

Birden Fazla Gezgin Robotla Nesne Taşıma İçin Hareket Planlama ve Kontrol

Alpaslan Yufka

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2010

Motion Planning and Control Scheme for Cooperative Transportation by Multiple  
Mobile Robots

Alpaslan Yufka

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Electrical-Electronics Engineering

June 2010

# Birden Fazla Gezgin Robotla Nesne Taşıma İçin Hareket Planlama ve Kontrol

Alpaslan Yufka

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Kontrol-Kumanda Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Metin Özkan

Haziran 2010

## ONAY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Alpaslan Yufka'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Birden Fazla Gezgin Robotla Nesne Taşıma İçin Hareket Planlama ve Kontrol” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç. Dr. Metin ÖZKAN

**İkinci Danışman** : -

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Metin ÖZKAN (Danışman)

**Üye** : Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

**Üye** : Doç. Dr. Osman PARLAKTUNA

**Üye** : Doç. Dr. Aydın AYBAR

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YAZICI

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

## **TEZ KONUSU**

Birden Fazla Gezgin Robotla Nesne Taşıma İçin Hareket Planlama ve Kontrol

## **ADI SOYADI**

Alpaslan Yufka

## **ÖZET**

Bu çalışmada, holonomik olmayan bir grup otonom robotun tek bir nesneyi işbirlikli olarak taşıyabilmesi için hareket planlama ve kontrol yaklaşımı önerilmiştir. İşbirlikli taşıma sistemi için sanal lider-takipçi formasyon kontrolü yöntemi kullanılmıştır. Taşınan nesne, işbirlikli taşıma sisteminin sanal lider robotu olarak düşünülmüş ve nesneyi taşıyan robotlarda takipçi robotlar olarak ele alınmıştır. Kinematik kısıtlar göz önünde bulundurularak sanal robotun izleyeceği bir yörünge planlanmış ve nesnenin ağırlık merkezi noktasına yerleştirilen koordinat sisteminin merkezinin yörüngeyi takip etmesi sağlanmıştır. Her bir takipçi robotun yörüngesi formasyon yapısını koruyacak şekilde planlanarak, robotların kendi yörüngelerini izlemeleri sağlanmıştır. Takipçi robotların başlangıçta eşzamanlama yapabilmesi için bir iletim birimi kullanılmış ve yaratılan yörüngeleri izleyebilmek için asimptotik kararlı yörünge izleme denetleyicisi kullanılmıştır. Önerilen yöntem, Pioneer P3-DX gezgin robotlar kullanarak gerçek dünya uygulamaları ve benzetimlerle doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İşbirlikli taşıma, hareket planlama, yörünge izleme kontrolü, formasyon, çok robotlu gruplar.

**THESIS TITLE**

Motion Planning and Control Scheme for Cooperative Transportation by Multiple  
Mobile Robots

**NAME LASTNAME**

Alpaslan Yufka

**SUMMARY**

In this study, motion planning and control scheme for a cooperative transportation system, which consists of a single object and multiple autonomous non-holonomic mobile robots, is proposed. Virtual leader-follower formation control strategy is used for the cooperative transportation system. The object is assumed as the virtual leader of the system and the robots carrying the object are considered as follower robots. A smooth path is generated by considering the constraints of the virtual robot. The origin of the coordinate system attached to the center of gravity of the object tracks the generated path. A path for each follower robot is generated to keep the formation structure. The follower robots track their paths. A communication framework is used for the messaging between robots, and asymptotically stable tracking control is used for trajectory tracking. The proposed method is verified with real applications and simulations using Pioneer P3-DX mobile robots and a single object.

Keywords : Cooperative transportation, motion planning, tracking control, formation, multi-robot groups.

## TEŞEKKÜR

Gerek yüksek lisans çalışmalarında, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Dr. Metin Özkan'a teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans dönemimde her zaman yanımda olan, danışmalığı esirgemeyen, bana inanan ve beni destekleyen değerli hocam Dr. Osman Parlaktuna'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans döneminde gerek derslerimde, gerek TÜBİTAK projesinde, gerekse akademik çalışmalar da destek olan Dr. Ahmet Yazıcı'ya teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, beni her zaman manevi ve maddi yönden destekleyen biricik sevgilim Burcu Alpay'a teşekkür ederim.

Tüm yaşamım boyunca bana yürekten inanan ve destekleyen canım ailem Nebahat Yufka, Mustafa Yufka ve Muhittin Yufka'ya teşekkür ederim. Bana canı gönülden inanan ve destekleyen dayım Alb. Kadri Saygı'ya minnettarım.

Saat 4'de sütlü çay desteğini esirgemeyen ve tez çalışmalarında beni motive eden canım arkadaşım Zuher Kazancı'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım döneminde görüş ve düşüncelerini paylaşan Yapay Zekâ ve Robotik Araştırma Laboratuvarı ekip arkadaşlarım Gökhan Kirlik, Burak Kaleci ve Nevin Canik'e teşekkür ederim.

Tez jürimde yer alan değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında emeği geçen diğer arkadaşlarım ve hocalarıma teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖZET .....</b>	<b>v</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>xiv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....</b>	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Problemin Tanımı .....	2
1.2. Önerilen Yaklaşım .....	3
1.3. Amaçlar .....	4
1.4. Kapsam .....	4
1.5. Katkıları .....	5
1.6. Tezin Ana Hatları .....	5
<b>2. LİTERATÜRATÜR ÖZETİ .....</b>	<b>6</b>
2.1. İşbirlikli Nesne Taşıma Yöntemleri .....	6
2.2. Yörünge İzleme Yöntemleri .....	12
2.2.1. Kinematik denetleme .....	12
2.2.2. Dinamik denetleme .....	13
2.2.3. Akıllı denetleme .....	14
2.2.4. Uyarlanabilir denetleme .....	15
2.2.5. Geri adım yöntemi ile denetleme .....	16
2.3. Yörünge Oluşturma Metotları .....	16
<b>3. İŞBİRLİKLİ TAŞIMA SİSTEMİ .....</b>	<b>19</b>
3.1. Literatürde Uygulanmış Lider-Takipçi Tipi Nesne Taşıma Yöntemleri .....	19
3.2. Önerilen İşbirlikli Nesne Taşıma Yöntemi .....	24



## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

<b>4. HAREKET PLANLAMA .....</b>	<b>28</b>
4.1. Robot Kinematik Modeli.....	28
4.2. Yörünge Oluşturma.....	30
4.3. Yörüngeyi Ayrıklaştırması.....	34
4.4. Takipçi Robotların Sahip Olduğu Kısıtlar.....	38
<b>5. TAKİPÇİ ROBOTLARIN FORMASYON KONTROLÜ .....</b>	<b>41</b>
5.1. Yörünge İzleme Denetleyicisinin Yapısı.....	41
5.2. Hata Dönüşümü.....	42
5.3. Hız (Direksiyon) Denetlemesi.....	45
5.4. Lyapunov Kararlılık Analizi .....	48
5.5. Routh–Hurwitz Kararlılık Ölçütü Analizi.....	51
5.6. $K_x$ , $K_y$ ve $K_\theta$ Kazanç Parametrelerinin Belirlenmesi.....	55
5.7. Hız Sınırlandırıcısı .....	60
5.8. Hareket Girdisinin Robota Uygulanması .....	60
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE UYGULAMALAR.....</b>	<b>62</b>
6.1. Uygulama Alt Yapısı.....	63
6.1.1. MobileSim benzetim yazılımı.....	63
6.1.2. MATLAB yazılımı .....	63
6.1.3. Gezin robotların donanımsal özellikleri .....	64
6.1.4. Uygulama ortamının özellikleri.....	65
6.2. Deneyler ve Sonuçlar .....	66
6.2.1. Benzetim ortamında iki robotlu dikey nesne taşıma.....	68
6.2.2. Benzetim ortamında iki robotlu paralel nesne taşıma.....	70
6.2.3. Benzetim ortamında üç robotlu nesne taşıma .....	73
6.2.4. Benzetim ortamında dört robotlu nesne taşıma .....	75
6.2.5. Gerçek ortamda iki robotlu dikey nesne taşıma.....	78
6.2.6. Gerçek ortamda iki robotlu paralel nesne taşıma.....	81
6.2.7. Gerçek ortamda iki robotlu çatal kaldıraçla paralel nesne taşıma.....	84
6.2.8. Gerçek ortamda iki robotlu çatal kaldıraçla dikey nesne taşıma.....	87

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİ.....</b>	<b>90</b>
<b>8. KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>91</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3. 1 Xin Yang ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi.....	20
3. 2 Xin Chen ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi .....	20
3. 3 M. Hashimoto ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi .....	21
3. 4 Xin Chen ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi .....	22
3. 5 Fujii ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi .....	23
3. 6 Kato ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi.....	24
3. 7 Sanal lider, takipçiler ve robotların merkez noktaları üzerindeki taşınan nesne .....	25
3. 8 Sanal lider, takipçiler ve robotların çatal kaldıraçları üzerinde taşınan nesne.....	26
4. 1 Pioneer P3-DX gezgin robot.....	28
4. 2 Gezgin robotun kinematik parametreleri .....	29
4. 3 Yol planı içerisindeki kritik düğüm noktaları.....	30
4. 4 Kritik düğüm noktalarının kullanılarak yolun eğrileştirilmesi .....	31
4. 5 ICC merkezli ve R yarıçaplı eğri yol .....	32
4. 6 Simetrik düzgün eğri yol.....	33
4. 7 Robotun konum tahmin modeli .....	35
5. 1 Yörünge izleme denetleyicisinin blok şeması .....	42
5. 2 Gerçek ve referans robotların sahip olduğu konum, yönelim ve hata elemanları ...	43
5. 3 Denetleme kuralının yapısı .....	46
5. 4 doğrusal hıza bağımlı $\omega_n$ fonksiyonu.....	59
6. 1 örnek bir MobileSim benzetim ortamı görüntüsü.....	63
6. 2 örnek bir MATLAB benzetim ortamı görüntüsü.....	64
6. 3 Pioneer P3-DX diferansiyel sürürlü holonomik olmayan ve çatal kaldıraca sahip gezgin robot .....	66
6. 4 Mapper3 ile oluşturulan benzetim ortamı haritası .....	66
6. 5 Gerçek dünya uygulaması ortamı .....	66
6. 6 a) Benzetim ortamı için referans yörünge, b) Gerçek dünya uygulaması için .....	67
referans yörünge .....	67

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6. 7 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için benzetimden film kareleri .....	68
6. 8 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için nesnenin izleme hataları (mm)...	69
6. 9 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağlı açıları (derece) .....	68
6. 10 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn) .....	70
6. 11 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için benzetimden film kareleri .....	71
6. 12 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için nesnenin izleme hataları (mm)	71
6. 13 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağlı açıları (derece) .....	71
6. 14 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn) .....	72
6. 15 Benzetim ortamında yapılan iki takipçi robot için benzetimden film kareleri .....	73
6. 16 Benzetim ortamında yapılan iki takipçi robot için nesnenin izleme hataları (mm)	74
6. 17 Benzetim ortamında yapılan iki takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağlı açıları (derece) .....	74
6. 18 Benzetim ortamında yapılan iki takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn) .....	75
6. 19 Benzetim ortamında yapılan 4 takipçi robot için benzetimden film kareleri .....	76
6. 20 Benzetim ortamında yapılan 4 takipçi robot için nesnenin izleme hataları (mm).	76
6. 21 Benzetim ortamında yapılan 4 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağlı açıları (derece) .....	76
6. 22 Benzetim ortamında yapılan 4 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn) .....	77
6. 23 Gerçek dünya uygulamasında taşınan nesne .....	78
6. 24 Taşıma mekanizması için T şeklinde ucunda iğne bulunan bir yatağın a) şematik gösterimi, b) gerçek dünya gösterimi .....	78
6. 25 2 takipçi robot için yapılan gerçek dünya uygulamasından film kareleri .....	79
6. 26 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi için nesnenin izleme hataları (mm)...	79
6. 27 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağlı açıları (derece) .....	79

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6. 28 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn) ..	79
6. 29 2 takipçi robot için yapılan gerçek dünya uygulamasından film kareleri.....	79
6. 30 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi için nesnenin izleme hataları (mm)...	79
6. 31 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağlı açıları (derece) .....	79
6. 32 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn) ..	79
6. 33 Çatal kaldıraçlara sahip Pioneer P3-DX diferansiyel sürürlü gezgin robotu.....	84
6. 34 2 takipçi robot için yapılan gerçek dünya uygulamasından film kareleri.....	85
6. 35 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi için nesnenin izleme hataları (mm)...	85
6. 36 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağlı açıları (derece) .....	85
6. 37 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn) .....	86
6. 38 2 takipçi robot için yapılan gerçek dünya uygulamasından film kareleri.....	87
6. 39 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi için nesnenin izleme hataları (mm)...	87
6. 40 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağlı açıları (derece) .....	87
6. 41 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn) ..	87

**ÇİZELGELER DİZİNİ****Çizelge****Sayfa**

5. 1 Asimptotik Kararlı Yörünge İzleme Denetleyicisi için Routh–Hurwitz tablosu..... 55

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
G	Taşıyacak olan nesnenin ağırlık merkezi.
$(x_{SL}, y_{SL})$	Sanal lider robot'un konumu, merkez noktası.
$\theta_{VL}$	Sanal lider robot' un yönelimi.
$v_{SL}$	Sanal lider robot' un doğrusal hızı.
$\omega_{SL}$	Sanal lider robot' un açısal hızı.
$[x_{SL}, y_{SL}, \theta_{SL}]^t$	Sanal lider robot' un referans konum ve yönelim vektörü.
$[v_{SL}, \omega_{SL}]^t$	Sanal lider robot' un referans hız vektörü.
$T_i, i=1,2,\dots,n$	Nesneyi taşıyan $i$ indisli takipçi robot.
SL	Sanal Lider.
$(x_{Ti}, y_{Ti})$	$i$ indisli takipçi robot'un konumu.
$\theta_{Ti}$	$i$ indisli takipçi robot'un yönelimi.
$d_i$	$i$ indisli takipçi robot' un sanal lidere olan Öklid uzaklığı.
$\alpha_{Ti} (i=1,2,\dots)$	$i$ indisli takipçi robot' un sanal liderle yaptığı açı.
$[x_{Ti}, y_{Ti}, \theta_{Ti}]^t$	$i$ indisli takipçi robot' un referans konum ve yönelim vektörü.
$[v_{Ti}, \omega_{Ti}]^t$	$i$ indisli takipçi robot' un referans hız vektörü.
D	Gezgin robot'un sol ve sağ tekerleri arasındaki uzaklık.
r	Gezgin robot'un bir tekerinin yarıçap uzunluğu.
$v_x$	Gezgin robot'un x eksenine yönündeki hızı.
$v_y$	Gezgin robot'un y eksenine yönündeki hızı.
$v_T$	Gezgin robot'un doğrusal hareket değişkeni.
$v_R$	Gezgin robot'un sağ teker hızı.
$v_L$	Gezgin robot'un sol teker hızı.
$\omega$	Açısal hızı.
$\Delta\theta$	$P_{RS}$ yönelimi ile $Q_{RF}$ yönelimi arasında oluşan fark.
$[x_R, y_R, \theta_R]^t$	Gezgin robot'un konum vektörü.

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$[\upsilon_X, \upsilon_Y, \omega]^t$	Gezgin robot'un hız vektörü.
$ICC(ICC_x, ICC_y)$	Gezgin robot'un anlık dönme merkezi.
R	Gezgin robot tarafından takip edilen düzgün eğri yolun yarıçapı.
$P_S=[X_S, Y_S, \theta_S]^t$	Gezgin robot'un dönmeyi beklediği başlangıç noktası.
$P_{RS}=[X_{RS}, Y_{RS}, \theta_{RS}]^t$	Gezgin robot'un dönmeye başladığı nokta.
$Q_{RF}=[X_{RF}, Y_{RF}, \theta_{RF}]^t$	Gezgin robot'un dönme işlemini bitirdiği nokta.
$Q_F=[X_F, Y_F, \theta_F]^t$	Gezgin robot'un eğri yörüngeyi izlemesini tamamen bitirdiği nokta.
Düğüm <sub>i,j,k</sub>	i., j., k. Düğüm noktaları
$L_1$	Düzgün eğri yolun sapmasını belirleyen uzunluk
$L_2$	$P_{RS}$ ve Düğüm <sub>j</sub> ya da $Q_{RF}$ ve Düğüm <sub>j</sub> arasındaki Öklid uzaklığı.
$L_3$	Düzgün eğri yörünge ile ilişkili olan uzunluk.
$L_4$	$Q_{RF}$ ve $Q_F$ ya da $P_S$ ve $P_{RS}$ noktaları arasındaki Öklid uzaklığı.
L	$P_S$ ve Düğüm <sub>j</sub> ya da $Q_F$ ve Düğüm <sub>j</sub> arasındaki Öklid uzaklığı.
$\phi$	Gezgin robot'un yol aldığı düzgün eğri yolun yay açısı.
d	Gezgin robot'un $\phi$ dönüş açısı ile aldığı toplam yol uzunluğu.
$t_s$	Örnekleme zamanı.
$\theta_{istenen}$	Takipçinin sanal liderle yaptığı kullanıcı tarafından istenen bağlı açı.
$p_r=[x_r, y_r, \theta_r]^t$	Gezgin robot için referans konum ve yönelim girdisi.
$q_r=[\upsilon_r, \omega_r]^t$	Gezgin robot için referans hız girdisi.
$p_s=[x_s, y_s, \theta_s]^t$	Gezgin robot'un şu an ki konum ve yönelim çıktısı.
$q_s=[\upsilon_s, \omega_s]^t$	Gezgin robot'un şu an ki hız çıktısı.
$p_h=[x_h, y_h, \theta_h]^t$	Referans ve gerçek bilgilerin farkından elde edilen hata vektörü.
$T_e$	Hata vektörünün dönüşüm matrisi.
$e=[x_e, y_e, \theta_e]^t$	Gezgin robot'un yerel eksenine dönüştürülen yeni hata vektörü.



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
$\dot{e} = [\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e]^t$	Dönüştürülmüş hata vektörünün türevi.
A	İleri besleme kısmı için tanımlanan bir matris.
$u_{ib} = [v_{ib}, \omega_{ib}]^t$	İleri besleme hareket çıktısı.
K	Kazanç matrisi.
$K_x, K_y$ ve $K_\theta$	Kazanç parametreleri.
B	Geri besleme kısmı için tanımlanan bir matris.
$u_{gb} = [v_{gb}, \omega_{gb}]^t$	Geri besleme hareket çıktısı.
$u = [v, \omega]^t$	Gezgin robot'a uygulanacak tek bir hareket vektörü.
V	Lyapunov fonksiyonu.
C	Doğrusallaştırabilmek için tanımlanan Jacobian matrisi.
$a_3, a_2, a_1$ ve $a_0$	$C(t)$ matrisinin karakteristik eşitliğinin katsayıları.
$\zeta$	Sönüm oranı.
$\omega_n$	Doğal frekans değeri.
$p_i, i=1,2,\dots,8$	$\omega_n$ fonksiyonun katsayıları.
$u' = [v', \omega']^t$	Robot'un kinematik modeline uygulanacak olan yeni hareket vektörü.

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Gezgin robotlar, insan hayatını tehlikeye sokabilecek ya da insanların ulaşamayacağı yerlerde kullanılabilirler. Bugün bomba tespiti ve imhasında, zararlı tıbbi, nükleer, zehirli, kimyasal atıkların toplanması ve temizlenmesinde, insanların giremeyeceği dar geçitlerin ve boruların içerisine girilmesinde, doğal afetlerde keşif ve kurtarma işlemlerinde gezgin robotlar kullanılmaktadırlar (Woo et al., 2003; Carpin et al., 2006). Hizmet sektöründe camların ve yerlerin temizlenmesinde, ileri teknoloji barındıran hastanelerde hastalara ilaç ve su taşınmasında robotlar kullanılmaktadırlar (Prassler et al., 2000; Katevas , 2001). Endüstride bir parçanın tamiri, birleştirilmesi, bir yükün kaldırılıp istenen bir yere taşınması, ağır sanayide çok ağır yüklerin kaldırılıp taşınması, araba boyama, cilalama ve montaj işlerine bakıldığında yine robotik teknolojisi ön plana çıkmaktadır (Sandler, 1999). Tarımsal yönden tohumların ekilmesi, tarlanın sürülmesi, ürünlerin ilaçlanmasında da robotik teknoloji yerini almıştır (Blackmore et al., 2004). Madencilik alanında yer altı maden yollarının haritalanması için robotlar kullanılmaktadır (Baker et al., 2004). Askeri alanda muharebe robotları ve kentsel mahaller içerisinde askeri hareketleri düzenlemekte robot teknolojisi kullanılmaktadır (Carlson ve Murphy, 2003).

Görüldüğü gibi otonom gezgin robotlar birçok alanda taşıma görevleri içerisinde kullanılmaktadırlar. Hafif ve ufak çaplı nesnenin taşınabilmesi için bir adet gezgin robota ihtiyaç duyulurken, ağır ve büyük çaplı nesnenin taşınabilmesi birden fazla otonom robota ve işbirlikli bir taşıma sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu düşünce insanlarda da aynı şekildedir. Ağır, büyük ve bir insanın taşıyamayacağı bir nesne taşınmak istendiğinde, yükü her bir kişiye dağıtmak için başka kişilerle işbirliği yapma ihtiyacı doğmaktadır. Böyle bir işbirliği, birden fazla robotun taşıma görevleri içerisinde kullanılması düşüncesini doğal olarak gezgin robotlara da genişletilebilmektedir (Chen et al., 2006). Bu durumda işbirlikli bir robotik sistemi oluşmaktadır. İşbirlikli robotların hedefi, bir grup robotun kendilerine verilen bir görevi birlikte yerine getirmeye

çalışması olarak tanımlanabilir ve bunları yerine getirirken tek robota oranla sistemin toplam faydası içerisinde bir artış olmaktadır (Yang et al., 2004).

Çok robotlu otonom gezgin robot sisteminin kontrolü merkezi ve dağıtık olmak üzere iki tipte incelenebilmektedir. Merkezi kontrol yaklaşımında, merkezi birimde meydana gelecek herhangi bir hatada sistemin çalışması durmakta ve yapılan iş yarıda kalmaktadır. Dağıtık kontrol yaklaşımında ise sistemin işleyişi tek bir birime bağlı değildir ve robotlar birbirlerinden bağımsız olarak karar verebilmektedir. Takım içerisinde bir robot işleyişini yitirse bile diğerleri işlerine devam edebilmektedirler. Dağıtık kontrol merkezi kontrole göre daha gürbüz ve ölçeklenebilirdir. Bu kontrol sistemi, işbirlikli taşıma sistemleri ve formasyon kontrolü gibi işbirlikli görevlere uygulanabilmektedir (Udomkun et al., 2008). Formasyon kontrolü uygulanırken lider-takipçi tipi bir kontrol algoritması kullanılmakta ve çok robotlu sistemlere uygulanabilen dağıtık kontrolü kolayca gerçekleştirilebilmektedir. Bu algoritma içerisinde lider robota istenilen bir yörünge ya da dışarıdan bir emir verilir ve takipçi robotların liderin yörüngesini tahmin etmesi ve lidere göre kendi yarattıkları yörüngeleri izlemesi sağlanmaktadır (Fujii et al., 2007). Bunlara ek olarak lider-takipçi tipi sistemlerde, nesnenin hareketi römorklu bir hareket gibi davranmayla kısıtlıdır (Humberstone et al., 2000).

### **1.1. Problemin Tanımı**

İlgilenilen problem, tek bir nesnenin bir robot tarafından taşınamayacağı durumlarda bu nesnenin iki veya daha fazla robottan oluşan bir robot grubu tarafından işbirlikli taşınmasıdır. Bu amaçla formasyon tabanlı bir hareket planlaması ve hareketin denetlenmesi için yöntem geliştirilmesidir.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında çoğu işbirlikli nesne taşıma yaklaşımında özel tasarlanmış aparatlara ve mekanizmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Yang et al., 2004)(Chen et al., 2006)(Hashimoto et al., 1995)(Kosuge ve Sato, 1999a)(Fujii et al, 2007)(Humberstone et al., 2000). Bununla beraber taşınacak olan

nesne çoğu zaman zemin üzerinde sürüklenerek ve ittirilerek taşınmaktadır (Zaerpoora et al.,2005; Wang et al., 2000; Fink et al., 2008; Wang ve Wu, 2006; Yamakita et al., 2003). Bu taşıma işlemi sırasında robotlar genellikle bir kuvvet dağılımına ihtiyaç duyulmaktadır (Tsuji ve Murakami, 2004; Wang et al., 2000; Kosuge et al., 1999b). Bunlara ek olarak bazı işbirlikli taşıma sistemleri içerisinde lider-takipçi tipi bir yaklaşım izlenmektedir (Yang et al., 2004; Chen et al., 2006; Hashimoto et al., 1995; Kosuge ve Sato, 1999a; Fujii et al, 2007). Ayrıca nesneyi taşıyacak olan robotlar, çoğu zaman her yöne serbestçe hareket edebilen (omni-directional) (Kato et al, 2001; Yamakita et al., 2003; Kosuge et al., 1999b) ya da araba tipi robotlar (Miyata et al., 1997; Yamaguchi ve Arai, 2009) olarak seçilmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmaların hiç birinde diferansiyel sürürlü holonomik olmayan gezgin robotlar çatal kaldırıcılarının üzerinde işbirlikli olarak bir taşıma yapmamışlardır. Nesnenin sanal lider ve nesneyi taşıyan robotların takipçi olarak düşünüldüğü sanal lider-takipçi tipi bir yaklaşım uygulanmamıştır.

## 1.2. Önerilen Yaklaşım

Bu çalışmada, işbirlikli taşıma sistemi için bir hareket planlama ve bir kontrol şeması yapılmıştır. Sistem holonomik olmayan birden fazla otonom robotu ve taşınacak olan bir nesneyi içermektedir. İşbirlikli taşıma sistemi için sanal lider-takipçi formasyon kontrol stratejisi kullanılmıştır. Taşınan nesne sanal lider robot olarak göz önünde bulundurulmuş ve sanal lider robotun referans koordinat eksenini taşınan nesnenin merkezine yerleştirilmiştir. Sanal lider robot için izlenecek olan eğri bir yörünge planlanmıştır ve referans koordinat sisteminin merkezi bu yörüngeyi izlemiştir. Takipçi robotlar, formasyonu korumak için planlanan yörüngelerini takip etmektedirler. Formasyonun şekli, taşınan nesnenin şekline ve takipçi robotların nesneyi tuttıkları noktalara göre değişmektedir. Bunlara ek olarak, her bir takipçi robotun nesneyle arasında oluşan açıyı istenen değerler içerisinde tutabilmek için formasyon kısıtı olarak adlandırılan bir açı kısıtı tanımlanmıştır (Bkz. Bölüm 4.4) ve yörünge oluşturulurken bu kısıt kullanılmıştır. Yörünge takibi asimptotik kararlı bir yörünge denetleyicisi tarafından yapılmıştır (Kanayama et al., 1990).

### 1.3. Amaçlar

Bu çalışma içerisinde holonomik olmayan diferansiyel sürürlü gezgin robotlara işbirlikli olarak bir nesnenin taşınması amaçlanmıştır. Nesne taşıma sırasında bu amaca ulaşabilmek için takipçi robotların kendi yarattıkları yörüngeleri takip etmesi ve bir formasyon yapısının korunması hedeflenmiştir. Formasyon yapısının korunmasında sanal lider-takipçi yaklaşımı kullanılmıştır.

### 1.4. Kapsam

Yapılan çalışma aşağıdaki iskelet çerçevesinde gerçekleştirilmiştir;

- Bu projede holonomik olmayan diferansiyel sürürlü ve çatal kaldıraçlara sahip gezgin robotlar kullanılmıştır.
- Yapılan çalışmada gezgin robotun sadece kinematik modeli hesaba katılmıştır.
- Formasyon tabanlı işbirlikli taşıma sistemi için sanal lider-takipçi yaklaşımı kullanılmıştır.
- Kinematik kısıtlar ve takipçilerin nesneyle olan bağıl açı kısıtı dikkate alınarak sanal lider robot için düzgün eğri bir yörünge yaratılmıştır. Bu yörüngeye ve nesneye bağlı olarak takipçi robotlarda kendi yörüngelerini yaratmışlardır.
- Yörüngeyi izlemek için Lyapunov tabanlı asimptotik kararlı yörünge denetleyicisi kullanılmıştır.
- Robotların düşük bir hızda nesneyi işbirlikli olarak taşırken tekerleri ile zemin arasında herhangi bir kayma olmadığı varsayılmıştır.
- Benzetim ortamı deneyleri, Pioneer P3-DX gezgin robotuyla uyumlu olan MobileSim benzetim ortamında ve sonuçları şekilsel olarak görebilmek için MATLAB benzetim ortamında yapılmıştır.
- Gerçek dünya ortamı deneyleri, Pioneer P3-DX gezgin robotları üzerinde AIRLAB (AIRLAB, 2010) bina içi gerçek deney ortamında uygulanmıştır.

### **1.5. Katkılar**

Yapılan iş birlikli taşıma sistemi, holonomik olmayan diferansiyel sürürlü ve çatal kaldıraca sahip robotlar için formasyon tabanlı bir hareket planlaması ve şeması sağlamaktadır. Objenin sanal bir lider robot olarak düşünülüp takipçilerin nesneye göre doğal bir formasyon oluşturduğu bir yaklaşımı içermektedir. Yörünge izleme denetleyicisi, gezgin robotların hızlarına bağlı olarak kazanç parametrelerini seçebilmektedir. Taşıma sisteminde takipçi robotlar kendi yörüngelerini ufak hatalarla izledikleri sürece tüm sistemin ortak modeline ihtiyaç duyulmamaktadır ve başlangıçta gezgin robotlar eşzamanlama yaptıktan sonra robotlar arasında açık bir iletişim kullanılmamaktadır. Robotlar nesneyi taşıyabilmek için bir kuvvet dağılımına ihtiyaçları yoktur.

### **1.6. Tezin Ana Hatları**

Tezin ana hatları dört bölümden oluşmaktadır. Tezin 1. Bölümü yapılan proje için bir altyapı, önerilen yaklaşım ve katkıları, projede kullanılan yöntem bilim, projenin amaçları ve kapsamı anlatılmıştır. Bölüm 2 içerisinde günümüze kadar olan işbirlikli taşıma sistemleri, yörünge izleme denetleyicileri ve yörünge oluşturma yöntemleri hakkında akademik edebiyat özeti verilmiştir. Bölüm 3’de işbirlikli taşıma sisteminin yapısı, Bölüm 4’de holonomik olmayan diferansiyel sürürlü gezgin robot’un kinematik modeli ve yörünge oluşturulması ve Bölüm 5 içerisinde yörünge gezgin robotlar tarafından izlenmesi için denetlenmesi anlatılmıştır. Bölüm 6 içerisinde gerçekleştirilen benzetim ortamı deneyleri ve gerçek dünya uygulamalarıyla yapılan çalışmada önerilen yaklaşımın doğruluğu kanıtlanmıştır. Bölüm 7’de tez de yapılan çalışmalar özetlenmiş, öneriler getirilmiş ve ileride muhtemel yapılacak çalışmalardan bahsedilmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, gezgin robot sistemleri için işbirlikli nesne taşıma yaklaşımları, yörünge izleme kontrol yaklaşımları ve kinematik kısıtlar altında yörünge oluşturulması için planlama yaklaşımlarını içeren literatür özeti sunulmaktadır.

#### **2.1. İşbirlikli Nesne Taşıma Yöntemleri**

Xin Yang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada tek bir nesnenin holonomik olmayan gezgin robotlar tarafından taşınabilmesi için dağıtık bir kontrol sistemi üzerine çalışılmıştır. Her robot iki kola sahip olup bu kollar bir bağlantı noktası etrafında dönebilmektedir. Bu robotlardan biri lider, diğerleri ise takipçilerdir. Lider erkin planlama ve nesnenin tüm yönlü hareketini gerçekleştirebilmektedir. Diğer robotlar ise basit bir PI kontrolü ile nesneye olan bağıl konumunu sabit tutup, iş birliği yaparak nesneyi taşımaktadırlar. Bunların klasik lider-takipçi tipi sistemlerden farkı, takipçilerin kendi yerel koordinatlarına dayanan bir hareket planlayabilmeleri ve mutlak konumsal bilgiye ihtiyaç duymamalarıdır. (Yang et al., 2004). Bu yaklaşımda, taşıma görevi için robotların özel tasarlanmış aparatlara sahip olması gerekmektedir.

