

**KAPALI ALANDA LAZER MESAFE ÖLÇER  
TEMELLİ DİNAMİK VE STATİK ENGELLERDEN  
SAKINABİLEN ZEKİ MOBİL ROBOT**

**2019  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Musa MATLI**

**KAPALI ALANDA LAZER MESAFE ÖLÇER TEMELLİ DİNAMİK VE  
STATİK ENGELLERDEN SAKINABİLEN ZEKİ MOBİL ROBOT**

**Musa MATLI**

**Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Aralık 2019**

Musa MATLI tarafından hazırlanan “KAPALI ALANDA LAZER MESAFE ÖLÇER TEMELLİ DİNAMİK VE STATİK ENGELLERDEN SAKINABİLEN ZEKİ MOBİL ROBOT” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Raif BAYIR

Tez Danışmanı, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 27/12/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ANUTGAN (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Raif BAYIR (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fecir DURAN (GÜ)

İmzası



...../...../2019

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü





*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Musa MATLI

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KAPALI ALANDA LAZER MESAFE ÖLÇER TEMELLİ DİNAMİK VE STATİK ENGELLERDEN SAKINABİLEN ZEKİ MOBİL ROBOT

Musa MATLI

Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Raif BAYIR

Aralık 2019, 107 sayfa

Uzay çalışmaları, askeri uygulamalar, servis robotları, endüstriyel yük taşıma gibi birçok alanda mobil robotlar kullanılmaktadır. Mobil robotların bağımsız hareket edebilme özelliği esnek uygulama avantajı getirmektedir. Mobil robotlar hareket kabiliyetlerine göre sınıflandırılmaktadır. Tekerlek yapılarından kaynaklı yüksek hareket kabiliyeti olan mobil robotlara çok yönlü mobil robotlar denmektedir. Çok yönlü mobil robotlar dar alanlarda daha fazla hareket imkânı sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında Mekanum tekerli farklı yönlerde hareket edebilen mobil robot geliştirilmiştir. Bu mobil robota durağan ya da hareketli engellerden sakınması için lazer mesafe ölçer eklenmiştir. Mobil robotun performansı üç farklı deney ile gözlemlenmiştir. Birinci deneyde robotun çarpışmadan deney ortamını taraması beklenmiştir. İkinci deneyde durağan engellerin bulunduğu bir parkuru tamamlaması beklenmiştir. Üçüncü deneyde hem durağan hemde hareketli engellerin bulunduğu bir

parkuru tamamlaması beklenmiştir. Birinci deneyde sağ duvar ile mesafesi korunarak ortam taraması gerçekleştirilmiştir. İkinci ve üçüncü deneyde, sensörden gelen nokta bulutu verileri çalışmada sunulan yöntem ile önce engellerin tespiti için filtrelenmiştir. Filtrelenen verilerden engellerin başlangıç ve bitiş noktaları tespit edilip engeller arası boşlukların genişlikleri hesaplanmıştır. Robotun yön seçimi için bulanık mantık sınıflandırıcısına boşluk merkez açısı, en yakın engel açısı ve en yakın engel mesafesi bilgileri giriş olarak verilmektedir. Bulanık mantık sınıflandırıcısı Mekanum tkelerli mobil robotun hareketi için ilgili hareket çıktısını üretmektedir. Birinci ve ikinci deneysel çalışmalarda %100 başarı oranında parkur tamamlanmıştır. Üçüncü deneysel çalışmada %60 başarı oranında tamamlanmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** Lazer görüntü algılama, Mekanum teker, çok yönlü mobil robot, mobil robot, lazer mesafe ölçer, engelden sakınma, boşluk takibi, bulanık mantık sınıflandırıcı

**Bilim Kodu :** 92905

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **AN INTELLIGENT MOBILE ROBOT THAT CAN BE AVOIDANCE FROM STATIC AND DYNAMIC OBSTACLES BASED ON LASER RANGE SENSOR IN INDOOR**

**Musa MATLI**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Mechatronics Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Raif BAYIR**

**December 2019, 107 pages**

Mobile robots are encountered in many fields such as space studies, military applications, service robots and industrial freight transport robots. The mobile robots' ability to move independently brings the advantage of flexible application. Mobile robots are classified according to their mobility. Mobile robots with high mobility due to wheel structures are called versatile mobile robots. The versatile mobile robots allow more movement in confined spaces. In this study, a versatile mobile robot with Mecanum wheel has been developed. The developed mobile robot is equipped with a laser-based distance sensor to avoid stationary or moving obstacles. The study was tried with three experiments. In the first experiment, the robot was expected to wander around the experimental environment without collision. In the second experiment, it was expected to complete a course with stationary obstacles. In the third experiment, it is expected to complete a track with both stationary and mobile obstacles. In the

first experiment, the distance between the right wall and the environment was maintained. The point cloud data from the sensor from the second and third experiments were first filtered for the detection of obstacles by the method presented in the study. From the filtered data, the starting and ending points of the obstacles were determined and the widths of the gaps between the obstacles were calculated. The fuzzy logic controller, which is designed according to the width of the calculated gaps, is provided with the input of the gap center angle, the closest obstacle angle and the closest obstacle distance. The fuzzy logic controller generates the corresponding motion output for the movement of the robot. The first and second experiments were successfully completed with %100 correctly. The third experiment was completed with %60 correctly.

**Key Word** : Laser imaging detection, Mecanum wheel, omni directional mobile robot, mobile robot, laser distance measurement, obstacle avoidance, gap tracking, fuzzy logic

**Science Code** : 92905



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında Őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Raif BAYIR'a sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

ÇalıŐmam sırasında yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğrt. Üyesi Ali UYSAL, Dr. Öğrt. Üyesi Tuncay SOYLU, Dr. Öğrt. Üyesi Mustafa AYDIN, ArŐ. Gör. Semih PAK, ArŐ. Gör. Mustafa Feyzi TEMEL ve Abdülhamit SEVGİ'ye teŐekkürlerimi sunarım.

Kahramanlarım annem, babam ve kız kardeŐime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez alıŐması KBÜBAP-18-YL-157 kodlu BAP projesi olarak desteklenmiŐtir. Desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi BAP birimine teŐekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	4
BÖLÜM 3 .....	21
MOBİL ROBOT YAPISI .....	21
BÖLÜM 4 .....	28
ENGELDEN SAKINMA YÖNTEMLERİ.....	28
4.1. YAPAY POTANSİYEL ALAN METODU .....	30
4.2. VEKTÖR ALAN HİSTOGRAMI .....	33
4.3. BÖCEK ALGORİTMASI.....	35
4.3.1. Böcek1 ve Böcek2 Algoritması .....	35
4.3.2. Sınıf 1 Algoritması.....	36
4.3.3. Alg1 ve Alg2 Algoritmaları .....	37
4.3.4. DistBug Algoritması .....	38
4.4. BOŞLUK TAKİBİ METODU .....	39

4.4.1.	Boşluk Dizisinin Hesaplanması ve Maksimum Boşluğun Bulunması...	39
4.4.2.	Boşluk Merkezi Açısının Hesaplanması .....	41
4.4.3.	Son Pozisyon Açısının Hesaplanması .....	43
4.5.	BULANIK MANTIK.....	45
4.6.	YAPAY SİNİR AĞLARI .....	47
BÖLÜM 5 .....		49
MEKANUM TEKERLİ MOBİL ROBOT KİNEMATİK HESABI VE TASARIMI		49
5.1.	MEKANUM TEKERLİ MOBİL ROBOTUN KİNEMATİK, DİNAMİK MODELLEMESİ VE TASARIMI.....	49
5.1.1.	Dört Mekanum Tekerli Bir Robotun Kinematığı.....	49
5.1.2.	Mekanum Robotun Dinamiği.....	53
5.1.3.	Tasarım Aşamaları .....	57
BÖLÜM 6 .....		61
MATERYAL VE METOD .....		61
6.1.	MATERYAL .....	61
6.1.1.	Merkez Kontrolcü Donanımı .....	62
6.1.2.	Motor Sürücü .....	62
6.1.3.	DC Motor .....	63
6.1.4.	LIDAR .....	63
6.1.5.	Mekanum Teker .....	64
6.1.6.	Batarya .....	65
6.1.7.	Deneysel Çalışmaların Kayıt Altına Alınması.....	67
6.2.	METOD .....	67
6.2.1.	Engellerin Tespit Edilmesi .....	68
6.2.2.	Boşluk Genişliğinin Tespit Edilmesi .....	70
6.2.3.	Bulanık Mantık Sınıflandırıcısının Tasarımı .....	73
6.2.4.	Scikit – Fuzzy Kütüphanesi .....	77
BÖLÜM 7 .....		78
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....		78

	<b><u>Sayfa</u></b>
7.1. ALAN TARAMASI DENEYİ.....	78
7.2. DURAĞAN ENGELLERDEN SAKINMA DENEYİ .....	86
7.3. DURAĞAN VE HAREKETLİ ENGELDEN SAKINMA DENEYİ.....	92
BÖLÜM 8 .....	98
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	98
KAYNAKLAR .....	100
ÖZGEÇMİŞ .....	107



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Yıllara göre mecanum tekerlek ile ilgili çalışmalar. ....	20
Şekil 3.1. Diferansiyel sürürlü mobil robot yapısının gösterimi [60]. ....	22
Şekil 3.2. Üç tekerli mobil robot yapısının gösterimi [60]. ....	22
Şekil 3.3. Arabaya benzer mobil robot yapısının gösterimi [60]. ....	23
Şekil 3.4. Ortogonal birden fazla teker ile çok yönlü mobil robot yapısının gösterimi [61]. ....	23
Şekil 3.5. Mekanum tekerler ile çok yönlü dört tekerli mobil robot yapısının gösterimi [61]. ....	24
Şekil 3.6. Temel kinematik gösterimi. ....	24
Şekil 4.1. Yerel minimum (a), osilasyon (b) ve hedef engel yakınlığı (c) problemlerinin görünümü. ....	33
Şekil 4.2. Robot hareketi sırasındaki ızgara hücrelerinin anlık gelen veriler ile güncellenmesinin görünümü. ....	34
Şekil 4.3. C*'ın hücre doluluğu, robot çerçevesindeki aktif pencerelerin ve açılabilir bölgelerin görünümü. ....	34
Şekil 4.4. Tespit edilen engellerin yoğunluğu (a) ve aktif pencere (b) görünümü. ....	35
Şekil 4.5. Böcek1 ve Böcek2 algoritmaları ile hareket eden robotun engeller karşısındaki durumu. ....	36
Şekil 4.6. Sınıf 1 algoritmasının bir çalışma alanında almış olduğu yolu görünümü. ....	37
Şekil 4.7. Alg1 ve Alg2 algoritmaları ile hareket eden robotun aldığı yolların görünümü. ....	38
Şekil 4.8. DistBug algoritmasının engeller karşısındaki davranışının görünümü. ....	39
Şekil 4.9. Boşluk takip metodunun üç temel basamağı. ....	39
Şekil 4.10. Sınırları tespit edilen engellerin sınır noktalarının açılarının görünümü. ....	40
Şekil 4.11. Boşluklar, engeller ve robot arasındaki ilişki parametreleri. ....	40
Şekil 4.12. Boşluk merkez açısının görünümü. ....	42
Şekil 4.13. Boşluk merkez açısının detaylı ifadesinin görünümü. ....	42
Şekil 4.14. Son pozisyon açısının hesaplanmasında yardımcı ortamın görünümü. ....	45
Şekil 4.15. Mobil robotun sensörlerinin görüş alanının görünümü. ....	46
Şekil 4.16. Statik engeller için tasarlanmış bulanık kontrolcü üyelik fonksiyonlarının görünümü [55]. ....	46

Şekil 4.17. Dinamik engel tanımada oluşturulan üyelik fonksiyonlarının görünümü [55].	47
Şekil 4.18. Temel yapay sinir ağı yapısının görünümü.	48
Şekil 5.1. Mekanum tekerin parametreleri.	49
Şekil 5.2. Dört Mekanum tekerli robot parametreleri.	52
Şekil 5.3. Mekanum tekerli mobil robotun şematik gösterimi.	54
Şekil 5.4 Tasarlanan mobil robotun üstten bakış görüntüsü ve ölçülerinin görünümü.	58
Şekil 5.5. Üretilen mobil robotun katı model tasarımının görünümü.	59
Şekil 5.6. Mekaniksel montajı tamamlanmış mobil robotun görünümü.	59
Şekil 5.7. Donanımların monte edildiği ve elektriksel bağlantıların yapıldığı mobil robotun görünümü.	59
Şekil 5.8. Geliştirilen mobil robotun son halinin görünümü.	60
Şekil 6.1. Robotun blok diyagramı.	61
Şekil 6.2. INTEL NUC5i7RYB görünümü.	62
Şekil 6.3. RoboClaw 2x15A görünümü.	63
Şekil 6.4. Linux 24V 95W DC motorun görünümü [78].	63
Şekil 6.5. Slamtec RPA2 LIDAR'ın görünümü.	64
Şekil 6.6. Mekanum tekerin görünümü.	64
Şekil 6.7. Mekanum tekerli sistemlerin dönüş stratejilerinin görünümü.	65
Şekil 6.8 Panasonic NCR18650 Li-Ion bataryanın görünümü.	65
Şekil 6.9. Tek batarya hücresine ait şarj karakteristiği grafiği.	66
Şekil 6.10. Deneylerin kayıt edilmesinde kullanılan aksiyon kamerasının görünümü.	67
Şekil 6.11. Robot üzerindeki yerleşimi veren blok diyagram.	67
Şekil 6.12. Robotun alt LIDAR'ın görüş açısının görünümü.	68
Şekil 6.13. LIDAR verilerinin görünümü.	69
Şekil 6.14. LIDAR verilerinin ölçüldüğü ortamın görünümü.	69
Şekil 6.15. Filtrelenmiş mesafe açısı grafiği.	70
Şekil 6.16. Engeller ile robot arasındaki ilişkinin görünümü.	70
Şekil 6.17. Engeller ile robot arasındaki ilişkinin görünümü.	71
Şekil 6.18. Engeller ile robot arasındaki ilişkinin görünümü.	72
Şekil 6.19. Tasarlanan bulanık mantık sınıflandırıcısının görünümü.	73

## **Sayfa**

Şekil 6.20. Boşluk merkez açısı giriş üyelik fonksiyonlarının görünümü. ....	74
Şekil 6.21. En yakın engelin açısı giriş üyelik fonksiyonlarının görünümü. ....	74
Şekil 6.22. En yakın engelin mesafesi giriş üyelik fonksiyonlarının görünümü. ....	75
Şekil 6.23. Çıkış üyelik fonksiyonlarının görünümü. ....	75
Şekil 7.1. Alan taraması deneyinin yapıldığı laboratuvar ortamının görünümü. ....	78
Şekil 7.2. Robotun izlemesi beklenen yolun ve başlangıç noktasının görünümü. ....	79
Şekil 7.3. Alan tarama deneyinin birinci tekrarının sonuçlarının görünümü. ....	80
Şekil 7.4. Alan tarama deneyinin birinci tekrarında robotun çalışma ortamı planı üzerindeki yaklaşık gösterimi. ....	80
Şekil 7.5. Alan tarama deneyinin ikinci tekrarının sonuçlarının görünümü. ....	81
Şekil 7.6. Alan tarama deneyinin ikinci tekrarında robotun çalışma ortamı planı üzerindeki yaklaşık gösterimi. ....	81
Şekil 7.7. Alan tarama deneyinin üçüncü tekrarının sonuçlarının görünümü. ....	82
Şekil 7.8. Alan tarama deneyinin üçüncü tekrarında robotun çalışma ortamı planı üzerindeki yaklaşık gösterimi. ....	82
Şekil 7.9. Alan tarama deneyinin dördüncü tekrarının sonuçlarının görünümü. ....	83
Şekil 7.10. Alan tarama deneyinin dördüncü tekrarında robotun çalışma ortamı planı üzerindeki yaklaşık gösterimi. ....	83
Şekil 7.11. Alan tarama deneyinin beşinci tekrarının sonuçlarının görünümü. ....	84
Şekil 7.12. Alan tarama deneyinin beşinci tekrarında robotun çalışma ortamı planı üzerindeki yaklaşık gösterimi. ....	84
Şekil 7.13. Deney ortamının görünümü. ....	86
Şekil 7.14. Robotun deneysel çalışmalarda başlatıldığı bölgenin görünümü. ....	86
Şekil 7.15. Durağan engel olarak kullanılan karton kutunun görünümü. ....	87
Şekil 7.16. Durağan engellerden sakınma deneyinin yapıldığı ortamın ve engellerinin konumunun görünümü. ....	87
Şekil 7.17. Durağan engellerden sakınma deneyinde robotun izlemesi beklenen yolun görünümü. ....	88
Şekil 7.18. Durağan engelden sakınma deneyinin birinci tekrarının görünümü. ....	88
Şekil 7.19. Durağan engelden sakınma deneyinin ikinci tekrarının görünümü. ....	89
Şekil 7.20. Durağan engelden sakınma deneyinin üçüncü tekrarının görünümü. ....	89
Şekil 7.21. Durağan engelden sakınma deneyinin dördüncü tekrarının görünümü. ..	90
Şekil 7.22. Durağan engelden sakınma deneyinin beşinci tekrarının görünümü. ....	90
Şekil 7.23. Durağan engelden sakınma deneylerinin bir arada gösterimi. ....	91
Şekil 7.24. Hareketli engelin görünümü. ....	92

## **Sayfa**

Şekil 7.25. Durağan ve hareketli engelden sakınma deney ortamının görünümü.....	93
Şekil 7.26. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin birinci tekrarının görünümü. ....	93
Şekil 7.27. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin ikinci tekrarının görünümü. ....	94
Şekil 7.28. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin üçüncü tekrarının görünümü. ....	95
Şekil 7.29. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin dördüncü tekrarının görünümü. ....	95
Şekil 7.30. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin beşinci tekrarının görünümü. ....	96





## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 4.1. Farklı engelden sakınma algoritmalarının özelliklerinin karşılaştırılması. .....	28
Çizelge 5.1 Mekanum tekerin parametreleri. ....	53
Çizelge 6.1. Batarya hücresi ve batarya paketinin teknik özellikleri. ....	66
Çizelge 6.2. Kural tablosu. ....	76
Çizelge 7.1. Alan taraması deneyinin çarpışma durumları ve deney süreleri. ....	85
Çizelge 7.2. Durağan engellerden sakınma deneyinin çarpışma durumları ve deney süreleri. ....	91
Çizelge 7.3. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin çarpışma durumları ve deney süreleri. ....	96

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$A$	: Amper
$V$	: Volt
$Ah$	: Amper saat
$G$	: Gram
$mA$	: Mili Amper
$U(q)$	: Çekim potansiyeli ve itme potansiyellerinin toplamı
$U_{att}(q)$	: Çekim potansiyeli
$U_{rep}(q)$	: İtme potansiyeli
$F(q)$	: Yapay kuvveti
$F_{att}(q)$	: Çekim kuvveti
$F_{rep}(q)$	: İtme kuvveti
$q_g$	: Hedefin konum vektörü
$F_{att-x}$	: X eksenindeki çekim kuvveti
$F_{att-y}$	: Y eksenindeki çekim kuvveti
$\eta$	: Pozitif bir ölçekleme faktörü
$\rho_0$	: Tek bir engelin en büyük etki mesafesi
$\emptyset_{lim\_l}$	: Robotun sol tarafında kalan boşluk sınır açısı
$\emptyset_{lim\_r}$	: Robotun sağ tarafında kalan boşluk sınır açısı
$\emptyset_{lim}$	: Boşluk sınırlarının açısı
$\emptyset_{nhol}$	: Robotun holonomik olmayan hareketinin sınır açısı
$\emptyset_{nhol\_l}$	: Robotun holonomik olmayan hareketinde sol tarafında kalan sınır açısı
$\emptyset_{nhol\_r}$	: Robotun holonomik olmayan hareketinde sağ tarafında kalan sınır açısı
$\emptyset_{fov}$	: Robotun görüş bölgesinin sınır açısı
$\emptyset_{fov\_l}$	: Robotun görüş bölgesinde sol tarafında kalan sınır açısı

$\emptyset_{fov\_r}$	: Robotun görüş bölgesinde sağ tarafında kalan sınır açısı
$d_{nhol}$	: Robotun holonomik olmayan hareket yayı ile engel sınırı arasındaki en yakın mesafe
$d_{nhol\_l}$	: Robotun holonomik olmayan hareket yayı ile engel sınırı arasındaki sol tarafında kalan mesafe değeri
$d_{nhol\_r}$	: Robotun holonomik olmayan hareket yayı ile engel sınırı arasındaki sağ tarafında kalan mesafe değeri
$d_{fov}$	: Robotun görüş bölgesi sınırının engel sınırı ile yaptığı en yakın mesafe değeri
$d_{fov\_l}$	: Robotun görüş bölgesi sınırının engel sınırı ile yaptığı sol tarafında kalan mesafe değeri
$d_{fov\_r}$	: Robotun görüş bölgesi sınırının engel sınırı ile yaptığı sağ tarafında kalan mesafe değeri
$\emptyset_{gap\_c}$	: Boşluk merkez açısı
$\emptyset_{goal}$	: Hedef açısı
$\alpha$	: Boşluğun ağırlık katsayısı
$\beta$	: Hedefin ağırlık katsayısı
$n$	: Engellerin sayısı
$d_n$	: n'inci engelin mesafesi
$d_{min}$	: $d_n$ mesafe değerlerinin minimumu
$\Theta$	: Dönme hızı
$m_b$	: Platformun kütlesi
$I_b$	: Eylemsizlik momenti
$r$	: Yarıçap
$f_i$	: Sürtünme kuvveti

## KISALTMALAR

BMS	: Bulanık Mantık Sınıflandırıcı
BTM	: Boşluk Takip Metodu
CCD	: Charge Coupled Device (Şarj Eşleştirmeli Cihaz)
CVM	: Curvature -Velocity Method (Eğrilik Hız Metodu)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DCM	: Direction Cosine Matris (Doğrultu Kosinüs Matris)
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
FGM	: Follow the Gap Method (Aralık Takip Yöntemi)
FSR	: Force Sensing Resistor (Kuvvet Algılama Direnci)
IBA	: Intelligent Bug Algorithm (Akıllı Böcek Algoritması)
IEEE	: Institute for Electrical and Electronic Engineers
IFGM	: Intelligent Follow the Gap Method (Akıllı Aralık Takip Yöntemi)
IMU	: Inertial Measurement Unit (Atalet Ölçü Birimi)
JPEG	: Joint Photographic Experts Group
LCM	: Lane Curvature Method (Şerit Eğrilik Yöntemi)
LIDAR	: Laser Imaging Detection and Ranging (Lazer Görüntü Algılama ve Mesafe Ölçümü)
OMPL	: Open Motion Planing Library (Açık Hareket Planlama Kütüphanesi)
PI	: Proportional – Integral (Oransal – İntegral)
PID	: Proportional – Integral – Derivative (Oransal – İntegral - Türevsel)
RANSAC	: Random Sample Consensus (Rastgele Örnekleme Konsensusu)
RGB	: Red Green Blue (Kırmızı Yeşil Mavi)
ROS	: Robotic Operating System (Robot İletim Sistemi)
SMC	: Sliding Mode Control (Kayma Mod Kontrol)
UART	: Universal Asynchronous Receiver – Transmitter (Evrensel Asenkron Okuyucu ve Yazıcı)
VAH	: Vektör Alan Histogramı
YPA	: Yapay Potansiyel Alan Metodu

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Mobil robotlar insan operatörü olmadan bir yerden bir başkasına otonom olarak hareket edebilen cihazlardır. Robota özel tasarlanmış alanların içerisinde çalışan genel endüstriyel robotların aksine mobil robotlar hedeflerine ulaşabilmek için önceden tanımlanmış çalışma alanlarında serbestçe hareket edebilme özelliklerine sahiptirler. Mobilite kabiliyeti mobil robotlara çok geniş bir uygulama alanı kazandırmaktadır. Mobil kara robotları tekerli mobil robotlar, bacaklı mobil robotlar olarak tanınmaktadır. Otonom hava araçları ve otonom sualtı araçları da mobil robot olarak tanınmaktadır. Mobil robotlarda en popüler tekerlekli mobil robotlardır. Çünkü düşük mekaniksel komplekslik ve enerji tüketimi ile özgün uygulamalar için uygundur. Bacaklı mobil robotlar standart olmayan ortamlarda, moloz yığınları üzerinde, merdiven üzerinde hareket gibi durumlar için uygundur [1]. Uzay çalışmalarında deneysel malzemelerin taşınması testlerin yapılması gibi durumlarda kullanılan mobil robotlar aynı zamanda restoranlarda servis yapmak sanayide yük taşıma gibi bir çok platformda kullanılmaktadır. Mobil robotlar otomatik hareket edebilme, sensör bilgilerine göre öğrenebilme ve değerlendirebilme özelliklerine sahiptir. Mobil robotların dinamik bir ortamda insan gibi hareket yoluna karar vermesi beklenmektedir. Bütünlük, hızlı cevap verme, daha kısa yol mesafesi, daha az zaman tüketimi gibi yetenekler mobil robotların performansını ortaya çıkarmaktadır [2].

Mobil robot platformlarında serbest hareketlilik, serbest hareket kabiliyeti sağlayacak donanım ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Platformların serbest hareket kabiliyetini kullandığı tekerlekler önemli ölçüde belirlemektedir. Bu sebeple birçok çalışmalar yapılmıştır. 1970 lerde Bengt Ilon tarafından Mekanum tekerlek geliştirilmiştir. Mekanum tekerlekler mobil robotların hareket kabiliyetlerini büyük ölçüde arttırmaktadırlar [3]. Mekanum teker kullanan mobil robotlar ileri, geri, sağ, sol ve çapraz hareketleri açısal dönüş yapmadan yapabilmektedir. Ağır yük kaldırmaya

da uygun olan Mekanum tekerler mobil robot platformlarında kullanılmaktadır.

Mobil robotların serbest hareketlerinde etraflarını algılamaları gerekmektedir. Çevresini algılanmasında birçok farklı algılayıcı kullanılmaktadır. Kullanılan algılayıcıların başlarında ultrasonik, LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging - Lazer Görüntü Algılama ve Mesafe Ölçümü) ve kamera gelmektedir. LIDAR algılayıcı çeşitli pratik uygulamalarda tercih edilen kullanışlı bir veri toplama aracıdır. LIDAR algılayıcı darbeli lazer ışığı kullanarak değişken mesafe ölçmeyi sağlayan gelişmiş bir uzaktan algılama teknolojisidir [4]. Mobil robotların üzerinde sıklıkla kullanılmaktadır. İki boyutlu ve üç boyutlu algılama kapasitelerine sahiptirler. Ayrıca tam tur 360 derece algılama yapabildikleri gibi belirli bir derece aralığında da algılama yapabilmektedirler.

LIDAR algılayıcı derece bazında nokta bulutu olarak mesafe değerleri vermektedir. Bu değerler ham olarak kontrol birimine gelmektedir ve nokta bulutu anlamlandırılmaktadır. Bunun için mobil robotlarda yüksek işlem gücüne sahip işlemciler kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında Mekanum tekerli bir mobil robot platformu geliştirilmiştir. Bu platform kapalı ortamda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan ve üretilen mobil robot etrafı algılamada LIDAR algılayıcı kullanılmaktadır. LIDAR verilerini yorumlamada ve gerekli kontrol işaretlerinin üretilmesinde Intel NUC markalı bir mini bilgisayar kullanılmaktadır.

Tez sekiz bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde mobil robot, kullanılan algılayıcılar, kullanılan tekerlek tiplerinin harekete etkisi temel olarak anlatılmakta ve tezin bölümleri takdim edilmektedir. İkinci bölümde literatür taraması verilmektedir. Literatür taraması yapılırken mobil robot platformları, kullanılan algılayıcılar, kontrol teknikleri gibi faktörler göz önünde bulundurularak yapılan çalışmaların kısa özetleri verilmektedir. Üçüncü bölümde mobil robotların yapısı açıklanmaktadır. Mobil robotların kinematik ve dinamik olarak hangi sınıflara ayrıldığı, literatürde çalışılan standart mobil robot kontrolcülerini, robot planlamaları, engellerin algılanması ve sakınma gibi konuların genel hatları verilmektedir. Dördüncü bölümde engelden

sakınma yöntemleri açıklanmaktadır. Bu yöntemler seçilirken en çok kullanılanlar ve engelden sakınmada temel olarak nitelenen yöntemler tercih edilmektedir. Beşinci bölümde Mekanum tekerli bir mobil robotun kinematik hesapları açıklanmaktadır. Ayrıca tez çalışmasında geliştirilen mobil robot platformunun tasarımı hakkında bilgiler verilmektedir. Altıncı bölümde tez çalışmasında kullanılan materyal ve metotlar açıklanmaktadır. Yedinci bölümde deneysel çalışmalardan bahsedilmektedir. Sekizinci bölümde mobil robotun başarısı ve bundan sonra bu konuda yapılacak çalışmalar hakkında öneriler sunulmaktadır.



## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Dickerson Georgia Teknoloji Enstitüsünde Mekanum tekerli çok yönlü robotik araçların kontrolü üzerine çalışmıştır. Çalışmada Mekanum tekerli araçların hareket kabiliyetleri araştırılmıştır. Çok yönlü kabiliyetin manevralar için gereken zaman ve alan miktarını büyük ölçüde azalttığı görülmüştür. İstenen hareketleri sağlayacak algoritmalar, kaymanın tespiti ve düzeltilmesi üzerine çalışılmıştır. Mekanum tekerlerin dar alanlarda hareket kabiliyetinin geniş olması sebebi ile savaş alanlarında kullanılmasının mümkün olabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca çalışma da Mekanum tekerleğin basit bir tasarım formülasyonu sunulmuştur [5].

Nagatani vd. Okayama Üniversitesinde optik akış bilgilerini kullanarak çok yönlü robotlar için konum hesabı iyileştirmesi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada dört Mekanum tekerli çok yönlü bir araç kullanmıştır. Mekanum tekerli araçlarda hareket esnasında Mekanum teker üzerinde bulunan kauçuklar kaymaya sebep olmaktadır. Bu sebeple motorların devirleri yada tekerin dönüşünün hesaplanması ile aracın ilerleyişinin doğru tespit edilemediği görülmüştür. Robot konumunu görüntü sensörü kullanarak yer görüntüsünün akış bilgisi ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Robot konumu maksimum olabilirlik tekniği ile tekerlerden okunan bilgi ve görüntüden gelen bilgilerin beraber kullanılarak tahmin yönteminin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada iki bilginin beraber kullanılmasına yönelik tanımlamalar yapılmıştır. Ancak optik akışın hesaplanması sırasında büyük problemler ortaya çıkmıştır. Optik akışın hesaplanması ile elde edilen veriler yeterli güvenilirlikte olmadığı gözlemlenmiştir. Kullanılan CCD (Charge Coupled Device - Şarj Eşleştirmeli Cihaz) kamera yere yakın kullanılarak ve optik takip için gözlem alanı genişletilerek yöntemin doğruluğunun geliştirilebilir olduğu ifade edilmiştir. Teorik olarak görsel akış verileri ile araç hareketi sırasında sapma açısının tahmin edilebilir olduğu ifade edilmiştir [6].



Viboonchaicheep vd. Polytechnic Üniversitesinde Mekanum tekerli çok yönlü araçlar için pozisyon düzelme kontrolü konusunda çalışmışlardır. Çalışma robotun yönelim ve pozisyon kontrolü boyunca çok örnekleme yaparak bir pozisyon düzeltme metodu sunmaktadır. Kontrol metodu holonomik kısıtlamalar altındaki benzersiz kinematik temeline dayanmaktadır. Çalışmada Mekanum tekerli araçlar için yeni bir pozisyon düzeltme kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu metot öncelikle özgün kinematik, dinamik ve durum denklemlerinin formüllerini içerir. Kontrol sistemi esas ileri ve ters kinematik denklemlere ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca çalışma Mekanum tekerli taşıtlarda oluşan kayma problemi için bir yöntem önermektedir. Belirtiler ile düzeltme metodu veya direkt motodu kademeli ve yumuşak bir şekilde hatayı sıfıra ayarlar ve simülasyon basamak cevabını değerlendirir. Önleyici düzeltme metodu veya endirekt metot aracın konumlandırma hatasının ortaya çıkmasını engeller ve değerlendirir. Kontrol metodu tasarlanan referans yol boyunca başarılı aracı başarılı bir şekilde hareket ettirmiştir. Çalışma simülasyon ortamında denenmiştir [7].

Ko vd. mobil robot navigasyonunda şerit temelli engelden sakınma metodu (Lane Based Obstacle Avoidance Method) üzerine çalışmışlardır. Kapalı alanı şeritlere ayırarak en uygun şeriti seçip hedefe doğru yol alma prensibinde çalışmaktadır. Şerit metodu eğrilik hız metodu (Curvature-Velocity Method - CVM) ile birlikte kullanılmış ve LCM olarak adlandırılmıştır. Sadece eğrilik hız metoduna göre LCM daha yumuşak ve güvenli hareketler sergilemiştir. LCM CVM'nin kaçırdığı çarpışmasız yollara robotu yönlendirmede daha başarılı olmuştur [8].

Cooney vd. Massey Üniversitesinde Mekanum tekerli mobil robotun hareket kontrolü için görsel rota hesabı üzerine çalışmışlardır. Dört Mekanum tekerli bir robot platformu tasarlanıp geliştirilmiştir. Motor sürücü devresi tasarlanıp üretilmiştir. Robot pozisyonun ölçülmesi için robotun önüne ve arkasına iki adet optik bilgisayar faresi konumlandırılmıştır. Optik fare ile görsel olarak robot pozisyonun takibi yapılmaktadır. Kontrolcü olarak Mitsubishi M16C/62 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Kapalı çevrim kontrol sisteminde üç adet bağımsız PID kontrolcü uygulanmıştır. PID kontrolcülere x, y eksen ve dönüş hareketi için kullanılmıştır. Yol takip performansı hem açık çevrim hem de kapalı çevrim olarak test edilmiştir. Optik fare ile robot hareket kontrolünün doğru bir şekilde sağlandığı gözlemlenmiştir. Robota kablosuz

veri aktarımı eklenmesinin mikrodenetleyici üzerindeki trigonometrik, dinamik ve durum hesaplama yüklerini alabileceği belirtilmiştir. Optik fare ile sistemin ucuz bir şekilde tasarlandığı görülmüştür [9].

Hui-Zhong vd. önceden bilinmeyen dinamik ortamda gerçek zamanlı yol planlama yapabilen mobil robot üzerine çalışmışlardır. Dinamik engelin hareketleri anlık olarak durağanmış gibi örneklemeler kaydedilmiştir ve bir sonraki hareketi tahmin edilmiştir. Geleneksel yöntemlerden gerçek zamanlı yol planlama yapmamaktadır. Bu yöntem yol planlamasını gerçek zamanlı olarak yapmıştır. Deneyler sonucu başarılı sonuçlar elde etmiştir [10].

Palancıoğlu vd. video tabanlı ölçme yöntemleri ve olanakları hakkında bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada konum ve video verilerinin bir arada kullanılmasının etkileri üzerinde durulmuştur. Konum ve video verilerinin bir arada kullanılması ile coğrafi içeriği anlamada ve konum belirleme hatalarını indirgemedeki kolaylık sağlandığı tespit edilmiştir [11].

Parlaktuna vd. lazer mesafe algılayıcısı ile gezgin robot konum tespiti konusunda çalışmışlardır. Çalışmada Pioneer 3-AT robotu kullanılmıştır. Lazer mesafe sensörü ve yapay yer-imi ile kapalı alanda robot konumu tespiti yapılmıştır [12].

