

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SINIRLI ALGILAMA ALANI OLAN TEKLİ
VE ÇOKLU TEKERLEKLİ MOBİL ROBOT
SİSTEMLERİNİN HAREKET KISITLAMALI
GÜZERGAH PLANLAMASI ÜZERİNE BİR
YÖNTEM

Hüsnü Türker ŞAHİN
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2008

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SINIRLI ALGILAMA ALANI OLAN TEKLİ
VE ÇOKLU TEKERLEKLİ MOBİL ROBOT
SİSTEMLERİNİN HAREKET KISITLAMALI
GÜZERGAH PLANLAMASI ÜZERİNE BİR
YÖNTEM

Hüsnü Türker ŞAHİN
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU

GEBZE
2008



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JÜRİ ONAY FORMU**

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN)

: Prof. Dr. Muammer KALYON

ÜYE

: Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU

ÜYE (TEZ DANIŞMANI)

: Yrd. Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Şeref Naci ENGİN

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen 26/12/2007 tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Doktora öğrencisi Hüsnü Türker Şahin'in çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu/...../..... tarih ve/..... sayılı kararıyla Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: Sınırlı Algılama Alanı Olan Tekli Ve Çoklu Tekerlekli Mobil Robot Sistemlerinin Hareket Kısıtlamalı Güzergah Planlaması Üzerine Bir Yöntem

YAZAR ADI: Hüsnü Türker Şahin

Bu tez tekerlekli mobil robotlara rota planlamasıyla 3 boyutlu robot manipülatörlerine yörünge oluşturulması ve bu sistemlerin kontrolü üzerine yapılan çalışmaları içerir.

Tezin temel çalışma alanı, tekerlekli mobil robotlar için rota planlamasıdır. Bu konuda öncelik, tekli ve çoklu robot sistemlerine statik ve dinamik engeller bulunan ortamlarda sınırlı sayıda ve menzilde sensörlerle çarpışmasız yörüngeler sentezlenmesi üzerinedir. Tezin bu alandaki ilk katkısı algoritmik olarak verimli ve etkin yeni bir tekli robot rota planlayıcısıdır. Bu algoritma, robotları bağlı uzaylarda, çarpışmasız rotalarda hareket ettirebilmektedir. Planlayıcının başarımı robotlar U-engeller ya da tüneller gibi aşırı konkav engellerle karşılaştığında düşmektedir. Ancak sınırlı sayıda parametresinde değişikliklerle bu kayıp önlenebilmektedir. Yöntem tekerlekli sistemlerin sade ve simetrik yapısı nedeniyle kinematik seviyede işlem görmektedir. Planlayıcı tek eksenli robotlarla uyumludur. Ancak algoritma zincirlenmiş (chained) sistemler için engel aşma konusunda uyarlanırsa, çok eksenli sistemlere de uygulanabilir. Planlayıcının bir problemi ön sensör belirsizliği olup, bu durum yoğun engelli ortamlarda gereksiz yön değiştirmeler sonucu zaman ve enerji kaybına sebep olabilmektedir. Sınırlı algılayıcıları ve sade algoritması nedeniyle planlayıcının optimal yörüngeler sentezlemesi amaçlanmamıştır. Ancak daha uzun menzilli sensörleri olan sistemlere de sınırlı sayıda değişikliklerle uyarlanabileceğinden bu sorunlarının aşılması sağlanabilir.

Tezde sürü robot planlaması üzerine gerçekleştirmeye çalışılan yenilikler tekli TMR rota planlayıcısının, önce sabit referans çerçeveli sonra da mobil referans çerçeveli dinamik olarak değiştirilebilen formasyonlarla entegre edilip göreceli olarak kalabalık (30 erkin) sürülerin gerçek zamanlı yörünge planlamasıdır. Ayrıca planlayıcı, engeller açısından yoğun olan ortamlarda etkin ve çarpışmasız rota planlaması da sağlamıştır.

SUMMARY

THESIS TITLE: A Method On Nonholonomic Path Planning For Single And Multiple Wheeled Mobile Robots With Limited Sensing Zones

AUTHOR: Hüsnü Türker Şahin

This dissertation is composed from a collection of research on wheeled mobile robot path planning in planar environments and trajectory generation and control for robot manipulators in 3-D operational spaces.

The wheeled mobile robot path planning section is the main part of this research. Particularly the emphasis is on planning collision free paths for single and multiple systems in environments with static and dynamical obstacles utilizing data from a limited number of range sensors. The main contributions can be summarized as a computationally efficient, yet effective single robot path planner, which can steer robots in collision free routes during their missions in connected operating spaces. The planner may fail if the robots encounter very concave blocks such as U or tunnel shaped obstacles. However, the performance can be improved significantly by tuning of a small number of parameters of the planner. As a result of the simple and highly symmetrical structure of the wheeled robots, the path planner can operate via device kinematics rather than dynamical approaches. The planner works for unicycle type robots, utilizing a two axle virtual reference robot. It can be adapted for robots with multiple axes; however, for this reason, collision free motion of chained systems should be considered in detail. Currently the main issue of the planner seems to be the front sensor ambiguity, which may cause the robots to change their course in obstacle dense environments and lose time and energy. The planner cannot address the optimality issues owing to its limited sensing ability and simple algorithm. On the other hand it can be applied to systems with more advanced and long range sensors via simple modifications.

In terms of multiple robot path planning the single robot planner is integrated as an agent planner with fixed reference frame and mobile dynamically reconfigurable formations for effective steering of relatively crowded swarms (up to 30 agents) in

real time. The planner can achieve efficient steering in relatively obstacle dense environments.

TEŞEKKÜR

Doktora tezim üzerinde iki yıla yakın bir süre çalıştıktan sonra, danışman hocamın ayrılması benim için çok kötü, çok sarsıcı olmuştu. Böyleyken Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Erkan Zergeroğlu'nun danışmanlığında başka bir alan ve konuda yeniden çalışmaya başladım. Azalan süre içerisinde beni hiç yalnız bırakmayan Değerli Hocam Erkan Zergeroğlu'nun desteği, ulaştığım sonuç üzerinde çok yapıcı bir rol oynamıştır. Tezime çalışırken yoğun katkılarını benden hiç esirgemeyen, yol gösterici, aydınlatıcı rehberliğini son ana kadar sürdüren ve zengin bilgi birikimini benimle paylaşan Değerli Hocam Erkan Zergeroğlu'nun emeğini ve iyiliklerini hiç bir zaman unutmayacağım. Örnek davranışlarıyla her zaman rehberim olacak Değerli Hocama bütün içtenliğimle teşekkürler ediyorum.

Benimle yakından ilgilenen ve her zaman iyi davranan, çalışmalarımı sürdürmem için yüreklendirip manen destek veren çok saygı duyduğum, değerli Öğretim Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Yusuf Sinan Akgül Hocama en içten şükranlarımı sunuyorum. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde bana çok veya az emeği, hakkı geçmiş bütün hocalarıma teşekkürler ediyorum.

Hem katıldığım derslerinde, hem lisans tezimi hazırlarken, hem de her konuda unutulmaz iyiliklerini gördüğüm UCL Mühendislik Fakültesi Öğretim Üyesi Değerli Hocam Prof. Dr. Marco Federighi'ye teşekkürlerim sonsuzdur. Beni Kontrol Sistemleri mühendisliğine yönlendiren ve bu konuda bilgilendiren Imperial College Öğretim Üyesi Sayın Hocam Prof. Dr. Nina Thornhill'e çok şey borçluyum. Kendilerine içten teşekkürler sunuyorum. Imperial College'de yüksek lisans eğitimim sırasında bilgilerinden çok yararlandığım danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Imad Jaimoukha'ya değerli katkılarının yanında hiç bir konuda benden yardımlarını esirgemedikleri ve daima dostça davrandıkları için sonsuz saygı ve şükranlarımı arz ediyorum.

Bütün bildiklerimim sağlam temellerini atan, küçük çocukluğumda büyük sevinçler, başarı mutlulukları yaşatan değerli İlkokul Öğretmenim Sayın Sebahat Tanel Hanımefendiye saygı ve sevgilerimin en derinini sunuyorum.

Son olarak, maddi ve manevi dayanağım sevgili annem ve babam Yurdanur Şahin ve Hasan Şahin'e derin saygılarımı, sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1 GİRİŞ	1
2 SINIRLI ALGILAMA ALANI OLAN TEK EKSENLİ TEKERLEKLİ MOBİL ROBOTLAR İÇİN HOLONOM OLMAYAN BİR ROTA PLANLAMA YÖNTEMİ	3
2.1 Kinematik Model	4
2.2 Problem Formülasyonu	5
2.3 Geliştirilen Rota Planlama Yöntemi	6
2.3.1 İstenen Konuma Doğrudan Sürme Yöntemi	6
2.3.2 Engel Algılama ve Aşma	8
2.3.3 Büyük U-Şeklinde Engeller ve Karmaşık Geometrilili Tüneller İçin Eklenti Önerileri	10
2.4 Benzetim Sonuçları	12
3 SABİT REFERANS ÇERÇEVESİ TABANLI HOLONOM OLMAYAN BİR SÜRÜ ROTA PLANLAMA YÖNTEMİ	26
3.1 Problem Formülasyonu	27

3.2	Sabit Referans Çerçevesi (FRF) Dizilim Yöntemi	27
3.3	Benzetim Sonuçları	32
4	MOBİL DİNAMİK-OLARAK YENİDEN ŞEKİLLENDİRİLEN REFERANS ÇERÇEVESİ FORMASYONLARI İLE KARMAŞIK ORTAMLARDA KOLEKTİF ROTA PLANLAMASININ İYİLEŞTİRİLMESİ	37
4.1	Problem Tanımı:	40
4.2	Kinematik Model	41
4.3	Önerilen MDDRF Dizilim Planlayıcısı	41
4.4	Formasyon Rotalanması ve Şekillendirilmesi	42
4.4.1	Formasyonun Yönlendirilmesi:	42
4.4.2	Formasyonun Yeniden Şekillendirilmesi:	42
4.5	Erkin Topluluğunu Bir arada Tutmak için Sanal Dış Potansiyel Sınırlaması	43
4.5.1	CR-Şablonları ile Dış Sınır Denetimi	43
4.5.2	CR-Şablonları ile Sınırlamanın Avantajları	45
4.5.3	Erkin Robot Dağılmalarını Sınırlamak için En küçük Kareler Yöntemi Tabanlı Eğri Uydurma Yaklaşımı	45
4.6	Referans Çerçevesi Formasyonlar:	48
4.6.1	Dizilim Yönünde Genleşme/Daralmaya Göre Nokta Dağılımı:	57
4.7	Benzetim Sonuçları	60
5	SONUÇ VE ÖNERİLER	71
5.1	Sonuçlar	71
5.2	Tartışma ve Öneriler	72
	KAYNAKLAR	75
	ÖZGEÇMİŞ	81

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>: Açıklaması</u>
q_c	: TMR'un duruş vektörü
$x_c(t), y_c(t)$	: TMR'un ağırlık merkezi koordinatları
q_c	: TMR'un duruş vektörü
$x_c(t), y_c(t)$	: TMR'un ağırlık merkezi koordinatları
$\theta(t)$	: Robot yönelim (orientation) açısı
$v(t)$	: Lineer ve açısal robot hızından oluşan vektör
P	: Referans robot ön ekseninin mevcut noktası
F_s	: Referans robot ön eksenine uygulanan sürüş sanal hızı. (Birinci dereceden bir diferansiyel ilişki ile modellenen bu nicelik tezin sonraki bölümlerinde F_s sanal kuvveti olarak adlandırılacaktır.)
P_d	: Referans robotun istenen noktası
$C_r = [x_r \ y_r]^T$	: Mevcut robot ağırlık merkezi
$C_d = [x_d \ y_d]^T$	: İstenen robot ağırlık merkezi
v_l	: Lineer hız
$\dot{\theta}_r$	: Açısal hız
φ	: Sürüş açısı
L	: Referans robot ön ve arka eksen açıklığı
$K, B \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$	: Sürüş kuvvetinin (sanal hızının) köşegensel, pozitif tanımlı katsayı matrisleri
e	: Hata terimleri
$\varepsilon \in \mathbb{R}^+$	: Sürüş kuvveti denkleminin paydasında kararlı yakınsamayı sağlayan terim
$C_i(t)$	: Engel tahmin merkezleri
$R_i(t) \in \mathbb{R}^+$	: Engel tahmin merkezleri yarıçapları
F_{o_i}	: Engelden sakınma kuvveti (sanal hızı) bileşenleri
$F_o(t)$	: Engelden sakınma kuvveti

$w_i \in \mathbb{R}^+$	: Ön sensörlere arka algılayıcılardan daha fazla vurgu yapan, dolayısıyla ilgili sakınma kuvveti bileşenlerinin ağırlıklarını arttıran sabit katsayılar
F_{on}	: Normalleştirilen engelden sakınma kuvveti
Δt	: Engel algılanma alanından çıktıktan sonra sakınma kuvvetinin uygulandığı süre
δt	: Şablon geçiş süresi
e_r	: Hata terimi
(x, y)	: Ajanın mevcut konumu
(x_d, y_d)	: İstenen konumu
a, b	: Ajan elips engel algılama bölgesi eksen yarıçapları
a_F, b_F	: Formasyon eksen yarıçapları
r	: Formasyon yarı çapı
X_{cont}, Y_{cont}	: Formasyon merkezine yakınsayan kontrol noktaları
X_s, Y_s	: Engel olmayan durumlardaki kontrol noktaları
X_{CM}, Y_{CM}	: Formasyon merkezi
(X_{exp}, Y_{exp})	: Serbest kontrol noktasının genişlemeden sonraki yeri
k_{Exp}	: Genleşme oranını belirleyen sabit
N_{nf}	: Engel etkisindeki sensör sayısı
w_{sens}	: İlgili sensörlerin genişleme ağırlıkları
w_{FT}	: Tüm sensörlerin genişleme ağırlıkları
p_i	: CR-eğrisinin geçtiği kontrol noktası
$p_{i \pm j}$	: Kontrol noktasına komşu noktalar
τ	: Kontrol noktasından geçen şablonun eğimi
δ_L	: Dış sınır tespit mesafesi
(x_{ae}, y_{ae})	: Formasyona gereğinden fazla yakın TMR'ların sanal ön eksenleri
(x_F, y_F)	: Formasyon sanal lideri
(x_R, y_R)	: Formasyonun son kontrol noktası
x_c, y_c	: Geometrik koordinat dönüşümü öncesi nokta konumu
x_t, y_t	: Geometrik koordinat dönüşümü sonrası konum

t_x, t_y, θ	: Geometrik dönüşümün duruş değişkenleri
a_{LS}	: En küçük kareler eğrisi katsayı vektörü
χ	: x-eksenindeki kontrol noktalarının katlarından oluşan VanDerMonde katsayı matrisi
$\chi^\#$	: VanDerMonde matrisinin sözde tersi
v	: y-eksenindeki kontrol noktalarından oluşan vektör
(x_0, y_0)	: Hiper-elips sanal engel eğrilerin ağırlık merkezleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Sentetik ön eksenin kinematik modele eklenmesi ile rotalama.	5
2.2 Engel algılama ve aşma modelinin şeması. (C_i, R_i $i = 1, 2$ sırasıyla dairesel engel tahminlerinin merkezlerini ve yarıçaplarını göstermektedir.)	10
2.3 TMR'un engelli ortamda düzgün holonom olmayan yörüngesi.	14
2.4 TMR'un çarpışmasız güzergah profili. (Elipsoit dizisi TMR'un yolu üzerine izdüşümüdür.)	15
2.5 İlk simülasyondaki Lineer ve Açısal Referans Hızlar.	16
2.6 İlk benzetimde sentezlenen duruş yörüngesi	16
2.7 Referans robotun duruş hataları.	17
2.8 Ön eksene uygulanan sürme kuvveti bileşenleri.	17
2.9 Sürme kuvvetinin norm ve yön bileşenleri.	18
2.10 İlk Benzetimdeki TMR hareket görünüşü (4 sensör).	19
2.11 İlk Benzetimdeki TMR hareket görünüşü (8 sensör).	20
2.12 Bir küçük ve bir büyük U-bariyer bulunan ortamda düşük Δt ve δt değerleri ile rota planlaması.	21
2.13 Şekil 2.12'daki ortamda daha büyük Δt ve δt süreleri ile benzetimin tekrarlanması.	22
2.14 Sanal engelli U-blok simülasyonları.	23
2.15 Şablon geçiş kipi parametrelerinin değişiminin zorlu bir tünelde tekli robot rota planlaması üzerinde etkisi.	24
3.1 Genel çoklu robot planlayıcısının yararlandığı formasyon yoluyla çok sayıda TMR'un bir bölgeden bir başka bölgeye nakli.	29
3.2 3 TMR'un sade engeller bulunan ilk benzetim ortamında yaptığı sürü benzeri hareket.	30
3.3 Tekli robot algoritmasının doğrudan uygulanması ile sağlanan sürü benzeri hareket. Benzetim süresi $t=0s$	31

3.4	Benzetim süresi $t=280s$	31
3.5	Benzetim süresi $t=560s$	32
3.6	Benzetim süresi $t=840s$	33
3.7	Benzetim süresi $t=1120s$	33
3.8	Geometrik formasyon tabanlı çoklu-TMR rota planlaması. Benzetim süresi $t=0s$	33
3.9	Benzetim süresi $t=280s$	34
3.10	Benzetim süresi $t=520s$	34
3.11	Benzetim süresi $t=840s$	34
3.12	Benzetim süresi $t=1120s$	35
4.1	CR-Şablonlu dış sınırı bulunan bir dizilimin (sanal lider noktaya doğru sürüş ile) sırasıyla engelsiz ve engelli ortamlarda davranış biçimi	47
4.2	CR-Şablonlu dış sınırı bulunan bir dizilimin (referans çerçevesi ile) sırasıyla engelsiz ve engelli ortamlarda davranış biçimi	48
4.3	Formasyon sınırlarının en küçük kareler eğrileri ile formasyonu	49
4.4	Kontrol noktalarının neredeyse tekil veri kümesi meydana getirmesi ve çözüm önerisi	50
4.5	Dizilim engelli ortamlarda iken referans noktalarının değişimi	51
4.6	Mobil dizilimli sürü rota planlaması (6 robot, noktasal sınırlamalı)	52
4.7	Mobil dizilimli sürü rota planlaması (10 robot, noktasal sınırlamalı)	53
4.8	Mobil dizilimli sürü rota planlaması (15 robot, noktasal sınırlamalı)	54
4.9	Mobil dizilimli sürü rota planlaması (20 robot, noktasal sınırlamalı)	55
4.10	Hareketli engellere karşı mobil formasyon (6 erkin).	56
4.11	Hareketli engellere karşı mobil formasyon (10 erkin).	57
4.12	Hareketli engellere karşı mobil formasyon (15 erkin).	58
4.13	Hareketli engellere karşı mobil formasyon (20 erkin).	59
4.14	Benzetim ortamının genel görünüşü	60
4.15	Karmaşık tünelde mobil ve sabit referans çerçeveli formasyon (15 robot, noktasal dış sınırlar)	61
4.16	Karmaşık tünelde en küçük kareler eğrisi tabanlı sürü planlayıcısı (15 erkin, sürekli dış sınır).	62

- 4.17 MDRRF formasyonunun kapalı geçitli tünelde başarımı. 63
- 4.18 Geometrik serbest referens çerçeve formasyonlu erkin güzergah planlayıcısının tünelin iç çeperi %90 oranında arttırıldığında başarımını yitirmesi. 64
- 4.19 Serbest referens çerçeve formasyonlu çoklu-TMR rota planlamasının U-engelli tünelde başarısız sonuç vermesi. 65

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 CR şablon yöntemi ve referans çerçevesi bulunmayan dizilimlerin Şekil 4.14'deki sade tünelde başarımı	68
4.2 CR şablon, LS tabanlı MDRRF yöntemin karmaşık tüneldeki başarımı	69

1. GİRİŞ

Bu tez, tekli ve çoklu Tekerlekli Mobil Robot (TMR) sistemlerinin sınırlı sensör bilgileri ile engelli ortamlarda etkin rota planlaması üzerine geliştirilen yöntemlerden oluşmaktadır. Tekerlekli mobil robot (TMR) grupları için güzergah planlaması son yılların aktif bir araştırma alanıdır. Tekli robotlara yönelik etkin yörünge planlama yöntemleri için genellikle yüksek maliyetli donanımlar gerektiren karmaşık algoritmalar kullanılmaktadır. Fazla sayıda robotun güzergah planlaması için uygun olan sürü yöntemleri ise sade yaklaşımlarından dolayı engellerin çok yoğun olduğu ortamlarda başarımlarını kayıplarına uğrayabilmektedirler.

Bu çalışmanın 2. konusunda tekli TMR güzergah planlaması için etkin bir yöntem sunulmaktadır. Bu yaklaşımla sade bir 2-eksenli referans robotun ön eksenine, amaç konum yönünde sanal bir kuvvet uygulanmakta ve sonucunda arka eksen tarafından TMR'ların takibine uygun hareket kısıtlamalı (non-holonomic) rota üretilmektedir. Bu rota engelle karşılaşılırsa, haritalama gerektirmeyen sade bir sakınma mekanizmasıyla robotun yönünü, çarpışma olmaması için değiştirmektedir. Yönteme iç-bükey engeller ve tünellerden sakınma sağlayabilmesi amacıyla hiper-elips tabanlı sanal engellerden yararlanan bir eklenti de yapılmıştır. Önerilen yöntem algoritmik sadeliğin yanı sıra, göreceli olarak karmaşık engelli ortamlarda yüksek çarpışmasız rota planlaması ve kolay temin edilebilen, düşük maliyetli donanımlarla gerçekleştirilebilir gibi avantajlara sahiptir. Yöntemin etkinliği detaylı benzetimlerle gösterilmiştir.

Tezin 3. konusunda geliştirilen tekli TMR rota planlama yöntemi sade sabit referans çerçeve (FRF) dizilimleriyle entegre edilerek çok sayıda robotun kolektif hareketi sağlanmaktadır. Yöntem sade engelli ortamların yanı sıra, bazı tünellerde de etkin rota sentezlenmesi gerçekleştirebilmektedir.

Tezin 4. konusunda ise önerilen FRF sürü planlayıcısının yeterli kolektiflik ve başarımlar sağlayamadığı, içerisinde geniş boşluklar olan ya da U-engeller bulunan tüneller gibi ortamlarda daha etkin planlama gerçekleştirebilen hareketli bir referans çerçevesi yöntemi üzerinde durulmuştur. Yöntem robot sürüsünün bazı dış sensörlerinden oluşan bir sensör ağından sağlanan engel bilgileri ile formasyonun

rotasını ve şeklini değiştirmektedir. Formasyon rotası, 2. konudaki sade hareket kısıtlamalı planlayıcıya göre değiştirilirken şekli de algılanan engel yüzeylerine yakın bir dış sınır oluşturulması ile sağlanmıştır. Bu sınırlarda Catmull-Rom (CR) şablonlarının yanı sıra En Küçük Kareler Eğrilerinden (Least Squares Fits) de yararlanılmıştır. Formasyondaki erkinler (agents) arasında yeterli güvenlik açıklığı (margin) oluşturulması için formasyon sınırlarına göre genişleyen ya da daralan referans çerçevelerinden yararlanılmıştır. Yöntemin sağladığı başarımlar detaylı simülasyonlarla gösterilmiştir.

Tezde yapılan çalışmalardan tekli TMRlar üzerine olan bölüm [Sahin and Zergeroglu, 2007b], sabit referans çerçevesi tabanlı sürü robot planlayıcısı [Sahin and Zergeroglu, 2007a] kaynaklarında yayımlanmıştır. Dinamik Olarak Yeniden Şekillendirilebilen Hareketli Referans Çerçevesi (MDRRF) yaklaşımı üzerine olan bölümle ilgili bir çalışma ise [Sahin and Zergeroglu, 2008] Konferansında yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

Özetlenirse tezin sonraki konuları şöyledir: 2. konuda tekerlekli mobil robotların 2 boyutlu uzayda rota planlaması üzerine geliştirilen bir çalışma sunulmaktadır. Bu çalışmada tek eksenli TMR'lar için sade ancak engelli ortamlarda etkin bir formülasyon sunulmuş; sonra bu yöntemin sınırlı sayıda parametresinde değişiklik yapılarak tüneller ve U-şeklinde engeller gibi ortamlarda başarımlar artırılmıştır. Tezin 3. konusunda tekli robot planlayıcısının erkinlerin planlamasını sağladığı sade bir geometrik sabit referans çerçevesi (FRF) tabanlı bir sürü robot planlayıcısı sunulmuştur. Çalışmamızın 4. konusunda ise önerilen FRF sürü planlayıcısının yeterli başarımlar sağlayamadığı, içerisinde geniş boşluklar olan ya da U-engeller bulunduran tüneller gibi ortamlarda daha etkin planlama gerçekleştirebilen hareketli bir referans çerçevesi yöntemi üzerinde durulmuştur. 5. konuda tezle ilgili tartışma ve öneriler bulunmaktadır.

2. SINIRLI ALGILAMA ALANI OLAN TEK EKSENLI TEKERLEKLI MOBİL ROBOTLAR İÇİN HOLONOM OLMAYAN BİR ROTA PLANLAMA YÖNTEMİ

Tekli ya da çoklu TMR'lar için düzgün güzergah planlaması, bu sistemlerin kinematik ve dinamiklerinin sadeliği nedeniyle yoğun şekilde araştırılan bir konudur. Ancak tekerlekli sistemlerin hareket kısıtlaması (non-holonomicity) özelliğinin yanı sıra, operasyon ortamlarında yapıları ve konumları bilinmeyen engeller bulunması, ayrıca robotların algılama yeteneklerindeki sınırlamalar nedeniyle zorlu bir problemdir. İşletim ortamlarının özellikleri ve bununla ilişkili olarak ekonomi, enerji ve zaman maliyetleri arasındaki öncelik sıralamasına göre farklı yaklaşımlar mümkündür.

Tekli Tekerlekli Mobil Robotların rota planlaması ile ilgili son yirmi senedeki önemli araştırmaları kapsayan literatür [Choset et al., 2005] kaynağında bulunabilir. Tekli robot sistemlerinde güzergah planlaması için geliştirilen alternatif yaklaşımlar arasında en kısa yol grafik arama (shortest path graph search) algoritmaları [Jacobs and Canny, 1989; Murray and Sastry, 1993; Laumond et al., 1994; Shkel and Lumelsky, 2000] ve potansiyel fonksiyonları tabanlı metotlar [Rimon and Koditschek, 1992; Tanner and Kyriakopoulos, 2000; Pathak and Aggrawal, 2004; Chen et al., 2005] sık karşılaşılan çözümlerdir. Ancak bu yaklaşımların önemli bir kısmı, iş uzayının tamamının gözlemlenebilir olması varsayımı nedeniyle dinamik güzergah planlaması sağlayamamaktadırlar. Ayrıca potansiyel teorisini temel alan yöntemlerin bazılarında robotların yerel minimumlarla karşılaşınca sıkışma olasılıkları, hedef konumlarına ulaşmasını engelleyebilmektedir.

Yakın zamanda TMR'lar için yüksek başarılı rota planlaması sağlayan yeni yöntemler de geliştirilmiştir [Minguez and Montano, 2004; Krishnamurthy and Khorrami, 2005; O'Kane and LaValle, 2006; Tovar et al., 2005]. Ancak bu yöntemlerin verimliliği donanımsal ve yazılımsal maliyetleri önemli oranda yükselten 2 boyutlu haritalamalardan kaynaklanmaktadır. Bu problemleri nedeniyle uygulama alanları göreceli olarak pahalı tekli robot sistemleri ile sınırlı kalmaktadır. Eğer lazer tarayıcısı ya da işleme (processor) maliyetleri, sade algılayıcılar ve kontrolörlerle

karşılaştırılabilir düzeye inmezse, sürü robot rota planlaması için uygun değildirler.

Tezin ilk konusu olan bu alanda yazarlar [Sahin and Zergeroglu, 2007b]'de, tek eksenli (unicycle) TMR'lar için sade bir güzergah planlama algoritması önermişlerdir. Bu yöntem iki eksenli bir referans robotla tek-tekerlekli TMR'ların izleyebileceği hız kısıtlamalı güzergah sentezlenmesi ve engellerle karşılaşıldığında (2 boyutlu haritalamalar yerine) algoritmasının sağladığı dairesel engel tahminlerinden uzaklaşma kavramı üzerine kurulu, düşük maliyetli bir yaklaşımdır. Geliştirilen güzergah planlayıcısı, sınırlı engel verisi sağlayan VAR/YOK algılayıcılarıyla yoğun engelli ortamlarda çarpışmasız dinamik güzergah planlamasının başarı ile uygulanmasına olanak sağlamıştır. Aynı zamanda haritalama gibi yüksek maliyetli eklentilere gerek duyulmaksızın, minimum sayıda parametre içeren süper-elipslerden yararlanarak hazırladığımız sanal engel kavramıyla (concept) U-şeklinde engeller ve tünel ortamlarında başarımlı artış sağlanabileceği gösterilmiştir. Algoritma sensör menzilineki hareketli nesneleri de engel olarak algıladığından, dinamik güzergah planlaması için uygundur. Bu planlayıcıdan, sade donanımlarla göreceli olarak yüksek başarımlı rotalama sağlanması nedeniyle sürü robot sistemlerinde de oğul robot (agent) planlayıcısı bileşeni olarak faydalanılabilir.

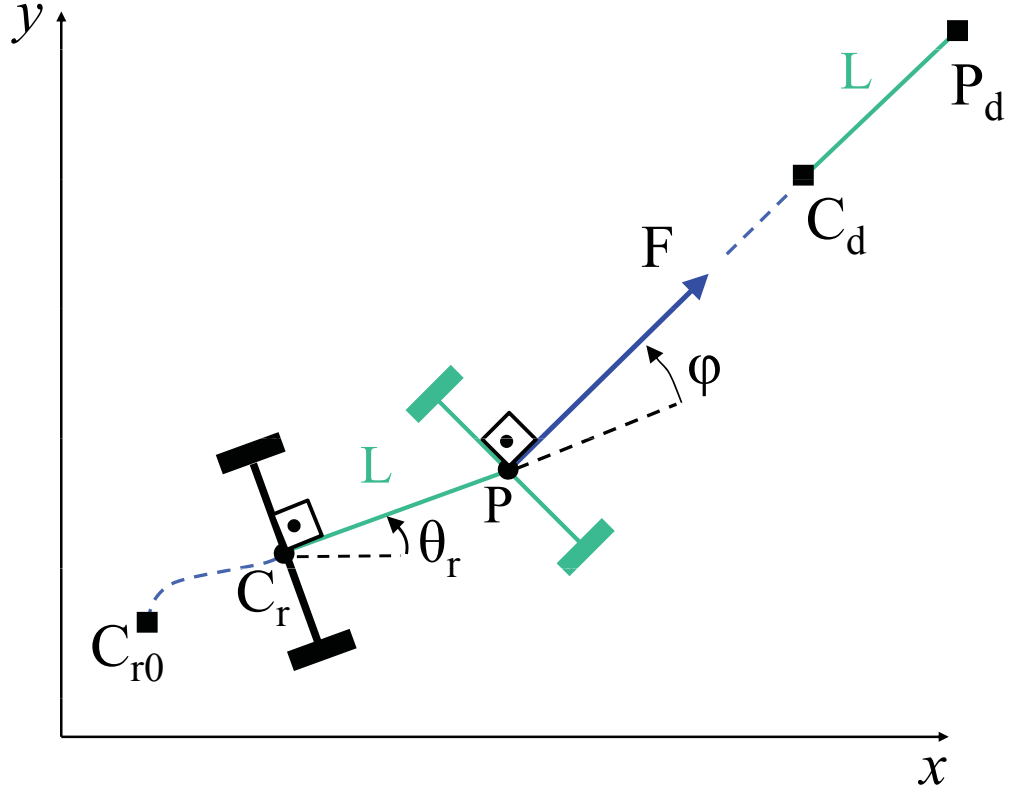
2.1. Kinematik Model

Bu çalışmada yararlanılan tek eksenli (unicycle) TMR kinematik modeli, aşağıdaki diferansiyel ilişki ile temsil edilir: [M'Closkey and Murray, 1997]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_l \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Bu denklemde $q_c = [x_c \ y_c \ \theta]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ TMR'un duruş vektörünü, $x_c(t), y_c(t)$ ağırlık merkezini, $\theta(t) \in \mathbb{R}^1$ ise robot yönelim açısını göstermektedir. $v(t) = [v_l \ \dot{\theta}]^T$ terimi ise lineer ve açısal robot hızından oluşan vektördür. Denklem (2.1) den robotun lineer hızı ve oryantasyonundan kartezyen uzayındaki hızları elde edilir:

$$\dot{x}_c = v_l \cos \theta, \quad \dot{y}_c = v_l \sin \theta. \quad (2.2)$$



Şekil 2.1: Sentetik ön eksenin kinematik modele eklenmesi ile rotalama.

TMR'ların yüksek başarılı takibi için, 2-boyutlu iş uzayında planlanan yörüngelerin holonom-olmama koşulunu modelleyen

$$\dot{x}_c \sin \theta - \dot{y}_c \cos \theta = 0 \quad (2.3)$$

denklemini sağlaması gereklidir.