Xin Chen ve arkadaşları, ağırlığı ihmal edilemeyecek bir nesnenin bir grup gezgin yönlendirici tarafından taşınması üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada, bir nesneyi taşıyan çoklu robotların eşgüdümlü kontrolü üzerine odaklanmışlardır ve formasyon bakış açısından lider-takipçi tipi bir kontrol tasarlamışlardır. Bunu, dağıtık kontrol stratejisi kullanarak kanıtlamışlar ve robotların dinamiklerine, uyarlamalı sinir ağı (NN) denetlemesi uygulamışlardır. Çalışmalarında, taşınan nesne istenen bir yörünge üzerinden taşınmaktadır. İzleme hatalarının parametre kararsızlığından

kaynaklandığını belirtmişlerdir (Chen et al., 2006). Bu yaklaşımda, taşıma görevi için robotların özel tasarlanmış aparatlara sahip olması gerekmektedir.

Masafumi Hashimoto ve arkadaşları, tabla üzerindeki bir yükün çoklu gezgin araçlar ile taşınması için bir kontrol tasarımı üzerine odaklanmışlardır. Her bir aracın üzerinde 2 tane düzlemsel ve 1 tane döner serbestlik derecesine sahip bir bağlantı olduğundan bahsetmişlerdir. Merkezi kontrol sistemi uygulamışlardır. Taşınacak nesnenin hedef davranışını belirlemek için bir liderden oluştuğunu ve liderin emrindeki robotların kuvvet ürettiklerini belirtmişlerdir. Önerdikleri kontrol tasarımının, belirlenen yörüngeler doğrultusunda nesnenin yüksek hızla taşınabildiğini ve kontrol sisteminin nesnenin ataletini dengeleyebildiğini belirtmektedirler (Hashimoto et al., 1995). Bu çalışmada, robotlarda özel aparatlar gerekmektedir.

Kazuhiro Kosuge ve Manabu Sato, bir nesnenin holonomik olmayan çoklu robotlar tarafından taşınabilmesi için dağıtık bir kontrol yaklaşımı üzerine çalışmışlardır. Bu yaklaşımda, lider-takipçi tipi bir yaklaşım kullanılmaktadır. Burada hareket emri lider olarak tanımlanan robotlardan birisi tarafından verilmekte, diğer robotlar takipçi olarak nitelendirilmektedir. Takipçiler, taşınan nesnenin hareketi boyunca liderin hareketini tahmin etmektedirler. (Kosuge ve Sato, 1999a). Bu çalışmada, taşıyıcı robotlar pasif kızaklı bir özel bir mekanizmaya sahip olmaları gerekmektedir.

Mahitthidetch Udomkun ve Poj Tangamchit, sıkıca bağlı (tightly coupled) taşıma görevlerini yerine getiren ve dağıtık bir yapıya sahip olan çok robotlu yapıda davranış tabanlı ve katmanlı bir mimari yapı önermişler ve işbirlikli taşıma görevi üzerinde uygulamışlardır. Bir taşıma görevinin başarı ile yerine getirilebilmesi, robotların karşılıklı hareket ve davranışlarına çok bağımlı olduğundan bu görev sıkıca bağlı bir görev olarak nitelendirilmiştir. Sıkıca bağlı bir görevde robotların küçük hareket hatalarında dahi taşıdıkları yükü düşüreceğini vurgulamışlardır. Davranışları, bireysel ve grupsal olarak iki sınıfta toplamışlardır. Eşgüdümlü çoklu gezgin robotlar içerisinde



kullanılan lider-takipçi yöntemindeki gürbüzlük sorununu çözen dağıtık bir kontrol mekanizması üzerine çalışmışlardır (Udomkun ve Tangamchit, 2008). Bu yaklaşımda; nesne, davranışlar kullanılarak robotların üzerinde taşınmaktadır ve çatal kaldıraçlı (forklift) bir taşıma söz konusu değildir.

Fujii ve arkadaşları, lider-takipçi tipi çoklu robot sistemlerin verimini arttıracak, işbirlikli olarak tek bir nesnenin taşınacağı bir kontrol yapısı önermişlerdir. Robotlar kanca yapısında ki özel taşıma aparatlarıyla nesneyi, bağlantı noktalarında bir kayma esnekliği ve dış boşluğu bulunacak şekilde gevşek bir biçimde taşımaktadırlar. Önerilen yaklaşım içerisinde, yapılması istenen işler ya da izlenmesi istenilen yörünge sadece lider robota verilmektedir. Takipçi robotlar ise taşıma sırasında nesneden gelen kuvvetin algılanmasıyla liderin yörüngesini tahmin etmeye çalışmaktadırlar. (Fujii et al, 2007). Bu çalışmada, robotların üzerinde 6 serbestlik derecesine sahip ve uç noktasında kanca bulunan özel bir mekanizma kullanılmaktadır.

Kato ve arkadaşları, bir nesnenin bilinmeyen bir ortam içerisinde birden fazla robot tarafından taşınabilmesi için işbirlikli bir kontrol yöntemi önermişlerdir. Nesneyi taşıyan robotların yörünge izleme ve nesneden kaçınma görevleri gibi değişik görevlere sahip olduklarını belirtmişlerdir. Her bir robot içerisinde aynı kontrol algoritmasının çalıştığını ve robotlar arasında gerçek zamanlı bir iletişime ihtiyaç duyulmadığını ifade etmişlerdir. Robotların görevleri, bir ağırlık matrisine ve nesnenin istenen konumuna göre ilişkilendirmişlerdir. Robotlar arasında bir kuvvet dağılımı kullanmışlar ve nesne taşıma sırasında bu kuvvet dağılımını olabildiğince eşit dağıtmayı kontrol etmeye çalışmışlardır. Lider-takipçi tipi kontrol yaklaşımının bilinmeyen ortamlarda yetersiz kaldığını belirtmişlerdir. Bunun için, robotların içerisindeki görevlere dayalı olarak geçici lider yaklaşımı oluşturmuşlardır (Kato et al, 2001). Bu yaklaşımda, taşıma görevi için her yöne serbestçe hareket edebilen robotlar kullanılmaktadır ve nesne zemin üzerinde sürüklenerek taşınmaktadır.

Kazuhiro Kosuge ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, bir nesnenin tüm gezgin robotlar tarafından eşgüdümlü olarak taşınabilmesi için kuvvet/moment dönüşümü ile ilgili bir problem üzerine çalışılmıştır. Bu problemi çözebilmek ve bir nesnenin tüm gezgin robotlar ile eşgüdümlü olarak taşınabilmesi için nesnenin tutum noktaları arasındaki geometrik kısıtları kullanan dağıtık bir kontrol algoritması önermişlerdir. Çalışmalarında lider takipçi tipi bir yaklaşım kullanmışlardır (Kosuge et al., 1999b). Bu yaklaşımda, nesnenin taşınması için bir kuvvet dağılımına ihtiyaç duyulmaktadır ve taşıma görevi için her yöne serbestçe hareket edebilen robotlar kullanılmaktadır.

Aram Zaerpoora ve arkadaşları çalışmalarında, iki boyutlu bir düzlemde nesnelere taşımak için dağıtık kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Önerdikleri yöntem kısıtla ve taşı yaklaşımını kullanmakta olup, robotlar görevlerine göre iki grupta düzenlenmektedir. Her bir gruptaki robotlar nesnenin taşınmasında farklı görevler üstlenmektedir. Bir grupta yer alan robotlar nesnenin doğrusal hızını kontrol ederken, diğer grupta yer alan robotlar nesnenin açısal hızını kontrol etmektedirler. Her bir robotun beklenen hızının hesaplanabilmesinde, kısıtla ve taşı stratejisi ve robotun yerel algılayıcıları kullanılmıştır (Zaerpoora et al.,2005). Bu yaklaşımda, nesne zemin üzerinde sürüklenerek taşınmaktadır.

Z. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, çok robotlu nesne taşıma için davranış tabanlı dinamik bir işbirliği stratejisi geliştirilmiştir. Bu işbirliği stratejisini iki adımda gerçekleştirmişlerdir. Birinci adımda dağıtık kontrol yapısına sahip olan robotun işbirlikli davranışsal özniteliklerini tasarlamışlardır. İkinci adım da ise bu davranışsal öznitelikleri düzenlemişlerdir (Wang et al., 2000). Bu yaklaşımda, nesne zemin üzerinde sürüklenerek taşınmaktadır ve nesnenin taşınması için bir kuvvet dağılımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Masaki Yamakita ve arkadaşları, Ay ya da gezegenlerde robotların kullanılması üzerine çalışma yapmışlar ve süper makine topluluğu (SMC) olarak isimlendirdikleri

çok robotlu gezgin robot sisteminin (MMRS) formasyon kontrolü üzerine çalışmışlardır. SMC sisteminin, bir ana gemi ve MMRS 'in bir prototipi olan birçok erkinden oluştuğunu söylemişlerdir. Ana geminin çok erkinli işbirlikli taşınması için bir yöntem önermişlerdir. Üç erkinin ana gemiyi taşımasındaki çok robotlu formasyonları analiz etmişler ve tartışmışlardır (Yamakita et al., 2003). Bu yaklaşımda, taşıma görevi için her yöne serbestçe hareket edebilen robotlar kullanılmaktadır ve bu robotların özel tasarlanmış aparatlara sahip olması gerekmektedir. Ayrıca ana gemi dünyada bir laboratuvar ortamının zemini üzerinde yerde sürüklenerek taşınmaktadır.

Jonathan Fink ve arkadaşları, taşınacak bir nesnenin işbirlikli olarak çoklu robotlar ile çekilmesi üzerine çalışmışlardır. Robotların, taşınacak olan yüke kablolar ile bağlı olduğundan söz etmişler ve taşınacak olan yükün hareket denklemlerini ve durağansal modelini çıkarmışlardır (Fink et al., 2008). Bu çalışmada, sürükleyerek taşıma söz konusudur.

Li-Sheng Wang ve Shan-I Wu çalışmalarında, bir nesnenin itilerek taşınabilmesi için eşgüdümlü bir kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında iki adet insansız araç (gezgin robot) kullanmışlardır. Bu araçların önde iki motora monte edilmiş ve kontrol edilebilir iki tane tekeri bulunduğunu, arkada ise iki adet serbest dönebilen sarhoş tekere sahip olduğunu belirtmişlerdir. İstenen yörüngenin araçlar tarafından izletilebilmesi için bulanık bir denetleyici kullanmışlardır. Ayrıca eşgüdüm sürecini kontrol edecek ayrı bir bulanık denetleyici daha kullanmışlardır. Eşgüdüm denetleyicide sadece yolları değil hızlarında denetlendiğini ifade etmişlerdir. Araçlar kendi konum bilgilerini öğrenmek için GPS kullanmışlardır. Her bir araç diğer araçların sahip olduğu konum ve davranış bilgilerini bir kablosuz iletim birimi üzerinden edinmektedir. Eşgüdüm tasarımlarının temelde yarı merkezi ve yarı dağıtık olduğunu belirtmişlerdir (Wang ve Wu, 2006). Bu yaklaşımda, nesne zemin üzerinde sürüklenerek taşınmaktadır.

Kazuharu Tsuji ve Toshiyuki Murakami, bir nesne taşınması yapan robotlara aşırı yük bindiğinde karşılaştıkları durumları çözecek bir kontrol sistemi üzerinde çalışmışlardır. Taşınan nesnenin ağırlık merkezi robotlara çok yakın olduğunda ya da robotların yer ile yüksek bir sürtünmeye sahip olduklarında aşırı yük binmesi durumunun oluştuğunu belirtmişlerdir. Önerdikleri sistemin üç katmandan oluştuğunu ve yük bilgisinin bu katmanlar arasında iletildiğini belirtmişlerdir. Bu sistemin çeşitli sayıda robota ve kapasiteye uygulanabileceğini söylemişlerdir (Tsuji ve Murakami, 2004). Bu yaklaşımda, nesnenin taşınması için bir kuvvet dağılımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Chad Humberstone ve Smith çalışmalarında, basit bir robotun mekanik tasarımı ve tasarlanan çok robotlu yapının katı bir nesneyi taşınması için nesneye istenilen ivmelenmeyi kazandıracak bir robot kontrolü üzerine çalışmışlardır. Robotlara bir denetçi tarafından aynı emirler verildiği ve robotlar arasında hiçbir haberleşmenin olmadığını belirtilmektedir. Kuvvet ve ivmelenme girdilerini kullanarak ileri ve geri besleme doğrusallaştırmasını, holonomik olmayan robotların hareketinde bir denge noktası bulmak için kullanmışlardır. İvmelenme geri beslemesini ise sadece tekerlek ivmelenmesinde kullanmışlardır. (Humberstone et al., 2000). Taşıma görevi için, robotlar üzerinde nesne ile temas noktasında özel mekanizmalar tanımlanmıştır.

Natsuki Miyata ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bir grup araba tipi gezgin robotun bir nesneyi işbirlikli taşınması için hareket planı ve denetleyicisi üzerine çalışılmıştır. Araba tipi robotların nesneyi taşıyabilmeleri ve kaldırebilmeleri için basit bir sonlandırıcı içeren bir mekanizma kullanmışlardır. Robotların nesneyi tuttıkları noktanın dinamik olarak değişebildiğini ve objeyi kenarlarından tuttıklarını vurgulamışlardır. Robotların melez yapıda hem merkezi hem de dağıtık şekilde katmanlı bir hareket planlama mimarisine sahip olduklarını ve dinamik olarak planlama yapabildiklerini belirtmişlerdir. Robotların birbirleri arasında iletişim kurabildiklerini ve nesnenin yatay yönde bir hareketle taşındığını belirtmişlerdir (Miyata et al., 1997). Bu

yaklaşımında, taşıma görevi için araba tipi robotlar kullanılmıştır ve robotlar üzerinde nesne ile temas noktasında özel mekanizmalar tanımlanmıştır.

Hiroaki Yamaguchi ve Tamio Arai, iki araba tipi robot ve bir nesnenin birbirlerine tek bir gövdeymiş gibi bağlandığı işbirlikli taşıma sisteminin direksiyon kontrolü için yeni bir yöntem önermişlerdir. Taşıma sisteminin üç girdili ve yedi değişkenli kaymasız holonomik olmayan mekanik bir sistem olduğunu ifade etmişlerdir. Bu sisteme, holonomik olmayan ve katı gövde kısıtları altında uygun bir dönüşüm aramışlardır. Bu dönüşüm ve kısıtlara bağlı olarak sistemi denetleyecek bir kontrol sistemi tasarlamışlardır. Araba tipi iki robotlu işbirlikli taşıma sisteminin pratik ve kullanım alanının geniş olduğunu belirtmişlerdir. Örnek olarak iki araba tipi robot ve bir taşıyıcı kullanılarak karayolu üzerinde tren taşımacılığını vermişlerdir (Yamaguchi ve Arai, 2009). Bu yaklaşımda, taşıma görevi için araba tipi robotlar kullanılmaktadır ve nesnenin taşınmasında lider-takipçi tipi bir yaklaşım kullanılmamaktadır.

## **2.2. Yörünge İzleme Yöntemleri**

Literatürde, yörünge izleme denetleyicileri için birçok yaklaşım bulunmaktadır. Denetleyiciler kullandıkları yaklaşımlara göre, kinematik modeli kullanan, dinamik modeli kullanan, akıllı, uyarlamalı ve geri adım yöntemini kullanan denetleme tipleri olarak sınıflandırılabilir.

### **2.2.1. Kinematik denetleme**

Günümüze kadar olan çalışmaların çoğunda, araştırmacılar gezgin robotların yörünge takibinde kinematik denetleyiciler önerilmiştir. Bu alanda, kinematik denetleyicilerin bu kadar yaygın olmasının nedeni, yörünge izleme probleminde gezgin robotun dinamik modelinin ihmal edilerek basitleştirilmesindedir. Genel olarak gezgin robotun mükemmel bir hız izlediği düşünülmektedir. Bu kabullenme altında, bu tür

denetleyiciler yörünge izleme hatalarını asimptotik olarak sıfıra götürebilmektedir. Ancak, gezgin robot sisteminin kararsızlık ve gürültüye maruz kaldığında kinematik denetleyiciler iyi bir manevra ve kararlılık gösterememektedir.

Kanayama ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, otonom bir gezgin robot için asimptotik kararlı bir yörünge izleme denetleyicisi önerilmektedir. Önerilen denetleyici bir kontrol kuralı içermektedir. Bu kontrol kuralının ana amacı, gezgin robotun bir yörüngeyi izleyebilmesi için uygun doğrusal ve açısal hareketin belirlenebilmesidir. Araştırmacılar, yörünge izleme denetleyicisinin kararlılığını ispatlayabilmek için bir Lyapunov fonksiyonu belirlemekte ve bu fonksiyonu kullanarak denetleyicinin asimptotik kararlılığını kanıtlamaktadırlar (Kanayama et al, 1990).

Doh-Hyun Kim ve Jun-Ho Oh çalışmalarında, holonomik olmayan bir gezgin robotun hız kısıtları için küresel asimptotik kararlı bir yörünge denetleyicisi üzerine çalışmışlardır. Denetleme kuralı içerisinde gezgin robotun konumunu ve hata durumunu hesaba katmışlardır. Bu özellik sayesinde küresel asimptotik kararlı yörünge izleme denetleyicisi, Kanayama ve arkadaşları tarafından önerilen asimptotik yörünge denetleyicisinin denetleme kuralından (Kanayama et al, 1990) ayrılmıştır. Denetleyicinin küresel asimptotik kararlılığı, Lyapunov kararlılık analizi yöntemi ile gösterilmiştir (Kim ve Oh, 1998).

### **2.2.2. Dinamik denetleme**

Dinamik denetlemede gezgin robotun ataletinin ve ağırlığının hesaba katıldığı dinamik model kullanılmaktadır. Genel olarak bir robotun dinamik modeli Euler-Lagrange yöntemi kullanılarak bulunabilmektedir. Bir dinamik model, gezgin robot'un simetrik ve pozitif tanımlı atalet matrisini, dönel bir eksen ve merkezkaçtan dolayı meydana gelen kuvvet vektörünü, yerçekiminden kaynaklanan kuvvet vektörünü, dışarıdan gelen gürültüleri ve uygulanacak tork çıktılarını içermektedir. Bu bilgilerden yararlanılarak araştırmacılar gezgin robotlar için çeşitli dinamik denetleyiciler tasarlamışlardır.

Yulin Zhang ve arkadaşları çalışmalarında, diferansiyel sürürlü gezgin robotların yüksek hızlarda ve büyük yükler altında gürbüz bir yörünge izleme kontrolü üzerine çalışmışlardır. Gezgin robotun dinamik modelini kullanılarak bir kontrol yapısı tasarlamışlardır. Ancak kontrol tasarımı sırasında, bir sistemin tüm dinamik modelinin çıkarımının uygulanabilir olamamasından dolayı çalışmalarında basitleştirilmiş bir dinamik model türetmişlerdir. Gezgin robotun dinamik modelinin, dışarıdan gelen kuvvetleri ve karmaşık bir teker modelini içerdiğini belirtmektedirler. Denetleyicinin dışarıdan gelen yüklere ve tekerin yer ile olan temasından kaynaklanan gürültülere karşı gürbüz olduğunu ifade etmişlerdir. Daha sonra kontrol yapısının kararlılığını analiz etmişlerdir (Zhang et al., 1998).

### **2.2.3. Akıllı denetleme**

Günümüzde araştırmacılar tarafından gezgin robotlar üzerinde uygulanmış birçok akıllı denetleme yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerin bir kaçı bulanık mantık, sinir ağları, genetik, tekrarlayan öğrenme veya bu yöntemlerin melezi şeklinde tasarlanmıştır. Uygulanacak olan akıllı denetleme yöntemlerinin temel amacı, sistemin genel verimini arttırmak olmuştur.

Tiemin Hu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, yapay sinir ağlarını kullanan bir denetleyici sunulmuştur. Bu denetleyici gezgin robotun hem kinematik hem de dinamik denetlemesinden oluşmuştur. Robotun sistem dinamikleri ve geometrik parametreleri tamamen bilinmemektedir. Sistemin kararlılığı ve yörünge izleme hatalarının yakınsaması Lyapunov kararlılık analizi ile kanıtlanmıştır. Gezgin robotun kontrolü, sinir ağlarının çevrimiçi öğrenmesi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir (Hu et al., 2002).

Xiaochuan Wang ve S. X. Yang çalışmalarında, holonomik olmayan gezgin bir robotun bir nesneden sakınması için sinir ağları ve bulanık mantık içeren bir kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Gezgin robotun etrafına dört adet kızılötesi algılayıcı monte

etmişlerdir ve böylece gezgin robotun etrafındaki nesnelere olan uzaklıklarını algılamasını sağlamışlardır. Uzaklık bilgisi sinir ağları ve bulanık mantık içeren denetleyici ile işlenmiştir. İşlenen bilgi sayesinde denetleyici gezgin robot'un ayrı olan iki tekerinin hızlarını değiştirerek kontrol etmişlerdir (Wang ve Yang, 2003).

#### **2.2.4. Uyarlanabilir denetleme**

Günümüz çalışmalarında birçok araştırmacı uyarlanabilir denetleme üzerine yöntemler önermişlerdir. Gezgin robotun dinamik modelinin bilinmeyen parametreler içerdiğinde, parametre tahmin kuralı içeren uyarlanabilir denetleme kullanılmıştır. Birçok uyarlanabilir denetleyici geri adım yöntemini kullanmaktadır ve kararlılıkları Lyapunov kararlılık analizi yöntemi ile ispatlanmaktadır.

Colbaugh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, bir gezgin robotun bilinmeyen parametreler içerdiği durumda belirlenmiş konum ve yöneliminin dengelenmesi ve yörünge izlemesi için uyarlanabilir bir kontrol tasarımı üzerine çalışılmıştır. Araştırmacılar, iki tip uyarlanabilir denetleyici önermişlerdir. Öncelikle, holonomik olmayan bir sistemi herhangi belirli bir hedefe götüreceği olan ve uyarlanabilir yörünge izleme stratejisiyle birleştirilmiş bir yörünge oluşturma algoritması geliştirmişlerdir. İkinci olarak, homojen sistemlerdeki ve performans tabanlı uyarlanabilir kontroldeki fikirleri kullanarak hareket kontrolü için dengeleyici bir denetleme kuralı gerçekleştirmişlerdir (Colbaugh et al, 1997).

Fukao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, holonomik olmayan tekerlekli gezgin bir robotun dinamik modeli için tork ve kinematik denetlemesinin entegrasyonu sunulmuştur. Tasarımlarında yeni bir uyarlamalı kinematik denetleyici önerilmiştir ve sonrasında uyarlamalı bir tork denetleyici, kinematik denetleyici kullanılarak türetilmiştir. Gezgin robotun dinamik modelindeki belirsizlikler uyarlamalı denetleyici ile tahmin edilip robot denetlenmiştir. Uyarlamalı tork denetleyici geri adım yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Böylece gezgin robotun hızı istenen bir hıza yakınsamıştır (Fukao et al, 2000).



### 2.2.5. Geri adım yöntemi ile denetleme

Literatürde yer alan birçok denetleyici bir robotun dönme ve doğrusal hız kontrolü için tasarlanmaktadır. Bu denetleyicilerden elde edilen hız kontrolü tork kontrolü şekline dönüştürülmektedir. Böylece hem bir tork değeri hem de istenen hız kontrolü davranışı sağlanmaktadır. Robotun hız kontrolü ile bundan elde edilecek olan tork kontrolü arasında bir köprü kuran bu yöntem geri adım yöntemi olarak ifade edilmektedir.

Fierro ve Lewis çalışmalarında, holonomik olmayan gezgin bir robot için kinematik bir denetleyicinin ve bir tork denetleyicisinin entegrasyonunu mümkün kılan dinamik bir yapı sunmuşlardır. Birleşik olan kinematik ve tork denetleme kuralını geri adım yöntemi kullanarak geliştirmişler ve denetleyicinin asimptotik kararlılığını Lyapunov kararlılık analizi ile ispatlamışlardır. Bununla beraber, geliştirdikleri kontrol algoritmasını holonomik olmayan üç temel seyrüsefere uygulamışlardır. Gezgin robotun kontrolü için geliştirilen denetleyicinin genel yapısının, hesaplanabilir tork denetleyicisi ve uyarlanabilir denetleyiciler gibi değişik kontrol yöntemlerine uyum sağlayabildiğini belirtmişlerdir (Fierro ve Lewis, 1995).

David Wilson ve Rush Robinett tarafından yapılan çalışmada, holonomik olmayan gezgin robotlar için uyarlanabilir gürbüz bir kontrol mimarisi sunulmuştur. Gezgin robotun kinematiği ve dinamiği arasında bir köprü kuran geri adım kavramını kullanmışlardır. Önceki çalışmalarında gezgin robotun kontrolü için sadece robotun kinematik modeli üzerinden hız denetlemesi yapmışlardır. Bu çalışmada ise bu denetlemeyi robotun dinamik modeli ve parametreler içerisindeki değişikliklerin dengelenmesini içerecek şekilde geliştirmişlerdir (Wilson ve Robinett, 2001).

## 2.3. Yörünge Oluşturma Metotları

Bir gezgin robotun bir noktadan diğerine giderken izleyeceği yörünge düzgün ve robotun kısıtları ile uyumlu olması gereklidir. Yörünge oluşturabilmek için

araştırmacılar birçok yöntem önermişlerdir. Bu yöntemler içerisinde genel olarak çizgiler, eğriler, çemberler, yaylar, polinom dereceleri eğriler (spline), yol için diferansiyel denklemler, kaotik eğriler ve spiral geçiş eğrileri (klotoid) kullanılmıştır.

Dubin tarafından yapılan çalışmada bir yörünge oluşturulması için çizgiler ve eğrilerden yararlanmış ve yörüngeler matematiksel olarak ifade edilmiştir (Dubin, 1957).

Soonshin Han ve arkadaşları çalışmalarında, diferansiyel sürürlü bir gezgin robot için sabit bir dönme yarıçapına sahip düzgün bir eğri yol planlanmışlardır. Oluşturulan yol gezgin robot için en uygun yörünge planı olup, diferansiyel sürürlü robotun hareket eden bir nesneyi yakalaması için önerilmiştir (Han et al, 2008).

Kiyoshi Komoriya ve Kazuo Tanie tarafından yapılan çalışmada, gezgin bir robotun yörünge izleme denetlemesi iki boyutlu bir düzlemde belirli teğetlerle oluşturulan belirli noktalardan geçen bir yörünge şeklinde tasarlanmıştır. Yörüngeyi eğriler (spline) kullanarak oluşturmuşlardır (Komoriya ve Tanie, 1989).

Johannes Reuter tarafından yapılan çalışmada, karmaşık bir ortam içerisinde hızlı hareket edebilen bir robot için düzgün eğrili bir yörünge oluşturulması problemi üzerine çalışılmıştır. Yörünge bilgisi çevrimiçi olarak sürekli güncellenmektedir. Bu yörünge, çizgiler ve yaylardan meydana gelmektedir. Yörüngeyi sürekli olarak türevi alınabilir olabilmesi için Hamilton-Jacobi yapısı kullanılmıştır (Reuter, 1998).

Luiz Martins-Filho ve Elbert Macau çalışmalarında, gezgin robotlar için kaotik sistemlerin dinamik özelliklerine dayanan özel yörüngeler üzerine bir çalışma sunmuşlardır (Martins-Filho ve Macau, 2007).

Manabu Shimizu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, yol planlama kısa süreli ve uzun süreli olmak üzere iki sınıfta incelenmiştir. Yazarlar kısa süreli planlama içerisinde ortama bağlı olarak yol planının sürekli olarak değişebildiğini vurgulamışlardır. Bunun için otonom gezgin bir robotun manevra kabiliyetini

arttırabilmek için spiral geçiş eğrileri (klotoid) kullanılarak kısa süreli planlama için yeni bir yörünge oluşturma yöntemi önermişlerdir (Shimizu et al, 2006).

Chong Hui Kim ve Byung Kook Kim tarafından yapılan çalışmada, gezgin robotların üstlerinde taşıdıkları bataryaların kısıtlı bir süre için enerji sağlayabildikleri düşünölmüştür. Bunun için gezgin robotun enerjisini en az harcayacak şekilde düzgün eğrilerden yararlanılarak yörüngeler oluşturulmuştur (Kim ve Kim, 2007).

Alpaslan Yufka ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda, bir gezgin robotun algılayıcı tabanlı bir kapsama problemi içerisinde düz çizgilerden oluşan yolların düzgün eğriler şeklindeki yörüngelere dönüşümü sağlanmaktadır (Yufka et al, 2009).

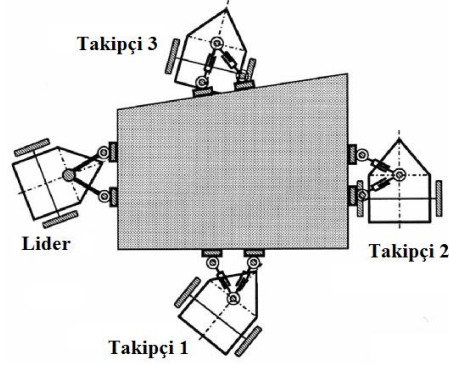
## BÖLÜM 3

### İŞBİRLİKLİ TAŞIMA SİSTEMİ

Bu bölümde literatürde uygulanmış lider-takipçi tipi işbirlikli nesne taşıma yöntemleri ve bu çalışmada ele alınan, taşınan nesnenin sanal bir lider robot olarak düşünüldüğü formasyon tabanlı işbirlikli bir taşıma sistemi yaklaşımı anlatılmaktadır. Bu sistem gezgin robotlar için bir hareket planlamasını, yörünge oluşturulmasını ve oluşturulan yörüngelerin izlenebilmesi için yörünge izleme kontrolünü içermektedir.

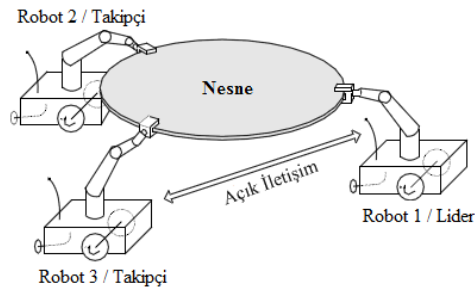
#### **3.1. Literatürde Uygulanmış Lider-Takipçi Tipi Nesne Taşıma Yöntemleri**

Xin Yang ve arkadaşları önerdikleri işbirlikli taşıma yaklaşımında lider ve takipçi robotlar bulunmaktadır. Tüm robotlar yatay bir düzlem üzerine konulmakta ve robotlar üzerlerinde bulundukları kollar ile nesneyi sıkıca tutmaktadırlar. Lider robot çevresini gözlemleyebilmektedir ve lider nesnenin tüm yönlü hareketini planlayabilmektedir. Takipçi robotlar, nesneyi taşımak için kullandıkları kolların uzunluk bilgisini kullanarak nesnenin hareketini tahmin etmektedirler ve kendi yerel koordinat eksenlerine göre kendi kendilerine kontrollerini sağlamaktadırlar. Xin Yang ve arkadaşları tarafından önerilen yaklaşımın bir taslağı Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Bu şekil içerisinde bir lider ve üç takipçi robot verilmektedir (Yang et al., 2004).



