ olur. Yukarıdaki denklemde $\bar{\theta}_{id}$, $|\dot{\theta}_{id}|$ 'ın üst sınırını belirtmektedir. s_{θ_i} teriminin değerini hesaplayabilmek için θ_{id} 'nin zamana göre türevinin bilinmesi gerekmektedir. Bu türev

$$\dot{\theta}_{id} = \frac{\frac{d}{dt}(Z_{iy}) \cdot Z_{ix} - \frac{d}{dt}(Z_{ix}) \cdot Z_{iy}}{(Z_{ix})^2 + (Z_{iy})^2} \quad (5.84)$$

olarak bulunur. (5.84) denklemindeki Z_{ix} ve Z_{iy} terimlerinin (5.72) denkleminde verilen tanımlarından görüldüğü gibi, $\frac{d}{dt}(Z_{ix})$ ve $\frac{d}{dt}(Z_{iy})$ terimlerinin değerlerini hesaplayabilmek için, potansiyel fonksiyonun p_i noktasındaki eğimini ifade eden (5.68), (5.69), (5.70) ve (5.71) terimlerinin zamana göre türevleri (5.79) denkleminde

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(J_{Tx_i}) &= k_T \left[\left[3(x_i - x_T)^2 + (y_i - y_T)^2 \right] (\dot{x}_i - \dot{x}_T) \right. \\ &\quad \left. + 2(x_i - x_T)(y_i - y_T)(\dot{y}_i - \dot{y}_T) \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(J_{Ty_i}) &= k_T \left[\left[(x_i - x_T)^2 + 3(y_i - y_T)^2 \right] (\dot{y}_i - \dot{y}_T) \right. \\ &\quad \left. + 2(x_i - x_T)(y_i - y_T)(\dot{x}_i - \dot{x}_T) \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(J_{Fx_i}) &= k_F \sum_{j=1, j \neq i}^N \left[\left[\frac{2b_{ij}(x_i - x_j)(y_i - y_j)}{c_{ij}} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}}\right) \right] (\dot{y}_i - \dot{y}_j) \right. \\ &\quad \left. - \left[a_{ij} - b_{ij} \left(1 - \frac{2(x_i - x_j)^2}{c_{ij}}\right) \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}}\right) \right] (\dot{x}_i - \dot{x}_j) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(J_{Fy_i}) &= k_F \sum_{j=1, j \neq i}^N \left[\left[\frac{2b_{ij}(x_i - x_j)(y_i - y_j)}{c_{ij}} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}}\right) \right] (\dot{x}_i - \dot{x}_j) \right. \\ &\quad \left. - \left[a_{ij} - b_{ij} \left(1 - \frac{2(y_i - y_j)^2}{c_{ij}}\right) \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}}\right) \right] (\dot{y}_i - \dot{y}_j) \right] \end{aligned}$$

olarak bulunur. Bu tanımdaki diğer terim olan $h(\nabla_{p_i} J(p))$ teriminin türevi de zaten

daha önce bu kısımda bulunmuştu (5.80).

(5.82) denklemindeki $\bar{\bar{\theta}}_{id}$ üst sınırı,

$$|\ddot{\theta}_{id}| \leq \frac{\|\ddot{Z}_i\|}{\|Z_i\|} + 2 \left(\frac{\|\dot{Z}_i\|}{\|Z_i\|} \right)^2 \triangleq \bar{\bar{\theta}}_{id}$$

denklemini ile hesaplanır. $\|\ddot{Z}_i\|$ terimi

$$\begin{aligned} \|\ddot{Z}_i\| &\leq \sigma \left\| \frac{d^2}{dt^2} (\nabla_{p_i} J(p)) \right\| + \beta \left\| \frac{d^2}{dt^2} h(\nabla_{p_i} J(p)) \right\| \\ &\leq \sigma \alpha_2(p) + \beta h_2(p) \end{aligned} \quad (5.85)$$

şeklinde üstten sınırlıdır. (5.85) denklemindeki $\alpha_2(p)$

$$\begin{aligned} \alpha_2(p) &= k_T \|\dot{p}_i - \dot{p}_T\| \|\dot{G}_T(p_i - p_T)\| + k_T \left(\frac{K_{i1}}{M} + \frac{f_v^+}{M} + |v_i| |w_i| + \beta_{T_a} \right) \|G_T(p_i - p_T)\| \\ &+ k_F \|\dot{p}_i - \dot{p}_j\| \sum_{j=1, j \neq i}^N \|\dot{G}_F(p_i - p_j)\| \\ &+ 2k_F \left(\frac{K_{i1}}{M} + \frac{f_v^+}{M} + |v_i| |w_i| \right) \sum_{j=1, j \neq i}^N \|G_F(p_i - p_j)\| \end{aligned}$$

olarak bulunur. $\dot{G}_T(p_i - p_T)$ ve $\dot{G}_F(p_i - p_j)$ türevleri de

$$\dot{G}_T(p_i - p_T) = 4(\dot{p}_i - \dot{p}_T)(p_i - p_T)^\top + 2(p_i - p_T)^\top (\dot{p}_i - \dot{p}_T)I, \quad (5.86)$$

ve

$$\begin{aligned} \dot{G}_F(p_i - p_j) &= -2 \frac{b_{ij}}{c_{ij}} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{c_{ij}}\right) \\ &\left[2(\dot{p}_i - \dot{p}_j)^\top (p_i - p_j) \left(\frac{2}{c_{ij}} (p_i - p_j)(p_i - p_j)^\top - I \right) - 2(\dot{p}_i - \dot{p}_j)(p_i - p_j)^\top \right] \end{aligned}$$

olur. Son olarak $h_2(p) \geq \left\| \frac{d^2}{dt^2} h(\nabla_{p_i} J(p)) \right\|$,

$$\frac{d^2}{dt^2} h(\nabla_{p_i} J(p)) \leq \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\pi}{2\bar{\epsilon}} \right) \alpha_2(p) + \left(\frac{\pi J_{x_i}(p)}{2\bar{\epsilon}} \right)^2, |J_{x_i}(p)| \leq \bar{\epsilon} \\ 0, |J_{x_i}(p)| > \bar{\epsilon} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\pi}{2\bar{\epsilon}} \right) \alpha_2(p) + \left(\frac{\pi J_{y_i}(p)}{2\bar{\epsilon}} \right)^2, |J_{y_i}(p)| \leq \bar{\epsilon} \\ 0, |J_{y_i}(p)| > \bar{\epsilon} \end{array} \right. \end{cases} \quad (5.87)$$

eşitsizliği kullanılarak bulunur. Bu denklemlerde T hedefinin ve $A_i, i = 1, \dots, N$ robotunun ivmelerinin gerçek değerleri yerine 5.2.1. ve 5.2.2. kısımlarındaki gibi üst sınırları kullanılmıştır.

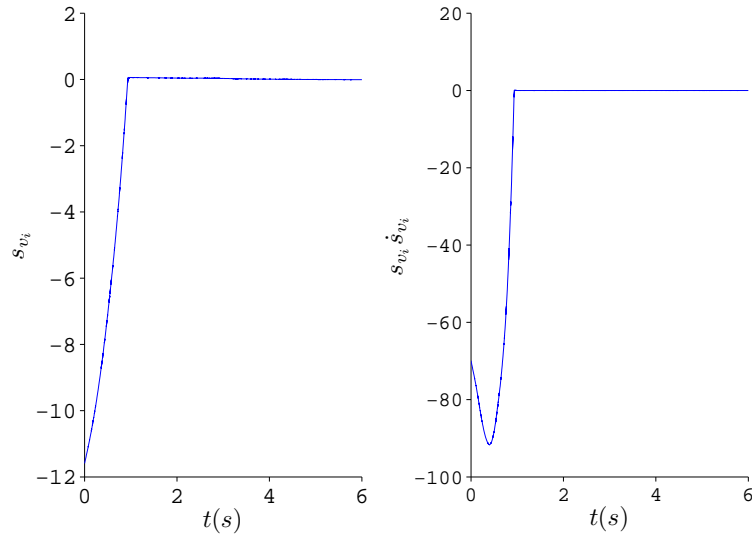
Tüm kayma yüzeylerinde kayan kip oluşuktan ve erkinler istenilen davranışa göre (5.5), (5.9) ve (5.23) denklemlerini sağlayacak şekilde hareket etmeye başladıktan sonra Problem 1, Problem 2, Problem 3 ve Problem 4'ün çözüleceği kesindir.

Bu bölümde geliştirilmiş olan denetleyici ile ilgili önemli bir nokta kayan kip oluşuktan sonra $v_i = v_{id}$ olacağı fakat $\theta_i = \theta_{id}$ olmayacağıdır. Aslında kayan kip oluşuktan sonra üstel hızda $\theta_i \rightarrow \theta_{id}$ olur ve yakınsama hızı kayma yüzeyinin eğimi $-\frac{1}{c_\theta}$ terimine bağlıdır. Bu nedenle hızlı yakınsama için c_θ parametresinin mümkün olduğunca küçük seçilmesi gerekmektedir. Bu parametrenin küçültülmesi K_{i2} denetim kazancının artmasına sebep olur. Ayrıca geliştirilen yöntem, m_A robot kütleini ve I_A robot eylemsizlik momentini etkileyen belirsizlikler ve f_{v_A} ve f_{w_A} şeklinde toplanır bozan etkiler etkisinde dahi düzgün çalışmayı garanti etmektedir ki bunlar son derece gerçekçi varsayımlardır. Yöntemin en önemli eksikliği, diğer robotların ve hedefin sadece konumlarının değil hızlarının da bilinmesinin gerekmesidir. Bu kuvvetli bir varsayımdır.

BÖLÜM 6

6. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde önceki kısımlarda geliştirilmiş olan denetim yönteminin etkinliğini sınavan benzetim sonuçları verilecektir. Yöntemle ilgili değinilmesi gereken bir konu denetim girdileri u_1 ve u_2 hesaplanırken teoride hatasız çalışan sgn fonksiyonunun pratikte süreksiz karakteristiği nedeniyle sayısal sorunlara ve yüksek frekanslı çatırdamaya sebep olabilmesidir. Bu nedenle benzetimlerde sgn fonksiyonunun yerine, γ parametresi $y = 0$ noktası etrafındaki eğimi ve sgn fonksiyonuna benzerliği belirleyen bir sabit olmak üzere, $\tanh(\gamma y)$ fonksiyonu kullanılmıştır. Tek takip ve sürü takip kısımlarında $\gamma = 20$, kümelenme ve dizilim kısımlarında $\gamma = 10$ olarak seçilmiştir.



Şekil 6.1. Birinci erkin için doğrusal hız kayma yüzeyi ($s_{v_i}, i = 1$) ile ilgili şekiller.

Kütle ve eylemsizlik momenti ile ilgili üst ve alt sınırlar sırasıyla $\overline{M} = \overline{I} = 1.2$ ve $\underline{M} = \underline{I} = 1.0$ olarak seçilmiştir. Benzetimlerde kütle ve eylemsizlik momentinin gerçek değeri bilinmemektedir. Benzetimin başında $[1 \quad 1.2]$ aralığından rasgele değer almaktadırlar. Bilinmeyen model belirsizlikleri ya da toplanır bozan etkenler

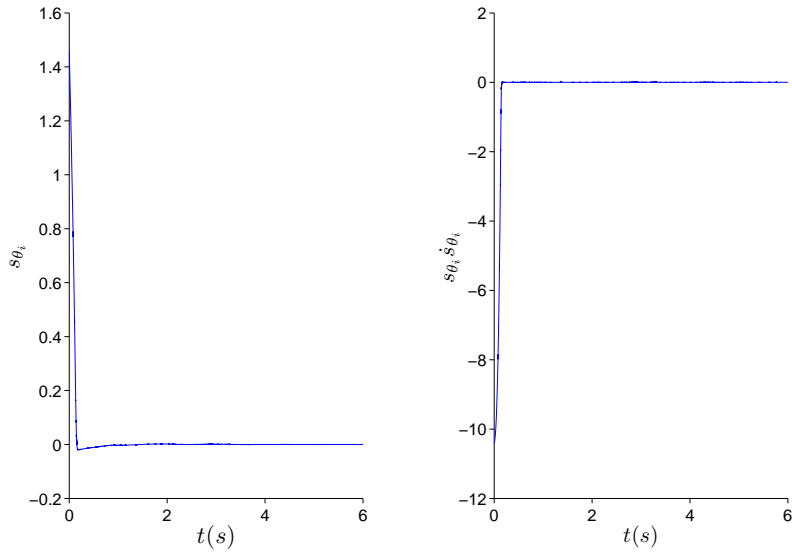
$$f_v(t) = f_w(t) = 1.2 \sin(1.2t)$$

olarak kabul edilmiştir. Burdan, bilinen $f_v^+ = f_w^+ = 1.2$ çıkar.