2.2. Problem Formülasyonu

Geliştirilen tekli robot rota planlayıcısının temel amacı, yapısal özellikleri bilinmeyen engellerin bulunduğu iş uzaylarında, sade sensör kurulumlarından (configuration) elde edilen sınırlı yerel bilgiye karşın, tek-eksenli TMR'lar için çarpışmasız holonom-olmayan yörüngeler üretmektir. Bunun için Şekil 2.1'deki çift eksenli referans robot modeli kullanılmaktadır. Bu cihazın iki eksen arasındaki bağlantı L birim uzunluğunda olup, arka eksen ile dik açı oluşturacak şekildedir. Ön eksen kütle merkezi $P = [x_e \ y_e]^T \in \mathbb{R}^2$ noktasındadır. Eğer referans robot, bu P noktasından istenen bir P_d noktası yönünde, (ön eksenine dik açı oluşturacak şekilde)

bir F_s sürüş kuvvetinin uygulanması ile iletirirse, arka eksen merkezi, mevcut $C_r = [x_r \ y_r]^T$ noktasından, amaçlanan $C_d = [x_d \ y_d]^T$ noktasına doğru otomatik olarak hareket kısıtlamalı (non-holonomic) rota sentezleyecektir. Dolayısıyla ön eksen merkezi P_d noktasına ulaştığında, arka eksen de (bu konuma L birim uzaklıktaki) TMR için amaçlanan C_d konumuna ulaşmış olacaktır. C_d konumunda, TMR'un yönü yalnızca rotasyonla istenilen θ_d açısına ayarlanabildiğinden, zaten yönelim (orientation) amacından uzaklaşmamış olunur. Tekli TMR rota planlayıcısının diğer önemli kriteri, robotun amaç konumu yönünde hareketi sırasında karşılaşacağı engellerden sakınabilmesidir. Ön eksene uygulanan sürüş kuvveti, robotun yönü engellerden uzaklaşacak şekilde değiştirilerek bu amaç sağlanabilir.

2.3. Geliştirilen Rota Planlama Yöntemi

Bu bölümde tekli ve çoklu robot rota planlayıcıları detaylı olarak açıklanacaktır. Tekli robot planlayıcısı iki temel bileşenden oluşmaktadır:

- (i) TMR'un holonom-olmayan bir rotada önceden belirlenmiş bir noktaya doğru hareketi;
- (ii) Bu doğrultuda karşılaşılacak engellerden yalnızca düşük seviyeli algılayıcılardan elde edilen verilerle sakınma.

Bir sonraki alt bölümde U-şeklinde iç-bükey engeller ve tünellerle karşılaşıldığında yüksek maliyetli haritalamalara gerek duyulmadan rota planlamasının başarımını arttırabilen süper-elips tabanlı bir sanal engel kavramı önerilmiştir.

2.3.1. İstenen Konuma Doğrudan Sürme Yöntemi

Şekil 2.1'deki çift eksenli referans robotun genel kinematik modeli, denklemler (2.1) ve (2.2)'teki TMR kinematiklerinin uygun hız-kuvvet ilişkileriyle aşağıdaki forma genelleştirilmesinden elde edilir:

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= v_l \cos \theta_r, & \dot{y}_r &= v_l \sin \theta_r, \\ \dot{\theta}_r &= \frac{v_l}{L} \sin \varphi, & v_l &= F \cos \varphi. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Bu ifadelerde (2.1) denklemindeki modele temel eklentiler, lineer ve açısal hızlar v_l ve $\dot{\theta}_r$ için yeni tanımlardır. v_l genel sürüş kuvveti F_s ve sürüş açısı terimi φ türünden

tanımlanmıştır. Dolayısıyla (2.4) denklemindeki diğer üç ilişkiyi etkileyen bu terim sürüş kuvvetinin robot oryantasyonu yönündeki iz-düşümüdür. Değiştirilen diğer terim $\dot{\theta}_r$ TMR'un referans açısal hızı olup, lineer hızın yanı sıra L değişkenine bağlıdır. L , Şekil 2.1'de ön ve arka eksenlerin merkezleri arasındaki mesafedir. Açısal hız bu mesafeyle ters orantılı olduğundan, TMR'un manevra kabiliyetinin artırılması için L değeri düşük tutulabilir. Referans robotun ön eksen merkezi olan P noktasından uygulanan F_s sürüş kuvveti, daima istenen C_d robot terminal noktası yönündedir. Ancak bu kuvvet C_d konumuna değil, TMR'un yaklaşma açısına göre her engelden sonra yeniden belirlenen P_d noktasına ulaşınca kadar uygulanır. Bu hareketi arka eksenin izlemesi sonucunda tek eksenli TMR'lar için uygun holonom-olmayan rota elde edilir.

Ön eksene uygulanan kuvvet aynı zamanda mümkün olduğunca düzgün ve sabit tutulmalıdır. Bu koşulları sağlayan uygun bir kuvvet şöyle formüle edilebilir:

$$F_s = K \frac{e}{\sqrt{\|e\|^2 + \varepsilon}} + B\dot{e}. \quad (2.5)$$

(2.5) denkleminde $F_s = [F_x \ F_y]^T$ kuvvetin x ve y koordinatları yönündeki bileşenleri; $K, B \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ ise köşegensel, pozitif tanımlı ölçekleme matrisleridir. Ayrıca $\|e\|$, e ile gösterilen hata teriminin Öklid normudur. Bu hata terimi ön eksenin istenen ve şu anki konumları P_d ve P arasındaki fark olup:

$$e = P_d - P = [x_{ed} - x_e, \ y_{ed} - y_e]^T \quad (2.6)$$

şeklinde tanımlanır.

Açıklama 2.1 Eğer ön eksene tam olarak P - D tarzında bir kuvvet uygulansaydı, denklem (2.5)'deki sürüş kuvveti ilişkisi aşağıdaki gibi olurdu

$$F_s = Ke + B\dot{e}. \quad (2.7)$$

Ancak (2.7) denkleminde baskın Ke terimi, istenen konuma yaklaştıkça sıfıra yakınsayıp, referans robot hızında gereksiz bir yavaşlamaya neden olur. Bu problemi aşmak için, (2.5) denklemindeki gibi sürüş kuvvetinde konum hatası, kendi normuna bölünerek bir tür normalleştirme (normalization) sağlanmıştır. Hata normu, istenen ve amaç konumlar arasındaki mesafeyle ters orantılı olduğu için hedefe yaklaşma

sonucunda sürüş kuvvetinde oluşacak yavaşlamanın dengelenmesini sağlar. Denklem (2.5)'deki küçük $\varepsilon \in \mathbb{R}^+$ terimi ise amaçlanan P_d konumuna sıfır hata ile ulaşılsa meydana gelebilecek kararsızlık durumunu engellemek içindir. Orantısal bileşenin paydasına eklenen bu terimler sonucunda, lineer hızlar engel aşma manevraları haricindeki durumlarda sabit tutulmaktadır.

2.3.2. Engel Algılama ve Aşma

Uygulamalarda genel olarak robotlar, iş uzayında sensörleriyle belirlenen sınırlı bir bölgeyi algılayabilirler. “Algılama alanı” olarak adlandırılan bu bölge tek eksenli TMR’ların genellikle dairesel olmaları nedeniyle elipsoidal olarak alınmıştır. TMR’un sensörlerinin herhangi biri bir engel algıladığında, rota planlayıcısı engelden sakınma kipine geçer. Sakınma algoritması sade VAR/YOK sensörleriyle yüksek başarımlı sağlamaktadır. Bu kurulumun özellikleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Şekildeki elipsoit TMR’un algılama alanını, siyah noktalar sensörleri, gölgeli daireler ise engel tahminlerini göstermektedir. Rota planlama algoritması uyarı gönderen komşu sensör sayısına göre, o yönde “dairesel” bir engelle karşılaşıldığını varsayar. Bunun paralelinde, dairesel engellerin merkezleri $C_i(t)$ ve yarıçapları $R_i(t) \in \mathbb{R}^+$ için tahmini büyüklükler belirler. Bu hesaplamalarda veri gönderen komşu sensörlerin sayısı ve sinyal sürelerinden yararlanır. Engellerin tahmini boyutları ve merkezleri başlangıçta o konum civarından uyarı gönderen komşu sensör sayısına göre belirlenirken algılayıcı işaret sürelerine göre bu boyut arttırılır. Dolayısıyla sensör merkezleri de TMR’dan uzaklaşır. Sonraki aşamada algoritma, her engel tahmini merkezi $C_i(t)$ noktasından, referans robot ön eksen $P(t)$ ’ye doğru bir $F_{oi} = [F_{oxi}, F_{oyi}]^T$, $i = 1, \dots, N$, kuvvet bileşeni uygular. Bu F_{oi} kuvvetlerinin bileşkesi ise F_o genel engelden sakınma kuvvetini oluşturur:

$$F_o(t) = \sum_{i=1}^N F_{oi}(t) = \sum_{i=1}^N w_i R_i(t) \frac{[P(t) - C_i(t)]}{\|P(t) - C_i(t)\|^2}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.8)$$

(2.8) denkleminde R_i , C_i , ve P önceki paragrafta açıklanan terimler olup, $w_i \in \mathbb{R}^+$ sabit bir ağırlık katsayısıdır. Bu bileşenlerine göre, engelden sakınma kuvveti F_o , potansiyel kuvvetlerine benzer şekilde, P ön eksen ve C_i engel merkezleri arasındaki mesafeyle doğru orantılı olarak azalır. Ayrıca bu mesafe ve $w_i \in \mathbb{R}^+$

ağırlığının ayarlanması ile robot hareket yönündeki engellerin etkisi daha uzaktaki engellerden yüksek olacağından robotun hareketi yönündeki engellerden sakınmaya ağırlık verilmektedir.

Yukarıdaki bilgilerin paralelinde (2.8) denkleminde her güç bileşeninin oranı, ilgili engelin etki süresiyle artmaktadır. Ancak genel engelden sakınma kuvveti F_o , denklem (2.5)'teki F_s istenen konuma doğrudan sürme kuvvetine normalleştirilerek genliği sabitlenmektedir:

$$F_{on}(t) = \|F_s(t)\| \frac{F_o(t)}{\|F_o(t)\|}. \quad (2.9)$$

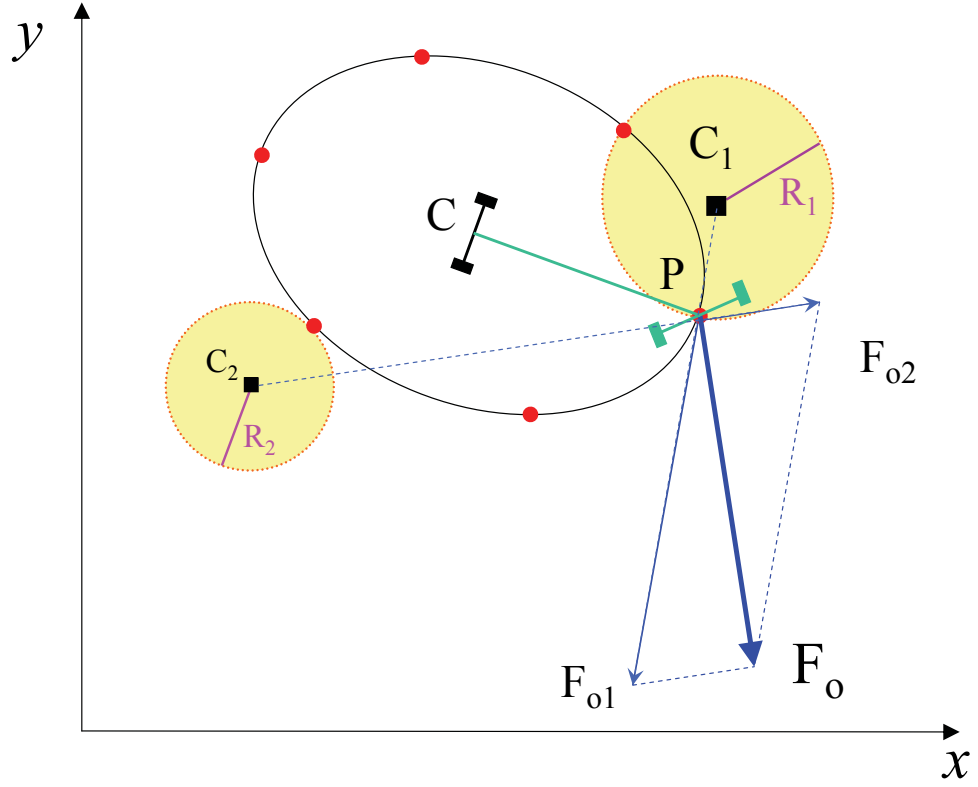
Bu işlem sonucunda elde edilen F_{on} kuvveti hedefe sürme modundan engel aşma kipine geçişte, referans hızlarında sıçramalar oluşmasının önüne geçilmektedir (bumpless velocity generation).

Açıklama 2.2 *Karşılaşılan engeller algılama alanından çıkar çıkmaz ilgili $F_{oi}(t)$ engel aşma kuvveti bileşeni sonlandırılmamalıdır. Yoksa rota planlayıcısı ileri sürüş ve engelden sakınma kipleri arasında sürekli anahtarlama yapmaya başlayıp genel sürüş kuvveti F ve lineer hız v_l de çatırdamalara sebep olabilir. Bu nedenle engel aşmada amaç konuma yönelme kipine iki aşamalı geçiş uygulanır. Geçişin ilk aşamasında, engelin tahmini boyutuna sanal bir marjın eklenmesiyle sakınma kuvveti bir Δt süresi kadar daha uygulanır. İkinci aşamada ise sakınma kipinden hedefe yönelim kipine 1. dereceden bir şablon (spline) ile geçiş gerçekleştirilir:*

$$F = F_s \frac{(t - t_s)}{\delta t} + F_{on} \frac{(t_s + \delta t - t)}{\delta t} \quad (2.10)$$

(2.10) denkleminde F_s ve F_{on} sırasıyla (2.5) ve (2.9) denklemlerinden elde edilen kuvvetlerdir. Bu geçiş safhası $t \in [t_s, t_s + \delta t]$ zaman aralığında sınırlı olup, t_s engelin, algılama alanından çıkış zamanını, δt ise geçişin süresini göstermektedir. Bu iki aşamalı geçiş ile muhtemel çatırdamaların önüne geçilmesinin yanı sıra TMR'un oryantasyonunun hedef yönünden çok sapması sonucunda meydana gelebilecek düzgünlük kayıpları da engellenir.

Rota planlayıcısının uygulandığı sürüş kuvveti $F(t)$, TMR engellere yakinken sakınma kuvveti $F_{on}(t)$; geniş açıklıklarda bulunurken ise ileri sürüş kuvveti $F_s(t)$ 'ye



Şekil 2.2: Engel algılama ve aşma modelinin şeması. (C_i, R_i $i = 1, 2$ sırasıyla dairesel engel tahminlerinin merkezlerini ve yarıçaplarını göstermektedir.)

yakınsamaktadır. Bu şekilde tekli TMR'ların engelli ortamlarda holonom-olmayan hareketi için algoritmik olarak verimli bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin üç temel kipindeki sürme kuvvetleri aşağıdaki ilişki ile özetlenmiştir:

$$F = \begin{cases} F_s(t), & \text{Hedef Sürme Kipi} \\ F_{on}(t), & \text{Engelden Sakınma Kipi} \\ F = F_s \frac{(t-t_s)}{\delta t} + F_{on} \frac{(t_s+\delta t-t)}{\delta t}, & \text{Geçiş Periyodu} \end{cases} \quad (2.11)$$

2.3.3. Büyük U-Şeklinde Engeller ve Karmaşık Geometrilili Tüneller İçin Eklenti Önerileri

(2.8) denkleminde R_i yarıçaplı dairesel engel tahminleri yapılması, sadece engelin $F_o(t)$ genel sakınma kuvveti içindeki payını belirleyen bir soyutlamadır. Engelden sakınma algoritması farklı şekillerde engellerin aşılması için yeterlidir. Ayrıca karşılaşılan engellerin iç-bükey kısımları çok büyük boyutta olmadığı müddetçe, aşılmalarında sorunla karşılaşmamaktadır. Problem teşkil edecek durumlar, TMR'un şablon geçiş periyodunun kısa olması nedeniyle takıldığı konkav engeller ve hedefe

yönelim bileşeninin olumsuz etkisi nedeniyle ters yöne sapma yaptığı, çok karmaşık topolojili tünellerdir.

Açıklama 2.3 *Konkav engeller robotun amaç konuma uzaklığının monitörlenmesi ya da sensörlerin uzun süreler işaret göndermesi sonucunda tespit edilebilir. Dolayısıyla geçiş süresinin, δt ve Δt parametre değerlerinin arttırılmasıyla algoritmanın başarımı ciddi oranda yükseltilebilir. Ancak başarımların artışı, parametrelerinde yüksek değerlerinin kullanımı nedeniyle. Bu durumun, yakın serpiştirilmiş engeller arasındaki bazı en kısa yolların tespit edilememesi sonucu zaman ve enerji kaybına yol açmaması için, U-bloklar ve tünellerden açıklıklara çıkışın belirlenmesi ve δt ve Δt parametrelerinin de buna göre uyarlanması önemlidir. Yoğun engelli ortamlarda VAR/YOK sensörlerinin sınırlı bilgisi ile U-engellerden kurtulmayı sağlayan bir yaklaşım olarak,*

$$\frac{(x - x_0)^4}{a^4} + \frac{(y - y_0)^4}{b^4} = 1$$

formundaki 4. dereceden süper-elips eğrilerinin uygulanmasını önermekteyiz. Bu kapalı eğrilerin ağırlık merkezleri (x_0, y_0) noktası U-blokların içinde kalacak şekilde atanırsa, x yönünde a, y yönünde ise b birim kadar açıklığa sahip bir sanal engel oluşturulur. Dolayısıyla TMR'lar U-engeller içerisindeyken δt ve Δt parametre değerleri ilgili hiper-elipsin dışına ulaşıncaya kadar arttırılır ve engeli içeren bu alandan dışarı çıkılınca da bu bölgedeki sanal elipsoit engel aktif duruma getirilerek U-tuzağı etkisizleştirilir. Artık TMR'un yeniden bu engel içine girme riski bulunmadığından geçiş kipinin parametreleri ilk değerlerine atanarak algoritmanın adaptasyonu gerçekleştirilmiş olur.

Açıklama 2.4 *TMR'un yalnızca ön sensörünün engel sinyali göndermesi durumunda, sağ ya da sola dönüş tercihi, aracın kullanıcısına bırakılmıştır. Bu amaçla benzetim modeline bir giriş eklenmiştir. Bu girişle benzetimden önce yapılan tercihe göre, böyle durumlarda rota planlayıcısı en ön sensörünün yanı sıra, tercihe ters yöndeki komşu sensörünün de işaret gönderdiğini varsayarak uygun dönüşü gerçekleştirmektedir. Örneğin Şekil 2.2'de gösterilen ilk dairesel engel tahmini geçerli dönüş tercihinin sağ yön olduğu bir durumda yalnız ön sensörün bilgi göndermesi sonucunda elde edilmiş olabilir. Bu esneklik algoritmaya sadelik katmaktadır. Ancak veri yetersizliğinden kaynaklanan sağ ya da sola dönüşün hangisinin daha uygun olduğu yönündeki belirsizlik,*

özellikle çoklu-robot uygulamalarında bazı üyelerin tüneller gibi dar ortamlarda ters yöne dönmeleri ve kendilerini izleyen robotları da olumsuz etkilemeleriyle sürülerin hareket verimliliğinin azalmasına yol açabilirler. Bir sonraki bölümde bu problemin engellenmesi için bazı öneriler sunulacaktır.

2.4. Benzetim Sonuçları

Önerilen rota planlama yöntemiyle tekli ve çoklu robotların, farklı topolojili birçok engelin bulunduğu ortamlarda detaylı benzetimleri yapılmıştır. Bu benzetimlerde Matlab[®]/ Simulink[®] platformlarında C s-fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Planlayıcı farklı sensörlerle çalışabilecek durumda olmasına karşın, yeterli başarıımı gösteren sade VAR/YOK algılayıcıları tercih edilmiştir. Algılayıcı sayısı, küçük TMR kurulumlarına ve tezin sonraki bölümlerinde üzerinde durulan sürü robotiğindeki kısıtlamalara uygun şekilde, 6 adet ile sınırlandırılmıştır. Elipsoit şeklindeki algılama alanının boyutu ise büyük ve küçük eksen yarıçapları

$$a = 22.5, \quad b = 20 \text{ [cm]}. \quad (2.12)$$

olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Denklem (2.5)'deki sürüş kuvvetinin orantısal ve türevsel parametreleri

$$K = \text{diag}(0.165, 0.165), \quad B = \text{diag}(0.01, 0.01), \quad (2.13)$$

şeklinde olup yine küçük TMR'ların manevra sınırları dahilinde hız profilleri üretimini sağlarlar. Referans robotun ön ve arka eksenleri arasındaki L mesafesi ise algılama bölgesinin büyük yarıçapı olan a nın değerine eşit tutulmuştur. Bu tercih, TMR'un sürüş mekanizmasına uygun boyutta açısal hızlar ($\|\dot{\theta}_r\| \leq 0.8\text{rad/s}$) verirken aynı zamanda karmaşık engellerin aşılması için yeterli manevra serbestliği sağlamaktadır.

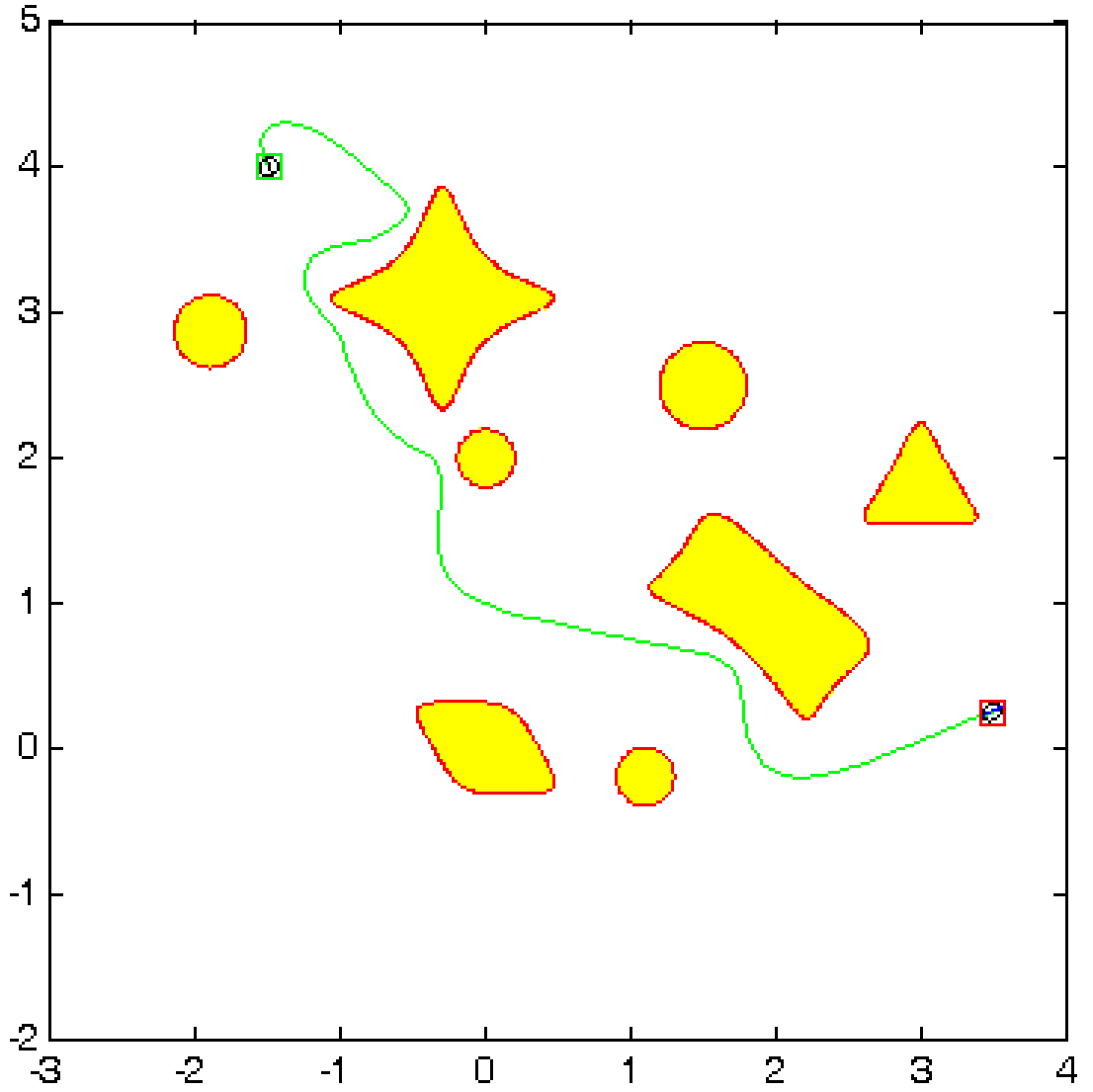
Benzetimlerde [Dixon et al., 2000]'daki hız sınırlamalı denetleyici kullanılmıştır. Uygulanan denetleyicinin yüksek başarılı işlevi için, sentezlenen rotanın holonom olmasının yanı sıra, mümkün olduğunca düzgün olması da gereklidir. Bunu sağlama amacıyla bazı ek düzenlemeler yapılmıştır. Öncelikle hareketin başlangıcında ani ivmelenmeleri engellemek için (2.5) denklemindeki sürme kuvveti yumuşak başlangıç yapacak şekilde ayarlanmıştır:

$$F_s^s(t) = (1 - \exp\{-t^3\})F_s(t). \quad (2.14)$$

İkinci olarak da hedefe sürüş kipinden engelden sakınma moduna geçişlerde, algoritmanın gereksiz yere karmaşılaştırılmaması için tersi durumdaki gibi (2.10) denklemine benzer şablonlu geçişler uygulanmamıştır. Ancak engelle karşılaşıldığında, sürüş kuvveti F 'nin ani değişimi sonucu az miktarda da olsa holonomluk kaybı söz konusu olmaması için, algoritmanın gerçekleşmesinde “ikincil referans robot” olarak adlandırdığımız bir kavramdan yararlanılmıştır. Buna göre bir referans robot, (doğrudan hedefe sürme, engel aşma, vb.) rota planlayıcısının standart modlarında takip edilecek yörüngeyi çizerken, bu yörüngeyi referans alan ikinci bir iki eksenli sistem de asıl robota sunulacak daha düzgün bir rotayı sentezler. Kipler arasında geçişteki küçük boyutlu çatırdamalardan etkilenmeyen bu ikincil rota, çok daha düzgün olup duruş hatalarını 10 kata yakın azaltabilir, ya da daha yüksek örnekleme zamanları sağlayarak benzetim sürelerini 2 kat oranında kısaltabilir. Özellikle daha hızlı operasyon sağlanması çoklu robot hareket planlamasında önemli bir özellik olup bu bölümdeki benzetimlerde yararlanılmıştır. İkincil referans robot kullanılması (2.4) denkleminin dinamiğinden açısal hızda biraz sınırlamaya sebep olabilir, ancak bu durum hız denklemini etkileyen L mesafesinin azaltılmasıyla kolayca önlenebilir.

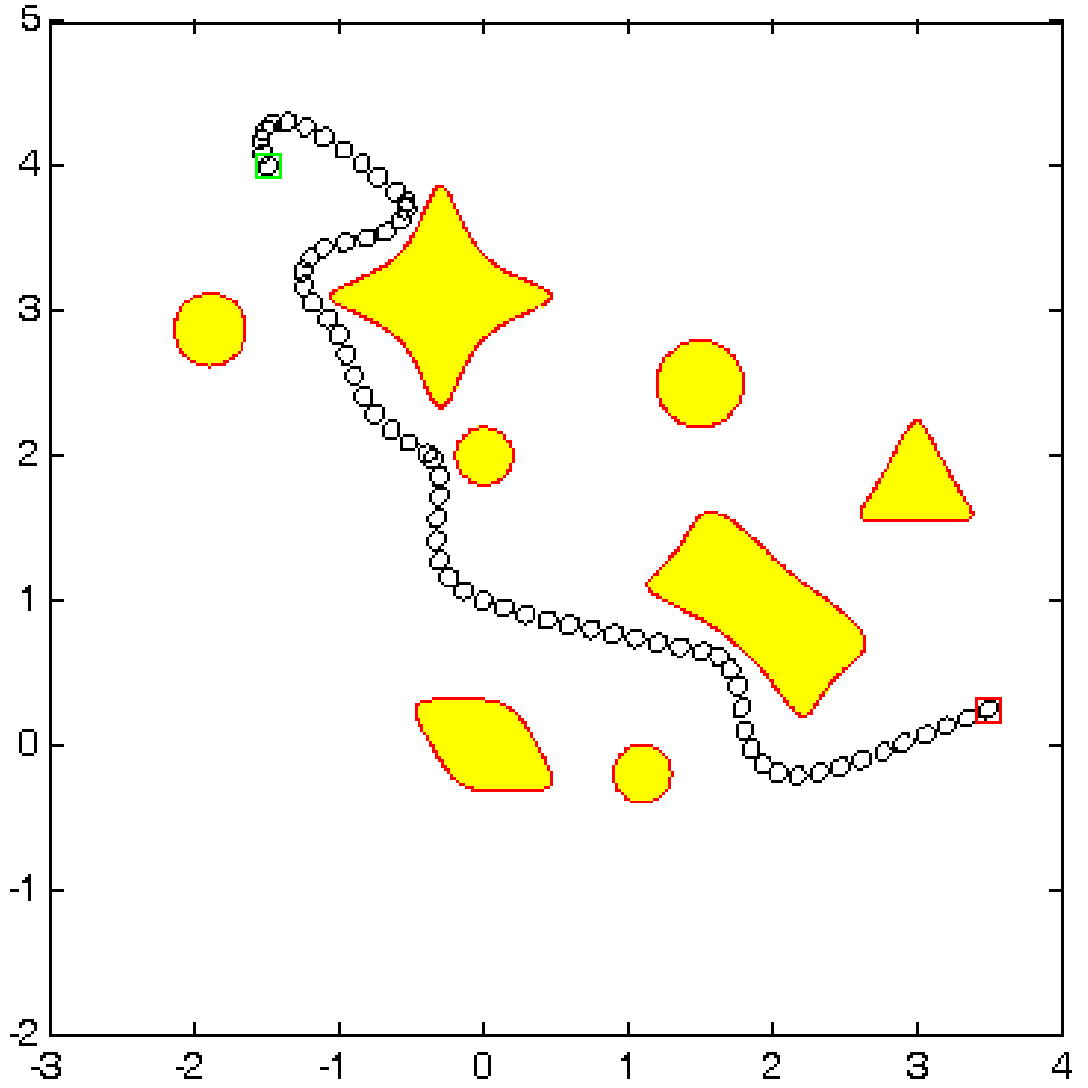
Standart yazılım ve donanımlardan yararlanılmasına karşın çoklu robot ortamları dahil tüm benzetimlerde gerçek zamanlı rota planlaması ve denetimi sağlanmıştır. Bölümün kalan kısımlarında bu benzetimler detaylı şekilde açıklanacaktır.

İlk benzetim Şekiller 2.3 ve 2.4’de gösterilmektedir. Burada engeller, koyu renkli sınır çizgileri olan açık renkle dolgulu şekillerdir. Fazla zorlu olmayan genel engellerin bulunduğu bu ortamda tek bir robotun rota planlaması amaçlanmaktadır. Şekiller 2.3 ve 2.4 aynı hareket profilini göstermektedirler, ancak Şekil 2.3’de rotanın izi oluşturularak düzgünlüğünün gösterilmesi amaçlanırken, 2.4’de rota boyunca robotun izdüşümü gösterilerek çarpışmasız hareket sağlanması vurgulanmıştır. İlk ve istenen TMR konumları $C_{r0} = [-1.5, 4.0]^T$ [metre] ve $C_d = [3.5, 0.25]^T$ [metre] larde dörtgenlerle işaretlenmişlerdir. Açıklama 2.4’ün paralelinde, TMR’un yalnızca ön sensörü engel algıladığında, sağ ya da sola dönüş aracın kullanıcısının tercihi bırakılmıştır. Bu benzetimde ise ilk karşılaşılan blok civarında gözlemleneceği gibi sağa dönüş geçerli olarak alınmıştır. Planlanan rota, robotun karşılaştığı birçok engele karşın düzgün olup ihmal edilebilir düzeyde hata ile takip edilmektedir. Bu özellikleri daha açık göstermek amacıyla, robot referans hızları, sentezlenen



Şekil 2.3: TMR'un engelli ortamda düzgün holonom olmayan yörüngesi.