Parlaktuna vd. gezgin robotlarda durum kontrolü ve haritalama konuları üzerine çalışmışlardır. Ultrasonik sensörler içeren Pioneer 3-DX robotu ile Bayes güncellemeli doluluk ızgaraları yöntemini kullanarak ortam haritalama yapılmıştır. Gerçek ortam testlerinde pusula bilgisinin tam alınamaması, kodlayıcıdan alınan bilgiler ile oluşturulan haritada kaymalar meydana getirmiştir. Bu sebeple yapay yada doğal yer işaretleri, lazer mesafe sensörleri veya kamera kullanılarak daha doğru harita oluşturulabileceği önerilmiştir [13].

Alp gezgin robotlarda eş anlı haritalama ve konum belirleme üzerine çalışmıştır. Pioneer 3DX robotu üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Öznitelik harita çıkarımında Üçgenleme Tabanlı Birleşim algoritması kullanılmıştır. Robot konumu ve yöneliminde odometri hatalarının giderilmesinde genişletilmiş Kalman süzgeci

kullanılmıştır. Harita üzerinde kenar tespiti işlemleri yapıldığında sahte kenar noktaları tespit edilmiştir. Sahte kenar noktalarını gidermek için kararlı kesişim koşulu ve etkin hareketli pencere güncelleme algoritmaları yazılıma eklenmiştir. Adece odometrik veriler ile konum belirleme işleminde son konumdaki hata oranı %46.18 bulunmuştur. Genişletilmiş Kalman süzgeci ile konum belirlemede ise son konum hata oranı %0.82 bulunmuştur [14].

Gfrerrer vd. Graz Teknoloji Üniversitesinde Mekanum tekerin geometrisi ve kinematığı üzerine çalışmıştır. Çalışmada Mekanum teker de bulunan ruloların geometrisinin detayları verilmektedir. Ruloların yüzeyi ve eğimlerinin basit parametreleri türetilmiştir. Ruloların parametrelerine dayanarak Mekanum tekerli bir aracın kinematığı üzerine çalışılmıştır. Çalışmada Mekanum tekerlerin detaylı geometrik analizi ve rulo yüzeyinin ve meridyen eğirisinin doğal parametreleri üzerine çalışılmıştır. Sonuçlar ruloların imalatı için kullanılabilceği ifade edilmiştir. Araç ve teker hızı arasındaki basit denklemler sunulmuştur [15].

Tlale vd. Council for Scientific and Industrial Research Araştırma Kuruluşunda Mekanum tekerli mobil platformun kinematik ve dinamik modeli üzerine çalışmışlardır. Çalışmada Mekanum tekerli mobil platformun matematiksel modeli geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Mekanum tekerli mobil robot ofis servis robotu olarak kullanılacak şekilde düşünülmüştür. Dört Mekanum teker ile 81 farklı teker hareketi kombinasyonu elde edilmiştir. Yapılan testler sonucu 51 hareketin işlevsel geri kalan 30 hareketin ise işlevsel olmadığını göstermiştir [16].

Shimada vd. mesafe sensörü kullanarak çok yönlü robotlarda engelden sakınma üzerine çalışmışlardır. Çalışmada Mekanum tekerli üzerinde mesafe sensörü bulunan bir platform ile çalışmalar yapılmıştır. Çalışma çoklu engellerden sakınma kontrolünü tek engelden sakınma şemasına indirgeme avantajını sunmaktadır. Bilinmeyen sayıdaki engelden sakınma mesafesi ve sakınma açısı belirlenmiştir. Belirlenen mesafe ve açı değerleri ile engelden sakınma metodu tanımlanmıştır. Tanımlanan metod deneysel çalışmalar sonucu başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak engelin yüksekliğine bağlı olarak engeli algılayamama ve engelin konumuna göre çıkış noktası tespit edememe gibi sorunlar ile karşılaşmıştır [17].

Röhrig vd. lazer mesafe sensörü ile çok yönlü taşıma robotunun lokalizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışma depolar yada dağıtım merkezlerinde taşıma kutularını nakliye etmek üzere Mekanum tekerler ile donatılmış çok yönlü bir mobil robotun takibini ve lokalizasyonunu sunmaktadır. Konumlandırma lazer mesafe sensörleri ve IEEE 802.15.4a ağından elde edilen alan ölçümlerinin sensör füzyonu ile gerçekleştirilmiştir. IEEE 802.15.4a ağı global konumlandırmanın yanı sıra haberleşme içinde kullanılmaktadır. Mesafe ölçümleri Monte Carlo Parçacık Filtresi ile filtrelenmiştir. Çalışma IEEE 802.15.4a mesafe ölçüleri için bir sensör modelinin yanısıra çok yönlü robot için yeni bir hareket planı geliştirmiştir. Deneysel sonuçlar geliştirilen modelin geçerliliğini göstermiştir. Lazer mesafe verilerinin kullanılması pozisyon doğruluğunu artırmakta ve kenetlenme manevralarını sağlamakta olduğu görülmüştür [18].

Ataş vd. gezgin robotlarda konumlandırma ve haritalama üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında KheperaIII robotu kullanılmıştır. Robot sistemlerine kör konumlandırma ve daha sonra bu sistem üzerine parçacık filtresi uygulanmıştır. Parçacık filtresinin bu sistem üzerine uygun olmadığı gözlemlenmiştir. IMU (Atalet Ölçü Birimi) destekli, IMU desteksiz ve IMU destekli parçacık süzgeçli kör konumlandırma sistemlerinin deneyleri yapılmış ve karşılaştırmaları sunulmuştur. Tek robotlu ve çok robotlu olarak haritalama çalışması yapılmış ve aralarındaki farklar sunulmuştur [19].

Tovey vd. ulaşım mesafesini en aza indirmek için performans ve tahmin sınırları üzerine çalışmışlardır. Çalışma konumlandırma ile alakalı birkaç yeni teorik sonuçlar ortaya koymuştur. Çalışma genel olarak hızlı konumlandırma sezgisellerinin kullanımını teorik olarak ortaya koymaya yardımcı olmuştur. Greedy konumlandırmasının seyahat mesafesinin minimalden çok daha büyük olduğu gösterilmiştir. Analiz sonucunda greedy haritalamasında seyahat mesafesinin alan büyüklüğünden daha büyük olamayacağı görülmüştür. Çalışmada arazi boyutunun logaritmik faktörü dahilinde konumlandırma için seyahat mesafesinin minimizasyon gücüğü ispatlanmıştır. Greedy konumlandırma ve haritalama hakkında teorik olarak analiz çalışmaları yapılmıştır [20].

Kim vd. Pusan National Universitesi ve Ulsan Technopark Technical Innovation Building de Mekanum tekerli otomatik yönlendirilen araçlar için ataletsel navigasyon sistemi üzerine çalışmışlardır. Mekanum tekerli robotlarda hareket esnasında çokça kayma meydana geldiği için sadece enkoder bilgileri ile değil ivme ölçer ve gyro sensörlerinden gelen veriler ile kontrol sağlanmalı olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada iki Kalman filtresi ile bir enkoder, bir ivmeölçer ve bir gyro sensör kullanılmaktadır. Doğrulama düz, yan ve çapraz hareketlerinin denenmesi ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Önerilen ölçme tekniğinde sık sık kaymalar yaşanmasına rağmen konum doğru bir şekilde ölçülmüştür. Önerilen yöntem iki adımdan meydana gelmektedir. Birinci adım kaymanın kararı ve ikinci adım pozisyon düzeltme görevini yapmaktadır. İlk adımda enkoder bilgisi ve gyro sensörü ile kayma değeri ölçülmektedir. İkinci adımda ivme sensörü ve enkoder tarafından hesaplanan pozisyon ve kayma derecesi kullanılarak doğru pozisyon hesaplanır ve düzeltme işlemi yapılmaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda sistemin doğru çalıştığı gözlemlenmiştir [21].

Habibov vd. FastSLAM algoritması ile eş zamanlı konum belirleme ve haritalandırma çalışması yapmışlardır. Tasarlanan robot ERSIM simülasyon programında test edilmiştir. Yuvarlak sınırlar içeren ortamlarda algı ölçümleri ve sınır çizdirme yöntemleri optimal tutularak sonuca ulaşılabilirliği tespit edilmiştir. Sistemde algılayıcı olarak altı adet kızılötesi algılayıcı kullanılmıştır. Kullanılan algılayıcı sayısı, konumu ve tipi ölçümlerdeki verimi etkilediği gözlemlenmiştir [22].

Velázquez vd. yaygın olarak kullanılan dört farklı tipteki mobile robotların matematiksel modellerini incelemişlerdir. İki tekerlekli diferansiyel tip, iki sabit bir sarhoş tekerlekli tip, dört tekerlekli birbirlerine kayış kasnakla bağlı tip, palet tip ve üç omni tekerlekli tip mobil robot tiplerinin matematiksel modelleri incelenmiştir [23].

Karaoğuz vd. tek robot ve çoklu robotlar ile ortam haritalama konusundaki literatür çalışmalarını değerlendirmişlerdir. Ortam haritalama problemlerini iki başlık altında toplamışlardır. Bunlardan birincisi haritanın oluşturulmasındaki tanımlamanın nasıl olacağı ve ortamdaki algılanacak nesnelere neler olacağıdır. İkincisi ise haritalamada kullanılacak modelin ve sistemden elde edilen bilgilerin haritanın oluşturulmasında ve güncellenmesinde nasıl kullanılacağıdır. Çalışmada çoklu robotlar ile

haritalandırmanın tekli robotlar ile haritalandırma yöntemlerinin geneleştirilmesine dayandığı tespit edilmiştir. Harita modelleri ve kullanım yöntemleri bakımından yapılan çalışmaların çoğunluğu metrik haritalandırma ve geometrik temelli kullanım yöntemleri sınırlarında olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında geometrik kafes tabanlı haritalama ortamı daha detaylı haritalandırıp farklı algılayıcı bilgilerini birleştirmede daha başarılıdır. Fakat sabit kafes boyutu ile çalıştığından geniş ortamlarda daha fazla sayıda kafes oluşturması gerekmektedir. Bu sebeple yüksek hafıza ve hesaplama gücü ihtiyaçları meydana çıkmaktadır. Düğümlerin ve kenarların ne anlama geldiğini uygulamaya göre değiştirebilen ve çizgi bazlı çalışan topolojik haritalama metodları alternatif olarak geliştirilmiştir. Tüm bu yöntemlere rağmen çoklu robotik haritalandırma sistemlerinde genellikle metrik haritalandırma yöntemi kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca çoklu robotik haritalandırma uygulamalarındaki iletişim bağlantı kriterleri robotlar hareket hâlinde iken, iletişim kararları, toplanan bilginin en fazla olması, hareket planına uygunluk ve robotlar arası etkileşimin en aza indirgenmesi gibi durumlar belirlemektedir [24].

Gracia vd. Valencia Teknik Üniversitesinde tekerli mobil robotların kayma faktöründe göz önünde bulundurularak kinematik modelinin oluşturulması konusunda çalışmışlardır. Çalışma tekerli mobil robotlar için kaymayı da içeren bir kinematik denklem modeli sunmaktadır. Sabit, merkezden yönlendirilen (centered orientable), merkezden yönlendirilmeyen (off-centered orientable) ve Mekanum tekerli olmak üzere dört farklı teker tipine sahip mobil robotlar için kinematik model oluşturulmuştur. Lagrange formüllerine dayalı tekerli mobil robotun dinamiği türetilmiş ve tartışılmıştır. Kayma modelini sağlayan kinematik şartları elde etmek için yarı statik hareket düşünülmüştür. Farklı tipte çekme modelleri zemin ve teker arasındaki kayma için uygulanmıştır. Kayma hızına bağlı doğrusal sürtünme kuvveti için tekerli mobil robotun kaymaz kinematik denklemi kayma modelinin eşitlikleri ve en küçük kareler yöntemi ile ilişkilendirilmiştir. Önerilen yaklaşımın uygulamasını örneklemek için üç tekerli bir araç gerçek durumu içerisinde değerlendirilmiştir. Kayma kinematik modeli için elde edilen deneysel sonuçlar iyi bilinen Kalman filtresi için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kayma faktörünün içerisinde olduğu üç kinematik model sunulmuştur. İlk yaklaşım robotun sabit açısal hızda ve tekerlek kütlelerinin ihmal edilmesi varsayımları ile oluşturulmuştur. İkinci yaklaşım

robotun eğrisel hareketi için gerekli merkezci kuvveti ihmal eder. Üçüncü yaklaşım kayma hızlarına doğrusal olarak etkiyen sürtünme kuvvetlerini dikkate almaktadır. Üçüncü yaklaşımın avantajı analitik olarak hesaplanmasıdır. Üç yaklaşımında doğruluğunun testini yapmak için gerçek ortamda üç tekerlekli endüstriyel forklift kullanılmıştır. Endüstriyel forklift üç tekerli mobil robota eş değerdir. Önerilen model hem gerçek hemde simülasyon ortamları için doğrudan uygulanabilir olduğu görülmüştür [25].

Wu vd. mobil robotlar için dinamik yol planlama ve engel tahmini üzerine çalışmışlardır. Kompleks çevrelerde statik global ve dinamik lokal yol planlama metodlarının bir kombinasyonu geliştirilmiştir. Bilinen statik ve bilinmeyen dinamik engellerin bulunduğu kompleks çevreler deney ortamını oluşturmaktadır. Simülasyon ortamında sistemin çalıştığı gözlemlenmiştir [26].

Zohaib vd. mobil robotlarda engelden sakınma kontrol stratejileri üzerine çalışmışlardır. Çalışmada o güne kadar geliştirilen algoritmaların ve bu algoritmaların karakteristiklerinin karşılaştırıldığı bir tablo oluşturulmuştur [27].

Yalçın vd. insansız kara taşıtlarının otonom hareketleri sırasındaki yol sınırlarını belirlemede yeni bir yöntem önermişlerdir. Test aracı üzerinde 2 boyutlu bir LIDAR sensör ile belirli bir açı altında yol taraması yapılmıştır. Tarama sonucu bölgenin yol olup olmadığına karar verilmiştir. Önerilen algoritmanın simülasyon ve test aracı üzerinde başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [28].

Yavşan vd. Kinect kamera ile insan hareketlerinin 3 boyutlu görüntülerini elde edip NAO insansı robota aktarılmıştır. Aktarılan hareketlerin tanınmasında aşırı öğrenme makinaları ve geri yayılım algoritması vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Aşırı öğrenme makinalarının daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir [29].

Özeren vd. gezgin robotlarda doğal yer imi kullanarak otonom konum kontrolü üzerine çalışmışlardır. Geliştirilen robot lazer sensör, jiroskop, ivme ölçer, manyetik sensör gibi konum ve engel algılama donanımlarına sahiptir. Konum hesaplamada DCM algoritmasını kullanılmıştır. Rotalama işleminde karınca koloni algoritması tercih

edilmiştir. Öznitelik haritalama tekniği ve doğal yer imleri haritalamada kullanılmıştır. Ortam taramada ilk önce manuel olarak tarama yapılması önerilmiştir. Robotun tahrikerleri arasına mekaniksel diferansiyel sistemi konulmuştur. Robot 5-10 cm hata ile rota takibinde bulunmuştur. Bluetooth ile uzaktan bağlantı yapılarak robot kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolün dahili bir sistem ile yapılması önerilmiştir [30].

Buniyamin vd. pointsbug ve tangent bug algoritmalarını statik çevrede karşılaştırmışlardır. Çalışmada belirtilen koşullar altında pointsbug algoritmasının tangentbug algoritmasına göre ortalama hızda daha iyi performans göstermiştir [31].

Zohaib vd. U ve H şekillerine sahip çevrede çarpışmadan yeni bir kaçınma algoritması geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Geliştirilen algoritma akıllı aralık takip yöntemi (Intelligent Follow the Gap Method - IFGM) olarak adlandırılmıştır. Algoritma, akıllı böcek algoritması (Intelligent Bug Algorithm - IBA) ve aralık takip yöntemi (Follow the Gap Method - FGM) ne dayanmaktadır. Simülasyon sonuçları algoritmanın engellerin bulunduğu ortamlarda güvenli ve akıcı sonuçlar verdiğini ispatlamıştır. Çalışmada IBA ve IFGM iki yeni yaklaşım olarak sunulmuştur. IBA diğer bug algoritmalarına kıyasla daha az sürede hedefe ulaşmıştır. IFGM'nin hesaplama işlemi klasik FGM'ye göre daha basit olduğu görülmüştür. Algoritma U ve H biçimli engelleri kolayca geçme başarısı göstermiştir. Sistem yüksek işlem gücüne sahip işlemciler gerektirmediği görülmüştür [32].

Xie vd. Auckland Üniversitesi ve Stuttgart Üniversitesinde otonom konumlandırma için ağır yükde Mekanum tekerli mobil robotlar üzerine çalışmışlardır. Mekanum tekerli robotların çok yönlü hareket kabiliyetinin avantaj olmasına rağmen rastgele kayma, yüksek hızlı titreşim, pozisyon hatası ve enerji kaybı gibi problemleri olduğu görülmüştür. Çalışmada çok yönlü Mekanum tekerli bir mobil robot platformu gerçekleştirilmiştir. Kontrolcü olarak Beckhoff markalı bilgisayar kullanılmıştır. Hareket uygulama ve konumlandırma işlemlerini bu kontrolcü ile yapılmıştır. Bir bilgisayar görsel simülasyonunda bu robot doğrulanmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen robot çok yönlü hareketliliğini pürüzsüz bir şekilde sürekli eğimli olarak gerçekleştirebiliyor. Robotun toplam ağırlığı 100kg olarak belirtilmiştir. Taşıma



kapasitesi olarak 300kg olarak belirtilmiştir. Simülasyon ISG-virtuos temelinde gerçekleştirilmiştir. Beckhoff kontrol sistemi ve ROS çerçevesini birleştiren kontrol sistemi mimarisi doğrulanmıştır. Kayma ve yüksek hızlı tekerlek titreşimlerinden kaynaklı hatalar tespit edilmiştir. Optik encoder dead-reckoning metodu kayma nedeni ile gözle görülür konum hatalarına sebep olduğu görülmüştür. IMU (Inertial Measurement Unit - Atalet Ölçü Birimi), gyro, görüntü sensörü, lazer sensörü, optik akış sensörü ve/veya GPS (Global Positioning System - Küresel Konumlama Sistemi) kullanılarak daha doğru konumlandırma yapılabileceği ifade edilmiştir [33].

Soyaslan iki adet sabit kamera ve bilgileri işleyecek bir bilgisayar yardımı ile çeşitli cisimlerin paralel kamera düzlemine olan uzaklıklarını tespit etmek için çalışma yapmıştır. Bir noktanın iki kameraya olan yatay uzaklığının farkı aykırılık değerini vermektedir. Çalışmadan anlaşılacağı üzere derinlik ve aykırılık değerleri birbirine ters orantılıdır. Çalışmada aykırılık haritası çıkarılarak derinlik analizi yapılmıştır. Çalışma sonucu olarak 70 – 100 cm aralığındaki nesnelerin mesafe ölçümlerindeki hata %3 etrafında bulunmuştur [34].

Kutlu vd. Stereo Vision tekniği ve Kinect ile OpenCV kütüphanesi kullanarak derinlik algılama çalışması yapmışlardır. OpenCV kütüphanesi ve Kinect ile derinlik analizi çalışmanın daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir [35].

Özbay vd. kinect kamera ile derinlik nokta bulutları elde edilen RGB (Red Green Blue - Kırmızı Yeşil Mavi) görüntülerin üzerine bu noktaların eşleştirilmesi için bir yöntem tespit etmişlerdir. Derinlik ölçümlerindeki 3B veriler 2B lu yapıya dönüştürülmüştür. Dönüştürülen veriler RGB görüntü ile eşleştirilmiştir. Bu sebeple görüntülenen nesnelerin derinlik bazında daha fazla ayrıntı verdiği tespit edilmiştir [36].

Kati vd. iki adet kamera ve bir bilgisayar ile görüntü elde edip derinlik analizi yapmışlardır. Sistem 64 – 68 mm aralığında düşük hata oranlarında çalıştığı tespit edilmiştir [37].

Topuz vd. sezgisel yöntemler ile sonar algılayıcıları kullanarak robotlarda engelden sakınma ve yol bulma üzerine çalışmışlardır. İlk önce MobileSim programında

benzetimi yapılmış daha sonra Pioneer 3-dx robot üzerinde deneyler yapılmıştır. Yol bulma genetik algoritma ile çözülmüştür. Engelden sakınmak için dist-bug algoritması duvar takibi yapılmadan kullanılmıştır. Duvar takibi yapılmaması robotun fazladan manevralar yapmasına sebep olmuştur [38].

Güney vd. yer altı madencilik alanında kullanılması için uzaktan kontrollü ve/veya otonom hareket edebilen ölçme ve izleme sistemi gerçekleştirmişlerdir. Sistem 3B tarama ve konum bilgileri elde edebilmektedir. Çalışmada tasarlanan robotun yer altı madenciliğinde kullanımının önemine odaklanılmıştır [39].

Alakshendra vd. Visvesvaraya National Teknoloji Enstitüsünde belirsizlikler ile Mekanum tekerli mobil robotun adaptif robust kontrolü üzerine çalışmışlardır. Çalışma Mekanum tekerli mobil robotlar için yeni bir ikinci dereceden kayma modlu adaptif robust kontrolcü uygulaması sunmaktadır. Robotun kinematik ve dinamik modeli sürtünme, harici kuvvet etkileri ve belirsizliklerin oluşma durumunda hareket eşitliğinin türetilmesi için kurulmuştur. Önerilen kontrol yöntemleri aynı zamanda simülasyon ortamında da denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar ve simülasyon çalışmaları önerilen yöntemin üstünlüğünü göstermiştir. Genelleştirilmiş hareket denklemi Newton-Eular yaklaşımı ile çıkarılmıştır. Deneysel çalışma ve simülasyon ikinci dereceden kayma modlu adaptif robust kontrol ve kayma modlu adaptif robust kontrol ve PID (Proportional Integral Derivative - Oransal İntegral Türevsel) kontrolcülerinde denenmiştir. İkinci dereceden kayma modlu adaptif robust kontrolün daha az kontrol enerjisi ve yumuşak kontrol girişi ile mükemmel bir izleme yeteneği olduğu doğrulanıp kanıtlanmıştır [40].

Vlantis vd. dört mekanum tekerli mobil platformlarında hata tolerans kontrolü üzerine çalışmışlardır. Çalışma KUKA youBot mobil platformu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dört Mekanum tekerli bir mobil robot platformu olarak tasarlanmıştır. Dış konum algılaması ve yönlendirmeler için sensör olarak Sony Eye kamerası kullanılmıştır. Kamera robotun üstüne yerleştirilmiştir. OpenCv ve ArUco kütüphaneleri ile görüntü işleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Robot İşletim Sistemi ise C++ ve Python uygulamaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol yapılırken tekerlerin hatalı olma durumları göz önünde bulundurulmuştur. Hatalı tekerleğe sıfır

tork komutu gönderilerek kontrol yazılımı tarafından tekerlek uyarılmaktadır. Kontrol algoritması ilgili deneysel çalışmalar sonucunda başarılı sonuç verdiği görülmüştür [41].

Adar vd. cisim görüntüsünü algılayıp kolları sayesinde cismi tutabilen insansı robot yapmışlardır. Görüntü elde etmek ve nesnelere algılatmak için Kinect kamera kullanılmıştır. Kamera robotun baş bölgesine konulmuştur. Baş bölgesine konulan kamera robot hareketlerinden etkilendiği için bozuk görüntüler elde edilmektedir. Bu sorun yapay sinir ağları ile görüntü düzeltilerek çözülmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda yeşil renk bazında tanınan nesnelere robot kollar tarafından tutulması sağlanmıştır [42].

Lafcı vd. çalışma ortamında dinamik engeller bulunan gezgin robotlar için hareket planlaması üzerine Gazebo robot simülatörü ortamında çalışma yapmışlardır. Robotun bulunduğu ortam bir harita olarak bilindiği varsayılmıştır. Hedefe giden en kısa yolu bulmak için A\* algoritması kullanılmıştır. Engel tespiti için lazer sensör kullanılmıştır. Engelden kaçma algoritmasının robot hız kontrolü ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. A\* algoritmasında kullanılan H değeri Manhattan metodu ile hesaplanmıştır. Manhattan metodunun çok iyimser sonuçlar vermesi dezavantaj oluşturmaya rağmen tahmin iyimserliği optimal sonuçlardan uzaklaştırmamakta olduğu için tercih edilmiştir. Engelden kaçma planında engelin en yakın noktası dikkate alınmıştır. Çalışmada hareketli engeller ortamda çalışan diğer robotlar olarak değerlendirilmiştir. Bu durumda kafa kafaya gelen robotların sağa dönüp solunda engel kalmayana kadar ilerlemeleri ve yeniden eski rotaarına gelmeleri istenmiştir. Sabit engeller önceden biliniyor kabul edilmiş ve A\* algoritmasının yol planı ile bu engellerden kaçınılmıştır. A\* algoritmasının dinamik engellerin bulunduğu ortamlarda yetersiz kalma eksikliği lazer sensörler ve uygun engel aşma algoritması ile giderildiği belirtilmiştir [43].

Yan vd. mobil robotların dinamik çevrede bulanık mantık ve yumuşatma filtresi temelinde otonom yol planı üzerine çalışmışlardır. Lazer sensörlerden gelen verileri bulanık mantık ve yumuşatma filtresi ile değerlendirilmiştir. Önerilen algoritma dinamik ortamda engeller arası boşlukların tespiti ile en iyi yolu bulmak üzerine

kurulmuştur. Tasarlanan ve gerçek ortamda denenen robotun başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [2].

Sidharthan vd. mobile robot konumlandırılmada LIDAR kullanarak yeni bir sıfır kutup korelasyon yöntemi sunmuşlardır. Yöntem çeviri ve dönüş koşullarında tahmini görüntü değişimini tahmin etmek için tarama verileri arasındaki farkların değişen toplamı yatay ve dikey ayırımını minimize etmek için kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [44].

Qian vd. Hefei Teknoloji Üniversitesinde akıllı üretim sistemlerine yönelik çok yönlü mobil robotların tasarımı ve geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Dar ortamda yumuşak ve esnek taşıma yapmak için dört Mekanum tekerli bir mobil robot tasarlanmıştır. Mekanik sistemi üç ayrılabilir katmandan oluşmaktadır. Her teker bir süspansiyon mekanizması üzerine yerleştirilmiştir. Süspansiyon mekanizması harekete kararlılık kazandırmıştır. Mobil robot hareket kontrolcüsü ve çoklu sensör verilerinin işlendiği kontrolcüsü olmak üzere iki seviye kontrolcüye sahiptir. Mobil robotun konumlandırılmasını yapmak için Kinect kamera ve dört tekerde bulunan enkoderlerden alınan veriler genişletilmiş Kalman filtresi ile filtrelenmiştir. Akıllı üretim sistemine yük taşımak için tasarlanan mobil robot entegre edilmiştir. Deneysel sonuçlar çok yönlü mobil robotun kapalı ortamda ve endüstriyel alanda otonom ve stabil hareket edebileceğini göstermiştir [45].

Aytaylan vd. hiperspektral görüntüler ve LIDAR aracılığı ile toplanan verilerin birleştirilmesi amacıyla, anlamsal bölütleme işlemi genel başarıml oranının arttırılmasını amaçlamaktadırlar. Markov Rastgele Alanlar ve Koşullu Rastgele Alanlar konularında önerilen enerji modellerinden esinlenerek yeni bir enerji denklemi önermişler ve minimizasyonunu yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar gerçek veri kümeleri ile karşılaştırılmıştır. LIDAR ve hiperspektral verilerinin birleştirilmesi sonucu birbirlerinin başarısız olduğu kısımlar birbirlerinin dezavantaj etkilerini ortadan kaldırmışlardır [46].

Kamil vd. robot navigasyon sistemlerinde bilinmeyen hareketli engelleri önceden tahmin etmek ve önceden davranış belirleme üzerine çalışmışlardır. Çalışmada konumu

bilinmeyen dinamik engeller barındıran ortamlardaki mevcut yol planlama yöntemlerinin dezavantajlarına odaklanmışlardır. Geliştirilen sistemde mesafe sensör verileri dört farklı çapta dairesel alanlara bölünmüştür. Engel farklı daireler ile kesişmektedir. Eğer bu kesişme bir önceki ile aynı ise engel durağan değil ise engel hareketlidir. Hareket eden engelin yönü bu dairelerin kesişim noktaları ile belirlenmektedir. Daha sonra geliştirdikleri yöntem uygulanmaktadır. Simülasyon ortamında farklı ortamlarda yapılan deneyler sonucu yöntem doğru sonuç vermiştir [47].

Phan vd. engel hareketlerinin sınırlı bilgileri ve sınırlı algılamaları ile mobil robotların çarpışmadan kaçınmaları konusu üzerine çalışmışlardır. Simplex mimarisinin nasıl kullanıldığı gösterilmiştir [48].

Karakaya vd. tekerlekli mobil robot platformlarında alan tasarımı, engelden kaçınma algoritmaları, konumlandırma gibi testlerin yapılabileceği MATLAB ortamında bir toolbox geliştirmişlerdir [49].

Sadeghian vd. sensörlerle donatılmış eldiven ile dört Mekanum tekerlekli robot kontrolü üzerine çalışmışlardır. Eldivende IMU, FSR (Force Sensing Resistor - Kuvvet Algılama Direnci) ve iki adet flex sensör bulunmaktadır. Robota önüne çıkacak engellerden kaçınması için ultrasonik sensörler takılmıştır. Sensör verilerinin yorumlanmasında bulanık mantık denetleyicisi kullanılmıştır. Bulanık mantık denetleyicisi ile engellerden sakınma sağlanmıştır [50].

Wang vd. çok yönlü tekerlere sahip mobil robotların yörünge takibinde kullanılan tahminsel kontrol stratejileri üzerine çalışmışlardır. Çalışma üç Omni tekerli bir mobil robotun yörünge izlemesi üzerinedir. Robotun kinematik modeli kurulmuştur ve tahmin kontrol modeli algoritması tasarlanmıştır. Kontrol algoritması başarılı sonuçlar vermiştir [51].

Tsai vd. National Chung Hsing Üniversitesinde dinamik etkiler ile heterojen ağıllı Mekanum tekerli çoklu robotların konsensüs formatlı bulanık kayma modu kontrolü üzerine çalışmışlardır. Çalışmada teorik olarak graph theory ve fuzzy sliding-mode

control konseptlerinin dahil edilmesi ile fuzzy sliding mode distributed consensus leader-follower formation control yöntemi sunulmuştur. Heterojen Mekanum tekerli mobil robotların kontrol kurallarını geliştirmek için bulanık anahtarlama mekanizmasının kullanışlı olduğu görülmüştür. Lyapunov stabilite teorisi ile consensus tracking garanti edilebilir ve istenilen düzen muhafaza edilebilir. Çalışmada yapılan iki simülasyon sonucu önerilen kontrol metodunun consensus tracking elde edimi ve düzendeki bütün takipçi Mekanum tekerli mobil robotların hareketinde efektif ve güçlü olduğu görülmüştür [52].

Zhang vd. Pekin İnşaat Mühendisliği ve Mimarlık Üniversitesinde mobil robotlarda görüntü temelli hedef tanıma ve engelden sakınma üzerine çalışmışlardır. Mekanum tekerli bir mobil robot platformu geliştirilmiştir. Kinect kamera ve lazer mesafe sensörü kullanılmıştır. Robot verileri bulut üzerinden merkezi bilgisayara göndermekte ve merkezi bilgisayar gerekli kontrol işaretlerini robota göndermektedir. Robot kontrol işaretlerini 100ms de bir okuyacak şekilde tasarlanmıştır. Nesne algılamada Gauss modeli arka plan farkı yöntemi kullanılmıştır. Hedef özelliklerini çıkarmada Speed Up Robust Features algoritması ve optimizasyon için Random Sample Consensus algoritması kullanılmıştır. Engellerden sakınmak için lazer mesafe sensörü kullanılmıştır. Deney sonucunda robotun hedef tanıma ve engellerden sakınabildiği gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar SURF algoritmasının %19.01 hata ile ve RANSAC (Random Sample Consensus - Rastgele Örneklem Konsensusu) algoritmasının %3.78 hata ile çalıştığını göstermiştir. RANSAC algoritması ışığın etkisi ile oluşan hataları elimine etmiştir [53].

Lu vd. Beijing Üniversitesinde çok yönlü araçlar için adaptif kayma mod kontrolü sinir ağı üzerine çalışmışlardır. Çalışmada dört Mekanum tekerli bir mobil robot platformu geliştirilmiştir. Sistemin dinamik ve kinematik modelleri oluşturulmuşmuştur. İç döngü kontrolünde kayan tip kontrol (SMC) ve dış döngü kontrolünde ise PID kullanılmıştır. Stabil ve robust performans kazanımı için yapay sinir ağı çeşitli belirsizliklerin tahmini ve modellenmesi için adaptif kural tabanında tanıtılmıştır. Önerilen kontrol metodu Lyapunov teorisi kullanılarak analiz edilmiştir. PID ve SMC kontrolcileri yapay sinir ağı ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve gerçek ortamda

platform test edilmiştir. Geliştirilen ağın belirsizlik ve bilinmeyen dış etkenlere karşı başarılı olduğu görülmüştür [54].

Nasrinahar vd. robotların engelden sakınması amacıyla akıllı hareket planlaması üzerine çalışmışlardır. Durağan ve hareketli engellere çarpmamak için iki farklı Sugeno bulanık mantık denetleyicisi tasarlamışlardır. Çalışmada hedefe ulaşma davranışı, hız kontrol davranışı, hedef arama davranışı ve engelden sakınma davranışı üzerine tasarım ve geliştirmelerde bulunulmuştur. MATLAB ortamında geliştirilen model üzerinde çalışma yapılmıştır. Çalışmada uygulanan kontrol yöntemi ile istenilen hedeflere ulaşma başarısı gösterilmiştir [55].

Sharma vd. 2B robot yol planlaması için sanal böcek planlama tekniği üzerine çalışmışlardır. Bug algoritma ailesi için BugFlood adında yeni bir algoritma sunmuşlardır. Çeşitli engeller içeren ortamlarda BugFlood algoritması açık hareket planlama kütüphanesi (Open Motion Planning Library - OMPL) planlayıcısı ve görünürlük grafiği metodu (visibility graph method) ile karşılaştırmıştır. Sonuçlar BugFlood algoritmasının düşük hesaplama zamanı ile çalıştığını göstermiştir [56].

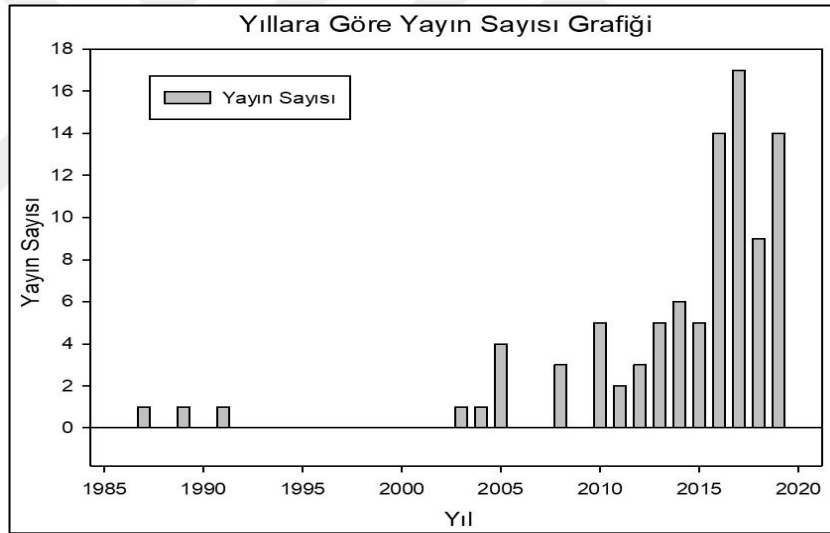
Dobhada vd. ekstrapolasyon kullanarak çarpışma algılama ve önleme konusunda çalışmışlardır. Engelin hareket yolunun sistemin hareket yolu ile aynı zamanda çakışmaması için hareketli engel ultrasonik sensör, kamera ve servo motor kullanılarak takip edilip tahminde bulunulmuştur. Geliştirdikleri algoritma daha çok görme engelliler için düşünülmüştür ve deneylerinde başarılı sonuçlar vermiştir [57].