Hedef takibi ile ilgili görevlerde hedefin hız-kısıtlı olduğu ve

$$\begin{aligned}\dot{x}_T &= v_T \cos(\theta_T), \\ \dot{y}_T &= v_T \sin(\theta_T), \\ \dot{\theta}_T &= w_T,\end{aligned}\tag{6.1}$$

denklemlerine göre hareket ettiği varsayılmıştır. Bu denklemlerdeki v_T , w_T ve θ_T sırasıyla hedefin doğrusal ve açısal hızlarını ve yönelme açısını belirtir.



Şekil 6.2. Birinci erkin için yönelme açısı kayma yüzeyi (s_{θ_i} , $i = 1$) ile ilgili şekiller.

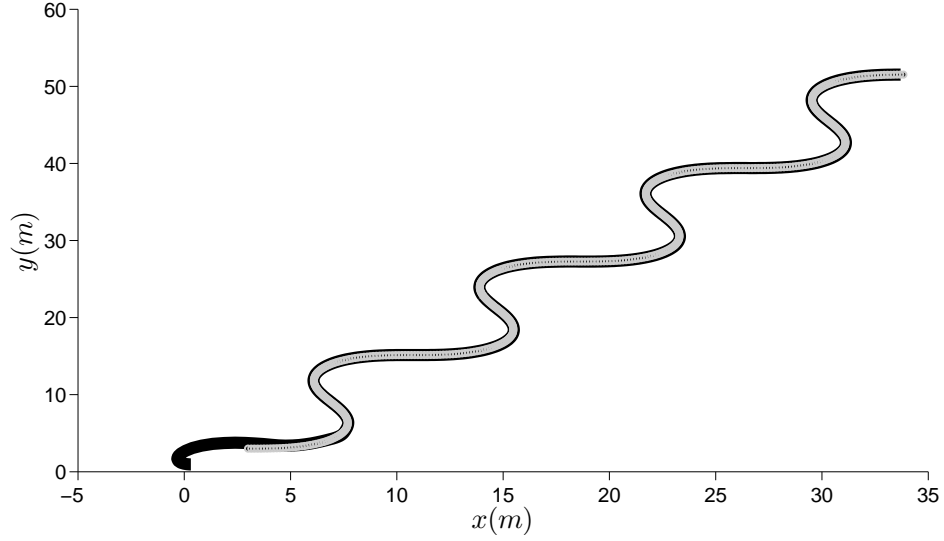
Şekil 6.1. ve Şekil 6.2., kümelenme davranışı sırasında birinci robot için kayma yüzeylerinin ve $s_{v_i} \dot{s}_{v_i}$ ve $s_{\theta_i} \dot{s}_{\theta_i}$ çarpımlarının zamanla değişimini göstermektedir. Şekillerden görüldüğü gibi tasarlanan kayan kipli denetleyiciler çalışmaktadır ve doğrusal hız ve yönelme açısı için tanımlanmış olan kayma yüzeyleri beklenildiği gibi oldukça kısa zamanda (Her iki kayma yüzeyi için de 1 saniyeden daha kısa sürede) sıfıra gitmektedir.

6.1. Tek Takip

Bu kısım için yapılan benzetim 50 saniye sürmektedir. Hedef, \mathbb{R}^2 uzayında (6.1) denklemleri ve

$$\begin{aligned}v_T(t) &= 1.5(m/sn), \\ w_T(t) &= 0.5 \sin(0.5t)(rad/sn).\end{aligned}$$

dinamikleriyle hareket etmektedir. Bu denklemden hedefin hızının ve ivmesinin üst sınırları sırasıyla $\beta_{T_v} = 1.5$ ve $\beta_{T_a} = 0.75$ olarak bulunur. (5.5) denkleminin parametreleri $\sigma = 1$ ve $\beta = 1.6$ ($\beta > \beta_{T_v}$) olarak seçilmiştir. İstenilen robot hareketi denkleminde sgn fonksiyonu yerine kullanılan ve (5.6) denklemi ile verilmiş olan benzer fonksiyonda $\bar{\epsilon} = 0.2$ olarak seçilmiştir.

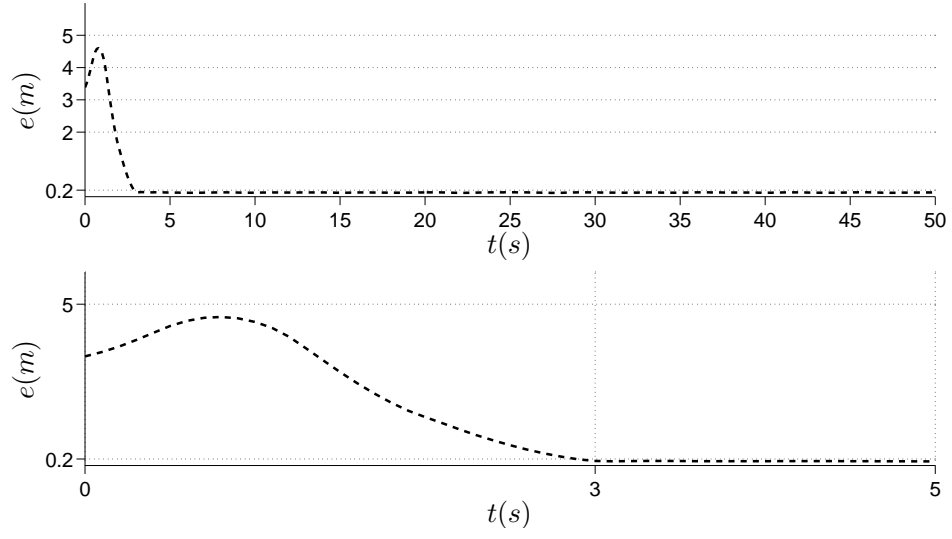


Şekil 6.3. A robotunun ve T hedefinin yolları ($p_T(0) = [3 \ 3]^T$).

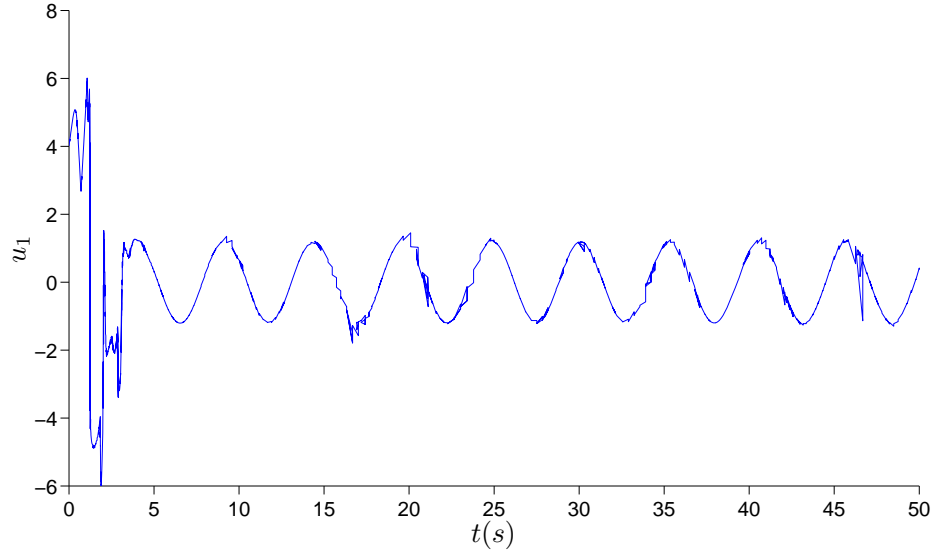
s_θ kayma yüzeyinin ifadesindeki c_θ , $c_\theta = 0.5$ olarak seçilmiştir. T hedefinin ilk konumu $p_T(0) = [3 \ 3]^T$ olarak seçilmiştir. A robotunun ilk konumu $p_A(0)$, $[0 \ 1] \times [0 \ 1]$ kare alanından rasgele seçilmektedir. Kayan kipli denetleyici kazançları benzetimin her adımında (5.41), (5.42), (5.46) ve (5.47) denklemlerine göre hesaplanmaktadır ve ikinci denetim girdisi kazancı K_2 bir satürasyon fonksiyonundan geçirildikten sonra sisteme uygulanmaktadır. Bu kısımda fonksiyonun satürasyon değeri 20 olarak seçilmiştir.

Şekil 6.3., T hedefinin ve A robotunun yollarını göstermektedir. Şekilden rasgele ilk konumla harekete başlayan takipçinin hedefi çabucak yakaladığı ve küçük bir hatayla takip ettiği görülmektedir. Bu sınırlı zamanda $\|p_A(t) - p_T(t)\| \leq \epsilon$ şartının sağlandığını gösterir.

Şekil 6.4., Problem 1'deki (4.1) denkleminin sağlandığını göstermektedir. Şekilde A robotu ile T hedefi arasındaki mesafe ve bu mesafenin x -ekseninde yaklaştırılmış hali çizdirilmiştir. Görüldüğü gibi uzaklık sınırlı zamanda (≈ 6 saniye) sifıra yakın



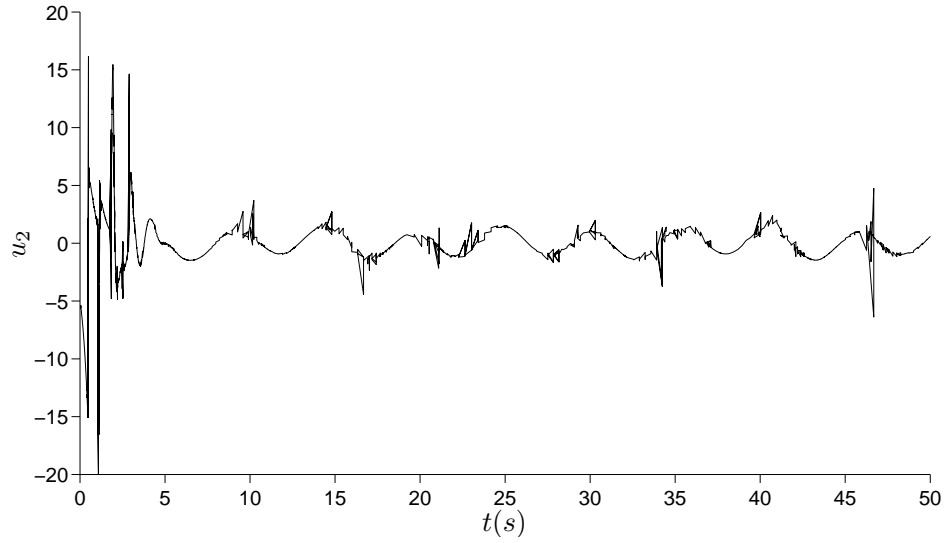
Şekil 6.4. A robotu ile T hedefi arasındaki mesafe.



Şekil 6.5. Birinci denetim girdisi $u_1 = F_A$.

küçük bir değere yakınsamıştır. Bu değer $\bar{\epsilon} = 0.2$ 'nin altındadır.

Şekil 6.5. ve Şekil 6.6., A robotu için u_1 ve u_2 denetim girdilerini göstermektedir. Şekillerden görüldüğü kadarıyla birinci denetim girdisinin kazancı $K_1 \leq 8$ şeklinde üstten sınırlıdır. İkinci denetim girdisinin kazancı K_2 'nin ise sadece benzetimin başlangıcında satürasyona girdiği görülmektedir. Şeklin bu kısmı haricinde K_2 kazancının, $K_2 \leq 15$ şeklinde üstten sınırlı olduğu söylenebilir.



Şekil 6.6. İkinci denetim girdisi $u_2 = \tau_A$.