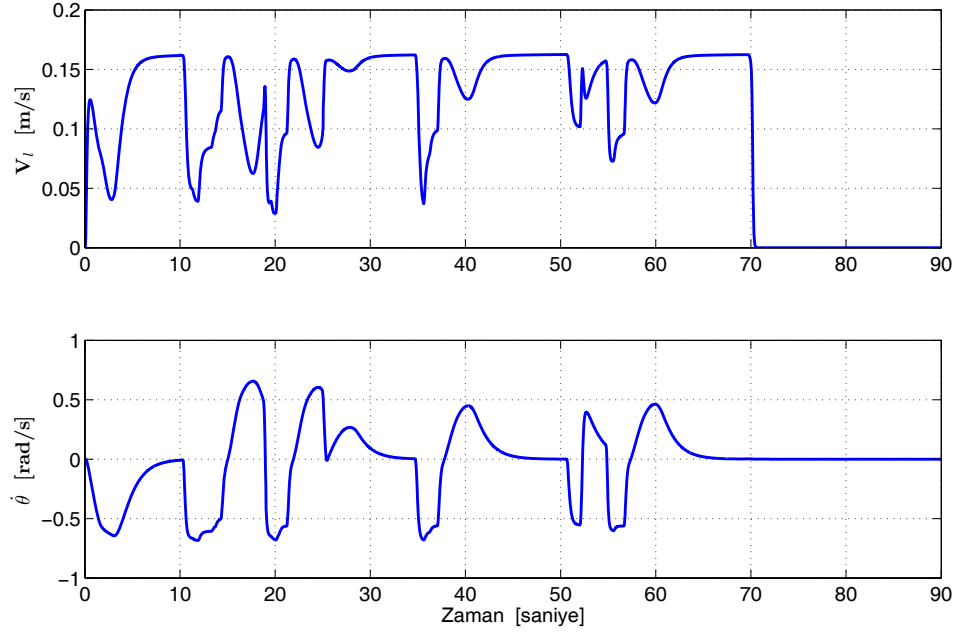
duruş rotası ve duruş izleme hataları üzerine bir dizi benzetim sonucu sunulmuştur (bkz. Şekiller 2.5-2.7). Şekil 2.5'te gösterilen lineer ve açısal hızlar, ikincil referans robot ve engel aşma ile hedefe sürme arasındaki şablonlu geçişler sonucunda çatırdamalar içermemektedir. Ayrıca denklem (2.5)'deki sürme fonksiyonu seçimi sonucunda, Açıklama 2.1'e paralel şekilde hız zarfında (envelope) amaç noktaya kadar sönümleme olmamaktadır. İzlediği güzergah boyunca içbükey olanlar dahil çeşitli engellerle karşılaşmasına rağmen, Şekil 2.6'daki rotadan TMR'un $C_d = [3.5, 0.25]^T$ [metre] istenen konumuna ulaştığı gözlemlenmektedir. Şekil 2.7'de ise takip hataları [cm] gösterilmektedir. Şekilden yalnızca engelden sakınma sırasında bazı küçük dalgalanmalar olduğu, ancak bunların kısa zamanda sönümlemesiyle sefer sırasında



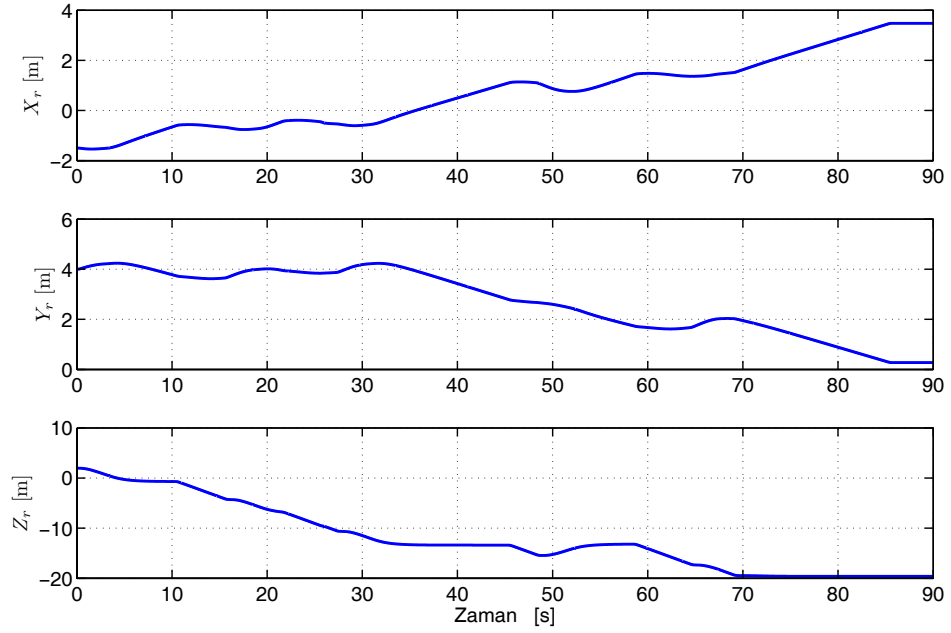
Şekil 2.4: TMR'un çarpışmasız güzergah profili. (Elipsoit dizisi TMR'un yolu üzerine izdüşümüdür.)

genel hatanın sıfıra yakın seyrettiği gözlemlenmektedir. Şekil 2.8'de referans robot ön eksenine uygulanan sürme kuvveti (sanal hız) bileşenleri gösterilmektedir. Şekil 2.9'da ise sürme kuvvetinin norm büyüklüğü ve yönü gösterilmektedir.

Tekli TMR rota planlayıcısı için uygun sensör adedini belirleyebilmek amacıyla benzetim farklı sayıda sensörlerle de tekrarlanmıştır. Tezin amaçları arasında sürü robot uygulamaları da olduğundan planlayıcının mümkün olduğunca sade donanımlarla yeterli başarımlı göstermesi önemlidir. Sensör adedi dörde indirilirse, ilk benzetim gibi sade engelli ortamlarda bile rota planlamasında başarımlı kaybı yaşanabilmektedir (Bkz. Şekil 2.10). Bunun temel sebebi dört

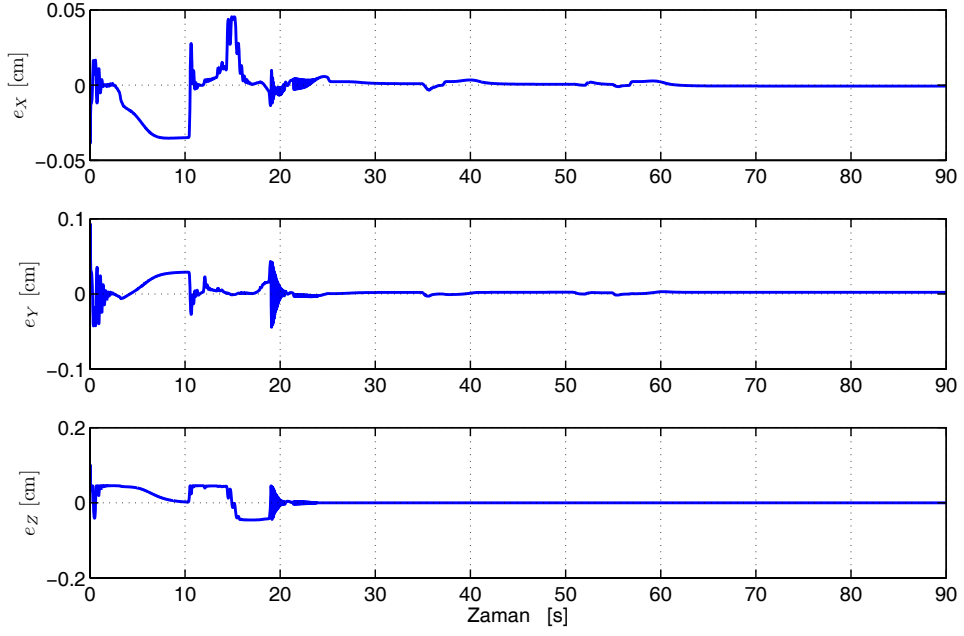


Şekil 2.5: İlk simülasyondaki Lineer ve Açısal Referans Hızlar.

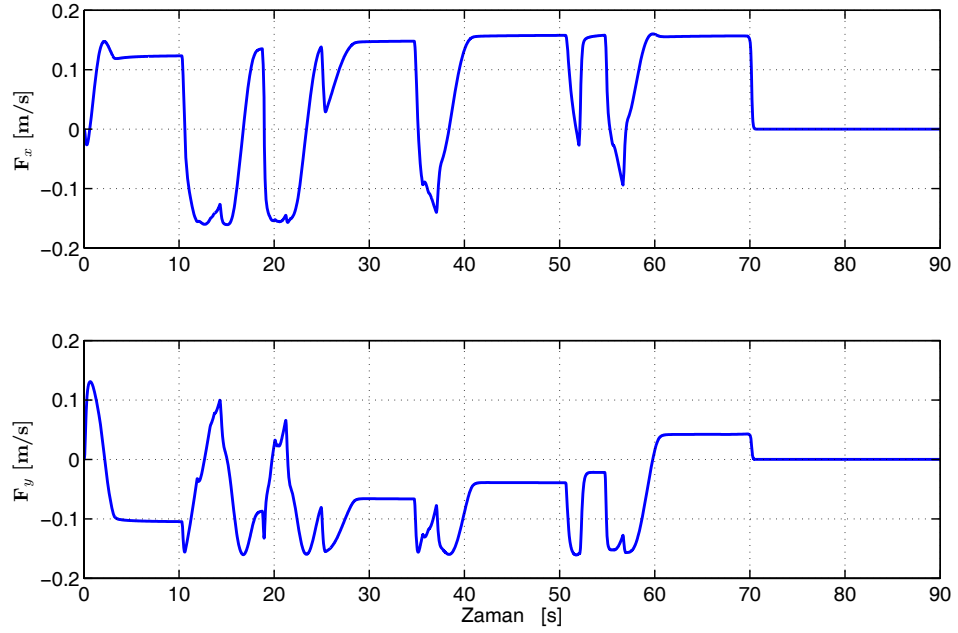


Şekil 2.6: İlk benzetimde sentezlenen duruş yörüngesi

sensörlük bir VAR/YOK algılayıcı kurulumunun robot çevresini yeterince etkin şekilde taramasının zorluğudur. Özellikle robotun önden konkav bloklarla karşılaştığında devre dışı kalma durumu ortaya çıkabilmektedir (bkz. Şekil

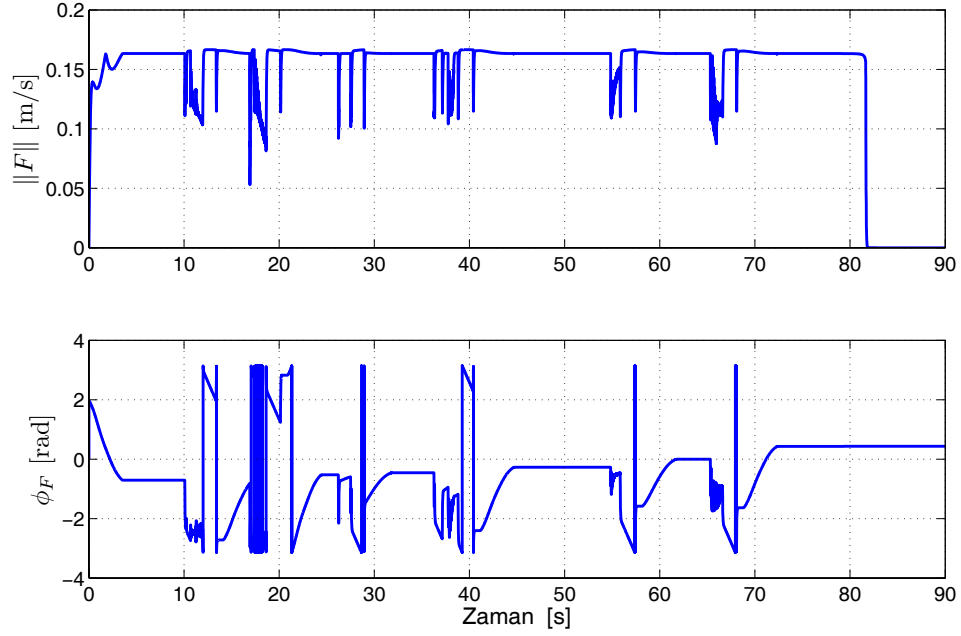


Şekil 2.7: Referans robotun duruş hataları.



Şekil 2.8: Ön eksene uygulanan sürme kuvveti bileşenleri.

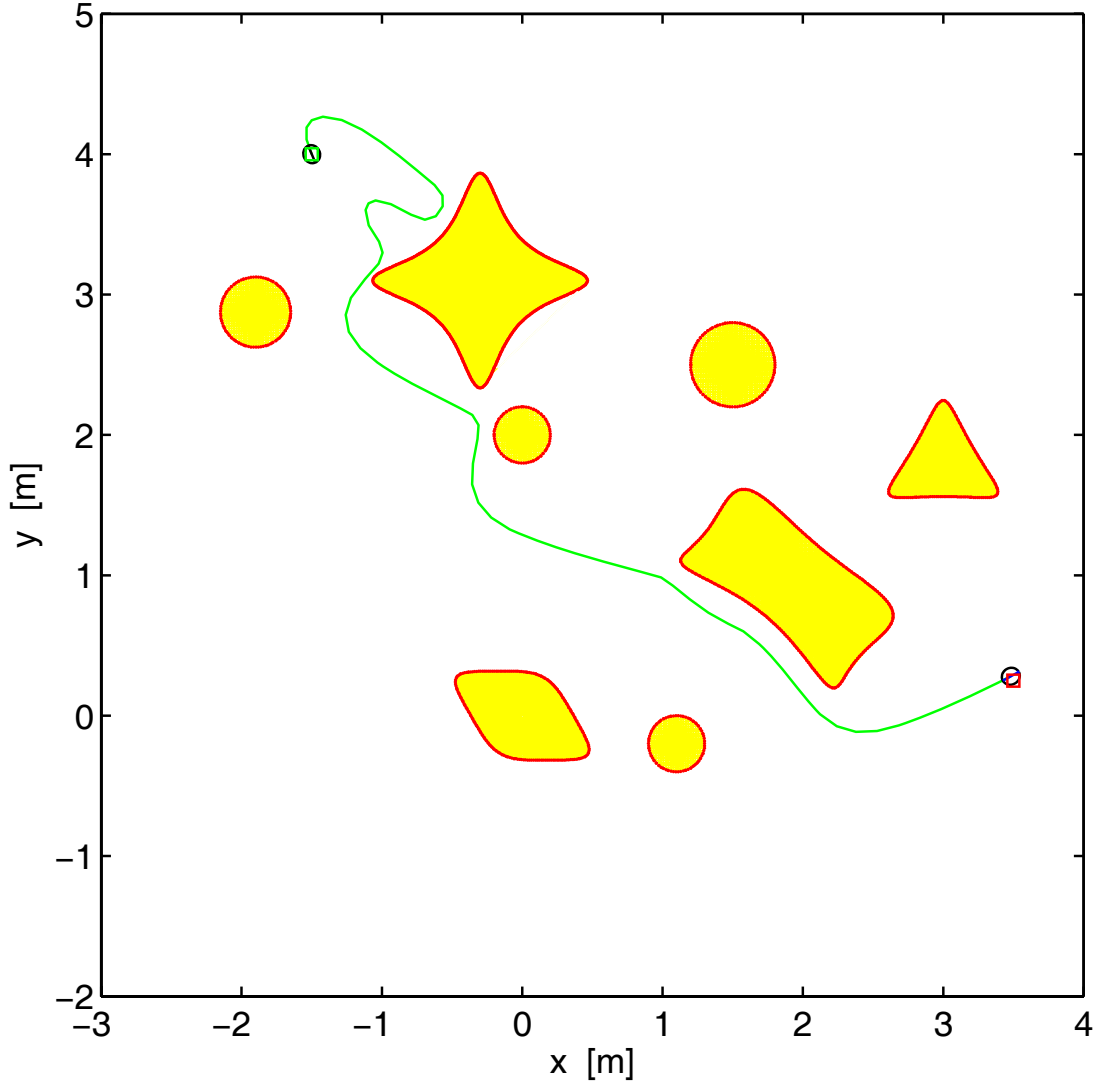
2.10 daki ilk engelde rota düzgünlük kaybı). Rota planlayıcısı sekiz sensörle de uygun bir planlama gerçekleştirmektedir. Bununla ilgili simülasyon sonucu Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Ancak maliyet ve sürü planlamasına uygunluk gibi



Şekil 2.9: Sürme kuvvetinin norm ve yön bileşenleri.

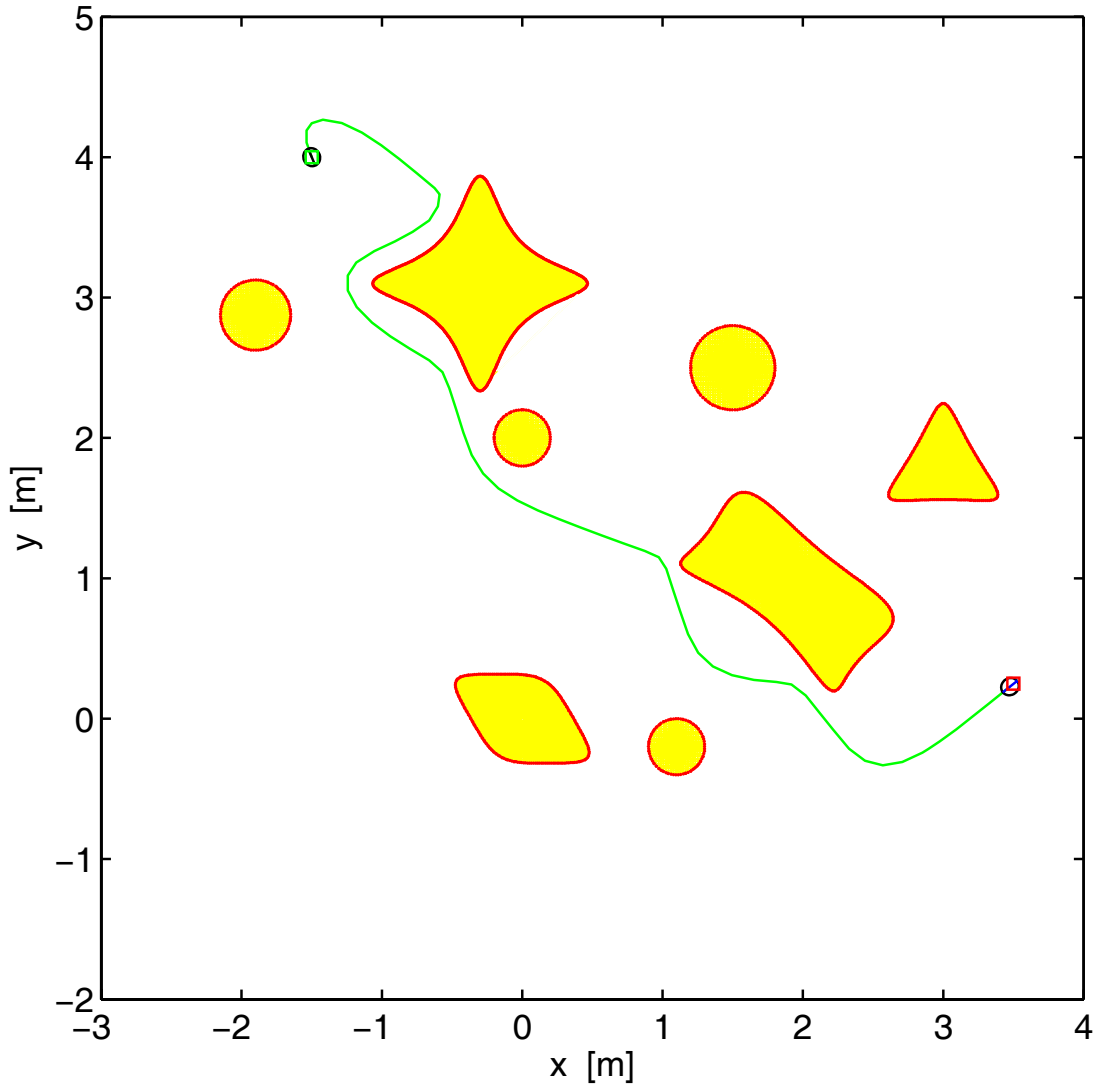
koşullar değerlendirilerek 6 sensörün yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. İlgili temel nedenler: (i) Az sayıda engelli ortamda sade örtük fonksiyon modelleri ile engel tespiti yapılmasına karşın, 6 yerine 8 sensör kullanımı simülasyon süresinde %10 luk bir artışa neden olabilmektedir. Engelden sakınma kipi benzetimin sınırlı bir periyodunda uygulandığından, hesaplama maliyeti yoğun engelli ortamlarda, algoritmayı daha verimsizleştirebilir. (ii) Donanımsal maliyet ve TMRun sınırlı enerji kaynağına yüklenme diğer bir faktördür. (iii) Çok sayıda TMR'un yoğun engelli ortamlarda kolektif rota planlaması sırasında 6 sensör yerine 8 ya da daha fazla sensör kullanılması bloklanma olasılığını (deadlocks) artırabilir.

Bir sonraki benzetimler Δt ve δt şablon geçiş parametreleri için yüksek değerler kullanılmasının U-bloklar ve tüneller gibi karmaşık engellerin aşılmasındaki yararı üzerinedir. Planlayıcının içbükey engellere karşı davranışı Şekiller 2.12 ve 2.13 'de gösterilmiştir. Aşırı içbükey engellere örnek olan U-bariyerleri, birçok mevcut rota planlama algoritmasının sentezlediği TMR yörüngelerini hapsedebilmektedirler. Şekiller 2.12(a)-2.12(b)'deki benzetimlerde robotun geliş yönüne göre en kötü U-engel koşulu olan, amaç konumun merkez duvarın hemen arkasına denk gelen durumu sınanmıştır. Bu şartlarda (2.10) denklemi ile modellenen genel sürüş kuvveti, hedef



Şekil 2.10: İlk Benzetimdeki TMR hareket görünüşü (4 sensör).

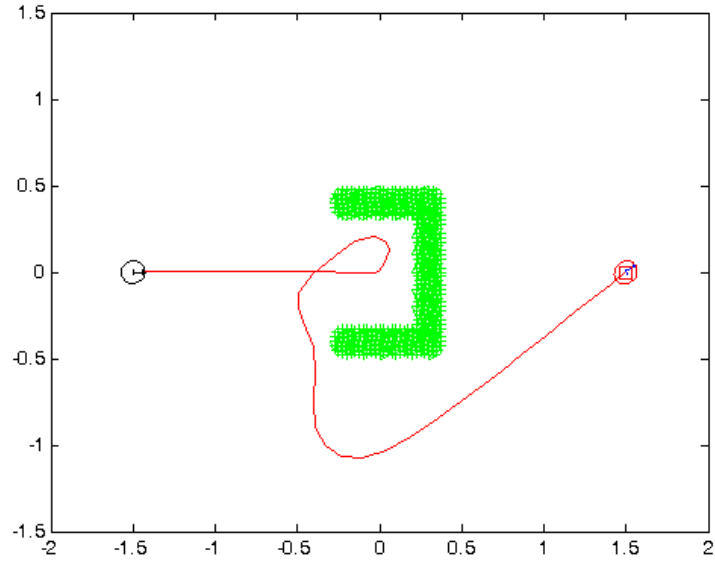
konumuna sürme bileşeni ağırlığının, Δt ve δt değerlerinin küçük seçilmesi sonucunda fazla olması, TMR'un yönünü daima tuzak konum olan iç-bükey alana çekme potansiyeli göstermektedir. Şekiller 2.12(a)-2.12(b)'de göreceli olarak küçük $\Delta t = 0.6$ ve $\delta t = 2$ [saniye]'lik şablon periyot parametre değerleri için algoritmanın sırasıyla bir küçük bir de büyük U-engele karşı davranışı gösterilmektedir. Bu değerlerle TMR yalnızca Şekil 2.12(a)'daki küçük engeli aşabilmekte, ancak Şekil 2.12(b)'den görüldüğü gibi büyük bariyerde hapsolarak salınım yapmaya başlamaktadır. Aynı ortamlardaki benzetim Şekiller 2.13(a)-2.13(b) de $\Delta t = 0.8$ ve $\delta t = 4$ [saniye] değerleri için tekrarlanmıştır. Bu şekillerden, ilgili değerleri arttırmanın (2.10) denklemindeki hedefe yönelim etkisini azaltarak TMR'un büyük engelden de kurtulmasını sağladığı net olarak görülmektedir. U-engelli simülasyonlarda Δt ve δt geçiş



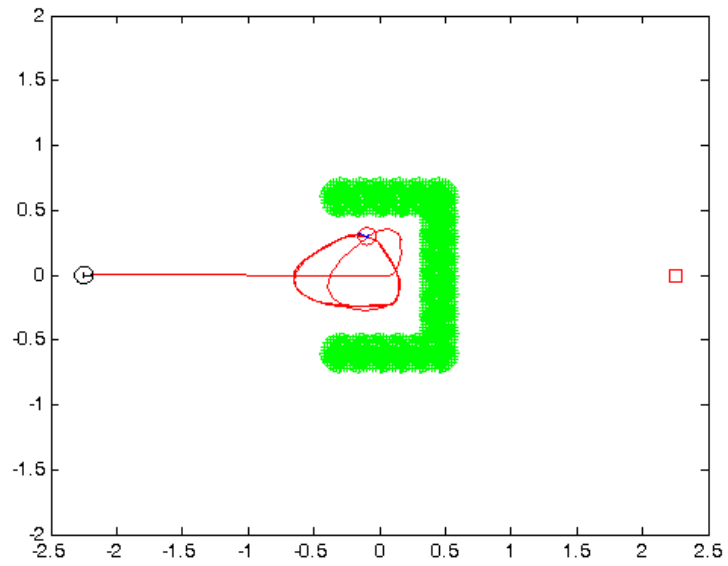
Şekil 2.11: İlk Benzetimdeki TMR hareket görünüşü (8 sensör).

zamanı parametrelerinin sistematik şekilde ayarlanmasıyla U-engellerin aşılmasından sonra amaç konuma yönelme zamanı da kısaltılabilir. Bu durumu örneklendiren bir benzetim şekiller 2.14(a) ve 2.14(b)'de gösterilmektedir. Şekil 2.14(a)'da, TMR kısa geçiş periyodu nedeniyle hapsolmaktadır. Şekil 2.14(b)'deki simülasyonda ise, Şekil 2.13(b)'deki benzetimin aksine, Δt ve δt , $x^4 + y^4 = 1$ denklemiyle sınırlanmış engel bölgesini kapsayan alandan ayrılanaya kadar artırılır (Bkz. Açıklama 2.3). Sonra geçiş parametreleri önceki değerlerine getirilir. Böylece TMR'un

- (i) daha kısa bir rotada ilerlemesi; ve
- (ii) yeni engellerle karşılaştığında, bu blokların aralarındaki küçük geçitleri bulma olasılığının artırılması



(a) Düşük geçiş süresi küçük U-engelden sakınma için yeterlidir.

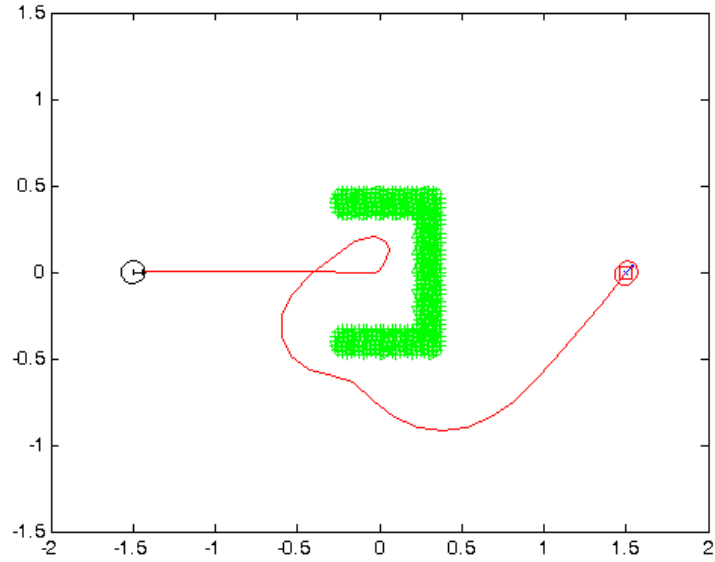


(b) Büyük U-bariyerde ise kısa geçiş süresi TMR'un tuzak konumuna düşmesine engel olamamıştır.

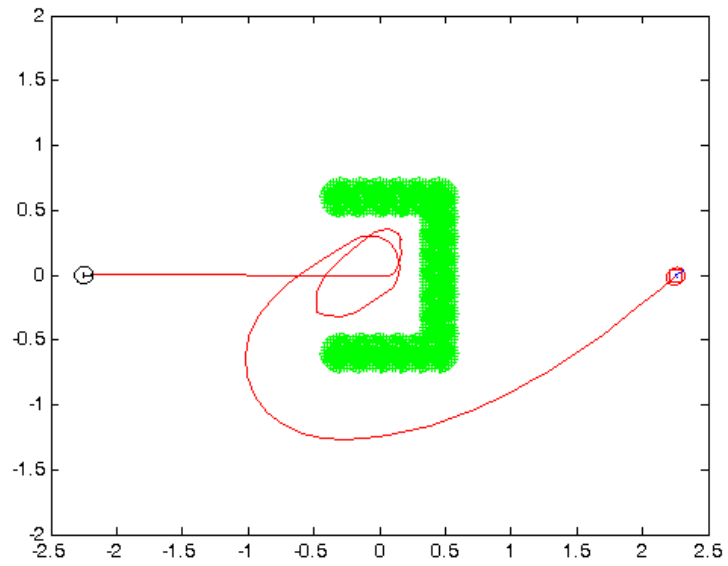
Şekil 2.12: Bir küçük ve bir büyük U-bariyer bulunan ortamda düşük Δt ve δt değerleri ile rota planlaması.

sağlanarak zaman ve enerji tasarrufu gerçekleştirilir.

Bir sonraki benzetimler Şekil 2.15'teki karmaşık geometrili tünel ortamında bir TMR için rota planlaması üzerinedir. Bu simülasyonun amacı TMR'u keskin virajlara karşın sol taraftan sağ bölümdeki açıklığa ulaştırmaktır. Şekil 2.15(a)'da gösterilen ilk benzetimde yine geçiş parametreleri için $\Delta t = 0.6$ ve $\delta t = 2$ [saniye] gibi küçük değerler kullanılmıştır. Dolayısıyla bir önceki benzetimde görüldüğü gibi yerel



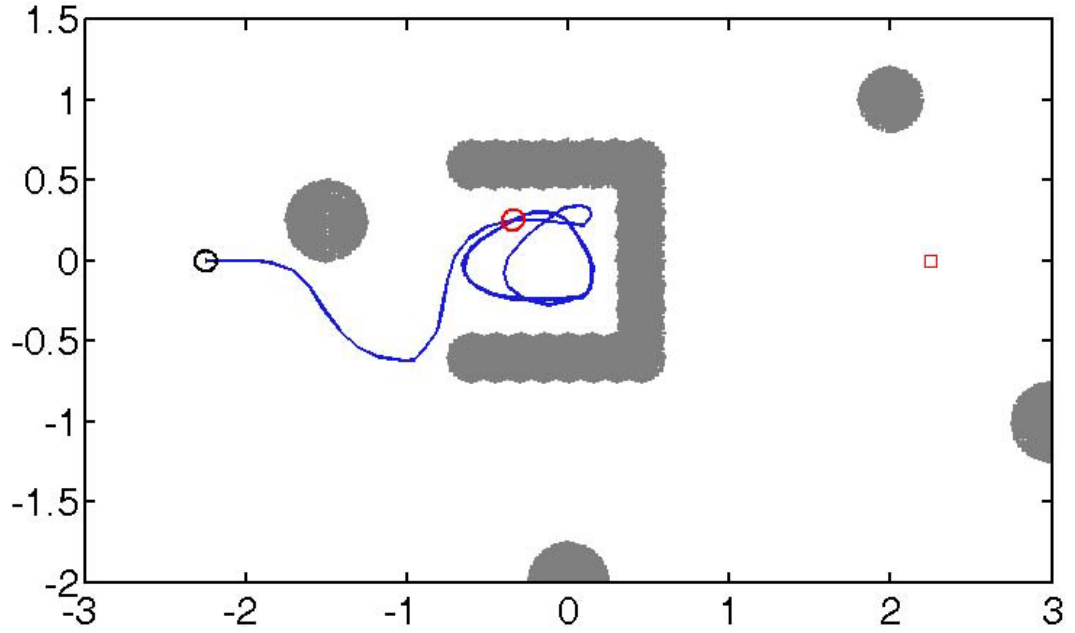
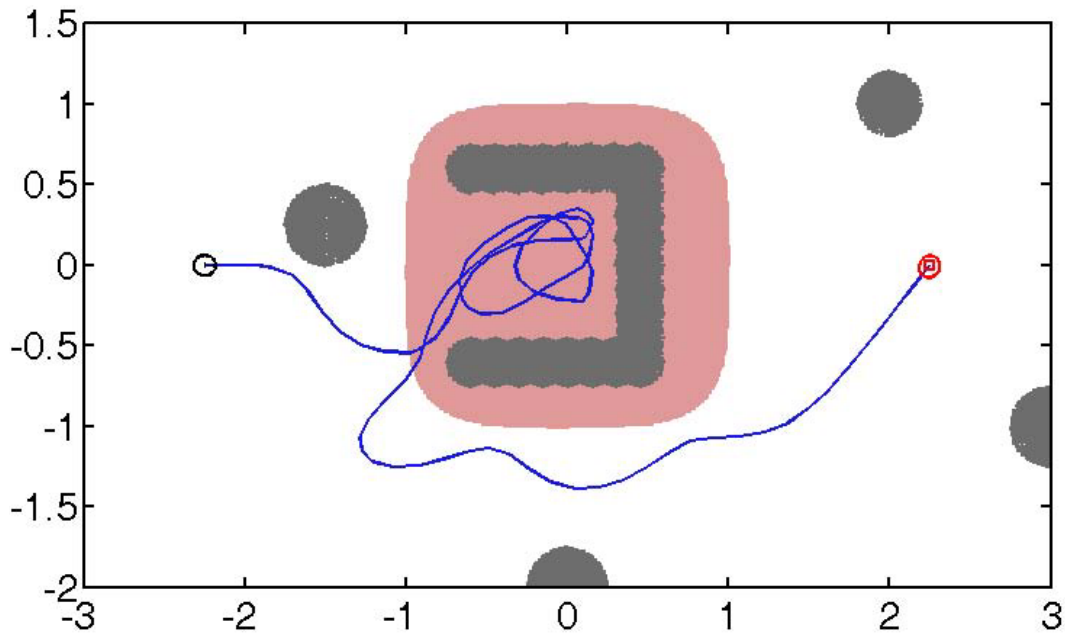
(a) Şekil 2.12(a)'daki ortamdaki benzetim.



(b) Şekil 2.12(a)'daki büyük U-blok, yeterince yüksek geçiş süreleri ile aşılabilmektedir.

Şekil 2.13: Şekil 2.12'deki ortamda daha büyük Δt ve δt süreleri ile benzetimin tekrarlanması.