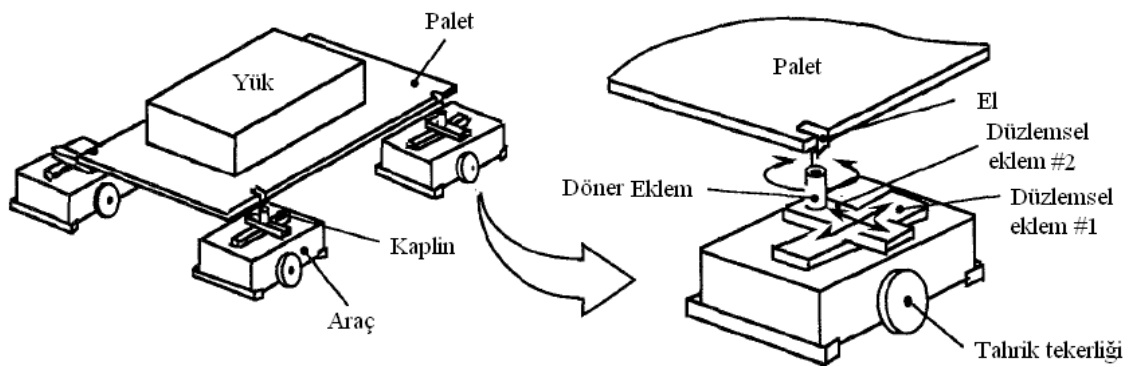
**Şekil 3.1** Xin Yang ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi (Yang et al., 2004)

Xin Chen ve arkadaşları önerdikleri işbirlikli taşıma yaklaşımında, nesnenin  $N$  tane robot tarafından özel aparatlarla taşınabildiğini göstermiştir. Önerdikleri yaklaşım içerisinde lider-takipçi bir yöntem kullanılmaktadır. Nesne için bir yörünge oluşturulmaktadır ve bu yörünge lidere verilmektedir. Daha sonrasında lider, takipçilerin olması gereken konum bilgilerini takipçilere iletmektedir. Böylece, takipçiler bu konum bilgilerini kullanarak liderle bir eşgüdüm içerisinde nesnenin taşınmasını idare etmektedirler. Robotlar arasında açık bir haberleşme vardır. Xin Chen ve arkadaşları tarafından önerilen yaklaşımın bir taslağı Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Bu şekil içerisinde bir lider ve iki takipçi robot verilmektedir (Chen et al., 2006).



**Şekil 3.2** Xin Chen ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi (Chen et al., 2006)

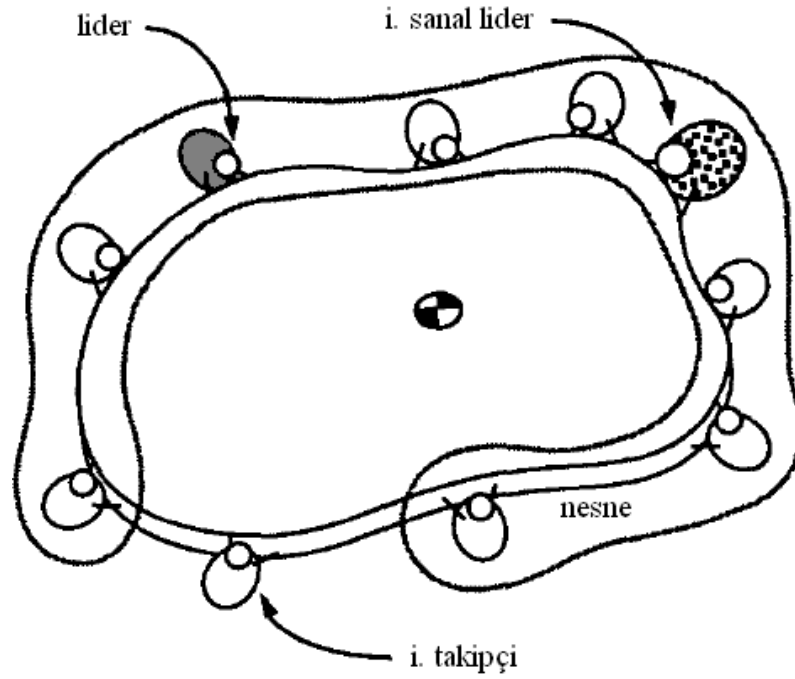
Masafumi Hashimoto ve arkadaşları, önerdikleri nesne taşıma yaklaşımında birden fazla gezgin araç ve bu araçların üzerinde nesneyi taşıyabilmek için bir tabla kullanmışlardır. Araçların üzerlerinde 2 tane düzlemsel ve 1 tane döner serbestlik derecesine sahip bir bağlantı bulunmaktadır. Her bir araç kendi konum ve yönelimini üzerlerinde bulundurdıkları algılayıcılar ile belirleyebilmektedir. Nesneyi taşıyan araçlar arasından biri lider olarak kabul edilmektedir. Lider araç nesnenin hedef davranışını belirlemekte ve buna göre emrindeki araçlara nesneyi taşıyabilmeleri için kuvvet üretmelerini sağlamaktadır. Masafumi Hashimoto ve arkadaşları tarafından önerilen yaklaşımın bir taslağı Şekil 3.3’de gösterilmektedir (Hashimoto et al., 1995).



**Şekil 3. 3** M. Hashimoto ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi (Hashimoto et al., 1995)

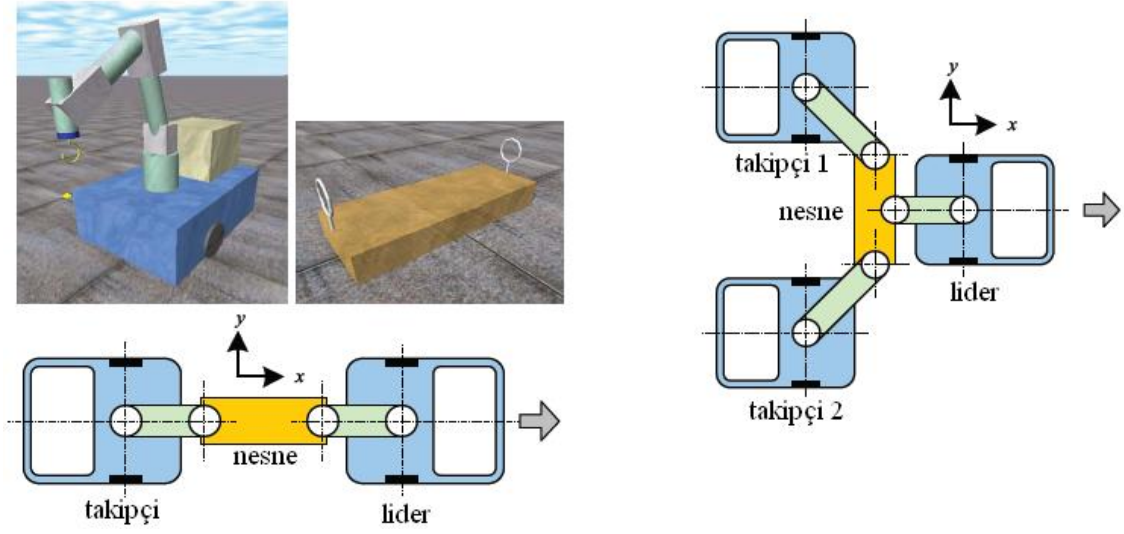
Kazuhiro Kosuge ve Manabu Sato, önerdikleri işbirlikli taşıma yaklaşımında lider, sanal lider ve takipçi kavramlarını kullanmışlardır. Yaklaşımları içerisinde takipçi robotun kendisini ilgilendiren sanal lideri takip etmesi istenmektedir. Takipçilerin sayısı ikiden fazla olduğunda, i. takipçi liderin yörüngesini takip edememektedir. Bunun nedeni i. takipçinin yörünge sapmasının diğer tüm robotların hareketleri tarafından etkilenmesindedir. Bunun için önerilen yaklaşım içerisinde, robotlar Şekil 3.4’de gösterildiği gibi iki grupta sınıflandırılmıştır. Birincisi i. takipçinin kendisidir, ikincisi ise lideri de içeren diğer tüm robotlardır. Önerilen yaklaşım içerisinde, diğer tüm

robotlar i. takipçinin i. sanal lideri olarak nitelendirilmektedir. i. Takipçi için i. sanal lider gerçek bir lider gibi davranmaktadır. İki robot (takipçi ve lider) bir nesneyi eşgüdümlü olarak taşıırken, i. takipçi i. sanal liderin yörüngesini tahmin algoritmasına dayanarak tahmin edebilmektedir (Kosuge ve Sato, 1999a).



**Şekil 3. 4** Xin Chen ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi (Kosuge ve Sato, 1999a)

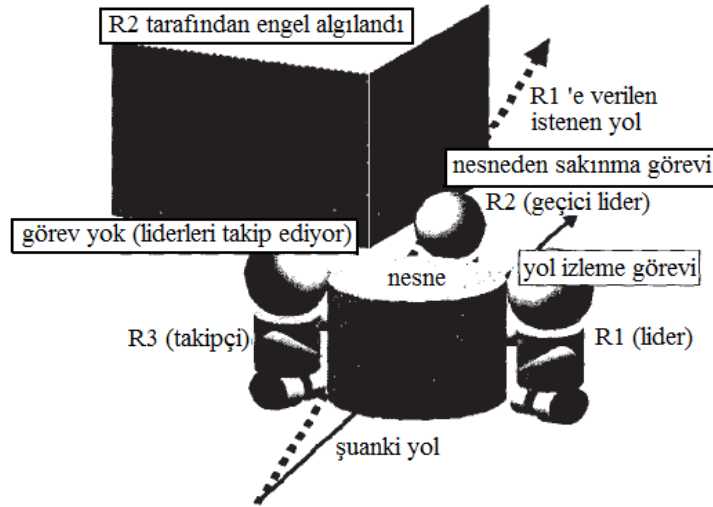
Fujii ve arkadaşlarının önerdiği işbirlikli taşıma yaklaşımı içerisinde lider-takipçi tipi bir yaklaşım içermektedir. Önerilen yaklaşım içerisinde, yapılması istenen işler ya da izlenmesi istenilen yörünge sadece lider robota verilmektedir. Takipçi robotlar ise taşıma sırasında nesneden gelen kuvvetin algılanmasıyla liderin yörüngesini tahmin etmeye çalışmaktadırlar. Robotlar kanca yapısında ki özel taşıma aparatlarıyla nesneyi, bağlantı noktalarında bir kayma esnekliği ve dış boşluğu bulunacak şekilde gevşek bir biçimde taşımaktadırlar. Fujii ve arkadaşları tarafından önerilen yaklaşımın bir taslağı Şekil 3.5’de gösterilmektedir (Fujii et al., 2007).



**Şekil 3. 5** Fujii ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi (Fujii et al., 2007)

Kato ve arkadaşları, lider-takipçi tipi kontrol yaklaşımının bilinmeyen ortamlarda yetersiz kaldığını belirtmişlerdir. Bunun için robotların içerisindeki görevlere dayalı olan ve bilinmeyen ortamlarda da çalışan geçici lider yaklaşımı önermişlerdir. Nesneyi taşıyan robotların her biri değişik görevlere sahip olmaktadır. Bu görevlerin verilen bir yörüngeyi izleme ve nesneden sakınma gibi değişik görevler olduğu belirtilmektedir. Bunlara ek olarak robotlar nesneyi taşıırken, grup içerisindeki lider değişip geçici bir lider oluşabilmektedir. Önerilen yaklaşımda, taşıma görevi için her yöne serbestçe hareket edebilen robotlar kullanılmakta ve nesne zemin üzerinde sürüklenerek taşınmaktadır. Kato ve arkadaşları tarafından önerilen yaklaşımın bir taslağı Şekil 3.6'da gösterilmektedir (Kato et al., 2001).





**Şekil 3. 6** Kato ve arkadaşlarının önerdikleri yaklaşımın taslak gösterimi (Kato et al., 2001)

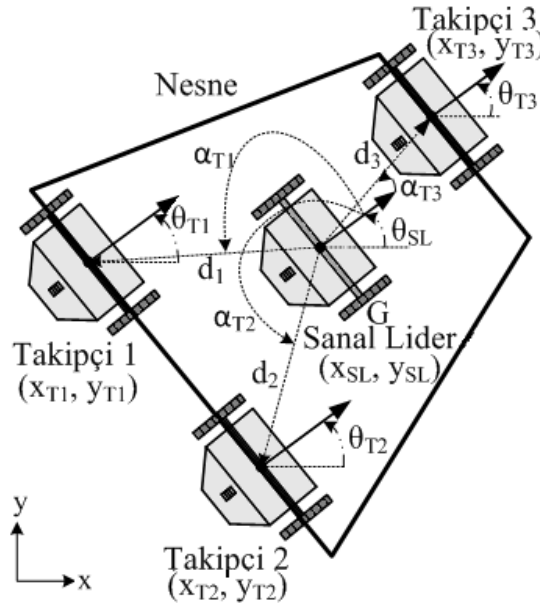
### 3.2. Önerilen İşbirlikli Nesne Taşıma Yöntemi

Bu çalışmada, ancak birden fazla robot tarafından taşınabilecek büyüklükteki bir katı nesnenin çatallı yükleyici (forklift) tipi araçlarla işbirlikli taşınması problemi ele alınmaktadır. Taşıyıcı araçların sayısı, araçların kaldırma kapasitesi, nesnenin ağırlığı ve nesnenin dengede kalabilmesi gözetilerek belirlenebilir. Araçların hepsi, nesnenin yerden kaldırılması esnasında aynı yönelime sahip olmalıdırlar. Ancak, taşıma esnasında, robotlar arasındaki sınırlı büyüklükte yönelim farkları kabul edilebilmektedir. Bu sistemde, taşıma esnasında sanal lider-takipçi formasyon kontrol stratejisi kullanılmaktadır. Bu sistemde, nesnenin istenen konuma, tanımlanan kısıtlar altında taşınması hedeflenmektedir.

Taşınacak olan nesne, sanal lider (SL) robot olarak düşünülmüştür. Sanal lider robotun referans koordinat eksenini taşıyan nesnenin ağırlık merkezine yerleştirilmiştir. Nesnenin ağırlık merkezi “G” sanal lider robotun diferansiyel tekerlerinin orta noktası,  $(x_{SL}, y_{SL})$  ile aynı yere konumlandırılmıştır. Sanal lider robot Şekil 3.7’de ve Şekil 3.8’de belirtildiği gibi x eksenine göre  $\theta_{SL}$  açısına ve nesne ile aynı yönelime sahiptir.

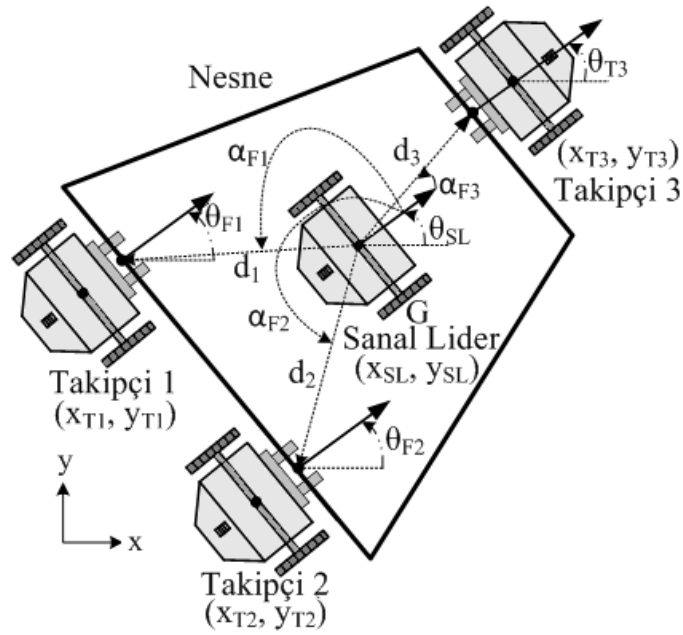
Nesneyi taşıyan robotlar takipçi robotlar ( $T_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$ ) olarak düşünülmüştür. Nesneyi taşıyacak olan robotların sayısı, nesnenin ağırlık merkezi, nesnenin şekli ve robotların nesneyi tutacakları noktaların konumuna göre değişebilir. Her bir takipçinin ağırlık merkezi küresel x-y koordinatlarına göre  $(x_{T_i}, y_{T_i})$  konumuna ve  $\theta_{T_i}$  yönelimine sahiptirler. Sanal lidere göre  $d_i$  uzaklığında ve  $\alpha_{T_i}$  ( $i=1,2,\dots$ ) açısı ile bir formasyon oluşturmaktadırlar.

Nesnenin bir grup gezgin robot tarafından taşınabilmesi için iki durum denenmiştir. Birinci durum da gezgin robotlar Şekil 3.7'de gösterildiği gibi nesneyi merkez noktalarının üzerinde taşımaktadırlar. Bu durumda, nesne gezgin robotların merkez noktalarında taşındığı için taşınan nesne robotun dönel hareketlerinden etkilenmemektedir. Bunlara ek olarak takipçi robot ile nesne arasında oluşacak olan bağıl açıya herhangi bir kısıt (çatal kaldıraçlı gezgin robotlar için formasyon kısıtı (Bkz. Bölüm 4.4)) koymaya gerek kalmamaktadır. Ayrıca gezgin robotlar nesneyi üzerlerinde taşıdıkları için hepsinin yönelimi aynı yöne bakabilmektedir.



Şekil 3. 7 Sanal lider, takipçiler ve robotların merkez noktaları üzerindeki taşınan nesne

İkinci durumda ise gezgin robotlar Şekil 3.8'de gösterildiği gibi çatalı kaldıraçlarının üzerinde nesneyi taşımaktadırlar. Robotlar nesneyi uç noktalarında taşıdığı için, nesne ve takipçi robot arasındaki bağıl açı önem kazanmaya başlamaktadır. Eğer bu bağıl açı sınır bir değerden büyük olursa robotlar nesneyi düşürebilirler. Bunu önlemek için çatal kaldıraçlı gezgin robotlar için bir kısıt konulmalıdır (Bkz. Bölüm 4.4). Her iki durumda da nesne işbirlikli olarak taşınmaktadır.



**Şekil 3. 8** Sanal lider, takipçiler ve robotların çatal kaldıraçları üzerinde taşınan nesne

İşbirlikli taşıma sistemi içerisinde nesnenin taşınabilmesi için sanal lider için bir hareket planı oluşturulmaktadır (Bkz. Bölüm 4). Bu hareket planını oluştururken düğüm noktalarından geçen, formasyonu muhafaza edecek ve kinematik kısıtları sağlayacak şekilde yörüngeler belirlenmektedir. Sanal lider robotun referans koordinat sisteminin merkezi planlanan yörüngeyi izlemektedir. Takipçi robotlar ise sanal lidere göre  $d_i$  uzaklığında  $\alpha_{Ti}$  ( $i=1,2,\dots$ ) açısı ile formasyonu muhafaza edecek şekilde yörünge izlemektedir. Başlangıçta, eşzamanlama amacı için takipçiler Açık Erkin Mimarisi

(OAA) (Martin et al.,1999) üzerinden birbirleri ile haberleşmektedirler. Eşzamanlama bir kez yapıldıktan sonra, takipçiler dağıtık bir tutum göstermektedirler.

Sanal robotun konum bilgisi takipçi robotlar için referans bir girdi olarak hesaba katılmıştır ve takipçi robotlar bu referans girdiyi kullanarak formasyon kısıtları altında kendi yörüngelerini yaratmaktadırlar. Ayrıca, taşınan nesnenin katı gövde kısıtları ve konum bilgisi yüzünden takipçiler kendi yörüngelerini takip ederlerken doğal bir formasyon şekillenmektedir. Takipçi robotlar oluşan formasyonu korumak için yarattıkları yörüngelerini takip etmektedirler ve bu yörüngeleri izleyebilmek için Lyapunov kararlılığı kanıtlanmış asimptotik kararlı bir yörünge izleme denetlemesi (Kanayama et al, 1990) kullanmaktadırlar (Bkz. Bölüm 5).

## BÖLÜM 4

### HAREKET PLANLAMA

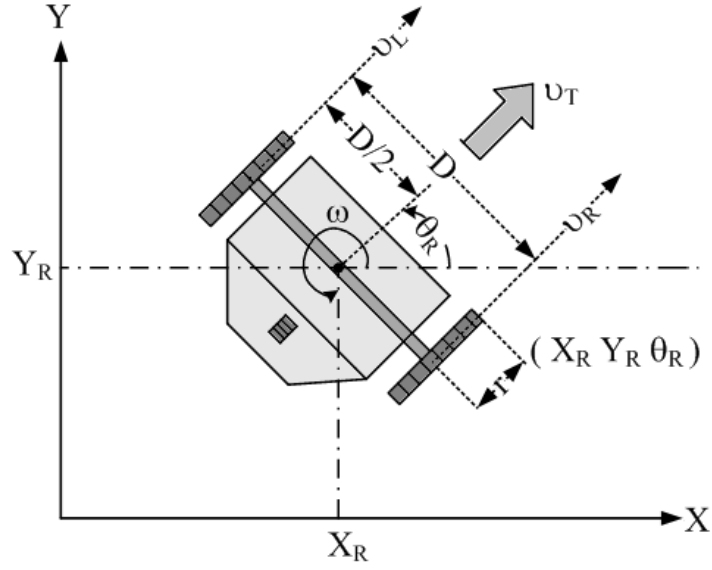
Bu bölümde önerilen işbirlikli taşıma sistemi yaklaşımının hareket planlaması ve yörünge oluşturulması sunulmaktadır. Bilindiği gibi diferansiyel sürürlü gezgin bir robot, tamamen entegrali alınamayan diferansiyel kısıtlara sahip olduğu için holonomik olmayan bir yapıya sahiptir (LaValle, 2006). Gezgin bir robot için düzgün eğri bir yol planının yapılabilmesi için, öncelikli olarak diferansiyel sürürlü holonomik olmayan gezgin robotun kinematik modelinin elde edilmiş olması gereklidir.

#### 4.1. Robot Kinematik Modeli

Yapılan çalışmalarda, taşıma sistemi için diferansiyel sürürlü gezgin robotlar kullanılmıştır. Şekil 4.1’ de Pioneer 3-DX model gezgin robot gösterilmiştir. Bu robot, her biri ayrı motorla döndürülen iki ana tekere ve dengeleme amacıyla monte edilmiş bir serbest tekere sahiptir.



Şekil 4. 1 Pioneer P3-DX gezgin robot



**Şekil 4. 2** Gezgin robotun kinematik parametreleri

Gezgin robot'un kinematik modelini oluşturabilmek için bazı parametreleri tanımlamak gereklidir. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi  $D$ , gezgin robotun sol ve sağ tekerleri arasındaki uzaklık;  $r$  ise, gezgin robotun tekerlerin yarıçap uzunluğudur. Denklem 4.1'de verildiği gibi  $v_x$  ve  $v_y$  gezgin robot'un sırasıyla  $x$  ve  $y$  eksenleri yönündeki hızlarıdır. Bu iki hızın birleşimi  $v_T$  olarak gösterilmekte olup doğrusal hız olarak tanımlanmaktadır.  $v_R$  ve  $v_L$  gezgin robot'un sırasıyla sağ ve sol teker hızlarını vermektedir.  $v_T$  ve  $\omega$  sırasıyla gezgin robotun doğrusal ve açısal hızları olarak nitelendirilmiştir. Bu tanımlamalara dayanarak gezgin robot'un kinematik modeli Denklem 4.1'de gösterildiği gibidir.

$$\left. \begin{aligned}
 v_x &= r \frac{(v_R + v_L)}{2} \cos \theta_R \\
 v_y &= r \frac{(v_R + v_L)}{2} \sin \theta_R \\
 \omega &= \frac{r}{D} (v_R - v_L) \\
 v_T &= \frac{(v_R + v_L)}{2}
 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

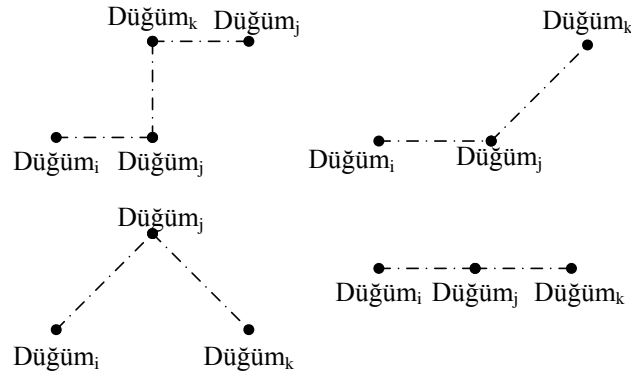
$[x_R, y_R, \theta_R]^t$  gezgin robot'un konum vektörü ve  $[v_x, v_y, \omega]^t$  hız vektörüdür. Bu bilgilerden yola çıkarak ve Denklem 4.1'de verilen eşitliklerin kullanılmasıyla gezgin robotun kinematik modeli Denklem 4.2'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \theta_R & 0 \\ r \sin \theta_R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_T \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

## 4.2.Yörünge Oluşturma

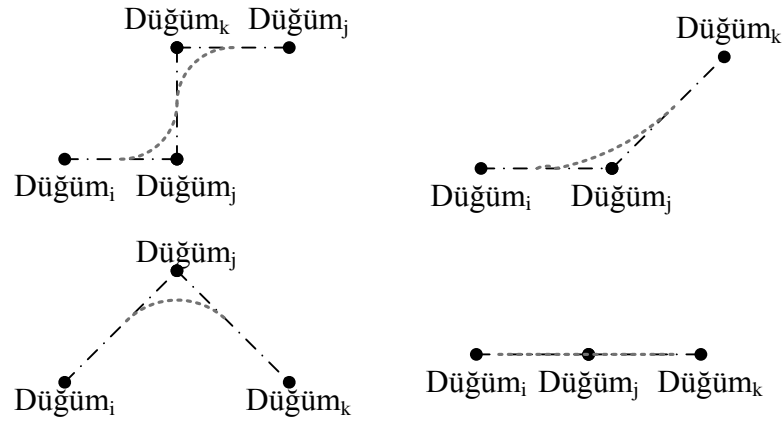
Taşıma sisteminde hareket planı oluşturulurken robotun kinematik kısıtları göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun için bir nesnenin birden fazla robot tarafından taşınması için kısıtlar dikkate alınarak yörünge oluşturulmaktadır. Yörünge oluşturulurken çemberlerden, yaylardan, eğrilerden ve düz çizgilerden yararlanılabilir.

Yörüngeler, verilen düğüm noktaları üzerinden geçecek şekilde oluşturulmaktadır. Robotların, buldukları konumdan hedef konuma ulaşması için öncelikle hangi düğüm noktalarından geçeceği belirlenir. Daha sonra, bu düğüm noktaları arasında robotun sahip olduğu kinematik kısıtlar altında izlemesi mümkün olan yörüngeler oluşturulur.



**Şekil 4. 3** Yol planı içerisindeki kritik düğüm noktaları

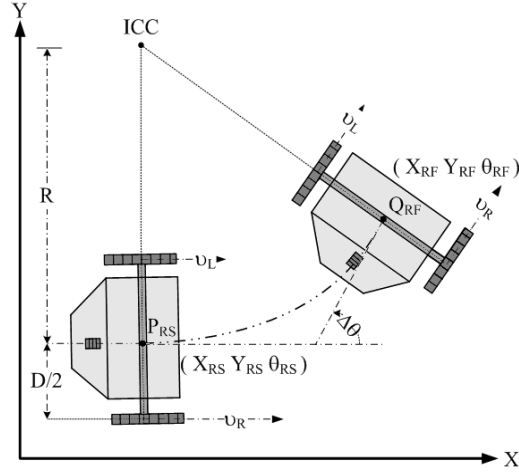
Taşınacak olan bir nesnenin üzerinden geçeceği kritik düğüm noktaları Şekil 4.3’de gösterildiği gibi oluşabilir. Bu düğümler birbirine, düz çizgiler ile bağlanmıştır. Ancak, düz çizgiler tarafından tanımlanan yörünge Şekil 4.4’de gösterildiği gibi düzgün eğri bir yörüngeye dönüştürülmesi gerekmektedir. Böylece gezgin robotun izleyeceği yörünge, holonomik olmayan bir robot’un kinematik kısıtlar altında izleyebileceği sürekli bir yörünge şekline dönüşmektedir. Eğer yörünge Şekil 4.3’de gösterildiği gibi sadece düz çizgilerden oluşmuş olsaydı, gezgin robot düğüm noktalarında holonomik olmayan yapısı yüzünden düğüm noktalarındaki sert geçişleri izleyemeyecektir ve bu geçişlerde çok yüksek bir izleme hatası meydana gelecektir. Bunlara ek olarak gezgin robot düğüm noktalarına yaklaşırken yavaşlamakta, düğüm noktasına geldiğinde durmakta, bir sonraki düğüm noktasına göre yönelimini ayarlamakta ve düğümden ayrılırken yeniden hızlanmaktadır. Bu da zaman kaybına yol açmaktadır.



**Şekil 4. 4** Kritik düğüm noktalarının kullanılarak yolun eğrileştirilmesi

Gezgin robotun diferansiyel sürürlü sağ ve sol tekerlerinin farklı dönüş hızlarına göre (robotun kinematik modelinden de hesaplanabileceği gibi) gezgin robotun konum ve yönelimi değişmektedir (Bkz. Denklem 4.2). Eğer  $v_R \neq v_L$  ise, tekerlerin hızlarına göre robot saat yönünde ya da saat yönünün tersine dönmektedir. Bu dönme Şekil 4.5’de verilen ICC (gezgin robot’un anlık dönme merkezi) merkez noktası etrafındadır.





**Şekil 4. 5** ICC merkezli ve R yarıçaplı eğri yol

Şekil 4.5’de gösterildiği gibi, R, gezgin robot tarafından takip edilen eğri yolun yarıçapıdır. Bu yarıçap, gezgin robot’un teker hızları ile Denklem 4.3’de verilen ilişkiye sahiptir.

$$\left. \begin{aligned} R &= r \frac{v_T}{\omega} \\ R &= \frac{D}{2} \left( \frac{v_R + v_L}{v_R - v_L} \right) \end{aligned} \right\} (4.3)$$

Düzgün eğri bir yörünge oluşturulması üç kısımda incelenmektedir. Bunlar dönmeye başlamadan önceki kısım, dönmeye başladığı kısım ve dönmeyi bitirdikten sonraki kısım. Şekil 4.6’da gösterildiği gibi  $P_S = [X_S, Y_S, \theta_S]^t$  noktası gezgin robotun gerekirse yavaşladığı ve dönmeyi beklediği başlangıç noktasıdır.  $P_{RS} = [X_{RS}, Y_{RS}, \theta_{RS}]^t$  noktası gezgin robotun anlık dönme merkezin de (ICC) R yarıçapı ile dönme işlemine başladığı noktadır.  $P_S$  ve  $P_{RS}$  noktaları arasındaki uzaklık  $L_4$  olarak tanımlanmaktadır.  $Q_{RF} = [X_{RF}, Y_{RF}, \theta_{RF}]^t$  noktası gezgin robotun dönme işlemini bitirdiği nokta olarak tanımlanmaktadır. Son olarak  $Q_F = [X_F, Y_F, \theta_F]^t$  noktası, gezgin robotun eğri yörüngeyi izlemesini tamamen bitirdiği nokta olarak tanımlanmaktadır.  $Q_{RF}$  ve  $Q_F$  noktaları arasındaki uzaklık  $L_4$  uzunluğuna eşittir.