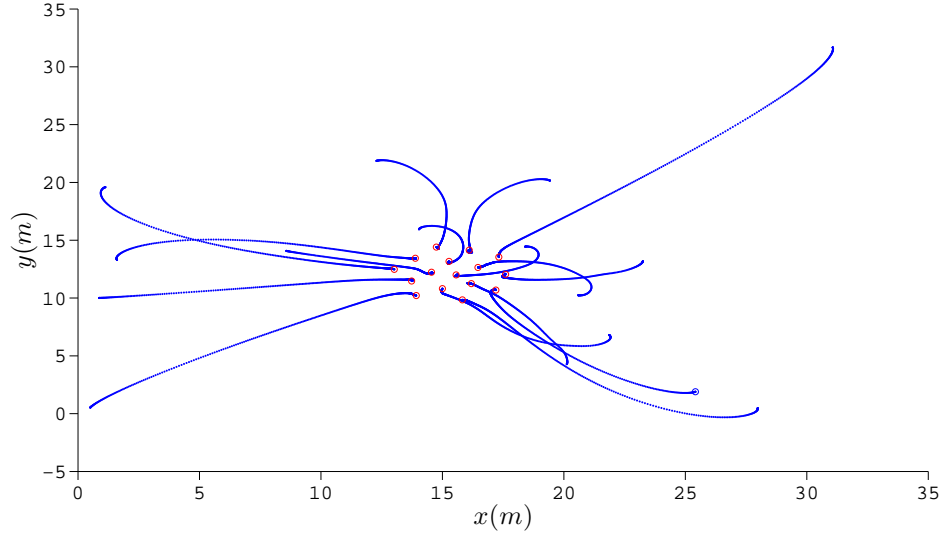
6.2. Kümelene

Bu kısımda robot sürüsünün kümelene davranışı yapması için geliştirilmiş olan denetleyicinin etkinliğini sınyan benzetimlerin sonuçları verilecektir. Benzetimler, $N = 16$ adet robottan (erkinden) oluşyan ve elemanları (3.2) denkleminde görülen hız-kısıtlı dinamiklerle hareket eden bir sürüyle gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda ve dizilim kısmında sürüyü oluşturyan robotların ilk konumları $[0 \ 2N] \times [0 \ 2N]$ aralığında rasgele seçilmektedir. Potansiyel fonksiyon parametreleri $a = 0.05$, $b = 4$, ve $c = 1$ olarak seçilmiştir. Ayrıca eğim parametresi $c_\theta = 0.5$ olarak seçilmiştir.

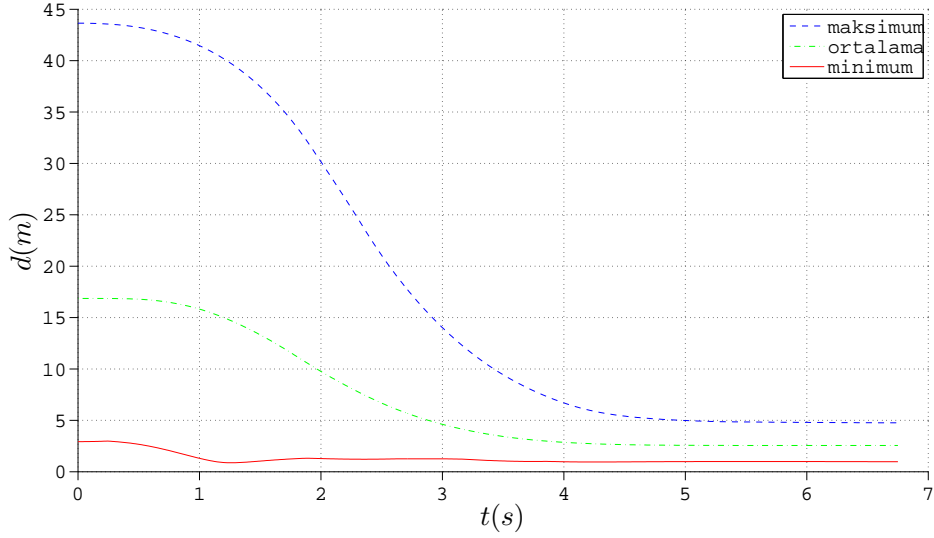
Bu kısımda ve dizilim kısmında denetim girdisi kazançları K_{i1} ve K_{i2} , benzetimin her adımında (5.60), (5.61), (5.66) ve (5.67) denklemlerine göre hesaplanmaktadır. Ayrıca dizilim oluşturma davranışının benzetimlerinde, K_2 , satürasyon fonksiyonundan geçirilmiştir ve satürasyon değeri 75 olarak seçilmiştir. Bu parametrelerle gerçekleştirilen benzetimlerde teorik olarak kanıtlandığı gibi sürünün çabucak kümelene davranışını yaptığı ve kararlı duruma ulaştığı görülmüştür.

Şekil 6.7.'de rasgele ilk konumlarla harekete başlayan sürü üyelerinin benzetim süresince izlediği yollar gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi robotlar kısa zamanda kümelene davranışını gerçekleştirmişlerdir.

Şekil 6.8.'de kümelene davranışı sırasında sürünün üyeleri arasındaki mesafeler çizilmiştir. Şekildeki eğriler sürü üyeleri arasındaki maksimum, minimum ve orta-



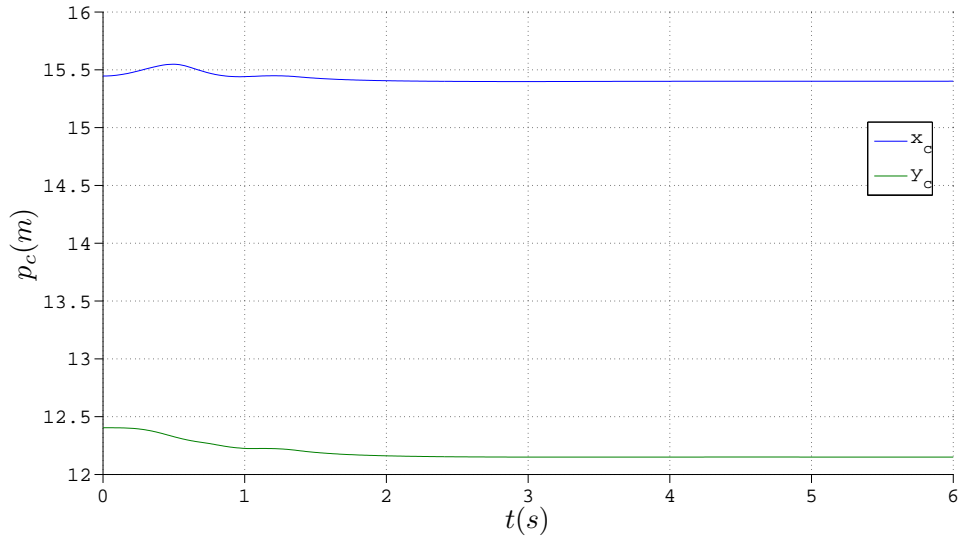
Şekil 6.7. $N = 16$ üyeli bir sürüde erkinlerin izlediği yollar.



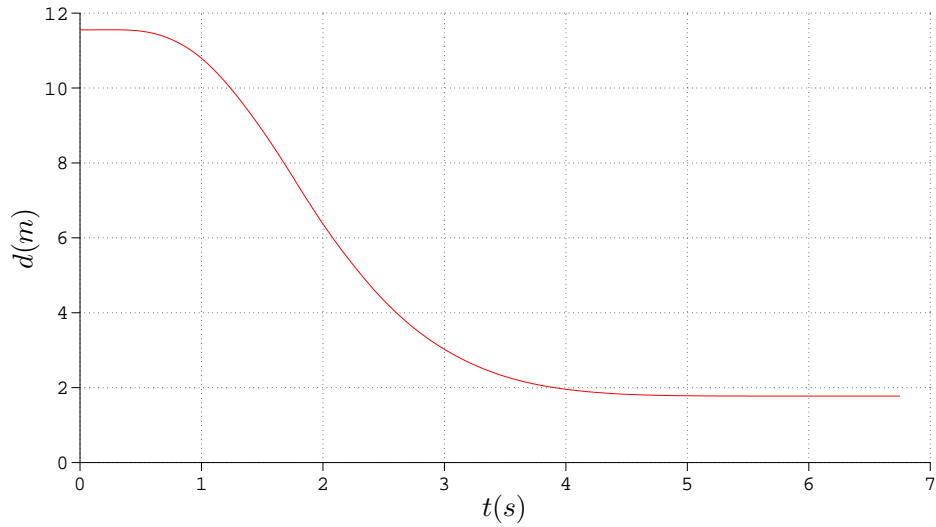
Şekil 6.8. Sürünün üyeleri arasındaki mesafeler.

lama mesafelerin değişimini göstermektedir. Mesafelerin [61] çalışmasındaki gibi sabit bir değere yakınsadığı şekilden gözlenmektedir. Ayrıca minimum mesafenin hiç bir zaman sıfır olmaması erkinler arasındaki itim kuvvetlerinden dolayı çarpışma olmadığının kanıtıdır.

Şekil 6.9.'da sürünün merkezinin hareketi çizilmiştir. Erkinler iki boyutlu uzayda hareket ettikleri için şekilde görülen iki eğri, merkezin x ve y eksenlerindeki hareketini



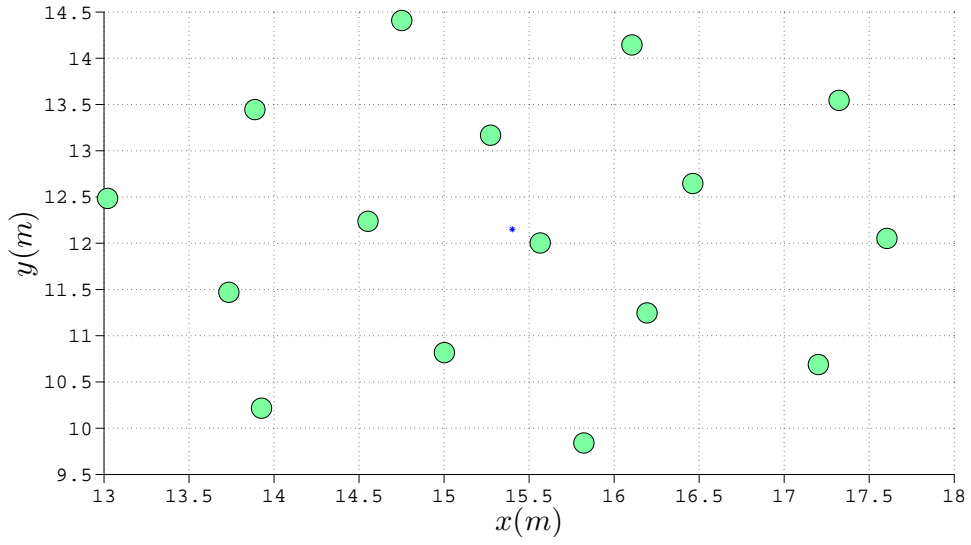
Şekil 6.9. Sürünün merkezinin hareketi.



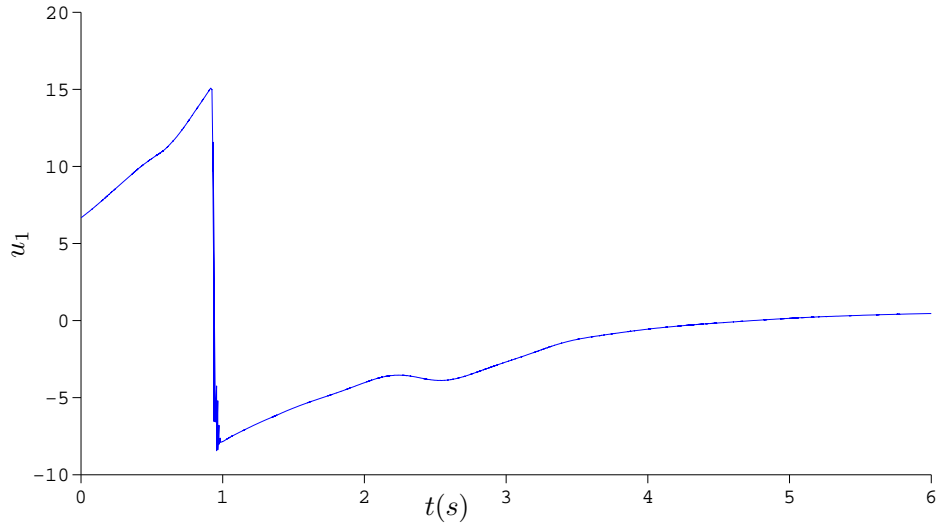
Şekil 6.10. Sürü üyelerinin sürü merkezine ortalama uzaklığı.

göstermektedir. [61] çalışmasında sürünün merkezinin tüm benzetim süresince sabit kalacağı kanıtlanmıştır. Burada ise sürünün merkezinin en azından tüm yüzeylerde kayan kip oluştuğundan sonra sabit kalacağı beklenmektedir ve şekilden de böyle olduğu görülmektedir.

Şekil 6.10.'da sürü üyeleri ile sürünün merkezi arasındaki ortalama mesafe çizilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi mesafe zaman içinde azalarak sabit bir değere yakınsamıştır.