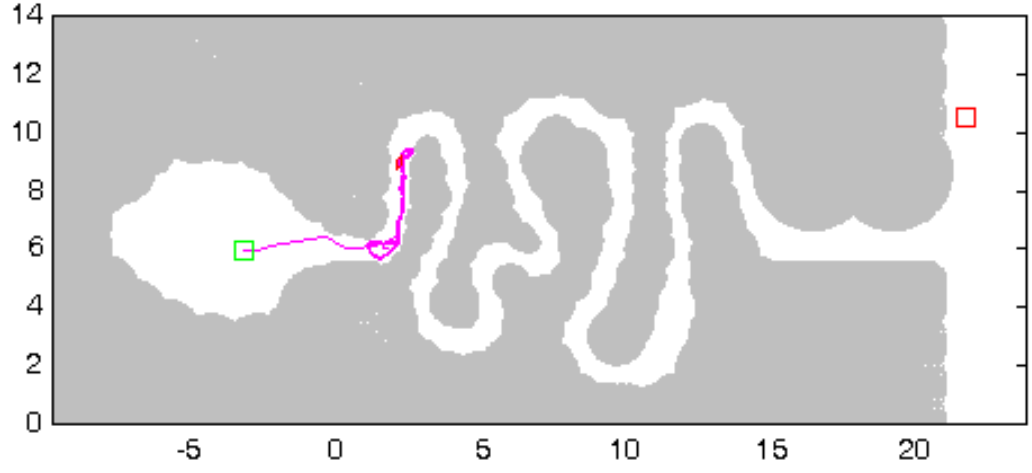
topoloji yerine amaç konum etkisinin vurgulanması dezavantaj teşkil etmektedir. Bu durum yalnız ön sensörden engel algılanmasının oluşturduğu belirsizlikle birleşince, TMR'un tünel içerisinde ters yöne sapması olasılığını ciddi oranda arttırmaktadır. Şekil 2.15(a)'dan da görüldüğü gibi bu durumun sonucunda TMR tünelin daha ilk kısımlarında sürekli salınımlar yapmaya başlamakta ve görev mesafesinin $1/4$ üne bile ulaşamamaktadır. Şekiller 2.15(b) ve 2.15(c)'deki benzetimlerde ise Δt ve δt parametrelerinin değerleri sırasıyla 0.8, 4 ve 1, 7.5 [saniyeler] olarak atanmıştır.

(a) Düşük ve sabit $\Delta t = 0.6$, $\delta t = 2s$ değerleri(b) Sanal engel sınırlı artımlı Δt , δt

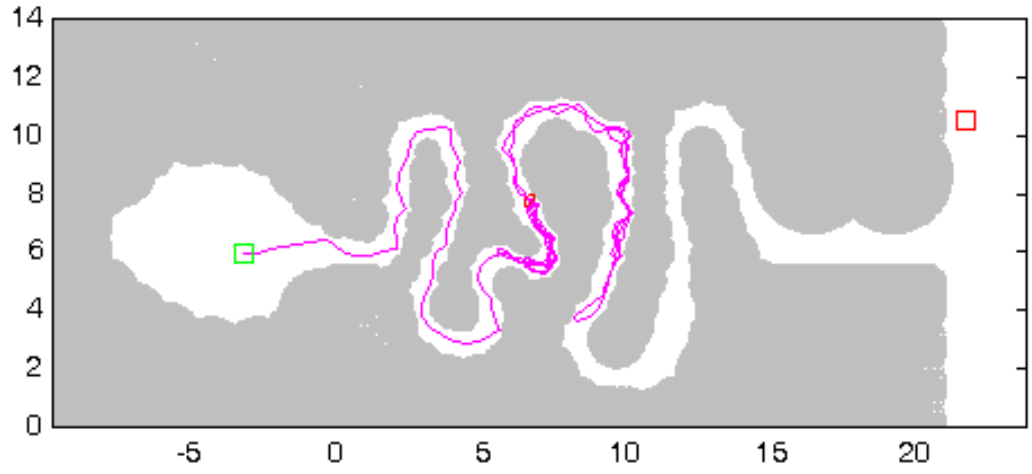
Şekil 2.14: Sanal engelli U-blok simülasyonları.

Bunun sonucunda hedefe yönelimin olumsuz etkisinde yine önemli azalma görülmüş, oluşan salınım sayısı Şekil 2.15(b)'den gözlemlenebileceği gibi hedefe ulaşılamasa da düşmüştür. Şekil 2.15(c)'de ise yeterince uzun olan geçiş periyodu nedeniyle hiç yön değişikliği olmadan açıklık bölgesindeki dörtgenle gösterilen amaç konuma ulaşılarak, zorlu tünel geçişine karşın fazladan zaman ve enerji kaybı yaşanmamıştır.

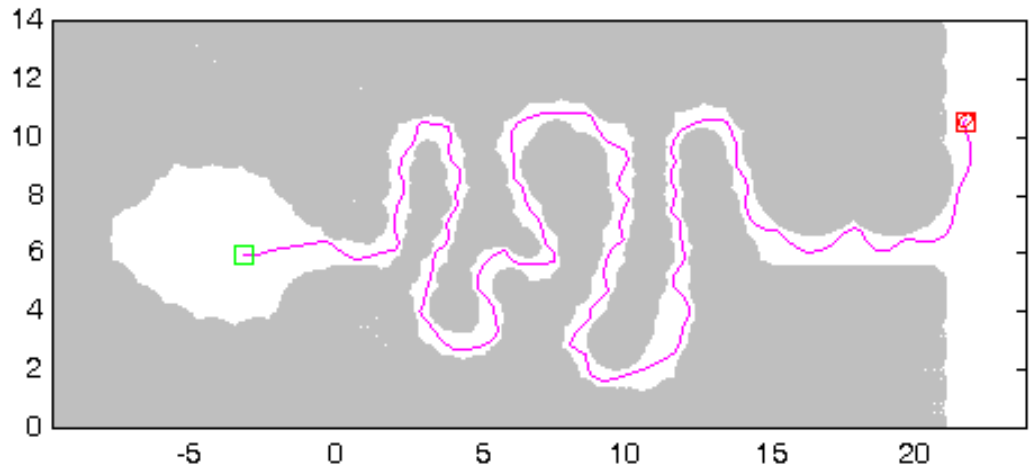
Bu simülasyonlardan şablon geçiş periyodu parametreleri Δt ve δt 'nin



(a) Küçük Δt ve δt değerleri.



(b) Biraz daha büyük Δt ve δt değerleri.



(c) Yeterince yüksek Δt ve δt değerleri.

Şekil 2.15: Şablon geçiş kipi parametrelerinin değişiminin zorlu bir tünelde tekli robot rota planlaması üzerinde etkisi.

arttırılmasıyla hem büyük boyutlu U-bariyerlerin hem de uzun tünellerin aşılmasında ortak bir iyileştirme sağlandığı gözlemlenmektedir. Ancak bu parametreler için yüksek değerler atanması tek başına U-blok ve tünel probleminin aşılması için yeterli olmayabilir, çünkü bu durumda rota planlayıcısının tünel girişleri ya da yakın serpiştirilmiş küçük engeller arasındaki geçitleri bulması zorlaşabilir. Böyle bir problemle karşılaşmamak için başlangıçta parametreler düşük değerlerde tutulabilir. Ancak Bölüm 2.3.3'te açıklandığı gibi sensörlerin çoğunun uzun süreler işaret vermesi, ya da sürekli salınımları, istenen hedefe bir noktadan fazla yaklaşmama gibi problemli engel tespiti sağlayan koşullar oluşunca artırılabilirler. Bu tür koşullar ortadan kalkınca da ilk konumdaki değerlerine geri dönüşle rota planlayıcısının içinde bulunduğu ortama adaptasyonu sağlanabilir.

3. SABİT REFERANS ÇERÇEVESİ TABANLI HOLONOM OLMAYAN BİR SÜRÜ ROTA PLANLAMA YÖNTEMİ

Sürü robot yöntemlerinin genel motivasyonu doğada gruplar halinde yaşayan canlıların, tek başına yapamadıkları zorlu görevleri ortak çalışmalarının verdiği sinerji ile etkin şekilde başarmalarıdır. Sürüler halinde yaşayan canlıların davranış kalıplarının robotik bilimine uyarlanmasıyla arama, kurtarma, sınır devriyesi (border patrolling), nakliyat gibi zorlu görevlerin daha etkin gerçekleştirileceği öngörülmektedir. Doğada yunuslar, filler gibi zeki canlıların sürüler halinde birlikte faaliyet göstermeleri sonucunda aynı sayıda yalnız bireye göre çok daha etkin başarımlar gösterdikleri bilinmektedir. Ancak sürü robot sistemlerinin temel prensibi çok daha sade zekaya sahip, küçük balıklar, arılar, ya da karıncalar gibi canlıların, tek başlarına hayatta kalamayacakları ortamlara, sürü davranışı sayesinde kolay adaptasyon sağlamalarıdır [Flake, 1999]. Özellikle, basit canlıların birarada etkin çalışmasının örnek alınmasıyla, fabrikalar, havaalanları ve limanları gibi geniş düzlemsel bölgelerde nakliyat [Alami et al., 1998], devriye [Choset, 2001], kurulum (construction) amaçlı manipülatör görevleri [Miyata et al., 2002], müzeler gibi sergi alanlarında ziyaretçileri yönlendirme [Arras et al., 2003], ya da kimyasal yangınlarda sakıncalı alanların gerçek zamanlı tespiti ile personel güvenliği [Penders, 1998]; ücra bölgeler ve arazilerde haritalama, arama-kurtarma, mayın tarama, maden ya da zararlı madde tespiti [Burgard et al., 2005; Fregene et al., 2004; Genevose et al., 1992]; okyanus/büyük deniz araştırmaları [Ogren and Leonard, 2003; Sepulchre et al., 2005; Ogren et al., 2002]; gibi görevlerde tekli robot tasarım ilkeleri ile sağlanamayacak verim artışları elde edilebilir. Dolayısıyla sürü robotik yaklaşımı, bu tarz görevlerde az sayıda karmaşık ve yüksek maliyetli robot yerine, çok sayıda sade erkin robot kullanılarak hem yüksek başarımlar, hem de zaman ve enerji tasarrufu gibi önemli avantajlar sağlayabilen yaklaşımlar geliştirilmesini amaçlamaktadır.

Bu alanda önerilen yöntemlerde genelde kullanılan ajan sayısı ile maliyetler arasında bir uzlaşma söz konusudur [Feddema et al., 2002]. Ancak yapılan araştırmalarda henüz kalabalık sürülerde kullanılan robot sayısı ile doğru orantılı başarımların sağlanması için geliştirilen yaklaşımlar üretilmemiştir.

Tezin bu konusunda, bir önceki konuda geliştirilen sade tekli TMR yörünge planlama yönteminin, sade dizilimlerle (formation) entegre edilmesi sonucu sürü zekası (swarm intelligence) gibi detaylı yaklaşımlara gerek kalmadan, sınırlı algılama alanlı oğul robotlardan (agents) oluşan sürüler (flocks) için verimli bir güzergah planlayıcısı önerilmektedir. Önerilen algoritma, FRF çerçevelerinin son derece sade geometrik formasyonlar olması nedeniyle birçok sürü robot yaklaşımına göre düşük işlem (processing) maliyeti içermektedir. Ayrıca göreceli olarak karmaşık ortamlarda 20–30 adet TMR’tan oluşan sürüler üzerinde benzetimlerle etkinliği gözlenmiştir. Yöntemin erkin planlama algoritmasının sade TMR’lara kolay uygulanabilir olması ve kolektif seferlerde telsiz haberleşme gerektirmemesi diğer avantajlarıdır.

3.1. Problem Formülasyonu

Çoklu robotlara rota planlaması için geliştirilen bu yöntemin genel amacı göreceli olarak kalabalık TMR formasyonlarının herhangi bir ilk konumdan (bölgeden) istenen bir konuma doğru çarpışmasız hareketinin sağlanmasıdır. Dolayısıyla tezin bu konusunda bu probleme şu sade yaklaşım önerilmektedir: (i) Sade tekli TMRlar için düşük algoritmik maliyetine karşın göreceli olarak yüksek başarımlı sağlayan rota planlayıcısından erkin planlayıcısı olarak yararlanılması; ve (ii) Bu planlayıcının çoklu yörünge üreten sabit referans çerçeve (FRF) formülasyonlarıyla entegrasyonu sonucunda etkin ancak düşük maliyetli bir sürü planlayıcısı geliştirilmesidir.

3.2. Sabit Referans Çerçevesi (FRF) Dizilim Yöntemi

Bu bölümde FRF dizilimleri ve onlara entegre şekilde faaliyet gösteren oğul robot planlayıcılarının genel fonksiyonları özetlenecektir. Aslında tekli robot algoritması bir eklentiye gerek olmaksızın, her TMR’un diğer mobil ajanları hareketli engeller olarak göreceği varsayımından yararlanılarak bir mobil robot grubunun üyelerine bağımsız şekilde uygulanabilir. Ancak bu yöntem tekli TMR algoritmasının sadeliğini tamamen korumasına karşın, çok yakın serpiştirilmiş engeller bulunduran ya da karmaşık tünellerden oluşan ortamlarda bazı ajanların amaç konuma ulaşmalarını garanti edememektedir. Çünkü bu yaklaşım aşağıdaki iki nedenle ajanların ters yöne

sapmalarına yol açabilir:

- (i) Tekli robot algortimasının Açıklama 2.4'te belirtilen ön sensör belirsizliği;
- (ii) Mobil ajanların, rastsal serpiştirilmiş istenen konumları sonucunda rotalarında kesişme ve sapma olasılığının artışı

Dolayısıyla tünellerde ters yöne ilerleyen TMR'lar, izleyen elemanların hareketini de ciddi oranda aksatırlar.

Bu problemi aşmak için Şekil 3.1'deki şemada gösterilen geometrik çerçeveden yararlanılarak, kalabalık robot formasyonları için rota planlaması gerçekleştirilmiştir. FRF yapısı robot grubunun ilk konumundan istenen bir konuma Şekil 2.1'deki referans robota benzer iki eksenli bir sistemin sağladığı tarzda, hız kısıtlamalı (non-holonomic) hareket yapmaktadır. Erkinler Şekil 3.1'deki koyu gri renkli formasyon bölgesine tutturulmuş sabit referans noktalarını takip edecek şekilde konumlarını koruyarak hareket etmektedirler. Bu şekilde sade ve göreceli olarak zayıf (loose) bir formasyon yapısı içinde olmalarına karşın aşırı engelli ortamlar dışında belli güvenlik marjlineri içersinde sürü benzeri hareket yapmaları sağlanmaktadır.

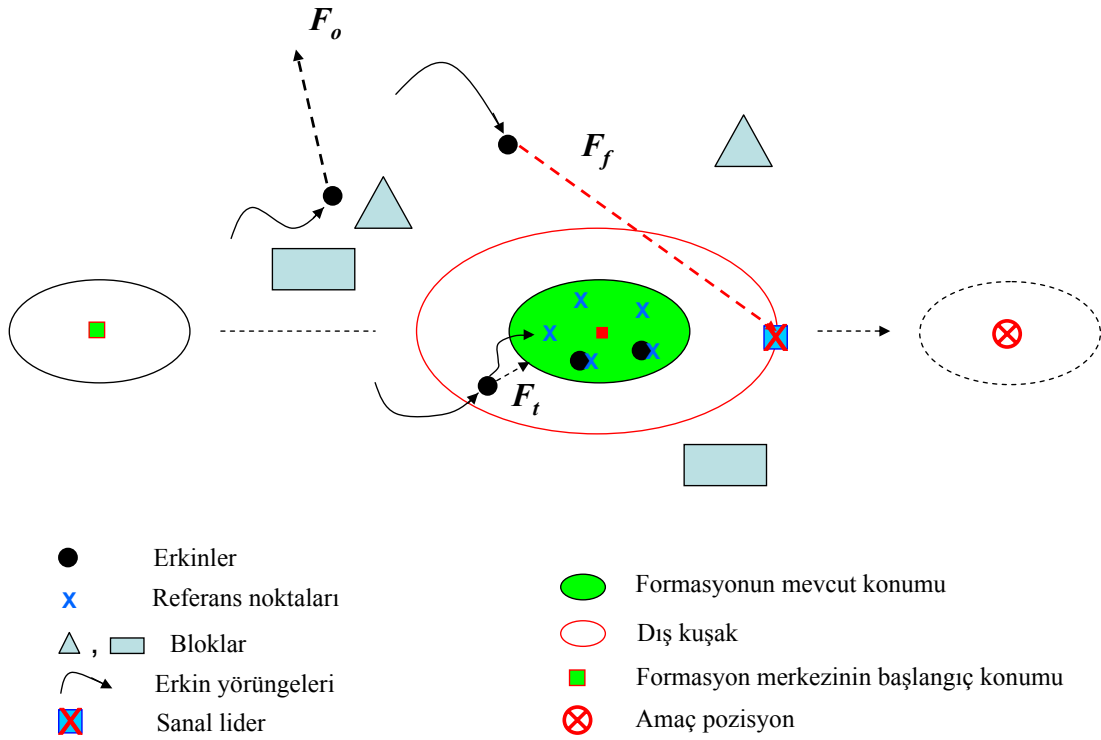
Ancak bu yapı tek başına engel algılama ya da aşmaya uygun değildir. Dolayısıyla bir engelle karşılaşma durumunda mobil ajanlar kendi sakınma algoritmalarından yararlanırlar. buna göre FRF dizilimlarindeki her mobil ajan planlayıcısının yine iki temel operasyon modu bulunmaktadır:

- (i) Erkinin formasyon içerisindeki referans konumlarını takip ederek istenen bölgeye doğru hareket kipi;
- (ii) Her TMR'un gruptan ayrılarak kendi engelden sakınma planına göre davranış gösterdiği engel aşma kipi.

İlk kipte olan bir ajan (2.5) denkleminde benzer bir formdaki:

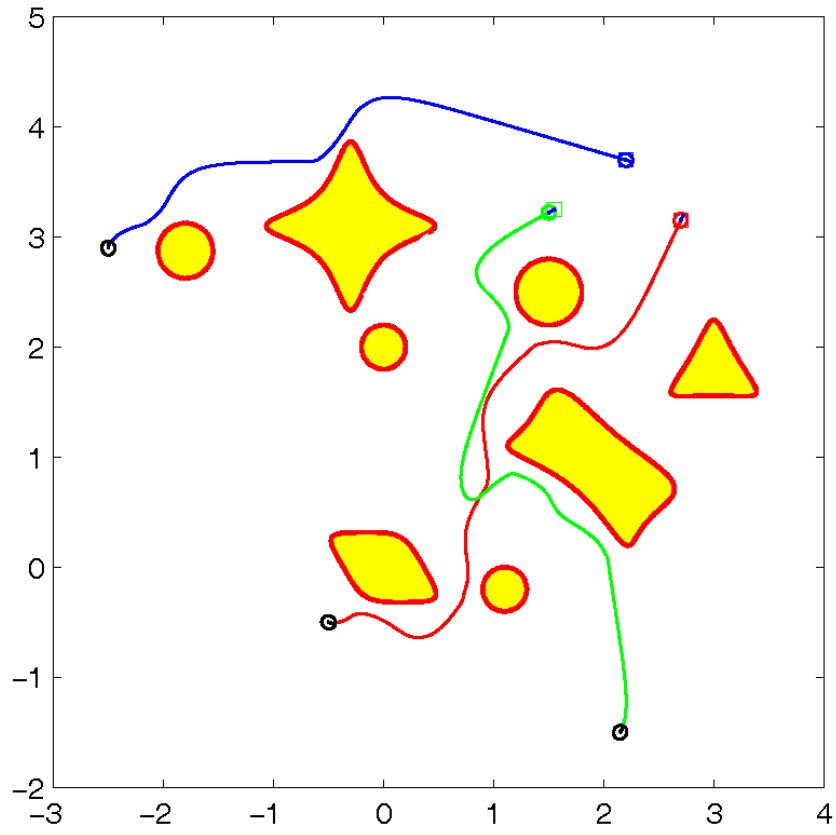
$$F_s = K \frac{e_r}{\sqrt{\|e_r\|^2 + \varepsilon}} + B\dot{e}_r, \quad (3.1)$$

sürme kuvvetiyle mobil formasyonun paralelinde hareket eder. (3.1) denkleminde konum hatası terimi $e_r = [x_{ed} - x, y_{ed} - y]^T$, hatanın türevi ise takip kontrol kriterlerine göre $\dot{e}_r = [\dot{x}_{ed} - \dot{x}, \dot{y}_{ed} - \dot{y}]^T$ şeklinde olup, bu vektörel ifadelerde (x, y) ajanın mevcut konumunu, (x_d, y_d) ise istenen konumunu göstermektedir.

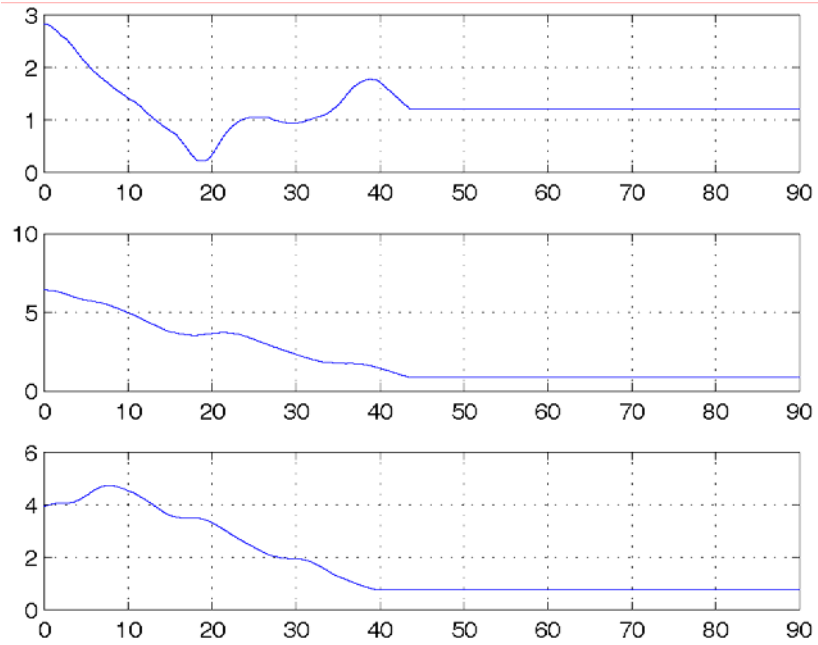


Şekil 3.1: Genel çoklu robot planlayıcısının yararlandığı formasyon yoluyla çok sayıda TMR'un bir bölgeden bir başka bölgeye nakli.

İkinci kip olan engelden sakınma ise 3 aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada ajanın formasyonda kendine ait konumdan ayrılarak, engelle çarpışmadan kaçınacak şekilde davranışı söz konusudur. Sonraki iki aşamada ise sırasıyla formasyon bölgesine düzgün bir rotada yakınsaması ve kendi mobil referans konumuna ulaşması gerçekleşir. Dolayısıyla engelle karşılaşıldıktan hemen sonra sürüş kuvveti Şekil 3.1'deki gibi $F = F_o$ olacak şekilde ayarlanmaktadır. Engel algılama alanından çıktıktan sonra yine Açıklama 2.2 deklilere benzer argümanlarla bu kuvvet bir Δt süresi kadar daha uygulanır. Sonraki aşamada ise 1. dereceden şablonlarla (first degree splines) robotun yönü formasyonun en uç noktasına çevrilmesi için sürüş kuvveti $F = F_f$ olarak değiştirilir. Bu kuvvet merkezi formasyon bölgesini çevreleyen güvenlik marjinine ulaşıldığı andan itibaren yine 1. dereceden bir şablon geçiş ile formasyon içindeki TMR konumuna doğru değiştirilerek düzgün yakınsama tamamlanır. Bu noktadan itibaren başka bir engelle ya da terminal noktasına kadar sürüş kuvveti $F = F_p$ şeklinde olacaktır. Bu 3 aşamalı düzgün yakınsama yaklaşımının engel sakınmadan sonra tüm robotların rastsal istenen konumlara yönlendirildiği formasyonsuz yöntemle göre önemli başarımların sağlanması söz konusudur.

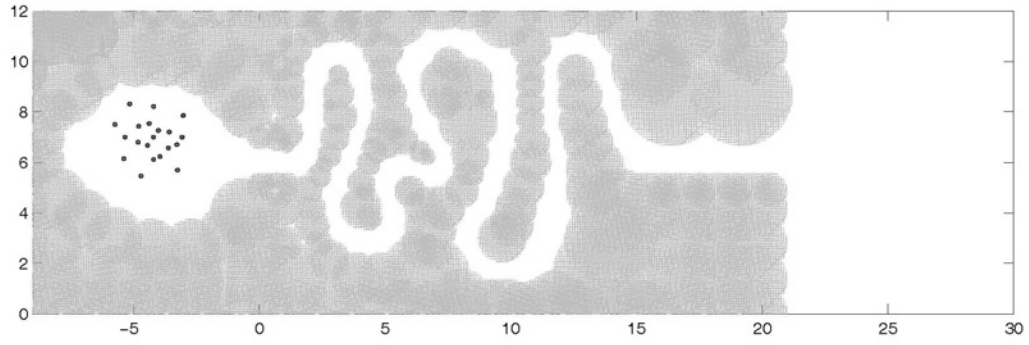


(a) Benzetim ortamının kuşbakışı görüntüsü.

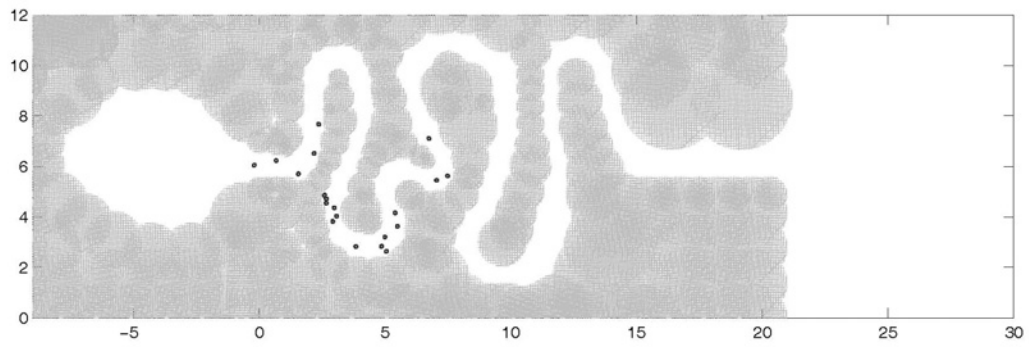


(b) 3 mobil ajan arasındaki mesafe fonksiyonları.

Şekil 3.2: 3 TMR'un sade engeller bulunan ilk benzetim ortamında yaptığı sürü benzeri hareket.

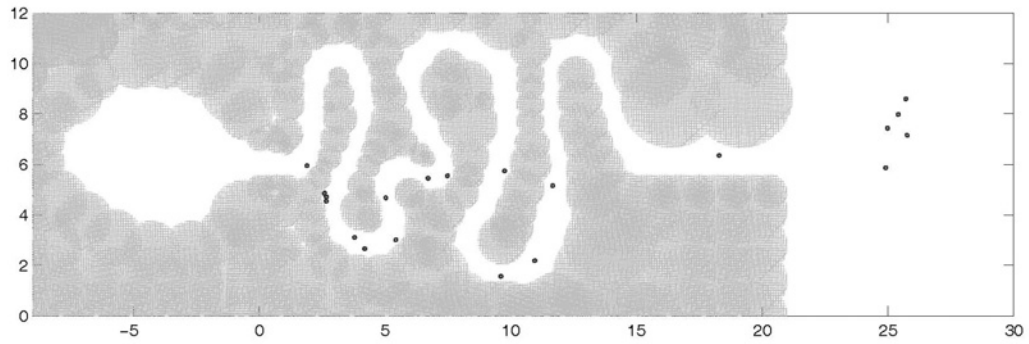


Şekil 3.3: Tekli robot algoritmasının doğrudan uygulanması ile sağlanan sürü benzeri hareket. Benzetim süresi $t=0s$

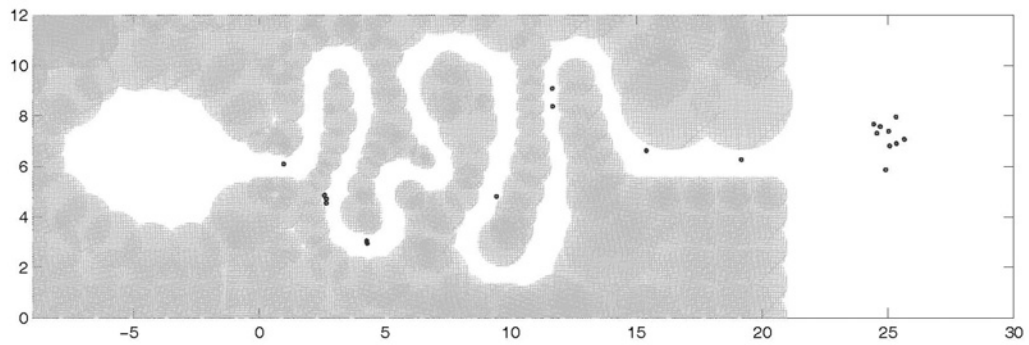


Şekil 3.4: Benzetim süresi $t=280s$

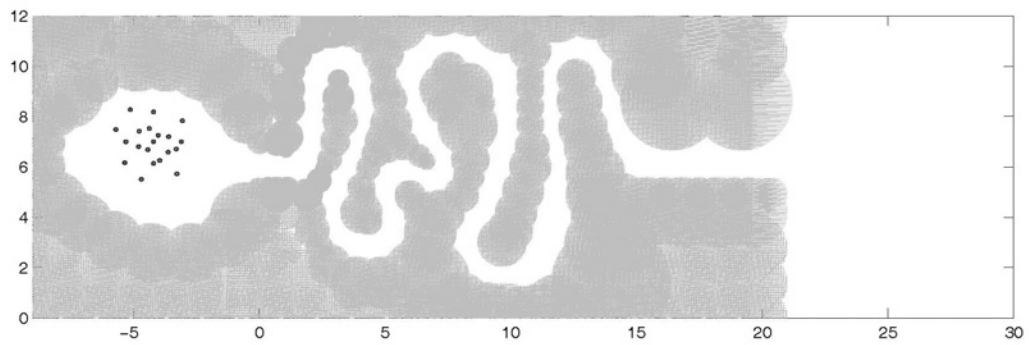
Bu yaklaşımın faydası yüksek Δt ve δt değerleri ile kullanılması sonucunda, çok sayıda TMR'un tüneller gibi karmaşık ortamlarda yüksek başarımlı hareketini olanaklı kılmasıdır. Bu çalışmada tekli güzergah planlayıcısının parametreleri dizilim dahilinde harekete uygun şekilde düzenlenmiştir. Sunulan yöntemin temel katkısı göreceli olarak kalabalık TMR grupları için düşük algoritmik maliyetli güzergah planlaması sağlaması ve ek olarak engelli ortamlarda genellikle etkin güzergah planlaması gerçekleştirmesidir. 512MB RAM'e sahip bir dizüstü bilgisayarda Windows XP ve Simulink gibi kolay erişilen ancak yavaş platformların kullanılmasına karşın, 20 adet TMR'un çok karmaşık tünel ortamlarında problemsiz nakli sağlanmıştır. Yöntem, bu özelliği ile sürü sistemlerinin nakliyat (transportation) problemine alternatif bir yaklaşım teşkil etmektedir.



Şekil 3.6: Benzetim süresi $t=840s$

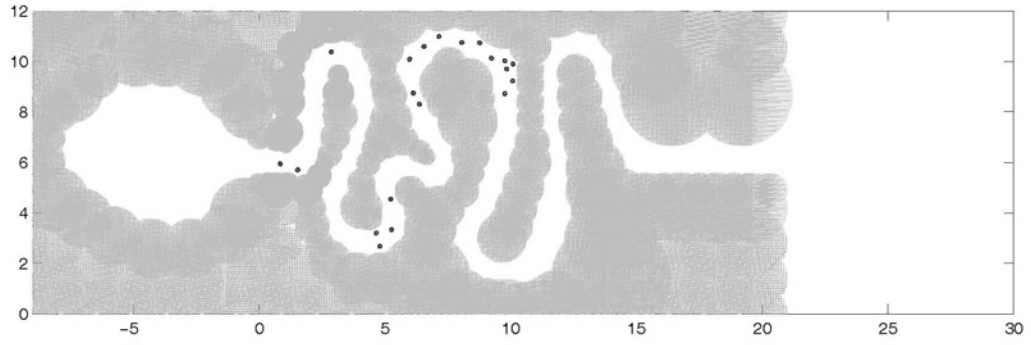


Şekil 3.7: Benzetim süresi $t=1120s$

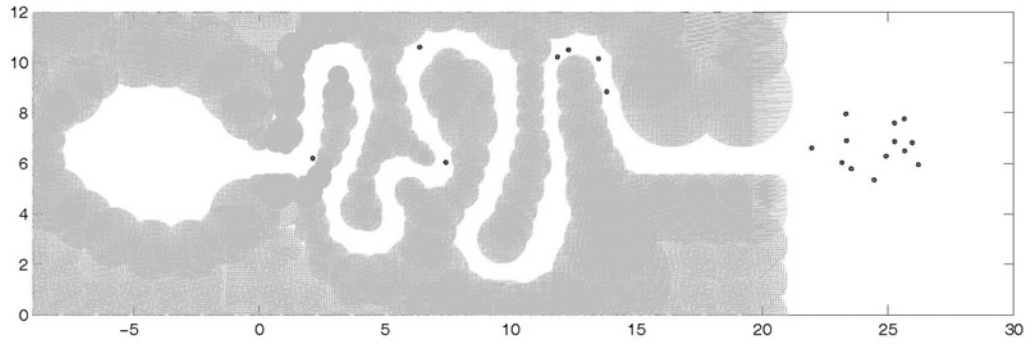


Şekil 3.8: Geometrik formasyon tabanlı çoklu-TMR rota planlaması. Benzetim süresi $t=0s$

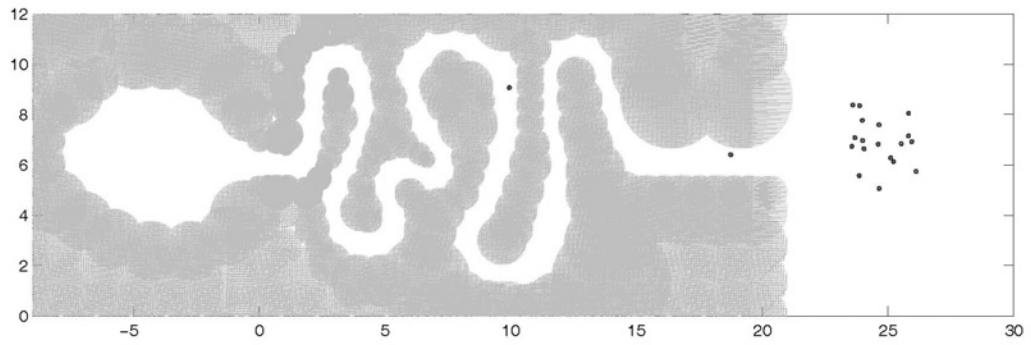
Benzetimlerin amacı, 20 adet TMR'un sol taraftaki başlangıç bölgesinden sağ taraftaki açıklığa çarpışma ya da hapsolme söz konusu olmaksızın kısa sürede ulaştırılmasıdır. Bu amaçla rota planlayıcısı parametre seçimleri şu şekilde yapılmıştır: Tekli robot bileşenleri yine 6 adet VAR/YOK sensörü bulundurmakta ve elipsoit algılama alanının yarı çapları olan a ve b değerleri denklem (2.12)'den uyarlanmaktadır.