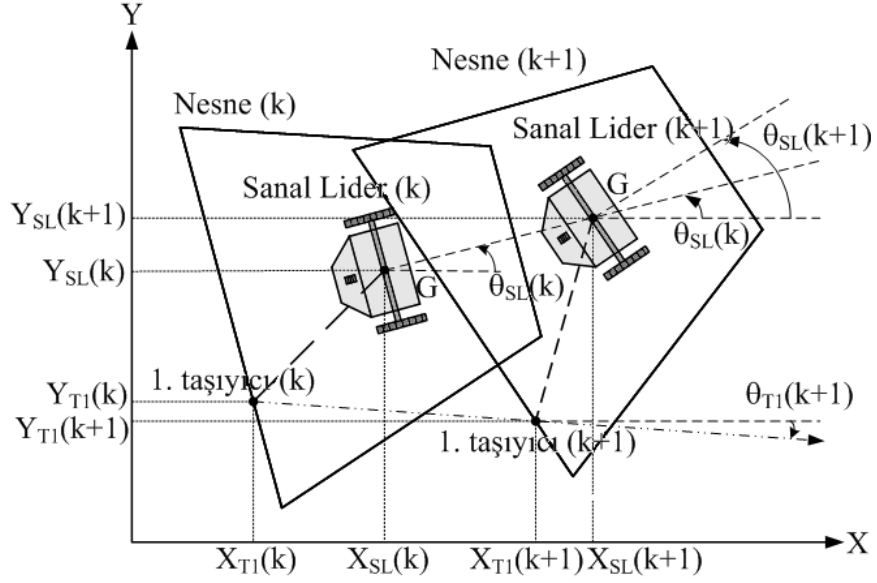
Şekil 4.6’da yansıtıldığı ve Denklem 4.6’da verildiği üzere  $d$  yayı, gezgin robotun  $\varphi$  dönüş açısı ile aldığı toplam yol uzunluğudur. Gezgin robot dönüşü sırasında sürekli olarak konum ve yönelim bilgisini güncellemektedir. Aynı zamanda  $v_T$  doğrusal hızını ve  $\omega$  açısal hızını kontrol etmektedir.

$$\left. \begin{aligned} d &= \int_{t_{PRS}}^{t_{PRS} + t_{QRF}} \frac{v_L + v_R}{2} dt \\ \varphi &= \frac{d}{R} \end{aligned} \right\} (4.6)$$

### 4.3. Yörüngenin Ayırıklaştırması

Gezgin robotun verilen yörüngeyi bilgisayarla kontrol edebilmesi ve kendi içerisindeki yörünge izleme denetleyicisini (Bkz. Bölüm 5) bilgisayarla kullanarak takip edebilmesi için öncelikle yörünge ayırıklaştırılmalıdır. Bu ayırıklaştırma sonucunda  $[X_R(k), Y_R(k), \theta_R(k)]^t$  şeklinde bir referans vektör elde edilmesi gereklidir. Böylece elde edilen referans vektör ile gezgin robot’un (k) anındaki kontrolü gerçekleştirilebilmektedir ve (k+1) anındaki durumu, robotun (k) anındaki bilgisi kullanılıp bulunabilmektedir.

Gezgin robotun konum ve yönelim bilgisi Şekil 4.7’de gösterildiği gibi robotun önceden tahmin edilebilir modeli ile hesaplanabilmektedir. Sanal liderin merkezi  $[x_{SL}, y_{SL}]$ , herhangi bir anda doğrusal ve açısal hızlarına bağımlı olarak değişmektedir. Burada sanal liderin kinematik modelinin herhangi bir kaymaya sahip olmadığı varsayılmaktadır. Böylece, sanal liderin hareketi, katı gövdenin basit kinematiği ile tanımlanabilir.



**Şekil 4.7** Robotun konum tahmin modeli

Sanal liderin konum ve yönelim bilgisi Denklem 4.1’de ve Denklem 4.2’de verilen eşitliklerin entegral alınması ile tahmin edilebilir. Bu entegral alma işlemleri Denklem 4.7, Denklem 4.8 ve Denklem 4.9’da gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
 x_{SL}(k+1) &= x_{SL}(k) + \int_{kt_s}^{(k+1)t_s} v_{SL} \cos \theta(t) dt \\
 &= x_{SL}(k) + v_{SL} \left[ \frac{\sin \theta(t)}{\dot{\theta}(t)} \right] \Big|_{kt_s}^{(k+1)t_s} \\
 &= x_{SL}(k) + \frac{v_{SL}}{\omega_{SL}} [\sin \theta(k+1) - \sin \theta(k)]
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}
 y_{SL}(k+1) &= y_{SL}(k) + \int_{kt_s}^{(k+1)t_s} v_{SL} \sin \theta(t) dt \\
 &= y_{SL}(k) - v_{SL} \left[ \frac{\cos \theta(t)}{\dot{\theta}(t)} \right] \Big|_{kt_s}^{(k+1)t_s} \\
 &= y_{SL}(k) - \frac{v_{SL}}{\omega_{SL}} [\cos \theta(k+1) - \cos \theta(k)]
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}
\theta_{SL}(k+1) &= \theta_{SL}(k) + \int_{kt_s}^{(k+1)t_s} \omega_{SL}(t) dt \\
&= \theta_{SL}(k) + \omega_{SL} t \Big|_{kt_s}^{(k+1)t_s} \\
&= \theta_{SL}(k) + \omega_{SL} t_s
\end{aligned}
\tag{4.9}$$

Entegral alma işlemlerinden sonra  $[x_{SL}(k+1), y_{SL}(k+1), \theta_{SL}(k+1)]^t$  vektörünü verecek olan nümerik algoritma elde edilmiştir. Bu nümerik algoritma Denklem 4.10'da ve Denklem 4.11'de verilmiştir (Koh et. al., 1999).

Eğer  $\omega_{SL} \neq 0$  ise

$$\begin{aligned}
x_{SL}(k+1) &= x_{SL}(k) + \frac{v_{SL}}{\omega_{SL}} [\sin(\theta_{SL}(k+1)) - \sin(\theta_{SL}(k))] \\
y_{SL}(k+1) &= y_{SL}(k) - \frac{v_{SL}}{\omega_{SL}} [\cos(\theta_{SL}(k+1)) - \cos(\theta_{SL}(k))] \\
\theta_{SL}(k+1) &= \theta_{SL}(k) + \omega_{SL} t_s
\end{aligned}
\tag{4.10}$$

Eğer  $\omega_{SL} = 0$  ise

$$\begin{aligned}
x_{SL}(k+1) &= x_{SL}(k) + v_{SL} t_s \cos(\theta_{SL}(k)) \\
y_{SL}(k+1) &= y_{SL}(k) + v_{SL} t_s \sin(\theta_{SL}(k)) \\
\theta_{SL}(k+1) &= \theta_{SL}(k)
\end{aligned}
\tag{4.11}$$

Bu denklemler ile elde edilen  $[x_{SL}(k+1), y_{SL}(k+1), \theta_{SL}(k+1)]^t$  vektörü, sanal lider robot için konum ve yönelim referans girdisi olmaktadır. Ayrıca kullanıcı tarafından sanal lider robot için dışarıdan girilecek olan  $[v_{SL}(k+1), \omega_{SL}(k+1)]^t$  hız vektörü sanal lider robotun referans hız girdisi olacaktır (Bkz. Bölüm 5).

Bu algoritma, takipçi robotlarla ilgili bazı parametrelerin eklenmesi ile ayrıca genişletilebilir. Takipçi robotlarla ilgili parametreler  $d_i$  ve  $\alpha_{Ti}$  değerleridir.  $d_i$  i. takipçi robotun sanal lidere olan Öklid uzaklığını belirtir.  $\alpha_{Ti}$  i. takipçi robotun sanal liderin

yerel eksenine göre yaptığı açığı nitelemektedir. Burada  $i=1,2,3,\dots,n$  'e kadar olmakla beraber işbirlikli taşıma sisteminin izin verdiği takipçi robot sayısını göstermektedir. Takipçi robotlar için genişletilmiş bu yöntem Denklem 4.12'de ve Denklem 4.13'de verilmektedir.

Eğer  $\omega_{SL} \neq 0$  ise

$$\left. \begin{aligned} x_{Ti}(k+1) &= x_{SL}(k+1) + d_i \cos(\alpha_{Ti} + \theta_{SL}(k)) \\ y_{Ti}(k+1) &= y_{SL}(k+1) + d_i \sin(\alpha_{Ti} + \theta_{SL}(k)) \\ \theta_{Ti}(k+1) &= \tan^{-1} \left( \frac{y_{Ti}(k+1) - y_{Ti}(k)}{x_{Ti}(k+1) - x_{Ti}(k)} \right) \end{aligned} \right\} (4.12)$$

Eğer  $\omega_{SL} = 0$  ise

$$\left. \begin{aligned} x_{Ti}(k+1) &= x_{SL}(k+1) + d_i \cos(\alpha_{Ti} + \theta_{SL}(k)) \\ y_{Ti}(k+1) &= y_{SL}(k+1) + d_i \sin(\alpha_{Ti} + \theta_{SL}(k)) \\ \theta_{Ti}(k+1) &= \theta_{SL}(k+1) \end{aligned} \right\} (4.13)$$

Denklem 4.12'den ve Denklem 4.13'den elde edilecek olan  $[x_{Ti}(k+1), y_{Ti}(k+1), \theta_{Ti}(k+1)]^t$  vektörü, takipçi robotların yörünge izleme kontrolü için kullanılan denetleyicisi için konum ve yönelim referans girdisi olacaktır (Bkz. Bölüm 5). Ayrıca takipçi robotların hızları sanal lider robotun hızından farklı olmaktadır. Takipçi robotların hızlarını hesaplayabilmek için Denklem 4.14 kullanılmaktadır.

$$\left. \begin{aligned} v_{x_{Ti}}(k+1) &= \frac{[x_{Ti}(k+1) - x_{Ti}(k)]}{t_s} \\ v_{y_{Ti}}(k+1) &= \frac{[y_{Ti}(k+1) - y_{Ti}(k)]}{t_s} \\ v_{Ti}(k+1) &= \sqrt{v_{x_{Ti}}^2(k+1) + v_{y_{Ti}}^2(k+1)} \\ -\omega_{SL-emb} &\leq \omega_{Ti} \leq \omega_{SL-emb} \end{aligned} \right\} (4.14)$$

Denklem 4.14'den elde edilecek olan  $[\nu_{T_i}(k+1), \omega_{T_i}(k+1)]^t$  hız vektörü takipçi robotların yörünge izleme kontrolü için kullanılan denetleyicisi için referans hız girdisi olacaktır (Bkz. Bölüm 5).

#### 4.4. Takipçi Robotların Sahip Olduğu Kısıtlar

İşbirlikli taşıma sisteminde, oluşturulan yol planı ve düzgün eğri bir yol, sanal lider için yapılmaktadır. Öncelikli olarak oluşturulan yol holonomik olmayan bir robotun rahatça takip edebileceği şekilde olmalıdır. Bunun içinse sanal robotun kinematik kısıtları göz önünde bulundurulmalıdır. Sanal robotun ve diğer diferansiyel sürürlü robotların sahip olduğu kinematik kısıtlar Denklem 4.15 içerisinde  $A(q)\dot{q} = 0$  şeklinde Pfaffian kısıt matrisi olarak gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = 0 \quad (4.15)$$

Bunlara ek olarak sanal robot kendisine verilen düzgün eğri yörüngeyi izlerken, çatal kaldıraçlara sahip takipçi robotların da nesnenin durumuna göre kendi referanslarını takip edebilmesi için takipçi robotların sanal robota göre oluşan bağlı açısına kısıt getirmek gereklidir. Bu kısıt robotların nesneyi düşürmeden çatal kaldıraçları üzerinde taşınması için getirilmektedir. Bunu yapabilmek için Denklem 4.16'de verilen durum göz önüne alınmaktadır.  $\theta_{istenen}$  takipçi robot'un sanal robot ile yaptığı kullanıcı tarafından istenen bağlı açı değeridir.

$$|\theta_{SL}(k+1) - \theta_{T_i}(k+1)| \leq \theta_{istenen} \quad (4.16)$$

Denklem 4.16'de verilen durum, Denklem 4.11 ve Denklem 4.12 kullanılarak  $\omega_{SL} \neq 0$  için yeniden düzenlenir ise Denklem 4.17'yi elde edilmektedir.

$$\left| \frac{-[\cos\theta_{SL}(k+1) - \cos\theta_{SL}(k)] + \frac{d_i}{R} [\sin(\alpha_{Ti} + \theta_{SL}(k+1)) + \sin(\alpha_{Ti} + \theta_{SL}(k))]}{[\sin\theta_{SL}(k+1) - \sin\theta_{SL}(k)] + \frac{d_i}{R} [\cos(\alpha_{Ti} + \theta_{SL}(k+1)) + \cos(\alpha_{Ti} + \theta_{SL}(k))]} \right| \leq \tan(|\theta_{istenen} - \theta_{SL}(k+1)|) \quad (4.17)$$

Denklem 4.17'deki durumu sağlayabilmek için uygun bir R yarıçapı değeri bulunması gereklidir. Bu R yarıçapı sanal robotun izlediği düzgün eğri yörüngenin yarıçapını nitelemektedir ve Denklem 4.4 ve Denklem 4.5 kullanılarak bulunabilmektedir. İşbirlikli taşıma sisteminde sanal robota kullanıcı tarafından sabit bir doğrusal hız uygulanmaktadır. Yukarıdaki kısıtlar, parametreler ve doğrusal hız göz önünde bulundurulunca uygun bir R yarıçapı bulunabilmektedir. Buna bağımlı olarak uygun bir açısal hız değeri de bulunabilmektedir.

#### 4.5. Kritik Noktaların Bulunması

Düzgün eğri yolun oluşturulmasında  $P_S$ ,  $P_{RS}$ ,  $Q_{RF}$ ,  $Q_F$  ve ICC kritik noktalarından önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu noktalar Şekil 4.5'de ve Şekil 4.6'da gösterilen şekiller üzerindeki geometrik ilişkilerden yararlanıp bulunmaktadır. Bu noktaların ifadeleri aşağıdaki denklemler içerisinde belirtilmektedirler.

ICC ( $ICC_x$ ,  $ICC_y$ ) noktası Denklem 4.18'de ifade edilmektedir. Burada mrobotun saat yönü ya da tersinde döndüğünü belirtmektedir. Eğer  $m=1$  ise saat yönünün tersine,  $m=0$  ise saat yönünde dönüyor demektir.

$$\left. \begin{aligned} \theta_s &= \tan^{-1} \left( \frac{Düğüm_{j_y} - Dügüm_{i_y}}{Dügüm_{j_x} - Dügüm_{i_x}} \right) \\ ICC_x &= Dügüm_{j_x} + (-1)^m R \sin(\theta_s) - L_2 \cos(\theta_s) \\ ICC_y &= Dügüm_{j_y} + (-1)^m R \cos(\theta_s) - L_2 \sin(\theta_s) \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$



$P_S(P_{S-x}, P_{S-y})$  noktası Denklem 4.19’de ifade edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} P_{S-x} &= \text{Düğüm}_{j_x} - L \cos(\theta_s) \\ P_{S-y} &= \text{Düğüm}_{j_y} - L \sin(\theta_s) \end{aligned} \right\} (4.19)$$

$P_{RS}(P_{RS-x}, P_{RS-y})$  noktası Denklem 4.20’de ifade edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} P_{RS-x} &= \text{Düğüm}_{j_x} - L_2 \cos(\theta_s) \\ P_{RS-y} &= \text{Düğüm}_{j_y} - L_2 \sin(\theta_s) \end{aligned} \right\} (4.20)$$

$Q_{RF}(Q_{RF-x}, Q_{RF-y})$  noktası Denklem 4.21’de ifade edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} \theta_f &= \tan^{-1} \left( \frac{\text{Düğüm}_{j_y} - \text{Düğüm}_{k_y}}{\text{Düğüm}_{j_x} - \text{Düğüm}_{k_x}} \right) \\ Q_{RF-x} &= \text{Düğüm}_{j_x} + L_2 \cos(\theta_f) \\ Q_{RF-y} &= \text{Düğüm}_{j_y} + L_2 \sin(\theta_f) \end{aligned} \right\} (4.21)$$

$Q_F(Q_{F-x}, Q_{F-y})$  noktası Denklem 4.22’de ifade edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} Q_{F-x} &= \text{Düğüm}_{j_x} + L \cos(\theta_f) \\ Q_{F-y} &= \text{Düğüm}_{j_y} + L \sin(\theta_f) \end{aligned} \right\} (4.22)$$

Bu bölümde önerilen işbirlikli taşıma sistemi yaklaşımının hareket planlaması ve yörünge oluşturulması anlatılmıştır. Sonraki bölümde, bu bölümde elde edilen referans yol bilgilerinin kullanılarak yörünge izleme denetleyicisi anlatılacaktır.2

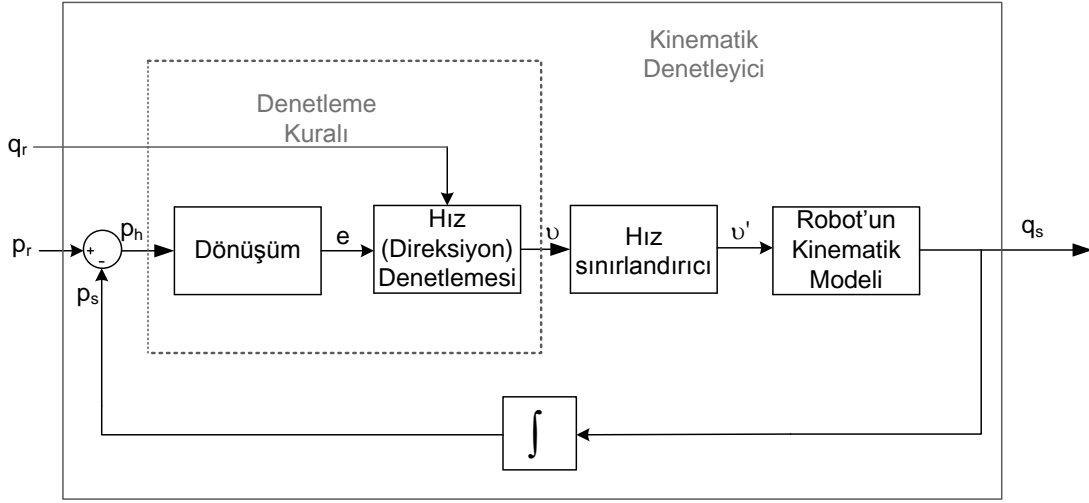
## BÖLÜM 5

### TAKİPÇİ ROBOTLARIN FORMASYON KONTROLÜ

Bu bölümde, Kanayama tarafından önerilen gezgin robotlar için asimptotik kararlı bir yörünge izleme kontrolü sunulmuştur (Kanayama et al., 1990). Gezgin robot için tasarlanan bu denetleyicinin kararlılığı Lyapunov yaklaşımı kullanılarak kanıtlanmıştır (Bkz. Bölüm 5.4). Bu denetleyici, yörünge izleme hatasını sıfırlayabilmektir.

#### 5.1. Yörünge İzleme Denetleyicisinin Yapısı

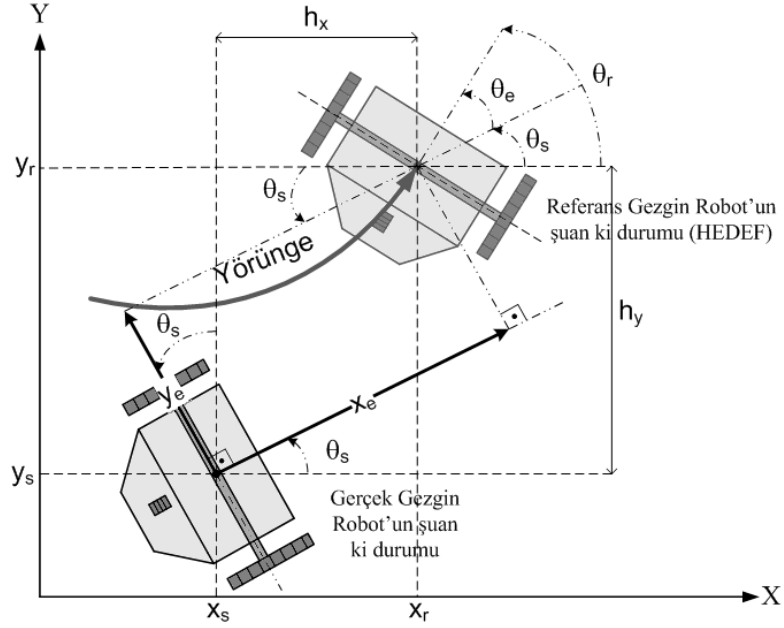
Şekil 5.1’de yörünge izleme denetleyicisinin blok şeması verilmiştir. Robot’un yörünge izleme denetleyicisini niteleyen bu blok şema; hata dönüşümü ve hız (direksiyon) denetlemesini içeren denetleme kuralı bloğundan, hız sınırlandırıcısı bloğundan ve robot’un kinematik modelini gösteren bloktan oluşmaktadır. Yörünge izleme denetleyicisinin girdileri, referans konum, yönelim ve hız bilgilerinden oluşmaktadır.  $p_r=[x_r, y_r, \theta_r]^t$  vektörü gezgin robot için referans konum ve yönelim girdisidir. Bu referans girdi sanal ve takipçi robotlar için izlenecek yörüngeyi ayırıştırılmasıyla elde edilmektedir.  $q_r=[v_r, \omega_r]^t$  vektörü ise referans hız girdisidir. Bu referans girdi ise takipçi robotlar için hesaplanmakta olup (Bkz. Denklem 4.14) sanal robot için kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Yörünge izleme denetleyicisinin çıktısı,  $q_s=[v_s, \omega_s]^t$  hız vektörüdür. Bu vektör robotun sürülmesi istenen doğrusal ve açısal hız değerlerini vermektedir. Denetleyici birimsel olmayan bir geri beslemeye sahip olduğu için  $q_s$  hız çıktısı entegral ile  $p_s=[x_s, y_s, \theta_s]^t$  konum ve yönelim çıktısına dönüştürülmektedir. Bu vektör robotun anlık konum ve yönelim bilgisini vermektedir. Bu konum ve yönelim bilgisi, yapılan çalışma içerisinde kullanılan gezgin robotlardan hem benzetim esnasında hem de gerçek uygulamalar esnasında herhangi bir entegrale ihtiyaç duymadan direk olarak alınabilmektedir.



Şekil 5. 1 Yörünge izleme denetleyicisinin blok şeması

## 5.2. Hata Dönüşümü

Hata dönüşümünde iki tane girdi kullanılmaktadır. Bunlar  $p_r=[x_r, y_r, \theta_r]^t$  referans konum ve yönelim vektörü ile  $p_s=[x_s, y_s, \theta_s]^t$  robotun mevcut konum ve yönelim vektörleridir. Hata dönüşümünün yapılmasının amacı, robotun kendi yerel eksenine göre yörüngeden ne kadar saptığını hesaplayabilmektir. Yörüngeyi takip için robotun bulunması gereken konum ve yönelime sahip olan referans robot tanımlanmaktadır. Gerçek robotun ve referans robotun sahip olduğu konum, yönelim ve hata büyüklükleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 5. 2** Gerçek ve referans robotların sahip olduğu konum, yönelim ve hata elemanları

Şekil 5.2' de gösterilen  $e=[x_e, y_e, \theta_e]^t$ , konum ve yönelim izleme hata vektörüdür. Bu vektörün değeri, geometrik olarak çıkarılan aşağıdaki matematiksel denklemler ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} x_e \cos(\theta_s) - y_e \sin(\theta_s) &= x_r - x_s \\ x_e &= \frac{x_r - x_s + y_e \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} x_e \cos(\theta_s) - y_e \sin(\theta_s) &= x_r - x_s \\ x_e &= \frac{x_r - x_s + y_e \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \end{aligned}} \right\} (5.1)$$

$$\begin{aligned} x_e \sin(\theta_s) + y_e \cos(\theta_s) &= y_r - y_s \\ y_e &= \frac{y_r - y_s - x_e \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} x_e \sin(\theta_s) + y_e \cos(\theta_s) &= y_r - y_s \\ y_e &= \frac{y_r - y_s - x_e \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \end{aligned}} \right\} (5.2)$$

$$\theta_e = \theta_r - \theta_s \quad (5.3)$$

$x_e$  hata elemanının bulunması,

$$\begin{aligned}
 x_e &= \frac{x_r - x_s + \left[ \frac{y_r - y_s - x_e \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \right] \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \\
 x_e \cos(\theta_s) &= x_r - x_s + \left[ \frac{y_r - y_s - x_e \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \right] \sin(\theta_s) \\
 x_e \cos^2(\theta_s) &= x_r \cos(\theta_s) - x_s \cos(\theta_s) + y_r \sin(\theta_s) - y_s \sin(\theta_s) - x_e \sin^2(\theta_s) \\
 x_e [\cos^2(\theta_s) + \sin^2(\theta_s)] &= (x_r - x_s) \cos(\theta_s) + (y_r - y_s) \sin(\theta_s) \\
 \cos^2(\theta_s) + \sin^2(\theta_s) &= 1 \\
 x_e &= (x_r - x_s) \cos(\theta_s) + (y_r - y_s) \sin(\theta_s)
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

$y_e$  hata elemanının bulunması,

$$\begin{aligned}
 y_e &= \frac{y_r - y_s - \left[ \frac{x_r - x_s + y_e \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \right] \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \\
 y_e \cos(\theta_s) &= y_r - y_s - \left[ \frac{x_r - x_s + y_e \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \right] \sin(\theta_s) \\
 y_e \cos^2(\theta_s) &= y_r \cos(\theta_s) - y_s \cos(\theta_s) - x_r \sin(\theta_s) + x_s \sin(\theta_s) + y_e \sin^2(\theta_s) \\
 y_e [\cos^2(\theta_s) + \sin^2(\theta_s)] &= -(x_r - x_s) \sin(\theta_s) + (y_r - y_s) \cos(\theta_s) \\
 \cos^2(\theta_s) + \sin^2(\theta_s) &= 1 \\
 y_e &= -(x_r - x_s) \sin(\theta_s) + (y_r - y_s) \cos(\theta_s)
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

$\theta_e$  hata elemanının bulunması,

$$\theta_e = \theta_r - \theta_s \tag{5.6}$$

Denklem 5.4, Denklem 5.5 ve Denklem 5.6 matris formunda yeniden düzenlenir ise Denklem 5.7'de belirtildiği gibi bir dönüşüm ortaya çıkmaktadır.

$$e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \sin(\theta_s) & 0 \\ -\sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_s \\ y_r - y_s \\ \theta_r - \theta_s \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

Referans ve gerçek konum bilgilerinin farkından elde edilen hata vektörü,  $p_h = [x_h, y_h, \theta_h]^t$  Denklem 5.8’de verildiği gibidir.

$$p_h = (p_r - p_s) = \begin{bmatrix} x_r - x_s \\ y_r - y_s \\ \theta_r - \theta_s \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Hata vektörünün gerçek gezgin robotun yerel eksenine dönüşümünü sağlayan dönüşüm matrisi  $T_e$  Denklem 5.9’da verilmiştir. Robotun yerel eksenine dönüştürülen yeni hata vektörü  $e = T_e \cdot p_h$  şeklinde elde edilebilir.

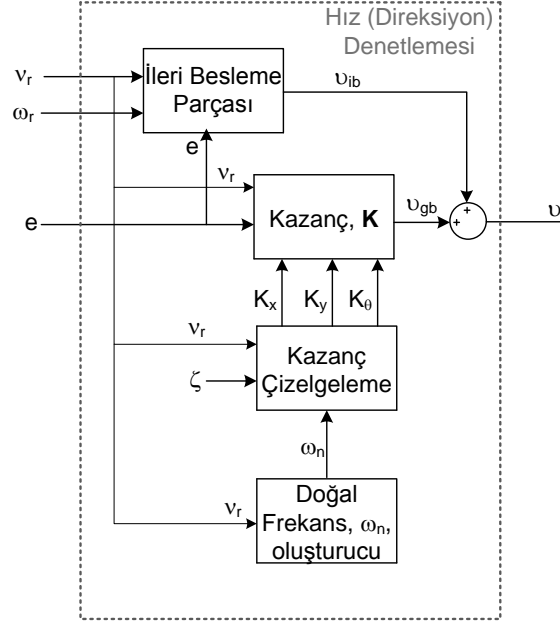
$$T_e = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \sin(\theta_s) & 0 \\ -\sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

### 5.3. Hız (Direksiyon) Denetlemesi

Hız (Direksiyon) denetlemesi, yörünge izleme denetleyicisinin denetleme kuralı olarak da isimlendirilmektedir. Bu denetleme kuralı, Lyapunov kararlılık kriteri kullanılarak oluşturulmaktadır (Bkz. Bölüm 5.4). Yörünge izleme denetleme sistemleri çoğunlukla doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir ve gezgin robota uygun hareketi yaptırabilmek için ileri ve geri beslemeyle uygun kuvveti sağlamak gerekir. Birçok denetleme kuralı aşağıdaki formdadır;

$$u = u_{ileri-besleme} + u_{geri-besleme} = u_{ib} + u_{gb} \quad (5.10)$$

İleri besleme ile gezgin robotun yörüngeyi izlemesi için gerekli girdi sağlanır. Geri besleme ile robotun izleme hatasını kullanılarak gerekli girdi sağlanır.



**Şekil 5. 3** Denetleme kuralının yapısı

Denetleme kuralının yapısı Şekil 5.3’de gösterilmektedir. Bu yapıda ileri besleme, geri besleme, kazanç, kazanç çizelgeleme ve doğal frekans oluşturucu kısımları bulunmaktadır. İleri besleme kısmı için Denklem 5.11’de gösterildiği gibi bir A matrisi tanımlanmış olsun.

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Referans hız vektörü  $q_r = [v_r, \omega_r]^t$  girdisi, denetleme kuralının ileri besleme kısmında kullanılırsa, Denklem 5.12’de belirtildiği gibi bir  $u_{ib} = [u_{ib}, \omega_{ib}]^t$  hız vektörü elde edilmektedir. İleri besleme hareket çıktısı  $u_{ib} = A \cdot q_r$  şeklinde elde edilebilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} u_{ib} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \\ u_{ib} &= \begin{bmatrix} v_{ib} \\ \omega_{ib} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos(\theta_e) \\ \omega_r \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} (5.12)$$

İleri besleme kısmının hareket çıktısını belirledikten sonra, denetleme kuralının geri besleme kısmı incelenmiştir. Geri besleme kısmında Denklem 5.13’de belirtildiği gibi bir K kazanç matrisi verilmektedir. Bu matrisin kazanç elemanları pozitif olup deneme yanılma yöntemi ile bulunabilmektedir.

$$K = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & K_\theta \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Geri besleme kısmı için Denklem 5.14’de gösterildiği gibi bir B matrisi tanımlanmış olsun. Bu matris içerisine girdi olarak; gerçek robotun yerel eksenine göre dönüştürülmüş hata vektörü ile referans doğrusal hız girdisi girmektedir.

$$B = \begin{bmatrix} x_e \\ v_r y_e \\ v_r \sin(\theta_e) \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

B matrisi ve K kazanç matrisi, denetleme kuralının ileri besleme kısmında kullanılırsa, Denklem 5.14’de belirtildiği gibi bir  $u_{gb}=[v_{gb}, \omega_{gb}]^t$  hız vektörü elde edilmektedir. Geri besleme hareket çıktısı  $u_{gb}=K.B$  şeklinde elde edilebilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} u_{gb} &= \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & K_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ v_r y_e \\ v_r \sin(\theta_e) \end{bmatrix} \\ u_{gb} &= \begin{bmatrix} v_{gb} \\ \omega_{gb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x x_e \\ v_r (K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e)) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

İleri ve geri beslemeden elde edilen hareket vektörlerinin toplamı Denklem 5.15’de gösterildiği gibi gezgin robota uygulanacak tek bir hareket vektörünü oluşturmaktadır. Bu hareket vektörü denetleyicinin hız sınırlandırıcısı ile sınırlandırılabilir. Oluşan u hareket vektörü; gerçek robotun yerel eksenine göre dönüştürülmüş hata vektörü ile referans hız vektörü girdisine bağlıdır.



$$\begin{aligned}
u &= u_{ib} + u_{gb} = \begin{bmatrix} v_{ib} + v_{gb} \\ \omega_{ib} + \omega_{gb} \end{bmatrix} \\
u &= \begin{bmatrix} v(e, q_r) \\ \omega(e, q_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos(\theta_e) + K_x x_e \\ \omega_r + v_r (K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e)) \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} u \\ u \end{aligned}} \right\} (5.15)$$

#### 5.4. Lyapunov Kararlılık Analizi

Denetleyicinin kararlılığının gösterilebilmesi için Lyapunov kararlılık analizinin yapılması gereklidir (Kanayama et al., 1990). Böylece denetleyicinin oluşacak izleme hatasını sıfırlayabildiği gösterilebilmektedir. Robotun yerel eksenine göre dönüştürülmüş hata vektörü  $e=[x_e, y_e, \theta_e]^t$  önceden tanımlanmıştı (Bkz. Bölüm 5.2). Bu bilgilerden yararlanarak, dönüştürülmüş hata vektörünün türevi  $\dot{e}=[\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e]^t$  bulunmak istensin.