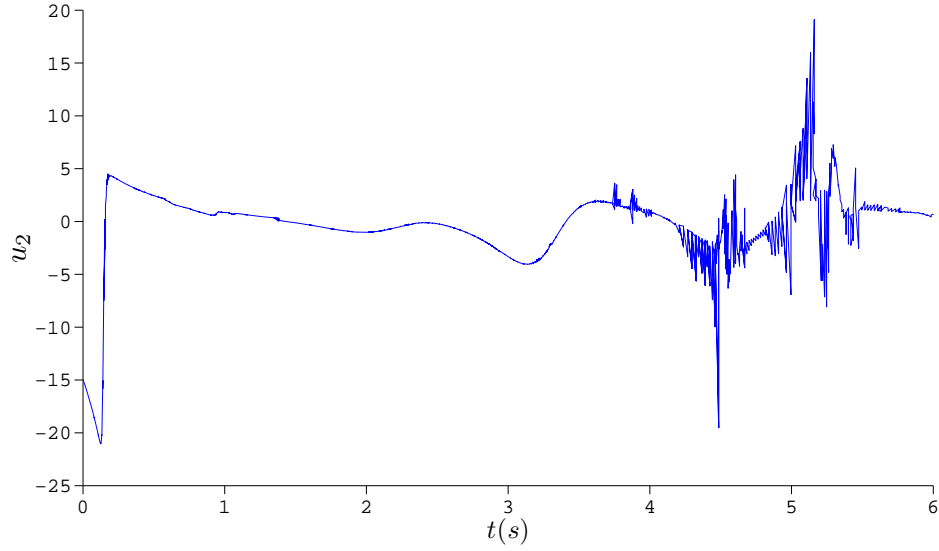
Şekil 6.11. Sürü üyelerinin benzetim sonundaki konumları.



Şekil 6.12. Sürü üyelerinden birinin $u_{i1} = F_i$ denetim girdisi.

Bu da sürünün kümелendiğini göstermektedir.

Şekil 6.11.'de sürü üyelerinin ve sürünün merkezinin son konumları görülmektedir. Yuvarlak olarak çizilmiş olan şekiller sürü üyelerini, şeklin ortasındaki yıldız ise merkezi göstermektedir. Görüldüğü gibi sürü üyelerinin son konumları ızgara benzeri bir şekil oluşturmuştur ve iki erkinin aynı konumu işgal etmesi söz konusu değildir.



Şekil 6.13. Sürü üyelerinden birinin $u_{i2} = \tau_i$ denetim girdisi.

Şekil 6.12. ve Şekil 6.13.'de sürüdeki bir A_i erkininin u_{i1} ve u_{i2} denetim girdileri çizilmiştir. Şekillerden görüldüğü kadarıyla denetim girdilerinin kazançları $K_{i1} \leq 20$ ve $K_{i2} \leq 25$ şeklinde üstten sınırlıdılar. Şekil 6.13.'de benzetim süresinin sonuna doğru görülen titreşimler potansiyel fonksiyonun eğimindeki küçük değişimlerin açılal etkisidir (tüm açılar $(-\pi \ \pi]$ aralığından değer almaktadır). Bu titreşimler fiziksel olarak erkinlerin kendi etraflarında döndükleri anlamına gelmektedir.

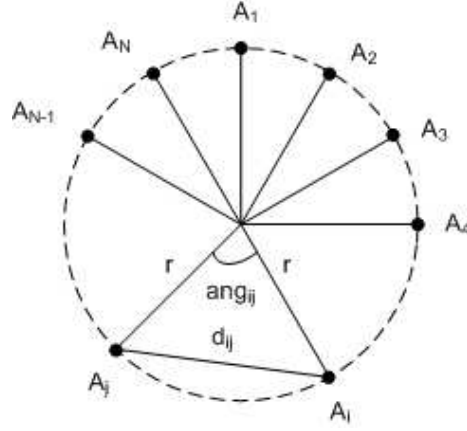
6.3. Dizilim

Bu kısımda sunulacak olan benzetim sonuçları robot sürüsünün dizilim oluşturması için geliştirilmiş olan denetleyicinin etkinliğini sınavan benzetimlerden elde edilmiştir. Bu kısımda sürü 5 erkinden oluşmaktadır ve (5.54) denklemindeki eğim parametresi $c_\theta = 0.5$ olarak seçilmiştir.

Oluşturulmak istenilen dizilim Şekil 6.14.'de gösterildiği gibi, sürü üyelerinin sayısı N 'e bağlı olarak dairesel bir yerleşim olacak şekilde belirlenir. Erkinler arasında olması istenilen mesafeler

$$d_{ij} = \sqrt{2}r\sqrt{1 - \cos(\angle_{ij})}$$

olarak kosinüs teoremi kullanılarak hesaplanır. Yukarıdaki denklemde r yerleşimi be-



Şekil 6.14. İstenilen Dizilim.

lirleyen dairenin yarıçapını ve

$$\angle_{ij} = |i - j| \frac{2\pi}{N}$$

de çemberin merkezi referans alındığında robotların dizilimi oluşturduklarında son konumları arasındaki açığı belirtmektedir. Bu kısımda $r = 1$ olarak alınmıştır.

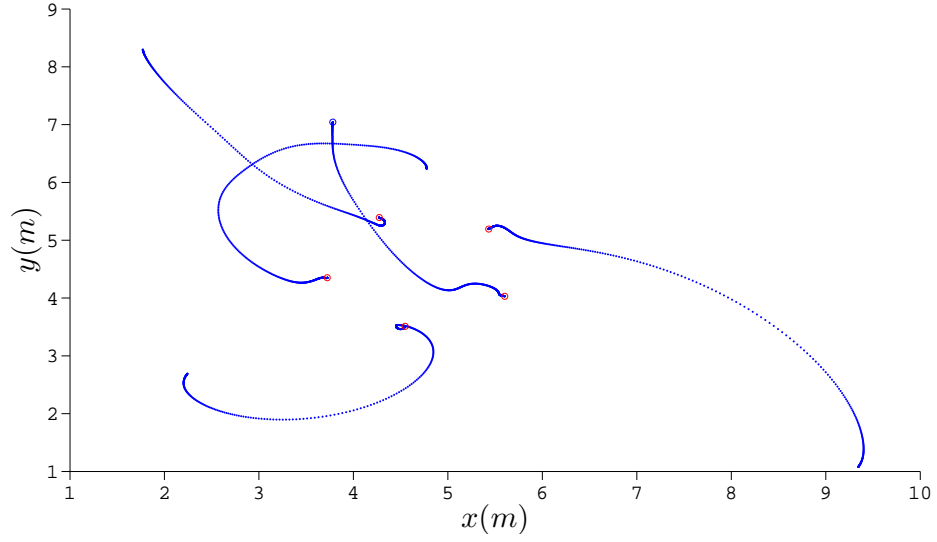
Potansiyel fonksiyonun bu konumlarda minimumunun olması için $b_{ij} = 6$ ve $c_{ij} = 1$ olarak seçilmiş ve a_{ij} de (5.14) denkleminde göre

$$a_{ij} = b_{ij} \exp\left(-\frac{(d_{ij})^2}{c_{ij}}\right)$$

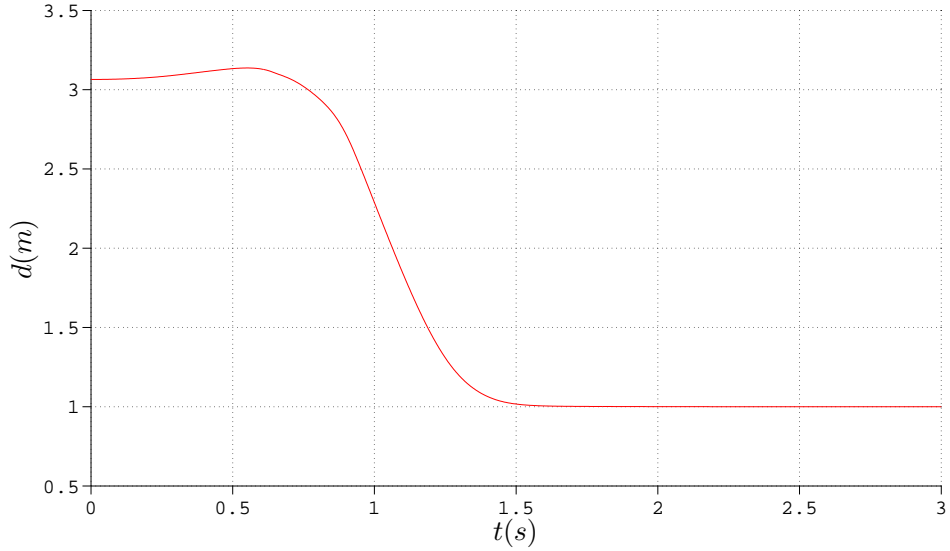
olarak hesaplanmaktadır. Bu parametrelerle gerçekleştirilen benzetimlerde, teorik olarak kanıtlandığı gibi sürünün çabucak istenilen geometrik şekli oluşturduğu ve kararlı duruma ulaştığı görülmüştür.

Şekil 6.15.'de rasgele ilk konumlarla harekete başlayan sürü üyelerinin dizilim oluştururken izlediği yollar gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi erkinler hızlı bir şekilde istenilen geometrik şekli oluşturmuşlardır.

Şekil 6.16.'de sürü üyelerinin merkeze uzaklıklarının ortalama değeri çizilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi uzaklık sabit bir değere yakınsamıştır ve bu değer tahmin



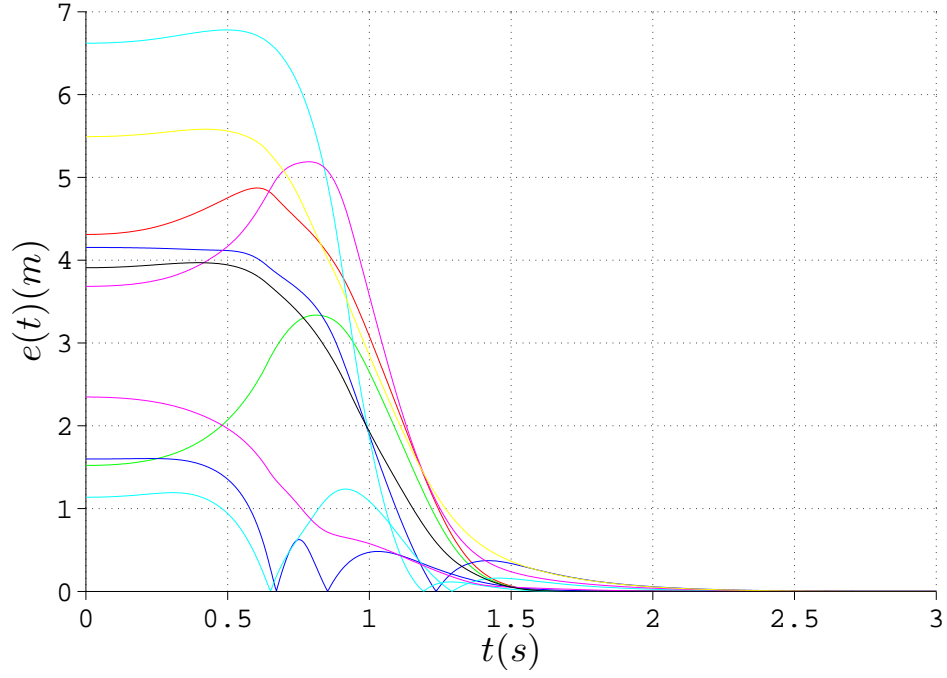
Şekil 6.15. $N = 5$ üyeli bir sürüde erkinlerin izlediği yollar.



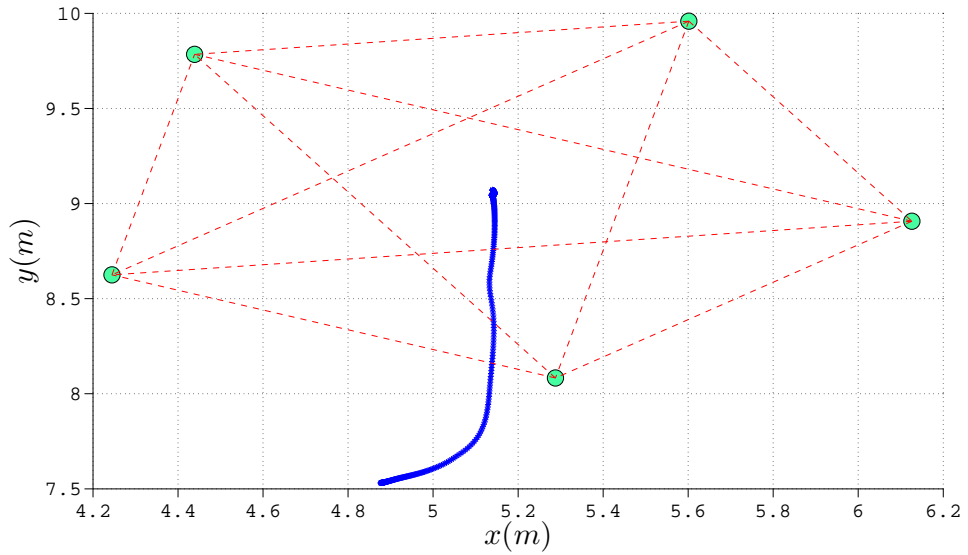
Şekil 6.16. Sürü üyelerinin sürü merkezine ortalama uzaklığı.

edileceği gibi çemberin yarıçapına ($r = 1$) eşittir.