Şekil 3.9: Benzetim süresi $t=280s$



Şekil 3.10: Benzetim süresi $t=520s$



Şekil 3.11: Benzetim süresi $t=840s$

Sürme kuvvetinin katsayıları ise (2.13) denklemindeki değerlerle aynı tutulmuştur. Yararlanılan çoklu robot formasyonunun yapısı Şekil 3.1'deki gibi $7a$ yarıçapında bir disk biçiminde alınarak, 20 adet küçük erkinin aynı anda yeterli güvenlik mesafesi kalacak şekilde kümelenmesi amaçlanmıştır. Formasyonun dış geçiş marjiniyle birlikte büyüklüğü ise $10a$ yarıçapına ulaşmaktadır. δt ve Δt süreleri sırasıyla 0.8 ve 7.5 [saniyeler] olarak alınmıştır.

amaçlı platformlarda (512MB RAM'i olan bir dizüstü bilgisayarda Win XP işletim sistemi altında Matlab/Simulink tabanlı algoritmalarla) gerçek zamanlı olarak çalıştırılmış; ayrıca yüksek başarılı operasyon için VAR/YOK sensörleri yeterli olmuştur. Dolayısıyla yöntemimiz, gerçekleşmesi (implementation) durumunda çoklu robot sistemlerinde maliyet açısından ciddi avantaj sağlayabilir.

4. MOBİL DİNAMİK-OLARAK YENİDEN ŞEKİLLENDİRİLEN REFERANS ÇERÇEVESİ FORMASYONLARI İLE KARMAŞIK ORTAMLARDA KOLEKTİF ROTA PLANLAMASININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Bir önceki konuda geliştirilen sabit referans çerçevesi yaklaşımlı rota planlayıcısı, sürü hareketi sırasında robotlar arası haberleşme gerektirmemesi ve düşük hesaplama maliyetli olması nedenleriyle engel yoğunluğu az ortamlarda diğer sürü planlayıcılarına göre avantajlıdır. Ancak bu yaklaşımın özellikle yoğun ve karmaşık engelli ortamlarda ortaya çıkan bazı sınırlamaları söz konusudur:

- (i) Öncelikle yöntemin sabit referans çerçevesi sade bir referans noktalar topluluğu olup ilk konumdan amaç bölgeye doğru engelleri algılamadan hareket eder.
- (ii) Metodun düşük düzeyde bir kolektif davranış mekanizması bulunmaktadır. Bu nedenle tüneller gibi ortamlarda birçok erkinin dağılması ve kendi sınırlı etkinlikte planlayıcılarının kontrolüne terk edilmeleri sonucuna yol açabilir.

Dolayısıyla bu yöntem konkav engelli bölgelerde çarpışma sayısını azaltırken, erkinlerin bir arada tutulmasını her koşulda tam olarak sağlamayabilir.

Sürü robotiğinin özellikle fabrikalar, ya da deniz/hava limanları gibi geniş kapalı alanlarda kurulum, nakliyat gibi kolektif görevlerde yararlı olabilmesi için doğal hayattaki canlı gruplarına benzer şekilde etkin dayanışma göstermesi önemlidir [Miyata et al., 2002; Tang et al., 2004]. Bu açıdan bir sürü rota planlayıcısının öncelikle değişen çevre faktörlerine karşın grubu bir arada tutabilme yeteneğine sahip olması önemli bir kriterdir. Bu alanda ilk önemli çalışmalardan birisi olan [Reynolds, 2000] kuş sürülerinin hareketine benzer bir simülatif model oluşturmuş ve bu modelin çalışması ile ilgili üç temel prensibi: hareket sırasında “bir arada kalma” (cohesion), sürünün elemanları arasında yeterli güvenlik mesafesinin bulunması (separation), ve yakındaki grup üyelerinin hızlarını birbirlerine yakın tutmaları (alignment) olarak özetlemiştir. Bu prensipler farklı yöntemler kullanan sürü robotiği çalışmaları için dikkate alınmaktadır. Dolayısıyla son yıllarda yapılan sürü robot rota planlaması çalışmaları, kolektifliği artırmak için formasyon üyeleri arasında FRF planlayıcılarına

göre daha sıkı bağlar oluşturan yaklaşımları tercih etmektedir. [Secrest and Lamont, 2003; Cervantes et al., 2007]'de düzgün sürü örüntülerinin (patterns) oluşturulabilmesi için parçacık sürüsü eniyilenmesi (particle swarm optimization - PSO) adlı bir yaklaşım uygulanmıştır. [Gazi and Passino, 2003] çalışmasında yazarlar kararlı sosyal davranış gösteren (stable foraging) sürü planlayıcıları için çekim ya da itme kuvvetleri (attraction/repulsion forces) oluşturan bir profilden yararlanmışlardır. [Ogren and Leonard, 2003; Sepulchre et al., 2005; Secrest and Lamont, 2003; Cervantes et al., 2007] gibi potansiyel fonksiyonu tabanlı sürü planlayıcıları da mevcuttur. [Lien et al., 2004]'de ise araştırmacılar çok sayıda sade erkinin daha az sayıda göreceli olarak karmaşık robotlar yardımıyla sürü klavuzlanmasını sağlayan (cobot yaklaşımı olarak adlandırılan) bir yöntem önermektedirler. Bu yöntemdeki cobot olarak adlandırılan farklı fonksiyonlu robotlar, sürülerdeki çoban köpekleri benzeri bir davranışla fazla sayıdaki erkinin klavuzlanmasına yardımcı olmaktadır. Bu yaklaşımdan gelecekte nakliyat ve gezi/eğlence faaliyetlerinde yararlanılması amaçlanmaktadır. Diğer sürü yaklaşımları arasında örtük polinom uygulamaları içeren [Hsieh and Kumar, 2003; Chaimowicz et al., 2005; Kalantar and Zimmer, 2006] yöntemler de vardır. Ancak örtük polinomların gerçek zamanlı olarak modellenmesinin zorlukları nedeniyle, uygulama alanları özellikle petrol sızıntıları gibi mümkün olduğunca durağan bölgelerin modellenmesi ile sınırlı kalmıştır. Literatürde [Zhang et al., 2007; Ogren et al., 2002] gibi deniz altı araştırmaları üzerinde yoğunlaşan potansiyel fonksiyonu ve sanal engel benzeri formasyonlardan faydalanan yöntemler de mevcuttur. Ayrıca [Caselli et al., 2002] gibi bazı yöntemlerde olasılık tabanlı yol-planları (probabilistic roadmap) yanında daha sade reaktif yerel planlayıcıların bir arada uygulanması ile hibrid sürü robot rota planlama yöntemleri de geliştirilmiştir. Sürü robotiği yönteminin küçük bileşenlerden önemli bir sinerji elde edilmesi sonucunda zorlu problemlerin çözümüne katkı yapabileceği düşüncesi sonucu bilgisayar grafikleri [Watson et al., 2003], tıp ve ilaç sanayinin [Dudek et al., 1993] yanı sıra ekonomi ve yeni nesil imalat sanayi sistemleri [Dagli, 2004] gibi farklı alanlara uygulanması da söz konusudur.

Tezin dördüncü konusunun sonraki bölümlerinde sabit referans çerçevesi (FRF) dizilimlerindeki sınırlamaların ortaya çıktığı yoğun ve kompleks engelli ortamlarda sürü robot planlamasında yüksek kolektiflik sağlanması için çalışmalar sunulacaktır. Özellikle FRF dizilimine alternatif olarak engelden sakınırken engel topolojisine göre

şekil değiştirme (morphing) özelliğinde robot dizilimi oluşturulması amaçlanmıştır. Bu yöntemle dış sensörlerden erkinlere göre daha geniş menzilli bir sensör ağı oluşturulacak şekilde yararlanılabilir. Böylece TMR'ların bazı engellerin yakınında kümelenerek çarpışmalarının önlenmesi yanında, erkinlerin yakın bir grup davranışı göstererek açıklıklara ulaştırılması sağlanabilir. Bu değişikliklerle FRF dizilimlerinin şablon parametrelerinde artım gibi sınırlı değişiklik imkanları dahilinde aşılamayacak geniş tüneller ve U-engel bulunduran geçitlerde başarımların artışı sağlanabilir. Artan kolektiflik özellikle nakliyat ya da TMR manipülatörleriyle işletim (Wheeled Mobile Manipulator operation) içeren yakın koordinasyon gerektiren görevlerde sürü erkinlerinin birarada çarpışmasız hareketinde fayda sağlayabilir. Kolektif rota planlamasında sınırlı ortam harita bilgisinin yanısıra etkin yerel reaktif planlayıcılardan yararlanma yaklaşımı hibrid sürü robot planlaması olarak adlandırılmaktadır. MDRRF planlayıcısı hibrid planlayıcıların yerel bileşeni olarak da kullanılabilir. Bu durumda sensör ağıyla etkin ve kolektif rotalama, daha az sayıda bilgi (landmark) ile yüksek başarımlar sağlanabilir.

Bu yeni sürü rota planlama yaklaşımı, “Mobil Dinamik olarak Yeniden Şekillendirilebilen Referans Çerçevesi” (Mobile Dynamically Re-morphable Reference Frame Formation - MDRRF) olarak adlandırılmıştır [Sahin and Zengeroglu, 2008]. Bu yaklaşımın temel donanımsal yapıtaşları 8 adet sensörden oluşan hareketli bir sensör grubudur. Sensör grubu ile ajanların ayrı ayrı algılayabileceğinden daha geniş alanlar taranabilir. Yeni yöntem taranan alanlarda tespit edilen engel bilgileri ile [Sahin and Zengeroglu, 2007b,a] çalışmalarındaki tekli TMR rota planlayıcısına benzer bir sakınma algoritması kullanır. Engel topolojisine göre şekil değiştirme (morphing) özelliğinin sağlanması için:

- (i) Catmull-Rom (CR) interpolasyonlu şablonları (CR interpolating splines) ile potansiyel fonksiyonları benzeri sanal sınırlayıcı noktalar oluşturulması;
- (ii) Şablonların aksine ayrık değil, sürekli sınırlar oluşturularak erkinlerin kolektif davranışını daha iyi koruyan en küçük kareler (Least Squares - LS) eğrileri uydurulması

yaklaşımları üzerinde çalışılmıştır. CR şablonlarının avantajı noktasal eğimlerinin ayarlanmasıyla mümkün olduğunca az salınımlı eğriler oluşturabilmeleridir. Bu

eğrilerin sınırına, bir marjinden daha yakın robotların sürme kuvvetlerine, yönü formasyon merkezine doğru bir sınırlama kuvveti eklenmesiyle kolektif davranışın sağlanması amaçlanmıştır. Ancak CR şablon eğrileri parametrik modeller olup yalnızca şablonun kollarında bulunan sınırlı sayıda nokta üzerinden etki yaparlar. Bunun sonucunda özellikle formasyon engellerle karşılaştığında bazı TMR'lar açıklıklardan uzaklaşarak kolektif davranışı olumsuz etkiler ve başarımı azaltırlar. Bu problemi önlemek için 8 sensörlü bir grubun başlangıç ve bitiş sensörleri ile ayrılan iki yarısına 2 ayrı en küçük kareler eğrisi uydurulmasıyla (least squares curve fit) sürekli sınırlar elde edilmiştir. Bunun için 2 sensör alt-kümesi de orijine transfer edilmiş ve 4. dereceden, 1 boyutlu eğriler uydurularak formasyon sınırının daha düzgün olması sağlanmıştır. En küçük kareler yöntemi çok az sayıda noktada bile etkin sınır modellemesi sağlar ve ender olarak oluşabilecek salınım seviyesi bir parametre ya da Ridge Regression [Tasdizen et al., 2000] gibi düşük maliyetli yöntemlerle kontrol edilebilir. Formasyonda bulunan robot dağılımı ise dış sınırların geometrik dönüşümüne göre yerleri ayarlanan referans noktaları kullanımı ile mümkün olduğunca düzgün şekilde tutulmuştur. Bu şekilde karmaşık tünellerde özellikle önceki sabit referans çerçevesi yaklaşımının başarısız olduğu (i) tünel içerisinde açıklıklar bulunması; (ii) U-engeller olması gibi problemlere karşı algoritmik olarak düşük maliyetli iyileştirme sağlanmıştır.

4.1. Problem Tanımı:

Sınırlı sayıda kısa menzilli algılayıcıdan sağlanan bilgilerle ve sade algoritmik hesaplamalarla şekli dinamik olarak değiştirilebilen mobil bir formasyon kurulup göreceli olarak çok sayıda ajanın engellerle kaplı bölgelerde bir arada hareket yeteneğinin, ilgili (i) çarpışma, (ii) geri dönme, (iii) formasyondan ayrılma ve (iv) hapsolme oranlarında iyileştirme sağlanarak arttırılmasıdır. Bu şekilde Bölüm 3'deki yöntemde FRF formasyon üyelerinin, tüneller gibi ortamlarda özellikle dağılma ve hapsolme problemlerinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Böyle ortamlarda sürü davranışı

(i) tünel iç çeperinin genişlemesi;

(ii) tünelde kör (çıkışı bulunmayan) koridorların bulunması

(iii) göreceli olarak sınırlı sensör menzili

gibi faktörler tarafından olumsuz etkilenir. Bu gibi yapılarla görev ortamlarında (operational spaces) sıkça karşılaşılabılır. Dolayısıyla etkin rotalama sağlamayı amaçlayan bir planlayıcı, [Sahin and Zengeroglu, 2007a]’daki FRF yaklaşımının aksine bu engel türlerini dikkate almalıdır. Bunun sağlanması ile tezin önceki konusunda yer alan yöntem ve literatürdeki bazı diğer sürü planlayıcılarına göre az sayıda global bilgiyle, daha etkin kolektif rota planları hazırlanabilir.

4.2. Kinematik Model

MDDRF formasyonlarındaki temel değişiklik, robot topluluğunun amaç bölgesine doğru sabitten çok bir tür hareketli referans çerçevesi benzeri kolektif rotalanma yapmasıdır. Formasyon da ajanlar gibi sınırlı sayıda dış sensörden elde edilen bilgilerle engellerden kaçınacak şekilde rotalanma sağlar. Dolayısıyla robot topluluğu, üye TMRlar kadar esnek şekilde, hareket kısıtlamalı rota yörünge planlaması gerçekleştirir.

Formasyon planlayıcısının bir diğer yeni özelliği, mobil sensörlerinin engellerle karşılaştığı bölgelerde engel sınırlarına göre büzüşüp serbest sensörlerinin olduğu bölgelere doğru genişmesi ile robot topluluğunu engelli alanlardan uzakta tutmaya önem vererek daha gerçekçi bir sürü davranışı sağlayabilmesidir.

Konu 3’teki gibi MDDRF formasyonlarında da TMR’ların sade yapısı nedeniyle kinematik modellerden yararlanılmıştır. Her ajan kendi referans konumunu bu bölümde tanıtilen iki-eksenli referans robot modeline göre izlemekte olup engel algılama ve aşma da yine aynı bölümdeki mekanizmalardan yararlanılarak gerçekleştirilir.

4.3. Önerilen MDDRF Dizilim Planlayıcısı

Önerilen MDDRF rota planlayıcısıyla ilgili sağlanan teori gelişimi üç grupta toplanır. Bunlar (i) az sayıda sensörden elde edilen konum bilgisi ile formasyonun dış sınırının rotalanması ve ortama uygun şekillendirilmesi; (ii) ajanların kaçışını

engellemek için “Catmull-Rom Şablonlarıyla” ayırık dış sınırlar ya da “En küçük kareler yönteminin” uygulanmasıyla sürekli dış sınırlar oluşturulması; (iii) dizilim içinde referans çerçevesi yaklaşımının uyarlanması ile ajan dağılımının düzenlenmesi.

4.4. Formasyon Rotalanması ve Şekillendirilmesi

Formasyonun başlangıç konumunda robotlar elipsoit şeklinde dış sınırı bulunan bir dizilim dahilinde harekete başlarlar. Bu dış sınırın, dizilimin çevresinde halka şeklinde bulunan robotların (düzgün şekilde dağıtılmış bir sensör ağı oluşturan) dış sensörleri tarafından belirlendiği varsayılır. Algoritmik maliyetin artmaması için bu sensör (denetim) düğümlerinin sayısı (6-8) gibi düşük bir rakamla sınırlandırılmıştır.

4.4.1. Formasyonun Yönlendirilmesi:

Formasyon, sensörlerden gelen engel bilgilerine göre bölüm 2.3.1’deki iki eksenli referans robot modeli ile holonom olmayan rota planlaması sağlar. Ajanlar formasyondaki referans konumlarını yine aynı bölümdeki (2.6) denklemine göre izlerler. Bu şekilde engel algılanmadığı konumlarda formasyonun amaç bölgesine doğru hareket kısıtlamalı sürülüşü sağlanır. Engel algılandığı durumlarda ise formasyonun yön değiştirmesi ile robotlara problem oluşturmada bu blokların aşılması sağlanır.

4.4.2. Formasyonun Yeniden Şekillendirilmesi:

Formasyon bir engelle karşılaşır (bkz. Şekiller 4.1(b), 4.2(b)), ilk olarak engellerin algılandığı bölgelerdeki sensörlere karşılık gelen kontrol noktaları, formasyon merkezine doğru yakınsarlar. Yakınsamanın duruş değeri yine Şekiller 4.1(b), 4.2(b)’de engel sınırlarında bulunan koyu renkli üçgenlerle gösterilmektedir. Buna göre yakınsama, engel algılayan sensörlerin konumlarından formasyon merkezine doğru:

$$X_{cont} = X_{CM} + 0.99(X_s - X_{CM}), \quad Y_{cont} = Y_{CM} + 0.99(Y_s - Y_{CM}) \quad (4.1)$$

formülünün yinelemeli biçimde uygulanmasıyla sağlanarak engelin sınırları hakkında bir ölçü oluşturulur. (4.1) denkleminde (X_{cont}, Y_{cont}) büzüşmeden sonraki (engel sınırlarına denk gelen) kontrol noktalarını; (X_{CM}, Y_{CM}) dizilimin ağırlık merkezini;

ve (X_s, Y_s) sensörlerin engel olmadığı durumlarda alacağı konumu göstermektedir.

(X_{cont}, Y_{cont}) kontrol noktaları, yukarda açıklandığı gibi formasyon merkezine doğru yakınsatıldıktan sonra, (ilk olarak serbest sensörlerle birebir örtüşen konumdaki) kontrol noktaları açık bölgelere doğru geniştirilir. Bu genişleştirme Şekiller 4.1(b), 4.2(b))’deki açık renkli üçgenlerin yönüne denk gelmekte olup:

$$X_{exp} = X_{CM} + (X_s - X_{CM}) k_{Exp} N_{nf} \left(1 + \frac{w_{sens}}{w_{FT}} \right) \quad (4.2)$$

$$Y_{exp} = Y_{CM} + (Y_s - Y_{CM}) k_{Exp} N_{nf} \left(1 + \frac{w_{sens}}{w_{FT}} \right)$$

formülü ile sağlanır. (4.2) denkleminde (X_{exp}, Y_{exp}) , serbest sensörlere karşılık gelen kontrol noktalarını; $k_{Exp} \in [0, 1]$ genişleme oranını belirleyen sabiti; N_{nf} engel etkisindeki sensör sayısını; w_{sens} ve w_{FT} sırasıyla ilgili sensörün ve tüm sensörlerin genişleme ağırlıklarını göstermektedir.

Genleşme, dizilimin hareket yönündeki (serbest) kontrol noktalarına, arka noktalara göre daha fazla ağırlık atanacak tarzda yapılmaktadır:

$$w_{sens}[0 \rightarrow 4] = \{4, 3, 2, 1, 0\}$$

Bu ifadede 0 indisi en ön, 4 indisi en arka sensöre denk gelmektedir.

4.5. Erkin Topluluğunu Bir arada Tutmak için Sanal Dış Potansiyel Sınırlaması

Dizilim sınırlarının, formasyonun yakınındaki engel dağılımına göre etkin olarak değiştirilebilmesi için 8 adet engele göre yeri değiştirilmiş kontrol noktasına (i) önce Catmull-Rom (CR) Şablonları; (ii) sonra da en küçük kareler (LS) eğrileri uydurulmuştur. CR-Şablonları ayrık dış sınır oluştururken LS eğrileri, erkinlerin hap-solmalarını veya çarpışmalarını engellemek için formasyona (kesikli değil), düzgün sınırlar belirlenmesi amacıyla uygulanılmıştır.

4.5.1. CR-Şablonları ile Dış Sınır Denetimi

Bir nokta kümesinden geçen CR şablonlarını modelleyen denklem:

$$\sigma(s) = \begin{bmatrix} 1 & s & s^2 & s^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\tau & 0 & \tau & 0 \\ 2\tau & \tau - 3 & 3 - 2\tau & -\tau \\ -\tau & 2 - \tau & \tau - 2 & \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i-2} \\ p_{i-1} \\ p_i \\ p_{i+1} \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, N_s \quad (4.3)$$

gibi olup, p_i eğrinin geçtiği kontrol noktası; $p_{i\pm j}$, $j = -2, -1, 1$ komşu kontrol noktaları; N_s kontrol noktalarının sayısı; τ ise şablonun kontrol noktasında eğimidir.

CR şablonlarının formasyon sınırları ile ilgili fayda sağlayabilen şu avantajları bulunmaktadır:

- (i) CR Şablonları interpolate eden şablonlardır. (Kontrol noktalarından geçerler).
- (ii) CR Şablonlarının C^1 sürekliliği söz konusudur.
- (iii) CR Şablonlarının yerel şekillendirilmesi kolaydır. Sadece τ parametresinin değiştirilmesi ile, CR şablon fonksiyonları kontrol düğümlerinde daha fazla ya da az eğime sahip olacak şekilde ayarlanarak formasyonun salınım miktarı uygun görülen düzeye çekilebilir.
- (iv) $\tau = 0$ değeri sensör düğüm kümesinin dışbükey zarflarına (convex hull) yakınsayan eğriler sentezler. Çalışmamızda $\tau = 0.3$ değeri ile düzgün ancak keskin açılarla ayrılmayan formasyon sınırları oluşturulması amaçlandı.

CR-Şablonları ile sentezlenen noktalarla potansiyel fonksiyonu benzeri sanal sınırlayıcı bir dış hat oluşturulur. Bunun için yararlandığımız mekanizma kısaca şu şekildedir: Dış sınıra bir δ_L mesafesinden daha fazla yaklaşan ajanların, dış bölgeye ulaşmamaları için onları ön eksenlerinden dizilim merkezine doğru sürükleyecek sanal bir potansiyel uygulanır. Bu sanal potansiyel bölgesi CR-şablonları ile (4.3) denkleminde göre oluşturulan parametrik eğriler olup kontrol noktaları arasına yeterli sayıda ara nokta uydurulmasıyla oluşturulurlar. Yöntemimizle her 8 CR kontrol düğümü arasına, 4 adet eşit aralıklı CR noktası eklenerek, 40 noktalı bir potansiyel sınırlayıcı hazırlanmıştır. Bu potansiyel Şekil 4.1(b)'de açık renkli oklarla gösterilen formasyonun merkezine doğru etkiyen bir kuvvetten ibaret olup sınırlara yakın erkinlerin sürüş kuvvetlerine vektörel olarak eklenir. Bu etki sonucunda erkinlerin formasyon dışına çıkarak hapsolme riskleri azaltılır.

İlgili sınırlayıcı potansiyel sürüş kuvvet fonksiyonu formülü:

$$F_p(x) = \frac{K_r(x_{CM} - x_{ae})}{L_c \|x_{CM} - x_{ae}\|}, \quad F_p(y) = \frac{K_r(y_{CM} - y_{ae})}{L_c \|y_{CM} - y_{ae}\|} \quad (4.4)$$

denklemleri modellenip, (4.4) denkleminde (x_{CM}, y_{CM}) formasyon merkezini; (x_{ae}, y_{ae}) formasyona gereğinden fazla yakın olan TMR'ların sanal ön eksenlerini; ve $L_c < \delta_L$, 40 denetim noktasının değerlendirilmesi sonucunda elde edilen ajanların formasyon sınırına mevcut uzaklığını gösterir. Sınır δ_L güvenlik mesafesinden daha yakın olan erkinlere uygulanan genel sürme kuvveti, dış potansiyel kuvvetinin, erkinin amaç bölgeye sürme kuvvetine eklenmesi sonucunda

$$F_g(x, y) = \begin{cases} F_s(x, y) + F_p(x, y), & L_c < \delta_L \\ F_s(x, y), & L_c \geq \delta_L \end{cases} \quad (4.5)$$

şeklinde elde edilir.

4.5.2. CR-Şablonları ile Sınırlamanın Avantajları

CR şablonları ile sınırlanan dizilimlerdeki robotların çoğunluğu formasyonun sınırları dahilinde tutulabilir. Dolayısıyla [Sahin and Zengeroglu, 2007a]'daki çalışmaya göre daha kolektif rota planlaması sağlanır. CR şablonları daha az salınımlı (oscillation) ve düzgün dizilim sınırları sağladığı için sonraki benzetimlerde gözlemlenebileceği gibi robot yön değiştirme ve hapsolme problemlerinin oranında azalma sağlayabilirler. Bu yönden tarayıcı (laser, ultra sound scanner) cihazları ile sürü planlaması yapan metotlara göre maliyet açısından avantajlıdırlar.

4.5.3. Erkin Robot Dağılımlarını Sınırlamak için En Küçük Kareler Yöntemi Tabanlı Eğri Uydurma Yaklaşımı

CR şablonlarının erkinleri dizilim içerisinde tutmak için sürekli değil, yalnızca sınırlı sayıda (ve genişlemeler sırasında aralıkları açılabilen) potansiyel noktalarından oluşan ayırık modeller olmaları önemli bir sınırlamalarıdır. Bu problem birçok durumda erkinlerin kolektif davranışını engelleyerek, bazı robotların sürüden kopmalarına yol açabilir. Ayrıca algortmik maliyet, dış potansiyel nokta sayısı ve dizilimdeki robot sayısına paralel olarak, $O(n^2)$ 'ye yakın şekilde artış gösterir. Bu nedenle sürekli sınırlar sağlayan, sade bir yaklaşım olan En Küçük Kareler Eğrisi (Least Squares Fit) algoritması benimsenilmiştir.

Eğri uydurmanın başarımı, ilgili örnek nokta kümesinin ağırlık merkezi orijine denk gelecek şekilde ayarlanılırsa artış göstermektedir [Tasdizen et al., 2000]. Buna göre yöntemimizin ilk adımında, robot dizilimi uygun dönüş (rotation) ve ötelenmelerle (translations), merkezi orijinde olacak ve en ön ve arka sensör noktalarının x-ekseni ile kesişecek şekilde Öklidyen dönüşüme (Euclidean transformation) tabi tutulur. Öklidyen dönüşüm 2-boyutta

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & t_x \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

denklemini ile modellenir. (4.6) denkleminde sırasıyla (x_c, y_c) ve (x_t, y_t) , dönüşüm öncesi ve sonrası konumları göstermekte olup; t_x, t_y, θ dönüşümün duruş bilgisini içeren üyelerinden ibarettir. Bu dönüşümden sonra ön ve arka sensörler ve x-ekseni ile ayrılan 2 alt nokta kümesine, 1 boyutlu en küçük kareler eğrileri uydurulur. Dolayısıyla da çalışmamızda 8 sensörden oluşan ağı (network) iki kısmındaki 5 noktaya en küçük kareler yöntemi uygulanır.

LS-eğrisi yöntemi, kısaca nokta değerlerinin farklı kuvvetlerinin

$$a_{LS} = \chi^\# v \quad (4.7)$$

biçiminde sözde ters matrisine uygulanmasıyla gerçekleştirilir. (4.7) denkleminde a_{LS} en küçük kareler eğrisi katsayı vektörünü temsil ederken; χ vektörü

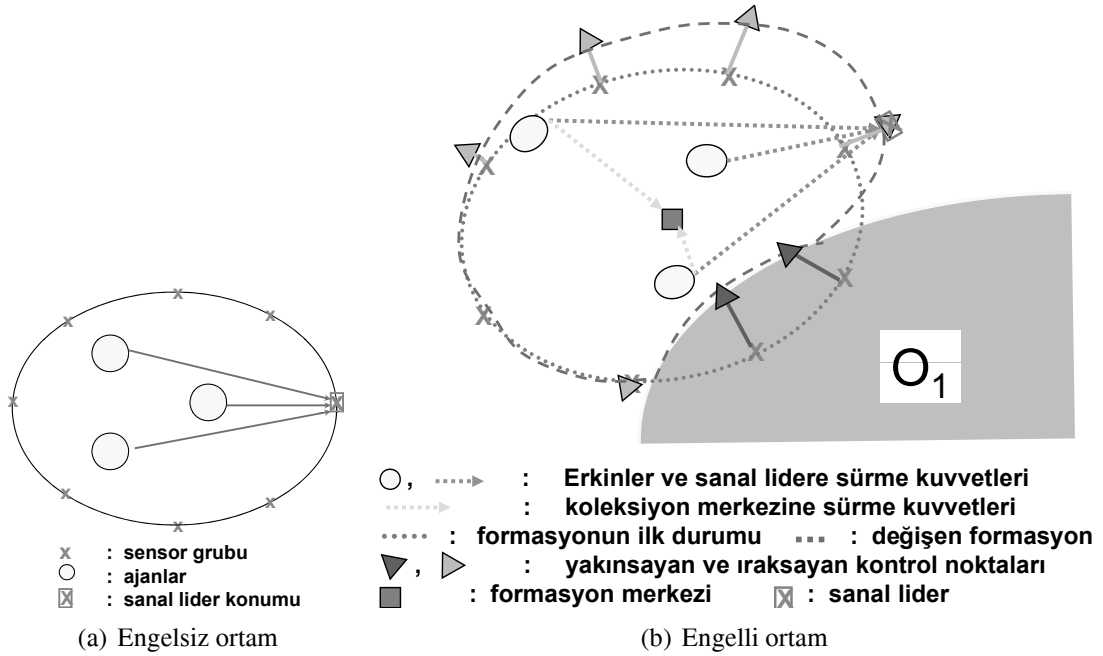
$$\chi = \begin{bmatrix} 1_{N \times 1} & x_i & x_i^2 & \cdots & x_i^k \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

şeklinde tanımlanır. Bu ifadede x_i^j , $j = 1, \dots, k$, $i = 1, \dots, N$, ilgili N kontrol noktasının x-ekseni değerinin j . kuvvetini temsil ederken; $\chi^\#$, χ vektörünün sözde tersi (pseudo-inverse) olup, $\chi^\# = (\chi^T \chi)^{-1} \chi^T$ şeklinde ifade edilir. Yine (4.7) denkleminde

$$v = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_N \end{bmatrix}^T$$

kontrol noktalarının y-eksenindeki bileşenleridir.