Denklem 5.4 kullanılarak Denklem 5.16'da gösterildiği gibi  $\dot{x}_e$  bulunabilmektedir.

$$\begin{aligned}
x_e &= (x_r - x_s) \cos(\theta_s) + (y_r - y_s) \sin(\theta_s) \\
\dot{x}_e &= (\dot{x}_r - \dot{x}_s) \cos(\theta_s) + (\dot{y}_r - \dot{y}_s) \sin(\theta_s) - (x_r - x_s) \dot{\theta}_s \sin(\theta_s) + (y_r - y_s) \dot{\theta}_s \cos(\theta_s) \\
&= \dot{x}_r \cos(\theta_s) - \dot{x}_s \cos(\theta_s) + \dot{y}_r \sin(\theta_s) - \dot{y}_s \sin(\theta_s) + \dot{\theta}_s [-(x_r - x_s) \sin(\theta_s) + (y_r - y_s) \cos(\theta_s)] \\
&= \dot{x}_r \cos(\theta_s) + \dot{y}_r \sin(\theta_s) - [\dot{x}_s \cos(\theta_s) + \dot{y}_s \sin(\theta_s)] + \dot{\theta}_s y_e \\
&= \dot{x}_r \cos(\theta_s) + \dot{y}_r \sin(\theta_s) - v_s + \omega_s y_e \\
&= \dot{x}_r \cos(\theta_r - \theta_e) + \dot{y}_r \sin(\theta_r - \theta_e) - v_s + \omega_s y_e \\
&= y_e \omega_s - v_s + \dot{x}_r [\cos(\theta_r) \cos(\theta_e) + \sin(\theta_r) \sin(\theta_e)] + \dot{y}_r [\sin(\theta_r) \cos(\theta_e) - \cos(\theta_r) \sin(\theta_e)] \\
&= y_e \omega_s - v_s + [\dot{x}_r \cos(\theta_r) + \dot{y}_r \sin(\theta_r)] \cos(\theta_e) + [\dot{x}_r \sin(\theta_r) - \dot{y}_r \cos(\theta_r)] \sin(\theta_e) \\
\dot{x}_r \sin(\theta_r) &= \dot{y}_r \cos(\theta_r) \quad (\text{Gezgin robot'un kinematik denklemlerinden}) \\
\dot{x}_e &= y_e \omega_s - v_s + v_r \cos(\theta_e)
\end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} x_e \\ \dot{x}_e \end{aligned}} \right\} (5.16)$$

Denklem 5.5 kullanılarak Denklem 5.17'de gösterildiği gibi  $\dot{y}_e$  bulunabilmektedir.

$$\begin{aligned}
y_e &= -(x_r - x_s) \sin(\theta_s) + (y_r - y_s) \cos(\theta_s) \\
\dot{y}_e &= -(\dot{x}_r - \dot{x}_s) \sin(\theta_s) + (\dot{y}_r - \dot{y}_s) \cos(\theta_s) - (x_r - x_s) \dot{\theta}_s \cos(\theta_s) - (y_r - y_s) \dot{\theta}_s \sin(\theta_s) \\
&= -\dot{x}_r \sin(\theta_s) + \dot{x}_s \sin(\theta_s) + \dot{y}_r \cos(\theta_s) - \dot{y}_s \cos(\theta_s) - \dot{\theta}_s [(x_r - x_s) \cos(\theta_s) + (y_r - y_s) \sin(\theta_s)] \\
&= -\dot{x}_r \sin(\theta_s) + \dot{y}_r \cos(\theta_s) + [\dot{x}_s \sin(\theta_s) - \dot{y}_s \cos(\theta_s)] - \dot{\theta}_s x_e \\
&= -\dot{x}_r \sin(\theta_s) + \dot{y}_r \cos(\theta_s) - \omega_s x_e \\
&= -\dot{x}_r \sin(\theta_r - \theta_e) + \dot{y}_r \cos(\theta_r - \theta_e) - x_e \omega_s \\
&= -x_e \omega_s - \dot{x}_r [\sin(\theta_r) \cos(\theta_e) - \cos(\theta_r) \sin(\theta_e)] + \dot{y}_r [\cos(\theta_r) \cos(\theta_e) + \sin(\theta_r) \sin(\theta_e)] \\
&= -x_e \omega_s - v_s + [-\dot{x}_r \sin(\theta_r) + \dot{y}_r \cos(\theta_r)] \cos(\theta_e) + [\dot{x}_r \cos(\theta_r) + \dot{y}_r \sin(\theta_r)] \sin(\theta_e) \\
&= -x_e \omega_s + v_r \sin(\theta_e)
\end{aligned} \tag{5.17}$$

Denklem 5.6 kullanılarak Denklem 5.18’de gösterildiği gibi  $\dot{\theta}_e$  bulunabilmektedir.

$$\begin{aligned}
\theta_e &= \theta_r - \theta_s \\
\dot{\theta}_e &= \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_s \\
&= \omega_r - \omega_s
\end{aligned} \tag{5.18}$$

Gerçek gezgin robotun verilen hızları mükemmel takip ettiği varsayılırsa, gerçek robotun şuan ki  $q_s = [v_s, \omega_s]^t$  hız vektörü Denklem 5.19’da belirtildiği gibi düşünülebilir.

$$q_s = \begin{bmatrix} v_s \\ \omega_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{5.19}$$

Denklem 5.17, Denklem 5.18 ve Denklem 5.19 matris formunda yeniden düzenlenir ise Denklem 5.20’de belirtildiği gibi dönüştürülmüş hata vektörünün türevi  $\dot{e} = [\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e]^t$  bulunmaktadır. Burada dönüştürülmüş hata vektörünün türevi  $\dot{e}$ ,  $e$ ,  $p_r$  ve  $u(e, q_r)$  ‘e bağlıdır.  $p_r$  ve  $u(e, q_r)$  vektörleri  $t$  zamanına bağımlı olduklarından dolayı hata vektörünün türevi  $\dot{e}$  ‘de  $t$  zamanına ve  $e$  vektörüne bağımlıdır.

$$\dot{e}(t, e) = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos(\theta_e) \\ -x_e \omega + v_r \sin(\theta_e) \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \tag{5.20}$$

Denklem 5.15’de belirtilen ifade Denklem 5.20 içerisinde kullanılır ise Denklem 5.21 elde edilmektedir.

$$\dot{e}(t, e) = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e[\omega_r + v_r(K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e))] - [v_r \cos(\theta_e) + K_x x_e] + v_r \cos(\theta_e) \\ -x_e[\omega_r + v_r(K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e))] + v_r \sin(\theta_e) \\ \omega_r - \omega_r - v_r(K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e)) \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Denklem 5.21 içerisinde gerekli düzenlemeler yapılırsa Denklem 5.22 elde edilmektedir.

$$\dot{e}(t, e) = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\omega_r + v_r(K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e))]y_e - K_x x_e \\ -[\omega_r + v_r(K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e))]x_e + v_r \sin(\theta_e) \\ -v_r(K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e)) \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Denklem 5.23 içerisindeki gibi bir Lyapunov fonksiyonu tanımlansın.

$$V = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2) + \frac{(1 - \cos(\theta_e))}{K_y} \quad (5.23)$$

Eğer  $v_r > 0$  ise,  $e = [0, 0, 0]^t$  kararlı bir eşitlik noktasıdır ve Lyapunov fonksiyonu  $V=0$  ‘dır.  $e > 0$  için Lyapunov fonksiyonuna bakıldığında  $\frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2) > 0$ ,  $K_y > 0$  ve  $(1 - \cos(\theta_e)) > 0$  ‘dır. O zaman Lyapunov fonksiyonu  $V > 0$  olup pozitif tanımlıdır. Eğer tanımlanan fonksiyonun türevi negatif tanımlı çıkar ise denetleyicinin kararlılığı Lyapunov anlamında ispat edilmiş olmaktadır ve hatayı her zaman sıfıra götürecektir olduğunu göstermektedir. Denklem 5.23’de verilen Lyapunov fonksiyonunun türevi Denklem 5.24 içerisinde verilmektedir.

$$\dot{V} = \dot{x}_e x_e + \dot{y}_e y_e + \frac{\dot{\theta}_e \sin(\theta_e)}{K_y} \quad (5.24)$$

Denklem 5.22 içerisinde verilen hata vektörünün türevi  $\dot{e}=[\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e]^t$  Denklem 5.24 içerisinde kullanılır ise Denklem 5.25 elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= \{[\omega_r + v_r(K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e))]y_e - K_x x_e\}x_e \\
 &\quad + \{-[\omega_r + v_r(K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e))]x_e + v_r \sin(\theta_e)\}y_e \\
 &\quad + \frac{[-v_r(K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e))] \sin(\theta_e)}{K_y} \\
 &= (\omega_r y_e + v_r K_y y_e^2 + v_r K_\theta \sin(\theta_e) y_e - K_x x_e) x_e \\
 &\quad + (-\omega_r x_e - v_r K_y y_e x_e - v_r K_\theta \sin(\theta_e) x_e + v_r \sin(\theta_e)) y_e \\
 &\quad + (-v_r K_y y_e - v_r K_\theta \sin(\theta_e)) \frac{\sin(\theta_e)}{K_y} \\
 \dot{V} &= -K_x x_e^2 - v_r K_\theta \frac{\sin^2(\theta_e)}{K_y}
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

Eğer  $v_r > 0$  ise  $\dot{e} = [0, 0, 0]^t$  kararlı bir eşitlik noktasıdır ve Lyapunov fonksiyonun türevi  $\dot{V} = 0$ 'dır.  $\dot{e} > 0$  için Lyapunov fonksiyonunun türevine bakıldığında da  $-K_x x_e^2 < 0$  ve  $-v_r K_\theta \frac{\sin^2(\theta_e)}{K_y} < 0$ 'dır. O zaman Lyapunov fonksiyonu  $\dot{V} < 0$  olup negatif tanımlıdır.

Görüldüğü gibi, verilen kontrol kuralı için Lyapunov fonksiyonunun kendisi pozitif tanımlı ve türevi negatif tanımlıdır. Bundan dolayı, asimptotik kararlı yörünge izleme kontrolü Lyapunov kararlıdır.

### 5.5. Routh–Hurwitz Kararlılık Ölçütü Analizi

$v_r$  ve  $\omega_r$  sınırlı ve sürekli olarak türevi alınabilir olduğu varsayılabilir. Pozitif bir sabit olan  $\delta$  tanımlanmış olsun ve  $t \geq 0$  için  $v_r \geq 0$  olsun.  $K_x$ ,  $K_y$  ve  $K_\theta$  parametrelerini pozitif sabitler olduğu bilinmekte olup  $\dot{v}_r$  ve  $\dot{\omega}_r$  değerleri yeterince ufak oldukları varsayılmaktadır. Bu koşullar altında  $e = [0, 0, 0]^t$  noktası, Denklem 5.22'de verilen ifadenin  $[0, \infty)$  aralığında, düzenli asimptotik kararlı bir noktasıdır. Bunun böyle

olabildiğini gösterebilmek için Denklem 5.22’de verilen ifadeyi  $e=[0, 0, 0]^t$  çevresinde doğrusallaştırmak gereklidir. Doğrusallaştırabilmek için öncelikle  $\dot{e}(t, e) = C(t)e$  şeklinde verilen ifadeden Jacobian matrisi  $C(t)$ ’in elde edilmesi gereklidir.

$C(t)$ , Denklem 5.26’da gösterildiği gibi bulunmaktadır.

$$C(t) = \left( \frac{\partial \dot{e}(t, e)}{\partial e} \right)_{e=[0,0,0]^t} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}_e(t, e)}{\partial x_e} & \frac{\partial \dot{x}_e(t, e)}{\partial y_e} & \frac{\partial \dot{x}_e(t, e)}{\partial \theta_e} \\ \frac{\partial \dot{y}_e(t, e)}{\partial x_e} & \frac{\partial \dot{y}_e(t, e)}{\partial y_e} & \frac{\partial \dot{y}_e(t, e)}{\partial \theta_e} \\ \frac{\partial \dot{\theta}_e(t, e)}{\partial x_e} & \frac{\partial \dot{\theta}_e(t, e)}{\partial y_e} & \frac{\partial \dot{\theta}_e(t, e)}{\partial \theta_e} \end{bmatrix}_{e=[0,0,0]^t} \quad (5.26)$$

Denklem 5.26’da verilen kısmi türev alınırsa Denklem 5.27 elde edilmektedir.

$$C(t) = \begin{bmatrix} -K_x & \omega_r + v_r(2K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e)) & 0 \\ -\omega_r + v_r K_y y_e + K_\theta \sin(\theta_e) & 0 & v_r \cos(\theta_e) \\ 0 & -v_r K_y & -v_r K_\theta \cos(\theta_e) \end{bmatrix}_{e=[0,0,0]^t} \quad (5.27)$$

$$= \begin{bmatrix} -K_x & \omega_r & 0 \\ -\omega_r & 0 & v_r \\ 0 & -v_r K_y & -v_r K_\theta \end{bmatrix}_{e=[0,0,0]^t}$$

Bunun sonrasında,  $C(t)$  sürekli olarak türevi alınabilir ve sınırlı olmaktadır.

$C(t)$  matrisinin karakteristik eşitliği Denklem 5.28’de verildiği gibi olsun.

$$|\lambda I - C| = a_3 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda^1 + a_0 \lambda^0 = 0 \quad (5.28)$$

Verilen karakteristik eşitliğin içerisindeki  $a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$  ve  $a_0$  katsayılarını bulabilmek için Denklem 5.28'de bulunan  $C(t)$  matris elemanlarını Denklem 5.29'de ki gibi düşünülmektedir.

$$C(t) = \begin{bmatrix} -K_x & \omega_r & 0 \\ -\omega_r & 0 & v_r \\ 0 & -v_r K_y & -v_r K_\theta \end{bmatrix}_{e=[0,0,0]^t} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}_{e=[0,0,0]^t} \quad (5.29)$$

Buradan karakteristik eşitliğin katsayılarını bulmak için Denklem 5.30'da verilen eşitliklerden yararlanılmaktadır.

$$\begin{aligned} \lambda^1 x_e &= c_{11}x_e + c_{12}y_e + c_{13}\theta_e \\ \lambda^1 y_e &= c_{21}x_e + c_{22}y_e + c_{23}\theta_e \\ \lambda^1 \theta_e &= c_{31}x_e + c_{32}y_e + c_{33}\theta_e \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \lambda^1 x_e &= c_{11}x_e + c_{12}y_e + c_{13}\theta_e \\ \lambda^1 y_e &= c_{21}x_e + c_{22}y_e + c_{23}\theta_e \\ \lambda^1 \theta_e &= c_{31}x_e + c_{32}y_e + c_{33}\theta_e \end{aligned}} \right\} (5.30)$$

ya da

$$\begin{bmatrix} c_{11} - \lambda^1 & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} - \lambda^1 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} - \lambda^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix}_{e=[0,0,0]^t} = 0$$

Denklem 5.30'da verilen 3 x 3 'lük matrisin determinantı alınırsa Denklem 5.31 ve Denklem 5.32'de verilen ifadeler elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \lambda^3 + \lambda^2(-c_{11} - c_{22} - c_{33}) + \lambda^1(c_{11}c_{33} + c_{22}c_{33} + c_{11}c_{22} - c_{13}c_{31} - c_{12}c_{21} - c_{23}c_{32}) \\ + \lambda^0(-c_{11}c_{22}c_{33} - c_{13}c_{21}c_{32} - c_{12}c_{23}c_{31} + c_{13}c_{22}c_{31} + c_{11}c_{23}c_{32} + c_{12}c_{21}c_{33}) = 0 \end{aligned} \quad (5.31)$$

$$1\lambda^3 + (K_\theta v_r + K_x)\lambda^2 + (K_y v_r^2 + K_x K_\theta v_r + \omega_r^2)\lambda^1 + (K_x K_y v_r^2 + \omega_r^2 K_\theta v_r)\lambda^0 = 0 \quad (5.32)$$

Denklem 5.32,  $C(t)$  matrisinin karakteristik eşitliğidir. Böylece Denklem 5.28 içerisinde verilen  $a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$  ve  $a_0$  katsayıları bu iki denklemin birbiri olan ile ilişkisinden Denklem 5.33'de gösterildiği gibi bulunabilmektedir.

$$\begin{aligned}
 a_3 &= 1 \\
 a_2 &= K_\theta v_r + K_x \\
 a_1 &= K_y v_r^2 + K_x K_\theta v_r + \omega_r^2 \\
 a_0 &= K_x K_y v_r^2 + \omega_r^2 K_\theta v_r
 \end{aligned}
 \tag{5.33}$$

$a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$  ve  $a_0$  katsayıları bulunduktan sonra Denklem 5.28'de belirtilen  $C(t)$  matrisinin karakteristik eşitliği üzerine Routh–Hurwitz kararlılık ölçütü analizi yapılabilmektedir. Bu analiz Denklem 5.34'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 &\begin{array}{l} \lambda^3 \\ \lambda^2 \\ \lambda^1 \\ \lambda^0 \end{array} \left| \begin{array}{cc} a_3 & a_1 & 0 \\ a_2 & a_0 & 0 \\ b_0 & b_1 & 0 \\ b_2 & b_3 & 0 \end{array} \right. \\
 b_0 &= \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_2} \\
 b_1 &= \frac{a_2 \cdot 0 - a_3 \cdot 0}{a_2} = 0 \\
 b_2 &= \frac{b_0 a_0 - b_1 a_2}{b_0} = a_0 \\
 b_3 &= \frac{a_2 \cdot 0 - b_0 \cdot 0}{b_0} = 0
 \end{aligned}
 \tag{5.34}$$

Denklem 5.34'de verilen ifadeler doğrultusunda  $a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$  ve  $a_0$  katsayıları pozitif olduğu sürece ve  $a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$  oldukça, tüm köklerin gerçek kısımları Routh–Hurwitz kararlılık ölçütüne göre negatif olmaktadır. Bunlara ek olarak, Denklem 5.34 içerisinde belirtilen Routh–Hurwitz tablosunun ilk sütununda herhangi bir işaret değişikliği olmadığı sürece, doğrusallaştırılan sistem kararlı yapıdadır ve denge noktasında asimptotik kararlıdır.

Denklem 5.34'de  $a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$  ve  $a_0$  katsayılarının değerleri yerine koyulursa Çizelge 5.1'de belirtilen Routh–Hurwitz tablosu bulunmaktadır.

**Çizelge 5. 1** Asimptotik Kararlı Yörünge İzleme Denetleyicisi için Routh–Hurwitz tablosu

$\lambda^3$	1	$K_y v_r^2 + K_x K_\theta v_r + \omega_r^2$
$\lambda^2$	$K_\theta v_r + K_x$	$K_x K_y v_r^2 + \omega_r^2 K_\theta v_r$
$\lambda^1$	$\frac{K_\theta v_r^3 K_y + K_x K_\theta^2 v_r^2 + K_x^2 K_\theta v_r + K_x^2 \omega_r^2}{K_\theta v_r + K_x}$	0
$\lambda^0$	$K_x K_y v_r^2 + \omega_r^2 K_\theta v_r$	0

Denklem 5.34’de  $a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$  ve  $a_0$  katsayılarının değerleri yerine koyulunca Çizelge 5.1’de belirtilen Routh–Hurwitz tablosu bulunmaktadır.

### 5.6. $K_x$ , $K_y$ ve $K_\theta$ Kazanç Parametrelerinin Belirlenmesi

Bölüm 5.5’de görüldüğü üzere herhangi bir pozitif  $K_x$ ,  $K_y$  ve  $K_\theta$  kazanç parametresi için sistem kararlılığını sürdürmektedir. Gezgin robot’un yörünge izlerken salınım yapmaması ve sisteme karşı yavaş bir cevap vermemesi için uygun kazanç parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin bulunmasında yapılacak olan analizi basitleştirmek için gezgin robotun +x eksenini boyunca sadece  $v_r$  doğrusal hızıyla gittiği varsayılmıştır. Anlatılan durumun matematiksel ifadesi Denklem 5.35’de verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned}
 p_r(t) &= \begin{bmatrix} x_r(t) \\ y_r(t) \\ \theta_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 q_r(t) &= \begin{bmatrix} v_r(t) \\ \omega_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \right\} (5.35)$$



Denklem 5.35'de verilen matematiksel ifade referans doğrusal hız olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte  $|\theta_e| \ll 1$  ve  $|\dot{\theta}_e| \ll 1$  varsayılmaktadır. Verilen bu durumlar altında kazanç parametrelerini bulabilmek için şu yollar izlenmektedir.

Denklem 5.7'de verilen ifade  $\dot{e}(t,e) = C(t)e$  ifadesi içerisinde kullanıldığında Denklem 5.36 elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 \dot{e} &= Ce \\
 \dot{T}_e(p_r - p_s) + T_e(\dot{p}_r - \dot{p}_s) &= CT_e(p_r - p_s) \\
 T_e(\dot{p}_r - \dot{p}_s) &= CT_e(p_r - p_s) - \dot{T}_e(p_r - p_s) \\
 T_e(\dot{p}_r - \dot{p}_s) &= (CT_e - \dot{T}_e)(p_r - p_s) \\
 \dot{p}_r - \dot{p}_s &= T_e^{-1}(CT_e - \dot{T}_e)(p_r - p_s) \\
 \dot{p}_s &= T_e^{-1}(CT_e - \dot{T}_e)(p_s - p_r) + \dot{p}_r
 \end{aligned} \tag{5.36}$$

Denklem 5.35'de verilen ifade  $|\theta_e| \ll 1$  ve  $|\dot{\theta}_e| \ll 1$  durumları göz önünde bulundurulduğunda  $\theta_r=0$  olduğu görülmektedir. Bu durumda  $|\theta_s| = |\theta_e| \ll 1$  ve  $|\dot{\theta}_s| = |\dot{\theta}_e| \ll 1$  olmaktadır. Bahsedilen durumlar Denklem 5.9'da verilen hata dönüşümü matrisi içerisine uyarlanır ise Denklem 5.37'de ifade edilen birim matris elde edilmektedir.

$$T_e = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \sin(\theta_s) & 0 \\ -\sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{|\theta_s| \ll 1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.37}$$

Denklem 5.37'de verilen ifadenin türevi alınırsa Denklem 5.38'de belirtildiği gibi 3 x 3 sıfır matrisi elde edilmektedir.

$$\dot{T}_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.38}$$

Denklem 5.37'de ve Denklem 5.38'de verilen ifadeler Denklem 5.36'da verilen ifade içerisinde uyarlanır ise  $\dot{p}_s$ 'in yeni eşitliği Denklem 5.39'da gösterildiği gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned}
 \dot{p}_s &= T_e^{-1}(CT_e - \dot{T}_e)(p_s - p_r) + \dot{p}_r \\
 \dot{p}_s &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} -K_x & \omega_r & 0 \\ -\omega_r & 0 & v_r \\ 0 & -v_r K_y & -v_r K_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_s - x_r \\ y_s - y_r \\ \theta_s - \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx_r/dt \\ dy_r/dt \\ d\theta_r/dt \end{bmatrix} \\
 \dot{p}_s &= \begin{bmatrix} -K_x & \omega_r & 0 \\ -\omega_r & 0 & v_r \\ 0 & -v_r K_y & -v_r K_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s - v_r t \\ y_s - 0 \\ \theta_s - 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d(v_r t)/dt \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \dot{p}_s = \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \\ \dot{\theta}_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -K_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_r \\ 0 & -v_r K_y & -v_r K_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s - v_r t \\ y_s \\ \theta_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.39}$$

Denklem 5.39'da verilen ifade, bu küçük sapma durumu için gezgin robotun  $x_s$  parametresinin  $y_s$  ve  $\theta_s$  parametrelerinden bağımsız olduğunu göstermektedir. Bu bilgiler ışığında Denklem 5.39'da verilen ifade aşağıdaki gibi basitleştirilebilir:

$$\begin{aligned}
 \dot{y}_s &= v_r \theta_s \\
 \dot{\theta}_s &= -v_r K_y y_s - v_r K_\theta \theta_s \\
 \theta_s &= \frac{\dot{y}_s}{v_r} \quad \text{ve} \quad \dot{\theta}_s = \frac{\ddot{y}_s}{v_r} \\
 \ddot{y}_s &= \dot{\theta}_s v_r \\
 &= (-v_r K_y y_s - v_r K_\theta \theta_s) v_r \\
 &= (-v_r K_y y_s - v_r K_\theta \frac{\dot{y}_s}{v_r}) v_r \\
 &= -v_r^2 K_y y_s - v_r K_\theta \dot{y}_s \\
 \ddot{y}_s + v_r K_\theta \dot{y}_s + v_r^2 K_y &= 0
 \end{aligned} \tag{5.40}$$

Denklem 5.40'da verilen ifade incelendiğinde ikinci dereceden bir sistemin karakteristik eşitliğine benzemektedir.

$$\ddot{y}_s + 2\zeta\omega_n\dot{y}_s + \omega_n = 0 \quad (5.41)$$

Denklem 5.41'de verilen ifadeyi kullanarak,  $\zeta$  sönüm oranını ve  $\omega_n$  doğal frekans değerini Denklem 5.42'de gösterildiği gibi bulunabilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= \frac{K_\theta}{2\sqrt{K_y}} \\ \omega_n &= v_r \sqrt{K_y} \end{aligned} \right\} (5.42)$$

$\zeta$  sönüm oranı, sistemin geçici durum tepkisinin karakteristiğine karar vermektedir. Aşırı sönümlü bir sistem ( $\zeta > 1$ ), yavaş tepki vermektedir. Az sönümlü bir sistem ( $0 \leq \zeta < 1$ ), hızlıca tepki verebilmektedir ancak aşma yapmaktadır. Kritik sönümlü sistem ( $\zeta = 1$ ), yeterince hızlıca cevap verebilmekte ve aşma yapmamaktadır. Denklem 5.42'de verilen ifadeler düzenlenir ise  $K_y$  ve  $K_\theta$  parametrelerini  $\zeta$  ve  $\omega_n$  cinsinden Denklem 5.43'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.  $K_x$  seçimi pozitif ve keyfi seçilebilir.

$$\left. \begin{aligned} K_y &= \left(\frac{\omega_n}{v_r}\right)^2 \\ K_\theta &= \frac{2\zeta\omega_n}{v_r} \\ K_\theta^2 &= 4K_y \quad (\text{Kritik sönümlü sistem için}) \end{aligned} \right\} (5.43)$$

$K_x$ ,  $K_y$  ve  $K_\theta$  kazanç parametrelerinin deneme yanılma yöntemi kullanılarak bulunabileceği önceden belirtilmişti. Yapılan çalışmada bu parametreleri belirleyebilmek için 50-400 mm/sn arası doğrusal hızlarda 50'er artışla çeşitli testler yapılmıştır. Bu testler de  $\zeta = 1$  kritik sönümlü bir sistem düşünülmüştür. Açısal hız değeri 4 derece/saniye (0,06981 radyan/saniye) ve  $K_x$  parametresi 1000 alınarak gezgin robotun doğrusal hızına bağlı 7. dereceden uygun bir  $\omega_n$  fonksiyonu bulunmuştur.  $\zeta$ , açısal hız ve  $K_x$  değerleri sürekli olarak sabit alınmıştır. Gezgin robotun hızına bağlı  $\omega_n$  fonksiyonu kullanılarak  $K_y$  ve  $K_\theta$  parametreleri elde edilmiştir. Böylece bir nevi kazanç

çizelgelemesi yapılmıştır.  $\omega_n$  fonksiyonun ifadesi Denklem 5.44'de ve grafiği Şekil 5.4'de belirtilmiştir.

$$p_1 = 9.651e - 017$$

$$p_2 = -1.448e - 013$$

$$p_3 = 9.149e - 011$$

$$p_4 = -3.129e - 008$$

$$p_5 = 6.147e - 006$$

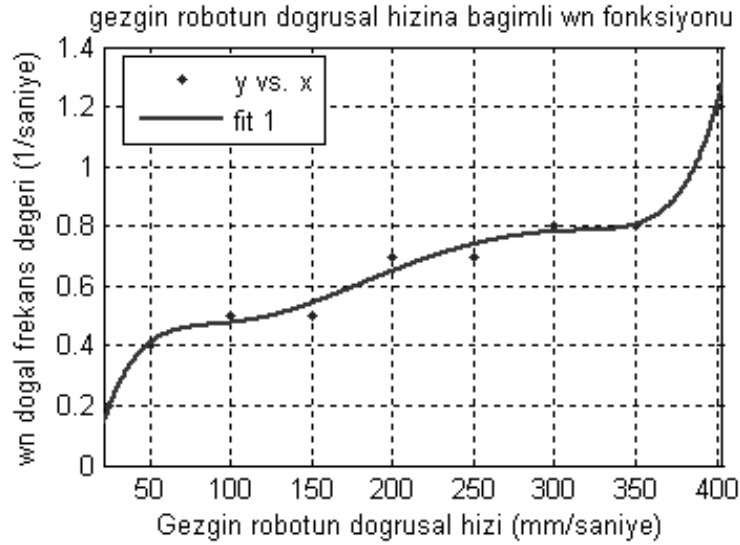
$$p_6 = -0.0006744$$

$$p_7 = 0.03853$$

$$p_8 = -0.4296$$

$$\omega_n(v) = p_1v^7 + p_2v^6 + p_3v^5 + p_4v^4 + p_5v^3 + p_6v^2 + p_7v + p_8$$

(5.44)



Şekil 5. 4 doğrusal hıza bağımlı  $\omega_n$  fonksiyonu

Denklem 5.44'de ve Şekil 5.4'de ifade edilen  $\omega_n$  fonksiyonu 7. dereceden bir polinom olup MATLAB'ın eğri uydurma fonksiyonları kullanılarak oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlar için gerekli olan veri kümesi MobileSim benzetim ortamında gezgin robot üzerinde yapılan çeşitli testlerle bulunmuştur.

Bunlara ek olarak,  $K_x$ ,  $K_y$  ve  $K_\theta$  kazanç parametrelerinin etkilerinin analizi (Kanayama et al, 1990) referansı içerisinde incelenebilir.

### 5.7. Hız Sınırlandırıcısı

Hız/direksiyon denetlemesinin çıktısı olan  $u$  hareket vektörü (Bkz. Denklem 5.15) robotun kinematik modeline direk olarak uygulanabilir ancak robota uygulanacak hız girdileri robotun ulaşamayacağı değerler de ya da robotun donanımına zarar verecek seviyelerde olabilir. Ayrıca yüksek doğrusal ve açısal hız değerleri robotun tekerlerinde kayma ve patinaj etkisi yaratabilmektedir. Bunu önlemek için  $u$  hareket girdisi bir hız sınırlandırıcısı ile sınırlandırılmaktadır. Yapılan çalışmada  $u$  hareket girdisinin robotun gerçek hız değerlerine yakın bir değere sınırlandıran ifade Denklem 5.45’de verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} v(e, q_r) * 0.85 \leq v'(e, q_r) \leq v(e, q_r) * 1.15 \\ - \omega_{enb} \leq \omega'(e, q_r) \leq \omega_{enb} \end{aligned} \right\} (5.45)$$

Denklem 5.45’den elde edilecek olan yeni hareket vektörü  $u'$  olarak nitelendirilmiştir (Bkz. Şekil 5.1). Robot’un kinematik modeline uygulanmaya artık hazır olan  $u'$  hareket vektörü Denklem 5.46’da verilmiştir.

$$u' = \begin{bmatrix} v'(e, q_r) \\ \omega'(e, q_r) \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

### 5.8. Hareket Girdisinin Robota Uygulanması

Bir önceki bölümde elde edilen  $u'$  hareket vektörü robotun kinematik modeline uygulanacak hareket girdisi olmaktadır. Bu vektör içerisindeki doğrusal ve açısal hız değerlerini diferansiyel sürürlü holonomik olmayan gezin robota uygulayabilmek için robotun sağ ve sol teker hızları cinsinden ifade etmek gerekmektedir. Bu ifadeler

robotun kinematik denklemlerinden bulunmuş (Bkz. Bölüm 4.1) ve Denklem 5.47’de ifade edilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} v_L &= v' - \frac{D\omega'}{2r} \\ v_R &= 2v' - v_L \end{aligned} \right\} (5.47)$$

Bu bölüm de Kanayama tarafından önerilen gezgin bir robotun asimptotik kararlı yörünge izleme denetlemesi anlatılmıştır ve denetleyicinin Lyapunov kararlı olduğu gösterilmiştir. Takipçi robotların, kendi oluşturdukları yörüngelerden gelen bilgiyi denetleyicileri içerisinde nasıl kullanacakları ifade edilmiştir. Bir sonraki bölümde benzetim ortamı ve gerçek dünya uygulamaları ile önerilen işbirlikli taşıma yaklaşımının etkinliği gösterilmiştir.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE UYGULAMALAR

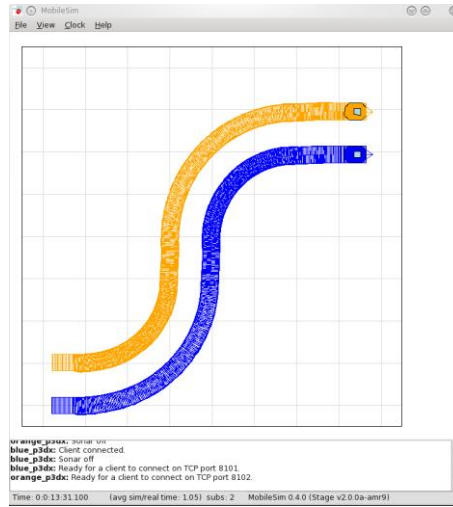
Bu bölümde, önerilen yaklaşımın doğruluğunu ve etkinliğini göstermek üzere benzetim ortamı ve gerçek ortamda gerçekleştirilen uygulamalar sunulmaktadır. Yapılan uygulamalarda holonomik olmayan diferansiyel sürüş ve çatal kaldıraçlara sahip çoklu gezgin robot sistemleri kullanılmıştır. Yapılan uygulamalarda, gezgin robotların kendi konumlarını belirleyebilmesi gerekmektedir. Hassas konumlandırma için geliştirilmiş çeşitli yöntemler robot sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki uygulamalarda, benzetim ortamları için adım sayacı ve gerçek ortamda ise SICK lazer mesafe algılayıcılarının kullanıldığı hassas bir konumlandırma sağlayan ARNL (Mobile Robots, Inc., 2010) yazılımı kullanılmıştır. Diferansiyel sürüslü holonomik olmayan çoklu otonom gezgin robotlar için önerilen işbirlikli taşıma yaklaşımı, Linux işletim sistemi üzerinde C++ programlama dili kullanılarak kodlanmış; P3-DX robotlar kullanılarak gerçek dünya uygulamaları ve MobileSim benzetim ortamı deneyleri ile test edilmiştir.