Şekil 6.17., Problem 3'deki dizilim şartının sağlandığını göstermektedir. Şekilde $e(t)$, istenilen mesafelerle (d_{ij}) ölçülen mesafeler arasındaki farkı belirtmektedir ($|\|p_i(t) - p_j(t)\| - d_{ij}|$). Şekilden mesafelerin 2 saniyeden daha kısa bir sürede sifira yakınsadığı gözlenmektedir.

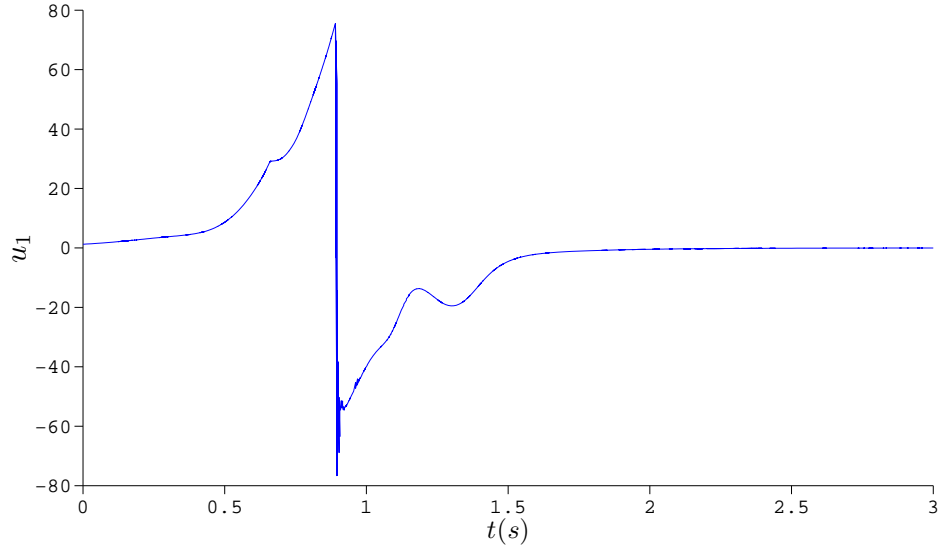


Şekil 6.17. İstenilen ve ölçülen mesafeler arasındaki fark.



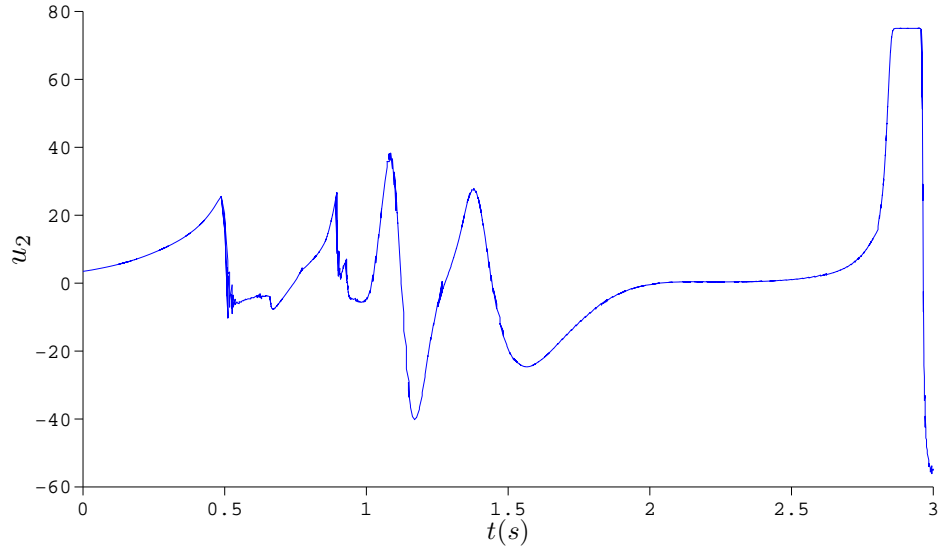
Şekil 6.18. Sürü üyelerinin benzetim sonundaki konumları.

Şekil 6.18.'da sürü üyelerinin benzetim sonundaki konumları çizilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere sürü beklenen dizilim olan eşkenar beşgeni oluşturmuştur. Şekildeki yıldız sürünün merkezinin hareketini göstermektedir.



Şekil 6.19. Sürü üyelerinden birinin $u_{i1} = F_i$ denetim girdisi.

Şekil 6.19. ve Şekil 6.20.'de sürüdeki bir A_i robotunun u_{i1} ve u_{i2} denetim girdileri çizilmiştir. Şekillerden görüldüğü kadarıyla denetim girdisi kazançları, $K_{i1} \leq 80$ ve $K_{i2} \leq 50$ şeklinde üstten sınırlıdır. Benzetim süresinin sonuna doğru K_{i2} kazancı kümelenme kısmında açıklanan sebepten dolayı satürasyona girmektedir.



Şekil 6.20. Sürü üyelerinden birinin $u_{i2} = \tau_i$ denetim girdisi.

6.4. Sürü Takip

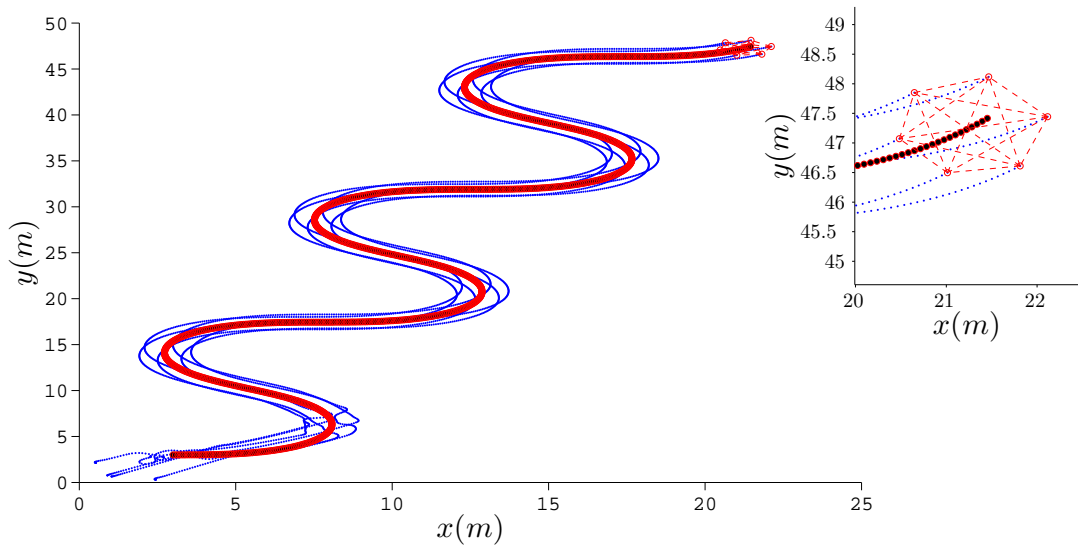
Bu kısımda hareketli bir hedefin hız-kısıtlı robotlarla takibi için geliştirilmiş olan algoritmanın etkinliğini sınavan benzetim sonuçları sunulacaktır. Benzetim süresi 50 saniyedir. Hedef \mathbb{R}^2 uzayında

$$\begin{aligned}v_T(t) &= 1.5(m/sn), \\w_T(t) &= 0.5 \sin(0.4t)(rad/sn).\end{aligned}$$

dinamikleriyle hareket etmektedir. Bu denklemden hedefin hızının ve ivmesinin üst sınırları sırasıyla $\beta_{T_v} = 1.5$ ve $\beta_{T_a} = 0.5$ olarak bulunur. (5.23) denkleminin parametreleri $\sigma = 0.01$ ve $\beta = 1.6$ ($\beta > \beta_{T_v}$) olarak seçilmiştir. sgn fonksiyonu yerine kullanılan ve (5.6) denklemleri ile verilmiş olan fonksiyonda $\bar{\epsilon} = 0.5$ olarak seçilmiştir. (5.15), (5.16) ve (5.17) denklemleriyle tanımlanmış olan yapay potansiyel fonksiyonda $k_T = 1$ ve $k_F = 0.5$ olarak seçilmiştir.

Oluşturulmak istenilen dizilim Şekil 6.14.'de gösterildiği gibi, sürü üyelerinin sayısı N 'e bağlı olarak dairesel bir yerleşim olacak şekilde belirlenir. Burada anlatılan benzetim $N = 6$ içindir. Erkinler arasında olması istenilen mesafeler 6.3. kısımdaki gibi belirlenir.

Potansiyel fonksiyonun bu konumlarda minimumunun olması için $b_{ij} = 4$ ve $c_{ij} = 1$ olarak seçilmiş ve a_{ij} de (5.14) denkleminde göre hesaplanmıştır. Yönelim açısı kayma



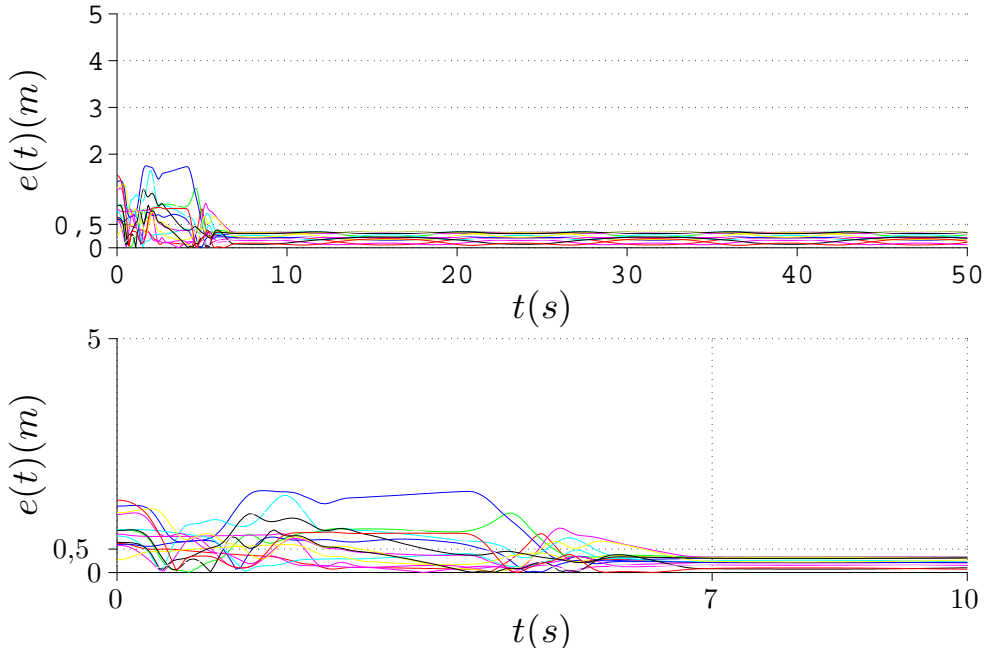
Şekil 6.21. Sürü üyelerinin ve T hedefinin izlediği yollar ($p_T(0) = [3 \ 3]^T$).

yüzeyinin (s_{θ_i}), eğim parametresi c_θ , $c_\theta = 0.1$ olarak seçilmiştir.

Denetim girdisi kazançları K_{i1} ve K_{i2} benzetimin her adımında (5.76), (5.77), (5.82) ve (5.83) denklemlerine göre hesaplanmaktadır ve K_{i2} kazancı bir satürasyon fonksiyonundan geçirildikten sonra sisteme uygulanmaktadır. Bu fonksiyonun satürasyon değeri 40 olarak seçilmiştir.