Bu yöntemle robot topluluğu ayrık yerine sürekli sınırlarla bir arada tutulmaktadır. Dolayısıyla robotların formasyonun sınırları dahilinde tutulması, sabit sayıda ve bazen araları genişlemeler sonucu açılan noktalarla değil, tüm sınır boyunca tanımlı

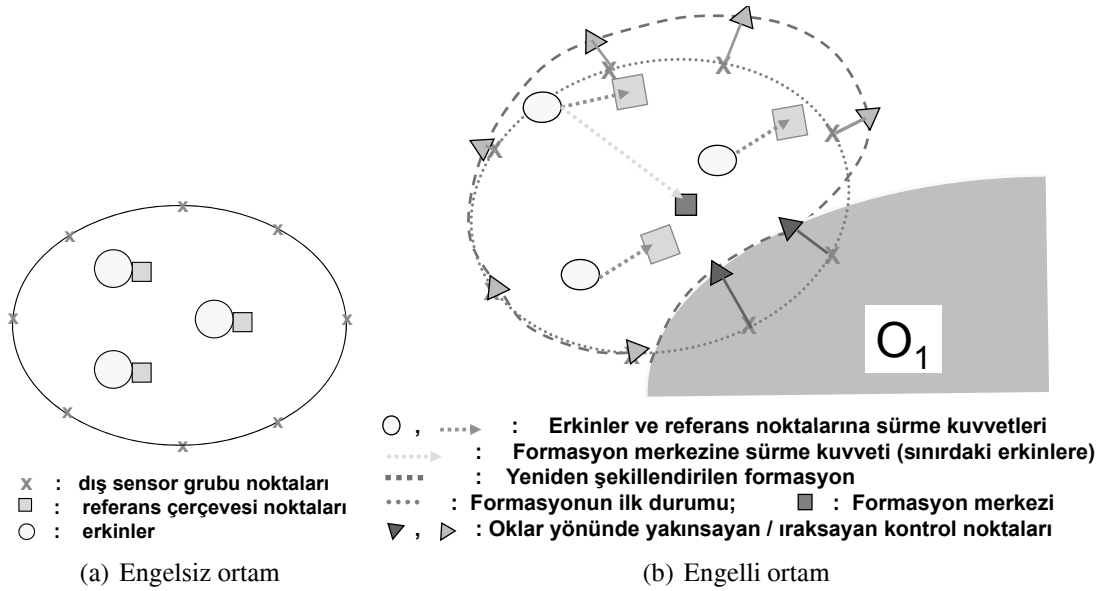


Şekil 4.1: CR-Şablonlu dış sınırı bulunan bir dizilimin (sanal lider noktaya doğru sürüş ile) sırasıyla engelsiz ve engelli ortamlarda davranış biçimi

en küçük kareler eğrileri ile sağlanır. Bu şekilde erkin robotların dizilim dışına çıkıp hapsolme oranları azaltılır.

Bir boyutlu LS eğrileri sürekliliklerinin haricinde de önemli avantajlar sağlarlar. İlk olarak LS eğrilerinin son derece yakın sınır takibi yapması sonucu sentezlenen eğriler çok az örnek nokta kullanımına karşın düzgünlük ve interpolasyon açısından CR Şablonlarının iyi özelliklerini büyük ölçüde korumaktadırlar. Ayrıca bu yaklaşımla dizilimin merkez çizgisine göre üst ve alt yarılarına 2 ayrı LS eğrisi uydurulması da, eğriler tarafından engel sınırlarının düzgün modellenmesi için göreceli olarak uygundur. LS eğrileri ile formasyon sınırı modellenmesi tekli TMR planlayıcısının engelden sakınma modeline [Sahin and Zergeroglu, 2007b]'deki sanal engel mekanizması tarzında entegre edilmektedir.

İki ya da fazla sayıda sensörün birbirlerine çok yakınlaşmaları durumunda sistem neredeyse lineer bağımlı (nearly linear independent) durumda kalıp sözde ters ile hesaplanan en küçük kareler eğrilerinde Şekil 4.4(a) da f_2 eğrisindeki salınımlar gibi ideal olmayan davranışlar oluşabilir. Bu durum (4.2) denkleminde dizilimin yeniden şekillendirme oranını kontrol eden k_{Exp} parametresinin azaltılması; ya da (4.7)



Şekil 4.2: CR-Şablonlu dış sınırı bulunan bir dizilimin (referans çerçevesi ile) sırasıyla engelsiz ve engelli ortamlarda davranış biçimi

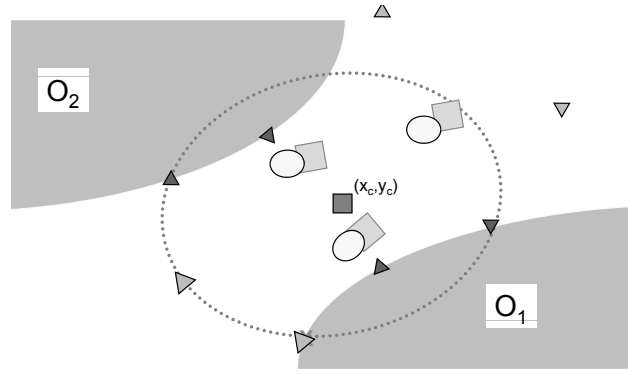
denklemine

$$a_{LSRR} = (\chi^T \chi + \epsilon I_{k \times k})^{-1} \chi^T v \quad (4.9)$$

denklemindeki gibi yine düşük maliyetli olan ridge regression düzenlenmesi [Tasdizen et al., 2000] gibi iki alternatif yöntem ile kontrol edilerek, (bkz. aynı şekildeki f_2^{RR} eğrisi gibi) daha düzgün sınır takibi sağlanabilir. (4.9) eşitliğinde $I_{k \times k}$, $k \times k$ birim matrisi; ϵ küçük bir ölçekleme terimini göstermektedir. Ancak bu durum formasyonun sensörlerinin erkin sensörleri ile birebir tutulmaması sonucu bir lineer bağımlılıktan kaynaklanmakta olup deneysel ortamlarda Şekil 4.4(b) deki gibi robotların çarpışmadan birbirlerine o kadar yaklaşmalarının mümkün olmaması ve robot dağılımının referans noktalar ve engelden sakınma özelliği bulunan TMR'larla belirlenmesi nedenleriyle sorun oluşturmazabilir.

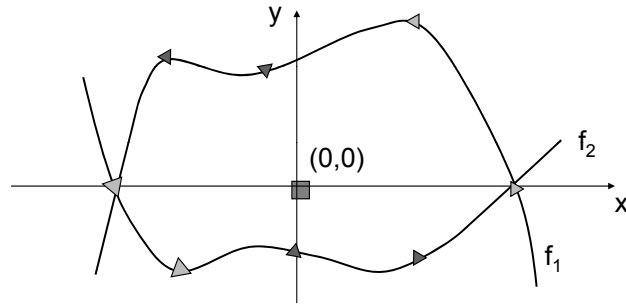
4.6. Referans Çerçevesi Formasyonlar:

Bölüm 4.5'deki yöntemlerle formasyonun dış sınırlarının belirlenmesi, oğul robotların dizilimin hareketi yönündeki sanal bir lider noktaya doğru ilerlemeleri, bazı noktalarda kümelenmeden rota planlaması için yeterli olmayabilir. Özellikle engellerden kaynaklanabilecek dış sınırlamalarla etkileşirse dar bölgelerde robot kümelenmeleri meydana gelerek, çarpışma oranlarında artış olur. Bu nedenle referans



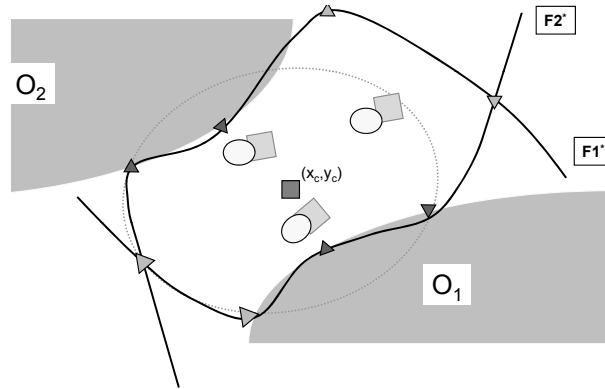
- : referans çerçevesi noktaları, ○ : erkinler;
 : formasyonun engelsiz ortamlarda sınırı;
 ▼, ► : yakınsayan / ıraksayan sınır noktaları;
 ■ : formasyon merkezi; O_{1,2} : engeller.

(a) Formasyon dış sınırlarının değişen kontrol noktaları ile yeniden şekillendirilmesi



- ▼, ► : orijine ötelenen yakınsayan / ıraksayan kontrol noktaları;
 ■ : formasyon merkezi; f_{1,2} : uydurulan en küçük kareler eğrileri

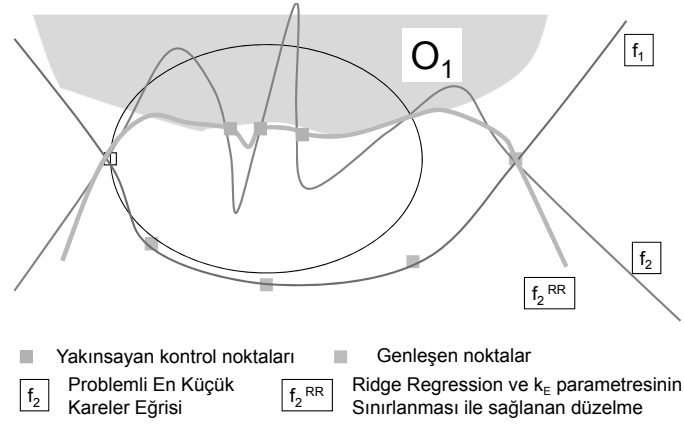
(b) Noktaların kartezyen koordinatlarının merkezine dönüşümü ve LS fits uygulanması



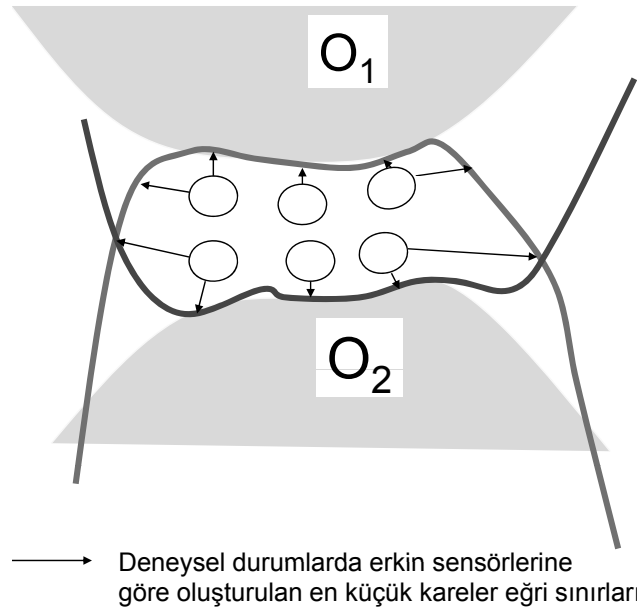
- : erkinler, ■ (x_c, y_c) : formasyon merkezi.
 F1', F2' : formasyon sınır eğrileri,

(c) Eğrilerin formasyon duruşuna yeniden geometrik dönüşümü ile formasyon sınırlarının oluşturulması

Şekil 4.3: Formasyon sınırlarının en küçük kareler eğrileri ile formasyonu



(a) Teorik durumda problemin oluşması ve RR yada k_{Exp} genişleme katsayısı sınırlanması ile çözümü

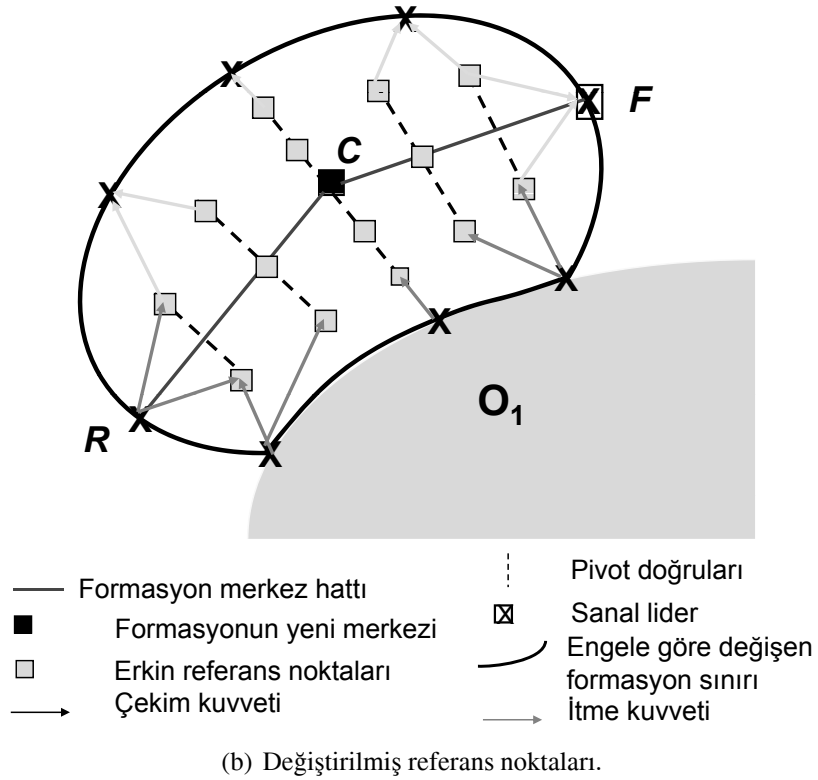
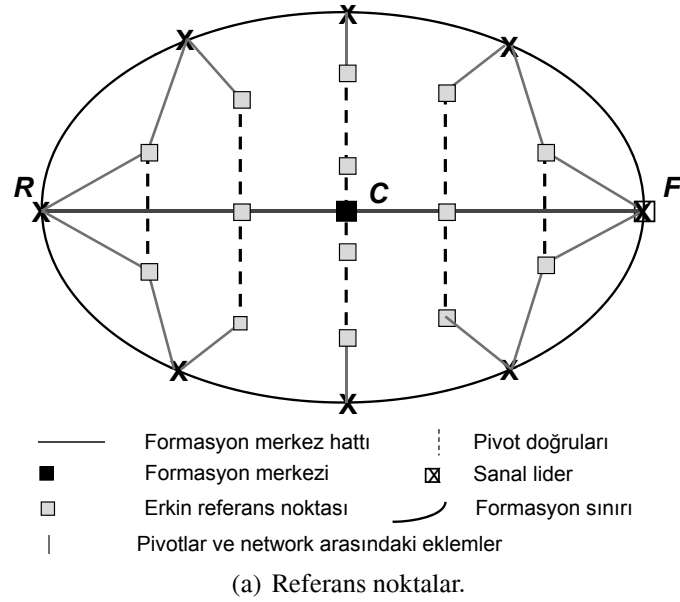


(b) Problem deneysel durumda olmamalıdır

Şekil 4.4: Kontrol noktalarının neredeyse tekil veri kümesi meydana getirmesi ve çözüm önerisi

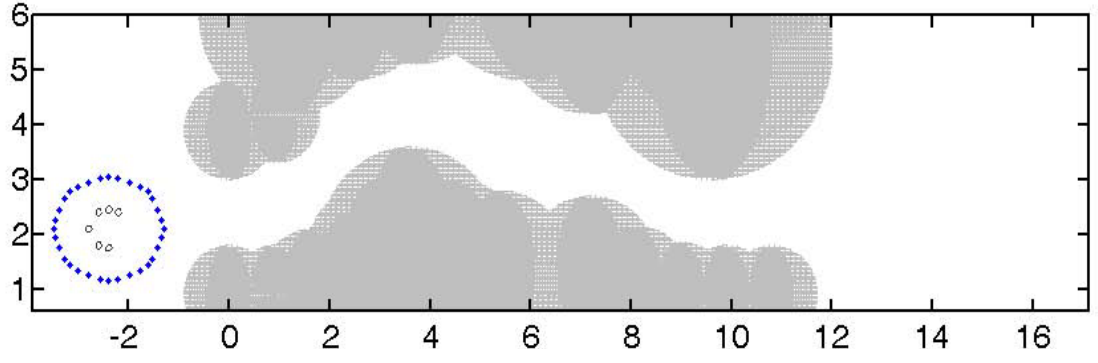
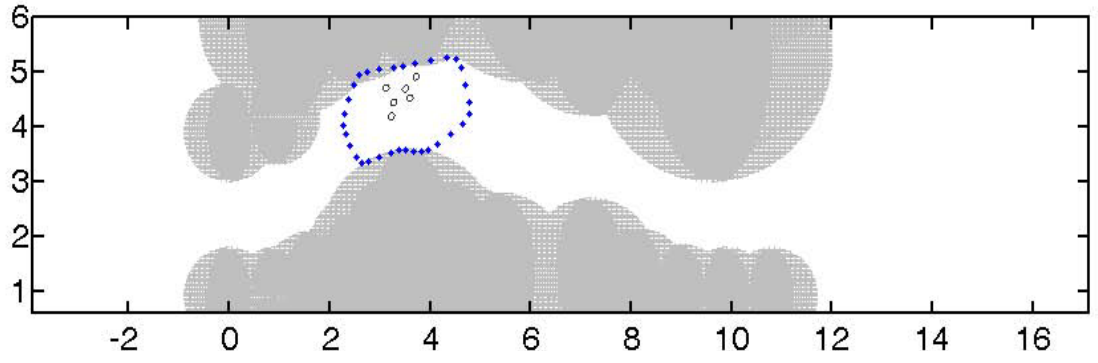
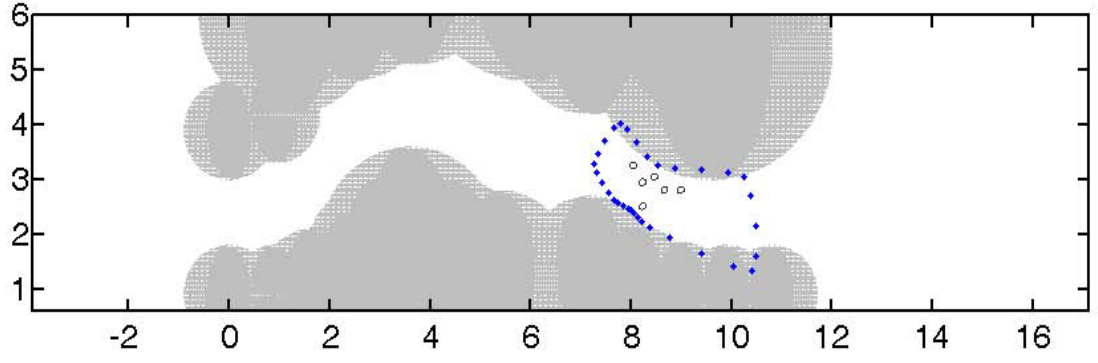
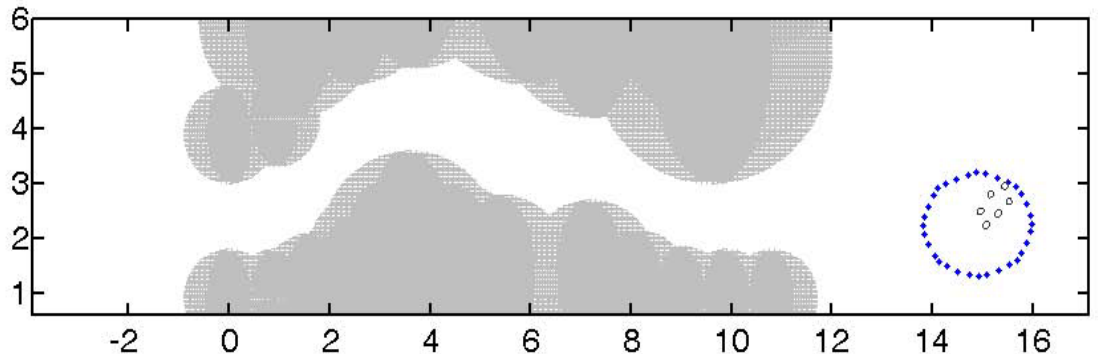
çerçeve uygulanıp sanal lider yaklaşımında göreceli olarak fazla sayıda çarpışma ve geri dönme oranının azaltılması amaçlanılmıştır.

Açıklama 4.1 Formasyon bölgesi gibi herhangi bir alanda düzgün şekilde nokta dağılımı için Voronoi üçgenselleştirmeleri gerekebilir [Varadhan et al., 2006]. Ancak bu tarz yöntemler yüksek algoritmik maliyet ve karmaşıklık içereceği için sürü rota planlamasına uygun değildir. Tezin bu bölümünde daha sağlam ve düşük maliyetli bir yaklaşım sunan alternatif bir yöntem önerilmektedir.

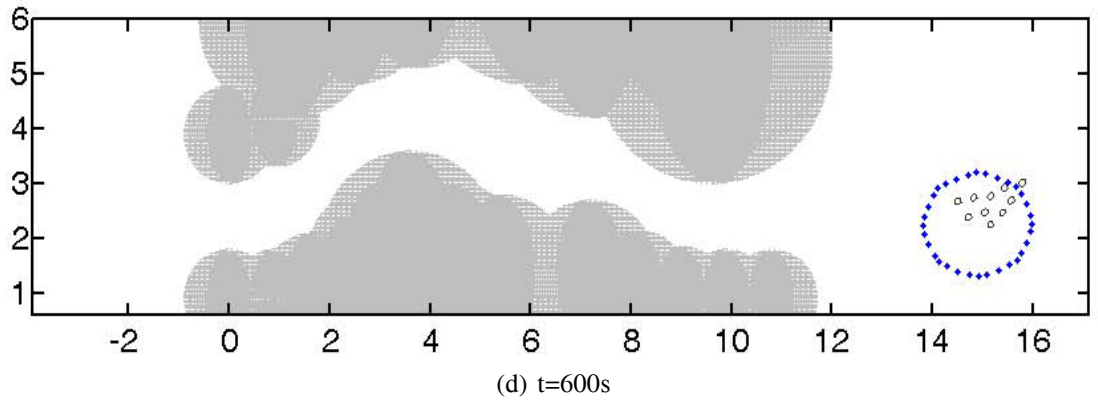
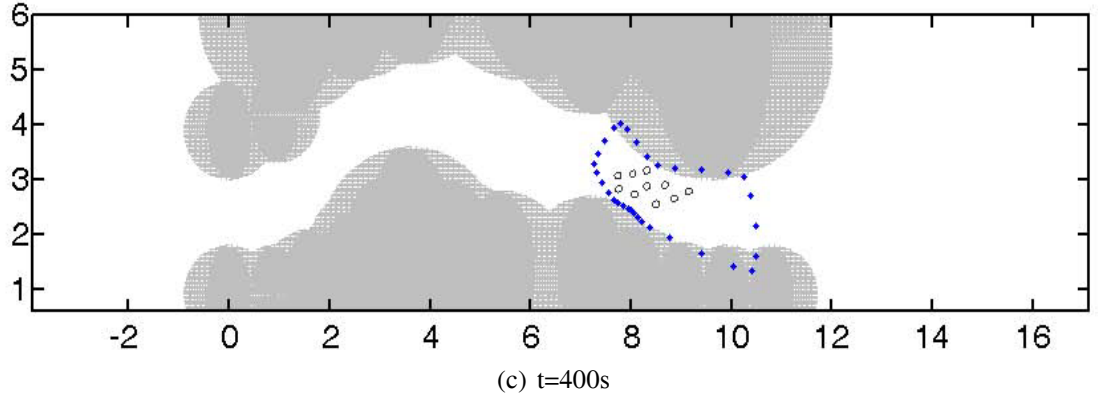
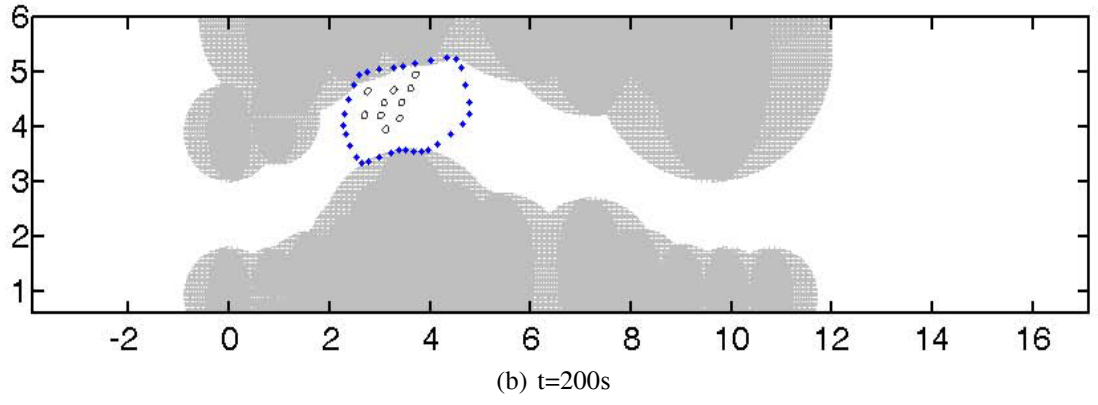
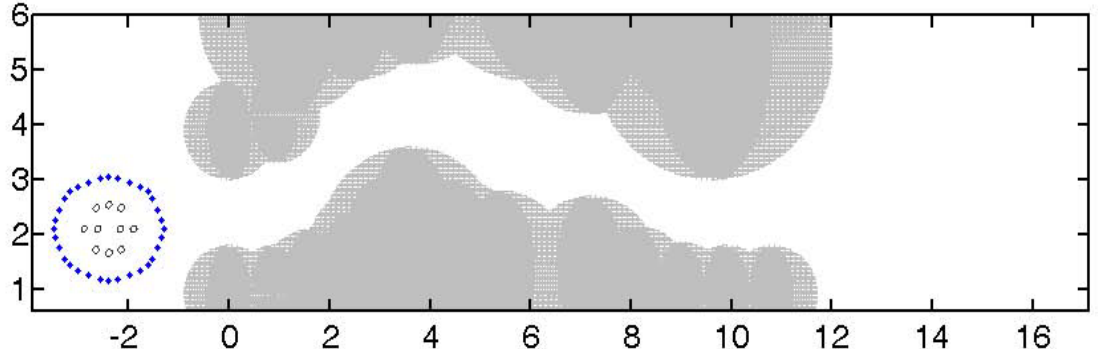


Şekil 4.5: Dizilim engelli ortamlarda iken referans noktalarının değişimi

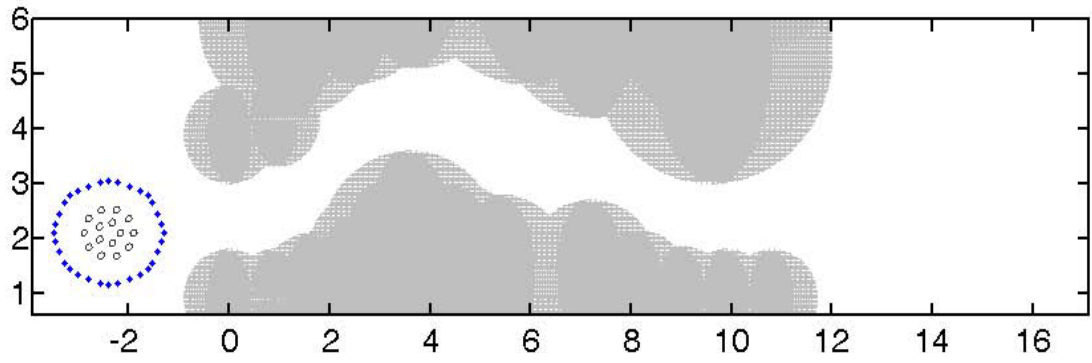
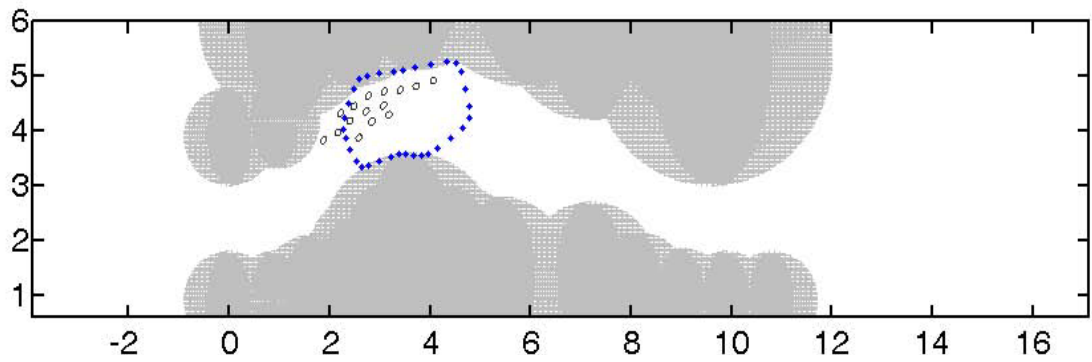
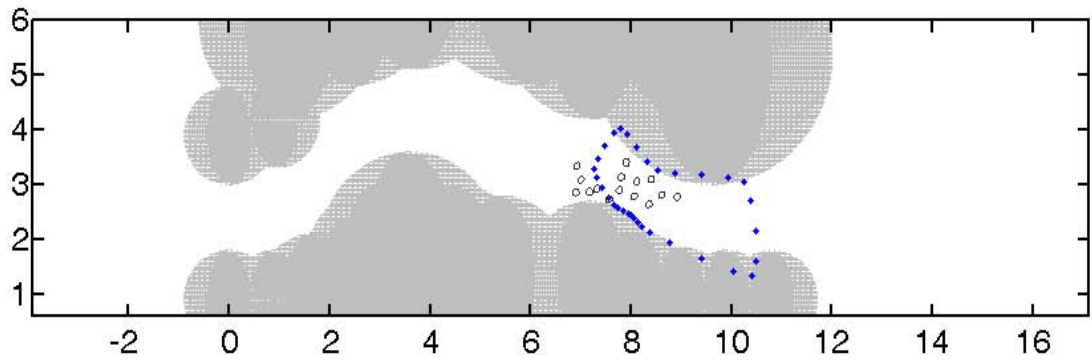
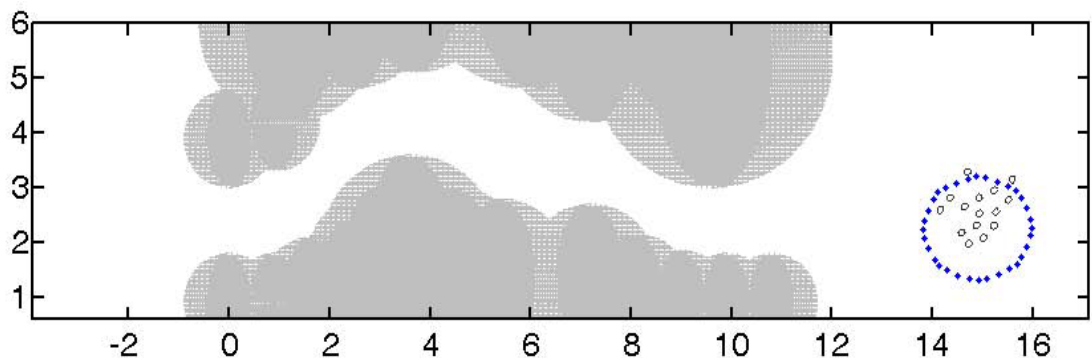
Önerdiğimiz yönteme göre TMR'lar ilk olarak elipsoit şeklindeki formasyonun içinde bulunan referans noktalarına iliştilerilerek aralarında yeterli mesafe sağlanır (Bkz. Şekil 4.3). Bu noktalar aşağıda anlatıldığı şekilde engel etkisi de söz konusu iken mümkün olduğunca aralarındaki mesafeyi koruduğu için çarpışma oranları önemli oranda azalır. Engel etkisiyle aşırı derecede şekil değiştiren formasyonlarda bazen komşu erkinler arasında etkileşim olabilir; ancak bu durumlarda erkin planlayıcıları

(a) Simulasyon Zamanı $t=0s$ (b) $t=200s$ (c) $t=400s$ (d) $t=600s$

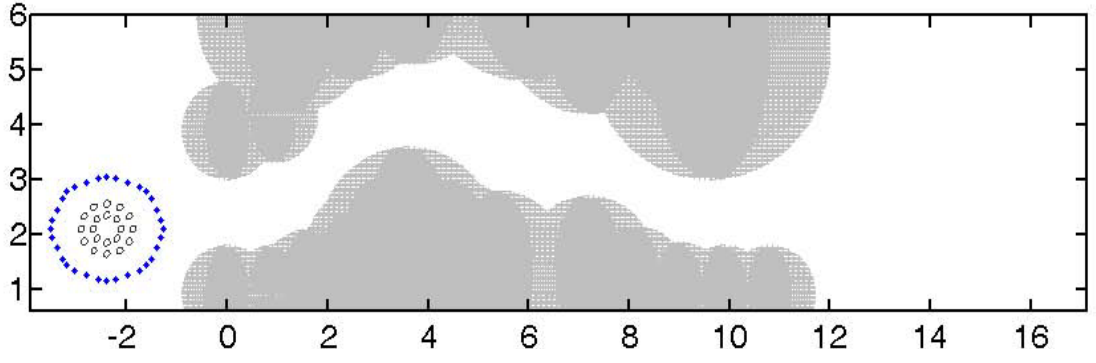
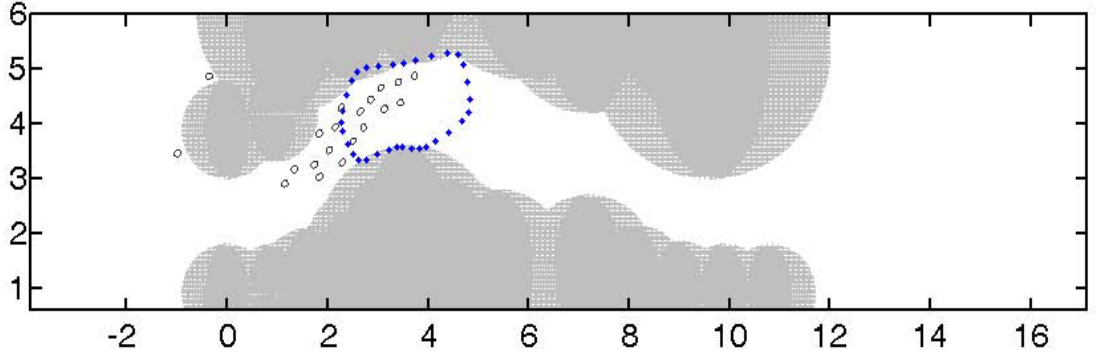
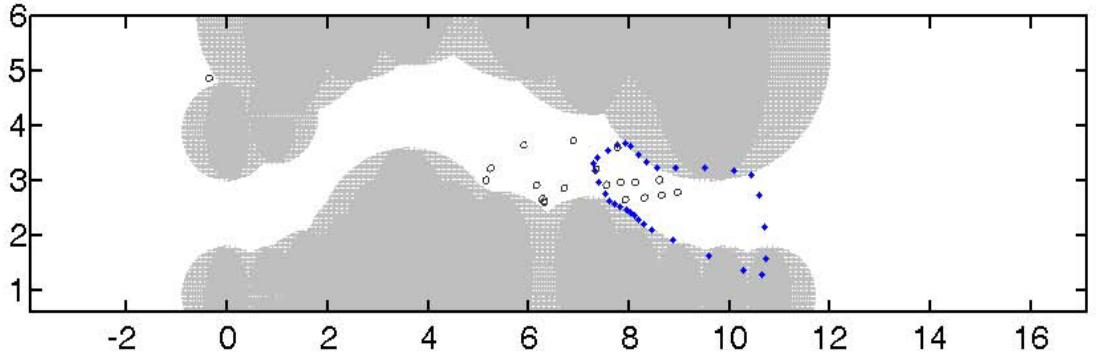
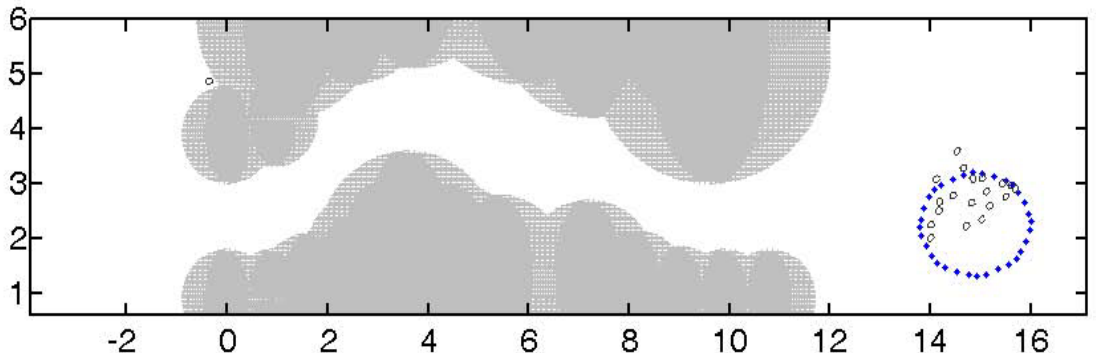
Şekil 4.6: Mobil dizimli sürü rota planlaması (6 robot, noktasal sınırlamalı)