Khan kapalı alanlarda otonom mobil robotlar için navigasyon çalışması yapmışlardır. Ultrasonic sensörler kullandıkları robotlarını bug-2 algoritması ile engelleri aşmasını sağlamışlardır [58].

Zijie vd. çok yönlü mobil robotların rota düzenlemesi için bulanık kontrol stratejisi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada Mekanum tekerin hareketini ve robotun kinematik modelini analiz ederek gerçek zamanlı olarak bulanık PI algoritması ile rota düzenlemesi yapılmıştır. Robotun rotadan çıkma hataları bulanık PI kontrolcüsü ile ve kontrolcüsüz olarak analiz edilmiştir. Robot 3.5 m olan bir mesafede hareket etmeye

başladığı zaman boylamsal ve enlemsel yönünde meydana gelen hataların  $-2.5^{\circ}-0^{\circ}$  ve  $-10.5^{\circ}-0^{\circ}$ 'den  $-0.6^{\circ}-0.6^{\circ}$  ve  $-1^{\circ}-0^{\circ}$ 'ye kontrol yöntemi sayesinde azaldığı görülmüştür. Deneysel çalışmalarda geleneksel PI kontrolcüsü ile bulanık PI kontrolcüsü karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda bulanık kontrol algoritması ile robotun hatası  $35^{\circ}$  ve  $40^{\circ}$  arasında olduğu zaman 1.3 ve 1.2 saniye arasında düzeltme yaptığı ve aşım (overshoot) açısı değerinin  $7.7^{\circ}$  ve  $4.3^{\circ}$ 'ye indiği görülmüştür. Deneysel sonuçlar bulanık PI algoritmasının iyi düzenleme performansına sahip olduğunu göstermiştir [59].

Web of Science'da title üzerinde yapılan aramada 92 tane çalışma çıkmıştır. Bunların 27 tanesi makale ve 64 tanesi de konferans bildiri şeklindedir. Son yıllarda Mecanum tekerlek kullanılarak yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Yıllara göre mecanum tekerlek ile ilgili çalışmalar.

Bu tez çalışmasında kapalı ortamda güvenlik amacı ile ortam taraması yapan bir mobil robot geliştirilmiştir. Etrafı, ortamda bulunan durağan ve hareketli engelleri algılaması için LIDAR kullanılmaktadır. LIDAR verileri mini bilgisayar tarafından okunmaktadır. Okunan veriler filterlenip engeller arası boşluklar tespit edilmektedir. Tespit edilen boşluklara göre bulanık mantık sınıflandırıcısı robot hareketine karar vermektedir. Yapılan araştırmalar sonucu literatürde bulanık mantık sınıflandırıcısı ile boşluk takip metodu ilk defa bu tez çalışmasında birlikte kullanılmıştır.



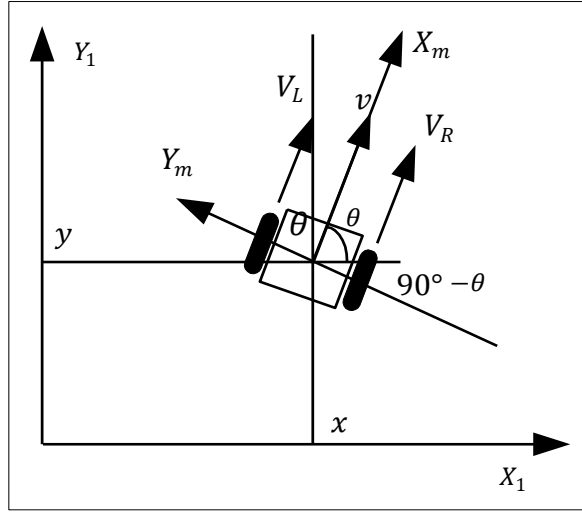
## BÖLÜM 3

### MOBİL ROBOT YAPISI

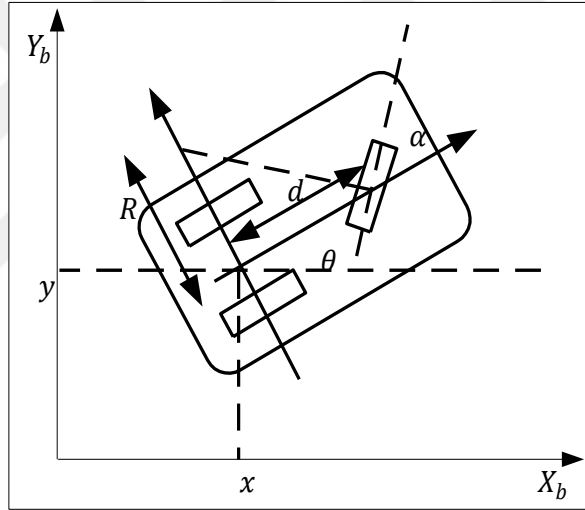
Yere bağımlı robotik sistemlerinin popüler türleri zemine montaj edilen robotlar ve mobil robotlardır. Zemine montaj edilen robotların fiziksel özellikleri kendi sınırlarını belirlemede hareket kabiliyetleri bu sınır içerisinde kalmaktadır. Mobil robotlar ise serbestçe engellerin bulunduğu ortamlarda güvenli bir şekilde hareket edebilmektedirler. Robotların yapısını iki önemli başlık oluşturmaktadır. Bunlar mobil robot kinematiği ve mobil robot dinamiğidir. Robot kinematiği robotların çalışma alanlarındaki konumları, geometrik ilişkileri, yörünge kısıtlamaları ile ilgilenmektedir. Zemine montaj edilen robotların fiziksel yapılarına bağlı çeşitli türleri olduğu gibi mobil robotlarda bir, iki, üç yada daha çok tekerli olabilirler. Bu yapılarını kinematik açıdan hesaplamak için geometriksel özellikleri kullanılmaktadır. Tekerli mobil robotlar kinematik olarak nonholonomic tekerli mobil robotlar ve holonomic tekerli mobil robotlar olmak üzere ana iki kategoriye ayrılmaktadır. Nonholonomic tekerli mobil robotlar kendi içinde üç başlıkta değerlendirilmektedir.

Diferansiyel sürürlü (Şekil 3.1) mobil robotlar. Robot platformunun sağ ve sol bölgelerine monte edilmiş iki sabit tekerden oluşmaktadır. İki tekerlek bağımsız olarak kontrol edilmektedir. Denge ve stabilite için bir yada iki pasif teker kullanılmaktadır. Sağ ve sol tarafta bulunan tekerlerden birinin diğer tekerden daha hızlı dönmesi ile robot dönme hareketi, ikisinin aynı hızda bir yöne dönmesi ile robot ileri ve geri hareketlerini yapmaktadır [1].

Üç tekerli (Şekil 3.2) mobil robotlar. Robot platformunda üç teker bulunmaktadır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi bir teker hareketlidir. Hareketli teker aynı zamanda robot hareketini de sağlamaktadır. Diğer iki teker stabilite için kullanılmaktadır. Hareketsiz iki teker robotun hareketi için güç vermemektedir. Ön tekerin yapmış olduğu açıya bağlı olarak robotun hareket yönü değişmektedir [1].



Şekil 3.1. Diferansiyel sürürlü mobil robot yapısının gösterimi [60].



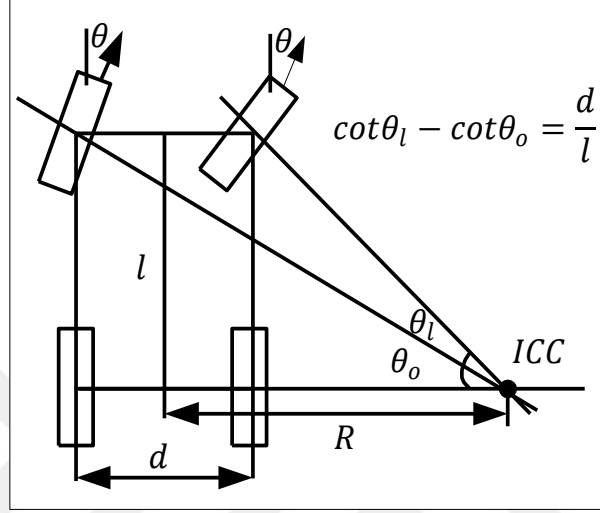
Şekil 3.2. Üç tekerli mobil robot yapısının gösterimi [60].

Arabaya benzer (Şekil 3.3) mobil robotlar. Otomobillerde kullanılan hareket sistemi ile aynı özellikler taşınmaktadır. Robot hareket yönünü ön tekerlerin yaptığı açı belirlemektedir. Bu durum robot hareketini sınırlandırmaktadır. Robot belirli bir dairesel yörünge dönüşler yapmaktadır [1].

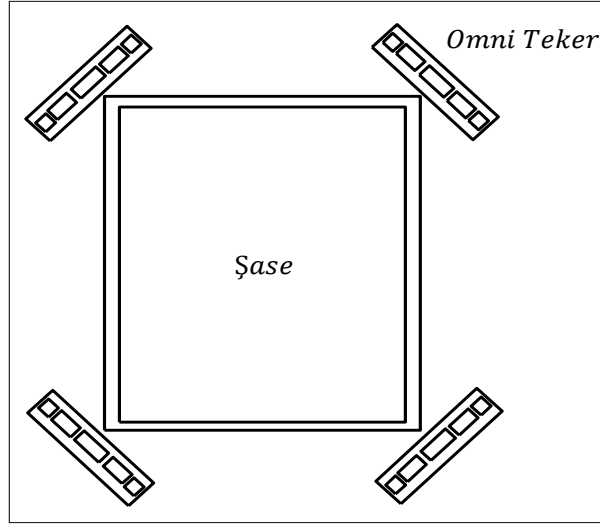
Holonomic tekerli mobil robotlar kendi içinde iki başlıkta değerlendirilmektedir. Bunlar ortogonal (evrensel) birden fazla tekerler ile çok yönlü mobil robotlar ve Mekanum tekerler ile çok yönlü dört tekerli mobil robotlardır.

Ortogonal (evrensel) birden fazla tekerler ile çok yönlü mobil robotlar. Evrensel

tekerler robota çok yönlü hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Çok yönlü hareketlilik için tekerlerin belirli geometride monte edilmesi gerekmektedir. Her bir teker ayrı ayrı kontrol edilmektedir. Tekerlerin hareketlerine bağlı olarak ileri, geri, sağ, sol, sağ çapraz, sol çapraz gibi hareketler yapılmaktadır.



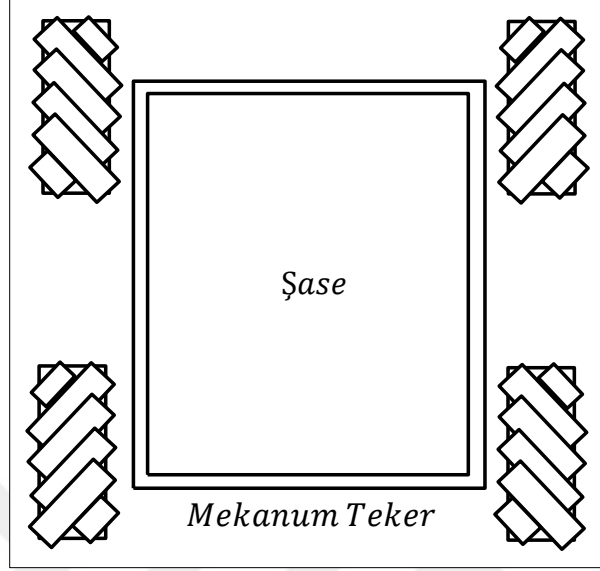
Şekil 3.3. Arabaya benzer mobil robot yapısının gösterimi [60].



Şekil 3.4. Ortogonal birden fazla teker ile çok yönlü mobil robot yapısının gösterimi [61].

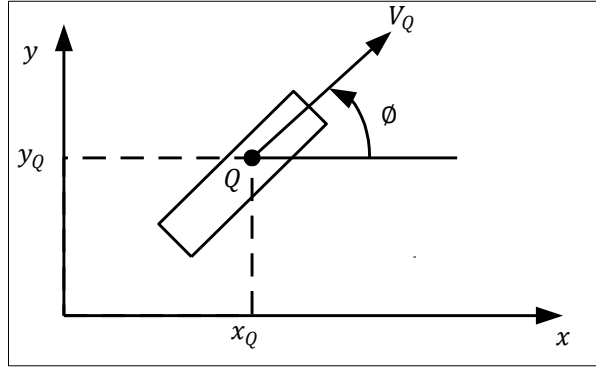
Mekanum tekerler ile çok yönlü dört tekerli mobil robotlar. Mekanum tekerler en az dört adet olacak şekilde Şekil 3.5’de görüldüğü düzende bağlanmalıdır. Mekanum tekerler robota çok yönlü hareket kabiliyeti kazandırmaktadır. Tekerlerin herbiri ayrı

olarak kontrol edilmektedir. Teker hareketlerine bağılı olarak ileri, geri, sağ, sol, sağ çapraz, sol çapraz olmak üzere temel 6 tip hareket yapılmaktadır.



Şekil 3.5. Mekanum tekerler ile çok yönlü dört tekerli mobil robot yapısının gösterimi [61].

Nonholonomic yapının temel kinematik yapı Şekil 3.5 üzerinden Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2 çıkarılarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Temel kinematik gösterimi.

Şekil 3.6'da kinematik yapının temel kinematik eşitliği Eşitlik3.1'de verilmektedir.

$$\dot{x}_Q = v_Q \cos \phi, \dot{y}_Q = v_Q \sin \phi, \dot{\phi} = \omega_Q \quad (3.1)$$

Eşitlik3.1'e gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Eşitlik 3.2 oluşmaktadır.

$$-\dot{x}_Q \sin \emptyset + \dot{y}_Q \cos \emptyset = 0 \quad (3.2)$$

Mobil robot dinamiği açıklanırken doğru dinamik ve ters dinamik olmak üzere iki ana başlık göz önünde bulundurulur. Doğru dinamik motorlar tarafından çeşitli kuvvet yada tork verilen robotun dinamik cevaplarını tanımlamak için dinamik eşitlikleri sağlamaktadır. Ters dinamik ise robot eklemlerini istenen yörüngeye getirmek için uygulanmak zorunda olan tork yada kuvvetleri sağlar. Tekerlekli mobil robotların dinamik eşitlikleri Newton – Euler ve Lagrange eşitliklerinden türetilmektedir. Newton – Euler modeli Lagrange modeli gibi kapsamlı türevlere ihtiyaç duymayan, daha basit ve çoğu alanda tercih edilmektedir. Mobil robotlarda kontrolcü oluşturmak içinde çeşitli yöntemler mevcut bulunmaktadır. Yıllardır çalışılan genel standart robot kontrolcüler aşağıda sıralanmaktadır [62]. Sırasıyla;

- Oransal integral denetleyici (Proportional integral controller).
- Lyapunov fonksiyonu temelinde denetleyici (Lyapunov function-based controller).
- Tork hesabı denetleyici (Computed torque controller).
- Hareket oranı çözümlü denetleyici (Resolved motion rate controller).
- Hareket ivmesi çözümlü denetleyici (Resolved motion acceleration controller).
- Mobil robotun kontrol işlemi iki aşamadan oluşmaktadır.
- Kinematik takip/denge kontrol (Kinematic tracking/stabilizing control).
- Dinamik takip kontrol (Dynamic tracking control).

Robotun kinematik modeli çıkarılırken ilk önce lineer ve açısal hızlarının kontrol kurallarını elde etmek için Lyapunov fonksiyonu kullanılmaktadır. İkinci olarak Lagrange modeli yada dişli kutusu ve motor dinamiklerini içeren yada içermeyen Newton dinamik modeli kullanılmaktadır [62].

İleri kontrolcüler lineer durum geri bildirim temelli denetleyici ve değişmez katman temelli denetleyicidir. Mobil robotlarda lineer durum geri bildirim temelli denetleyici modeli giriş yada giriş çıkış doğrusallaştırma şeklinde yapılmaktadır. Holonomic olmayan robotlar affine sistemi ile modellenenirler. Değişmez katman temelli denetleyicisi ise nonholonomic Brockett entegratörü ve (2-n) zincir modeli kullanılmaktadır. Bu kontrol tekniği farklı kontrolcülerin geniş kaynakları ile zengin

bir literatüre sahiptir. Nonholonomic metodu ince bir şekilde ele almaktadır [62].

Mobil robotlar adaptif kontrol ve robust kontrol olmak üzere iki ana başlıkta kontrol edilmektedir. Adaptif kontrol yük değişkenliği, yakıt durumu gibi yavaş değişen sistemler için uygundur. Belirsizliklerin olduğu ve bu belirsizliklerin sınırlarının bilinmediği durumlarda robust kontrol kullanılmaktadır. Adaptif kontrol sistemin çalışma durumunda meydana gelecek değişiklikleri anlayabilen ve buna göre kendi parametrelerini değiştirerek içinde bulunduğu duruma uygun hale gelmeye çalışmaktadır. Robust kontrolde ise kontrol parametreleri başlangıçta nasıl verildi ise o şekilde devam etmektedir. Sistemin değişimlerinden etkilenmemektedir. Adaptif kontrol model referansı ile kontrol metodu ve kendini yenileyebilen kontrol metodudur. Lineer olmayan sistemler için güçlü bir yöntem olan robust kontrol kayma modu (sliding mode control) kontrol tekniğini kullanmaktadır [62].

Robot planlama konusu robotun görevini nasıl planlayacağı ve istenilen konuma nasıl ulaşacağı ile ilgili genel bir problem ile ilgilenmektedir. Robot planlama, robot yol planlaması ve robot hareket planlamasını içerir. Robot yol planlaması robot navigasyon uygulamalarında temel ihtiyaç duyulan işlemlerden biridir. Robot yol planlaması üç işlemde oluşmaktadır. Bunlar kendini konumlandırma, yol planlama ve harita oluşturma ve harita yorumlamadır. Kendini konumlandırma “Ben neredeyim?” sorusuna cevap aramaktadır. Yol planlama ise “Gideceğim yere nasıl gidebilirim?” sorusuna cevap aramaktadır. Harita oluşturma ve yorumlama ise robot çevresini temsil eden bir geometrik yapı sağlamaktadır. Özel teknikler ise bağıl konumlandırma metodu ve mutlak konumlandırma metodu olarak iki sınıfa ayrılmaktadır [62]. Bağıl konumlandırma odometri veya atalet navigasyonu tarafından gerçekleştirilmektedir. Mutlak konumlandırma model eşleştirilmesi, doğal ve yapay yerleri tanımda kullanılır. Yol planlama yerel yada küresel olabilir. Yerel yol planlama lokal sensörlerden data alırken ve robot hareket ediyorken gerçekleştirilmektedir. Bu durumda robot ortam değişimlerinde yeni yol üretebilme kabiliyetine sahiptir. Küresel konumlandırma ise robotun çevreyi statik ve tam olarak bildiği durumlarda gerçekleştirebilmektedir. Bu durumda robot hareketinden önce algoritma başlangıç noktasından hedef noktasına bir yol üretmektedir. Robot hareket planlamasını üç farklı alanda sınıflandırılmaktadır [62]. Bunlar görev yada kartezyen

alan, eklemler (motorlar) alan, eyleyici alandır. Bu üç kategori altı ayrı stratejiyi barındıran serbest yol planlamasında çok geniş kategorilere sahiplerdir. Bunlar duyarlı kontrol, temsili dünya modeli, ikisinde birleşimdir. Çoğu yol planlama metodu model tabanlı yaklaşım ve model harici yaklaşım olarak iki kategoriye ayrılabilir. İlk kategoride robot çalışma alanı ile ilgili bütün bilgiler önceden öğretilmektedir. Kullanıcı objelerin geometrik modelini ve bu modellerin terimsel açıklamalarını belirtmektedir. İkinci kategoride robot çalışma alanı ile alakalı bilgilerin bazıları sensörler vasıtasıyla gözlemlenmektedir. Kullanıcı bir görevi başarmak için ihtiyaç duyulan robot hareketlerinin hepsini belirtmek zorundadır. Robot çalışma alanında hareketli ve hareketsiz engeller bulunmaktadır. Böylece iki tür yol bulma problemi sabit engeller arasında yol planlama ve hareketli engeller arasında yol planlama ile çözülmektedir [62].

Sabit engeller için yol planlama metodolojisi alan yapısı ile ilgilenmektedir. Bu durumda yol planlama yöntemleri uygulanmaktadır. Harektli engellerin bulunduğu durumlarda ise problem iki farklı plan uygulanmaktadır. Bunlar sabit engeller ile çarpışmayacak şekilde bir yol planı ve hareketli engellere yol boyunca çarpmayacak şekilde bir hız planıdır. Bu iki plan robot hareket planını oluşturmaktadır. Robot navigasyon haritaları çevre temsili için sürekli geometrik tanımlama (continuous geometric description) yada ayrışma tabanlı geometrik harita (decomposition-based geometric map) yada topolojik harita (topological map) kullanılmaktadır. Bu haritalar uygulama altındaki yol algoritması için ayrık haritalara uygun çevrilmek zorundadır. Bu dönüşüm dört temel yöntem ile tamamlanmaktadır. Bunlar yol haritaları, hücre ayrıştırma, potansiyel alanlar ve vektör alan histogramlarıdır. Robotlar konumlarını belirlemek ve hedeflenen noktaya gidebilmek için sensörler vasıtasıyla çevreyi algılamak zorundadır [62].

## BÖLÜM 4

### ENGELDEN SAKINMA YÖNTEMLERİ

Mobil robot uygulamalarına engelden sakınma problemi önemli bir önem arz etmektedir. Mobil robotun durağan, hareketli yada her iki engelin de bulunduğu ortamlarda çalışmaktadır. Çevreyi algılama engeli tespit etmek ve hareketini bu şekilde düzenlemek gerekmektedir. Literatürde birçok yöntem önerilmiş ve test edilmiştir. Performansları açısından yöntemlerden bazıları popülerlik kazanmıştır. Bu yöntemlerden bazılarının performans karşılaştırmaları Çizelge 4.1 de verilmektedir [27].

Çizelge 4.1. Farklı engelden sakınma algoritmalarının özelliklerinin karşılaştırılması.

Algoritma	Gerçekleştirme		Performans			Açıklamalar
	Gerekli Donanımlar	Gerekli Parametreler	Verimlilik	Yakınsama	Zaman Karmaşıklığı	
Böcek Algoritması (Bug Algorithm)	Mesafe sensörü (IR, sonar), Mikrokontrolcü	Geçerli ve hedef konum	Düşük, robot hedeften uzağa gidebilir.	Evet, ama hedefe ulaşmak için daha çok zaman alır.	Zaman karmaşıklığı her zaman engelden kaçmak için bir yönde hareket eder.	Yerel minimum oluşmaz uzun yol seçer.
Potansiyel Alan Metodu (Potential Field Method) (VFF)	Mesafe sensörü (IR, sonar), Mikrokontrolcü	Hedef ve engel mesafesi	Düşük, hesaplama doğru değil, kısıtlamalar hesaba alınmıyor.	Hayır (U ve simetrik engeller varsa)	Daha az zaman gerekir çünkü kısa yolu seçer	Yerel minimum oluşur.
Vektör Alan Histogramı (Vector Field Histogram)	Sonar sensör, işlemci, yüksek hafıza	Engel mesafesi	Düşük, hesaplama doğru olabilir ancak bellek, işlemci ve güç gibi daha fazla kaynak tüketir.	Hayır (U ve simetrik engeller varsa)	2B ızgara oluşturmak ve 2B'den 1B'ye kadar polar histograma dönüştürme için daha fazla zaman gerekir	Mikrokontrolcü için zordur. Yüksek hesaplama gerektirir.
Görme Sensörü Tabanlı Metod (Vision sensor based method)	Kamera, sonar sensör, işlemci, beagle board, laptop	Engel pozisyonu, açısı ve mesafesi	Yüksek, hesaplamalar gerçek ve doğrudur (ekipmana bağlı olarak).	Olabilir veya olmayabilir (Algoritmanın doğasına bağlı)	Kullanılan kameranın çözünürlüğüne ve kullanılan uygulamaya bağlı olarak hesaplamalar daha çok zaman alır.	Mikro kontrolcüler ile minik araçlar için en iyisi değildir. Laptop yada işlemci ve MATLAB gibi özel uygulamalar gerektirir.



Çizelge 4.1.devam ediyor.

Algoritma	Gerçekleştirme		Performans			Açıklamalar
	Gerekli Donanımlar	Gerekli Parametreler	Verimlilik	Yakınsama	Zaman Karmaşıklığı	
Boşluk Takip Metodu (Follow the Gape Method)	Ultrasonik ve LIDAR sensör, kamera optik hız sensörü, NIPXI-811108RT işlemci, PXI 7954R FPGA	Engel mesafesi ve açısı	Yüksek, kolay ayarlanır, her zaman kısa yolu seçer, simetrik engelleri algılayabilir.	Hayır (U ve simetrik engeller varsa)	Az zamanda bitirir. Karar yoğunluk algısı temeline dayanmaktadır.	U şekilli engellerde başarısızdır.
Dolaşma Yolu ile Hibrit Navigasyon Algoritması (Hybrid Navigation Algorithm With Roaming Trails)	Lazer ve sonar sensör, Pioneer 3-AT robot	Önceden bilinen bilgi	Orta, en kısa yolu oluşturur ancak yoldan sapma sınırı yoktur	Evet, fakat bazı senaryolarda robot engelin önünde durabilir.	Referans yol üretmek daha zaman alır (A* araması gereklidir). Dakikalar veya saniyeler	Yüksek hesaplama gerektirir. Saniyeler ve dakikalarca çok zaman harcar.
Yeni Hibrit Navigasyon Algoritması (New Hybrid Navigation Algorithm) (NHNA)	Lazer sensör, Mikro işlemci	Önceden bilinen bilgi	Hybrid orta ve verimli, DH-Bug algoritmasını kullanır.	Evet, cul-de-sac gibi bazı senaryoların dışında çoğunlukla yakınsar.	Yol üretmek için gereken A* araması ile daha çok zaman harcar.	Yüksek hesaplama gerektirir. Saniyelerce çok zaman harcar.

Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere her yöntem kendine has donanım ve parametrelere ihtiyaç duymaktadır. Ortaya çıkan problemler hangi parametrelere sahip, ne kadarlık verim istenmekte gibi durumlara göre donanım ve yöntem belirlenmektedir. Yüksek verimlilik istendiğinde Görüntü Sensörü Tabanlı Metod ve Boşluk Takip Metodu verilmektedir. Görüntü Sensörü Tabanlı Metod Boşluk Takip Metoduna göre daha fazla hesaplama zamanı almaktadır. Ancak Boşluk Takip Metodu U şeklindeki engellerde başarısızdır. Potansiyel Alan Metodu ve Böcek Metodu kullanılması için hedef konumunun bilinmesi gerekmektedir. Diğer metodlarda böyle bir zorunluluk yoktur. Vektör Alan Histogramı, . Dolaşma Yolu ile Hibrit Navigasyon Algoritması, Yeni Hibrit Navigasyon Algoritması ve Görme Sensörü Tabanlı Metod yüksek hesaplama gücü istemektedir. Dolaşma Yolu ile Hibrit Navigasyon Algoritması en düşük yolu hesaplamaktadır. Ancak hesaplamalarda çok zaman harcamaktadır. Boşluk Takip Metodu az hesaplama zamanı harcamaktadır. Görme Sensörü Tabanlı Metod’un verimliliği donanım kalitesine bağlıdır. Donanım kalitesi verimliliği doğru orantılı olarak etkilemektedir.

#### 4.1. YAPAY POTANSİYEL ALAN METODU

Yapay Potansiyel Alan Metodu (YPA) ilk kullanıldığı günden bugüne çeşitli çalışmalar ile kullanılmış ve kullanılmaya devam etmektedir. Metodun temel mantığının anlaşılması için geleneksel YPA'yı anlamak gerekmektedir. YPA'nın altında yatan temel fikir robotun teorik bir kuvvet alanının içerisinde hareket ettiği düşüncesidir. Ortamda bulunan hedef noktası çekici bir potansiyel oluştururken engeller itici potansiyel oluşturmaktadır. Hedefin çekici gücü robotun hedefe doğru yönelimini arttırmaktadır. Engellerin oluşturduğu itici kuvvet robotun engellerden uzaklaşmasını sağlamaktadır. Eşitlik 4.1'de verilen ifade itici ve çekici kuvvetlerin bileşkesi olarak tanımlanabilir. Eşitlik 4.1'deki ifade ile düşük kuvvetin doğrultusunda hareket eden robot çarpışmadan uzak bir yol bulabilir. Robot koordinatları  $q = (x, y)^T$  olarak tanımlandığı zaman bileşke potansiyeli Eşitlik 4.1'de verilmektedir.

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1'de bulunan  $U(q)$  çekim potansiyeli ve itme potansiyellerinin toplamıdır.  $U_{att}(q)$  çekim potansiyelini ve  $U_{rep}(q)$  itme potansiyelini ifade etmektedir. Hesaplanan yapay kuvvet hedef noktasına robotu götürecektir yönü ifade etmektedir. Çekim kuvveti çekim potansiyelinin negatif gradyanıdır. İtme kuvveti itme potansiyelinin negatif gradyanıdır. Robot üzerinde oluşan yapay kuvveti Eşitlik 4.2'de ki gibi ifade edilmektedir.

$$F(q) = -\nabla U(q) = -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q) = F_{att}(q) + F_{rep}(q) \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2'de  $F(q)$  yapay kuvveti temsil etmektedir. Ayrıca robotun hedefe ulaşmasında rehberlik etmektedir.  $F_{att}(q)$  çekim kuvvetini ve  $F_{rep}(q)$  itme kuvvetini temsil etmektedir. Çekim potansiyeli Eşitlik 4.3'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2}k(q - q_g)^2 = \frac{1}{2}k\rho_{goal}^2(q) \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.1'de  $k$  pozitif bir katsayıdır.  $q_g = (x_g, y_g)^T$  hedefin konum vektörüdür.

$\rho_{goal}(q) = \|q - q_g\|$  robot konumu ve hedef pozisyonu arasındaki Öklid mesafesidir. Çekim kuvveti Eşitlik 4.4'da ki gibi verilmektedir.

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = -\frac{1}{2}k\nabla\rho_{goal}^2(q) = -k(q - q_g) \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.4'de görülen  $F_{att}(q)$ ,  $q_g$  ya doğru yönlendirilmiş bir vektördür.  $F_{att}(q)$  nun bileşenleri çekim kuvvetinin x ve y yönü boyunca eksi yönlü türevleridir. Böylece çekim kuvveti etki ettiği zaman bileşenler Eşitlik 4.5 deki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} F_{att-x}(q) &= -k(x - x_g) \\ F_{att-y}(q) &= -k(y - y_g) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.5'de verilen  $F_{att-x}$  X eksenindeki çekim kuvvetini ve  $F_{att-y}$  Y eksenindeki çekim kuvvetidir. Robotlar engellerden uzaklaştırılmalıdır ancak engeller robottan uzakta olduğu durumlarda da engellerin robot hareketine etki etmesi istenmez. Bu sebeple YPA metodunu 1986 yılında tanıtan Khabib itme potansiyel alanı olarak Eşitlik 4.6'deki ifadeyi kullanmıştır.

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} 0 & , \rho(q) \geq \rho_0 \\ \frac{1}{2}\eta \left( \frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & , \rho(q) \leq \rho_0 \end{cases} \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6'da bulunan  $\eta$  pozitif bir ölçekleme faktörüdür.  $q_c = (x_c, y_c)$ ,  $q$ 'ya yakın bir engelde benzersiz bir konum olursa, robot ile engel arasındaki en kısa mesafe  $\rho(q) = \|q - q_c\|$  olmaktadır.  $\rho_0$  tek bir engelin en büyük etki mesafesidir. Robot ile engel arasındaki mesafe  $\rho_0$  dan büyük olduğu zaman engel robota etki edememektedir. Benzer şekilde itme kuvveti Eşitlik 4.7'da ki gibi verilmektedir.

$$F_{rep}(q) = -\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} 0 & , \rho(q) \geq \rho_0 \\ \eta \left( \frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \left( \frac{1}{\rho^2(q)} \right) \nabla\rho(q) & , \rho(q) \leq \rho_0 \end{cases} \quad (4.7)$$

yada

$$F_{rep}(q) = \begin{cases} 0 & , \rho(q) \geq \rho_0 \\ \eta \left( \frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \left( \frac{1}{\rho^2(q)} \right) \frac{q-q_c}{\|q-q_c\|} & , \rho(q) \leq \rho_0 \end{cases} \quad (4.8)$$

İtme kuvveti  $F_{rep}$  in bileşenler  $F_{rep-x}$  ve  $F_{rep-y}$  olarak tanımlanmaktadır. İtme kuvveti robot üzerinde etki gösterdiği zaman, bileşenlerin ifadesi Eşitlik 4.9 ve 4.10'de ki gibi verilmektedir.

$$F_{rep-x}(q) = \begin{cases} 0 & , \rho(q) \geq \rho_0 \\ \eta \left( \frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \left( \frac{1}{\rho^2(q)} \right) \frac{x-x_c}{\|q-q_c\|} & , \rho(q) \leq \rho_0 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$F_{rep-y}(q) = \begin{cases} 0 & , \rho(q) \geq \rho_0 \\ \eta \left( \frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \left( \frac{1}{\rho^2(q)} \right) \frac{y-y_c}{\|q-q_c\|} & , \rho(q) \leq \rho_0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Çevrede birçok engel bulunabilir. Bu sebeple tüm engellerin oluşturduğu potansiyel etki alanı her bir engelin potansiyel etki alanlarının toplanması ile bulunmaktadır. Toplam itme potansiyel alanlarının ifadesi Eşitlik 4.11'de verilmektedir.

$$U(q) = U_{att}(q) + \sum_{i=1}^n U_{rep}(q) \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11'deki  $i$  değeri engellerin sayısını belirlemektedir.  $i= 1,2,3, \dots ,n$  olabilir. Toplam yapay kuvvet alanı Eşitlik 4.12'de ki gibi ifade edilmektedir.

$$F(q) = F_{att}(q) + \sum_{i=1}^n F_{rep}(q) \quad (4.12)$$

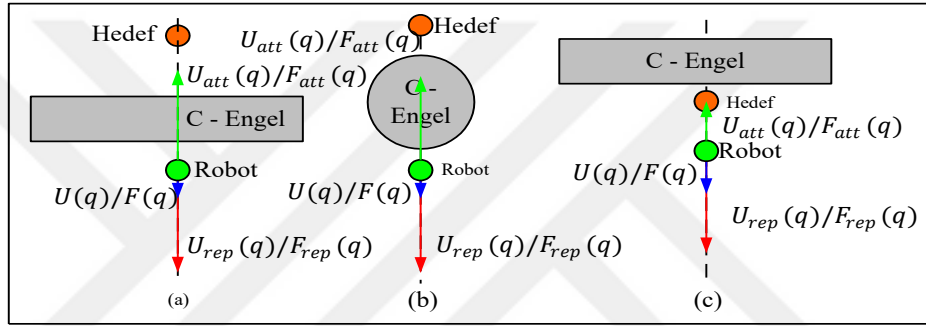
Geleneksel YPA metodu pürüzsüz bir yol planlayabilmesine rağmen çok ciddi problemlere sahiptir. İstenen global minimum yerine yerel minimum ve osilasyon problemlerine sahiptir. Yerel minimum ve osilasyon problemini Eşitlik 4.13 ve 4.14'de ki gibi ifade edilmektedir.

$$|U(q)| = |U_{att}(q) + \sum_{i=1}^n U_{rep}(q)| \leq \varepsilon \quad (4.13)$$

$$|F(q)| = |F_{att}(q) + \sum_{i=1}^n F_{rep}(q)| \leq \varepsilon \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.13'de ki  $\varepsilon$  sıfırdan büyük herhangi bir küçük değer için kullanılmaktadır. Çekim ve itim potansiyellerinin  $q$  noktasındaki bileşkesi  $\varepsilon$  dan küçük olmaktadır.