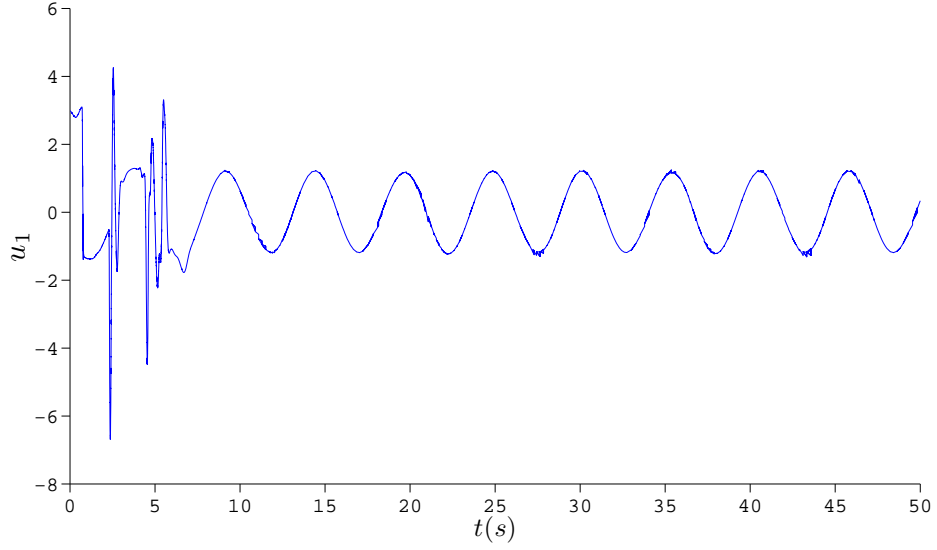
Hedefin ilk konumu $p_T(0) = [3 \ 3]^\top$ olarak ve $A_i, i = 1, \dots, N$ robotunun ilk konumu $p_i(0)$, $[0 \ N/2] \times [0 \ N/2]$ alanından rasgele seçilmektedir. Bu parametrelerle gerçekleştirilen benzetimlerde, teorik olarak kanıtlandığı gibi sürünün çabucak istenilen geometrik şekli oluşturduğu, hedefi yakaladığı, etrafını sardığı ve hedefi takip ettiği görülmüştür.

Şekil 6.21.'de sürü üyelerinin ve hedefin yolları ve yolların benzetim süresinin son bir kaç saniyesi içinde büyütülmüş hali görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi rasgele konumlarla harekete başlayan sürü üyeleri çabucak istenilen dizilimi oluşturup hedefi yakalamış ve etrafını sarmışlardır. Bu şekilden, hedefin sürü üyelerinin konumlarının oluşturduğu dışbükey alan içinde kaldığı görülmektedir $p_T(t) \rightarrow \text{conv}\{p_1(t), \dots, p_N(t)\}$.

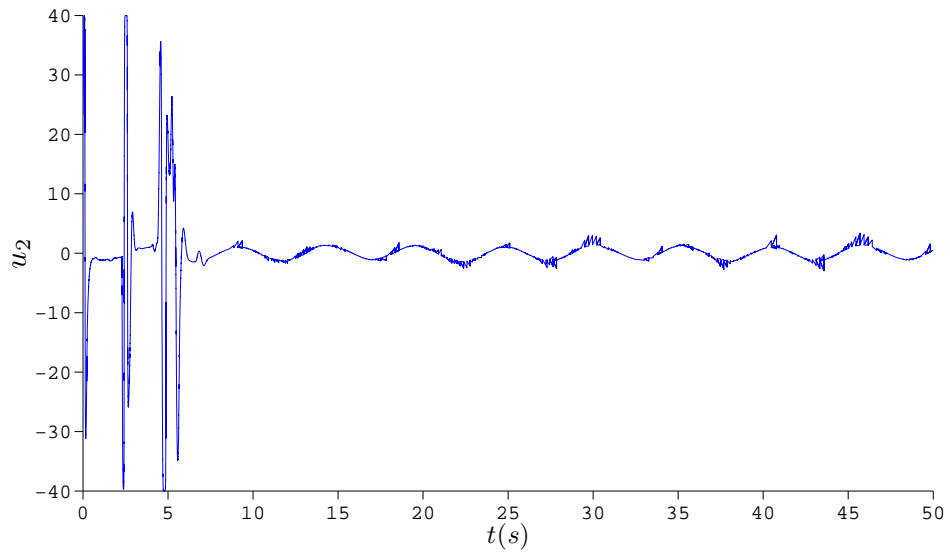


Şekil 6.22. İstenilen ve ölçülen mesafeler arasındaki fark.

Şekil 6.22., Problem 4'teki (4.5) denkleminin sağlandığını göstermektedir. Şeklin x -ekseninde yakınlaştırılmış hali de çizilmiştir. Şekilde istenilen erkinler arası mesafelerle ölçülen mesafeler arasındaki fark çizdirilmiştir ($|\|p_i(t) - p_j(t)\| - d_{ij}|$). Şekilden, mesafelerin yaklaşık 7 saniye içinde beklenildiği gibi küçük değerlere (sıfıra yakın) yakınsadığı gözlenmektedir.



Şekil 6.23. Sürünün üyelerinden birinin $u_{i1} = F_i$ denetim girdisi.



Şekil 6.24. Sürünün üyelerinden birinin $u_{i2} = \tau_i$ denetim girdisi.

Şekil 6.23. ve Şekil 6.24., erkinlerden bir tanesinin (A_i) denetim girdilerini göstermektedir. Şekilden K_{i1} kazancının, $K_{i1} \leq 8$ şeklinde üstten sınırlı olduğu görülmektedir. K_{i2} kazancının ise satürasyona girdiği benzetimin başlangıç bölümü haricinde $K_{i2} \leq 10$ şeklinde üstten sınırlı olduğu söylenebilir.

BÖLÜM 7

7. SONUÇLAR

7.1. Yorumlar

Bu tez çalışmasında üyeleri hız-kısıtlı dinamiklerle hareket eden bir sürünün hareket denetimi çalışılmıştır. Çalışmada sürüye kümelenme, dizilim oluşturma ve hedef takibi gibi davranışlar yaptırılmaya çalışılmıştır. Sürüye bu davranışları yaptırabilmek için yapay potansiyel fonksiyonlarla kayan kip tekniğini birleştiren ve merkezi olmayan bir denetim stratejisi geliştirilmiştir. Yöntemde erkinler (robotlar), kayan kip tekniği ile yapay potansiyel fonksiyonun eğimini takip etmeye zorlanmaktadır. Yapay potansiyel fonksiyonlar da erkinlerin çevreleriyle olan etkileşimlerini itim-çekim temelinde düzenlemek için kullanılmıştır. Teorik analizlerle geliştirilen yöntemin başarısı benzetimlerle sınanmıştır.

Çalışmanın 1. bölümünde, robotik sistemler ve sürü sistemler ile ilgili kısa ve genel bir tanıtım yapılmıştır. Daha sonra 2. bölümde sürü sistemler ile ilgili güncel çalışmalar da dahil olmak üzere birçok farklı çalışma incelenmiş ve bu disiplinde başlangıçtan beri kat edilen yol ve gelinen son nokta ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. 3. bölümde sürü üyelerinin hareketini tarif ettiği varsayılan hız-kısıtlı erkin modeli tanıtılmıştır. 5. bölümünde ise hız-kısıtlı erkinlere (robotlara) tek-takip, kümelenme, dizilim oluşturma ve sürü-takip davranışlarını yaptıracak denetleyicinin tasarımı anlatılmıştır.

Kümelenme davranışında erkinler rasgele ilk konumlarla harekete başlayıp birbirlerine doğru hareket etmektedirler. Dizilim oluşturma davranışı kümelenmeye oldukça benzemektedir fakat bu sefer erkinlerin son konumları arasındaki mesafelerin önceden belirlenmiş bir geometrik şekile yakınsaması beklenmektedir. Tek-takip görevinde hız-kısıtlı bir erkin yine hız-kısıtlı hareket eden ve dinamikleri üstten sınırlı olan bir hedefi yakalamaya ve takip etmeye çalışmaktadır. Sürü takip görevinde ise sürünün, hedefin etrafını sarması ve hedef etrafında dizilim oluşturarak hedefi takip etmesi gerekmektedir. Geliştirilen denetim yöntemiyle anlatılan davranışların tümü başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde daha önce literatürde her yöne hareket edebilen robotlar için elde edilmiş olan sonuçlar [79, 82, 99] denetim açısından daha karmaşık ve zor olan hız-kısıtlı robotlar için geliştirilmiştir.

İlgili bölümlerdeki teorik analizlerden ve benzetimlerden görüldüğü gibi geliştirilen denetim yöntemi başarılı bir şekilde çalışmaktadır. Bu anlamda, tez çalışması amacına ulaşmıştır. Geliştirilen yöntemle sadece burada anlatılan davranışlar değil floklama veya toplu beslenme vb. gibi başka davranışlar da denetlenebilir [129]. Geliştirilen yöntem gürbüzdür, sistem parametrelerindeki üstten ve alttan sınırlı bozulmalardan ve belirsizliklerden etkilenmemektedir. Benzetimlerde, istenilen erkinler arası mesafelerle ölçülen mesafeler arasındaki fark, sürü merkezine olan ortalama uzaklık, yakınsama süresi gibi incelemelerle sadece yöntemin başarısı değil etkinliği de sınanmıştır.

Geliştirilen yöntemde her erkin diğer erkinlerin ve davranışa göre hedefin konum ve hız bilgilerine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle takip görevlerinde hedefin hızının bilinmesi kuvvetli bir varsayımdır fakat daha önce bahsedildiği gibi hedefin hızını tahmin ederek bu varsayımı yumuşatacak yöntemler mevcuttur. Her erkinin diğer tüm erkinlerin konumlarını bilmesi benzetimlerde sorun yaratmasa da gerçek bir uygulamada iletişim yükünü arttırarak sürünün verimini düşürebilir. Bu varsayım bu yöntemin çalışması için olmazsa olmaz bir şart değildir ve sonuçlar belirli bir haberleşme komşuluk yapısı için de genişletilebilir. Yöntemin eksikliklerinden biri de denetleyici uygulanırken özellikle ikinci denetim girdisinde yüksek şiddetli sayılabilecek denetim sinyallerinin ortaya çıkmasıdır.

7.2. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Ne kadar başarılı olursa olsun her çalışmada geliştirilmesi/değiştirilmesi gereken yanlar vardır. Bu çalışmada da geliştirilmesi gereken veya gelecekte yapılabilecek çalışmalar olarak değerlendirilebilecek konular vardır. Bu konuların birçoğu yöntemi daha uygulanabilir hale getirmeye yöneliktir. Bu konulardan biri, yöntemin, sınırlı iletişim komşuluğunda analiz edilmesi ve benzetimlerle sınanmasıdır. Ayrıca yöntemin konum veya mesafe algılama hatalarından etkilenip etkilenmediği ve etkileniyorsa ne kadar etkilendiği iyi bir araştırma konusu olabilir. Hedefin hızının tahmin edilmesi de yöntemi daha gerçekçi hale getirmek açısından önemlidir. Denetim sinyallerinin şiddetinin düşürülmesi veya denetimin üstten sınırlı denetim sinyalleri varlığında gerçekleştirilmesi bu çalışmanın konusu olmamakla beraber gelecek çalışmalar için önerilebilecek başka bir konudur.

Yukarıda sayılanlar dışında bir konuda ortamda nesnelere olduğu durumlarda aynı davranışların gerçekleştirilmesidir. Geliştirilen yöntem yapay potansiyel tabanlı olduğu için bu tip bir geliştirme potansiyele ortamdaki nesnelere (engellerle) etkileşimi sağlayacak fazladan bir terim eklenerek gerçekleştirilebilir. Böyle bir ortamda

sürü takip görevi sırasında dizilim değiştirme/dizilimi koruma davranışları da gözlemlenebilir.