Benzetim ve gerçek sistemler üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar iki kısımda yapılmıştır. Birinci kısımda gezgin robotlar, üstlerindeki özel mekanizmalar vasıtasıyla nesneyi merkez noktalarında destekleyerek ve nesne ile temas noktası etrafında robotların dönüşünü serbest bırakarak taşımışlardır. İkinci kısımda ise robotlar nesneyi çatal kaldıraçlarının üzerinde taşımışlardır. Problemin doğası gereği, robotların nesneye göre dönüşüne kısıt getirilmiştir. Benzetim deneyleri içerisinde iki, üç ve dört robot kullanılarak değişik formasyon yapılarında önerilen sistem test edilmiştir. Gerçek sistemler üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar da iki robot kullanılmıştır.

## 6.1. Uygulama Alt Yapısı

### 6.1.1. MobileSim benzetim yazılımı

MobileSim ActivMedia firmasının (Mobile Robots, Inc., 2010) ürettiği Pioneer-3DX model gezgin robotlarla tamamen uyumlu bir şekilde çalışan ve bu robotlarla deney yapabilmek için bir platform sağlayan bir benzetim yazılımıdır. Pioneer-3DX modeli gezgin robotların programlanmasında, geniş bir yazılım geliştirme kütüphanesi sağlayan C++ diliyle yazılmış ARIA kütüphanesi (Mobile Robots, Inc., 2010) kullanılmıştır. Mapper3 (Mobile Robots, Inc., 2010) ile tasarlanan ortam haritalarında çalışma olanağı sunabilmektedir. MobileSim de gerçekleştirilen bir benzetim ortamı görüntüsü Şekil 6.1 içerisinde verilmektedir.



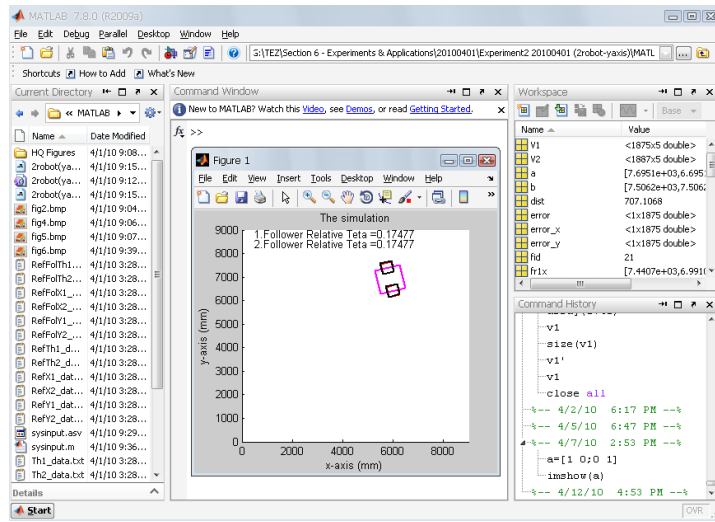
Şekil 6. 1 örnek bir MobileSim benzetim ortamı görüntüsü

### 6.1.2. MATLAB yazılımı

MATLAB (MATris LABORatuarı) MathWorks firmasının (The MathWorks, Inc. 2010) geliştirdiği matris ve nümerik hesaplamaları, 2B ve 3B grafikler çizdirip



görüntüleyebilen ve üst düzey bir programlama yapısına sahip, bütünleşik bir hesaplama ve benzetim ortamıdır. MATLAB 'ın hazır fonksiyonları ve kendi yazdığınız fonksiyon parçacıklarını kullanıp görsel bir benzetim ortamı hazırlanabilmektedir. Örnek bir MATLAB benzetim ortamı görüntüsü Şekil 6.2 içerisinde verilmektedir.



Şekil 6. 2 örnek bir MATLAB benzetim ortamı görüntüsü

### 6.1.3. Gezgin robotların donanımsal özellikleri

Gerçek sistemler üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar esnasında Şekil 6.3'de gösterildiği gibi, ActivMedia firmasının (Mobile Robots, Inc., 2010) ürettiği Pioneer modeli P3-DX diferansiyel sürürlü holonomik olmayan gezgin robotlar kullanılmıştır. Bu robot önde iki adet diferansiyel sürürlü her biri ayrı servo motorla sürülen tekerlere ve arkada serbestçe dönebilen dengeleyici bir tekere sahiptir. Robot'un boyutları 44,5 cm. x 39,3 cm. x 23,7 cm. boyutlarındadır, teker yarıçapı yaklaşık 9,5 cm. boyutundadır. Ortamın algılanabilmesi için SICK marka 180 derecelik bir bölgede 1 derecelik aralıklarla lazer ışını yayıp mesafe bilgisi veren bir hassas mesafe algılayıcısına sahiptir. Ayrıca önünde 8 tane ve arkasında 8 tane olmak üzere 16 adet ses üstü mesafe algılayıcısına da sahiptir. Robot üzerinde, ortamı görsel olarak

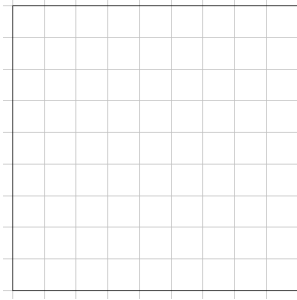
algılayabilmek için dönme, eğilme ve yakınlaştırma yapılabilen renkli bir CCD kamera bulunmaktadır. Bağlı konum bilgisini hesaplayabilmek için, her bir diferansiyel sürüslü tekere monte edilmiş adım sayacı bulunmaktadır. Yönünü algılaması için üzerinde sayısal bir pusula vardır. Arkadan herhangi bir çarpışma olduğunda algılanabilmesi için tampon anahtarlarına sahiptir. Son olarak, uygulamalarda çatal kaldırıcı olarak kullanılan ve nesnelerin tutup taşınması için 2 serbestlik derecesine sahip tutucu mekanizmasına sahiptir. Robotların içerisinde, Pentium tabanlı bir bilgisayar ve Linux işletim sistemi bulunmaktadır. Kablosuz Ethernet kullanılmasıyla robotların bilgisayarlarına ağ üzerinden ulaşmak ve robotların kendi aralarında haberleşmesi mümkün olmaktadır.



**Şekil 6. 3** Pioneer P3-DX diferansiyel sürüslü holonomik olmayan ve çatal kaldırıcıya sahip gezgin robot

#### **6.1.4. Uygulama ortamının özellikleri**

Önerilen yaklaşımın test edilmesi amacıyla, hem benzetim hem de gerçek sistemler üzerinde gerçekleştirilen uygulamalarda iki farklı ortam kullanılmıştır. İki ortamın da ortak özelliği dörtgensel bir şekle sahip olmasıdır. Ancak gerçek dünya uygulamasında yer kısıtlı olduğundan gerçek dünya uygulamasının ortam haritasının boyutları benzetim ortamına göre biraz daha küçüktür.



**Şekil 6. 4** Mapper3 ile oluşturulan benzetim ortamı haritası

Benzetim deneylerinde, Şekil 6.4’de gösterildiği gibi Mapper3 yazılımıyla hazırlanan bir ortam haritası kullanılmıştır. Benzetimlerde kullanılan engelsiz ortam 9000mm x 9000mm. Gerçek dünya uygulamalarında, Şekil 6.5’de gösterildiği gibi 7260mm x 6655mm boyutlarına bir ortam kullanılmıştır.



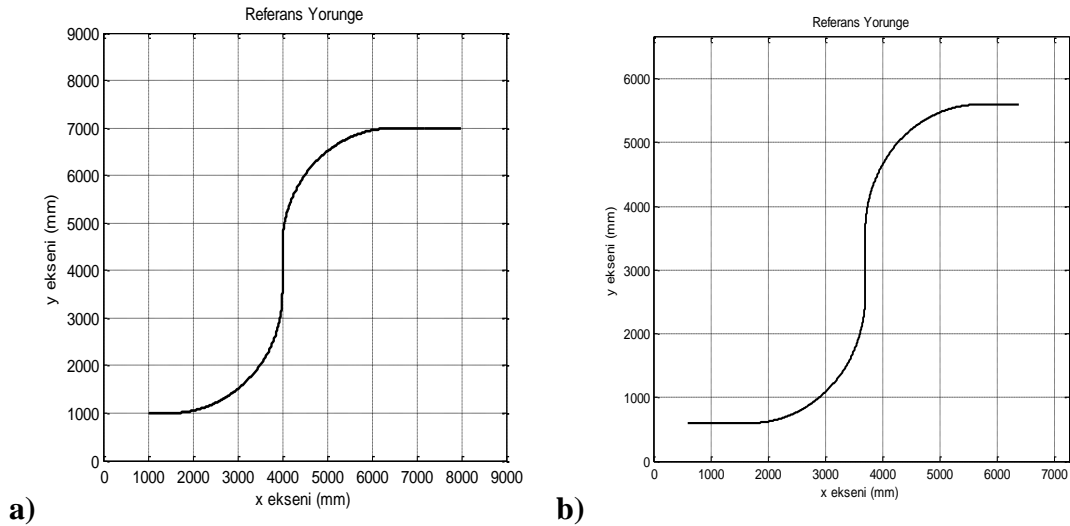
**Şekil 6. 5** Gerçek dünya uygulaması ortamı

## **6.2. Deneyler ve Sonuçlar**

Bu kısımda bir grup gezgin robotun işbirlikli olarak, bir nesneyi farklı kurgular altında taşımaları test edilerek önerilen yaklaşımların geçerliliği kanıtlanmıştır.

Benzetim deneylerinde iki, üç ve dört robotun kullanıldığı uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Gerçek sistemler üzerindeki uygulamalarda ise, laboratuvar ortamında sahip olunan çalışır durumdaki iki robot kullanılmıştır.

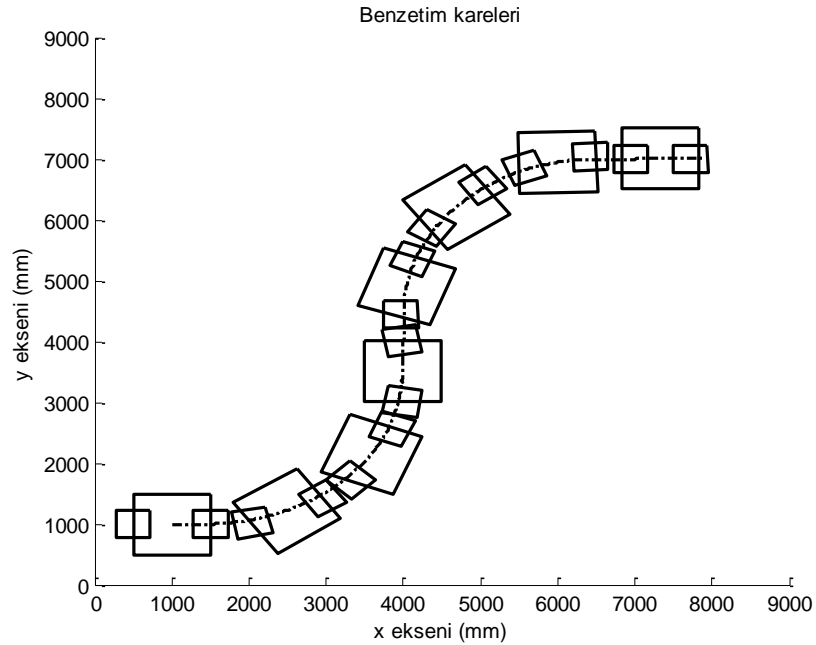
Benzetimlerde (1000mm, 1000mm), (4000mm, 1000mm), (4000mm, 7000mm), (8000mm, 7000mm) ve gerçek dünyada (1000mm, 1000mm), (3700mm, 1000mm), (3700mm, 5600mm), (6400mm, 5600mm) düğüm noktalarını kullanarak sanal lider için bir yörünge oluşturulmuştur. Benzetim ortamı için verilen referans bir yörünge Şekil 6.6-a'da ve gerçek dünya uygulamasında kullanılan referans yörünge Şekil 6.6-b'de gösterilmiştir. Takipçi robotlar için yörünge, sanal lider için planlanan yörüngeyi ayırklaştırması sonucu elde edilen veriden (Bkz. Denklem 4.10-11) yararlanarak sanal lidere göre  $d_i$  uzaklığında  $\alpha_{Ti}$  ( $i=1,2,\dots$ ) açısı ile kendileri tarafından hesaplanmıştır (Bkz. Denklem 4.12-13). Yörüngelerini takip ederlerken, kendi referans hız girdilerini şuan ki ve bir sonraki konumuna göre hesaplamışlardır (Bkz. Denklem 4.14). Sanal lider, 50 mm/sn doğrusal ve  $5^0$ /sn açısal hızlara sahiptir.  $\theta_{istenen}$   $20^0$  olarak seçilmiştir.



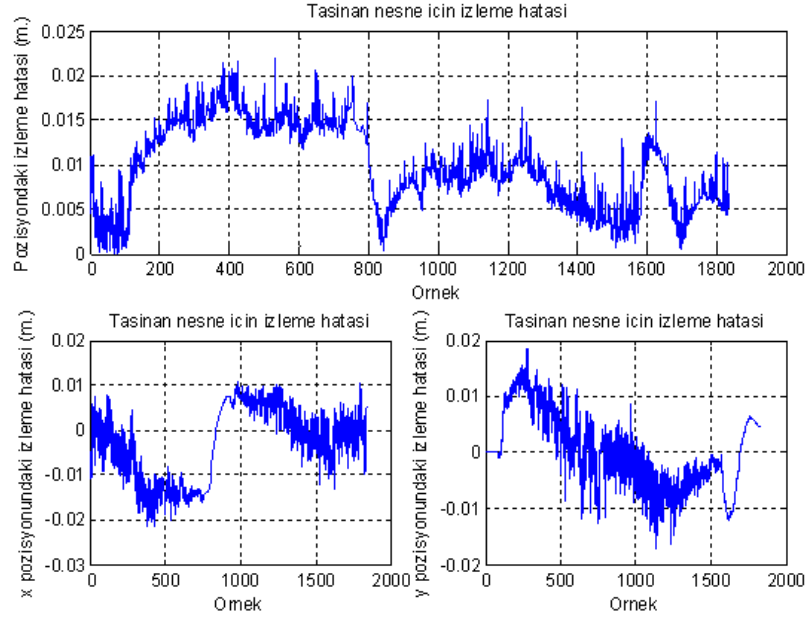
**Şekil 6. 6 a)** Benzetim ortamı için referans yörünge, **b)** Gerçek dünya uygulaması için referans yörünge

### 6.2.1. Benzetim ortamında iki robotlu dikey nesne taşıma

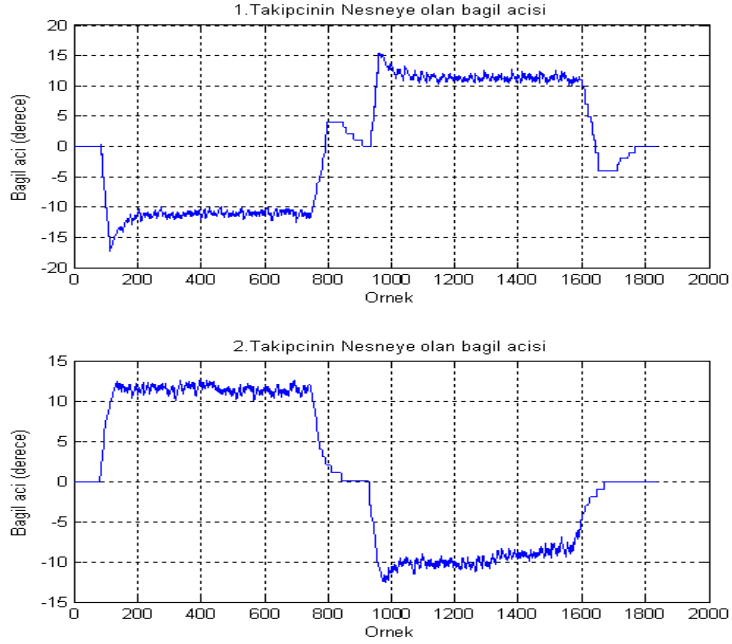
Benzetim ortamında dikdörtgen şeklindeki bir nesnenin dikey bir şekilde iki takipçi robot tarafından taşınması beklenmektedir. Şekil 6.7’de MobileSim benzetim ortamından elde edilen veriler kullanılarak MATLAB benzetim ortamında yansıtılan deney sonucundaki nesne ve robotların hareket izleri görülmektedir. Taşınan nesnenin ağırlık merkez noktası referans yörüngeyi izlemiştir. Bu noktanın x ve y yönlerindeki ve nesnenin hareket yönü doğrultusundaki izleme hataları Şekil 6.8’de gösterilmiştir. İzleme hatalarının 25mm’den küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.9’da takipçilerin nesneyle olan bağıl açıları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bağıl açı  $25^{\circ}$ ’den küçük ve istenen değer aralığı  $[-\theta_{istenen}, \theta_{istenen}]$  içerisindeydir. Şekil 6.10’da takipçi robotların alınan her 200 hız değerinin ortalaması ile hesaplanan doğrusal hızlar verilmiştir. Takipçi robotlar yörüngelerinin benzerliklerinden dolayı genelde 50 mm/sn hızla gitmişlerdir.



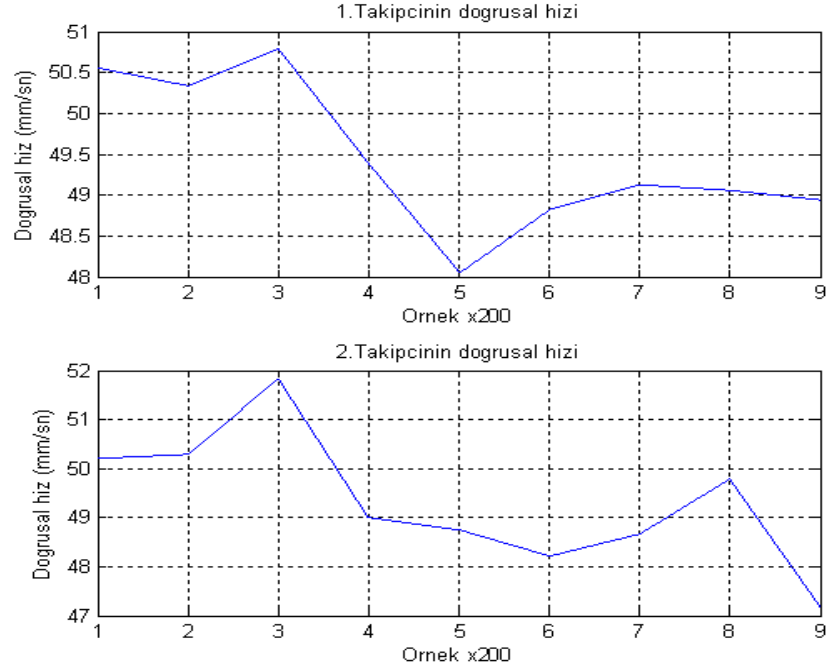
Şekil 6. 7 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için benzetimden film kareleri



**Şekil 6. 8** Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için nesnenin izleme hataları (mm)



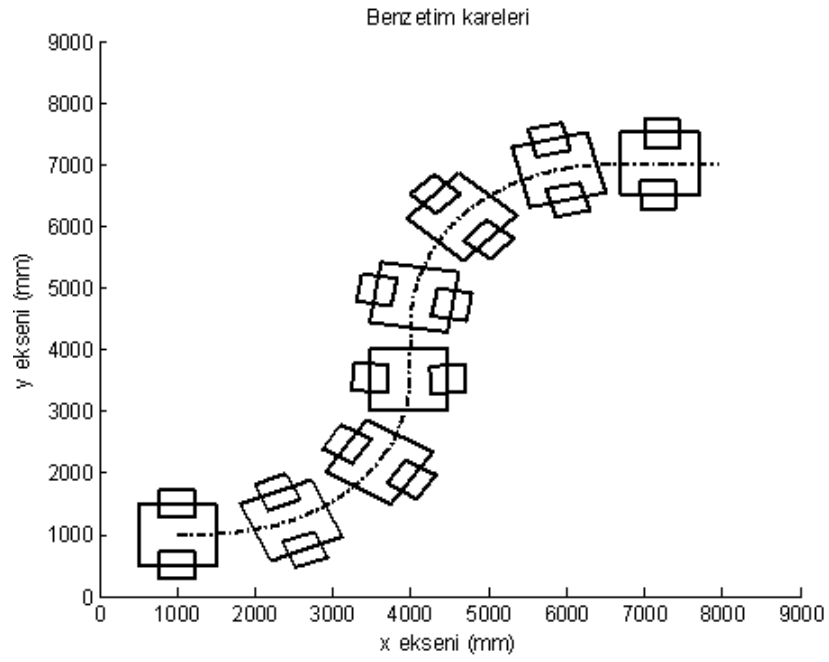
**Şekil 6. 9** Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağlı açıları (derece)



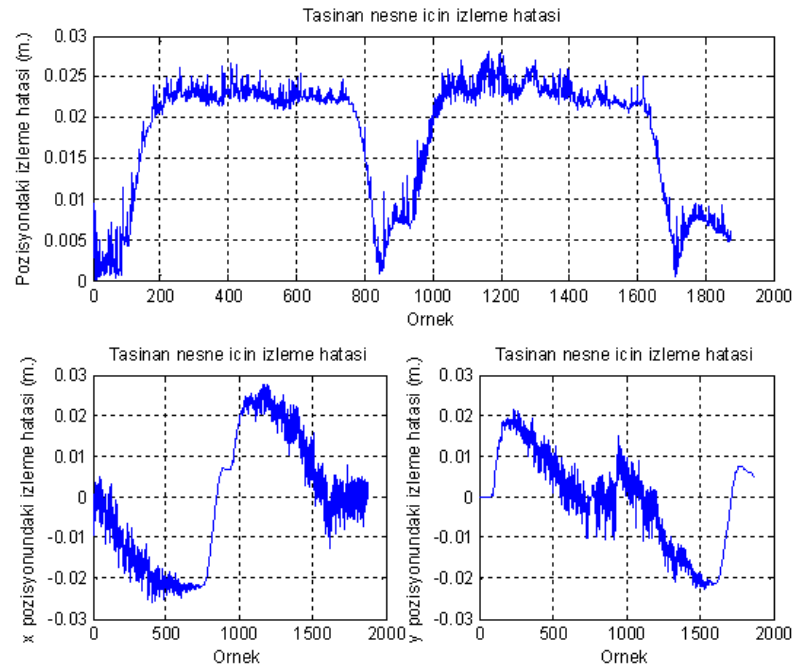
**Şekil 6. 10** Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn)

### 6.2.2. Benzetim ortamında iki robotlu paralel nesne taşıma

Benzetim ortamında dikdörtgen şeklindeki bir nesnenin paralel bir şekilde iki takipçi robot tarafından işbirlikli olarak taşınması beklenmektedir. Şekil 6.11’de MobileSim benzetim ortamından elde edilen veriler kullanılarak MATLAB benzetim ortamında yansıtılan deney sonucunda ki nesne ve robotların hareket izleri görülmektedir. Taşınan nesnenin ağırlık merkez noktası referans yörüngeyi izlemiştir. Bu noktanın x ve y yönlerindeki ve nesnenin hareket yönü doğrultusundaki izleme hataları Şekil 6.12’de gösterilmiştir. İzleme hatalarının 30mm’den küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.13’de takipçilerin nesneyle olan bağıl açıları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bağıl açı  $4^0$ ’den küçüktür. Şekil 6.14’de takipçi robotların her 200 örneğin toplamıyla hesaplanan ortalama doğrusal hızları verilmiştir. Takipçiler yarattıkları eğri yörüngelerini izlerken, bir takipçi yavaş giderken diğeri ona göre daha hızlı gitmektedir.

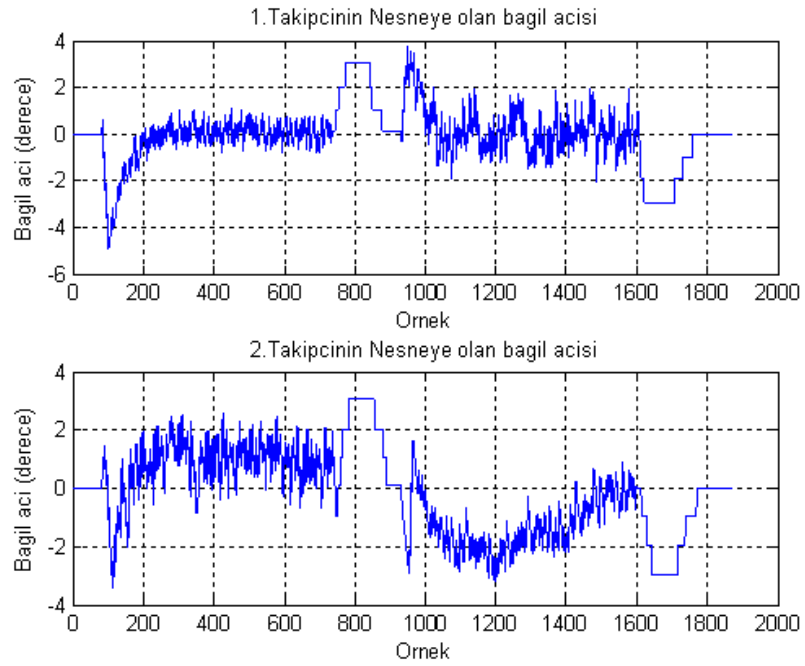


Şekil 6. 11 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için benzetimden film kareleri

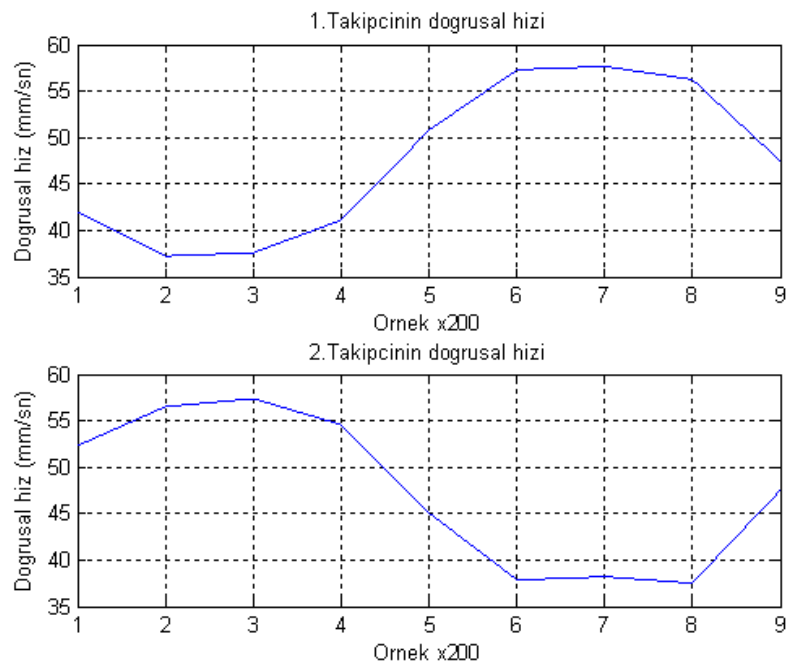


Şekil 6. 12 Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için nesnenin izleme hataları (mm)





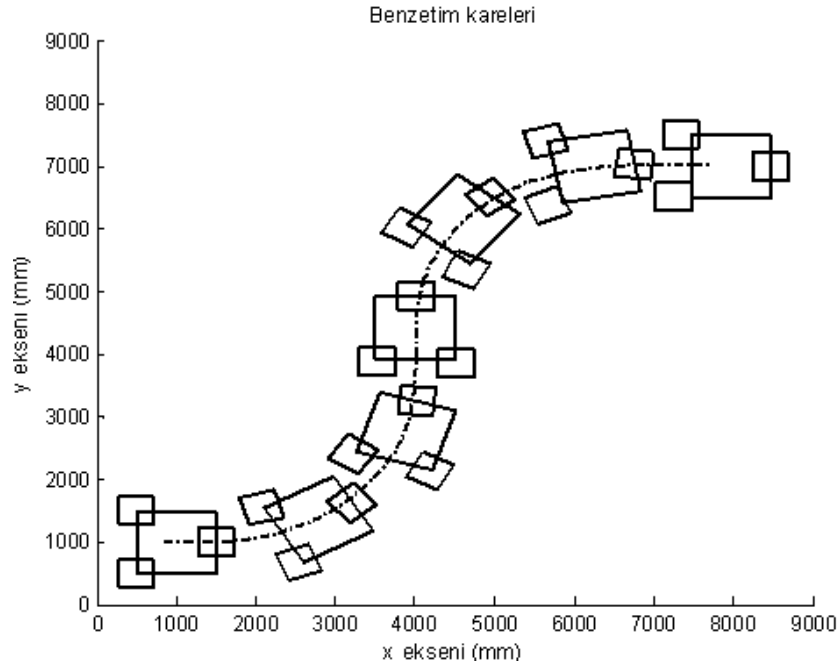
**Şekil 6. 13** Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağıl açıları (derece)



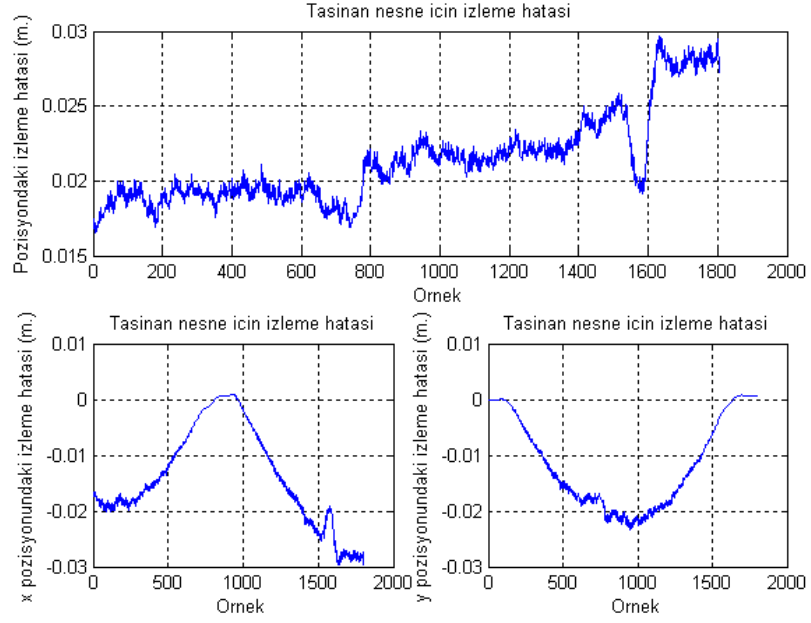
**Şekil 6. 14** Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn)

### 6.2.3. Benzetim ortamında üç robotlu nesne taşıma

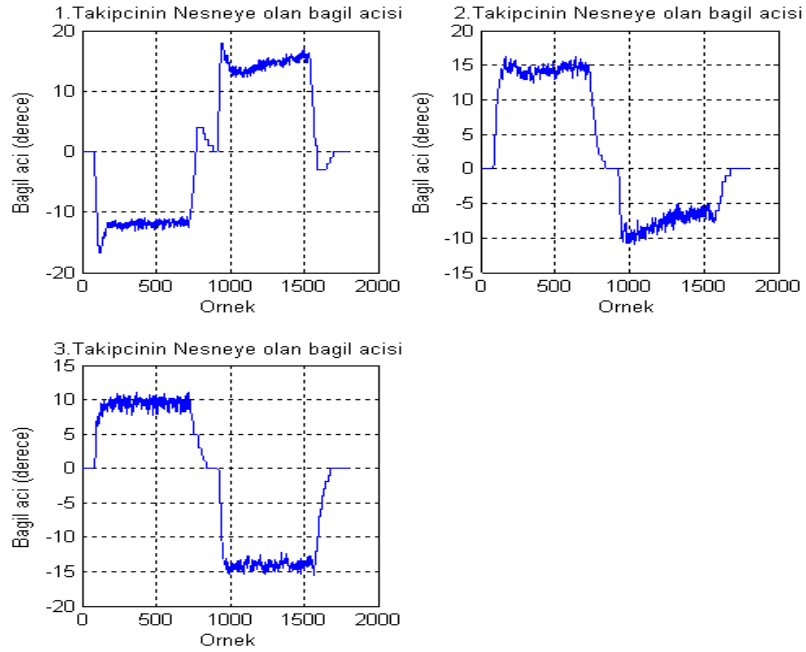
Benzetim ortamında dikdörtgen şeklindeki bir nesnenin 3 takipçi robot tarafından işbirlikli olarak taşınması beklenmektedir. Şekil 6.15’de MobileSim benzetim ortamından elde edilen veriler kullanılarak MATLAB benzetim ortamında yansıtılan deney sonucunda ki nesne ve robotların hareket izleri verilmektedir. Taşınan nesnenin ağırlık merkez noktası referans yörüngeyi izlemiştir. Bu noktanın x ve y yönlerindeki ve nesnenin hareket yönü doğrultusundaki izleme hataları Şekil 6.16’da gösterilmiştir. İzleme hatalarının 30mm’den küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.17’de takipçilerin nesneyle olan bağıl açıları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bağıl açı  $20^0$ ’den küçüktür. Şekil 6.18’de takipçi robotların her 200 örneğin toplamıyla hesaplanan ortalama doğrusal hızları verilmiştir. Takipçiler yarattıkları eğri yörüngelerini izlerken, kendi referans hızlarını oluşturdukları yörüngeye göre hesaplayabilmektedirler.