Eşitlik 4.14 için aynı ifadeler kullanılmaktadır. Eşitlik 4.14 potansiyel yerine kuvvet ile ilgilenmektedir. Eğer YPA ve yapay kuvvet alanı Eşitlik 4.13 ve 4.14 durumlarını karşılaşırsa robot osilasyon ve yerel minimum problemlerine yakalanmış demektir. Çekim potansiyeli yada kuvveti ve itme potansiyeli yada kuvveti eşit yada neredeyse eşit ve aynı doğrultuda yada neredeyse aynı doğrultuda olduğu zaman robotun yapay potansiyeli yada kuvveti neredeyse sıfırdır. Bu durumda robotun yerel minimum ve osilasyon hataları yaşamasına sebep olmaktadır. Ayrıca engel ile hedef birbirine çok yakın konumda ise robot hedefe ulaşamaz. Bu hata durumlarının görsel olarak ifadesi sırası ile Şekil 4.7 a,b,c'de verilmektedir [63].

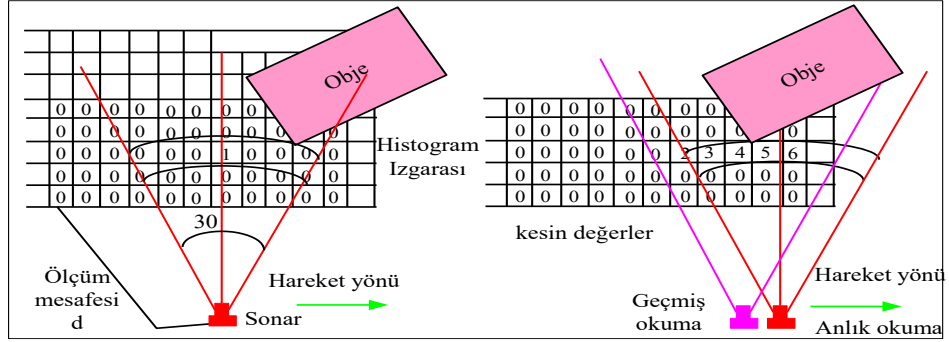


Şekil 4.1. Yerel minimum (a), osilasyon (b) ve hedef engel yakınlığı (c) problemlerinin görünümü.

## 4.2. VEKTÖR ALAN HİSTOGRAMI

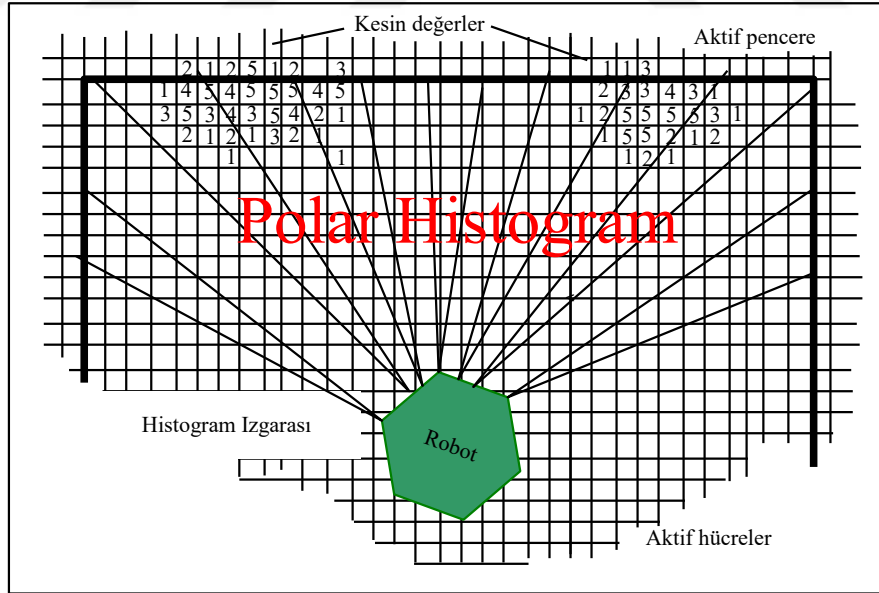
Vektör Alan Histogram (Vector Field Histogram - VAH), robotu hedefe doğru götürürken gerçek zamanlı olarak bilinmeyen engellerin algılanması ve çarpışmadan sakınmaya izin veren bir engelden sakınma metodudur [64]. VAH bir dünya modeli olarak iki boyutlu Kartezyen histogram ızgarası kullanmaktadır. Bu dünya modeli mesafe sensörlerinden okunan bilgiler ile gerçek zamanlı olarak güncellenmektedir. VAH aracın kontrol komutlarını hesaplamak için iki aşamalı veri azaltma süreci kullanmaktadır. İlk aşamada iki boyutlu histogram ızgarasının sabit boyutlu bir alt kümesi robotun anlık konumunda düşünülmektedir. Bu iki boyutlu ızgara bir boyutlu polar histograma indirgenmektedir. Polar histogramdaki her bölge engel yoğunluğunu temsil eden bir değerdir. İkinci aşamada algoritma düşük engel yoğunluğu ile tüm polar histogram bölgelerinden en uygun bölgeyi seçer ve robotu bu yönde hizalar. Şekil 4.2'de ultrasonik sensörler ile donatılmış bir robotun hareketi sırasında hücre

değerlerindeki güncelleme işlemi görülmektedir [65].



Şekil 4.2. Robot hareketi sırasındaki ızgara hücrelerinin anlık gelen veriler ile güncellenmesinin görünümü.

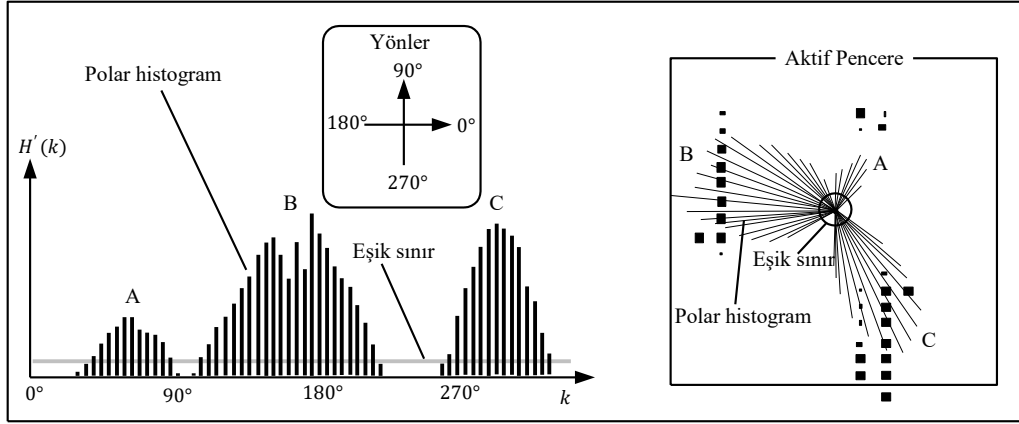
Aktif ızgaralı  $C^*$  tarafından, her bir genişlik değeri  $\alpha$  ve açısal bölümleri  $\eta$  olan değerleri içeren  $H$  polar histogram olarak bilinen bir boyutlu yapının üzerine haritalandırılmaktadır. Şekil 4.3’de  $C^*$ ’ın hücre doluluğunu, robot çevresindeki aktif pencereyi ve bir boyutlu polar histogramın değerlendirilmesi için göz ününde bulundurulmuş açısız bölgeleri verilmektedir.



Şekil 4.3.  $C^*$ ’ın hücre doluluğu, robot çerçevesindeki aktif pencerelerin ve açısız bölgelerin görünümü.

Şekil 4.4-a’da üç engel algılayan robot durumu için engel yoğunluğu ile bir boyutlu polar histogram verilmektedir. Engeller A, B ve C olarak isimlendirilmektedir. Şekil 4.4-b’de önceden elde edilen bir boyutlu histogramı belirtilen engeller ile örtüşen

kutupsal formda verilmektedir.



Şekil 4.4. Tespit edilen engellerin yoğunluğu (a) ve aktif pencere (b) görünümü.

VAH metodunun uygulanması üç ana adımda sıralanabilir [65]. Bunlar engelin iki boyutlu Kartezyen histogram ızgarası oluşturulması, bir önceki iki boyutlu histogram ızgarasından robot çevresindeki aktif ızgaralar bir boyutlu polar histograma filtrelenmesi, optimizasyon sonucu olarak direksiyon açısı ve hız kontrolleri bir boyutlu polar histogram ile hesaplanmasıdır.

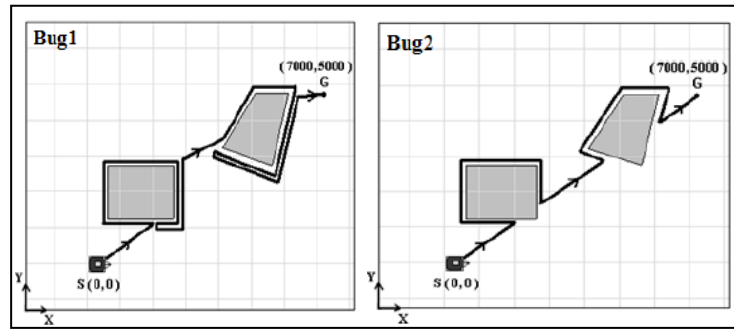
### 4.3. BÖCEK ALGORİTMASI

Böcek algoritmalarında önceden bilinmeyen bir engel ile karşılaşıldığı zaman hedefe giden bir yol olması durumunda kolayca kendi yolunu iki boyutlu olarak üretebilir. Böcek algoritmaları üç varsayım ile çalışmaktadır. Birincisi robotu bir nokta olarak kabul etmektedir. İkincisi robotun mükemmel konumlama kabiliyetinin olduğunu kabul etmektedir. Üçüncü olarak robotta mükemmel sensörlerin bulunduğu kabul edilmektedir. Bu sebep ile direk uygulanması ve teorideki başarısının gözlemlenmesi gerçekte beklenmemelidir. Fakat iki boyutlu robot konumlandırma Böcek algoritmaları ilk çözüm olarak görülebilir [66].

#### 4.3.1. Böcek1 ve Böcek2 Algoritması

Böcek1 ve Böcek2 algoritmaları sensör tabanlı hesaplama yaptıkları için minimum hafıza gerektirmektedirler. Böcek1 algoritması hedef ile başlangıç noktası arasında

direkt bir yol çizmektedir. Bu yol üzerine hareket etmeye başlamaktadır. Yol üzerinde hareket halinde olan robotun önüne bir engel çıktığı durumda saat yönünde engelin etrafında dolaşmaya başlamaktadır. Bu dolaşma sırasında anlık olarak hedefe olan uzaklığını ölçmekte ve bu ölçümün en düşük olduğu noktayı hafızasında tutmaktadır. Engelin etrafında bu şekilde bir tam tur atmaktadır ve en yakın başka bir nokta ile karşılaştığında en yakın noktayı güncellemektedir. Engelin etrafındaki bir tam turu bittiğinde en son hafızasındaki hedefe en yakın noktaya gitmektedir ve o nokta engelden ayrılmaktadır. Engelden ayrılan robot yeniden hedefe doğru hareket etmeye başlamaktadır. Eğer yol üzerinde yeniden bir engel ile karşılaşır aynı işlemleri tekrar eder. Bu yöntem verimli değildir fakat hedefe ulaşmayı garanti eder. Böcek2 algoritmasında hedefe doğru bir eğim çizilmektedir ve robot bu eğimi takip etmektedir. Eğim takip edildiği sırada önüne bir engel çıkması durumunda engelin etrafında saat yönüne doğru hareket etmeye başlar. Engelin etrafında aldığı hareketi sırasında başlangıç eğimi ile aynı hizaya geldiğinde hareketine son vermektedir. Engelin etrafındaki hareketine son veren robot hedefe gelmiş olduğu noktadan ayrılarak başlangıç eğimi üzerinde yeniden hareket etmektedir. Eğer robot yol üzerinde bir engel ile yeniden karşılaşır aynı adımları tekrar uygulamaktadır. Böcek1 ve Böcek2'nin yol alma durumları Şekil4.5'de verilmektedir [67].



Şekil 4.5. Böcek1 ve Böcek2 algoritmaları ile hareket eden robotun engeller karşısındaki durumu.

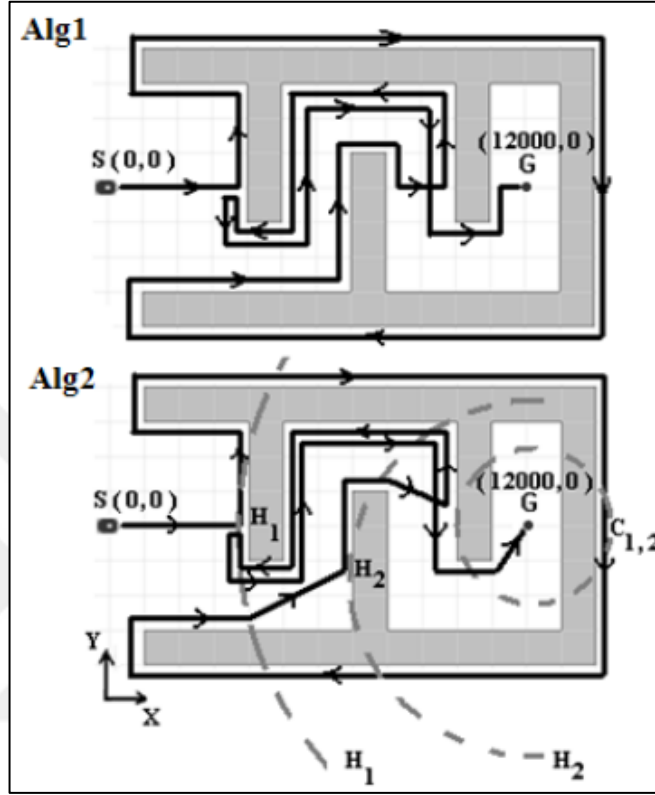
#### 4.3.2. Sınıf 1 Algoritması

Sınıf 1 algoritmasında robot hedefe doğru yol alırken bir engel ile karşılaştığında engelin etrafında saat yönünde hareket etmeye başlamaktadır. Engelin etrafında yol alan robot anlık olarak hedefe olan uzaklığını hesaplamaktadır. Hedef ile arasında





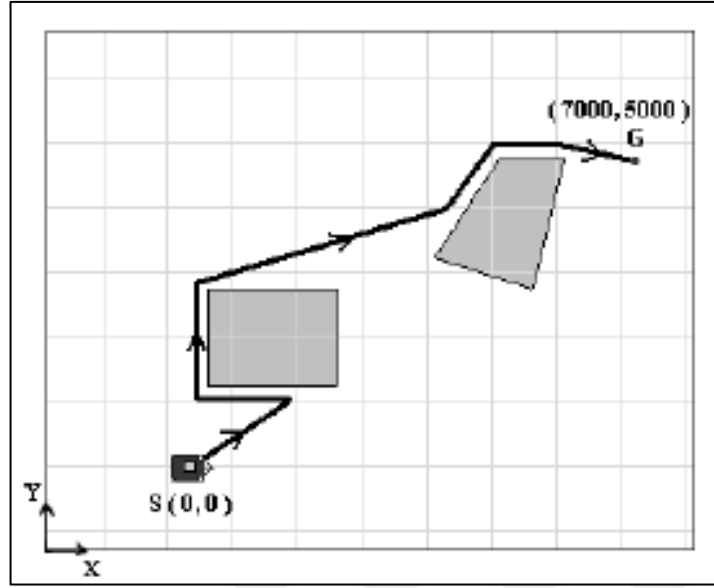
Hareketi sırasında geçtiği konuma bir daha ulaşırsa aynı yolu almadan geri dönmekte ve yeni bir yol aramaktadır. Ayrılma noktasının tespiti Sınıf 1 algoritmasına benzemektedir. Alg1 ve Alg2 nin hareket yapısı Şekil 4.7’de verilmektedir [70] [67].



Şekil 4.7. Alg1 ve Alg2 algoritmaları ile hareket eden robotun aldığı yolların görünümü.

#### 4.3.4. DistBug Algoritması

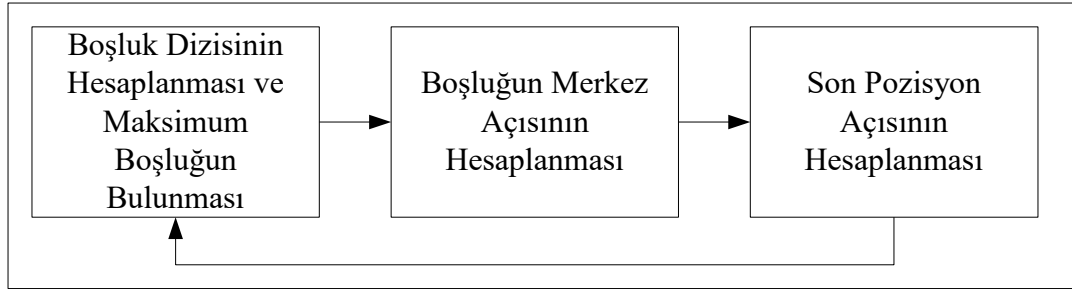
DistBug algoritması Alg1 ve Alg2 den türetilmektedir. Ayrılma noktalarını saklamak için farklı veri yapıları kullanmaktadır. Bu algoritmada robot sınırı R olarak adlandırılan maksimum algılama mesafesine sahiptir. Sınır takibi ve hedefe doğru hareket olmak üzere iki temel davranış sergilemektedir. Robot hedefe doğru hareket etmeye başlamaktadır. Hareketi sırasında karşısına bir engel çıktığı zaman engelin etrafında saat yönünde dönmeye başlamaktadır. Engelin etrafında dolaşan robot sürekli hedef ile arasında engel olup olmadığını kontrol etmektedir. Eğer hedef ile arasında herhangi bir engel yok ise sınırlarını takip ettiği engelden ayrılmaktadır. DistBug algoritması kullanan bir robotun davranışı Şekil 4.8’de verilmektedir [67].



Şekil 4.8. DistBug algoritmasının engeller karşısındaki davranışının görünümü.

#### 4.4. BOŞLUK TAKİBİ METODU

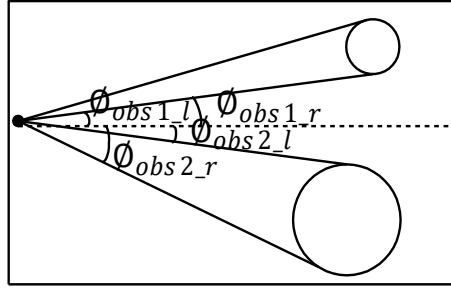
Boşluk Takip Metodu (BTM) robot hedefe doğru hareketi esnasında çevresindeki engellerin arasında ki en büyük boşluğu algılayarak bu boşluğun merkezine doğru robotu yönlendirmektedir. BTM algoritması üç ana parçada çalışmaktadır. Algoritmanın çalışma adımları Şekil 4.9’da verilmektedir.



Şekil 4.9. Boşluk takip metodunun üç temel basamağı.

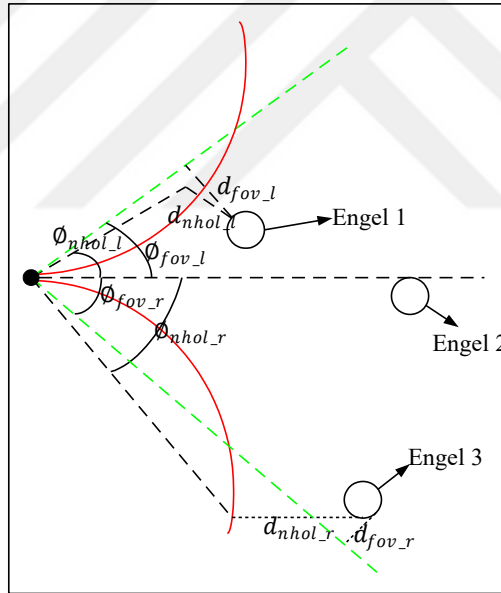
##### 4.4.1. Boşluk Dizisinin Hesaplanması ve Maksimum Boşluğun Bulunması

Engelin sınırlarının başı ve sonu olmak üzere iki noktasının açı değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 4.10’da bu noktalar verilmektedir.



Şekil 4.10. Sınırları tespit edilen engellerin sınır noktalarının açılarının görünümü.

$\phi_{obs1_l}$  ve  $\phi_{obs1_r}$  değerleri  $i$ 'inci engelin sağ ve sol sınır noktalarını temsil etmektedir. Robotun hangi boşluktan geçeceğinin tespiti yapılırken robot genişliği göz önünde bulundurulmaktadır. Boşluğa doğru yavaşan robot eğer bir dönme hareket yapacaksa bu dönme hareketini yaparken engele ne kadar yaklaştığı hesaplanmaktadır. Şekil 4.11'de robotun engel boşlukları ile olan ilişkisi verilmektedir.



Şekil 4.11. Boşluklar, engeller ve robot arasındaki ilişki parametreleri.

Şekil 4.11 de bulunan yeşil kesikli çizgiler robotun görüş alanını temsil etmektedir. Pembe dairesel çizgiler robotun minimum dönüş rotasını temsil etmektedir. Karar kuralları Eşitlik 4.15'de verilmektedir.

$$d_{nhol} < d_{fov} \Rightarrow \phi_{lim} = \phi_{nhol}$$

$$d_{nhol} \geq d_{fov} \Rightarrow \phi_{lim} = \phi_{fov}$$

(4.15)

Boşluk sınırlarının açısı  $\phi_{lim}$ 'dir.  $\phi_{lim\_l}$  robotun sol tarafında kalan sınır  $\phi_{lim\_r}$  robotun sağ tarafında kalan sınır açılarını ifade etmektedir. Robotun holonomik olmayan hareketinin sınır açısı  $\phi_{nhol}$ 'dur.  $\phi_{nhol\_l}$  robotun sol tarafında kalan sınır  $\phi_{nhol\_r}$  robotun sağ tarafında kalan sınır açılarını ifade etmektedir. Robotun görüş bölgesinin sınır açısı  $\phi_{fov}$ 'dur.  $\phi_{fov\_l}$  robotun sol tarafında kalan sınır  $\phi_{fov\_r}$  robotun sağ tarafında kalan sınır açılarını ifade etmektedir. Robotun holonomik olmayan hareket yayı ile engel sınırı arasındaki en yakın mesafe  $d_{nhol}$ 'dur.  $d_{nhol\_l}$  robotun sol tarafında kalan mesafe  $d_{nhol\_r}$  robotun sağ tarafında kalan mesafe değerini ifade etmektedir. Robotun görüş bölgesi sınırının engel sınırı ile yaptığı en yakın mesafe değeri  $d_{fov}$ 'dur.  $d_{fov\_l}$  robotun sol tarafında kalan mesafe  $d_{fov\_r}$  robotun sağ tarafında kalan mesafe değerini ifade etmektedir.

Engel sınırları ve boşluk sınırlarının temsilinden sonra boşluk değerleri üretilmektedir. N adet engel için N+1 boşluk bulunmaktadır. N+1 adet boşluk dizisi Eşitlik 4.16'de ifade edilmektedir.

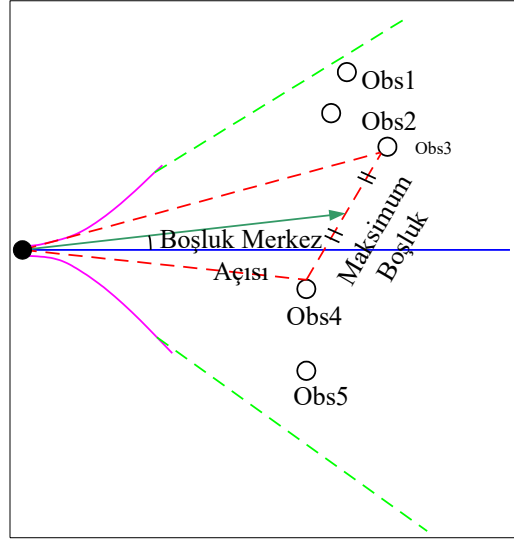
$$Gap[N + 1] = [(\phi_{lim\_l} - \phi_{obs1\_l})(\phi_{obs1\_r} - \phi_{obs2\_l}) \cdots (\phi_{obs(n-1)\_r} - \phi_{obs(n)\_l})(\phi_{obs(n)\_r} - \phi_{lim\_r})] \quad (4.16)$$

Maksimum boşluk değeri Eşitlik 4.16'da ifade edilen dizinin en büyük değerli elemanıdır. Eğer birden fazla büyük değerli eleman varsa ilk hesaplanan seçilmektedir.

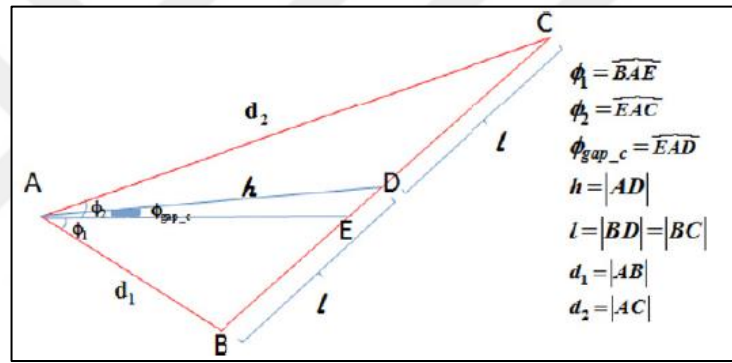
#### 4.4.2. Boşluk Merkezi Açısının Hesaplanması

Engeller arası boşlukların sınırları tespit edildikten sonra bu boşlukların merkezlerinin robot ile olan açısının hesaplanması gerekmektedir. Boşluk merkez açısı Şekil 4.12 de verilmektedir.

Boşluk merkez açısının bulunmasında Kosinüs ve Apollonius teoremleri kullanılmaktadır. Şekil 4.12'de kesik çizgi ile gösterilmiş bir üçgen ve üçgenin içerisinde tabanı iki eş parçaya bölen bir vektör görülmektedir. Boşluk merkez açısı ve Şekil 4.12'de verilen üçgenin daha detaylı ifadesi Şekil 4.13'de verilmektedir.



Şekil 4.12. Boşluk merkez açısının görünümü.



Şekil 4.13. Boşluk merkez açısının detaylı ifadesinin görünümü.

Amaç  $\phi_{gap_c}$  parametresini ölçülebilir  $d_1, d_2, \phi_1, \phi_2$  parametreleri cinsinden verilmektedir.  $d_1, d_2$  boşluğun engellere olan mesafesini ve  $\phi_1, \phi_2$  boşluk ile engeller arasındaki açıyı ifade etmektedir. Öncelikle ABC üçgenine kosinüs teoremi uygulanmaktadır.

$$(2l)^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2\cos(\phi_1 + \phi_2)$$

$$l^2 = \frac{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2\cos(\phi_1 + \phi_2)}{4} \quad (4.17)$$

Daha sonra ABC üçgenine Apollonius teoremi uygulanmaktadır.

$$d_1^2 + d_2^2 = 2l^2 + 2h^2 \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.17'de elde edilen ifade Eşitlik 4.18'de yerine yazılıp Eşitlik 4.19 elde

edilmektedir.

$$h^2 = \frac{d_1^2 + d_2^2 + 2d_1d_2\cos(\phi_1 + \phi_2)}{4} \quad (4.19)$$

Son olarak ABC üçgenine yeniden Kosinüs Kuralı uygulanıp Eşitlik 4.20 elde edilmektedir.

$$l^2 = d_1^2 + h^2 - 2d_1h\cos(\phi_1 + \phi_{gap\_c}) \quad (4.20)$$

Eşitlik 4.17 ve 4.19'de elde edilen veriler Eşitlik 4.18'de yerlerine konularak Eşitlik 4.21 elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} & \frac{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2\cos(\phi_1 + \phi_2)}{4} \\ &= d_1^2 + \frac{d_1^2 + d_2^2 + 2d_1d_2\cos(\phi_1 + \phi_2)}{4} \\ & \quad - 2d_1 \frac{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 2d_1d_2\cos(\phi_1 + \phi_2)}}{2} \cos(\phi_1 + \phi_{gap\_c}) \\ \phi_{gap\_c} &= \arccos\left(\frac{d_1 + d_2\cos(\phi_1 + \phi_2)}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 2d_1d_2\cos(\phi_1 + \phi_2)}}\right) - \phi_1 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Boşluğun merkez açısı Eşitlik 4.21 ile bulunmaktadır. Boşluk merkez açısı  $d_1$  ve  $d_2$  mesafeleri göz ardı edilerek  $\phi_1$  ve  $\phi_2$  değerlerinin ortalaması alınarak basitçe hesaplanabilir. Bu durum Eşitlik 4.22'de verilmektedir.

$$\phi_{gap\_c\_basic} = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \quad (4.22)$$

Ancak Eşitlik 4.22 kullanılması durumunda bazı durumlar altında güvensiz rotalara sebep olabilir.

#### 4.4.3. Son Pozisyon Açısının Hesaplanması

Son adım olarak son pozisyon açısının hesaplanması gerekmektedir. Bu adımda

hesaplanan açı robotun engellere çarpmadan hedefe ulaşabilmesi için referans vektörün açısı olmaktadır. Temel olarak hedef, engeller ve robotun bulunduğu ortamın görünümü Şekil 4.14’de verilmektedir.

Son açı hedef açısı ve boşluk merkezi açısının birleşimidir. Bu birleşim ağırlık katsayıları ve engellerin çevresindeki minimum mesafeye bağlıdır. Eğer engeller robota yakınsa ilk önce hedef açısı yerine boşluk merkez açısını dikkate almaktadır. Son açının hesaplanması Eşitlik 4.23’de verilmiştir.

$$\Phi_{final} = \frac{\frac{\alpha}{d_{min}}\phi_{gap\_c} + \beta\phi_{goal}}{\frac{\alpha}{d_{min}} + \beta} \quad (4.23)$$

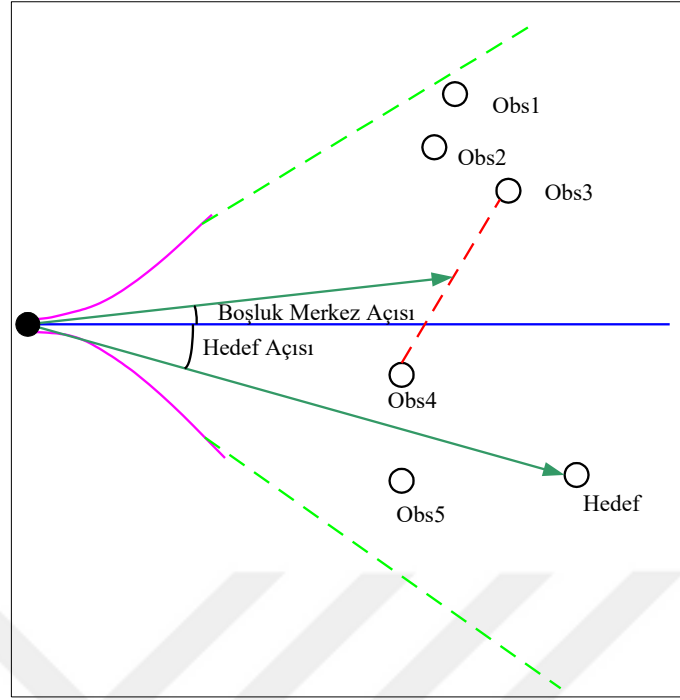
Eşitlik 4.23’de  $d_{min} = \min_{i=1:n}(d_n)$  olarak alınmaktadır. Boşluk merkezinin açısı  $\phi_{gap\_c}$ , hedef açısı  $\phi_{goal}$ , boşluğun ağırlık katsayısı  $\alpha$ , hedefin ağırlık katsayısı  $\beta$ , engellerin sayısı  $n$ , n’inci engelin mesafesi  $d_n$ ,  $d_n$  mesafe değerlerinin minimumunu  $d_{min}$  temsil etmektedir.

Hesaplamanın basit olması için  $\beta$  değeri 1 olarak alınmaktadır. Teorik olarak engele olan mesafe sıfıra yaklaştığı zaman son açı boşluk açısına yakın bir değer olmaktadır. Bu durum l’Hospital kuralı kullanılarak elde edilen Eşitlik 4.24’de verilmektedir.

$$\lim_{d_{min} \rightarrow 0} \Phi_{final} \cong \frac{\infty}{\infty} \Rightarrow \lim_{d_{min} \rightarrow 0} \Phi_{final} \cong \frac{\frac{\partial(\frac{\alpha}{d_{min}}\phi_{gap\_c} + \beta\phi_{goal})}{\partial d_{min}}}{\frac{\partial(\frac{\alpha}{d_{min}} + \beta)}{\partial d_{min}}} = \frac{\frac{-\alpha\phi_{gap\_c}}{d_{min}^2}}{\frac{-\alpha}{d_{min}^2}} = \phi_{gap\_c} \quad (4.24)$$

BTM diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında bazı avantajları görülmektedir. BTM sadece bir adet ayarlama parametresine sahiptir. Bu parametre alfa parametresidir. Algoritmada bu parametreyi düzenlemek çok kolay olmaktadır. BTM yerel minimum problemine sahip değildir. BTM robotun holonomik olmayan hareketlerini de göz önünde bulundurarak sadece uygulanabilir rotalar belirlemektedir. BTM de robotun görüş alanı göz önünde bulundurulmaktadır. Görmediği ve ölçmediği yerlere robot yönlendirilmemektedir. Sonuç olarak BTM robotu mümkün olduğunca boşluğun merkezine doğru yönlendirmektedir. Bu yönlendirme de daha güvenli sonuçlara neden olmaktadır [71].





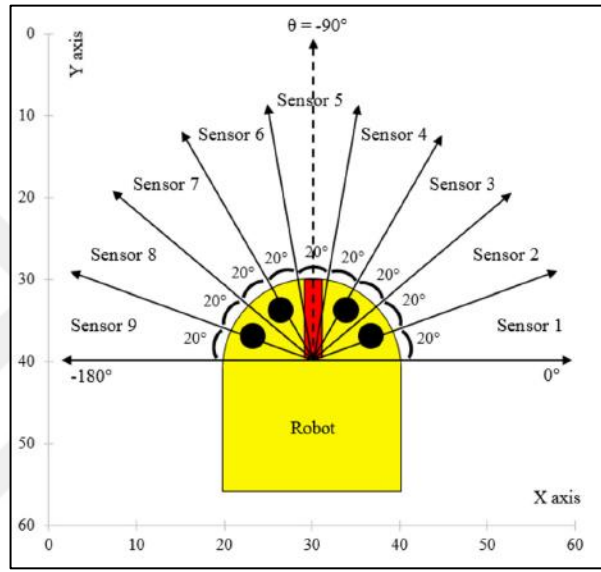
Şekil 4.14. Son pozisyon açısının hesaplanmasında yardımcı ortamın görünümü.