Bütün bu sayılanlardan daha önemli bir çalışma konusu da geliştirilen yöntemin gerçek bir robot sürüsü/takımı üzerinde denenmesidir. Böyle bir çalışma yapabilmek için kayan kip tekniğinin robotlara zarar verebilecek çatırdama etkisini ortadan kaldıracak sınır katmanı yaklaşımı, integrasyon ve filtreleme vb. tekniklere ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- [1] “Robofesta.” erişim adresi: <http://robots.open.ac.uk/minicourse/>, erişim tarihi: 10 Nisan 2008.
- [2] “Wikipedia.” erişim adresi: <http://en.wikipedia.org/wiki/Robot>, erişim tarihi: 12 Nisan 2008.
- [3] Beni, G., Wang, J., Swarm intelligence, Proc. of the Seventh Annual Meeting of the Robotics Society of Japan, 425–428, 1989.
- [4] Martinoli, A., Collective complexity out of individual simplicity, *Artificial Life*, 7, 315–319, 2001.
- [5] Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, New York, 1999.
- [6] Reynolds, C.W., Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, *Comp. Graph.*, 21, 25–34, 1987.
- [7] Resnick, M., *Turtles, termites, and traffic jams: explorations in massively parallel microworlds*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1994.
- [8] LaValle, S., Lin, D., Guibas, L., Latombe, J., Motwani, R., Finding an unpredictable target in a workspace with obstacles, Proc. of the IEEE Int’l Conf. on Robotics and Automation, 737–742, 1997.
- [9] Lakemeyer, G., Sklar, E., Sorrenti, D.G., Takahashi, T., eds., *RoboCup 2006: Robot Soccer World Cup X*, Lecture Notes in Computer Science, 4434, Springer, 2007.
- [10] Kube, R.C., Bonabeau, E., Cooperative transport by ants and robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 30, 85–101, 2000. ISSN: 0921-8890.
- [11] Yamaguchi, H., A cooperative hunting behavior by mobile-robot troops, *The International Journal of Robotics Research*, 18, 931–940, Eylül 1999.
- [12] Fowler, J., D’Andrea, R., A formation flight experiment, *IEEE Control Systems Magazine*, 23, 35–43, Ekim 2003.
- [13] Nardi, R.D., Holland, O., Ultraswarm: A further step towards a flock of miniature helicopters, *Swarm Robotics*, 116–128, Springer, 2006.
- [14] Uzol, O., Yavrucuk, İ., Sürü halinde uçan mikro hava araçları için akışkanlar mekaniği tabanlı güzergah belirleme yöntemi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, (İstanbul, Sabancı Üniversitesi), 242–246, Eylül 2007.
- [15] Cortes, J., Martinez, S., Karatas, T., Bullo, F., Coverage control for mobile sensing networks, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 20, 243–255, 2004.
- [16] Nomdedeu, L., Sales, J., Cervera, E., Alemany, J., Sebastia, R., Penders, J., Gazi, V., An experiment on squad navigation of human and robots, *Proceedings of the EURON/IARP International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Surveillance of the Environment*, (Benicassim, Spain), Ocak 2008.
- [17] Smith, R.S., Hadaegh, F.Y., Control of deep-space formation-flying spacecraft; relative sensing and switched information, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 28, 106–114, Ocak-Şubat 2005.
- [18] Somaraju, R., Schill, F., A communication module and TDMA scheduling for

- a swarm of small submarines, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 15, 283–306, Temmuz 2007.
- [19] Rothermich, J.A., Ecemis, M.I., Gaudio, P., Distributed localization and mapping with a robotic swarm, *Swarm Robotics* (E. Sahin and W. M. Spears, eds.), 3342, 58–69, Springer, 2004.
- [20] Spears, W.M., Hamann, J.C., Maxim, P.M., Kunkel, T., Heil, R., Zarzhitsky, D., Spears, D.F., Karlsson, C., Where are you?, *Swarm Robotics* (E. Sahin, W. M. Spears, and A. F. T. Winfield, eds.), 4433, 129–143, Springer, 2006.
- [21] Dorigo, M., Tuci, E., Gross, R., Trianni, V., Labella, T.H., Nouyan, S., Ampatzis, C., Deneubourg, J.-L., Baldassarre, G., Nolfi, S., Mondada, F., Floreano, D., Gambardella, L.M., The SWARM-BOTS project, *Swarm Robotics - SAB 2004 International Workshop* (E. Sahin and W. M. Spears, eds.), 3342, 31–44, 2005.
- [22] Seyfried, J., Szymanski, M., Bender, N., Estaña, R., Thiel, M., Wörn, H., The I-SWARM project: Intelligent small world autonomous robots for micro-manipulation, *Swarm Robotics*, 70–83, 2004.
- [23] Winter, G., Périaux, J., Galán, M., Cuesta, P., Genetic algorithms in engineering and computer science. *John Wiley and Sons*, 1995.
- [24] Fukuda, T., Nakagawa, S., Approach to the dynamically reconfigurable robotic system, *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 1, 55–72, 1988.
- [25] Beni, G., The concept of cellular robotic systems, *Proc. 3rd IEEE Int’l Symp. Intelligent Control*, (Arlington, Virginia), 57–62, Ağustos 1988.
- [26] Beni, G., Wang, J., Self organizing sensory systems, *Proc. of NATO Advanced Workshop on Highly Redundant Sensing in Robotic Systems*, (Il Ciocco, Italy), Haziran 1988.
- [27] Beni, G., From swarm intelligence to swarm robotics, *Swarm Robotics*, 1–9, 2004.
- [28] Sahin, E., Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application, *Swarm Robotics: State-of-the-art Survey* (E. Sahin and W. Spears, eds.), *Lecture Notes in Computer Science (LNCS 3342)*, 10–20, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, 2005.
- [29] Gazi, V., Fidan, B., Coordination and control of multi-agent dynamic systems: Models and approaches, *Proceedings of the SAB06 Workshop on Swarm Robotics* *Swarm Robotics* (E. Sahin, W. M. Spears, and A. F. T. Winfield, eds.), *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 71–102, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, 2007.
- [30] Iocchi, L., Nardi, D., Salerno, M., Reactivity and deliberation: A survey on multi-robot systems, *Balancing Reactivity and Social Deliberation in Multi-Agent Systems*, 9–34, 2000.
- [31] Bayındır, L., Sahin, E., A review of studies in swarm robotics, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 15, 115–147, Temmuz 2007.
- [32] Dudek, G., Jenkin, M., Milios, E., Wilkes, D., A taxonomy for multi-agent robotics, *Autonomous Robots*, 3, 375–397, 1996.
- [33] Cao, Y.U., Fukunaga, A.S., Kahng, A.B., Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions, *Autonomous Robots*, 4, 7–23, 1997.

- [34] Liu, Y., Passino, K.M., Swarm intelligence: literature overview, Mart 2000.
- [35] Parker, L.E., Current state of the art in distributed autonomous mobile robotics, Distributed Autonomous Robotic System 4 (L. E. Parker, G. Bekey, and J. Barhen, eds.), 3–12, *Springer-Verlag*, Tokyo, Ekim 2000. ISBN: 4-431-70295-4.
- [36] Shaw, E., The schooling of fishes, *Sci. Am.*, 206, 128–138, 1962.
- [37] Breder, C.M., Equations descriptive of fish schools and other animal aggregations, *Ecology*, 35, 361–370, 1954.
- [38] Warburton, K., Lazarus, J., Tendency-distance models of social cohesion in animal groups, *Journal of Theoretical Biology*, 150, 473–488, 1991.
- [39] Grünbaum, D., Okubo, A., Modeling social animal aggregations, *Frontiers in Theoretical Biology, Lecture Notes in Biomathematics*, 100, 296–325, *Springer-Verlag*, New York, 1994.
- [40] Okubo, A., Dynamical aspects of animal grouping: swarms, schools, flocks, and herds, *Advances in Biophysics*, 22, 1–94, 1986.
- [41] Parrish, J.K., Hamner, W.M., eds., *Animal Groups in Three Dimensions*. *Cambridge University Press*, 1997.
- [42] Theraulaz, G., Pratte, M., Gervet, J., Behavioral profiles in polistes dominulus christ wasp societies: a quantitative study, *Behaviour*, 113, 223–250, 1990.
- [43] Camazine, S., Deneubourg, J.-L., Franks, N.R., Sneyd, J., Theraulaz, G., Bonabeau, E., *Self-Organization in Biological Systems*. *Princeton University Press*, New Jersey, Nisan 2001.
- [44] Grünbaum, D., Schooling as a strategy for taxis in a noisy environment, *Animal Groups in Three Dimensions* (J. K. Parrish and W. M. Hamner, eds.), 257–281, *Cambridge University Press*, 1997.
- [45] Grünbaum, D., Schooling as a strategy for taxis in a noisy environment, *Evolutionary Ecology*, 12, 503–522, 1998.
- [46] Durrett, R., Levin, S., The importance of being discrete (and spatial), *Theoretical Population Biology*, 46, 363–394, 1994.
- [47] Gueron, S., Levin, S.A., The dynamics of group formation, *Mathematical Biosciences*, 128, 243–264, 1995.
- [48] Parrish, J.K., Viscido, S.V., Grünbaum, D., Self-organized fish school: An examination of emergent properties, *Biol. Bull.*, 202, 296–305, Haziran 2002.
- [49] Edelstein-Keshet, L., *Mathematical Models in Biology*. Birkhäuser Mathematics Series, *The Random House*, New York, 1989.
- [50] Murray, J.D., *Mathematical Biology*. *Springer-Verlag*, New York, 1989.
- [51] Gazi, V., Passino, K.M., Stability analysis of social foraging swarms, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Part B*, 34, 539–557, Şubat 2004.
- [52] Mogilner, A., Edelstein-Keshet, L., A non-local model for a swarm, *Journal of Mathematical Biology*, 38, 534–570, 1999.
- [53] Levine, H., Rappel, W.-J., Self-organization in systems of self-propelled particles, *Physical Review E*, 63, 017101–1–017101–4, Ocak 2001.
- [54] Czirok, A., Vicsek, T., Collective behavior of interacting self-propelled particles, *Physica A*, 281, 17–29, 2000.
- [55] Stephens, D., Krebs, J., *Foraging Theory*. *Princeton Univ. Press*, Princeton, NJ,

1986.

- [56] Kennedy, J., Eberhart, R.C., Particle swarm optimization, IEEE International Conference on Neural Networks, 1942–1948, 1995.
- [57] Coloni, A., Dorigo, M., Maniezzo, V., Distributed optimization by ant colonies, Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, (Paris, France), 134 – 142, 1992.
- [58] Akat, S.B., Gazi, V., Marques, L., Asynchronous particle swarm optimization based research with a multi-robot system, Workshop and summer school on evolutionary computing (WSSEC-08), (Derry, Northern Ireland), Eylül 2008.
- [59] “Information society technologies.” erişim adresi: <http://cordis.europa.eu/ist/cognition/projects.htm>,
- [60] Moreau, L., Stability of multiagent systems with time-dependent communication links, IEEE Trans. on Automatic Control, 50, 169–182, Şubat 2005.
- [61] Gazi, V., Passino, K.M., Stability analysis of swarms, IEEE Trans. on Automatic Control, 48, 692–697, Nisan 2003.
- [62] Gazi, V., Passino, K.M., A class of attraction/repulsion functions for stable swarm aggregations, Int. J. Control, 77, 1567–1579, Aralık 2004.
- [63] Gazi, V., Passino, K.M., Stability of a one-dimensional discrete-time asynchronous swarm, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Part B, 35, 834–841, Ağustos 2005.
- [64] Gazi, V., Stability of an asynchronous swarm with time-dependent communication links, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 38, 267–274, Feb. 2008.
- [65] Şamiloglu, A.T., Gazi, V., Koku, A.B., Effects of asynchronism and neighborhood size on clustering in self-propelled particle systems, Proc. of International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS06) (A. Levi and et al., eds.), Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 4263, 665–676, Springer Verlag, Kasım 2006.
- [66] Şamiloglu, A.T., Gazi, V., Koku, A.B., An empirical study on the motion of self-propelled particles with turn angle restrictions, Proc. of SAB06 Workshop on Swarm Robotics (E. Şahin et al., ed.), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Springer Verlag, Eylül 2006.
- [67] Şamiloglu, A.T., Gazi, V., Koku, A.B., Comparison of three orientation agreement strategies in self-propelled particle systems with turn angle restrictions in synchronous and asynchronous settings, Asian Journal of Control, 10, 212–232, Mart 2008.
- [68] Olfati-Saber, R., Murray, R.M., Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays, IEEE Trans. on Automatic Control, 49, 1520–1533, Eylül 2004.
- [69] Encarnacao, P., Pascoal, A., Combined trajectory tracking and path following: an application to the coordinated control of autonomous marine craft, Proc. of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 1, 964–969, 2001.
- [70] Guldner, J., Utkin, V.I., Stabilization of nonholonomic mobile robots using Lyapunov functions for navigation and sliding mode control, Proc. Conf. Decision Contr., (Lake Buena Vista, Florida), 2967–2972, Aralık 1994.