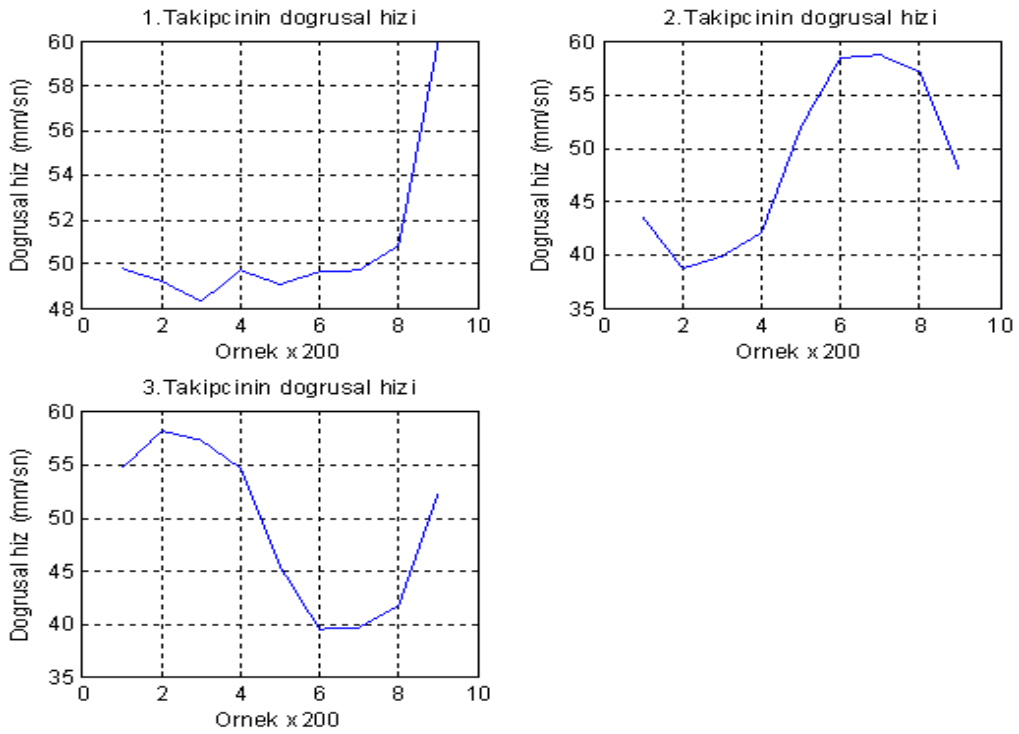
**Şekil 6. 15** Benzetim ortamında yapılan iki takipçi robot için benzetimden film kareleri



**Şekil 6. 16** Benzetim ortamında yapılan iki takipçi robot için nesnenin izleme hataları (mm)



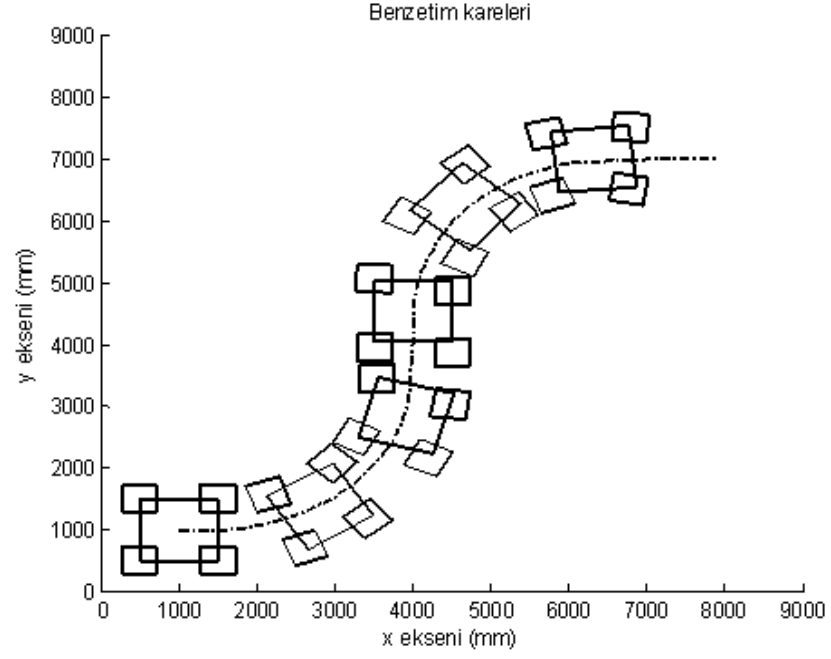
**Şekil 6. 17** Benzetim ortamında yapılan iki takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağil açıları (derece)



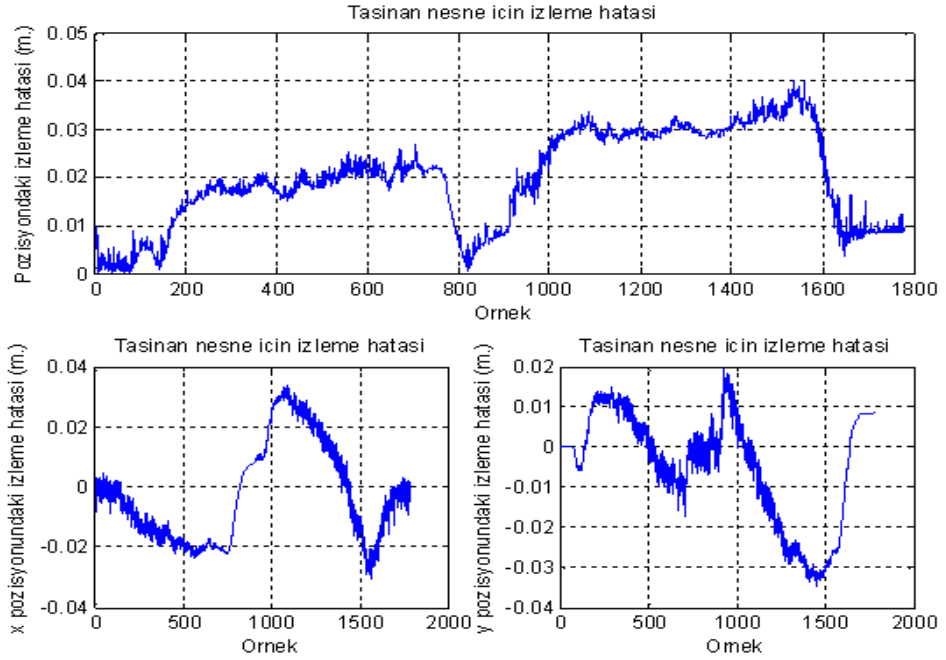
**Şekil 6. 18** Benzetim ortamında yapılan iki takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn)

#### 6.2.4. Benzetim ortamında dört robotlu nesne taşıma

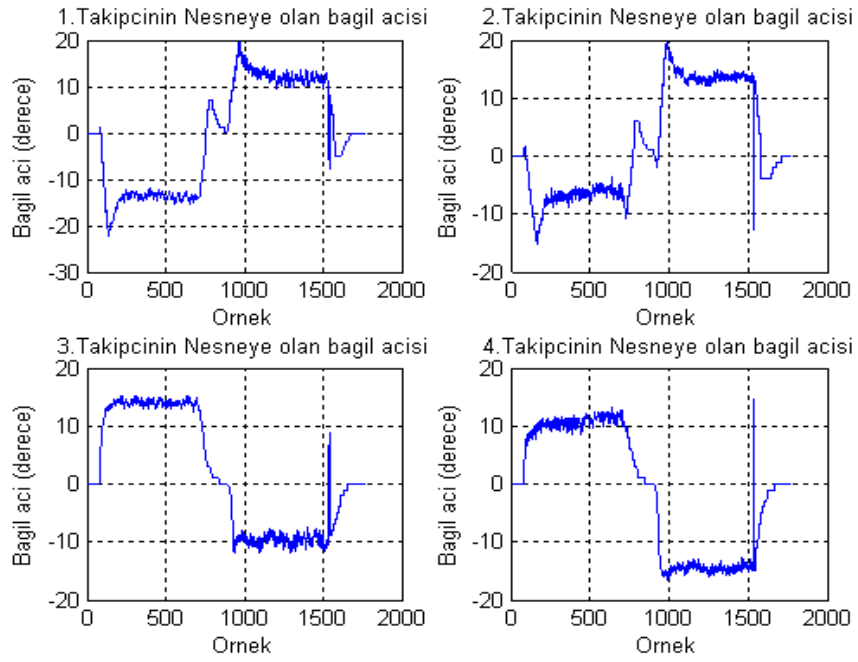
Benzetim ortamında dikdörtgen şeklindeki bir nesnenin 4 takipçi robot tarafından işbirlikli olarak taşınması istenmiştir. Şekil 6.19'da MobileSim benzetim ortamından elde edilen veriler kullanılarak MATLAB benzetim ortamında yansıtılan deney sonucunda ki nesne ve robotların hareket izleri yer almaktadır. Taşınan nesnenin ağırlık merkezi noktası referans yörüngeyi izlemiştir. Bu noktanın x ve y yönlerindeki ve nesnenin hareket yönü doğrultusundaki izleme hataları Şekil 6.20'de gösterilmiştir. İzleme hatalarının 40mm'den küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.21'de takipçilerin nesneyle olan bağıl açıları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bağıl açı  $20^0$ 'den ufaktır. Şekil 6.22'de takipçi robotların her 200 örneğin toplamıyla hesaplanan ortalama doğrusal hızları verilmiştir. Takipçiler yarattıkları eğri yörüngelerini izlerken, kendi referans hızlarını oluşturdukları yörüngeye göre hesaplayabilmektedirler.



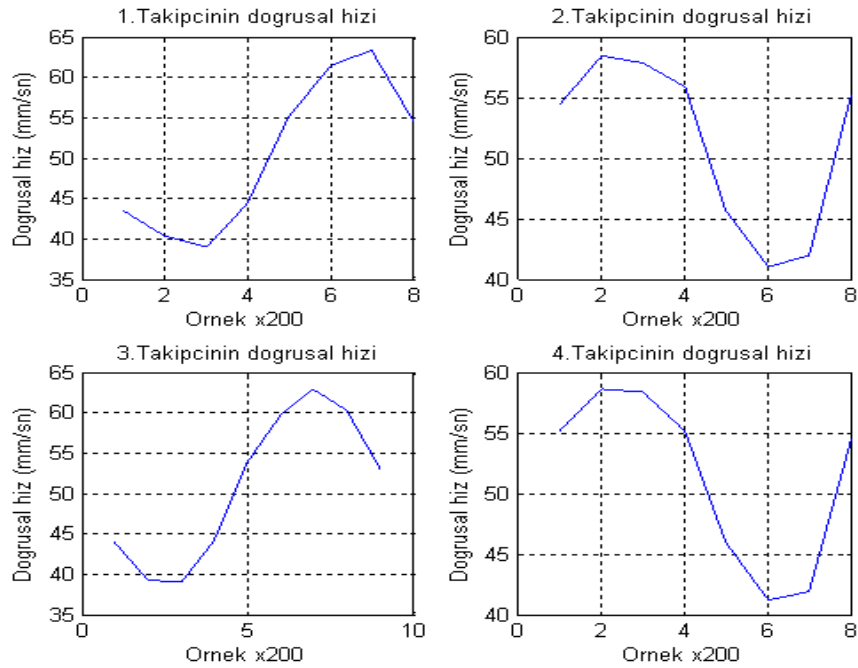
Şekil 6. 19 Benzetim ortamında yapılan 4 takipçi robot için benzetimden film kareleri



Şekil 6. 20 Benzetim ortamında yapılan 4 takipçi robot için nesnenin izleme hataları (mm)



**Şekil 6. 21** Benzetim ortamında yapılan 4 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağıl açıları (derece)



**Şekil 6. 22** Benzetim ortamında yapılan 4 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn)

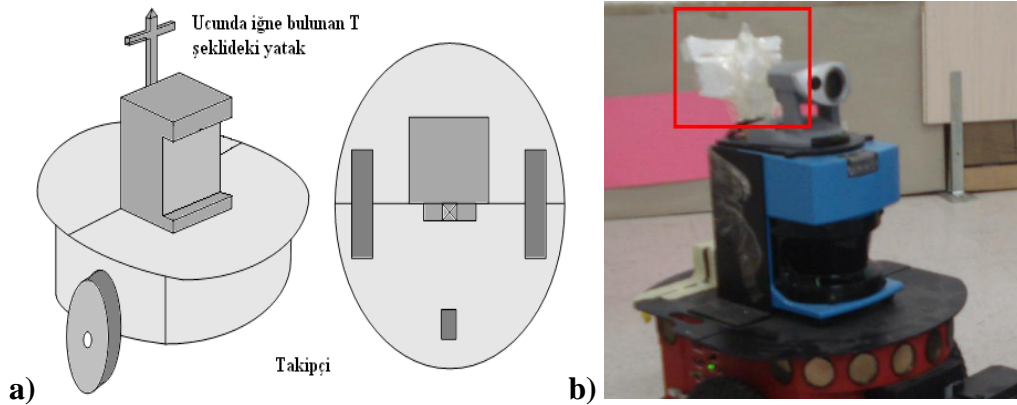
### 6.2.5. Gerçek ortamda iki robotlu dikey nesne taşıma

İki robotlu dikey nesne taşıma için gerçekleştirilen benzetim ortamı deneyi (Bkz. Bölüm 6.2.1.), bu bölümde gerçek robotlar üzerinde gerçek dünya ortamında uygulanmıştır. Taşınan dikdörtgenel nesne Şekil 6.23’de gösterilmiştir.



**Şekil 6. 23** Gerçek dünya uygulamasında taşınan nesne

Bu nesne, robotlara eklenen T şeklinde ucunda iğne bulunan bir yatak ile taşınmıştır. İğne ve yatak sistemi, taşıma esnasında oluşan küçük izleme hatalarını törele edecek şekilde tasarlanmıştır. Her bir takipçi robot üzerinde bulunan bu yapının şematik gösterimi Şekil 6.24-a’da ve gerçek dünya görüntüsü Şekil 6.24-b’de gösterilmiştir.



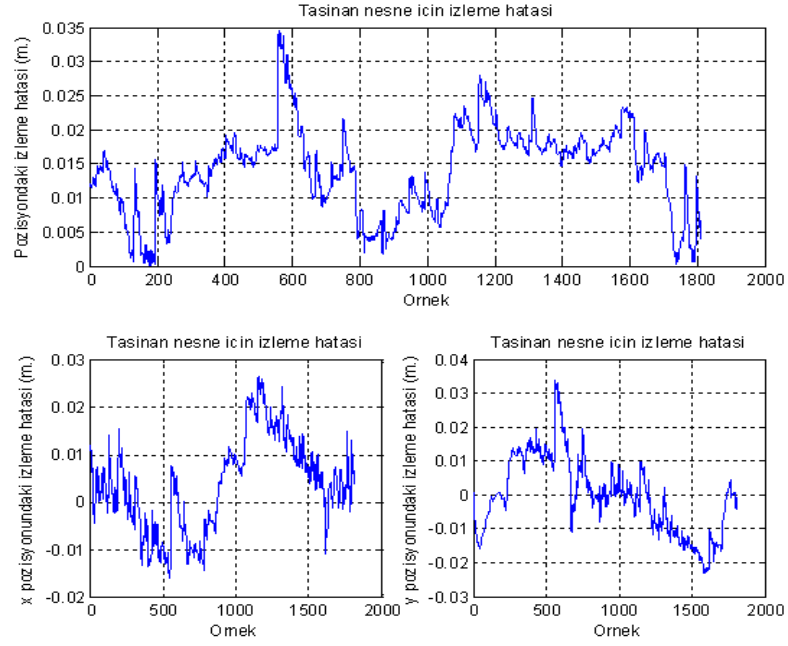
**Şekil 6. 24** Taşıma mekanizması için T şeklinde ucunda iğne bulunan bir yatağın a) şematik gösterimi, b) gerçek dünya gösterimi

Gerçek dünya ortamında dikdörtgen şeklindeki bir nesnenin tasarlanan özel mekanizma üzerinde dikey bir şekilde 2 takipçi robot tarafından işbirlikli olarak taşınması istenmiştir. Şekil 6.25’de gerçek dünya uygulamasının videosunda alınan kareler görülmektedir. Taşınan nesnenin ağırlık merkez noktası referans yörüngeyi izlemiştir. Bu noktanın x ve y yönlerindeki ve nesnenin hareket yönü doğrultusundaki izleme hataları Şekil 6.26’da gösterilmiştir. İzleme hatalarının 35mm’den küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.27’de takipçilerin nesneyle olan bağıl açıları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bağıl açı  $20^0$ ’den küçük ve istenen değer aralığı  $[-\theta_{istenen}, \theta_{istenen}]$  içerisindeydir. Şekil 6.28’de takipçi robotların her 200 örneğin toplamıyla hesaplanan ortalama doğrusal hızları verilmiştir. Takipçi robotlar yörüngelerinin benzerliklerinden dolayı ortalama 50 mm/sn hızla gitmişlerdir. Yapılan uygulamanın videosuna (AIRLAB, 2010) içerisinden ulaşılabilir.

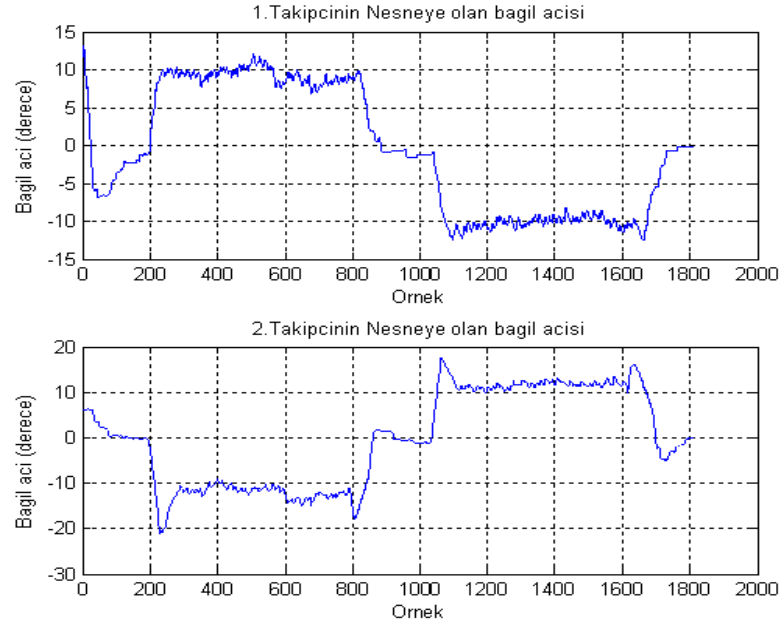


Şekil 6. 25 2 takipçi robot için yapılan gerçek dünya uygulamasından film kareleri

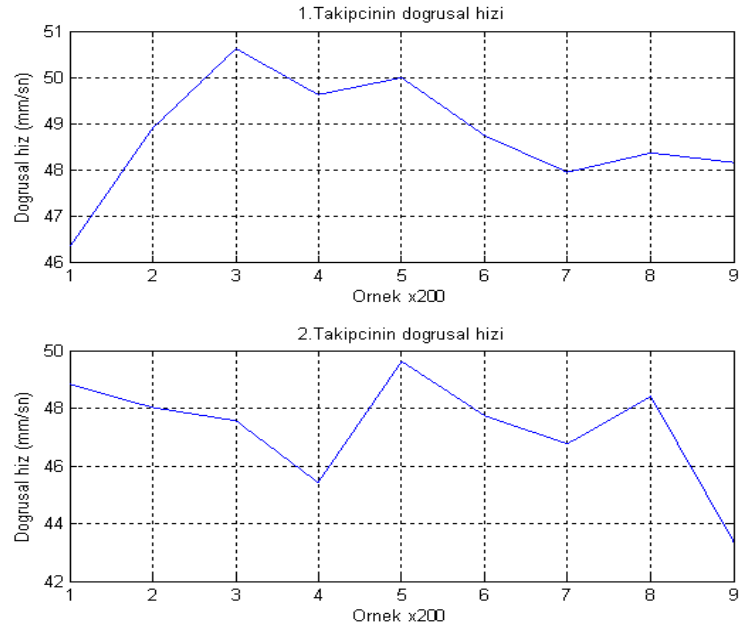




**Şekil 6. 26** Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi için nesnenin izleme hataları (mm)



**Şekil 6. 27** Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağli açıları (derece)



**Şekil 6. 28** Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn)

### 6.2.6. Gerçek ortamda iki robotlu paralel nesne taşıma

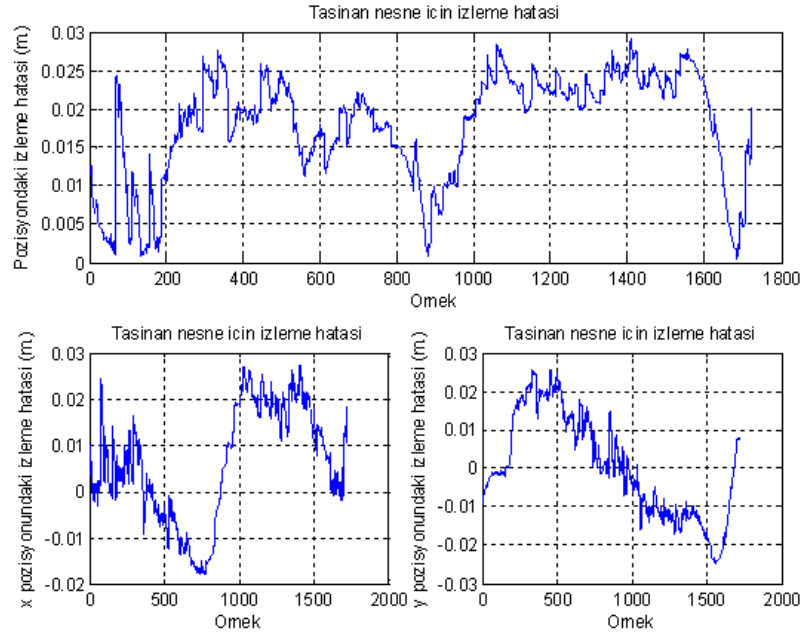
İki robotlu paralel nesne taşıma için gerçekleştirilen benzetim ortamı deneyi (Bkz. Bölüm 6.2.2.), bu bölümde gerçek robotlar üzerinde gerçek ortamında uygulanmıştır. Taşıma mekanizması Bölüm 6.2.5’ de anlatıldığı gibidir (Bkz. Bölüm 6.2.5.).

Gerçek dünya ortamında dikdörtgen şeklindeki bir nesnenin paralel bir şekilde 2 takipçi robot tarafından işbirlikli olarak taşınması istenmiştir. Şekil 6.29’da gerçek dünya uygulamasının film kareleri yer almaktadır. Taşınan nesnenin ağırlık merkez noktası referans yörüngeyi izlemiştir. Bu noktanın x ve y yönlerindeki ve nesnenin hareket yönü doğrultusundaki izleme hataları Şekil 6.30’da gösterilmiştir. İzleme hatalarının 35mm’den küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.31’de takipçilerin nesneyle olan bağıl açıları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bağıl açı  $20^0$ ’den küçüktür. Şekil 6.32’de takipçi robotların her 200 örneğin toplamıyla hesaplanan ortalama doğrusal hızları verilmiştir. Takipçiler yarattıkları eğri yörüngelerini izlerken, içteki

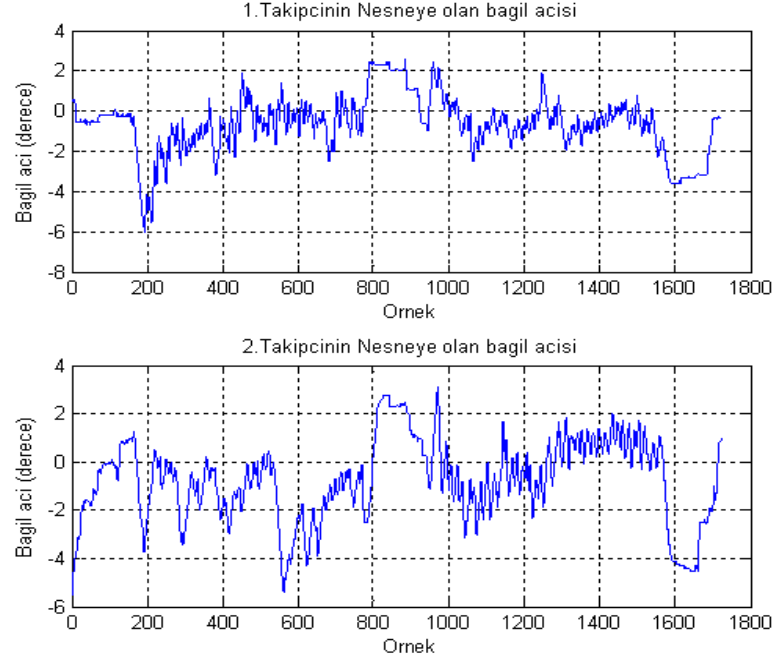
takipçi yavaş giderken dıştaki ona göre daha hızlı gitmektedir. Yapılan uygulamanın videosuna (AIRLAB, 2010) içerisinde ulaşılabilir.



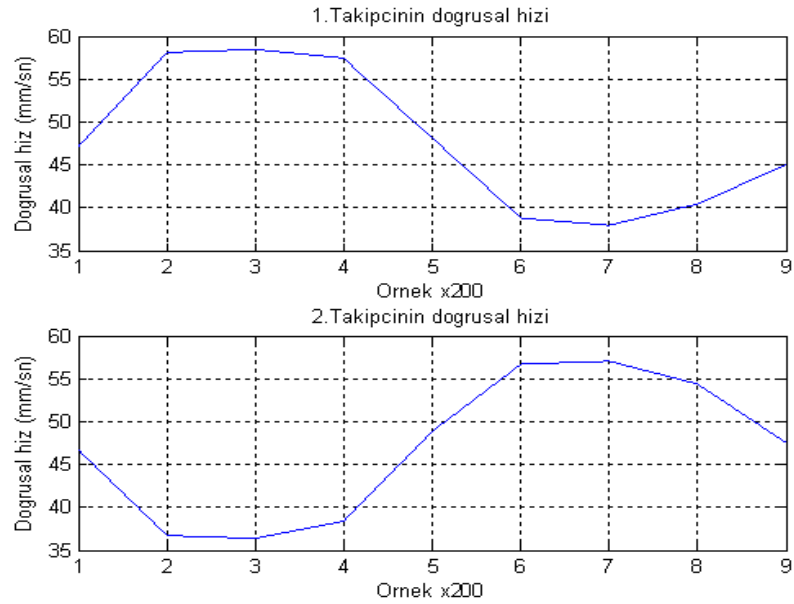
Şekil 6. 29 2 takipçi robot için yapılan gerçek dünya uygulamasından film kareleri



Şekil 6. 30 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi için nesnenin izleme hataları (mm)



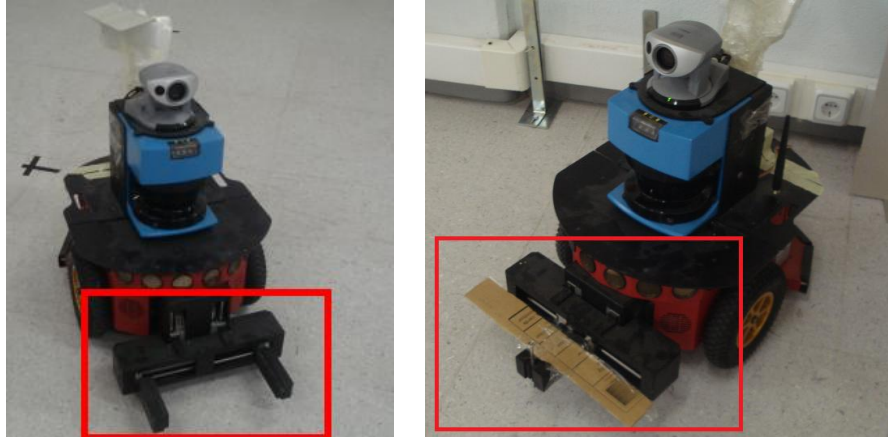
**Şekil 6. 31** Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağıl açıları (derece)



**Şekil 6. 32** Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn)

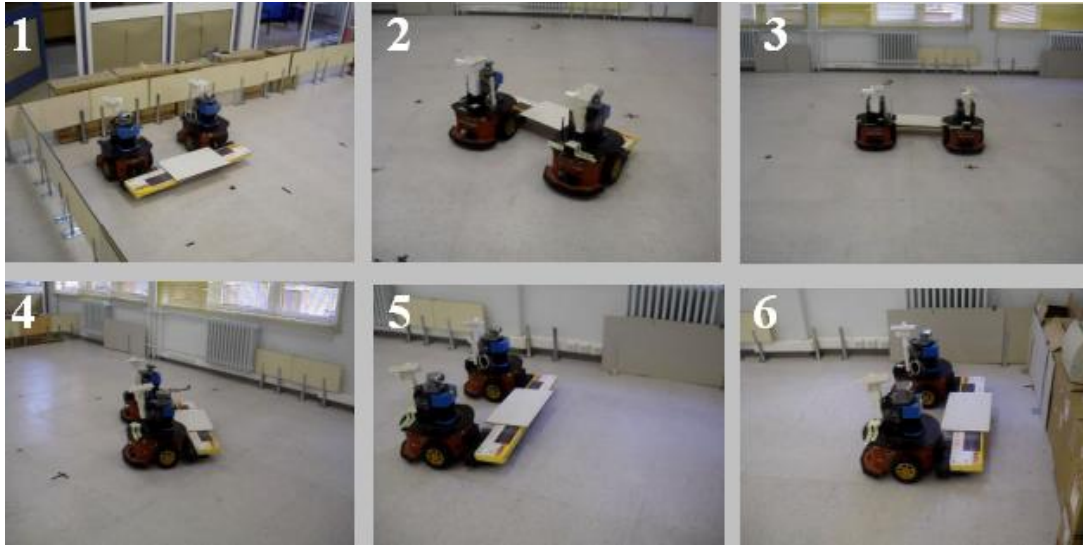
### 6.2.7. Gerçek ortamda iki robotlu çatal kaldıraçla paralel nesne taşıma

Bu bölümde gerçek robotların özel taşıma mekanizması kullanmadan mevcut çatal kaldıraçlar vasıtasıyla nesne taşıması test edilmektedir. Nesne, gezgin robotların ön tarafında bulunan Şekil 6.33’de gösterildiği gibi çatal kaldıraçları üzerinde taşınmaktadır. Bu yapı, endüstride kullanılan çatal kaldıraçlı araçlara benzerlik göstermektedir.