#### 4.5. BULANIK MANTIK

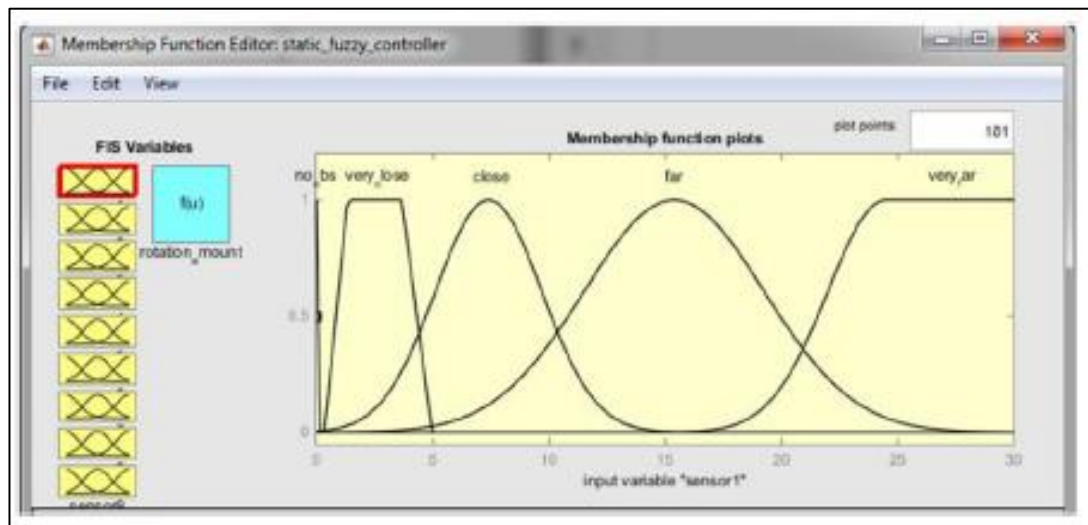
Bulanık mantık bir yapay zeka alt başlığıdır. Bulanık mantık gibi yapay zeka çözümleri genelde kesin çözümlerin olmadığı karmaşık problemlerde kullanılmaktadır. Mobil robotlarda engelden sakınma durumları karmaşık problemler teşkil etmektedir. Bu yüzden bulanık mantık ile mobil robotların konum belirlemesi yapılmaktadır. Bulanık mantık kontrolcünün sezgisel doğası gereği tasarlanması kolaydır. Bulanık mantık kontrolcüsünün girişi olarak sensörden okunan bilgiler kullanılmaktadır. Çıktı olarak sağa, sola dönüş, hızlı, yavaş sürüş, yön açısı gibi kontrol parametreleri oluşturmaktadır. Statik ve dinamik engellerden kaçınma için Sugeno tip bulanık mantık denetleyicisi üzerinden anlatım gerçekleştirilecektir. Statik ve dinamik engeller için iki ayrı bulanık kontrolcü tasarlanmıştır. Kontrol edilecek robot ultrasonik sensörler ile donatılmıştır. Robotun görünümü Şekil 4.15’de görülmektedir.

Robot davranışları hedefe ulaşma, hız kontrol, hedefi arama ve engellerden sakınma olmak üzere dört madde de sıralanmaktadır. Tüm senaryolar bu davranışlar üzerine kurulmaktadır. Hedefe ulaşma davranışı hedef görünürse değişkeni 1 yapmaktadır. Hız

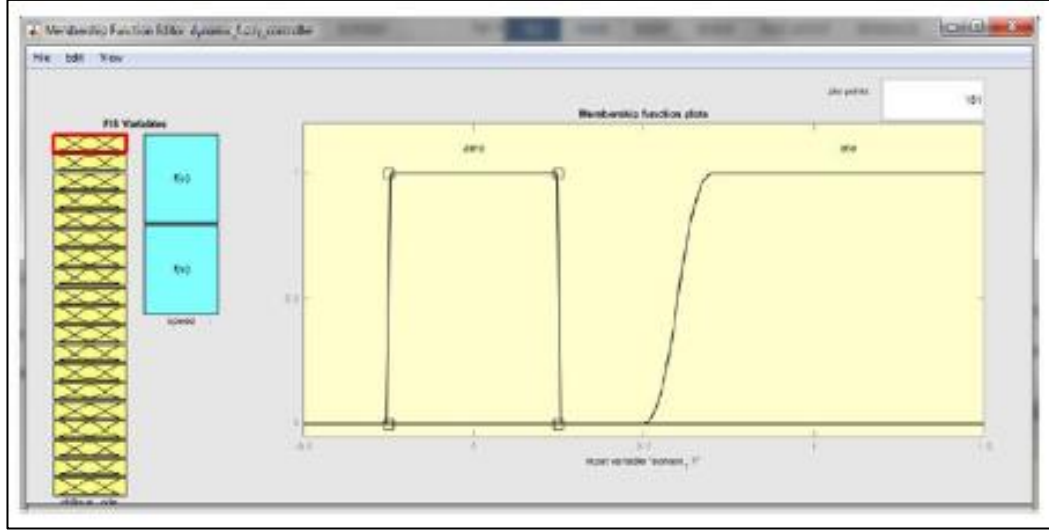
kontrol davranışı için yüksek, orta ve düşük hız olmak üzere üç farklı durum da kontrol yapılmaktadır. Hedef arama davranışı robotun hedefe yavaş ve kademeli olarak dönmesini sağlamaktadır. Engelden sakınma davranışında iki durum söz konusu olmaktadır. Bu iki durum statik ve dinamik engeller ile tanımlanmaktadır. Statik engel için beş üyelik fonksiyonu tanımlanmaktadır. Bunlar engel yok, çok yakın, yakın, uzak, çok uzak olarak isimlendirilmektedir. Statik engel durumu için dokuz giriş fonksiyonu tasarlanmaktadır (Şekil 4.16).



Şekil 4.15. Mobil robotun sensörlerinin görüş alanının görünümü.



Şekil 4.16. Statik engeller için tasarlanmış bulanık kontrolcü üyelik fonksiyonlarının görünümü [55].

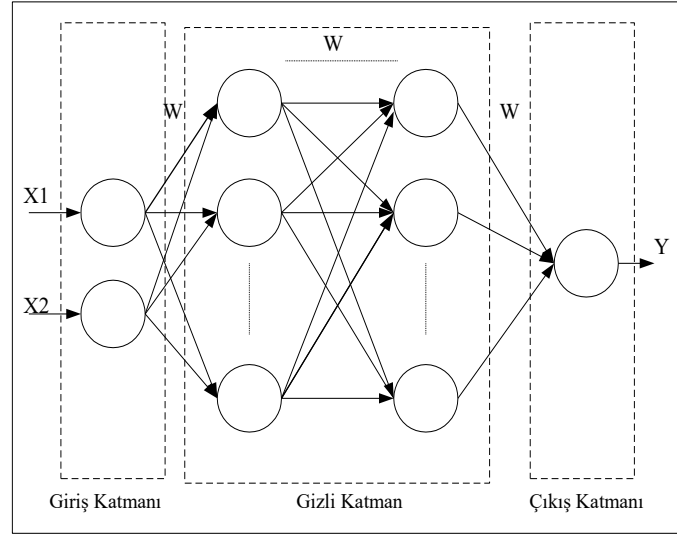


Şekil 4.17. Dinamik engel tanımda oluşturulan üyelik fonksiyonlarının görünümü [55].

Dinamik engellerin algılanmasında kullanılacak fonksiyon yapısı statik engel tanımdan daha farklı bir yapıda olmaktadır. Dinamik engel olarak yatay, dikey, eğik, dönme hareketi olmak üzere dört dinamik engel hareketi tanımlanmaktadır. Dinamik engel tanımda kullanılan 19 giriş fonksiyonu oluşturulmuştur. Giriş fonksiyonları için sıfır ve bir olarak isimlendirilen üyelik fonksiyonları tanımlanmaktadır (Şekil 4.17). Dinamik engel algılamada iki adet çıktı kullanılmaktadır. Bunların birincisi hedef ile olan açı ikincisi robot hızı olmaktadır. Hedefe olan açı çıktısı çok küçük sağa dönüş, orta sola dönüş, çok çok küçük sağa dönüş, dönüş yok gibi 10 dilsel değişken kullanılmaktadır. Hız tanımlama ise dur, değişiklik yapma, arttır olarak 3 dilsel değişken kullanılmaktadır. Tüm bu kontrolcü tasarımları ve kural tabanlarının oluşturulması ile robotun engellerden sakınarak hedefe ulaşması sağlanmaktadır [55].

#### 4.6. YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay sinir ağları ile robotikte engelden sakınma çalışmaları yapılmaktadır. Mobil robotun kullandığı sensöre, mobil robotun türüne ve yapısına, çalışma ortamına, engellerin yapısına ve dinamiğine bağlı olarak yapay sinir ağları oluşturulmaktadır. Genel olarak yapay sinir ağları insan beyninin öğrenme yapısı baz alınarak tasarlanmaktadır. Giriş katmanı, ara katman ve çıkış katmanı olarak temelde üç katmandan oluşmaktadır. Her bir katmanında çeşitli sayılarda nöronlar içermektedir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Temel yapay sinir ağı yapısının görünümü.

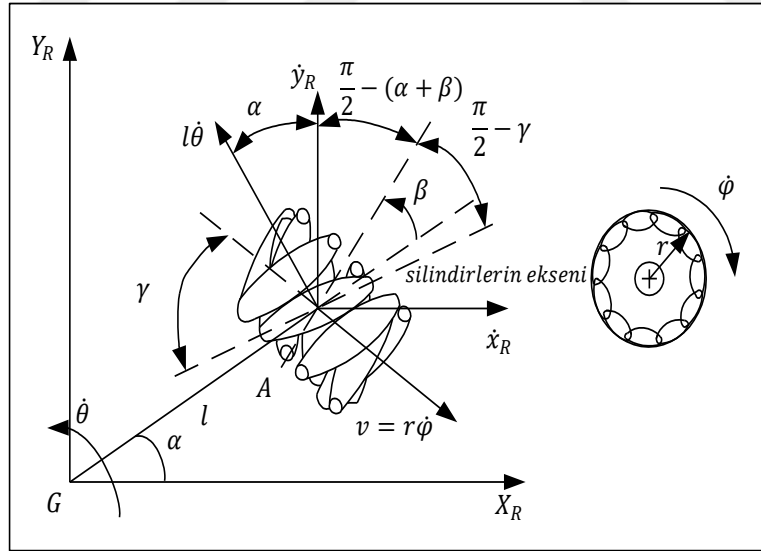
Yapay sinir ağları ile birçok farklı yöntem ile engelden sakınma yapılmaktadır. Bu konuda Danica Janglová'nın çalışması örnek verilebilir. Çalışmada ultrasonik sensörler içeren bir mobil robot platformunun bilinmeyen bir çevrede engellerden sakınarak hareket etmesi yapay sinir ağları ile yapılmıştır. İki adet yapay sinir ağı kullanılmaktadır. İlk yapay sinir ağı ölçülen çevre bilgilerini girdi olarak alarak boşlukları bulmaya çalışmaktadır. Boşluk bilgisi ikinci yapay sinir ağına girdi olarak verilmektedir. İkinci yapay sinir ağı ise robotun hareketini kontrol etmektedir [72].

## BÖLÜM 5

### MEKANUM TEKERLİ MOBİL ROBOT KİNEMATİK HESABI VE TASARIMI

#### 5.1. MEKANUM TEKERLİ MOBİL ROBOTUN KİNEMATİK, DİNAMİK MODELLEMESİ VE TASARIMI

Bir İsveç tekeri (Swedish wheel) tekerlek çevresine bağlı pasif silindirlere sahip sabit bir standart tekerlekten oluşur, Şekil 5.1’de verilmektedir. Mekanum tekerlek,  $\gamma = 45^\circ$  olan İsveç tekerinin bir türüdür.  $\gamma$  teker düzlemi ve pasif silindirlere dönüş eksenleri arasındaki açıdır. Dört Mekanum tekerli çok yönlü bir robotun tamamlanmış kinematik, dinamik modellemesi ve tasarımı bu bölümde açıklanmaktadır [73].



Şekil 5.1. Mekanum tekerin parametreleri.

##### 5.1.1. Dört Mekanum Tekerli Bir Robotun Kinematiği

Lokal koordinat çerçevesi  $\{R\}:X_R Y_R Z_R$  olan mobil robota monte edilmiş bir Mekanum teker, Şekil 5.1’de görülmektedir. Şekil 5.1’deki A noktası tekerleğin

merkezidir ve diğer geometrik parametreler şu şekilde tanımlanabilir,  $\alpha$ , robot çerçevesi G orijininin tekerleğin merkezi olan A noktasına kadar  $GA$  vektörünün  $X_R$  ye göre açısıdır ve  $\beta$  ana teker açısı ile  $GA$  vektörü arasındaki açıdır. Geometrik merkez olan G noktasından teker merkezi olan A noktasına kadarki uzaklık  $l$  dir ve ana tekerlek yarıçapı  $r$  dir. Ayrıca  $\dot{\phi}$  ve  $\dot{\phi}_{sw}$  sırasıyla ana tekerleğin ve düz zemin ile temas eden pasif silindirlerin dönüş hızlarıdır.

Mekanum teker ile zemin arasında bir temas noktasının ani bir dönüş merkezi olduğu varsayılırsa, yani, temas kayma olmadan sade bir yuvarlanma durumu içerisinde, o zaman tekerlek merkezi A nın bununla alakalı hızı Şekil 5.1 de görülen teğet yön boyunca  $r\dot{\phi}$  dir. Böylece temas eden tekerlerin eksenleri boyunca olan teker merkezi A noktasının hız bileşeni  $r\dot{\phi} \cos \gamma$  dir. Robotun lokal çerçevede  $\{R\}$  nin koşullarında ani öteleme hızı  $[\dot{x}_R \ \dot{y}_R]^T$  dir.  $Z_R$  eksenleri etrafındaki olan dönme hızı  $\dot{\theta}$  dir. Tekerlek merkezi olan A noktasının hızı Şekil 5.1’de görülen dönme hızından dolayı öteleme hız vektörleri olan  $\dot{x}_R \ \dot{y}_R$  ve bağıl hız  $l\dot{\theta}$  nin toplanması ile hesaplanabilir. Böylece, teker merkezi olan A noktasının hız bileşeni temas tekerlerinin eksenleri boyunca Eşitlik 5.1 gibi ifade edilmektedir (platformun hızı üzerinden hesaplandı):

$$\begin{aligned}
& \dot{x}_R \cos \left[ \frac{\pi}{2} - \left( \frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta) \right) - \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right) \right] + \dot{y}_R \cos \left[ \left( \frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta) \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right) \right] \\
& \quad + l\dot{\theta} \cos \left[ \alpha + \left( \frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta) \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right) \right] \\
& = \dot{x}_R \cos \left[ (\alpha + \beta + \gamma) - \left( \frac{\pi}{2} \right) \right] + \dot{y}_R \cos [(\pi - (\alpha + \beta + \gamma))] + l\dot{\theta} \cos [\pi - (\beta + \gamma)] \\
& = \dot{x}_R \sin(\alpha + \beta + \gamma) - \dot{y}_R \cos(\alpha + \beta + \gamma) - \dot{\theta} l \cos(\beta + \gamma) \tag{5.1} \\
& = [\sin(\alpha + \beta + \gamma) \quad -\cos(\alpha + \beta + \gamma) \quad -l \cos(\beta + \gamma)] \cdot [\dot{x}_R \ \dot{y}_R \ \dot{\theta}]^T
\end{aligned}$$

Temas silindirlerinin eksenleri boyunca kayma yoksa, aynı hız tekerlerinin dönüş hızı olan  $\dot{\theta}$  dan hesaplanabilir. Böylece bir İsveç tekeri için kısıtlılık denklemi Eşitlik 5.2’deki denkleme sahip olunmaktadır:

$$[\sin(\alpha + \beta + \gamma) \quad -\cos(\alpha + \beta + \gamma) \quad -l \cos(\beta + \gamma)] \cdot [\dot{x}_R \ \dot{y}_R \ \dot{\theta}]^T = r\dot{\phi} \cos \gamma \tag{5.2}$$

Robot çerçevesi olan {R} ile ilgili eylemsizlik çerçevesi olan {I} nin yönelmesini temsil eden dönüş matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$${}^R R_I(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

$\theta$   $X_R$  ve  $X_I$  arasındaki açıdır, robot çerçevesi olan {R} cinsinden robotun hız vektörüdür,  $\dot{\xi}_R = [\dot{x}_R \quad \dot{y}_R \quad \dot{\theta}]^T$  Eşitlik 5.4 gibi hesaplanabilir,

$$\dot{\xi}_R = {}^R R_I(\theta) \dot{\xi}_I \quad (5.4)$$

$\dot{\xi}_R = [\dot{x}_R \quad \dot{y}_R \quad \dot{\theta}]^T$  eylemsizlik çerçevesin {I} cinsinden robot hız vektörüdür. Eşitlik 5.2 Eşitlik 5.5'e çevrilir,

$$[\sin(\alpha + \beta + \gamma) \quad -\cos(\alpha + \beta + \gamma) \quad -l \cos(\beta + \gamma)] \cdot {}^R R_I(\theta) \dot{\xi}_I = r\dot{\phi} \cos \gamma \quad (5.5)$$

Temas eden silindirin eksenine dikey yönde, hareket pasif temas silindirlerinin serbest dönüşünden dolayı zorlanmaz, böylece Eşitlik 5.6 hız ilişkisi çıkarılabilir:

$$\begin{aligned} & \dot{x}_R \sin \left[ \frac{\pi}{2} - \left( \frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta) \right) - \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right) \right] - \dot{y}_R \sin \left[ \left( \frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta) \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right) \right] \\ & \quad - l \dot{\theta} \sin \left[ \alpha + \left( \frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta) \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right) \right] \\ & = r\dot{\phi} \sin \gamma + r_{sw} \dot{\phi}_{sw} \quad (5.6) \\ & \therefore [\cos(\alpha + \beta + \gamma) \quad \sin(\alpha + \beta + \gamma) \quad l \sin(\beta + \gamma)] \cdot [\dot{x}_R \quad \dot{y}_R \quad \dot{\theta}]^T + r\dot{\phi} \sin \gamma + r_{sw} \dot{\phi}_{sw} \\ & = 0 \end{aligned}$$

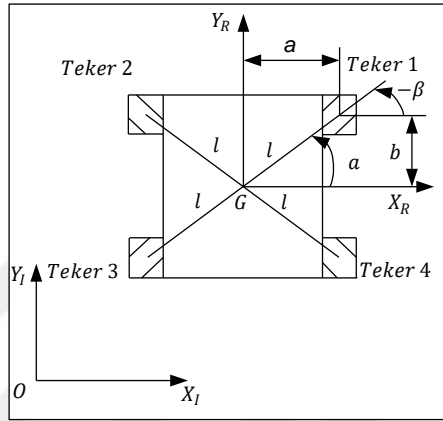
Böylece yukarıdaki yuvarlama Eşitlik 5.7 şekline dönüştürülür:

$$[\cos(\alpha + \beta + \gamma) \quad \sin(\alpha + \beta + \gamma) \quad l \sin(\beta + \gamma)] {}^R R_I(\theta) \dot{\xi}_I + r\dot{\phi} \sin \gamma + r_{sw} \dot{\phi}_{sw} = 0 \quad (5.7)$$

Çok yönlü robotu, Şekil 5.2'de verilen dört Mekanum tekerlekli düşünün. Dört Mekanum tekeri takılmış robotun  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  ve  $\gamma_i$  açıları,  $i = 1,2,3,4$  için değerler Çizelge

5.1’de görülmektedir. Mekanum tekerlerin merkezleri için 4 kısıtlı denklem Eşitlik 5.5 kaynağı ile aşağıda verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) & -\cos(\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) & -l_1 \cos(\beta_1 + \gamma_1) \\ \sin(\alpha_2 + \beta_2 + \gamma_2) & -\cos(\alpha_2 + \beta_2 + \gamma_2) & -l_2 \cos(\beta_2 + \gamma_2) \\ \sin(\alpha_3 + \beta_3 + \gamma_3) & -\cos(\alpha_3 + \beta_3 + \gamma_3) & -l_3 \cos(\beta_3 + \gamma_3) \\ \sin(\alpha_4 + \beta_4 + \gamma_4) & -\cos(\alpha_4 + \beta_4 + \gamma_4) & -l_4 \cos(\beta_4 + \gamma_4) \end{bmatrix} \cdot {}^R R_I(\theta) \dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} r_1 \dot{\phi}_1 \cos \gamma_1 \\ r_2 \dot{\phi}_2 \cos \gamma_2 \\ r_3 \dot{\phi}_3 \cos \gamma_3 \\ r_4 \dot{\phi}_4 \cos \gamma_4 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$



Şekil 5.2. Dört Mekanum tekerli robot parametreleri.

Her Mekanum tekerleğin eşit yarıçapa ve montaj mesafesine sahip olması  $r_i = r$ ,  $l_i = l$ ,  $i=1,2,3,4$  ve Çizelge 5.1’de bulunan değerler Eşitlik 5.8’inn yerine yazılması varsayımı ile, Eşitlik 5.9’da verilen ters kinematik denklemi elde edebiliriz.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix} = -(\sqrt{2}/r) \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \\ \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \\ -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \\ -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Denklemden  $\alpha = \tan^{-1}(b/a)$  olarak alınmaktadır. Jakobiyen matrisinin tanımlanması Eşitlik 5.10’da verilmektedir.

$$J = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \\ \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \\ -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \\ -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$



Çizelge 5.1 Mekanum tekerin parametreleri.

Tekerler	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\gamma_i$
1	$\tan^{-1}(b/a)$	$-\tan^{-1}(b/a)$	$(\pi/2 + \pi/4)$
2	$\pi - \tan^{-1}(b/a)$	$\tan^{-1}(b/a)$	$-(\pi/2 + \pi/4)$
3	$\pi + \tan^{-1}(b/a)$	$-\tan^{-1}(b/a)$	$(\pi/2 + \pi/4)$
4	$2\pi - \tan^{-1}(b/a)$	$\tan^{-1}(b/a)$	$-(\pi/2 + \pi/4)$

Dört Mekanum tekerli mobil robotun ileri kinematik eşitliği Eşitlik 5.11 gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = -(\sqrt{2}/2)rJ^+ \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Burada ki  $J^+ = (J^T J)^{-1} J^T$  denkleminin J'nin tersidir.

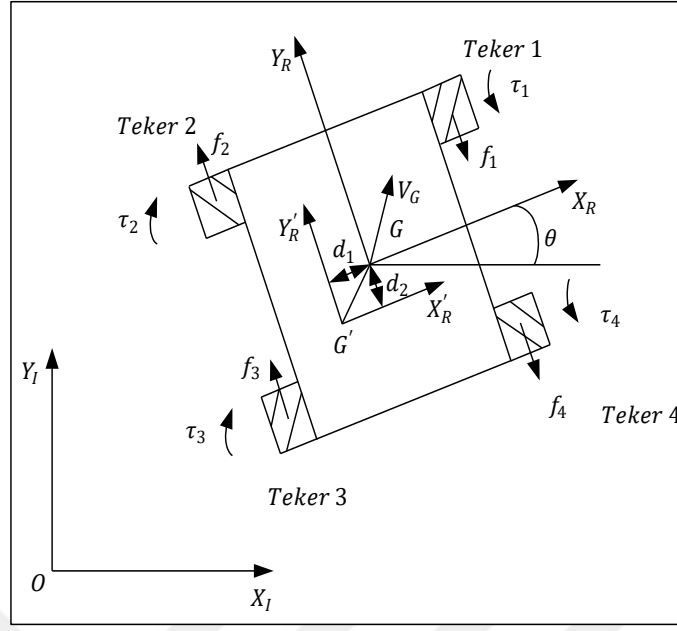
### 5.1.2. Mekanum Robotun Dinamiği

Şekil 5.3'de kabul edilen dört tekerli mobil robotun G noktası eylemsizlik çerçevesinin  $\{I\}$  ya göre  ${}^I r_G = [x_I \ y_I]^T$  pozisyon vektörü ile geometrik merkezidir ve  $G'$  robot çerçevesi  $\{R\}$  ye göre  ${}^R r_{G'/G} = [-d_1 \ -d_2]^T$  göreli pozisyon vektörünü ile hareket platformunun kütle merkezidir. G noktasının  ${}^R v_G$  hızı, robot çerçevesi  $\{R\}$  ye göre Eşitlik 5.12 gibi ifade edilir.

$${}^R v_G = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \end{bmatrix} = [\dot{x}_I \cos\theta + \dot{y}_I \sin\theta \quad -\dot{x}_I \sin\theta + \dot{y}_I \cos\theta]^T \quad (5.12)$$

$\dot{x}_I$  ve  $\dot{y}_I$ , sırasıyla  $X_I$  ve  $Y_I$  eksenleri boyunca G'nin hız bileşenleridir.  $\theta$  referans çerçevesi  $\{I\}$  ile ilgili platformun yönelme açısıdır. Böylece robot çerçevesi  $\{R\}$  ye göre kütle merkezi  $G'$  nin  ${}^R v_{G'}$  hızı Eşitlik 5.13 gibi verilmektedir.

$$\begin{aligned} {}^R v_{G'} &= {}^R v_G + \dot{\theta} k_R \times {}^R r_{G'/G} \\ &= (\dot{x}_I \cos\theta + \dot{y}_I \sin\theta + \dot{\theta} d_2) i_R + (-\dot{x}_I \sin\theta + \dot{y}_I \cos\theta - \dot{\theta} d_1) j_R \end{aligned} \quad (5.13)$$



Şekil 5.3. Mekanum tekerli mobil robotun şematik gösterimi.

Mobil robotun dört tekerleğinin ve platformunun içerdiği toplam kinetik enerji  $T$  Eşitlik 5.14 gibi hesaplanır.

$$T = \frac{1}{2} [m_b v_{G'}^T v_{G'} + I_b \dot{\theta}^2 + \sum_{i=1}^4 m_{wi} (r \dot{\phi}_i)^2 + \sum_{i=1}^4 I_i \dot{\phi}_i^2] \quad (5.14)$$

$m_b$  platformun kütlesidir.  $m_{wi}$   $i$ ' inci tekerin kütlesidir.  $i=1,2,3,4$  şeklide değer almaktadır.  $I_b$ ,  $G'$  noktası boyunca  $Z_R'$  ekseninde ki ( $Z_R$  ye paralel) platformun eylemsizlik momentidir.  $I_i$  ise ana eksenindeki  $i$ ' inci tekerin eylemsizlik momentidir.  $\dot{\theta}$  platformun dönme hızıdır.  $\dot{\phi}_i$  ana eksenindeki  $i$ ' inci tekerin dönüş hızıdır.  $r$  Mekanum tekerin yarıçapıdır. Mobil robot bir düzlemde hareket ettiği varsayıldığında toplam potansiyel enerji  $V = 0$  olmaktadır. Dört Mekanum tekerin aynı olduğu böylece  $i = 1,2,3,4$  için  $m_{wi} = m_w$  ve  $I_i = I$  varsayılmaktadır. Eşitlik 5.8 yerine bazı hesaplamalar yapıldıktan sonra, Lagranj  $L=T-V=T$  Eşitlik 5.15 gibi verilmektedir.

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2} I_b \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_b [(\dot{x}_I \cos\theta + \dot{y}_I \sin\theta + \dot{\theta} d_2)^2 + (-\dot{x}_I \sin\theta + \dot{y}_I \cos\theta - \dot{\theta} d_1)^2] \\ & + \frac{1}{2} m_w \{ [-\dot{x}_I (\cos\theta - \sin\theta) - \dot{y}_I (\sin\theta + \cos\theta) - \sqrt{2} \dot{\theta} l \sin(\pi/4 - \alpha)]^2 \\ & + [-\dot{x}_I (\cos\theta + \sin\theta) - \dot{y}_I (\sin\theta - \cos\theta) - \sqrt{2} \dot{\theta} l \sin(\pi/4 - \alpha)]^2 \\ & + [-\dot{x}_I (-\cos\theta + \sin\theta) + \dot{y}_I (\sin\theta + \cos\theta) - \sqrt{2} \dot{\theta} l \sin(\pi/4 - \alpha)]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[ \dot{x}_I(\cos\theta + \sin\theta) - \dot{y}_I(-\sin\theta + \cos\theta) - \sqrt{2}\dot{\theta}l\sin(\pi/4 - \alpha) \right]^2 \} \quad (5.15) \\
& + \frac{1}{2} \frac{1}{r^2} I_1 \left[ -\dot{x}_I(\cos\theta - \sin\theta) - \dot{y}_I(\sin\theta + \cos\theta) - \sqrt{2}\dot{\theta}l\sin(\pi/4 - \alpha) \right]^2 \\
& + \frac{1}{2} \frac{1}{r^2} I_2 \left[ -\dot{x}_I(\cos\theta + \sin\theta) - \dot{y}_I(\sin\theta - \cos\theta) - \sqrt{2}\dot{\theta}l\sin(\pi/4 - \alpha) \right]^2 \\
& + \frac{1}{2} \frac{1}{r^2} I_3 \left[ -\dot{x}_I(-\cos\theta + \sin\theta) + \dot{y}_I(\sin\theta + \cos\theta) - \sqrt{2}\dot{\theta}l\sin(\pi/4 - \alpha) \right]^2 \\
& + \frac{1}{2} \frac{1}{r^2} I_4 \left[ \dot{x}_I(\cos\theta + \sin\theta) - \dot{y}_I(-\sin\theta + \cos\theta) - \sqrt{2}\dot{\theta}l\sin(\pi/4 - \alpha) \right]^2
\end{aligned}$$

Dinamik model Lagranj denklemleri kullanılarak türetilmektedir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i, i = 1,2,3 \quad (5.16)$$

$q_i$  i' inci genel koordinattır.  $F_i$  i' inci genel kuvvet/tork ifadesidir. Mobil robotun genel koordinat vektörü  $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T = [x_I \ y_I \ \theta]^T$  olarak tanımlanabilir. Şekil 5.3'de işaret edilen  $f_i$  zemin ile i' inci Mekanum tekerin sürtünme kuvvetidir. Genelleştirilmiş kuvvet/tork  $F_i, i = 1,2,3$  Eşitlik 5.17 gibi türetilmektedir.

$$F_1 = \sum_{i=1}^4 (\tau_i - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_i) f_i) \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_I} = \sum_{i=1}^4 (\tau_i - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_i) f_i) \frac{\partial \varphi_i}{\partial \dot{x}_I} \quad (5.17)$$

Eşitlik 5.8 ile Eşitlik 5.18 verilmektedir.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \varphi_1}{\partial \dot{x}_I} &= -\frac{1}{r}(\cos\theta - \sin\theta); \frac{\partial \varphi_2}{\partial \dot{x}_I} = -\frac{1}{r}(\cos\theta + \sin\theta); \frac{\partial \varphi_3}{\partial \dot{x}_I} = \frac{1}{r}(\cos\theta - \sin\theta); \frac{\partial \varphi_4}{\partial \dot{x}_I} = \\
& \frac{1}{r}(\cos\theta + \sin\theta); \quad (5.18)
\end{aligned}$$

Böylece Eşitlik 5.19 gibi türetilmektedir.

$$\begin{aligned}
F_1 &= [\tau_1 - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_1) f_1] \left[ -\frac{1}{r}(\cos\theta - \sin\theta) \right] + [\tau_2 - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_2) f_2] \left[ -\frac{1}{r}(\cos\theta + \sin\theta) \right] + \\
& [\tau_3 - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_3) f_3] \left[ \frac{1}{r}(\cos\theta - \sin\theta) \right] + [\tau_4 - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_4) f_4] \left[ \frac{1}{r}(\cos\theta + \sin\theta) \right] \quad (5.19)
\end{aligned}$$

Benzer şekilde Eşitlik 5.20 ve 5.21 gibi türetilmektedir.

$$F_2 = \sum_{i=1}^4 (\tau_i - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_i) f_i) \frac{\partial \varphi_i}{\partial \dot{y}_i} = [\tau_1 - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_1) f_1] \left[ -\frac{1}{r} (\cos\theta + \sin\theta) \right] + [\tau_2 - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_2) f_2] \left[ -\frac{1}{r} (\cos\theta - \sin\theta) \right] + [\tau_3 - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_3) f_3] \left[ \frac{1}{r} (\cos\theta + \sin\theta) \right] + [\tau_4 - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_4) f_4] \left[ \frac{1}{r} (\cos\theta - \sin\theta) \right] \quad (5.20)$$

$$F_3 = \sum_{i=1}^4 (\tau_i - r \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_i) f_i) \frac{\partial \varphi_i}{\partial \dot{\theta}} = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) \left[ -\frac{\sqrt{2}}{r} l \sin(\pi/4 - \alpha) \right] + [\operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_1) f_1 + \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_2) f_2 + \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_3) f_3 + \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_4) f_4] [\sqrt{2} l \sin(\pi/4 - \alpha)] \quad (5.21)$$

Bazı açık hesaplamalardan sonra, mobil robotun hareket denklemleri matris / vektör formunda Eşitlik 5.22 gibi ifade edilmektedir.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B^T S f = \frac{1}{r} B^T \tau \quad (5.22)$$

Tüm hesaplamalar sonucu Eşitlik 5.23 ile 5.34 aralığındaki denklemler türetilmektedir.

$$\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4]^T, \quad (5.23)$$

$$f = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]^T, \quad (5.24)$$

$$S = \operatorname{diag}[\operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_1) \quad \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_2) \quad \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_3) \quad \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_4)], \quad (5.25)$$

$$M = [m_{\ddot{v}}]_{3 \times 3}, \quad (5.26)$$

$$m_{11} = m_b + 4 \left( m_w + \frac{1}{r^2} \right); \quad (5.27)$$

$$m_{22} = m_b + 4 \left( m_w + \frac{1}{r^2} \right); \quad (5.28)$$

$$m_{12} = m_{21} = 0; \quad (5.29)$$

$$m_{13} = m_{31} = m_b (d_1 \sin\theta + d_2 \cos\theta); \quad (5.30)$$

$$m_{23} = m_{32} = m_b (-d_1 \cos\theta + d_2 \sin\theta); \quad (5.31)$$

$$m_{33} = m_b (d_1^2 + d_2^2) + I_b + 8 \left( m_w + \frac{1}{r^2} \right) l^2 \sin^2(\pi/4 - \alpha); \quad (5.32)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m_b \dot{\theta} (d_1 \cos\theta - d_2 \sin\theta) \\ 0 & 0 & m_b \dot{\theta} (d_1 \sin\theta + d_2 \cos\theta) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (5.33)$$

$$B = \begin{bmatrix} -(\cos\theta - \sin\theta) & -(\sin\theta + \cos\theta) & -\sqrt{2}l\sin(\pi/4 - \alpha) \\ -(\cos\theta + \sin\theta) & -(\sin\theta - \cos\theta) & -\sqrt{2}l\sin(\pi/4 - \alpha) \\ \cos\theta - \sin\theta & \sin\theta + \cos\theta & -\sqrt{2}l\sin(\pi/4 - \alpha) \\ \cos\theta + \sin\theta & \sin\theta - \cos\theta & -\sqrt{2}l\sin(\pi/4 - \alpha) \end{bmatrix}. \quad (5.34)$$

### 5.1.3. Tasarım Aşamaları

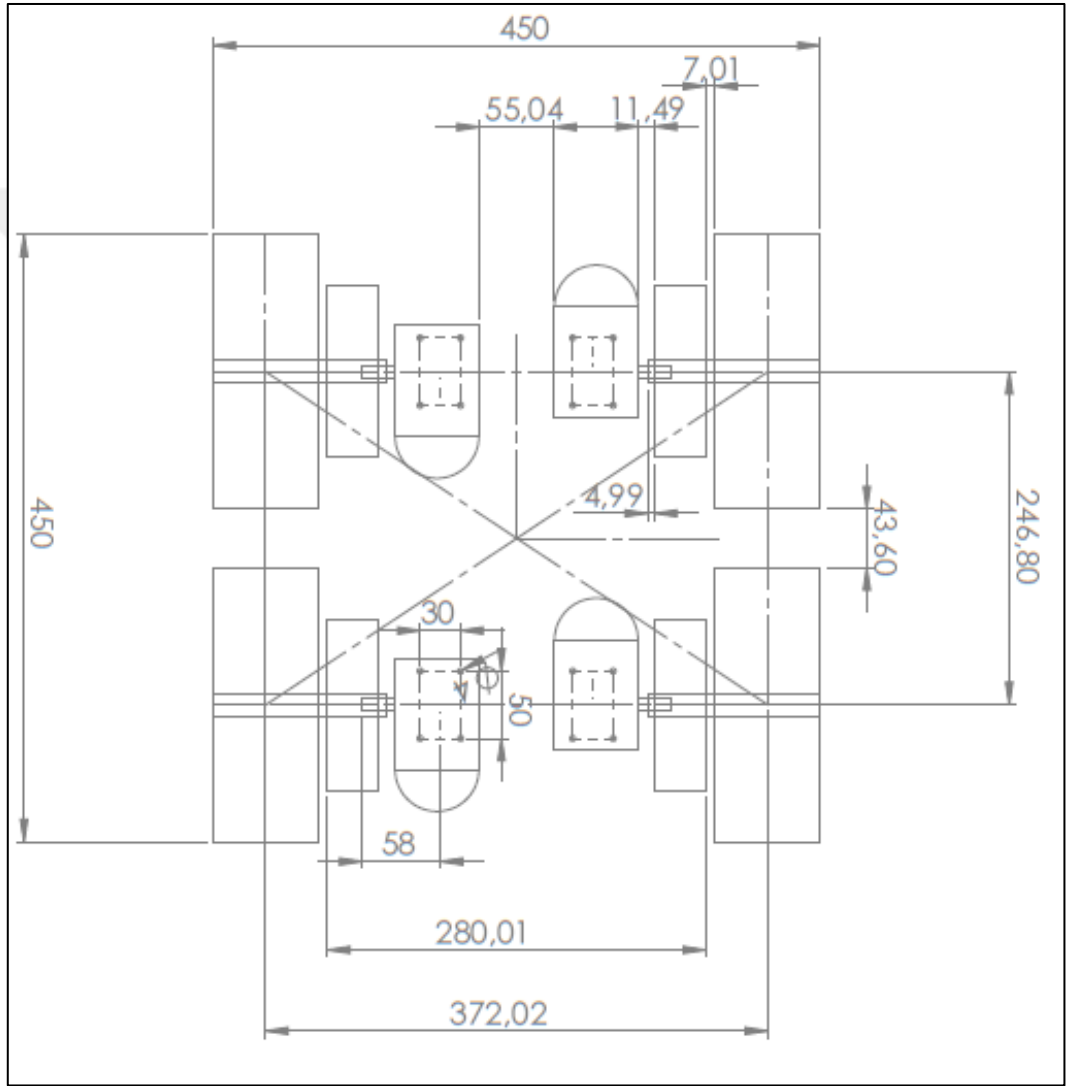
Mekanum teker ile harekete yön verilen sistemlerin tasarımında kinematik ve dinamik hesaplamalar önemli rol oynamaktadır. Mekanum teker içeren mobil robotlar için bu hesaplamaları Lih – Chang Lin, Hao – Yin Shih “Modeling and Adaptive Control of an Omni – Mekanum – Wheeled Robot” başlıklı çalışmalarında yapmıştır. Bu çalışmadan faydalanarak Mahmut Çimen “Çok Yönlü Tekerleklerle Sahip Bir Çatallı Yükleyicinin Tasarımı ve Kontrolü” başlıklı yüksek lisans tezinde Mekanum teker içeren forklift tasarımı yapmıştır. Çalışmalarda Mekanum tekerli bir sistem tasarımı için Şekil 5.2’de verilen ölçüm sabitlerinin olması hesapsal kolaylık sağladığı belirtilmiştir. Şekil 5.2’de tekerlerin birbirlerine olan çapraz mesafelerinin eşit olduğu gözlemlenmektedir. Yani tekerlerin merkezinin dikdörtgenin ya da karenin köşelerine konumlandırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmada ki tasarım süreci bu çalışmalar ve şekil göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Tasarlanan mobil robotun 2D üstten bakış görüntüsü Şekil 5.4’de görülmektedir.