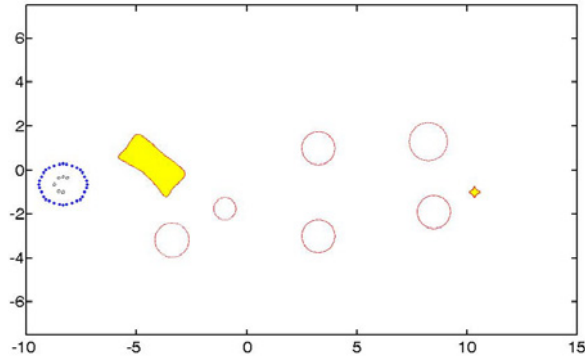
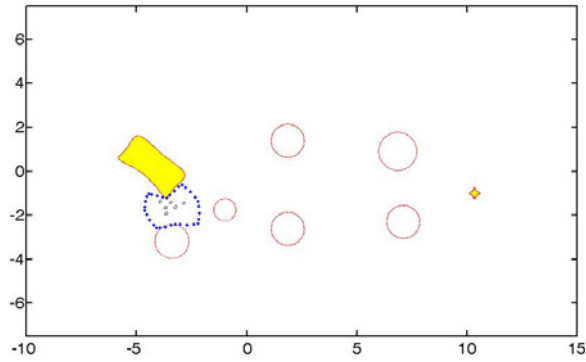
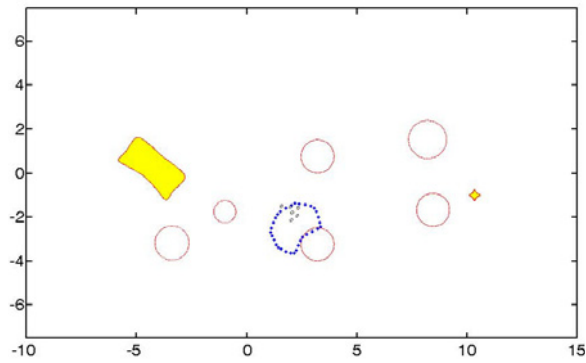
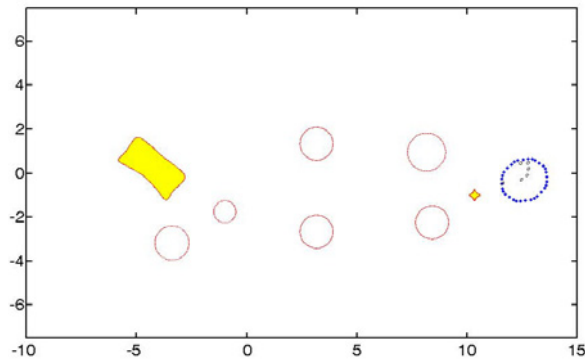
Şekil 4.7: Mobil diziliimli sürü rota planlaması (10 robot, noktasal sınırlamalı)

(a) Simulasyon Zamanı $t=0s$ (b) $t=200s$ (c) $t=400s$ (d) $t=600s$

Şekil 4.8: Mobil dizilimli sürü rota planlaması (15 robot, noktasal sınırlamalı)

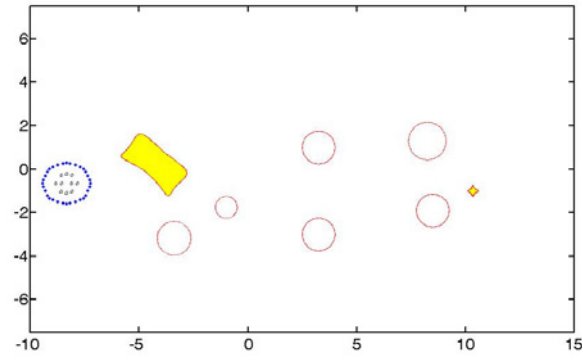
(a) Simulasyon Zamanı $t=0s$ (b) $t=200s$ (c) $t=400s$ (d) $t=600s$

Şekil 4.9: Mobil diziliimli sürü rota planlaması (20 robot, noktasal sınırlamalı)

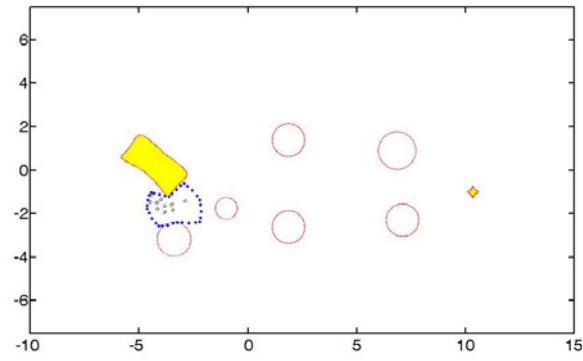
(a) Simulation Time $t=0s$ (b) $t=200s$ (c) $t=400s$ (d) $t=800s$

Şekil 4.10: Hareketli engellere karşı mobil formasyon (6 erkin).

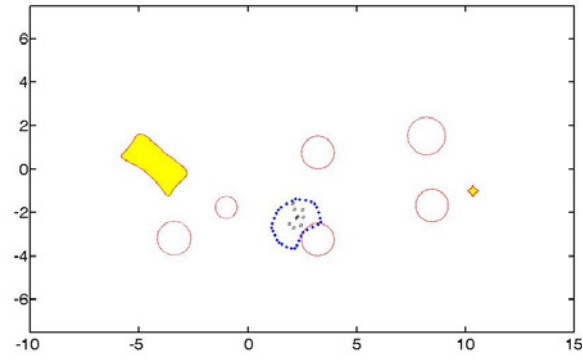
genellikle problemsiz şekilde engelden sakınma sağlayarak çarpışmaları önlerler.



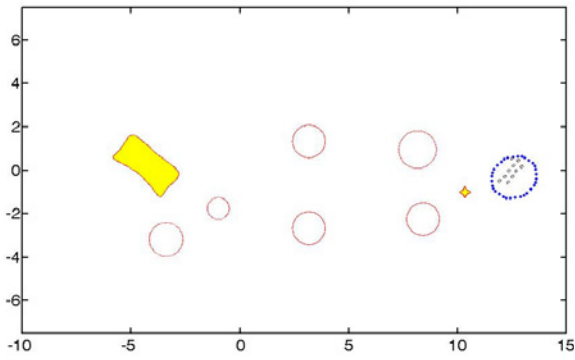
(a) Simulation Time t=0s



(b) t=50s



(c) t=115s

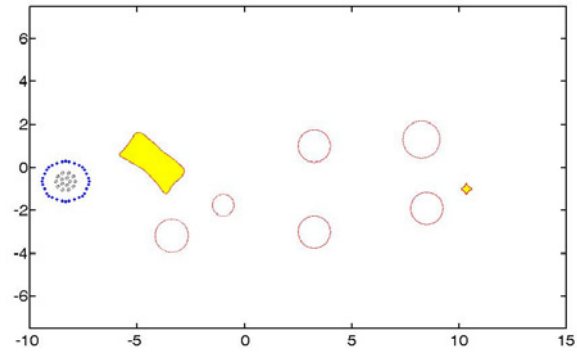


(d) t=250s

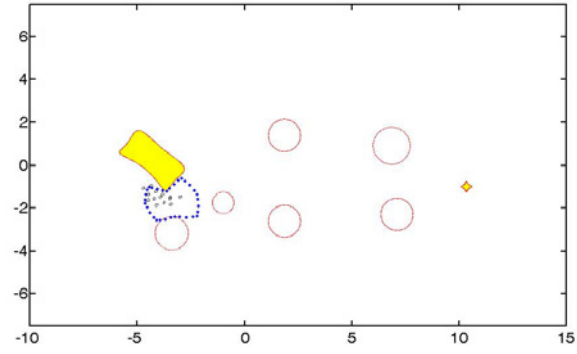
Şekil 4.11: Hareketli engellere karşı mobil formasyon (10 erkin).

4.6.1. Dizilim Yönünde Genleşme/Daralmaya Göre Nokta Dağılımı:

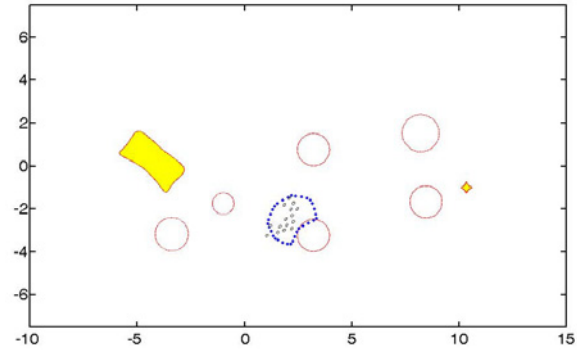
Erkinlerin referans noktaları, (x_F, y_F) ön kontrol noktasından başlayan ve (x_{CM}, y_{CM}) formasyon merkezi üzerinden (x_R, y_R) arka kontrol noktasına yönelen



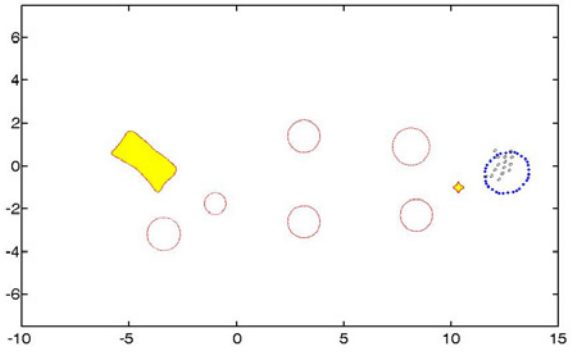
(a) Simulation Time t=0s



(b) t=50s



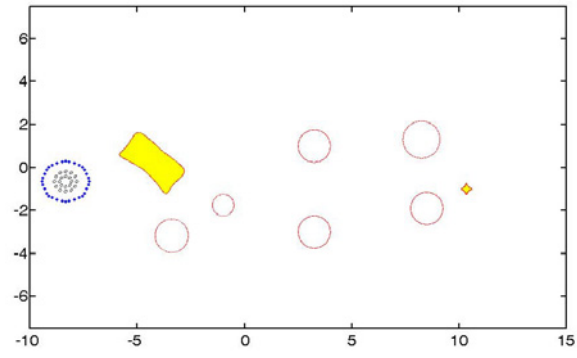
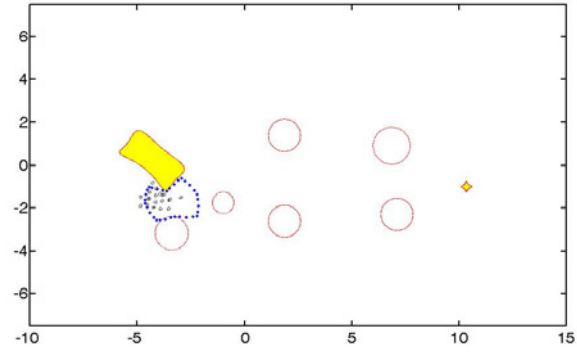
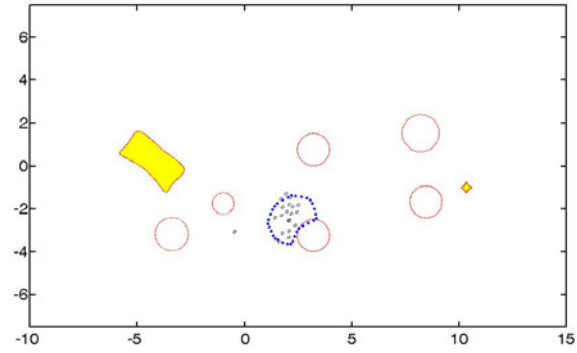
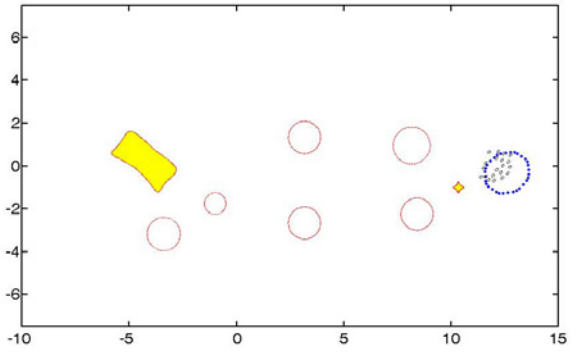
(c) t=115s



(d) t=250s

Şekil 4.12: Hareketli engellere karşı mobil formasyon (15 erkin).

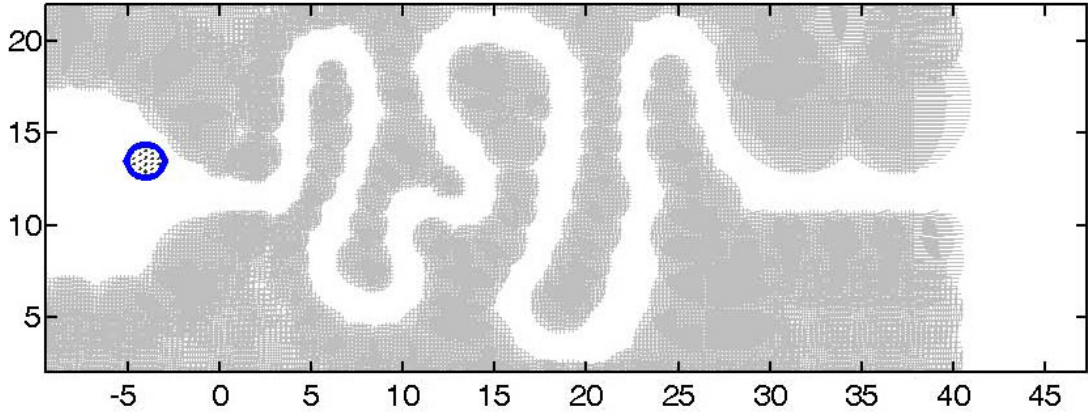
doğru parçaları üzerinde, birbirinden eşit olarak Δ_L mesafeleri ile ayrılan pivot konumları üzerindedir. Her pivottan, üzerinde 2 – 4 arasında erkin referans noktası

(a) Simulation Time $t=0s$ (b) $t=50s$ (c) $t=115s$ (d) $t=250s$

Şekil 4.13: Hareketli engellere karşı mobil formasyon (20 erkin).

bulunduran doğru parçaları geçer (bkz. Şekil 4.5).

Dizilimin sürülmesine ve şekil değiştirmesine göre pivot noktalarının for-

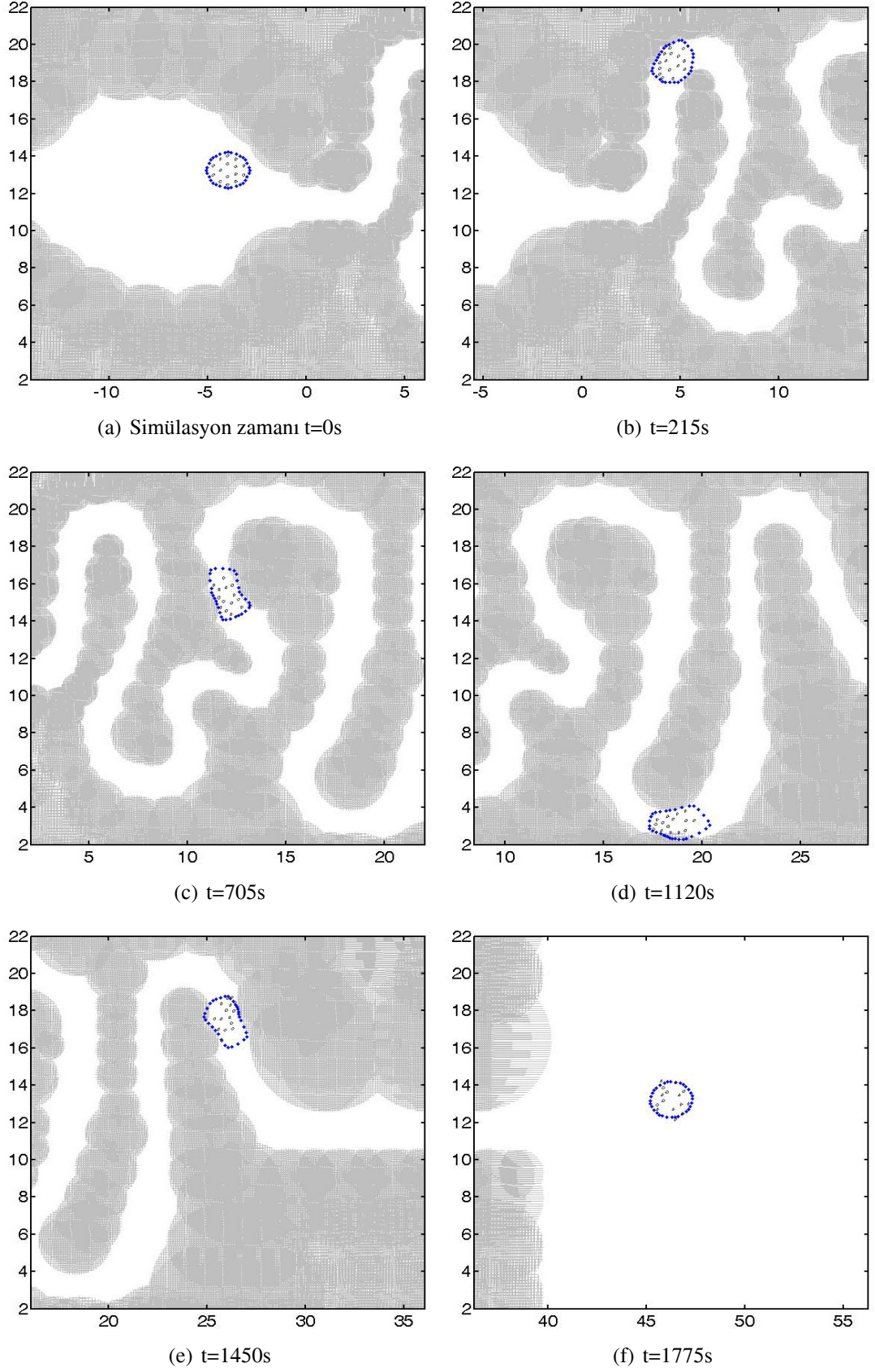


Şekil 4.14: Benzetim ortamının genel görünüşü

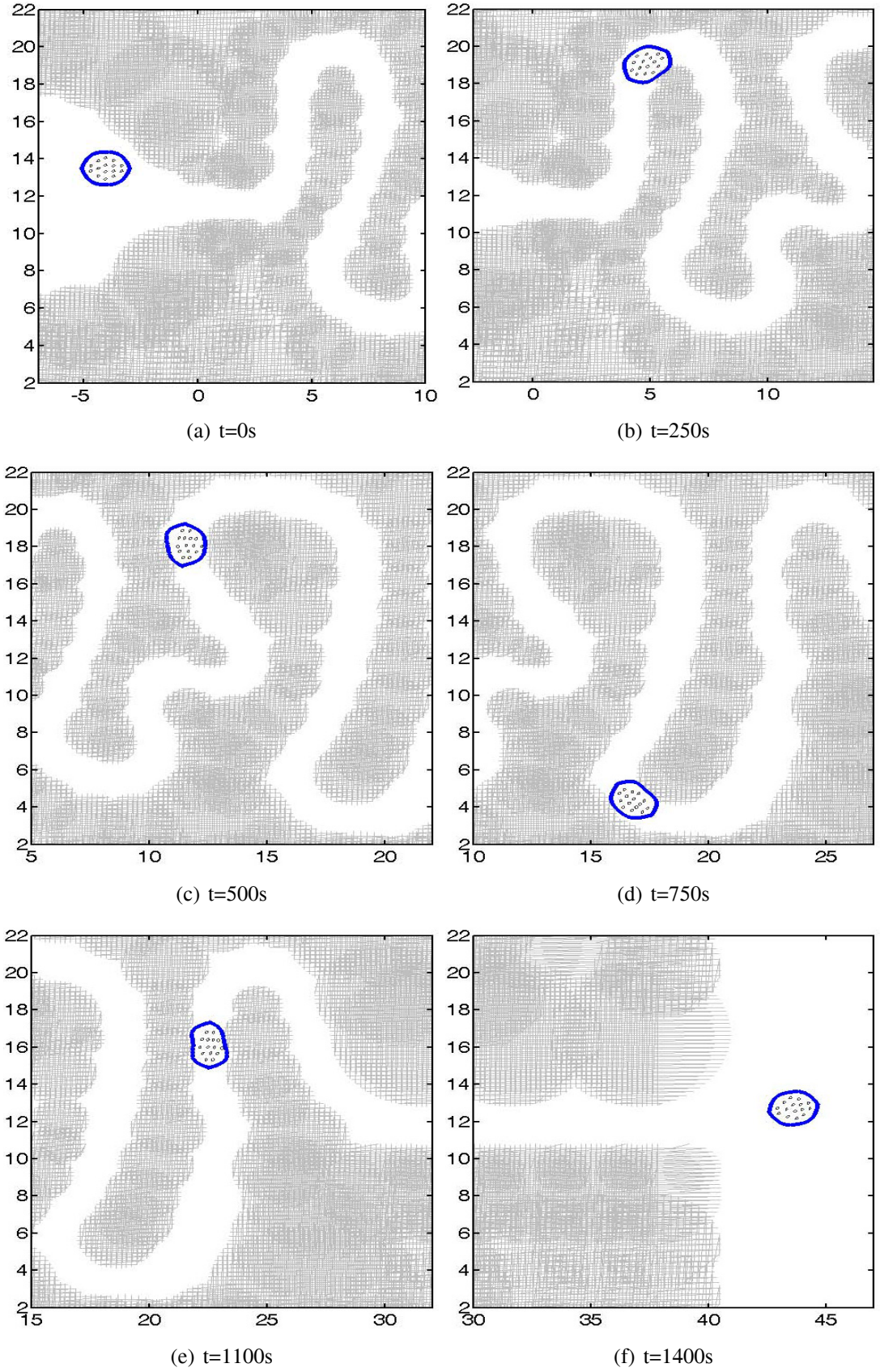
masyondaki konumları da rota boyunca değişir. Buna göre formasyon temel eksenini boyunca genişlediği zaman, Δ_L mesafesi de bununla doğru orantılı olarak artar. Bu değişim sırasıyla engel etkisinde bulunmayan ve bulunan formasyonlar için Şekiller 4.5(a) ve 4.5(b) de şematik olarak belirtilmiştir. Buna göre ajanların pivotlar üzerinde doğru parçalarındaki referans konumları mümkün olduğunca düzgün dağılımı korumayı sağlayacak formda güncellenmektedir. Yazılımsal maliyet arttırılmadan çarpışma ve geri dönme sayıları azaltılmakta ve dizilimin başarımları karmaşık tünellerde dahi aşırı düşmemektedir.

4.7. Benzetim Sonuçları

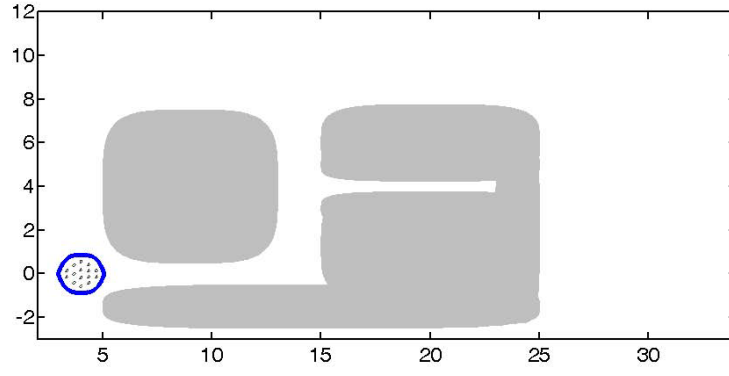
Sürü rota planlayıcısının etkinliği birçok benzetimle gösterilecektir. Simülasyonlar, Şekiller 4.6-4.9, 4.10-4.13 ve 4.15'den gözlemlenebileceği biçimde tüneller ve mobil engeller gibi zorlu ortamlarda yapılmaktadır. Benzetimlerde Matlab[®]/ Simulink[®] ortamlarında derlenen C mex s-fonksiyonları kullanılmıştır. Benzetim parametreleri şöyle belirlenmiştir: Erkin sensörlerine ek olarak dizilim dış sınırında da dengeli şekilde dağıtılmış sensörler bulunur. Bu sensörler TMR'un çevresinde elipsoit bir algılama alanı oluşturan 6 VAR-YOK algılayıcısından ibarettir. Dizilim algılayıcılarının ise robot sensörlerinden oluştuğu varsayılır. Bu sensörlerin sayıları, etkin ve algoritmik verimli engelden sakınma amaçlandığı için 8 tane ile sınırlanmıştır. CR şablonu ve LS eğrisi yaklaşımları için, (2.5) denklemindeki dizilim



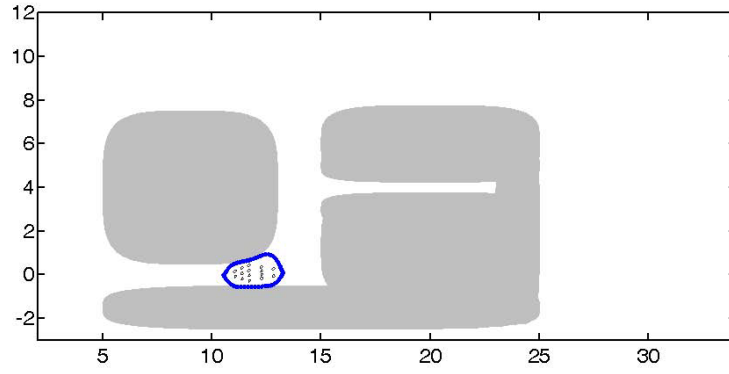
Şekil 4.15: Karmaşık tünelde mobil ve sabit referans çerçevesi formasyon (15 robot, noktasal dış sınırlar)



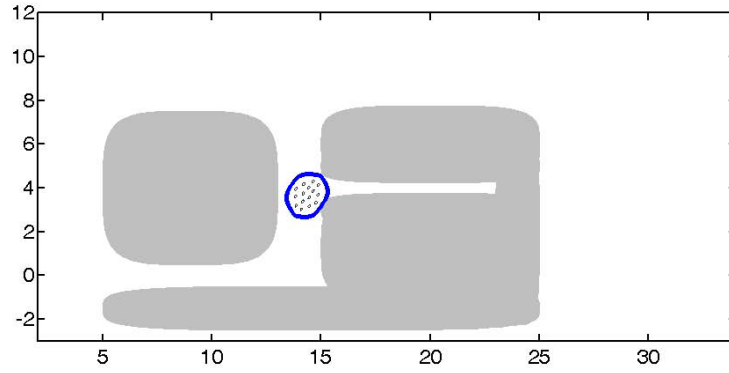
Şekil 4.16: Karmaşık tünelde en küçük kareler eğrisi tabanlı sürü planlayıcısı (15 erkin, sürekli dış sınır).



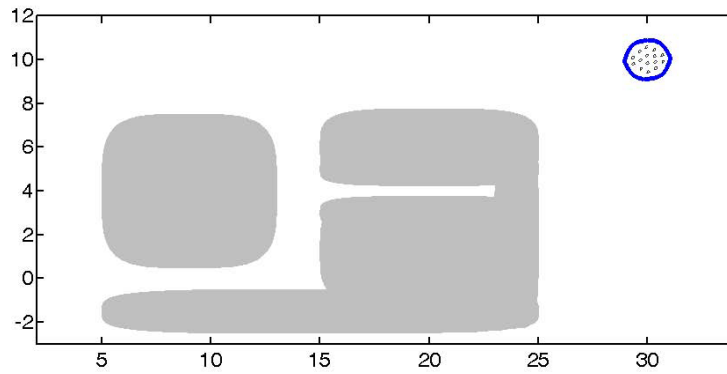
(a) Benzetim ortamının genel görünüşü. ($t=0s$)



(b) $t=75s$

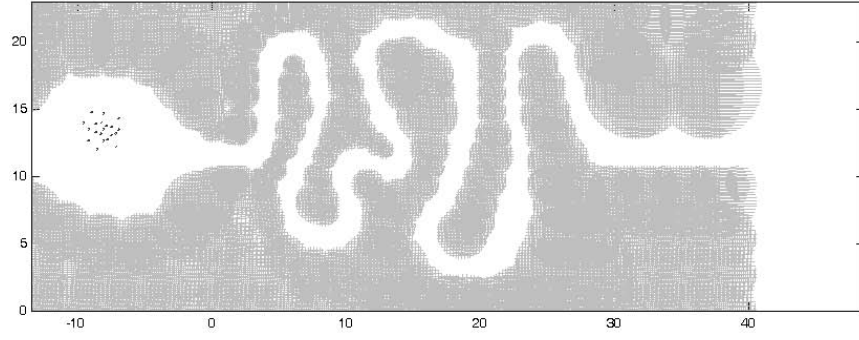
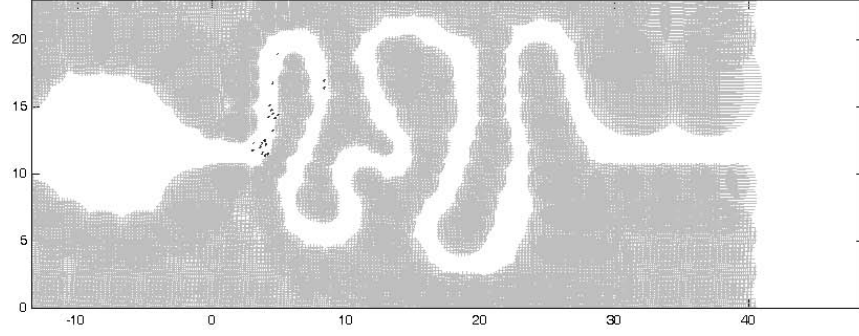
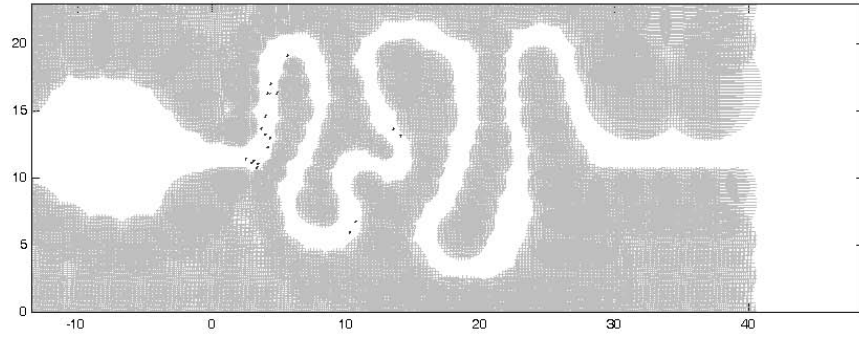
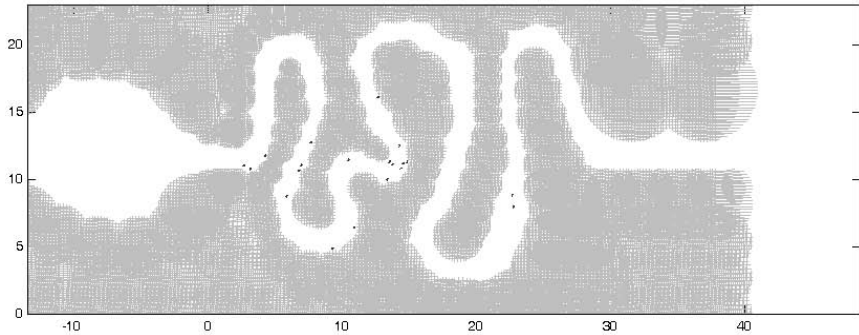


(c) $t=175s$



(d) $t=700s$

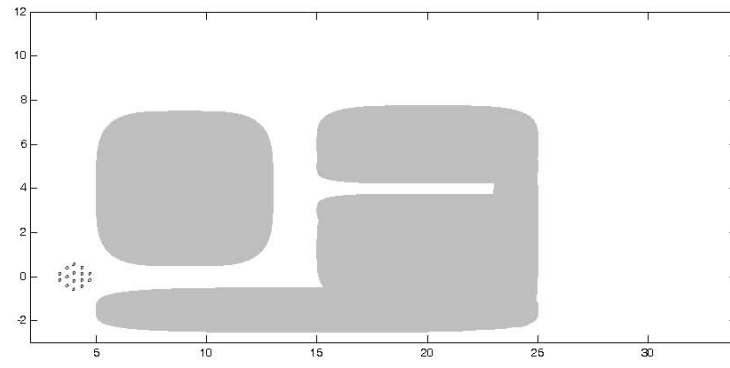
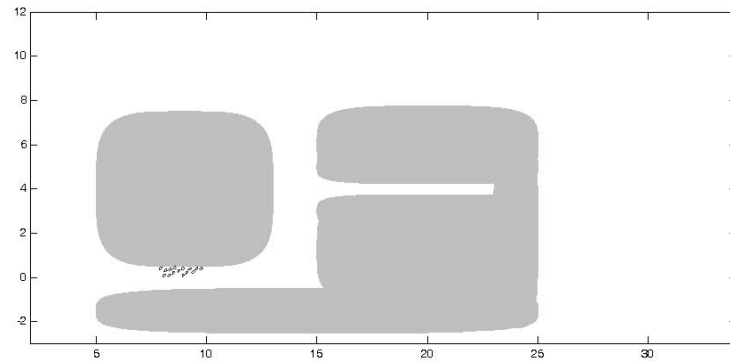
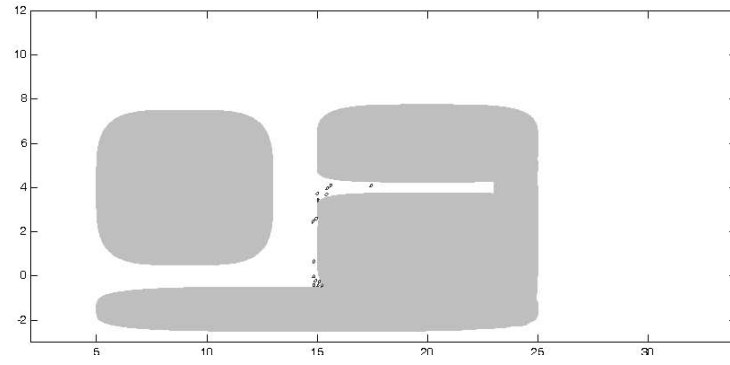
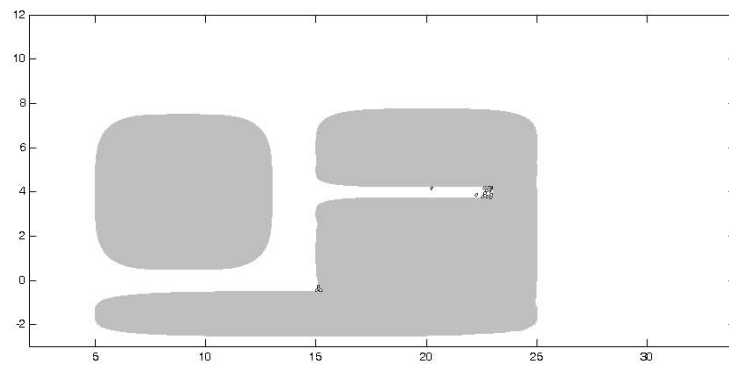
Şekil 4.17: MDRRF formasyonunun kapalı geçitli tünelde başarıımı.