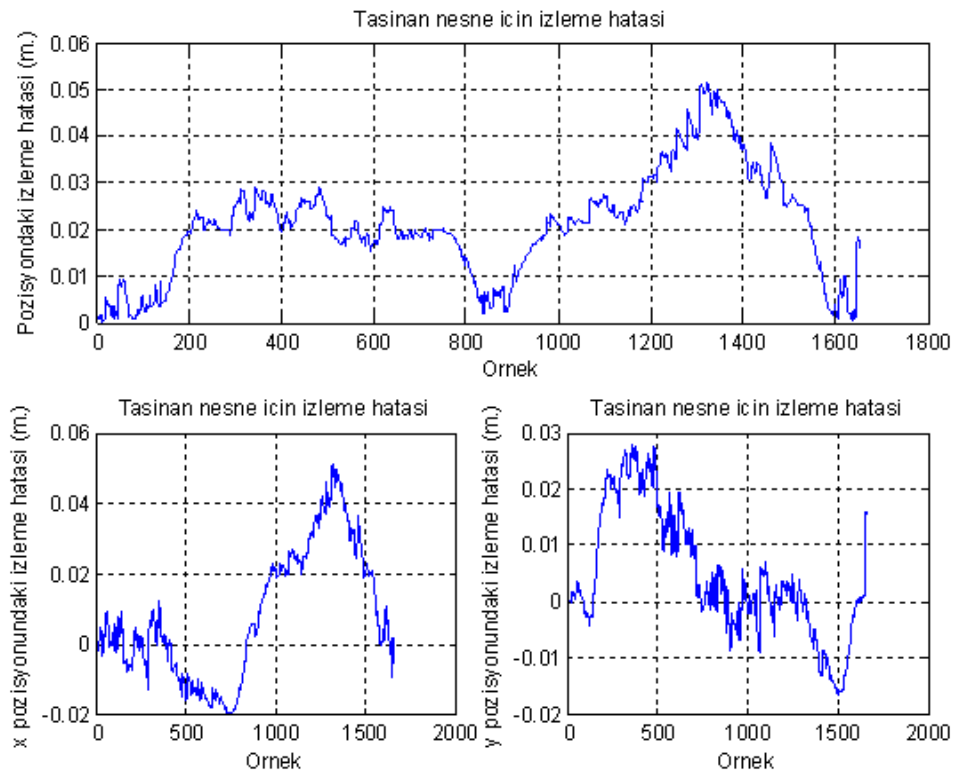


**Şekil 6. 33** Çatal kaldıraçlara sahip Pioneer P3-DX diferansiyel sürürlü gezgin robotu

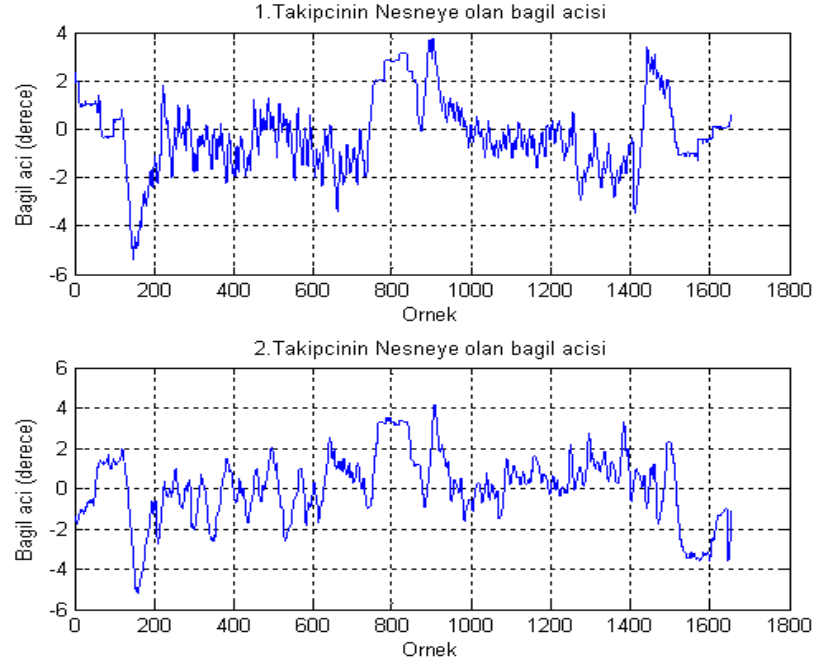
Şekil 6.34’de gerçek dünya uygulamasının videosundan alınan kareler görülmektedir. Taşınan nesnenin ağırlık merkez noktası referans yörüngeyi izlemiştir. Bu noktanın x ve y yönlerindeki ve nesnenin hareket yönü doğrultusundaki izleme hataları Şekil 6.35’de gösterilmiştir. İzleme hatalarının 50mm’den küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.36’da takipçilerin nesneyle olan bağıl açıları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bağıl açı  $5^0$ ’den küçüktür ve istenen değer aralığı  $[-\theta_{istenen}, \theta_{istenen}]$  içerisindeydir. Şekil 6.37’de takipçi robotların her 200 örneğin toplamıyla hesaplanan ortalama doğrusal hızları verilmiştir. Takipçiler yarattıkları eğri yörüngelerini izlerken, bir takipçi yavaş giderken diğeri ona göre daha hızlı gitmektedir. Yapılan uygulamanın videosuna (AIRLAB, 2010) içerisinden ulaşılabilir.



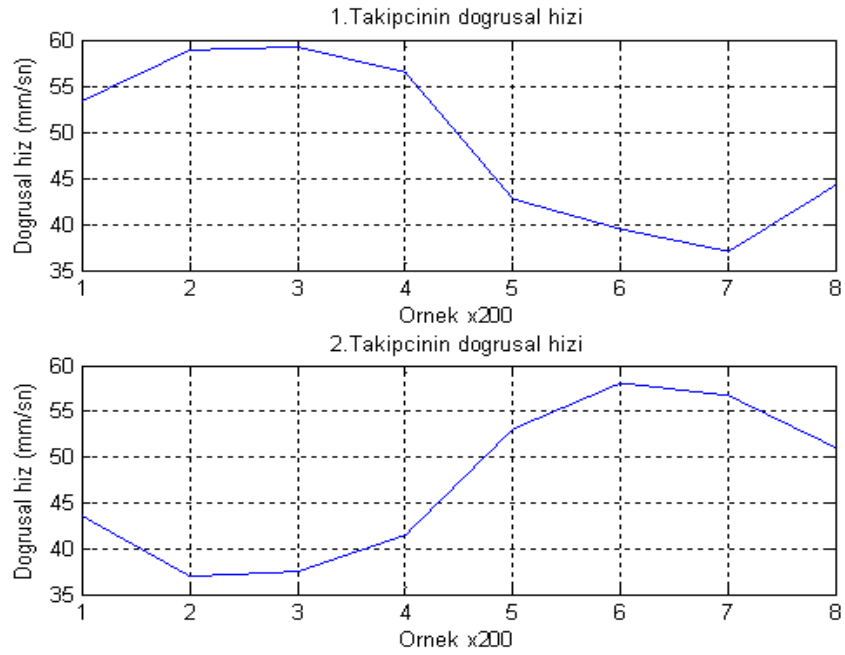
Şekil 6. 34 2 takipçi robot için yapılan gerçek dünya uygulamasından film kareleri



Şekil 6. 35 Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi için nesnenin izleme hataları (mm)



**Şekil 6. 36** Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağıl açıları (derece)

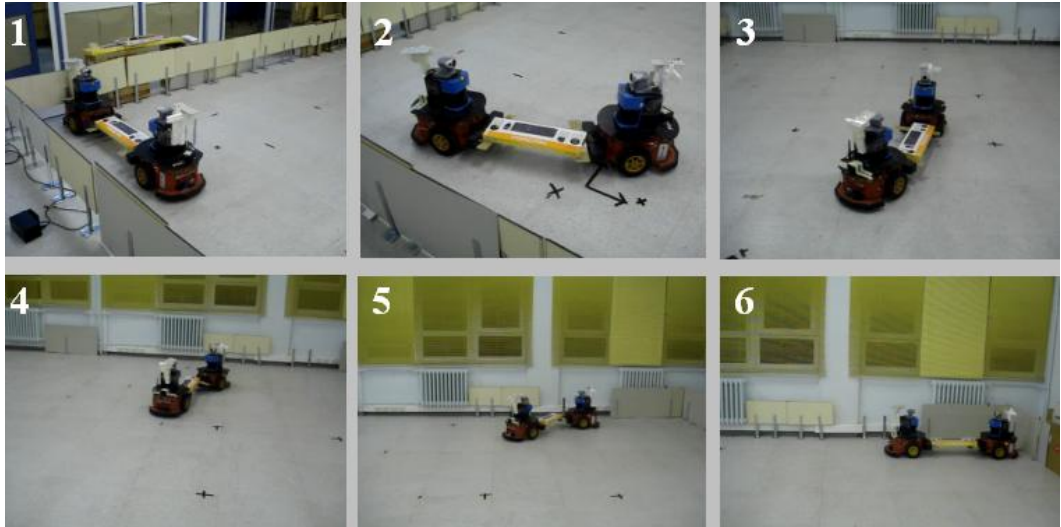


**Şekil 6. 37** Benzetim ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn)

### 6.2.8. Gerçek ortamda iki robotlu çatal kaldıraçla dikey nesne taşıma

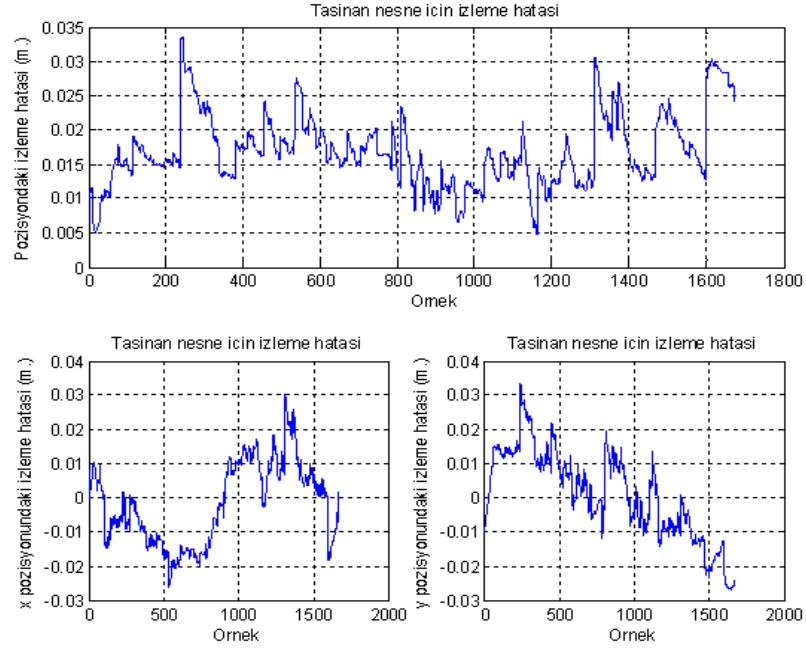
İki robotlu dikey nesne taşıma için gerçekleştirilen benzetim ortamı deneyi (Bkz. Bölüm 6.2.1.), bu bölümde gerçek robotlar üzerinde gerçek dünya ortamında uygulanmıştır. Nesne, gezgin robotların ön tarafında bulunan çatal kaldıraçlar üzerlerinde taşınmıştır (Bkz. Şekil 6.33).

Şekil 6.38’de gerçek dünya uygulamasının videosundan alınan kareler görülmektedir. Taşınan nesnenin ağırlık merkez noktası referans yörüngeyi izlemiştir. Bu noktanın x ve y yönlerindeki ve nesnenin hareket yönü doğrultusundaki izleme hataları Şekil 6.39’da gösterilmiştir. İzleme hatalarının 35mm’den küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.40’da takipçilerin nesneyle olan bağıl açıları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bağıl açı  $20^0$ ’den küçüktür ve istenen değer aralığı  $[-\theta_{istenen}, \theta_{istenen}]$  içerisindeydir. Şekil 6.41’de takipçi robotların her 200 örneğin toplamıyla hesaplanan ortalama doğrusal hızları verilmiştir. Takipçiler yarattıkları eğri yörüngelerini izlerken, bir takipçi yavaş giderken diğeri ona göre daha hızlı gitmektedir. Yapılan uygulamanın videosuna (AIRLAB, 2010) içerisinden ulaşılabilir.

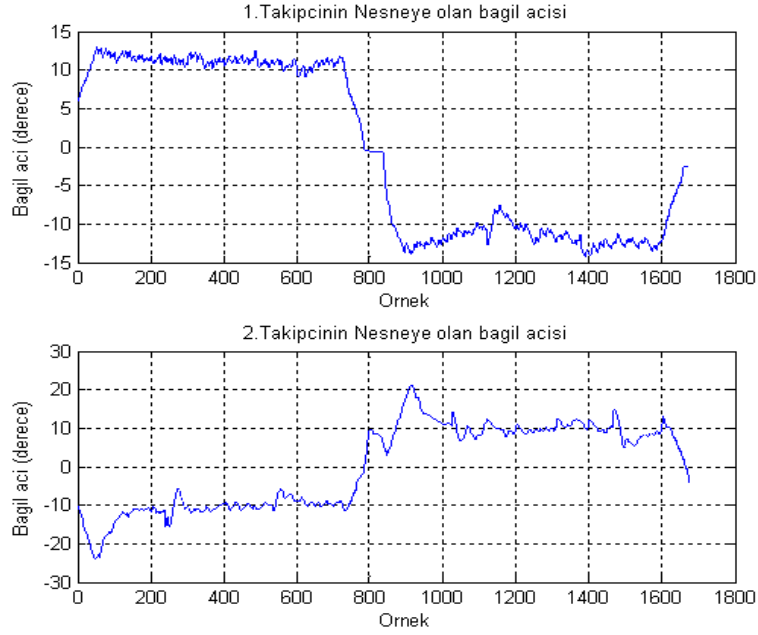


Şekil 6. 38 2 takipçi robot için yapılan gerçek dünya uygulamasından film kareleri

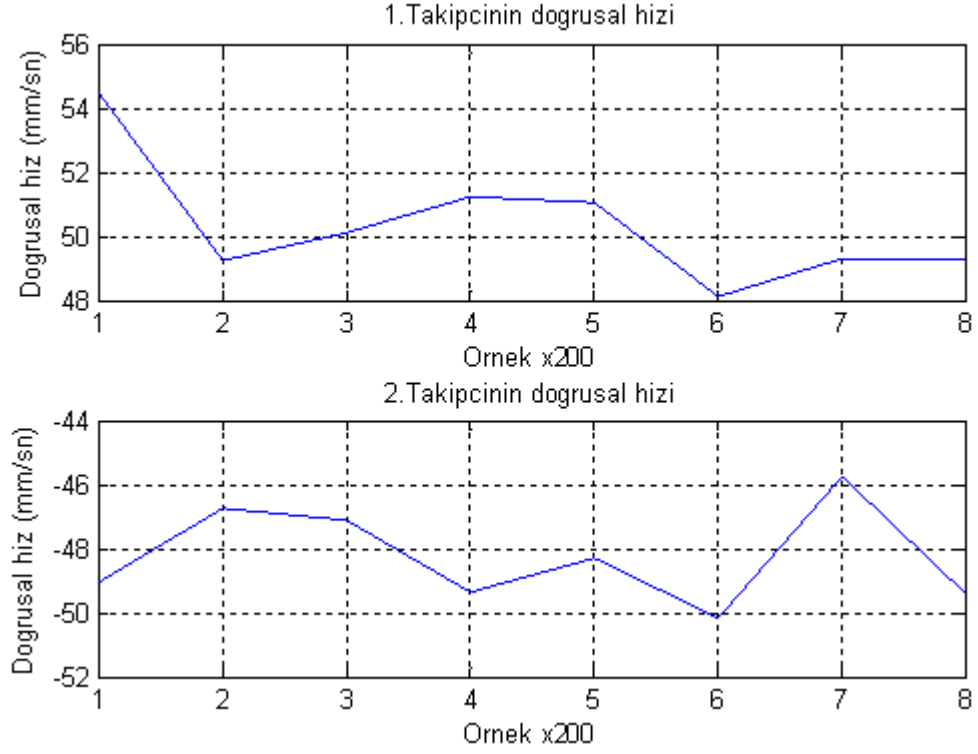




**Şekil 6. 39** Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi için nesnenin izleme hataları (mm)



**Şekil 6. 40** Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin nesneye olan bağıl açıları (derece)



**Şekil 6. 41** Gerçek Dünya ortamında yapılan 2 takipçi robot için takipçilerin hızı (mm/sn)

Bu bölüm de önerilen yaklaşımın doğruluğu ve etkinliği, yapılan benzetim ortamı deneyleri ve gerçek sistemler üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar ile gösterilmiştir. Benzetim ortamı deneyleri MobileSim benzetim ortamından alınan veri dosyaları ile MATLAB ortamı kullanılarak yapılmıştır. Gerçek dünya uygulamalarında ise önerilen yaklaşım diferansiyel sürürlü holonomik olmayan ve çatal kaldıraçlara sahip gezgin robotlar üzerinde uygulanmıştır. Takipçi robotlar kendi yörüngelerini ufak hatalarla takip ettikleri sürece, önerilen yaklaşımın etkin olduğu görülmüştür. Takipçi robotların nesneye olan bağıl açıları istenen açı değeri sınırları içerisinde olduğu görülmüştür.

Yapılan uygulamaların videolarına (AIRLAB, 2010) içerisinden ulaşılabilir.

## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİ

Bu çalışmada, taşınan nesnenin sanal bir lider robot olarak düşünüldüğü formasyon tabanlı işbirlikli bir taşıma yaklaşımı önerilmiştir. Referans yörünge sanal lider için yaratılmıştır. Her bir takipçi robot formasyon kısıtları altında kendi yörüngelerini yaratmışlardır ve Lyapunov kararlılığı kanıtlanmış bir denetleyici kullanmışlardır. Benzetim ve gerçek dünya ortamlarında yapılan deneylerin sonuçları önerilen yöntemin çoklu robotlar tarafından bir objenin taşınması açısından etkinliğini göstermiştir.

Yapılan çalışma ile çoklu robotlar tarafından işbirlikli taşıma alanına yeni bir yaklaşım ile katkıda sağlanmıştır. Holonomik olmayan diferansiyel sürürlü ve çatal kaldıraca sahip gezgin robotlar formasyon tabanlı bu yeni yaklaşımı kullanarak merkez noktalarının üzerinde ve çatal kaldıraçlarının üzerinde nesneyi işbirlikli olarak taşıyabilmişlerdir. Yapılan tez çalışmasının sonunda hedeflenen amaçlara ulaşılmıştır. Yapılan çalışma ulusal ve uluslararası konferanslarda sözlü olarak sunulmuştur (Yufka ve Özkan, 2010a; Yufka ve Özkan, 2010b; Yufka et al., 2010c; Yufka ve ark., 2010d).

İleride yapılacak çalışmalarda, önerilen yaklaşımın etkinliğini artırmak üzere yeni çalışmalar ve eklemeler yapılabilir. Daha çok sayıda robot ve değişik işbirlikli taşıma görevleri için gerçek dünya ve benzetim ortamı deneyleri gerçekleştirilebilir. Taşıma sistemi daha da ileriye götürülerek geliştirilebilir. Örneğin gezgin robotlar, ortamda nesneyi algılayıp yanına giderek çatal kaldıraçlarıyla işbirlikli olarak kaldırabilirler. Taşıma sisteminin etkinliğini zenginleştirmek için araba tipi gezgin robotlar kullanılabilir. Gezgin robotlar arasında görev paylaşımı, kuvvet dağılımı, nesnenin konumuna göre anlayacağı kapalı bir iletişim eklenebilir. Belirli ara noktalarda robotlar birbirleri ile haberleşip tekrar eş zamanlama yapabilirler. Ortamın durumuna göre takipçiler formasyon yapılarını değiştirip yeniden hareket planlaması yapabilirler.

## BÖLÜM 8

### KAYNAKLAR DİZİNİ

- AIRLAB, 2010, Artificial Intelligence & Robotics Laboratory, Eskisehir Osmangazi University, <http://www.ai-robotlab.ogu.edu.tr/>, Son Erişim : 16.04.2010.
- Baker C., Morris A., Ferguson D., Thayer S., Whittaker C., Omohundro Z., Reverte C., Whittaker W., Hahnel D., and Thrun, S., 2004, A campaign in autonomous mine mapping, IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1050-4729 .
- Blackmore B.S., Fountas S., Tang L., and Have H., 2004, System Requirements For a Small Autonomous Tractor, Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development, Volume VI, Manuscript PM 04 001.
- Carlson J. and Murphy R.R., 2003, Reliability analysis of mobile robots, International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, pp. 1050-4729.
- Carpin S., Wang J., Lewis M., Birk A. and Jacoff A., 2006, High Fidelity Tools for Rescue Robotics: Results and Perspectives, Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin, pp. 301-311.
- Chen X. and Li Y., 2006, Cooperative transportation by multiple mobile manipulators using adaptive NN control, IEEE International Joint Conference on Neural Network, , Vol 1-10, pp.4193-4200.
- Colbaugh R., Barany E., and Glass K., 1997, Adaptive Stabilization of Nonholonomic Mechanical System, Proceeding of the 36th Conference on Decision and Control, Vol 3, pp. 3081 - 3088.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Dubins L. E., 1957, On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents, American Journal of Mathematics, Vol. 79, No. 3., pp. 497-516.
- Fierro R. and Lewis F.L., 1995, Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics, Proceedings of the 34th Conference on Decision and Control, vol. 4, pp. 3805-3810.
- Fink J., Cheng P., and Kumar V., 2008, Cooperative Towing with Multiple Robots, Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference.
- Fu L., Yazici A., Ozguner U., 2008, Route Planning For OSU-ACT Autonomous Vehicle in DARPA Urban Challenge, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2008), in Eindhoven, The Netherlands, pp.781-786.
- Fujii M., Inamura W., Murakami H., Tanaka K., and Kosuge, K., 2007, Cooperative Control of Multiple Mobile Robots Transporting a Single Object with Loose Handling, IEEE International Conference on Robotics and Biometrics, Vols: 1-5, pp. 816-822.
- Fukao T., Nakagawa H., and Adachi N., 2000, Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot, IEEE Transaction on Robotics and Automation, pp. 609 – 615.
- Han S., Choi BS., and Lee JM., 2008, A precise curved motion planning for a differential driving mobile robot, Mechatronics, Vol 18, Issue 9, pp.486-494.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Hashimoto M., Oba F., and Zenitani S., 1995, Object-Transportation Control by Multiple Wheeled Vehicle-Planar Cartesian Manipulator Systems, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2267- 2272.
- Hu T., Yang S.X., Wang F., and Mittal G.S., 2002, A Neural Network Controller for a Nonholonomic Mobile Robot with Unknown Robot Parameters, Proceeding of IEEE International Symposium on Computational Intelligent in Robotics and Automation, Vol 4, pp. 3540 - 3545.
- Humberstone C.K. and Smith K.B., 2000, Object Transport Using Multiple Mobile Robots with Pin Joint Endeffectors, Proceedings of the 5th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, pp. 417-426.
- Kanayama Y., Kimura Y., Miyazaki F., and Noguchi T., 1990, A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.384-389.
- Katevas N.I. (editör), 2001, Mobile Robotics in Healthcare, Amsterdam Berlin Oxford Tokyo Washington/DC: IOS Press, ISBN 1-58603-079-5.
- Kato K., Inoue K., Arai T., Mae Y., 2001, Cooperative control and force limitation for multiple robots in single object transportation, 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vols 1-3, pp. 422-427.
- Kim C.H. and Kim B.K., 2007, Minimum-Energy Rotational Trajectory Planning for Differential-Driven Wheeled Mobile Robots, The 13th International Conference on Advanced Robotics, Jeju, Korea, pp. 265-270.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Kim D.-H. and Oh J.-H., 1998, Global Asymptotically Stable Tracking Control of Mobile Robots, Proceeding of IEEE International Conference on Control Applications, Vol 2, pp. 1297 – 1301.
- Koh K.C. and Cho H.S., 1999, A Smooth Path Tracking Algorithm for Wheeled Mobile Robots with Dynamic Constraints, Journal of Intelligent & Robotic, Vol 24 (4), pp. 367-385.
- Komoriya K. and Tanie K., 1989, Trajectory Design and Control of a Wheel-type Mobile Robot Using B-spline Curve, IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Tsukuba, Japan, pp. 398 – 405.
- Kosuge K. and Sato M., 1999a, Transportation of a Single Object by Multiple Decentralized- Controlled Nonholonomic Mobile Robots, International Conference on, Intelligent Robots and Systems, vol 3, pp. 1681 – 1686.
- Kosuge K. and Hirata Y., Asama H., Kaetsu H., and Kawabata K., 1999b, Motion Control of Multiple Autonomous Mobile Robots Handling a Large Object in Coordination, Proceedings of the IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Detroit, vol 4, pp. 2666 – 2673.
- LaValle S.M., 2006, Planning Algorithms, Cambridge University Press.
- Martin D., Cheyer A.J., and Moran D.B., 1999, The Open Agent Architecture: A Framework for Building Distributed Software Systems, Applied Artificial Intelligence, vol. 13, pp. 91-128.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Martins-Filho L. S. and Macau E.E.N., 2007, Patrol Mobile Robots and Chaotic Trajectories, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol 2007, Article ID 61543, 13 pages.
- Miyata N., Ota J., and Aiyama Y., 1997, Cooperative Transport System with Regrasping Car-like Mobile Robots, *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol 3, pp. 1754 – 1761.
- Mobile Robots, Inc, 2010, Installation and Operations manual, <http://robots.mobilerobots.com/wiki/Manuals>, Son Erişim : 16.04.2010.
- Prassler E., Ritter A., Schaeffer C., and Fiorini P., 2000, A Short History of Cleaning Robots, *Journal of Autonomous Robots*, Volume 9, Number 3, pp. 211-226.
- Reuter J., 1998, Mobile Robots Trajectories With Continuously Differentiable Curvature: An Optimal Control Approach, *Proceedings of the IEEE Intelligent Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol 1, pp. 38–43.
- Sandler B.Z., 1999, *Robotics Designing the Mechanisms for Automated Machinery*, Second Edition, Academic Press, ISBN 0-12-618520-4.
- Shimizu M., Kobayashi K., and Watanabe K., 2006, Clothoidal Curve-based Path Generation for an Autonomous Mobile Robot, *IEEE International Joint Conference, Bexco, Busan, Korea*, pp. 478 – 481.
- The MathWorks, Inc., 2010, <http://www.mathworks.com/>, Son Erişim : 16.04.2010.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Tsuji K. and Murakami T., 2004, Load distribution control for cooperative transportation by multiple mobile robots, 8<sup>th</sup> IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 249-252.
- Udomkun M. and Tangamchit P., 2008, Cooperative Behavior-based Control of Decentralized Mobile Robots on an Overhead Box Carrying Task, IEEE Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, pp. 633 – 636.
- Wang L.-S and Wu S.-I., 2006, Coordinated Control and Experiments of Pushing an Object by Using Two Unmanned Vehicles, International Joint Conference, Busan, Korea, pp. 623 – 627.
- Wang, X. and Yang S.X., 2003, A Neuro-Fuzzy Approach to Obstacle Avoidance of a Nonholonomic Mobile Robot, Proceeding of IEEE International Conference on Advance Intelligent Mechatronics, Vol 1, pp. 29 – 34.
- Wang Z.D., Pineros C.V., Takahashi T., Kimura Y., Nakano E., 2000, Arrangement and control of a cooperative multi-robot system for object transportation, 6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-6), Venice, Italy.
- Wilson D.G. and Robinett I.I.I. RD., 2001, Robust adaptive backstepping control for a nonholonomic mobile robot, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 5, pp. 3241-3245.
- Woo E., MacDonald B. A., and Trepanier F., 2003, Distributed Mobile Robot Application Infrastructure, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), vol. 2, pp. 1475 – 1480.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Yamaguchi H. and Arai T., 2009, A Conversion of a Cooperative Transportation System with Two Car-Like Mobile Robots into Two-Chain, Single-Generator Chained Form and its Steering, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 21, No.1, pp. 57-65.
- Yamakita M., Taniguchi Y., and Shukuya Y., 2003, Analysis of formation control of cooperative transportation of mother ship by SMC, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vols 1-3, pp. 951-956.
- Yang X., Watanabe K., Izumi K., and Kiguchi K., 2004, A decentralized control system for cooperative transportation by multiple non-holonomic mobile robots, International Journal of Control, pp. 949-963(15).
- Yufka A., Yazıcı A., and Parlaktuna O., 2009, A Smooth Path Generation Approach for Sensor-based Coverage Path Planning, 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'09), Bursa, Turkey, pp. 375-379.
- Yufka A. and Özkan M., 2010a, Formation-Based Cooperative Transportation by a Group of Non-holonomic Forklift-Type Mobile Robots, The 1st International Symposium on Computing in Science & Engineering (ISCSE'10), Kusadasi, Aydın, Turkey, June, 3-5.
- Yufka A. and Özkan M., 2010b, Cooperative Transportation by Multiple Autonomous Non-holonomic Mobile Robots, International Workshop on Unmanned Vehicles (UVW'10), Istanbul, Turkey, June , 10-12.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Yufka A., Ozkan M., and Parlaktuna O., 2010c, Formation-Based Cooperative Transportation by a Group of Non-holonomic Mobile Robots, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'10), Istanbul, Turkey, October , 10-13, (will be presented; accepted).
- Yufka A., Özkan M. ve Parlaktuna O., 2010d, Çoklu Gezgin Robotlarla Formasyon Tabanlı Nesne Taşıma, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'10), Gebze, Kocaeli, Eylül , 21-23, (sunulacak; kabul edildi).
- Zaerpoora A., Ahmadabadia M.N., Barunia M.R. and Wang Z.D, 2005, Distributed object transportation on a desired path based on Constrain and Move strategy, Robotics and Autonomous Systems, pp. 115–128 (50).
- Zhang Y., Hong D., Chung J. H., and Velinsky S. A., 1998, Dynamic Model Based Robust Tracking Control of a Differentially Steered Wheeled Mobile Robot, Proceedings of The American Control Conference, Vols 1-6, pp. 850-855.