Tasarım sürecinde Mahmut Çimen çalışmasında tekerlerin karenin köşesine yerleştirilmesini önermektedir. Bu sayede sürtünmenin en aza ineceği ifade edilmektedir [74]. Tasarımın kare olduğu Şekil 5.4’de görülmektedir. Tasarım en düşük ölçülerde yapılmıştır. Bu sebeple kullanılacak elektrik motorları yer düzleme dik olarak konumlandırılarak yer kazanılmıştır. Birebir oranda SolidWorks programında tasarlanmıştır. Tasarlanan Mekanum tekerli mobil robotun görünümü Şekil 5.5’de verilmektedir.

Tasarıma uygun olarak mekaniksel montaj yapılmıştır. Bir santim kalınlığında alüminyum robotun şasesini oluşturmaktadır. Tüm ekipmanlar bu şasesinin üzerine monte edilmiştir. Ayrıca Mekanum tekerler ve DC motorlar arasında yükü taşıyacak rulmanlar yerleştirilmiştir. Mekaniksel montajının tamamlandığı Mekanum tekerli

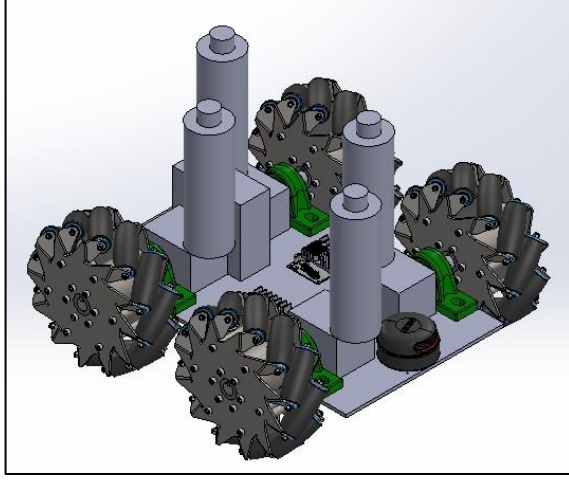
mobil robotun görünümü Şekil 5.6'da verilmektedir.

Mekaniksel montajı tamamlanmış mobil robot üzerine mini bilgisayar, batarya, LIDAR, motor sürücüler monte edilmiştir. Monte edilen donanımların elektriksel bağlantıları yapılmıştır. Donanımların monte edildiği ve elektriksel bağlantılarının yapıldığı mobil robotun görünümü Şekil 5.7'de görünmektedir.



Şekil 5.4 Tasarlanan mobil robotun üstten bakış görüntüsü ve ölçülerinin görünümü.

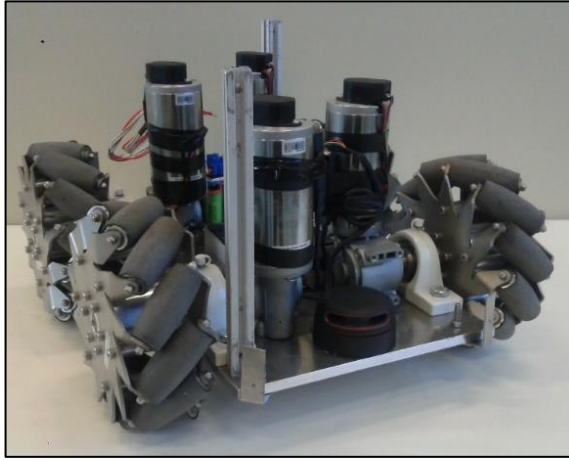
Mobil robot donanımlarının darbelere karşı korunması amacı ile dairesel bir dış kabuk kaplanmıştır. Dış kabuğun üzerine mini bilgisayar ile iletişim için dokunmatik ekran ve etrafı algılamak için LIDAR konumlandırılmıştır. Robotun son durumunun görünümü Şekil 5.8'de görülmektedir.



Şekil 5.5. Üretilen mobil robotun katı model tasarımının görünümü.



Şekil 5.6. Mekaniksel montajı tamamlanmış mobil robotun görünümü.



Şekil 5.7. Donanımların monte edildiği ve elektriksel bağlantıların yapıldığı mobil robotun görünümü.



Şekil 5.8. Geliştirilen mobil robotun son halinin görünümü.



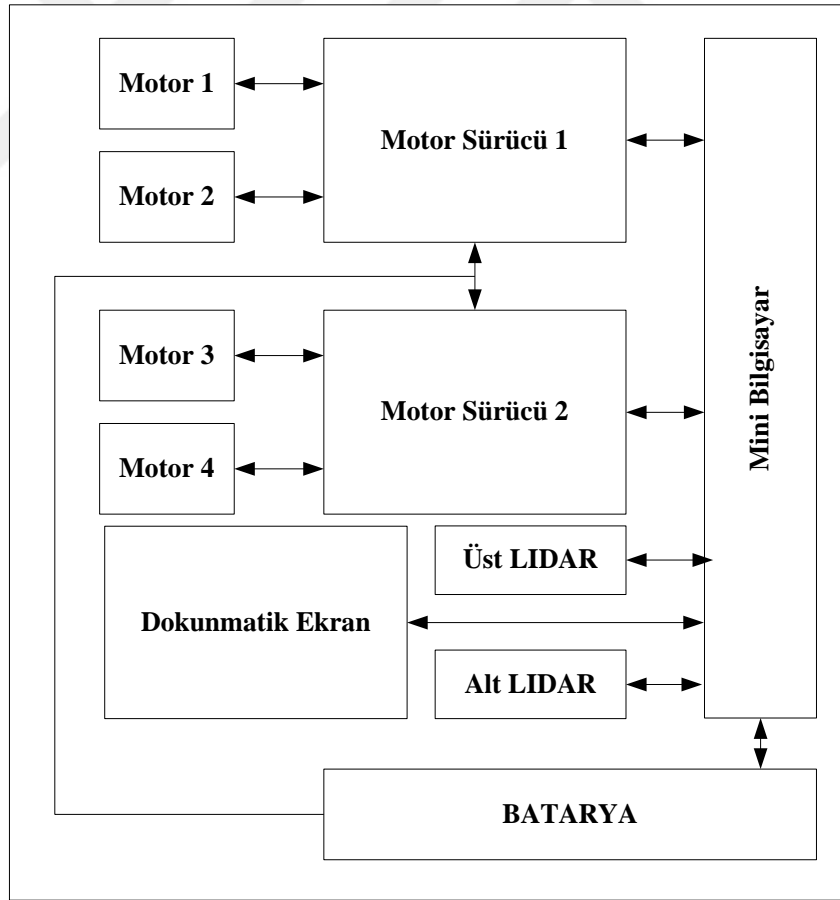


## BÖLÜM 6

### MATERYAL VE METOD

#### 6.1. MATERYAL

Mekanum tekerli mmobil robotun yapımında algılayıcılar, eyleyiciler, denetleyiciler vb. kullanılmıştır. Mini bilgisayar, motor, motor sürücü, batarya, dokunmatik ekran, LIDAR birimlerinin birbirleri ile olan ilişkileri robot blok diyagramı Şekil 6.1’de verilmektedir.



Şekil 6.1. Robotun blok diyagramı.

### 6.1.1. Merkez Kontrolcü Donanımı

Çalışmada ana kontrolcü olarak mini bilgisayar kullanılmıştır. Mini bilgisayar LIDAR dan gelen verileri anlamlandırmak ve gerekli kontrol işaretlerini üretme görevi yapmaktadır. Hesap ve cevap verme sürelerinin hızlı olması için yüksek işlem gücüne sahip olan bir bilgisayara ihtiyaç duyulmuştur. Ayrıca çalışma gerilimi sisteme uygun olmalıdır. Tüm ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak INTEL NUC5i7RYB markalı bilgisayar sisteme dahil edilmiştir [75]. Donanım Şekil 6.2’de görülmektedir.



Şekil 6.2. INTEL NUC5i7RYB görünümü.

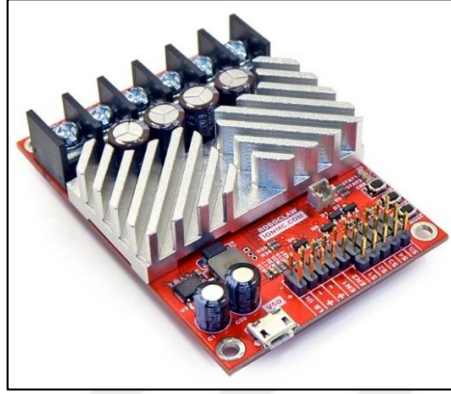
Mini bilgisayarın işlemcisi 5. Nesil Intel i7-5557U, grafik birimi Iris Graphics 6100 ve bellek boyutu 8Gb DDR3L SDRAM’dır.

### 6.1.2. Motor Sürücü

Çalışmada dört adet 95W DC motor kullanılmaktadır. Kullanılan motorlara dayanabilecek motor sürücülerin seçilmesi önemlidir. Motorların üzerinde enkoder mevcuttur. Sürücüde dahili enkoder okuyucusunun olması işlemleri kolaylaştırmaktadır. İhtiyaçlar göz önünde bulundurularak sisteme RoboClaw 2x15A iki adet motor sürücü dahil edilmiştir. Sürücü 15A’ye dayanabilmektedir. Ayrıca UART üzerinden direkt bilgisayar ile haberleşebilmektedir. Windows platformu için kütüphaneleri mevcuttur [76]. Sürücünün görünümü Şekil 6.3’de görülmektedir.

Motor sürücü 30A’lik anlık akımlara dayanabilmektedir. Multimod arayüzü, 19.6 PPS decoder, TTL, USB, analog haberleşme, R/C giriş kontrolü, limit belirleme, otomatik

fan kontrol, 3.3V çıkış, 5V giriş, programlanabilir akım limiti, programlanabilir gerilim sabitleme, açık-kapalı döngü kontrol, otomatik PID düzenleme, karışık kontrol modu, data kayıt gibi özelliklere sahiptir.



Şekil 6.3. RoboClaw 2x15A görünümü.

### 6.1.3. DC Motor

Sistemin ağırlığı çekeceği yük gibi faktörler göz önünde bulundurularak motor seçimi yapılmıştır. Kontrolünün daha kolay olması beslemesinin batarya üzerinden yapılabilmesi gibi sebeplerden ötürü DC motor seçilmiştir. Çalışmada 24V 95W 220 rpm Linix motor kullanılmıştır [77]. Motor Şekil 6.4'de görülmektedir.



Şekil 6.4. Linix 24V 95W DC motorun görünümü [78].

### 6.1.4. LIDAR

Sistemde engel algılamada kullanmak üzere bir lazer tarayıcıya ihtiyaç duyulmuştur. Fiyat performans ilişkisi göz önünde bulundurularak Slamtec firmasının RP LIDAR

A2M6 ürünü sisteme dahil edilmiştir. 18 m ölçüm mesafesi ve saniyede 8000 veri verme kapasitesine sahiptir [79]. Bilgisayar ile USB portu üzerinden haberleşmektedir. Donanım Şekil 6.5’de görülmektedir.



Şekil 6.5. Slamtec RPA2 LIDAR'ın görünümü.

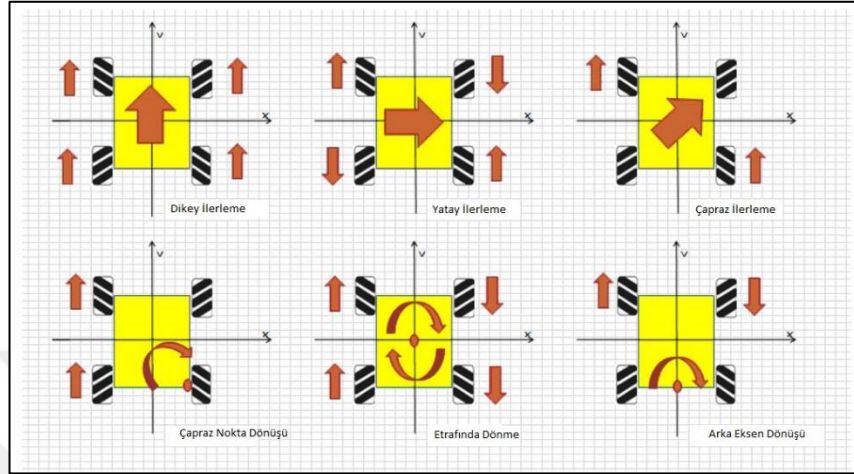
#### 6.1.5. Mekanum Teker

Mobil robot platformlarında aktif ve esnek hareket süreci önemlidir. Hareket sağlayıcıların başında motorlar ve tekerlekler gelmektedir. Mekanum teker sistemleri Şekil 6.7’da görüldüğü gibi esnek hareket imkanı sunmaktadır [80].



Şekil 6.6. Mekanum tekerin görünümü.

Sisteme Nexus Robot firmasının üretmiş olduğu 203mm çapında Mekanum tekerler dahil edilmiştir [81]. Herbir teker 53 kg yük taşıma kapasitesine sahiptir. Teker Şekil 6.6'de görülmektedir [82].



Şekil 6.7. Mekanum tekerli sistemlerin dönüş stratejilerinin görünümü.

#### 6.1.6. Batarya

Güç kaynağı olarak Panasonic firmasının üretmiş olduğu NCR18650B tipi Li-Ion batarya kullanılmıştır. Batarya 3.6V nominal gerilime ve 2600 mAh kapasiteye sahiptir. Batarya Şekil 6.8'de görülmektedir.



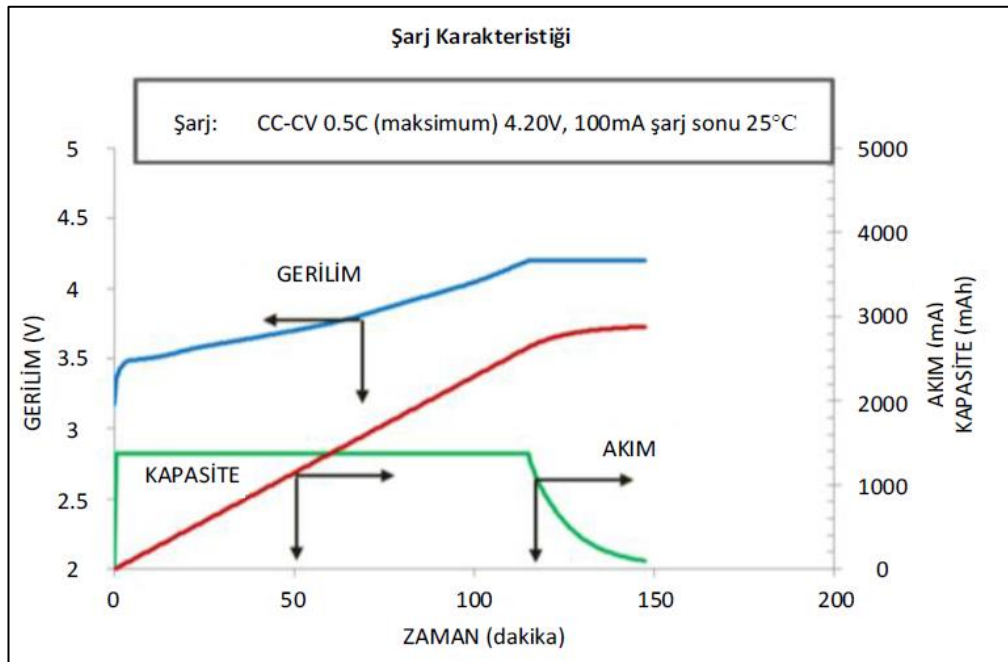
Şekil 6.8 Panasonic NCR18650 Li-Ion bataryanın görünümü.

Sistemde 5 batarya seri olarak bağlanmıştır. Batarya hücresi ve batarya paketinin özellikleri Çizelge 6.1'de verilmektedir [83].

Çizelge 6.1. Batarya hücresi ve batarya paketinin teknik özellikleri.

Özellikler	Tek Hücre	Batarya Paketi
Kapasite	2.9 Ah	23.2 Ah
Nominal Gerilim	3.6 V	22.4 V
Şarj Gerilimi	4.2 V	29.4 V
Kesme Gerilimi	2.5 V	17.5 V
Şarj Akımı	1.375A	11 A
C oranı	2 C	2 C
Ağırlık	48g	2688g
Şarj Sıcaklığı	0 °C ile 45 °C arasında	
Deşarj Sıcaklığı	-20 °C ile 60 °C arasında	
Depolama Sıcaklığı	-20 °C ile 50 °C arasında	
Çevrim Ömrü	500	

Tek hücre için şarj akımı 0.5C yani 1.375A'dır. Li-Ion bataryalar şarj gerilimine ulaşıncaya kadar sabit akım ve şarj gerilimine ulaştıktan sonra sabit geriliminde şarj edilmektedir. Şarj sonlandırma işlemi şarj akımı 100mA'e ulaşıncaya yapılmalıdır. Tek hücreye ait şarj karakteristiği grafiği Şekil 6.9'da görülmektedir.



Şekil 6.9. Tek batarya hücresine ait şarj karakteristiği grafiği.

### 6.1.7. Deneysel Çalışmaların Kayıt Altına Alınması

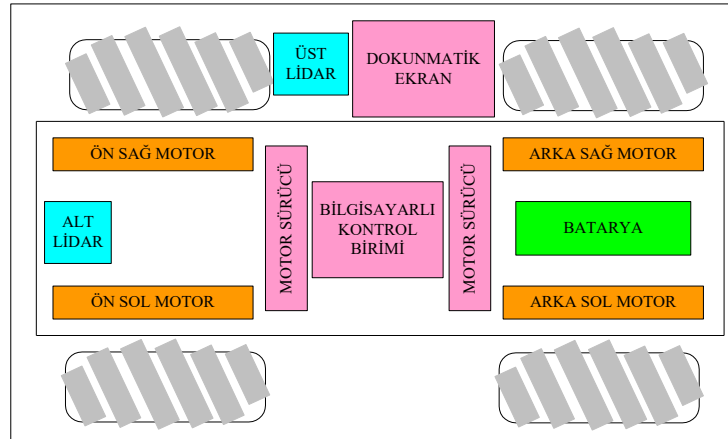
Deney çalışmaları yerden yaklaşık 290 cm yükseğe konumlandırılan bir aksiyon kamerası ile kayıt altına alınmıştır. Aksiyon kamerası olarak Şekil 6.10'da görülen SJCAM400 kullanılmıştır.



Şekil 6.10. Deneylerin kayıt edilmesinde kullanılan aksiyon kamerasının görünümü. Kamera kablosuz görüntü iletimi ve kayıt başlatma işlemleri yapabilmektedir. Kameranın 12Mp lensi ile 1080p 30fps FullHD video çekimi yapabilmektedir.

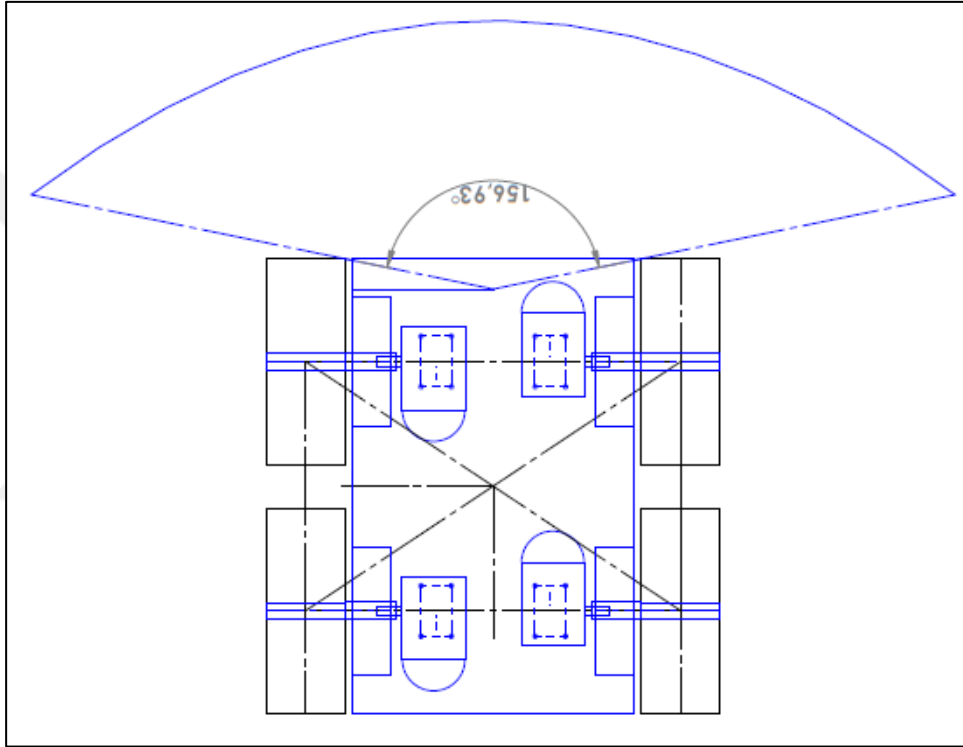
### 6.2. METOD

Mobil robot platform dört adet doğru akım motoru, LIDAR, motor sürücülerini, mini bilgisayar batarya, Mekanum tekerler ve gövdeden oluşmaktadır. Robot üzerindeki yerleşimi veren blok diyagram Şekil 6.11'de verilmektedir. Üst LIDAR ve dokunmatik ekran robotun üstünde konumlandırılmıştır.



Şekil 6.11. Robot üzerindeki yerleşimi veren blok diyagram.

Sistemde dört adet doğru akım motoru bulunmaktadır. Bu motorlar RoboClaw 2x15A motor sürücüler ile sürülmektedir. Ayrıca her sürücü mini bilgisayara bağlıdır. Mini bilgisayar motor sürücülerine gerekli kontrol sinyallerini göndermektedir. LIDAR sensör mini bilgisayara bağlanmaktadır. LIDAR dan gelen verileri mini bilgisayar yorumlamakta ve gerekli kontrol işaretlerini üretmektedir. Robotun görüş açısı LIDAR'ın konumuna bağlı olarak alt LIDAR'ın yaklaşık 150 derecelik bir görüş açısı bulunmaktadır (Şekil 6.12). Üst LIDAR ise 360 derece görebilmektedir.

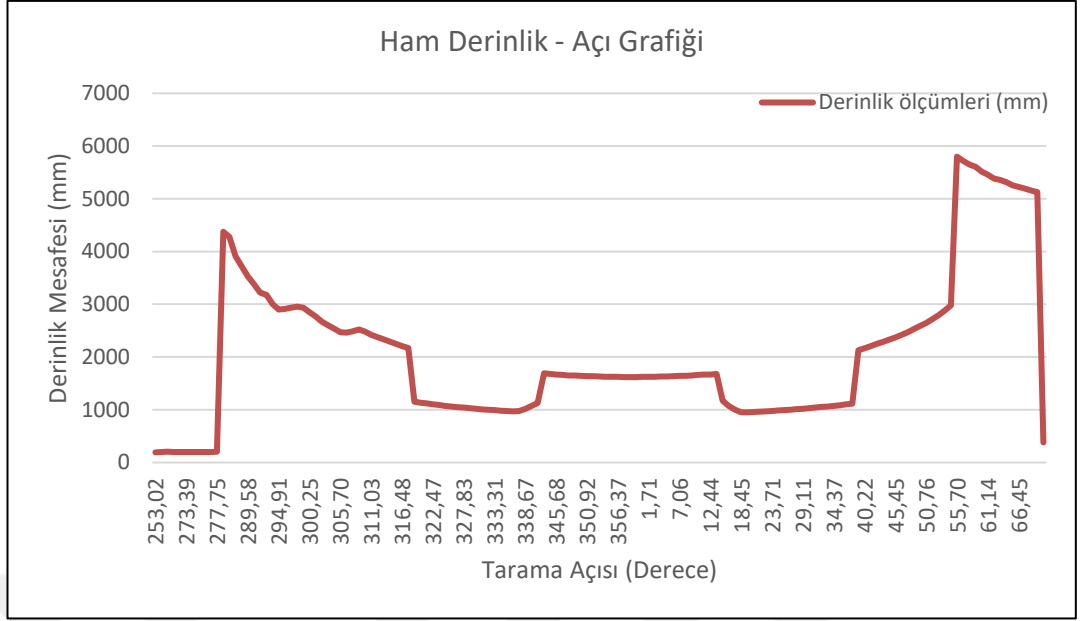


Şekil 6.12. Robotun alt LIDAR'ın görüş açısının görünümü.

### 6.2.1. Engellerin Tespit Edilmesi

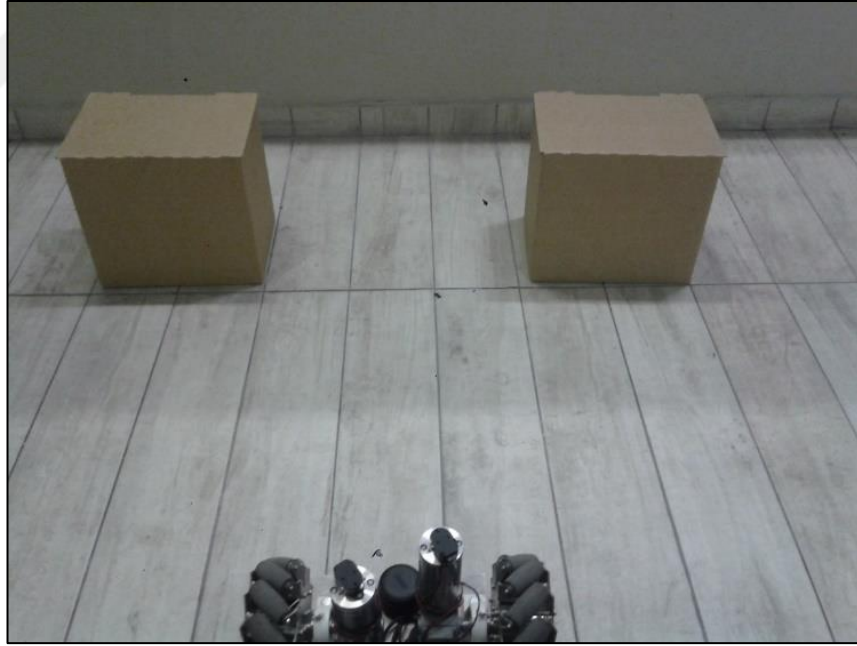
Robotun çevreyi engellerden sakınarak ilerlemesinde boşluk takip metodunun temelinde yatan boşlukların tespiti ve takibi ile bulanık mantık kontrolcüsü beraber kullanılmaktadır. LIDAR etrafını tarayarak mesafe ve açı değerlerine sahip noktalar kümesi vermektedir. Bu nokta kümesi içerisinde engellerin tespit edilmesi gerekmektedir. Engellerin başlangıç ve bitiş noktaları tespit edildiği zaman boşluklarında başlangıç ve bitiş noktalarına ulaşılmış olunmaktadır. Nokta bulutu mesafe açı cinsinden iki boyutlu bir grafik şeklinde verilmektedir (Şekil 6.13).





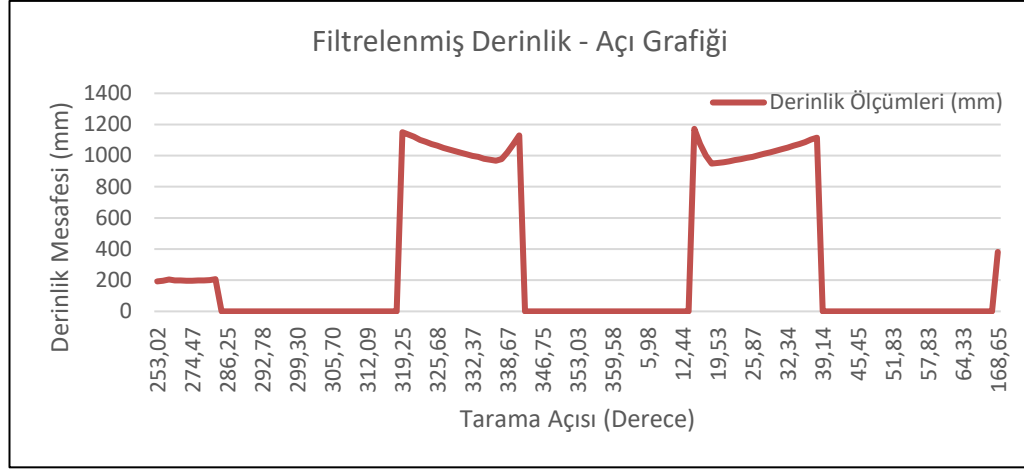
Şekil 6.13. LIDAR verilerinin görünümü.

Şekil 6.13’de ki mesafe ve açı değerleri Şekil 6.14’de ki görüntüye aittir.



Şekil 6.14. LIDAR verilerinin ölçüldüğü ortamın görünümü.

Şekil 6.14’de görülen iki adet engel Şekil 6.13’de 319 – 346 ve 12 – 39 dereceleri arasında görülmektedir. Engeller robota yaklaşık bir metre mesafede konumlandırılmıştır. İki metreden fazla mesafede bulunan her ölçüm sıfır olarak kabul edilirse Şekil 6.14’de görülen grafik Şekil 6.15 gibi olmaktadır.

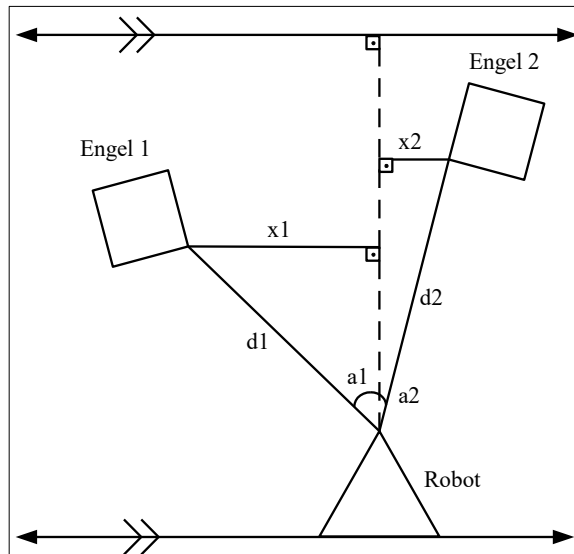


Şekil 6.15. Filtrelenmiş mesafe açılı grafiği.

Şekil 6.15’de görüldüğü üzere uygulanan filtre sonucu engeller ortaya çıkmaktadır. Bu durumda teker teker mesafe verilerinin tutulduğu küme kontrol edilmektedir. Sıfırdan bire geçen yerler engelin başlangıcı ve birden sıfıra düşen yerler engelin bitişi olarak değerlendirilmektedir. Filtre değerinin miktarı gözlem alanını belirlemektedir.

### 6.2.2. Boşluk Genişliğinin Tespit Edilmesi

Engellerin başlangıç ve bitiş noktalarının bulunması ile boşluk genişliği hesaplanmaktadır. Robot ve engeller arasında ki durum üç farklı şekilde olmaktadır. Birinci durum Şekil 6.16’da görülmektedir.



Şekil 6.16. Engeller ile robot arasındaki ilişkinin görünümü.

Birinci durumda robot engellerin arasında konumlanmıştır. Burada  $d1$  ve  $d2$  LIDAR ile ölçülen engellerin sınırları ile robot arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Engellerin sınırlarının robot ile yapmış oldukları açı  $a1$  ve  $a2$  olarak ifade edilmektedir. Engel sınırlarının robot üzerinden dik olarak geçen eksene mesafeleri  $x1$  ve  $x2$  olarak ifade edilmektedir. Burada  $x1$  ve  $x2$  nin toplamı robot genişliğinden büyük ise robotun geçebileceği sonucuna varılmaktadır. Boşluğun genişliğinin hesabı aşağıda verilmektedir.