(a) Benzetim süreleri $t=0s$ (b) $t=300s$ (c) $t=670s$ (d) $t=1420s$

Şekil 4.18: Geometrik serbest referans çerçeve formasyonlu erkin güzergah planlayıcısının tünelin iç çeperi %90 oranında artırıldığında başarımını yitirmesi.

ve erkin sürüş kuvveti parametreleri, sırasıyla şu şekildedir:

$$K_f = \text{diag}(0.07, 0.07), \quad B_f = \text{diag}(0.01, 0.01),$$

(a) Benzetim süreleri $t=0s$ (b) $t=75s$ (c) $t=210s$ (d) $t=700s$

Şekil 4.19: Serbest referans çerçeve formasyonlu çoklu-TMR rota planlamasının U-engelli tünelde başarısız sonuç vermesi.

$$\begin{aligned}
K_a &= \text{diag}(0.075, 0.075), \quad B_a = \text{diag}(0.01, 0.01), \\
K_f &= \text{diag}(0.11, 0.11), \quad B_f = \text{diag}(0.01, 0.01), \\
K_a &= \text{diag}(0.1175, 0.1175), \quad B_a = \text{diag}(0.01, 0.01).
\end{aligned}$$

Erkin elipsoit algılama alanı yarı-çapları

$$a = 11, \quad b = 10 \text{ [cm]}, \quad (4.10)$$

küçük TMR'larınki ile paralel olacak şekildedir. Dizilim kuşağı yarıçapları ise

$$a = 110, \quad b = 97.5 \text{ [cm]} \quad (4.11)$$

biçiminde 15 erkini aralarında yeterli açıklık bulunduracak şekilde belirlenmiştir.

Erkinlerin şablon geçiş süreleri [Sahin and Zergeroglu, 2007a]'dakilere göre düşük olan

$$\delta_t = 1.0, \quad \Delta_t = 0.3, \quad [\text{s}] \quad (4.12)$$

değerlerinde tutulurken, genel formasyonun geçiş süresi parametreleri ise

$$\delta_t = 3.4, \quad \Delta_t = 0.8, \quad [\text{s}] \quad (4.13)$$

değerleriyle belirlenmiştir.

En küçük kareler tabanlı eğri uydurmalı benzetimlerde, genişleme katsayısı gereksiz salınımlardan sakınmak için, $k_{Exp} = 0.5$ değeriyle sınırlı tutulmuştur.

Şekiller 4.6-4.9 sırasıyla 6, 10, 15 ve 20 oğul robotlu sürülerin, CR şablonu ve sanal lider tabanlı MDRRF formasyonu ile bir tünelde hareketi üzerinedir. Ancak bu şekillerde referans çerçevesi uygulanmamıştır. Görev amacı robotları sol taraftan sağdaki açıklığa ulaştırmaktır.

Şekil 4.6'da az sayıda TMR ilk olarak elipsoit şeklinde olan dizilim sınırları içerisinde harekete başlarlar. Şekil 4.6(b)'de CR şablonlarıyla modellenen değişken formasyon sınırlarının, algılanan tünel yapısına göre şekil almaya başladığı görülmektedir. Şekil 4.6(c)'de ise sistem, tünelin daha dar bir kısmındadır. İki durumda da robotların dizilim sınırlarından ayrılamadığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.6(d)'de ise formasyondaki TMR'ların amaç bölgeye ulaşması görülmektedir.

Bu simülasyonlardan CR şablonları ile formasyon sınır belirlemenin etkinliğinin yanısıra sayıca 10'dan az robot içeren gruplarda kolektif rotalanmanın büyük ölçüde sağlandığı sonucuna varılabilir. Erkinler bazı durumlarda birbirlerine ciddi oranlarda yaklaşsalar da dizilimden ayrılan ya da tünelde kalan robot olmamaktadır.

Şekil 4.7'de aynı ortamda 10 TMR'un hareketi gösterilmektedir. Formasyon sınırları benzer şekilde ilerlemesine karşın Şekil 4.7'deki gibi bazı robotlar sınırlar dışına çıkabilmektedir. Ayrıca Şekiller 4.8(b), 4.8(c), 4.9(b), ve 4.9(c)'den gözlemleneceği gibi, erkin sayısı 15'e ulaştıktan sonra sürü davranışında artan sayıda robotun CR şablon sınırlarını aşması sonucunda bozulmalar başlamaktadır. Yine de ilk üç benzetimde robotların hapsolması söz konusu olmamıştır.

20 robotlu son benzetimde, başarımda daha önemli düzeyde azalmaların meydana gelmesinin yanı sıra bir ajan da tünel başlangıcında hapsolmaktan kurtulamamaktadır (bkz. Şekil 4.9 ve Çizelge 4.1). Dolayısıyla 15 robottan itibaren kolektif davranışta zayıflamalar olmaktadır. Bunun sonucunda CR şablon tabanlı yaklaşım tek başına gerçeğe yakın formasyon davranışı oluşturma açısından yeterli görülmemiştir.

Şekiller 4.10-4.13, sırasıyla 6, 10, 15 ve 20 erkinli sürülerin hem sabit hem de hareketli engeller bulunduran ortamlarda rota planlaması ile ilgilidir. Simülasyonda büyük engellerin yanı sıra hareketli engeller ve küçük bloklar da bulunmaktadır. Detaylı olarak açıklanırsa Şekil 4.10'da ilk üç sol engel nispeten karmaşık yapıda sabit engellerdir. Sonraki dairesel dört adet engel ise benzetim zamanına göre yer değiştiren hareketli engellerdir. Amaç konuma yakın olan ve dizilim sensörleri tarafından algılanmayan ancak erkinlerin sensörlerini etkileyen küçük boyutta bir blok da söz konusudur.

Şekillerden gözlemlendiği gibi dizilim sınırları, sabit engellerin yanı sıra hareketli engel sınırlarını da takip edecek oranda değişmektedir. Kolektif davranışın olumsuz etkilemesi, yine erkin sayısının 15 ya da daha fazla robota ulaşması ile formasyon sınırlarının kapasitesine yaklaşmasından sonra oluşmaktadır. Bu durumda (Bkz. Şekiller 4.12 ve 4.13) sürü sınırlarını aşan; geri dönen ya da çarpışan (Bkz. Çizelge 4.1) erkin sayısında önemli artışlar başlamakta ancak yine de en sağdaki küçük engelin aşılmasında sorun olmamaktadır.

Çizelge 4.1: CR şablon yöntemi ve referans çerçevesi bulunmayan dizilimlerin Şekil 4.14'deki sade tünelde başarımı

Ortamlar	Başarım Kriterleri	B1 (6 erkin)	B2 (10 erkin)	B3 (15 erkin)	B4 (20 erkin)
Kısa Tünel	Çarpışma	1	3	3	7
	Yön değişimi	1	2	4	9
	Hapsolma	0	0	0	1
Hareketli engel	Çarpışma	1	4	4	10
	Yön değişimi	2	0	3	7
	Hapsolma	0	0	0	0

İlk iki benzetimde başarımlar ölçütlerine uyma oranları Çizelge 4.1'de özetlenmiştir. Bu listeden çarpışma, yön değiştirme ve görev dışı kalma oranlarında TMR sayısındaki artışla paralel bir artım gözlemlenebilir. CR şablon ve sanal lider tabanlı bu yaklaşımlarda 10 – 15 arasında robotun seferinin daha mantıklı olduğu sonucuna varılabilir. Dolayısıyla sonraki simülasyonlarda 15 TMR kullanılacaktır.

Tek başına şablonlu sınırlama ve sanal lider yaklaşımı fazla sayıda robot ya da çok karmaşık topolojili ortamlarda yeterli başarımlar sağlayamadığından, sonraki simülasyonlarda (iç referans çerçevesi yardımı ile TMR'lar arasında yeterli güvenlik bölgesinin sağlanması prensibini de bulunduran) MDRRF formasyonlarının kullanımı uygun görülmüştür. Yaklaşımın başarımı Şekil 4.14'deki karmaşık tünel ortamında CR-şablon ve LS-eğrileri ile sınırlı dizilimlerin rota planlanması ile denenmiştir. Dolayısıyla Şekil 4.15'deki dizilim, CR-şablonlu bir MDRRF formasyonudur. Bu benzetimde MDRRF formasyonsuz simülasyonlara göre daha zorlu bir ortam bulunmasına karşın hem erkinlerin formasyon dışına çıkmaları engellenmiş hem de içerde aralarında yeterli güvenlik mesafesinin korunması amaçlanmıştır. Şekil 4.15'den bu yaklaşımın, referans çerçevesiz önceki yaklaşıma göre daha etkin olduğu gözlemlenmektedir. Önceki simülasyonlara göre çok daha karmaşık olan ortama karşın kolektif davranışta önemli ilerlemeler meydana gelmiştir. Ayrıca Çizelge 4.2'den, CR şablonlu bu örnekte çarpışma ve yön değiştirme sayılarının da referans çerçeveli durumda, önceki referans çerçevesiz duruma göre son derece azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla MDRRF formasyonları ayırık dış sınırlama sağlayan CR şablonlarıyla bile önemli başarımlar sağlanabilir.

Sürü davranışını olumsuz etkileyen çok önemli bir faktör de TMR'ların sürü sınırlarını aşmalarıdır (Bkz. Şekiller 4.15(e), 4.15(f)). Bu durum ayırık

Çizelge 4.2: CR şablon, LS tabanlı MDRRF yöntemin karmaşık tüneldeki başarımı

CR şablon yöntemi	(RF yok)	(RF)
Çarpışma	15	5
Yön değişimi	11	7
Hapsolma	0	0
LS-eğrisi yöntemi	(RF yok)	(RF)
Çarpışma	-	0
Yön değişimi	-	2
Hapsolma	-	0

potansiyellerle sınırlamanın, özellikle karmaşık engelli ortamlarda etkinliğinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, [Sahin and Zergeroglu, 2007a]’daki durumun aksine δ_t ve Δ_t geçiş periyodu süreleri daha kısa tutulduğundan, (özellikle tünel virajları sırasında) sürüden ayrılan TMR’ların görev dışı kalma oranları artabilir. Daha gerçekçi bir sürü davranışı için robotların sınırlar içinde tutulmaları önemlidir. Bu nedenle son iki benzetimde, 1 boyutlu en küçük kareler yöntemiyle formasyonun merkez hattının her iki tarafındaki 5 sensöre kapalı eğriler uydurularak robotların güzergah sırasında sürekli bariyerlerle sınırlandırılması amaçlanmıştır.

İlk benzetim Şekil 4.16’da olup bu ortam Şekil 4.15’deki karmaşık tünelle aynı yapıdadır. Ancak bu simülasyonda ajanlar daha kolektif rotalama sağlamakta ve sürü sınırlarını ihlal etmemektedir. Ayrıca Çizelge 4.2’den çarpışma sayısının sıfıra, yön değiştiren TMR sayısının 2 gibi düşük rakamlara indiği gözlemlenebilir.

[Sahin and Zergeroglu, 2007a]’daki planlayıcının iki problemi söz konusudur. (i) tünel iç çeperlerinin artışına bağlı olarak başarımda azalış trendi söz konusu olur; ve (ii) U-engeller ya da koridorları bulunan tünellerde sınırlı algılama alanlı erkinler hapsolurlar. Şekil 4.16’da benzetim ortamı, [Sahin and Zergeroglu, 2007a]’daki ortama yakın görünmesine karşın daha geniş bir iç çeperi vardır. Bu durumda MDRRF yaklaşımı yerine, yine serbest referans çerçevesi (FRF) uyuglanırsa, Şekil 4.18’deki gibi TMR’lerin çoğunluğu tünelde kalmaktadır. Yeni mobil dizilimin avantajı Şekiller 4.18 ile 4.16’nın karşılaştırılmasından görülebilir. Bu bakımdan MDRRF metodu, genellikle (çok dar olmayan tünel ortamları dışında) [Sahin and Zergeroglu, 2007a]’da önerilen FRF yöntemine göre avantajlıdır.

MRRRF yaklaşımı daha gerçeğe yakın sürü davranışı ve TMR'ların ayrı ayrı algılama alanlarından daha yüksek menzilli algılama yeteneği sonucunda, ölü koridorlar bulunan tünellerde de rotalama başarımını artırabilir. Buna bir örnek Şekil 4.17'deki benzetimdir. Burada tünelde robotların ayrı ilerlemeleri durumunda hapsolmalarına neden olacak büyüklükte bir tünelin sürünün daha geniş algılama alanı sonucunda problemsiz geçilmesi gösterilmektedir. Bu durumda geri dönen, çarpışan ya da hapsolan ajan söz konusu olmamıştır (Bkz. Çizelge 4.1).

Şekiller 4.18 ve 4.19'de ise MDRRF sisteminin başarılı olduğu önceki 2 simülasyonda, FRF formasyonu ile ilerlemeye çalışan ajan grubunun uğradığı başarısız rota planlaması görülmektedir. İlk simülasyon, önceki bölümde Şekil 4.17'da MDRRF ve LS yönteminin başarıyla aştıkları tünelde, FRF formasyonunun daha geniş iç çeper nedeniyle şablon parametrelerinde artışa karşın düşük başarımlı göstermesi üzerinedir (bkz. Şekil 4.18). Yine MDRRF formasyonunun yüksek başarımlı sağladığı Şekil 4.19 ortamında ise FRF ile ilerleyen robotların geçişi olmayan koridorda hapsolmaları görülmektedir. Bu sonuçlardan MDRRF dizilimlerinin nispeten geniş ya da içinde U-bloklar bulunan tüneller gibi ortamlarda RRF metoduna göre daha yüksek başarımlı göstereceği düşünülebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tezin 2. konusunda tekerlerkli mobil robotların yoğun engelli ortamlarda rotdalanması için sade ve etkin bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntem çift eksenli bir referans robotun ön eksen merkezine amaç konum yönünde sanal bir sürme kuvvetinin uygulanmasından ibarettir. Engelle karşılaşılması durumunda az sayıda VAR/YOK sensörünün sağladığı bilgilerle haritalama yapılmaksızın engellerden sakınma gerçekleştirilmiştir. İki kip arasında geçişler ise birinci dereceden bir şablon periyodu ile sağlanır. Detaylı benzetimlerle yöntemin sensör sayısına duyarlılığı ve farklı geometride engellerden sakınması konusunda yeterliliği gösterilmiştir.

TMRların önemli bir uygulama alanı sürü robotiği ve ilgili koordineli görevlerdir. Tezin 3. ve 4. konularında ise geliştirilen düşük maliyetli tekli robot güzergah planlayıcısı sade dizilim yöntemleriyle entegre edilerek kolektif robot planlaması amaçlanmıştır. İkinci konuda sade sabit referans çerçevesi dizilim yaklaşımı benimsenmiş ve bu yaklaşımla tüneller ve U-bloklar bulunduran bölgeler gibi birçok engel açısından yoğun ortamlarda göreceli olarak fazla sayıda oğul robot içeren sürülerin güzergah planlaması gerçekleştirilmiştir. Yöntemin sade VAR/YOK algılayıcıları, mikro-denetleyiciler gibi düşük maliyetli ve yüksek enerji gerektirmeyen donanımlarla çalışabilme ve planlama için haberleşme gerektirmeme gibi avantajları bulunmaktadır. Önerilen yöntemin özellikleri ve etkinliği benzetimlerle gösterilmiştir. Yöntemin zayıf kaldığı ortamlar olan genişliği aşırı değişken ya da konkav tuzaklar içeren tüneller gibi yoğun engelli ortamlardır.

Yoğun engelli ortamlarda etkin sürü TMR planlaması için robotlar arasında hesaplama maliyetini artırmadan kolektivite sağlanması önemlidir. Tezin 4. konusunda bu amaçla hareketli referans çerçeveleri ve formasyon dış sınırlarından oluşan yeni bir yöntem önerilmiştir. Formasyon çerçevesi ve sınırları için dış robotlardan sağlanan bilgilerle oluşturulan bir sensör ağından elde edilen bilgilerden yararlanılmaktadır. Bu şekilde yüksek maliyetli donanımlar olmaksızın algılama alanı artırılmakta ve kolektif planlama iyileştirilmektedir.

Tezin sağladığı yenilikler ve avantajlar şöyledir: Geliştirilen planlama yöntemi düşük maliyetli donanımlarla engelli ortamlarda çarpışmasız planlama sağlanması üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu amaçla ikinci konuda geliştirilen tekli TMR planlayıcısı VAR/YOK sensorlariyle özellikle kapalı ortamlarda yeterli planlama sağlayabilir. Yöntem haritalama yapmadan engelden sakınma gerçekleştirdiği için sade donanımlarla çalışmaya uygundur. Ayrıca engelden sakınma mekanizmasının [Sahin and Zergeroglu, 2007b]'deki sanal engel mekanizmasıyla uyumlu çalışabilmesi de bir avantajdır. Planlayıcıya sanal engel konseptinin eklenmesi sınırlı bilgiye sahip olunan ortamlarda hibrid planlamanın sağladığı avantajları mevcut yöntemlere göre daha düşük maliyetli bir şekilde sağlayabilir. Tezin üçüncü ve dördüncü konularında sunulan sabit ve hareketli referans çerçeve yöntemleri, sürü robotların kolektif planlaması üzerine düşük hesaplama maliyetli yaklaşımlardır. Yöntemler sade algılama ile engelli ortamlarda rolanma gerçekleştirebilmektedirler. Yöntemlerle detaylı haritalama bilgisi gerektirmeden çeşitli bölgelerde nakliyat uygulamaları yapılabilir.

5.2. Tartışma ve Öneriler

Önerilen yöntemler konveks ve sık karşılaşılan konkav engelli ortamlarda yeterli planlama sağlamaktadırlar. Ancak birbirine çok yakın ve karmaşık engeller bulunan ortamlarda başarımları azalabilir. Bu zayıflığı ortadan kaldırmak için sonraki çalışmalarla ilgili ilk önerimiz formasyonların, daha yüksek seviyede şekillenme ve küçük gruplara ayrılma özelliklerini taşıyabilecek daha esnek yapılara ulaştırılmasıdır.

Önerilen yöntemlerin sade donanımlarla çalışmasının yanısıra, bir diğer avantajı sade yaklaşımı nedeniyle daha farklı sensörler ile planlama için uygun konuma getirilebilmeleridir. Önerilen 2 boyutlu planlayıcı, 3 boyutta kolektif rota planlama örneklerine de uyarlanabilir. 3 boyutlu planlayıcılar genelde düzlemsel ortamlarda hareket yapmadıkları ve konfigürasyon uzaylarında rüzgar ya da diğer akımlar gibi etkilere maruz kaldıklarından sistem kinematiklerine ek olarak dinamik modellerin de uygulanmasını gerektirirler. Bu gibi sistemlerde duruş değişkenleri için koterniyon temsilleri de daha geçerli olabilir. Ek olarak bu sistemlerde de hız kısıtlaması kriteri

3 boyutlu operasyon uzayında gereklidir. Böyle bir 3-boyutlu rota planlayıcısının uygulanabileceği iki sistem denizaltılar (su-altı cihazları) [Antonelli et al., 2001] ve yelkenkanatlardır (gliders) [Ogren and Leonard, 2003]. Ancak böyle sistemler etkin rota planlaması için denizaltı sonarları gibi daha geniş alanları tarayan sensörlerle donatılmıştır. Bu bakımdan doğrudan yöntemimizle kullanım için uygun olmayabilirler. Zaten önerdiğimiz yöntemin etkinliği, üçgenleştirme kullanan algoritmik olarak maliyetli haritalama yöntemleri yerine, az sayıda sensör ile çalışmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle sistemimizin 3-boyuta uyarlanabilmesi için hem tarayıcılar hem de kısa menzilli algılayıcıların avantajlarını mümkün olduğunca koruyabilecek karma bir yaklaşım önerilebilir. İki sensör bölgesinden oluşan bu yaklaşımın ilk bölgesi robota sade planlayıcımızın kullandığı elipsoit algılama bölgesine kadar olan engelleri tanıyıp bu planlayıcı gibi düşük algoritmik maliyetli planlama sağlayabilir. İkinci bölge ise tarayıcının tüm menzilini kapsar ve (örneğin sade düşük menzilli tarayıcının ön profilindeki sensörleri kapatacak büyüklükte konkav engelle karşılaşıldığında otomatik olarak manevralanma sağlama ile) U-engellere karşı etkin rotilanma; ya da (uzun menzilli açıklıkları denetleyerek) tünel açıklıklarını tespit ile VAR/YOK planlayıcılı sade algoritmanın önemli iki açığını da kapayabilir. Ayrıca ön sensör belirsizliği ayrık yerine sürekli algılama alanı uyarlanmasıyla hem 2 hem 3 boyutta aşılabılır. Bu karma yöntem ile hem tarayıcı ve mikroişlemci donanımlı kompleks 2-bouyutlu robotlar hem de denizaltılar ya da yelkenkanatlar gibi 3-boyutlu hız kısıtlamalı sistemler için rota planlaması gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla 3-boyutlu robotlarda da benzer şekilde sürekli algılama yerine nokta sensörlü hatta 2 aşamalı algılanmaya geçilerek düşük algoritmik maliyetli planlama gerçekleştirilebilir. 2-boyutlu en küçük kareler ya da CR-spline eğrilerinden yararlanılarak dış sınırlama yöntemleri ve sade referans çerçevesinin 3-boyuta kolay uyarlanabilmesi yöntemin bir diğer avantajı olabilir. Bu şekilde 2 ya da 3-boyutlu engeller içeren ortamlarda daha karmaşık donanımlı robotlar için mevcut yöntemlere göre düşük algoritmik maliyetli olmasına karşın yüksek başarılı rota sentezi sağlanabilir.

Diğer bir yaklaşım ise planlayıcının tarayıcılardan daha yüksek menzilli catadioptrik kameralarla [Marchand and Chaumette, 2007] çalışmaya uygun şekle getirilmesidir. Bu alanda yapılabilecek çalışmalar görsel geri besleme tabanlı denetim uygulamaları da içerecektir [Hutchinson et al., 1996; Malis, 2002; de Sousa and Kak,

2002]. Ancak bu yeni yaklaşımla çalışan sistemlerin, görüntü işleme algortimaları kullanması gerekli olduğundan mevcut sistemlerden daha gelişmiş donanıma gerek duyulması günümüzde bir dezavantajdır.

KAYNAKLAR

Alami, R., Fleury, S., Herbert, M., Ingrand, F., and Robert, F. (1998). Multi robot cooperation in the martha project. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 5(1):1575–1582.

Antonelli, G., Chiaverini, S., and Schiavon, R. (2001). Real-time path planning and obstacle avoidance for rais an autonomous underwater vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 26(2):216–227.

Arras, K., Philippsen, R., Tomatis, N., de Battista, M., Schilt, M., and Siegwart, R. (2003). A navigation framework for multiple mobile robots and its application at the expo.02 exhibition. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1992–1999.

Burgard, W., Moors, M., Stachniss, C., and Schneider, F. (2005). Coordinated multi-robot exploration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 21(3):376–386.

Caselli, S., Reggiani, M., and Sbravati, R. (2002). Parallel path planning with multiple evasion strategies. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 260–265.

Cervantes, A., Galvan, I., and Isasi, P. (2007). Building nearest prototype classifiers using a michigan approach pso. In *Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pages 135–140.

Chaimowicz, L., Michael, N., and Kumar, V. (2005). Controlling swarms of robots using interpolated implicit functions. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2487–2492.

Chen, J., Dixon, W., Dawson, D., and Galluzzo, T. (2005). Navigation and control of a wheeled mobile robot. In *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1145–1150.

Choset, H. (2001). Coverage for robotics a survey of recent results. *Annals*

Mathematics Artificial Intelligence, 31(2):113–126.

Choset, H., Lynch, K., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L., and Thrun, S. (2005). *Principles of Robot Motion – Theory, Algorithms and Implementations*. MIT Press, Cambridge MA., USA.

Dagli, C. (2004). Artificial life: How can it impact on engineering practices of the future? In *Advances in Information Systems*.

de Sousa, G. and Kak, A. (2002). Vision for mobile robot navigation: A survey. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 24(2):237–267.

Dixon, W., Dawson, D., Zergeroglu, E., and Zhang, F. (2000). Robust tracking and regulation control for mobile robots. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 10:199–216.

Dudek, G., Jenkin, M., Milios, E., and Wikes, D. (1993). A taxonomy for swarm robots. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 441–447.

Feddema, J., Lewis, C., and Schoenwald, D. (2002). Decentralized control of cooperative robotic vehicles: Theory and application. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(5):852–864.

Flake, G. (1999). *The Computational Beauty of Nature*. Cambridge. MIT Press, Cambridge MA., USA.

Fregene, K., Madhavan, R., and Kennedy, D. (2004). Coordinated motion of multiple terrain mapping of uavs. In *Proceedings of the of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4210–4215.

Gazi, V. and Passino, K. (2003). Stability analysis of social foraging swarms. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 34(1):539–557.

Genevose, V., Magni, R., and Odetti, L. (1992). Self-organizing behavior and swarm intelligence in a pack of mobile miniature robots in search of pollutants. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1575–1582.

Hsieh, M. and Kumar, V. (2003). Pattern generation with multiple robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2442–2447.

Hutchinson, S., Hager, G., and Corke, P. (1996). A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 12(5):651–670.

Jacobs, P. and Canny, J. (1989). Planning smooth paths for mobile robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2–7.

Kalantar, S. and Zimmer, U. (2006). A formation control approach to adaptation of contour-shaped robotic formations. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1490–1497.

Krishnamurthy, P. and Khorrami, F. (2005). Godzilla: A low-resource algorithm for path planning in unknown environments. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 110–115.

Laumond, J., Jacobs, P., M.Taix, and Murray, R. (1994). A motion planner for nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10(5):577–593.

Lien, J., Bayazit, O., Sowell, R., Rodriguez, S., and Amoto, N. (2004). Shepherd behaviors. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4159–4165.

Malis, E. (2002). Survey of vision-based robot control. In *European Naval Ship Design, Captain Computer IV Forum*, ENSIETA, Brest, France.

Marchand, E. and Chaumette, F. (2007). Fitting 3d models on central catadioptric images. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 52–57.

M'Closkey, R. and Murray, R. (1997). Exponential stabilization of driftless nonlinear control systems using homogeneous feedbacks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(5):614–628.

Minguez, J. and Montano, L. (2004). Nearness diagram (nd) navigation:

collision avoidance in troublesome scenarios. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(1):45–59.

Miyata, N., Ota, J., Arai, T., and Asama, H. (2002). Cooperative transport by multiple robots in unknown static environments associated with real-time task assignment. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(5):769–780.

Murray, R. and Sastry, S. (1993). Nonholonomic motion planning: Steering sinusoids. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(5):700–716.

Ogren, P., Fiorelli, E., and Leonard, N. (2002). Formations with a mission : Stable coordination of vehicle group maneuvers. In *Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, pages 1–15.

Ogren, P. and Leonard, N. (2003). Obstacle avoidance in formation. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 216–227.

O’Kane, J. and LaValle, S. (2006). On comparing the power of mobile robots. In *Robotics: Science and Systems*.

Pathak, K. and Aggrawal, S. (2004). Planning and control of a nonholonomic unicycle using ring shaped local potential fields. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 2368–2373.

Penders, J. (1998). Robot swarming applications. *Springer Lecture Notes in Computer and Information Sciences*, 229:227–234.

Reynolds, C. (2000). Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. *Computer Graphics*, 21:25–34.

Rimon, E. and Koditschek, D. (1992). Exact robot navigation using artificial potential function. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(5):501–518.

Sahin, T. and Zergeroglu, E. (2007a). A computationally efficient path planner for wheeled mobile robots with limited sensing zones. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1074–1079.

Sahin, T. and Zergeroglu, E. (2007b). Computationally efficient path planning

for wheeled mobile robots in obstacle cluttered environments. *Robot Motion and Control, Springer Verlag*, 360:259–267.

Sahin, T. and Zengeroglu, E. (2008). Mobile dynamically reformable reference frame formations for efficient flocking behavior in complex environments. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

Secrest, B. R. and Lamont, G. B. (2003). Visualizing particle swarm optimization – gaussian particle swarm optimization. In *Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pages 198–204.

Sepulchre, R., Paley, D., and Leonard, N. (2005). Graph laplacian and lyapunov design of collective planar motions. In *International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA)*.

Shkel, A. and Lumelsky, V. (2000). On optimal nonholonomic paths in limited space. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1728–1733.

Tang, C., Bhatt, R., and Krovi, V. (2004). Decentralized kinematic control of payload transport by a system of mobile manipulators. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2462–2467.

Tanner, H. and Kyriakopoulos, K. (2000). Nonholonomic motion planning for mobile manipulators. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1233–1238.

Tasdizen, T., Tarel, J., and Cooper, D. (2000). Improving the stability of algebraic curves for applications. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9(3):405–416.

Tovar, B., Yershova, A., O’Kane, J., and LaValle, S. (2005). Information spaces for mobile robots. In *International Workshop on Robot Motion and Control RoMoCo 05*, pages 11–20.

Varadhan, G., Krishnan, S., Zhang, L., and Manocha, D. (2006). Reliable implicit surface polygonization using visibility mapping. In *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, pages 211–221.

Watson, N., John, N., and Crowther, W. (2003). Simulation of unmanned air vehicle flocking. In *Proceedings of the Theory and Practice of Computer Graphics*, pages 130–137.

Zhang, F., Fratantoni, D., Paley, D., Lund, J., and Leonard, N. (2007). Control of coordinated patterns for ocean sampling. *International Journal of Control*, 80(7):1186–1199.

ÖZGEÇMİŞ

Hüsnü Türker Şahin 25 Nisan 1974'te İstanbul'da doğdu. İlkokulu Kartaltepe İlköğretim Okulunda, ortaokul ve lise öğrenimini Kadıköy Anadolu Lisesinde tamamladı. Lisans derecesini Londra Üniversitesi'nde (University College London) Elektronik ve Optoelektronik Mühendisliği üzerine yaptı. Yüksek lisansını Imperial College'de Kontrol Sistemleri Dalında tamamladı. Halen Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde araştırma görevlisi olarak çalışmakta olup, non-lineer kontrol sistemleri, görsel geri beslemeli kontrol, tekerlekli mobil robotların rota planlaması ilgi duyduğu alanlar arasındadır.