- [71] Freund, E., Mayr, R., Nonlinear path control in automated vehicle guidance, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13, 49–60, Şubat 1997.
- [72] Kim, D.-H., Oh, J.-H., Globally asymptotically stable tracking control of mobile robots, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications, 2, 1297–1301, 1-4 Eylül 1998.
- [73] Fierro, R., Lewis, F.L., Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics, Proc. of the 34th IEEE Conference on Decision and Control, 4, 3805–3810, 13-15 Aralık 1995.
- [74] Godhavn, J.-M., Nonlinear tracking of underactuated surface vessels, Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control, 1, 975–980, 11-13 Aralık 1996.
- [75] Ren, W., Beard, R.W., Trajectory tracking for unmanned air vehicles with velocity and heading rate constraints, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12, 706–716, Eylül 2004.
- [76] Egerstedt, M., Hu, X., Stotsky, A., Control of a car-like robot using a virtual vehicle approach, Proc. of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, 2, 1502–1507, 16-18 Aralık 1998.
- [77] Masoud, A.A., Bayoumi, M.M., Intercepting a maneuvering target in a multidimensional stationary environment using a wave equation potential field strategy, Proc. International Symposium on Intelligent Control, (Columbus, OH), 243–248, Ağustos 1994.
- [78] Masoud, A.A., A boundary value problem formulation of pursuit-evasion in a known stationary environment: A potential field approach, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2734–2739, 1995.
- [79] Gazi, V., Ordóñez, R., Target tracking using artificial potentials and sliding mode control, *Int. J. Control*, 80, 1626–1635, Ekim 2007.
- [80] Li, T.-H.S., Chang, S.-J., Tong, W., Fuzzy target tracking control of autonomous mobile robots by using infrared sensors, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 12, 491–501, Ağustos 2004.
- [81] Jia, Z., Balasuriya, A., Challa, S., Recent developments in vision based target tracking for autonomous vehicles navigation, Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC '06. IEEE, 765–770, 2006.
- [82] Gazi, V., Swarm aggregations using artificial potentials and sliding mode control, *IEEE Trans. on Robotics*, 21, 1208–1214, Aralık 2005.
- [83] Soysal, O., Bahçeci, E., Sahin, E., Aggregation in swarm robotic systems: Evolution and probabilistic control, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 15, 199–225, Temmuz 2007.
- [84] Garnier, S., Jost, C., Jeanson, R., Gautrais, J., Asadpour, M., Caprari, G., Theraulaz, G., Collective decision-making by a group of cockroach-like robots, Swarm Intelligence Symposium, 2005. SIS 2005. Proceedings 2005 IEEE, 233–240, 8-10 Haziran 2005.
- [85] Soysal, O., Sahin, E., Probabilistic aggregation strategies in swarm robotic systems, Proc. of the IEEE Swarm Intelligence Symposium, (Pasadena, California), Haziran 2005.
- [86] Bahçeci, E., Sahin, E., Evolving aggregation behaviors for swarm robotic sys-

- tems: A systematic case study, Proc. of the IEEE Swarm Intelligence Symposium, (Pasadena, California), Haziran 2005.
- [87] Trianni, V., Labella, T.H., Gross, R., Sahin, E., Dorigo, M., Deneubourg, J.-L., Modeling pattern formation in a swarm of self-assembling robots, Tech. Rep. TR/IRIDIA/2002-12, IRIDIA, Mayıs 2002.
- [88] Liu, Y., Passino, K.M., Polycarpou, M.M., Stability analysis of one-dimensional asynchronous swarms, IEEE Trans. on Automatic Control, 48, 1848–1854, Ekim 2003.
- [89] Liu, Y., Passino, K.M., Polycarpou, M.M., Stability analysis of m -dimensional asynchronous swarms with a fixed communication topology, IEEE Trans. on Automatic Control, 48, 76–95, Ocak 2003.
- [90] Bahceci, E., Soysal, O., Sahin, E., A review: Pattern formation and adaptation in multi-robot systems, Tech. Rep. CMU-RI-TR-03-43, Carnegie Mellon University, Ekim 2003.
- [91] Desai, J.P., Ostrowski, J., Kumar, V., Controlling formations of multiple mobile robots, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, (Leuven, Belgium), 2864–2869, Mayıs 1998.
- [92] Balch, T., Hybinette, M., Social potentials for scalable multi-robot formations, Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1, 73–80, 2000.
- [93] Desai, J.P., Ostrowski, J., Kumar, V., Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 17, 905–908, Aralık 2001.
- [94] Egerstedt, M., Hu, X., Formation constrained multi-agent control, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 17, 947–951, Aralık 2001.
- [95] Lawton, J.R.T., Beard, R.W., Young, B.J., A decentralized approach to formation maneuvers, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 19, 933–941, Aralık 2003.
- [96] Fredslund, J., Mataric, M., A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 18, 837–846, Ekim 2002.
- [97] Raffard, R.L., Tomlin, C.J., Boyd, S.P., Distributed optimization for cooperative agents: application to formation flight, CDC. 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 3, 2453–2459, 14-17 Aralık 2004.
- [98] Ögren, P., Fiorelli, E., Leonard, N.E., Formations with a mission: Stable coordination of vehicle group maneuvers, Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, Ağustos 2002.
- [99] Yao, J., Ordonez, R., Gazi, V., Swarm tracking using artificial potentials and sliding mode control, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 129, 749–754, Eylül 2007.
- [100] Ng, W.K., Leng, G.S.B., Low, Y.L., Coordinated movement of multiple robots for searching a cluttered environment, (IROS 2004). Proceedings. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1, 400–405, 28 Eylül-2 Ekim 2004.
- [101] Utkin, V.I., Sliding Modes in Control and Optimization. *Springer Verlag*, Berlin,

Heidelberg, 1992.

- [102] Utkin, V.I., Guldner, J., Shi, J., Sliding Mode Control in Electromechanical Systems. *CRC Press*, Boca Raton, FL, 1999.
- [103] Young, K.D., Utkin, V.I., Özgüner, Ü., A control engineer's guide to sliding mode control, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 7, 328–342, Mayıs 1999.
- [104] Utkin, V.I., Variable structure systems with sliding modes, *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-22, 212–222, Nisan 1977.
- [105] Girin, A., Plestan, F., Brim, X., Glumineau, A., A 3rd order sliding mode controller based on integral sliding mode for an electropneumatic system, 45th *IEEE Conference on Decision and Control*, 1617–1622, 13-15 Aralık 2006.
- [106] Shtessel, Y., Buffington, J., Banda, S., Tailless aircraft flight control using multiple time scale reconfigurable sliding modes, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10, 288–296, Mart 2002.
- [107] Chunxia, T., The control system design for ASV via discrete sliding mode control based on disturbance observer, *IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications*, 1, 758–762, 4-6 Ekim 2006.
- [108] Hung, J.Y., Gao, W., Hung, J.C., Variable structure control: a survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40, 2–22, Şubat 1993.
- [109] Khatib, O., Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, *The International Journal of Robotics Research*, 5, 90–98, 1986.
- [110] Rimon, E., Koditschek, D.E., Exact robot navigation using artificial potential functions, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8, 501–518, Ekim 1992.
- [111] Guldner, J., Utkin, V.I., Tracking the gradient of artificial potential fields: Sliding mode control for mobile robots, *Int. J. Control*, 63, 417–432, 1996.
- [112] Reif, J.H., Wang, H., Social potential fields: A distributed behavioral control for autonomous robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 27, 171–194, 1999.
- [113] Poduri, S., Sukhatme, G.S., Constrained coverage for mobile sensor networks, *Proceedings. ICRA '04. IEEE International Conference on Robotics and Automation.*, 1, 165–171, 26 Nisan-1 Mayıs 2004.
- [114] Kowalczyk, W., Kozłowski, K., Artificial potential based control for a large scale formation of mobile robots, *RoMoCo'04. Proceedings of the Fourth International Workshop on Robot Motion and Control*, 285–291, 17-20 Haziran 2004.
- [115] Dunbar, T., Esposito, J., Artificial potential field controllers for robust communications in a network of swarm robots, *SSST '05. Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory*, 401–405, 20-22 Mart 2005.
- [116] Koren, Y., Borenstein, J., Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2, 1398–1404, 9-11 Nisan 1991.
- [117] Tanaka, Y., Tsuji, T., Kaneko, M., Morasso, P.G., Trajectory generation using time scaled artificial potential field, *Proceedings. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1, 223–228, 13-17 Ekim 1998.
- [118] Veelaert, P., Bogaerts, W., Ultrasonic potential field sensor for obstacle avoid-

- ance, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 15, 774–779, Ağustos 1999.
- [119] Hussein, A.M., Elnagar, A., Motion planning using maxwell's equations, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3, 2347–2352, 2002.
- [120] Igarashi, H., Kakikura, M., Path and posture planning for walking robots by artificial potential field method, Proceedings. ICRA '04. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3, 2165–2170, 26 April-1 May 2004.
- [121] Horner, D.P., Healey, A.J., Use of artificial potential fields for UAV guidance and optimization of wlan communications, Autonomous Underwater Vehicles, 2004 IEEE/OES, 88–95, 17-18 Haziran 2004.
- [122] Shi, H., Sun, C., Sun, X., Feng, T., Chaotic potential field method and application in robot soccer game, WCICA 2006. The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2, 9297–9301, 21-23 Haziran 2006.
- [123] John-Olcayto, E.S., Kluza, J., Low-complexity spacecraft guidance using artificial potential functions, 3rd International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST '07)., 591–594, 14-16 Haziran 2007.
- [124] Jantapremjit, P., Wilson, P.A., Control and guidance for homing and docking tasks using an autonomous underwater vehicle, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007)., 3672–3677, Ekim 29 2007-Kasım 2 2007.
- [125] Utkin, V.I., Drakunov, S.V., Hashimoto, H., Harashima, F., Robot path obstacle avoidance control via sliding mode approach, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, (Osaka, Japan), 1287–1290, Kasım 1991.
- [126] Guldner, J., Utkin, V.I., Sliding mode control for an obstacle avoidance strategy based on an harmonic potential field, Proc. Conf. Decision Contr., (San Antonio, Texas), 424–429, Aralık 1993.
- [127] Guldner, J., Utkin, V.I., Sliding mode control for gradient tracking and robot navigation using artificial potential fields, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 11, 247–254, Nisan 1995.
- [128] Guldner, J., Utkin, V.I., Hashimoto, H., Harashima, F., Tracking gradients of artificial potential fields with non-holonomic mobile robots, Proc. American Control Conf., (Seattle, Washington), 2803–2804, Haziran 1995.
- [129] Gazi, V., Fidan, B., Hanay, Y., Köksal, M.I., 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, 149–168, Temmuz 2007.
- [130] Saaj, C.M., Lappas, V., Gazi, V., Spacecraft swarm navigation and control using artificial potential field and sliding mode control, IEEE International Conference on Industrial Technology, (Mumbai, India), 2646–2652, Aralık 2006.
- [131] Barraquand, J., Latombe, J.-C., On nonholonomic mobile robots and optimal maneuvering, Proc. of the IEEE International Symposium on Intelligent Control, 1989, 340–347, 25-26 Eylül 1989.
- [132] da Silva, J., de Sousa, J., Optimal motion planning for the rendezvous of non-holonomic vehicles under disturbances, MED '06. 14th Mediterranean Confer-

- ence on Control and Automation, 1–6, Haziran 2006.
- [133] Dierks, T., Jagannathan, S., Control of nonholonomic mobile robot formations: Backstepping kinematics into dynamics, CCA 2007. IEEE International Conference on Control Applications, 94–99, 1-3 Ekim 2007.
 - [134] Köksal, M.İ., Gazi, V., Fidan, B., Ordoñez, R., Tracking a maneuvering target with a swarm of non-holonomic agents using artificial potentials and sliding mode control, Proceedings of the EURON/IARP International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Surveillance of the Environment, (Benicassim, Spain), Ocak 2008.
 - [135] Köksal, M.İ., Gazi, V., Fidan, B., Ordoñez, R., Tracking a maneuvering target with a non-holonomic agent using artificial potentials and sliding mode control, Proc. 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, (Corsica, France), Haziran 2008.
 - [136] Liu, S., Tan, D., Liu, G., Vision-based formation control of mobile robots with relative motion states, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 72–76, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı,Adı : Köksal, Murat İlter
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum tarihi ve yeri : 29.05.1980 Kütahya
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 223 46 94
Faks : 0 (312) 292 40 91
e-mail : i.koksal@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Bilkent Üniversitesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-2008	TOBB ETÜ	Araştırma Görevlisi
2005-2007	SYS Sistem Yazılım Tasarım	Ar-Ge Mühendisi
2005-2007	Tepe Güvenlik	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Köksal, M.İ., Gazi, V., Fidan, B., Ordoñez, R., Tracking a maneuvering target with a non-holonomic agent using artificial potentials and sliding mode control, Proc. 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, (Corsica, France), Haziran 2008.

Gazi, V., Fidan, B., Hanay, Y., Köksal, M.İ., 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, 149–168, Temmuz 2007.