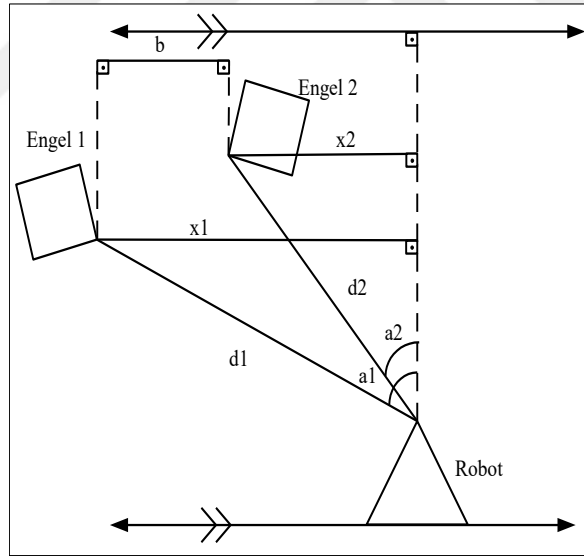
$$x1 = d1 * \sin(a1)$$

$$x2 = d2 * \sin(a2)$$

(6.1)

$$\text{Boşluk Genişliği} = x1 + x2$$

Birinci durum için boşluk genişliğinin hesaplanmasında Eşitlik 6.1 kullanılmaktadır. İkinci durum Şekil 6.17’de görülmektedir.



Şekil 6.17. Engeller ile robot arasındaki ilişkinin görünümü.

İkinci durum da robot engellerin sağ tarafında bulunmaktadır. Bu durumda hesaplanacak boşluk genişliği ( $b$ ) aşağıda verilmektedir.

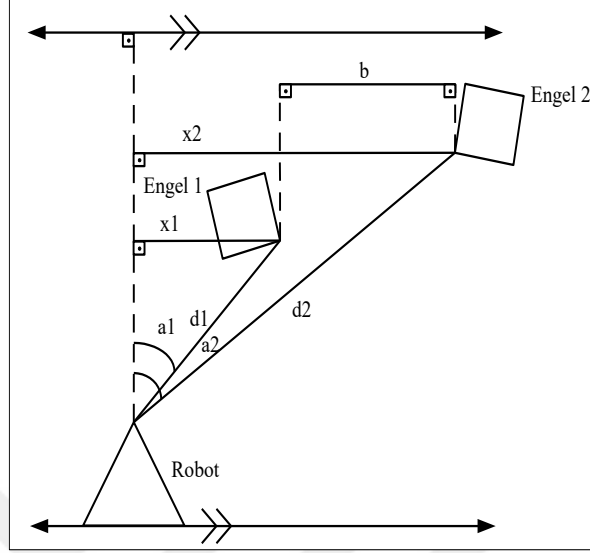
$$x1 = d1 * \sin(a1)$$

$$x2 = d2 * \sin(a2)$$

(6.2)

$$\text{Boşluk Genişliği} = x1 - x2$$

İkinci durumda engeller arasındaki boşluk genişliğinin hesabı için Eşitlik 6.2 kullanılmaktadır. Üçüncü durum Şekil 6.18’de görülmektedir.



Şekil 6.18. Engeller ile robot arasındaki ilişkinin görünümü.

Üçüncü durum da robot engellerin sol tarafında bulunmaktadır. Bu durumda hesaplanacak boşluk genişliği (b) aşağıda verilmektedir.

$$x1 = d1 * \sin(a1)$$

$$x2 = d2 * \sin(a2)$$

(6.3)

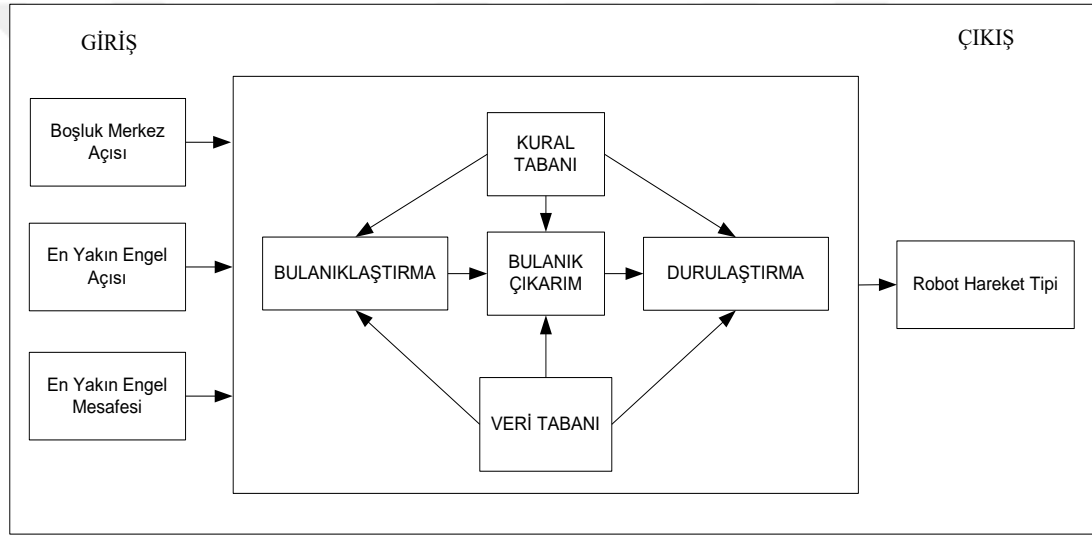
$$\text{Boşluk Genişliği} = x2 - x1$$

Üçüncü durumda engeller arasındaki boşluk genişliğinin hesabı için Eşitlik 6.3 kullanılmaktadır. Bu üç durum engel sınırlarının açı miktarına göre değerlendirilmektedir. Robotun içerisinde bulunduğu durumda birden fazla engel dolayısı ile birden fazla boşluk olabilir. Bu durumda tüm boşluk genişlikleri hesaplanmakta ve en büyük genişlik değerlendirilmektedir. En büyük değere sahip genişlik robot genişliğinden büyük ise robot o boşluğa doğru yönlendirilmektedir. Yönlendirilme işlemi yapılırken boşluğun orta noktasına doğru robot yönlendirilmektedir. Boşluğun orta noktasının açı değerinin hesabı Eşitlik 6.4’de verilmektedir.

$$\text{Boşluk Merkez Açısı} = \frac{\text{Boşluk sağ sınır açısı} + \text{Boşluk sol sınır açısı}}{2} \quad (6.4)$$

### 6.2.3. Bulanık Mantık Sınıflandırıcısının Tasarımı

Boşluk merkez açısının bulunması ile robot harekete başlamaktadır. Aynı zamanda boşluğun merkezine doğru giderken engellerden de sakınması gerekmektedir. Bu durumda engellerden sakınmasın ve boşluk merkezine hareket etmesinde bulanık mantık sınıflandırıcısı kullanılmaktadır. Bulanık mantık denetleyicisi üç giriş ve bir çıkış olarak tasarlanmıştır. Bulanık mantık sınıflandırıcısı Şekil 6.19’da verilmektedir.

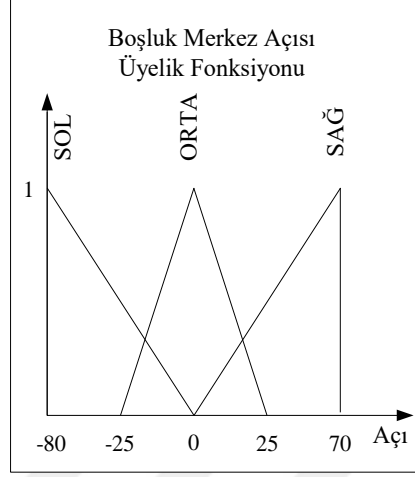


Şekil 6.19. Tasarlanan bulanık mantık sınıflandırıcısının görünümü.

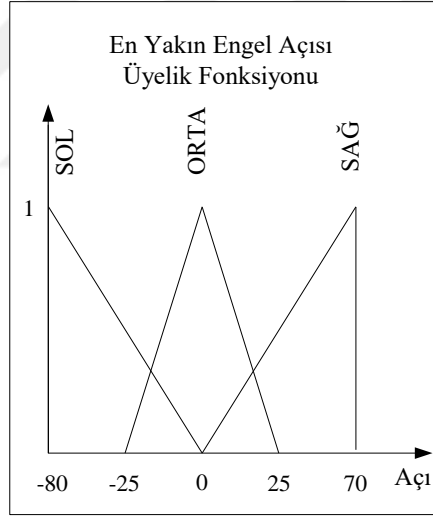
Giriş olarak boşluk merkez açısı, en yakın engel açısı ve en yakın engel mesafesi verilmektedir. Bu durum boşluğun neresinde olduğumuzu ve engelin bizim ne tarafımızda ve ne kadar yakınımızda olduğunu vermektedir. Boşluk merkez açısı girişinin üyelik fonksiyonları Şekil 6.20’de verilmektedir.

Boşluk merkez açısı hesaplandıktan sonra bulanık mantık denetleyicisinde robota olan durumu değerlendirilmektedir. Boşluk merkez açısının robota göre konumu sol, orta ve sağ olmak üzere dilsel değişkenler ile ifade edilmektedir. Robotun görüş açısı tam merkezden sağa 70 derece ve sola -80 derece olarak ifade edilmektedir. Robotun tarama açısını da bu dereceler ifade etmektedir. Bu sebeple en yakın engel açısının

girdi olarak alındığı bulanık mantık sınıflandırıcısının giriş fonksiyonu Şekil 6.21’de verilmektedir.



Şekil 6.20. Boşluk merkez açısı giriş üyelik fonksiyonlarının görünümü.

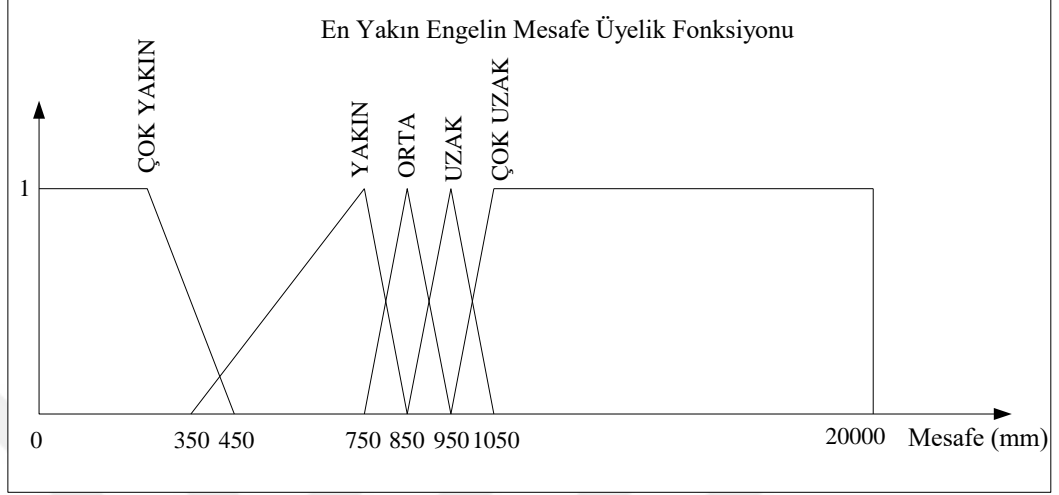


Şekil 6.21. En yakın engelin açısı giriş üyelik fonksiyonlarının görünümü.

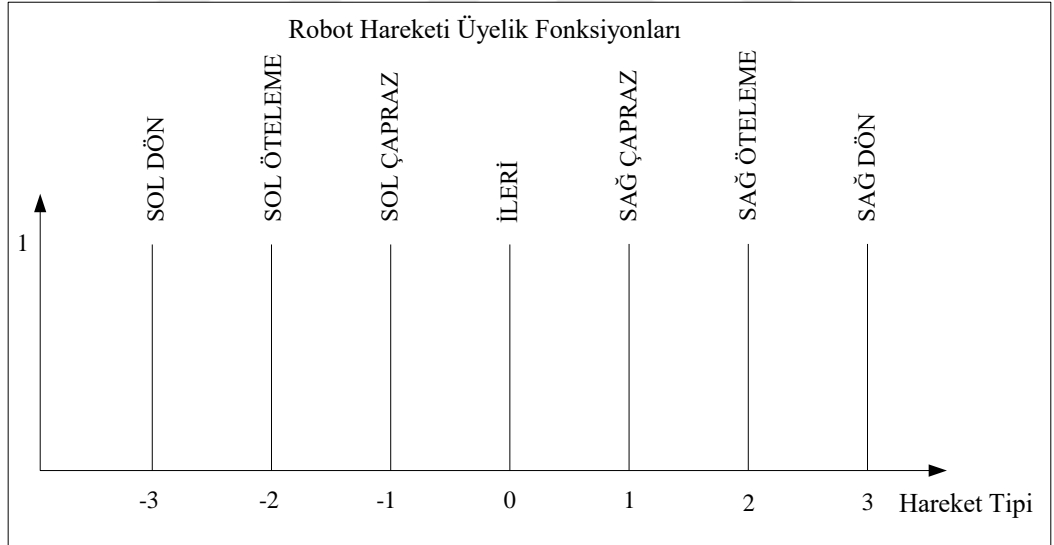
En yakın engelin açısı sol, orta ve sağ şeklinde dilsel değişkenler ile ifade edilmektedir. Son olarak üçüncü giriş olarak en yakın engelin robota olan yakınlık mesafe değerinin giriş üyelik fonksiyonu Şekil 6.22’de verilmektedir.

En yakın engelin mesafesi beş grupta değerlendirilmektedir. Mesafe çok yakın, yakın, orta, uzak, çok uzak isimli dilsel değişkenler ile ifade edilmektedir. LIDAR’ın görüş kapasitesi 20 metre olduğu için 0-20000mm arasında fonksiyon oluşturulmuştur. Robotun engellerden daha pürüzsüz kaçması için yakın üyelik fonksiyonu ile diğer

üyelik fonksiyonlarından herhangi biri kesiştirilmemiştir. Girişlerin durumuna göre çıkışlara karar verilmektedir. Çıkış fonksiyonu Şekil 6.23’de verilmektedir.



Şekil 6.22. En yakın engelin mesafesi giriş üyelik fonksiyonlarının görünümü.



Şekil 6.23. Çıkış üyelik fonksiyonlarının görünümü.

Robot ileri, geri ve dur haricinde Mekanum tekerlerden kaynaklı olarak altı farklı hareket yapabilmektedir. Bu hareketler sol ve sağ olarak negatif ve pozitif kısımlara konumlandırılmıştır. Girişlere gelen verilere göre çıkışların tayin edildiği kural tabanı bulunmaktadır. Kural tabanı 45 kuraldan oluşmaktadır. Kural tablosu Çizelge 6.2’de verilmektedir.

Çizelge 6.2. Kural tablosu.

Boşluk	Engel Açı	Mesafe	Çıkış
sol	sol	çokyakın	sağ öteleme
sol	sol	yakın	sağ çapraz
sol	sol	orta	sağ çapraz
sol	sol	uzak	sağ çapraz
sol	sol	çokuzak	ileri
sol	orta	çokyakın	sol öteleme
sol	orta	yakın	sol çapraz
sol	orta	orta	sol çapraz
sol	orta	uzak	sol çapraz
sol	orta	çokuzak	sol çapraz
sol	sag	çokyakın	sol öteleme
sol	sag	yakın	sol çapraz
sol	sag	orta	sol çapraz
sol	sag	uzak	sol çapraz
sol	sag	çokuzak	sol çapraz
orta	sol	çokyakın	sağ öteleme
orta	sol	yakın	sağ çapraz
orta	sol	orta	sağ çapraz
orta	sol	uzak	sağ çapraz
orta	sol	çokuzak	ileri
orta	orta	çokyakın	sol öteleme
orta	orta	yakın	sol çapraz
orta	orta	orta	sol çapraz
orta	orta	uzak	sol çapraz
orta	orta	çokuzak	sol çapraz
orta	sag	çokyakın	sol öteleme
orta	sag	yakın	sol çapraz
orta	sag	orta	sol çapraz
orta	sag	uzak	sol çapraz
orta	sag	çokuzak	ileri
sağ	sol	çokyakın	sağ öteleme
sağ	sol	yakın	sağ çapraz
sağ	sol	orta	sağ çapraz
sağ	sol	uzak	sağ çapraz
sağ	sol	çokuzak	sağ çapraz
sağ	orta	çokyakın	sağ öteleme
sağ	orta	yakın	sağ çapraz
sağ	orta	orta	sağ çapraz



Çizelge 6.3. devam ediyor.

Boşluk	Engel Açı	Mesafe	Çıkış
sağ	orta	uzak	sağ çapraz
sağ	orta	çokuzak	sağ çapraz
sağ	sag	çokyakın	sol öteleme
sağ	sag	yakın	sol çapraz
sağ	sag	orta	sol çapraz
sağ	sag	uzak	sol çapraz
sağ	sag	çokuzak	ileri

#### 6.2.4. Scikit – Fuzzy Kütüphanesi

Kural tablosunda giriş olarak gelecek tüm ihtimaller değerlendirilmiş ve uzman görüşü ile ilgili çıkış değerleri ifade edilmiştir. Ayrıca bu olasılıkların dışında boşluk genişliklerinin robot genişliğinden küçük olması ve gidecek herhangi bir boşluğun bulunmaması durumlarında robot durdurulmaktadır. Bulanık mantık denetleyicisi ve kontrol algoritmaları python dilinde ve ortamında gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık denetleyicisi scikit – fuzzy kütüphanesi ile oluşturulmuştur [84]. Scikit kütüphanesi literatürde birçok farklı çalışmada kullanıldığı görülmektedir [85], [86], [87]. Scikit kütüphanesinin bulanık mantık için olan bölümü scikit-fuzzy'dir. Bu kütüphane python ortamında üyelik fonksiyonu tanımlama, durulama, bulanık çıkarım işlemleri, en yaygın bulanık mantık işlemlerinin kullanımı, Dong, shah ve Wong yöntemlerinin kullanımı, sınırlı bulanık mantık görüntü işleme işlemleri, 1D ve 2D'de Else-action (FIRE) filitreleri tarafından yönetilen bulanık çıkarım gibi kabiliyetlere sahiptir. Üyelik fonksiyonlarının grafiklerini çizdirme, kural tablosunun grafiğini çizdirme gibi özellikleri mevcuttur. Durulama yönteminde ağırlık merkezi, açıortay, maksimum ortalama, maksimumun en düşüğü ve maksimumun en yükseği gibi bilinen hesaplama kabiliyetlerine sahiptir. Bu kütüphane ile c-means kümeleme, tahmin etme ve denetleyici problemleri rahatlıkla çözebilmektedir [88].

## BÖLÜM 7

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Üç farklı deney ile robot test edilmiştir. Robotun alan taraması, durağan engellerden sakınma ve durağan ve hareketli engelden sakınma kabiliyetleri test edilmiştir.

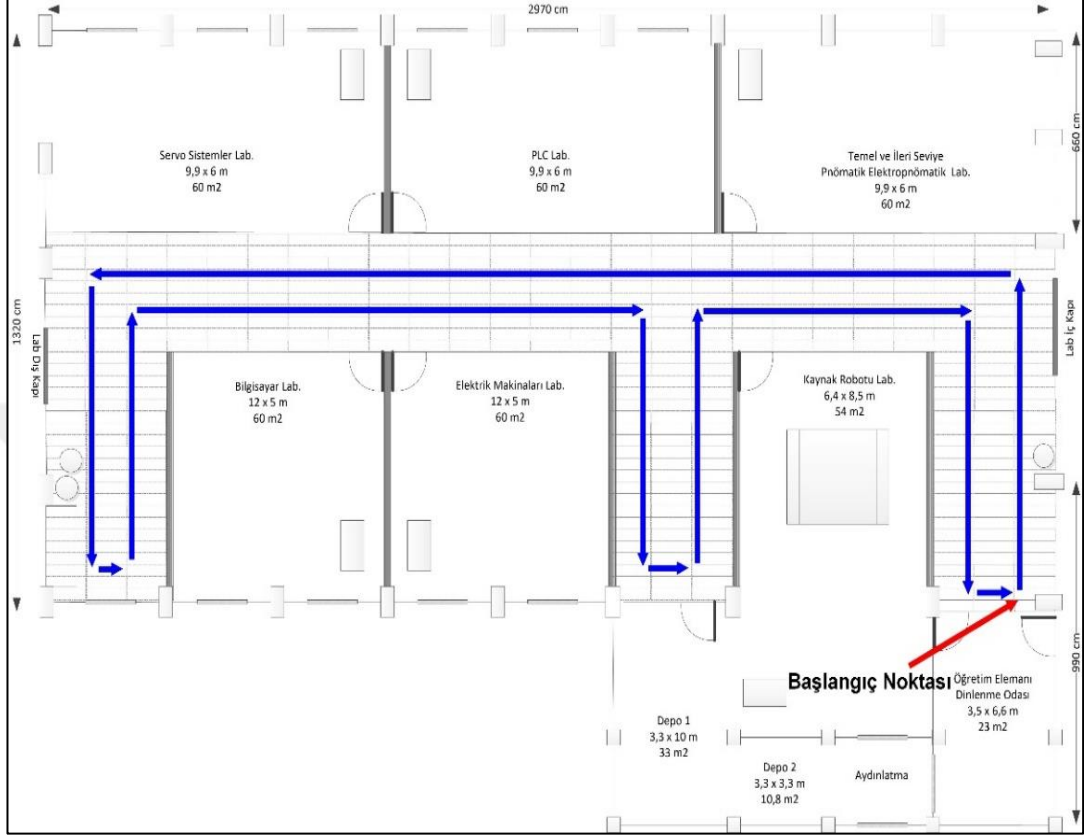
#### 7.1. ALAN TARAMASI DENEYİ

Alan taraması deneyi laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada robotun güvenlik amacı ile laboratuvar içerisinde tur atması beklenmektedir. Laboratuvar kapalı bir ortamdır. Ters “E” şeklindedir. Bir ana koridor ve üç yan koridora sahiptir. Çalışma ortamının görüntüleri Şekil 7.1’de verilmektedir.



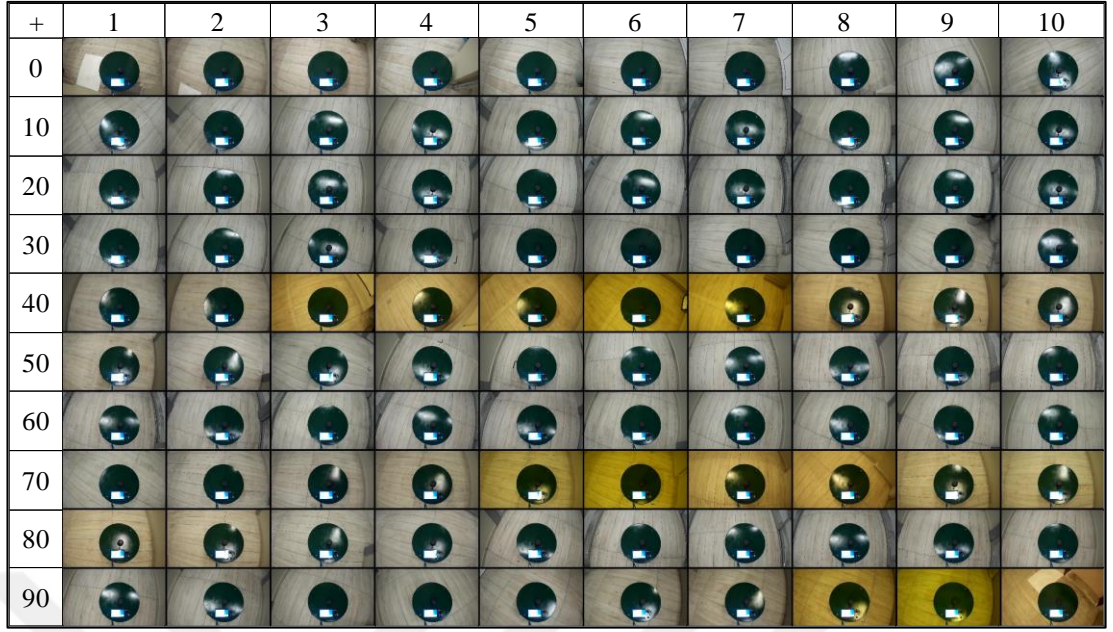
Şekil 7.1. Alan taraması deneyinin yapıldığı laboratuvar ortamının görünümü.

Çalışma ortamında robotun tarama yapması istenmiştir. Bu tarama yaklaşık olarak Şekil 7.2’de görülen bir şekilde olması beklenmektedir.



Şekil 7.2. Robotun izlemesi beklenen yolun ve başlangıç noktasının görünümü.

Robotun Şekil 7.2’de görülen rotayı takip ederek çalışma ortamını taraması beklenmektedir. Tarama robot sağ duvara göre kendi pozisyonunu koruyarak hareket etmektedir. Ayrıca ön tarafındaki engeller kontrol edilerek hareketine karar vermektedir. Deneyler beş kez tekrar edilmiş ve kayıt altına alınmıştır. Her tekrar robotun tam şarj durumu ile yapılmıştır. Deneyler robot üzerine bağlanan bir aksiyon kamerası ile kayıt altına alınmıştır. Video kayıtları yüz eşit parçaya bölünerek sırası ile sunulmuştur. Görüntüleri daha anlaşılır hale getirmek amacı ile fotoğraflar baz alınarak yaklaşık konumları çalışma ortamı planı üzerinde işaretlenmiştir. Alan taraması deneyinin birinci deneme sonuçlarının görünümü Şekil 7.3’de verilmektedir. Şekil 7.3’de görüldüğü üzere birinci fotoğraf 0 numaralı satır ve 1 numaralı sütunun kesişimindeki fotoğraftır. Örneğin 57. fotoğraf 50 numaralı satır ve yedi numaralı sütunun kesişimindeki fotoğraftır.



Şekil 7.3. Alan tarama deneyinin birinci tekrarının sonuçlarının görünümü.

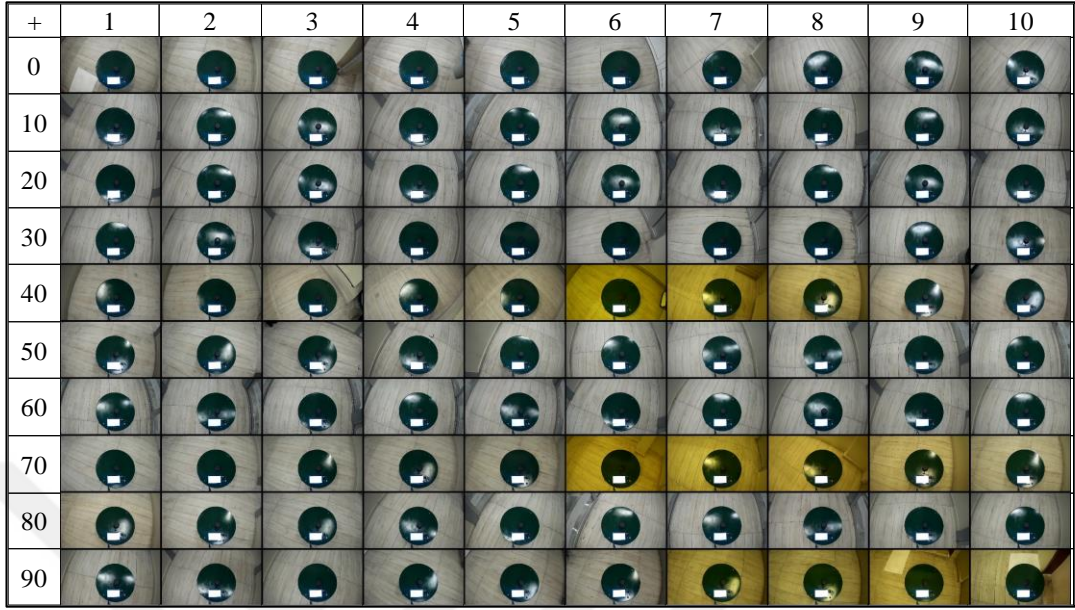
Şekil 7.3'de görülen alan tarama deneyinin birinci tekrarının çalışma ortamı planı üzerindeki gösterimi Şekil 7.4'de verilmektedir.



Şekil 7.4. Alan tarama deneyinin birinci tekrarında robotun çalışma ortamı planı üzerindeki yaklaşık gösterimi.



Alan tarama deneyinin üçüncü tekrarının görüntüleri Şekil 7.7’de verilmektedir.



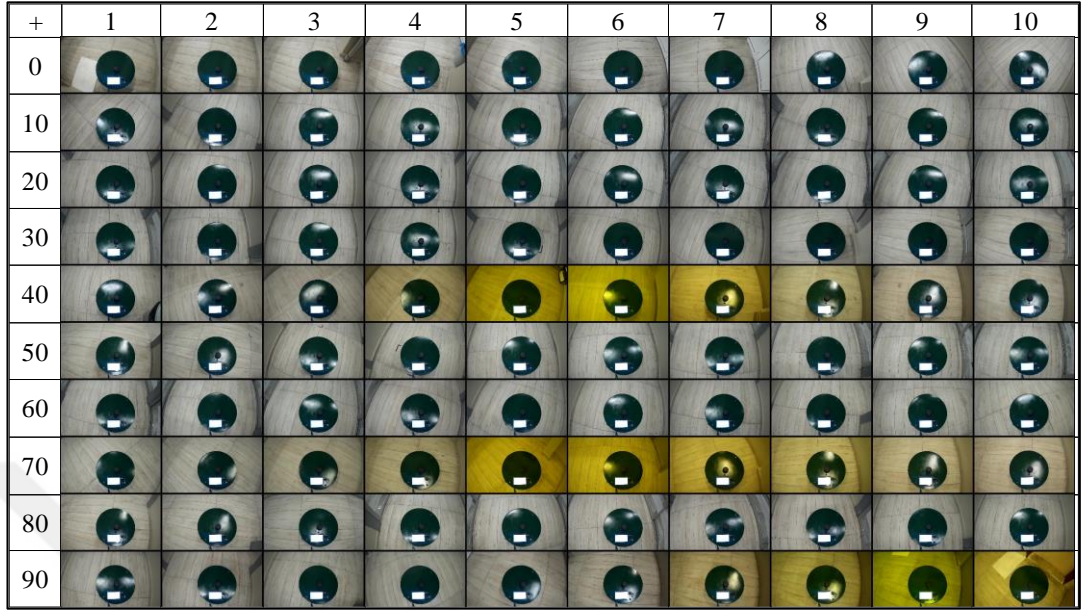
Şekil 7.7. Alan tarama deneyinin üçüncü tekrarının sonuçlarının görünümü.

Şekil 7.7’de görülen alan tarama deneyinin üçüncü tekrarının çalışma ortamı planı üzerindeki gösterimi Şekil 7.8’de verilmektedir.



Şekil 7.8. Alan tarama deneyinin üçüncü tekrarında robotun çalışma ortamı planı üzerindeki yaklaşık gösterimi.

Alan tarama deneyinin dördüncü tekrarının görüntüleri Şekil 7.9’da verilmektedir.



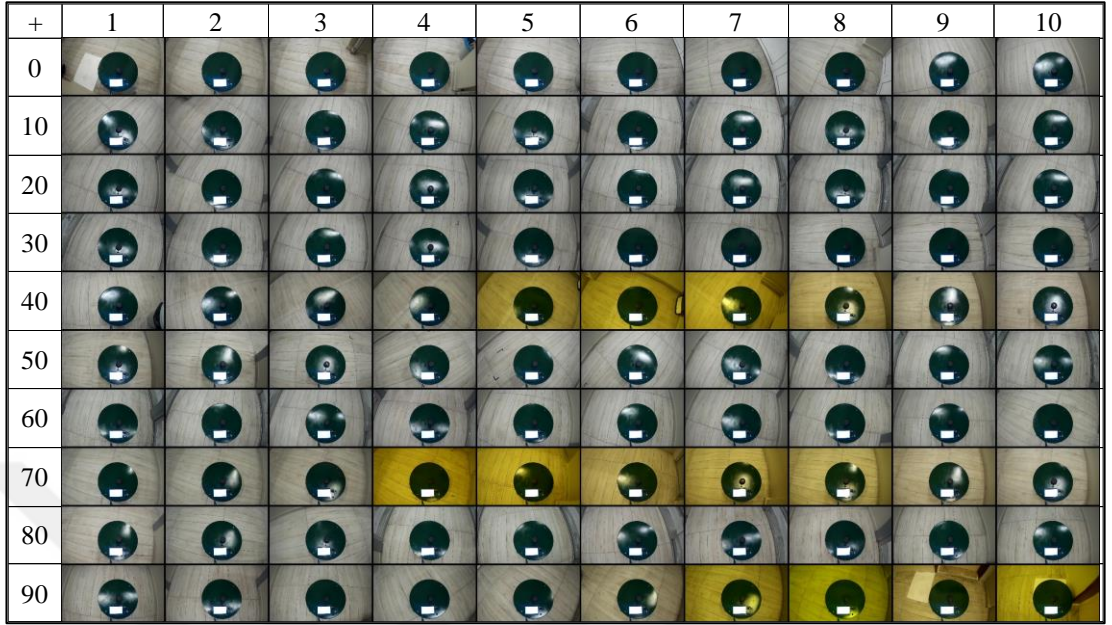
Şekil 7.9. Alan tarama deneyinin dördüncü tekrarının sonuçlarının görünümü.

Şekil 7.9’da görülen alan tarama deneyinin dördüncü tekrarının çalışma ortamı planı üzerindeki gösterimi Şekil 7.10’da verilmektedir.



Şekil 7.10. Alan tarama deneyinin dördüncü tekrarında robotun çalışma ortamı planı üzerindeki yaklaşık gösterimi.

Alan tarama deneyinin beşinci tekrarının görüntüleri Şekil 7.11’de verilmektedir.



Şekil 7.11. Alan tarama deneyinin beşinci tekrarının sonuçlarının görünümü.

Şekil 7.11’de görülen alan tarama deneyinin beşinci tekrarının çalışma ortamı planı üzerindeki gösterimi Şekil 7.12’de verilmektedir.



Şekil 7.12. Alan tarama deneyinin beşinci tekrarında robotun çalışma ortamı planı üzerindeki yaklaşık gösterimi.



Robot başlangıç noktasında deneye başlamıştır. Alanı tarayıp geri başlangıç noktasına gelmeyi başarmıştır. Tüm taramayı çevreye çarpmadan yapmayı başardığı görülmektedir. Yalnız ortam zemi parke taşları ile döşeli olduğu için zemin tam pürüzsüz değildir. Bu durumda robot her bir parke taşı geçilirken Mekanum tekerlerden de kaynaklı olarak titreşime maruz kalmaktadır. Bu titreşim robot hareketinde kaymalar meydana getirmektedir. Şekil 7.4, 7.6, 7.8, 7.10, 7.12’de görüldüğü üzere robot sürekli doğrusal hareket edememektedir. Robot konumu duvarla olan mesafesi ile düzeltilmektedir. Robot önüne bir engel geldiğinde sola dönüş hareketi yapmaktadır. Sağ tarafında koridorun olduğu anlaşıldığında ise iki saniye ileri hareketi yapmakta ve daha sonra sağa dönüp ileri hareketi yapmaktadır. Bu sebeple sağa dönüşlerdeki keskinlik bu sebeple meydana gelmektedir. Ancak yine bu durumdada robot konumunda sapma oluştu ise hareket doğrusallıktan sapabilmelidir. Robot sağ duvar ile arasında 80 – 110 cm arasında bir mesafe korumaya çalışmaktadır. Hareketindeki dalgalanma bu sebeple olmaktadır. Bazı yerlerde duvara yakın hareket ederken bazı yerlerde de duvardan uzak hareket edebilmektedir. Alan taraması deneylerinin süreleri ve çarpışma durumları Çizelge 7.1’de verilmektedir.

Çizelge 7.1. Alan taraması deneyinin çarpışma durumları ve deney süreleri.

Alan Taraması Deneyi		
Deney Nu.	Deney Süresi	Çarpışma
1. Deney	00:04:45	Yok
2. Deney	00:04:42	Yok
3. Deney	00:04:49	Yok
4. Deney	00:04:45	Yok
5. Deney	00:04:42	Yok

Çizelge 7.1’de görüldüğü üzere beş deney birbirine yakın sürelerde deneyi bitirmiştir. Ortalama bitirme süresi 4 dakika 45 saniyedir. Üçüncü deney ortalamanın biraz üzerindedir. Şekil 7.8’de görüldüğü üzere 17’nci noktada robot sol tarafa çok fazla kaymıştır. Robot yeniden kendini konumlandırana kadar belirli bir süre geçmiştir. Bu sebeple vakit kaybı oluşmuştur.

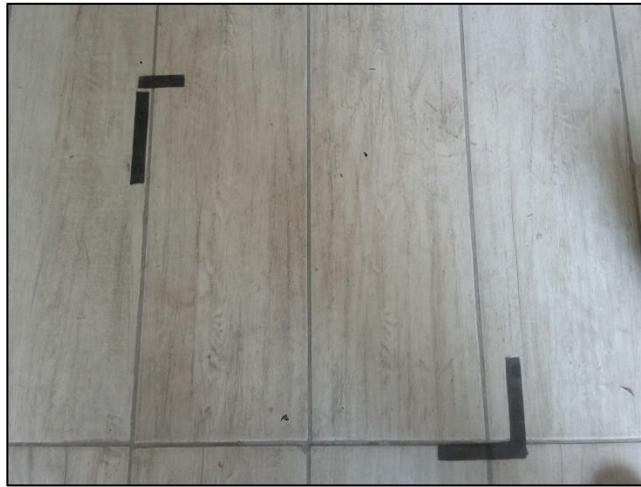
## 7.2. DURAĞAN ENGELLERDEN SAKINMA DENEYİ

Deneysel çalışma laboratuvarının belirli bir bölümünde yapılmıştır. Deneysel ortamının görünümü Şekil 7.13’de verilmektedir.



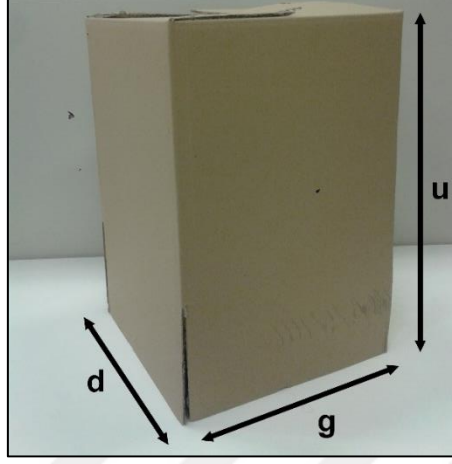
Şekil 7.13. Deneysel ortamının görünümü.

Şekil 7.13’de görülen uzunluk (h) ve genişlik (d) mesafe değerleri sırası ile 625 cm ve 212 cm dir. Deneysel çalışmalarda robot tepkisinin gözlemlenebilir olarak ölçülmesi için robot sürekli olarak aynı noktadan başlatılmıştır. Bu nokta Şekil 7.14’de verilmektedir.



Şekil 7.14. Robotun deneysel çalışmalarda başlatıldığı bölgenin görünümü.

Deneysel çalışmada durağan engel olarak Şekil 7.15’de görülen karton kutu kullanılmıştır.



Şekil 7.15. Durağan engel olarak kullanılan karton kutunun görünümü.

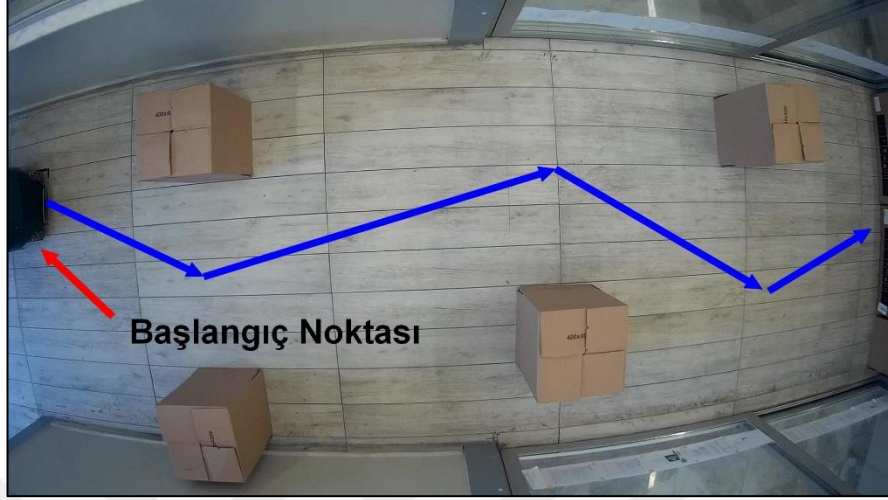
Engelin d, g ve u ölçüleri sırası ile 40, 40 ve 60 cm dir. Statik engellerin deneysel ortamda konumlandırılması Şekil 7.16’da verilmektedir.



Şekil 7.16. Durağan engellerden sakınma deneyinin yapıldığı ortamın ve engellerinin konumunun görünümü.

Durağan engellerin konumları robotun bazı kabiliyetlerinin görülmesi açısından konumlandırılmıştır. Engellerin konumları robotun iki engel arasından geçebilmesini ve çapraz engellerden sakınarak yoluna devam edebilmesini test etmek için Şekil 7.16’da görüldüğü gibi konumlandırılmıştır. Robot algoritması gereği engeller

arasındaki boşlukları ortalamaya çalışmaktadır. Robotun hareketinin Şekil 7.17’de görüldüğü gibi olması beklenmektedir.



Şekil 7.17. Durağan engellerden sakınma deneyinde robotun izlemesi beklenen yolun görünümü.

Deneyle beşer defa tekrar edilmiştir. Robot tam şarj ile deneylere başlatılmıştır. Beş tekrarın beşinde de robotun engelden sakındığı gözlemlenmiştir. Durağan engelden sakınma görevinin birinci tekrarının görüntüsü Şekil 7.18’de verilmektedir.



Şekil 7.18. Durağan engelden sakınma deneyinin birinci tekrarının görünümü.

Durağan engelden sakınma görevinin ikinci tekrarının görüntüsü Şekil 7.19’da

verilmektedir.



Şekil 7.19. Durağan engelden sakınma deneyinin ikinci tekrarının görünümü.

Durağan engelden sakınma görevinin üçüncü tekrarının görüntüsü Şekil 7.20’de verilmektedir.



Şekil 7.20. Durağan engelden sakınma deneyinin üçüncü tekrarının görünümü.

Durağan engelden sakınma görevinin dördüncü tekrarının görüntüsü Şekil 7.21’de

verilmektedir.



Şekil 7.21. Durağan engelden sakınma deneyinin dördüncü tekrarının görünümü.

Durağan engelden sakınma görevinin beşinci tekrarının görüntüsü Şekil 7.22’de verilmektedir.



Şekil 7.22. Durağan engelden sakınma deneyinin beşinci tekrarının görünümü.

Tüm deneylerde robot hareketleri Şekil 7.23’de verilmektedir.



Şekil 7.23. Durağan engelden sakınma deneylerinin bir arada gösterimi.

Şekil 7.23’de görüldüğü üzere deneysel çalışma sonucunda robotun beş tekararda engelden sakındığı görülmüştür. Robot hareketleri gözlemlenmiştir. Durağan engellerin yerleşimi dikkate alındığında robotun karşılaştığı ilk engel karşılıklı yerleştirilmiş ve robotun arasından geçmesi beklenmiştir. Engeller arasından başarılı bir şekilde geçmeyi başarmıştır. Engeller arasından geçmesi sonrasında çapraz yerleştirilmiş engellerden sakınması beklenmiştir. Bu durumda da başarılı bir hareket göstermiştir. Ayrıca Mekanum tekerlerin getirmiş olduğu bir avantaj olarak çapraz engellerden sakınmada robot çapraz hareket göstermiştir. Bu durum Mekanum tekerlerin engelden sakınmadaki avantajını göstermektedir. Durağan engellerden sakınma deneylerinin süreleri ve çarpışma durumları Çizelge 7.2’de verilmektedir.

Çizelge 7.2. Durağan engellerden sakınma deneyinin çarpışma durumları ve deney süreleri.

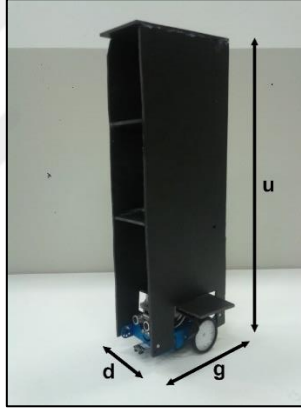
Durağan Engellerden Sakınma Deneyi		
Deney Nu.	Deney Süresi	Çarpışma
1. Deney	00:00:37	Yok
2. Deney	00:00:36	Yok
3. Deney	00:00:36	Yok
4. Deney	00:00:39	Yok
5. Deney	00:00:40	Yok

Çizelge 7.2’de görüldüğü üzere beş deney birbirine yakın sürelerde deneyi bitirmiştir.

Ortalama bitirme süresi 38 saniyedir. Dördüncü ve beşinci deneylerin süreleri ortalamanın üzerindedir. Şekil 7.23’de görüldüğü üzere dördüncü ve beşinci deneyde robot sağ tarafında kalan ilk durağan engelle çok yanaşmıştır. Bu sebeple sol öteleme hareketi yapmak zorunda kalmıştır. Burada sol öteleme hareketi yapması diğer deney sonuçlarına göre daha uzun bir bitirme süresi oluşmasına sebep olmuştur.

### 7.3. DURAĞAN VE HAREKETLİ ENGELDEN SAKINMA DENEYİ

Deneysel çalışma durağan engellerden sakınma deneyinin yapıldığı alanda gerçekleşmiştir. Durağan engel özellikleri ve başlangıç noktası bu deneyde de kullanılmıştır. Hareketli engel olarak mBot olarak bilinen bir eğitim robotu kullanılmıştır. Robotun üzerine engel olabilmesi için Şekil 7.24’de görüldüğü gibi bir giydirme yapılmıştır.



Şekil 7.24. Hareketli engelin görünümü.

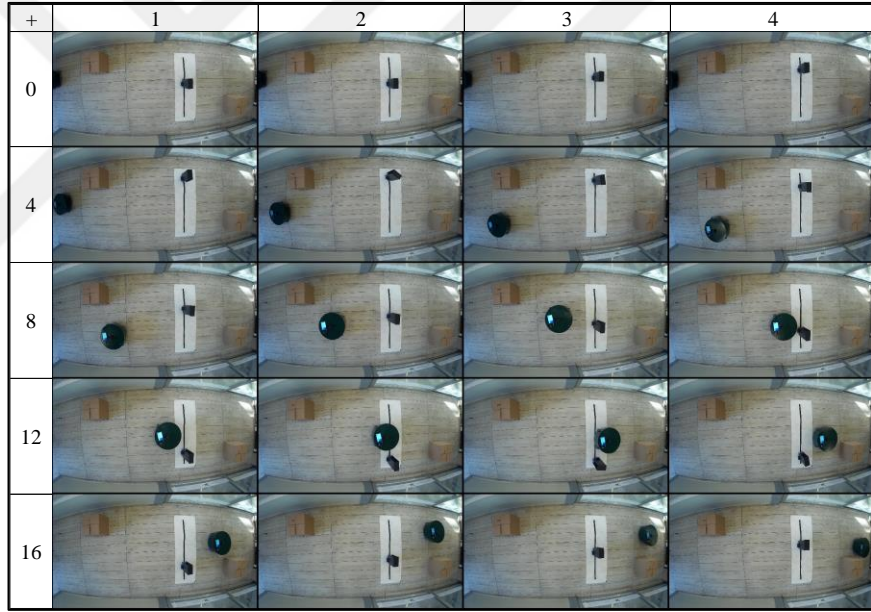
Engelin d, g ve u ölçüleri sırası ile 9.5, 19 ve 58 cm’dir. Şekil 7.25’de görülen hareketli engel deneysel çalışmada Şekil 7.25’de görülen çizgiyi takip ederek ileri ve geri rota izlemektedir. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinde hareketli engelin ve durağan engelin deneysel ortamdaki konumlandırılması Şekil 7.25’de verilmektedir.

Deneysel çalışma beş kez tekrar edilmiştir. Deneysel çalışmalar tam şarj ile başlatılmıştır. Beş denemede durağan engellere çarpmamıştır. Hareketli engel ile iki defa çarpışma meydana gelmiştir. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin birinci tekrarı Şekil 7.26’da verilmektedir.



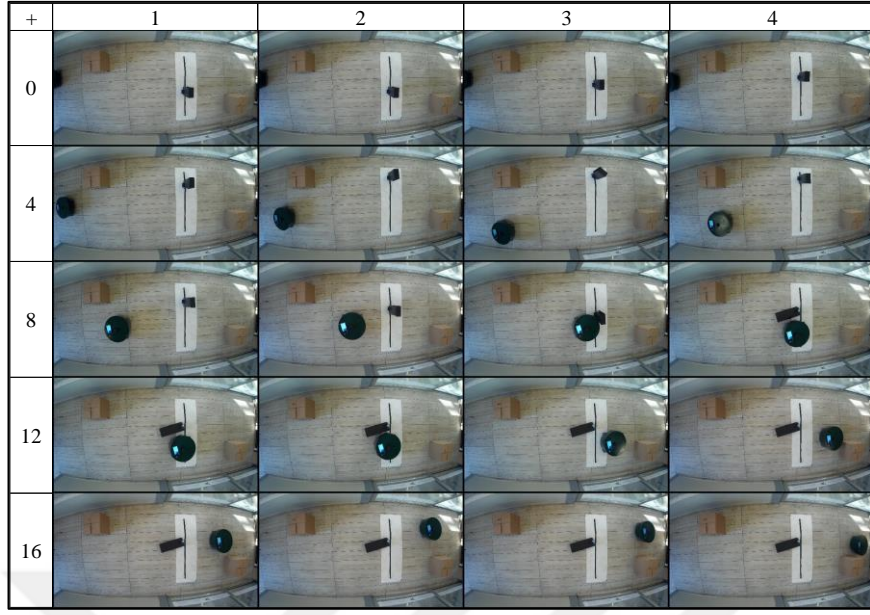


Şekil 7.25. Durağan ve hareketli engelden sakınma deney ortamının görünümü.



Şekil 7.26. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin birinci tekrarının görünümü.

Şekil 7.26'da görüldüğü üzere robot hem durağan hemde hareketli engelden sakınmıştır. Deney sırasında Şekil 7.26'da görülen 11. fotoğrafta hareketli engel robotun sağ tarafında kaldığı görülmektedir. Bu sebeple robotun sol tarafı daha geniş bir boşluk olarak görülmektedir. Bu sebeple sol tarafında kalan geniş boşluğa doğru yönelmiştir. Hareketli engelden sakınarak parkurun sonuna doğru hareketi başarılı bir şekilde tamamlamıştır. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin ikinci tekrarı Şekil 7.27'de verilmektedir.



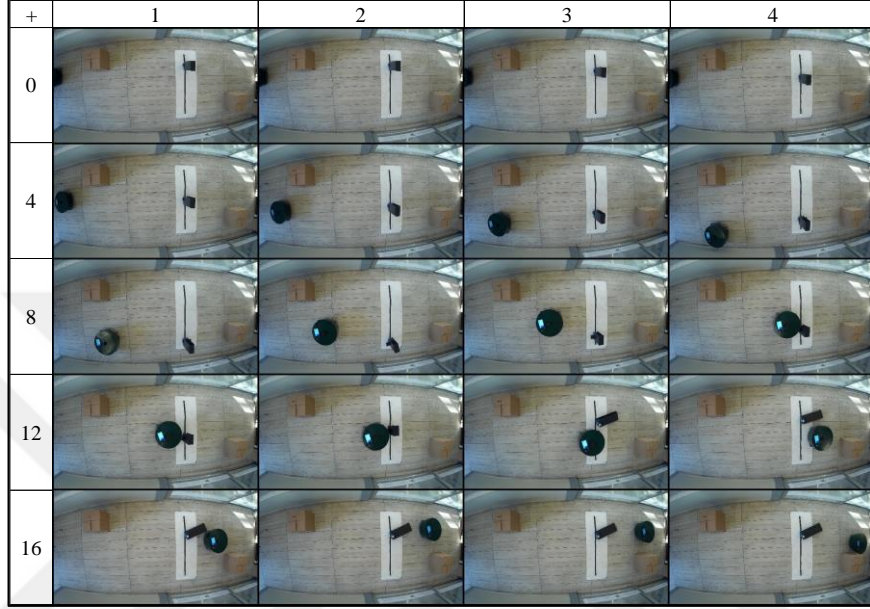
Şekil 7.27. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin ikinci tekrarının görünümü.

Şekil 7.27’de başarısız bir deney sonucu görülmektedir. Robot yine durağan engellerden sakınmayı başarmıştır. Robot hareketli engel ile Şekil 7.27’de görülen 10. fotoğrafta görüldüğü gibi karşılaşmıştır. Hareketli engel robotun sol tarafında kalmıştır. Bu sebeple robot sağ tarafa doğru yönelmiştir. Ancak hareketli engel robotun üzerinde doğru hareket etmektedir. Sağ tarafa hareket eden robot ile hareketli engel çarpışmıştır. Çarpışma sonucu hareketli engel devrilmiştir. Robot hareketli engel bölgesini geçtikten sonra durağan engelden sakınarak parkuru tamamlamıştır. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin üçüncü tekrarı Şekil 7.28’de verilmektedir.

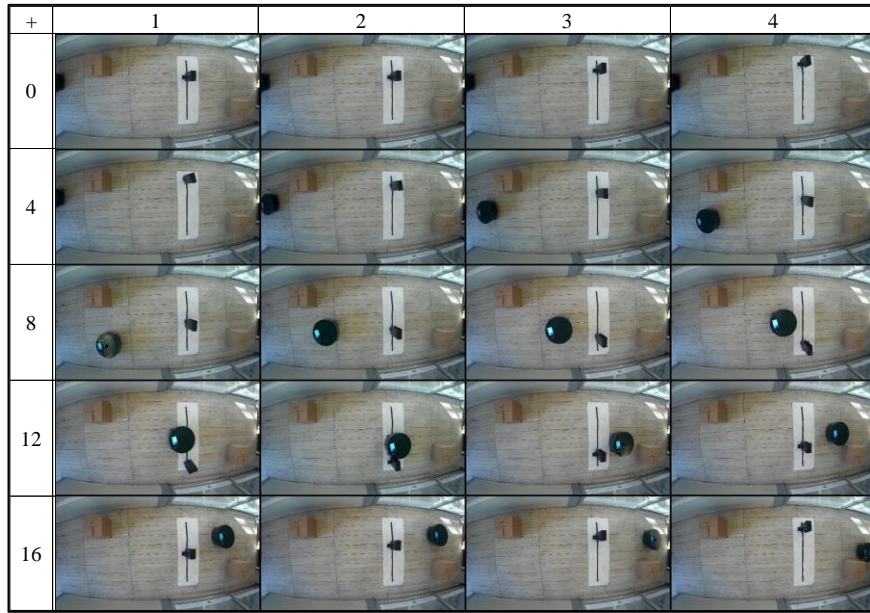
Şekil 7.28’de başarısız bir deney sonucu görülmektedir. Robot Şekil 7.28’de görülen 11. fotoğrafta görüldüğü gibi hareketli engel ile karşılaşmıştır. Hareketli engel robotun sağ tarafında bulunmaktadır. Robot bu durumda sol tarafa yönelmiştir. Ancak hareketli engel robota yetişerek robotun önüne gelmiştir. Robot hareketli engel ile çarpışmıştır. Hareketli engel devrilmiştir. Robot durağan engellere çarpmadan parkuru tamamlamıştır. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin dördüncü tekrarı Şekil 7.29’da verilmektedir.

Şekil 7.30’da başarılı bir deneysel sonuç görülmektedir. Hareketli engel durağan ve hareketli engelden sakınarak parkurun sonuna gelmiştir. Robot hareketli engel ile

karşılaştığında robotun sol tarafında bir boşluk algılamıştır (Şekil 7.30’da görülen 11. fotoğraf). Robot hareketli engelin sol tarafından geçerek parkuru çarpışma yaşamadan tamamlamıştır. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneylerinin süreleri ve çarpışma durumları Çizelge 7.3’de verilmektedir.

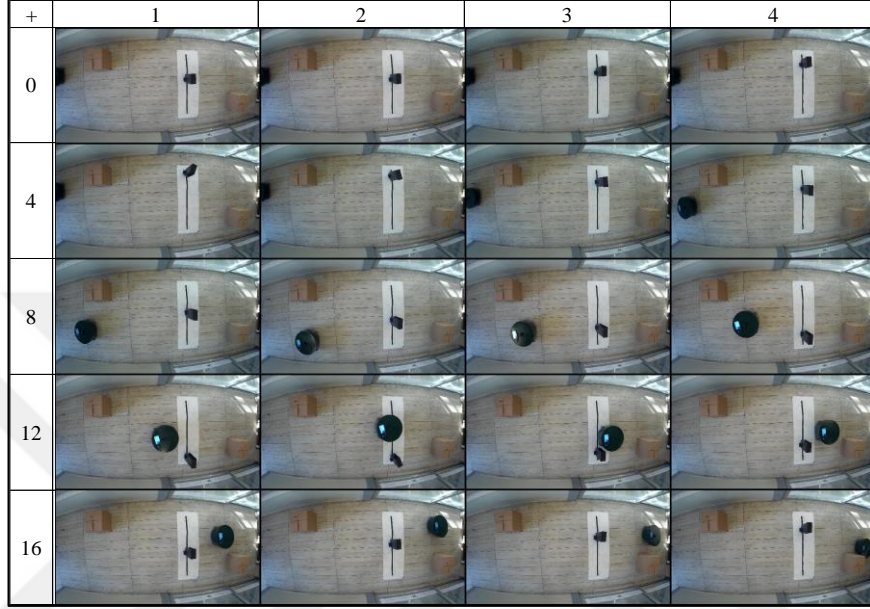


Şekil 7.28. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin üçüncü tekrarının görünümü.



Şekil 7.29. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin dördüncü tekrarının görünümü.

Şekil 7.29’da başarılı bir deney görüntüsü görülmektedir. Hareketli engel robotun sağ tarafında kaldığı bir durum görülmektedir (Şekil 7.29’da görülen 11. fotoğraf). Robot sol tarafa yönelmiştir. Hareketli engele çarpmadan parkuru tamamlamıştır. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin beşinci tekrarı Şekil 7.30’da verilmektedir.



Şekil 7.30. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin beşinci tekrarının görünümü.

Çizelge 7.3. Durağan ve hareketli engelden sakınma deneyinin çarpışma durumları ve deney süreleri.

Durağan ve Hareketli Engelden Sakınma Deneyi		
Deney Nu.	Deney Süresi	Çarpışma
1. Deney	00:00:38	Yok
2. Deney	00:00:43	Var
3. Deney	00:00:39	Var
4. Deney	00:00:37	Yok
5. Deney	00:00:34	Yok

Çizelge 7.3’de görüldüğü üzere beş deney birbirine yakın sürelerde deneyi bitirmiştir. Ortalama bitirme süresi 38 saniyedir. İkinci ve üçüncü deneylerin bitiş sürelerinin ortalamadan yukarıda olduğu görülmektedir. Bu durumun en önemli sebeplerinden bir tanesi çarpışmanın olmasıdır. İkinci deneyde robot hareketli engel ile çarpışmıştır. Çarpışmadan sakınmaya çalışırken hızı yavaşlamıştır. Çarpışma anında ise hareketli engelin hareket platformuna takılmış ve platformdan geçene kadar vakit

kaybetmiştir. Üçüncü deneyde de çarpışma olmuştur. Çarpışmadan kaçınmak için hareketli engel sol öteleme hareketi yapmıştır. Fakat hareketli engelde sola doğru hareket ettiği için bir süre sanki hareketli engeli robot takip ediyormuş gibi sol öteleme hareketine devam etmiştir. Sol boşluk artık robotun geçebileceği genişlikte olmadığı zaman robot sağa çapraz hareketi yapmıştır fakat bu esnada hareketli engele çarpmış ve yine hareketli engelin platformuna takılıp vakit kaybetmiştir.



## BÖLÜM 8

### SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında dört Mekanum tekerli mobil robot platformu tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Mekanum tekerli mobil robotların tasarımında kareselliğe dikkat edilmiştir. Mekanum tekerlerin robota çok yönlü hareket kabiliyeti sağlar. Bu hareket kabiliyeti robotun engelden sakınırken birden fazla hareket senaryosu kullanılabilir hale gelmektedir. Engellerin algılanmasında LIDAR teknolojisinin kolaylıkla başarıyla kullanılabilir. Mobil robotlar genelde haritayı ve harita içerisindeki konumunu bilmektedir. Yapılan çalışmada robot konumunu ve haritayı bilmemektedir. Bu sebeple bulunduğu ortamda serbest hareket ederken karşısına çıkacak olan statik ve dinamik engellerden sakınabilme kabiliyetine sahiptir. Üç farklı deney ile robot performansı test edilmiştir. Her deneyde beş tekrar yapılmıştır. Beş tekrar robot sürekli aynı konumdan başlatılarak yapılmıştır. Bu sayede doğruluk ölçülmeye çalışılmıştır. Birinci deneyde robotun güvenlik amaçlı laboratuvar ortamında alan taraması yapması test edilmiştir. Bu durum için robot sağ tarafındaki duvarı ile belirli bir mesafe de laboratuvar ortamını taramayı başarmıştır. Birinci deneyde %100 doğruluk oranı ile başarılı sonuç alınmıştır. Ortalama 4 dakika 45 saniyede alan taraması deneyini bitirmiştir. İkinci deneyde durağan engellerden oluşan bir parkur robot tarafından %100 doğruluk oranı ile tamamlanmıştır. Ortalama 38 saniyede deneyi bitirmiştir. Üçüncü deneyde hem durağan hemde hareketli engelin bulunduğu bir parkur robot tarafından tamamlanmıştır. Üçüncü deneyde %60 doğruluk oranı ile tamamlanmıştır. Ortalama 38 saniyede deneyi bitirmiştir. Algoritmada hareketli engelin bir sonraki pozisyon tahmini yapılmamaktadır. Eğer bu durum algoritmaya eklenmesi, hareketli engelden kaçma durumlarında robotun hızının artırılması ve hareketli engelin hızının düşürülmesi başarıyı artıracaktır.

Engellerden sakınması için hareketi esnasında engeller arasındaki boşluklar ölçülmekte ve ölçüm değerleri ile en yakın engelin mesafe ve açı değerleri bulanık

mantık sınıflandırıcısında değerlendirilmektedir. Çalışmada literatür de bulunan iki yöntem beraber kullanılmıştır. Boşluk takip yöntemi ve bulanık mantık sınıflandırıcısı birlikte kullanılabilmesi bu çalışmanın özgünlüğüdür. En geniş boşluğun genişlik değerinin robot genişliğinden büyük olması durumunda robotun boşluğa yönlendirilmesi gerekmektedir. Boşluk merkezine yönlendirilen robotun hareket esnasında engellerden de sakınması gerekmektedir. Harita ve konum bilgisinin bilinmemesi sebebi ile bulanık mantık sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Bulanık mantık sınıflandırıcısına boşluk açısı, en yakın engel mesafesi ve açısı giriş olarak verilmiş ve gerekli robot hareketleri için çıkış elde edilmiştir.

Mekanum tekerli mobil robotlarda hareket problemi çok fazla olmaktadır. Sadece motor kontrolü ile bu problem çözülememektedir. Çünkü Mekanum tekerlerde yapısı sebebi ile hareket esnasında kaymalar meydana gelmektedir. Bu durum robotun engelden sakınırken izlediği yolun doğrusallığını bozmaktadır. Bu sebeple Mekanum tekerli mobil robot çalışmalarında öncelikle robot pozisyon kontrolünün yapılması engelden sakınmayı daha verimli hale getirecektir. Mekanum tekerin yapısı gereği pürüzsüz zeminlerde fazla titreşim meydana gelmez iken pürüzlü zeminlerde çok fazla titreşim meydana gelmektedir. Titreşimden kaynaklı LIDAR verilerinde bozulmalar ve mekaniksel sistemde yıpranmalar oluşmaktadır. Mekanum tekerlerin bir süspansiyon sistemi ile kullanılması bu sorunu çözebilir.

LIDAR camı görmekte sorun yaşamaktadır. Camları LIDAR cam arasındaki açığa bağlı olarak bazen görebilirken bazende camın arkasındaki nesnelere görebilmektedir. Deneysel çalışmada laboratuvar ortamında camlı bölümler bulunması robotun hareketinde sapmalara neden olmuştur. Sapmaların engellenmesi amacı ile camlı bölgelerde LIDAR mesafesinde camlar kağıt ile kapatılmıştır. Bu durum robotdaki sapma problemini çözmüştür.

Mobil robotlarda batarya doluluk durumu çok önemlidir. Çünkü batarya yeterli gücü robota veremediği takdirde LIDAR dan okunan verilerde, robot hızında düşüş gibi problemler yaşanmaktadır. Bunun için batarya doluluk durumunun sürekli kontrol edilmesi gerekmektedir. Batarya doluluk durumunun belirli bir değerin altına düşmesi ile robot çalışmasını ve görev başarısını doğrudan etkilemektedir.

## KAYNAKLAR

1. Tzafestas, S. G., "Introduction to Mobile Robot Control", Elsevier, 1. Ed., *Elsevier*, Athens, Greece, 1 (2011).
2. Yan, Y. and Li, Y., "Mobile Robot Autonomous Path Planning Based on Fuzzy Logic and Filter Smoothing in Dynamic Environment", *12th World Congress On Intelligent Control And Automation (WCICA)*, 1479–1484 (2016).
3. Keek, J. S., Loh, S. L., and Chong, S. H., "Comprehensive Development and Control of a Path-Trackable Mecanum-Wheeled Robot", *IEEE Access*, 7: 18368–18381 (2019).
4. He, X., Wang, A., Ghamisi, P., Li, G., and Chen, Y., "LiDAR Data Classification Using Spatial Transformation and CNN", *IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters*, 16 (1): 125–129 (2019).
5. Dickerson, S. L., "CONTROL OF AN ONMI-DIRECTIONAL ROBOTIC VEHICLE WITH MECANUM WHEELS", *IEEE*, 323–328 (1991).
6. Nagatani, K., Tachibana, S., Sofue, M., and Tanaka, Y., "Improvement of odometry for omnidirectional vehicle using optical flow information", *IEEE International Conference On Intelligent Robots And Systems*, 1: 468–473 (2000).
7. Viboonthaicheep, P., Shimada, A., and Kosaka, Y., "Position Rectification Control for Mecanum Wheeled Omni-directional Vehicles", *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 1: 854–859 (2003).
8. Ko, N. Y., Simmons, R. G., and Kim, K. S., "A lane based obstacle avoidance method for mobile robot navigation", *KSME International Journal*, 17 (11): 1693–1703 (2003).
9. Cooney, J. A., Xu, W. L., and Bright, G., "Visual dead-reckoning for motion control of a Mecanum-wheeled mobile robot", *Mechatronics*, 14 (6): 623–637 (2004).
10. Zhuang, H. Z., Li, H., and Du, S. X., "Real-time path planning of mobile robots in dynamic uncertain environment", *Proceedings Of The World Congress On Intelligent Control And Automation (WCICA)*, 2 (4): 8886–8891 (2006).
11. Palancıoğlu, H. M. and Kurban, T., "VİDEO TABANLI ÖLÇME YÖNTEMİ VE GÖRSEL KONUM", *TMMOB Harita Ve Kadastro Mühendisleri Odası Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, (2007).



12. Parlaktuna, O., Yazıcı, A., and Özkan, M., "Mobile Robot Localization Using Laser Range Sensor", *In Proceedings Of The IEEE 13th Signal Processing And Communications Applications Conference, 2005.*, 436–439 (2005).
13. Parlaktuna, O. and Eroğlu, E., "Gezgin Robotlarda Ultrasonik Mesafe Algılayıcılarla Robot Davranışlarının Kontrolü ve Çevre Haritalama", *Eng&Arch.Fac. Eskişehir Osmangazi University*, XX (2): 84–106 (2007).
14. Alp, O., "Gezgin Robotlarda Eş Anlı Haritalama ve Konum Belirleme", *Başkent Üniversitesi*, .
15. Gferrer, A., "Geometry and kinematics of the Mecanum wheel", *Computer Aided Geometric Design*, 25 (9): 784–791 (2008).
16. Tlale, N. and Villiers, M. De, "Kinematics and dynamics modelling of a mecanum wheeled mobile platform", *15th International Conference On Mechatronics And Machine Vision In Practice, M2VIP'08*, (3): 657–662 (2008).
17. Shimada, A., Kiddee, P., and Nishi, Y., "Obstacle avoidance control on omnidirectional vehicle robots using range sensor", *Electrical Engineering In Japan (English Translation Of Denki Gakkai Ronbunshi)*, 172 (1): 58–68 (2010).
18. Röhrig, C., Heß, D., Kirsch, C., and Künemund, F., "Localization of an omnidirectional transport robot using IEEE 802.15.4a ranging and laser range finder", *IEEE/RSJ 2010 International Conference On Intelligent Robots And Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, 3798–3803 (2010).
19. Ataş, Y., "Gezgin Robot Sistemlerinde Konumlandırma ve Haritalama", *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi*, (2010).
20. Tovey, C. and Koenig, S., "Localization: Approximation and performance bounds to minimize travel distance", *IEEE Transactions On Robotics*, 26 (2): 320–330 (2010).
21. Kim, J., Woo, S., Kim, J., Do, J., Kim, S., and Bae, S., "Inertial navigation system for an automatic guided vehicle with Mecanum wheels", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 13 (3): 379–386 (2012).
22. Habibov, A., "Gezgin Robotlarla Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama", *Yıldız Teknik Üniversitesi*, (2011).
23. Velázquez, R. and Lay-Ekuakille, A., "A review of models and structures for wheeled mobile robots: Four case studies", *IEEE 15th International Conference On Advanced Robotics: New Boundaries For Robotics, ICAR 2011*, 1: 524–529 (2011).
24. Karaoğuz, H., Erkent, Ö., Bayram, H., and Bozma, H. I., "Tek Robottan Çoklu Robotlara Ortam Haritalama", *EMO Bilimsel Dergi*, (2012).

25. Gracia, L. and Tornero, J., "Kinematic modeling of wheeled mobile robots with slip", *Advanced Robotics*, 21 (11): 1253–1279 (2007).
26. Wu, Z. and Feng, L., "Obstacle Prediction-based Dynamic Path Planning for a Mobile Robot", *International Journal Of Advancements In Computing Technology*, 4 (3): 118–124 (2012).
27. Zohaib, M., Pasha, M., Riaz, R. A., Javaid, N., Ilahi, M., and Khan, R. D., "Control Strategies for Mobile Robot With Obstacle Avoidance", *ArXiv Preprint ArXiv:1306.1144.*, (2013).
28. Yalçın, Ö., "İnsansız Kara Araçlarında 2D LİDAR Kullanarak Yol Sınırları Tespiti", *Kocaeli Üniversitesi*, (2014).
29. Yavşan, E., "Kinect Algılayıcı Kullanarak İnsan Davranışlarının İnsansı Robotlara Öğretilmesi", *Fırat Üniversitesi*, (2014).
30. Özeren, A., "Doğal Yer İmi Kullanarak Gezgin Robot Konum Kontrolünün Otonom Olarak Gerçekleştirilmesi", *Karabük Üniversitesi*, (2014).
31. Buniyamin, N., Wan Ngah, W. A. J., and Mohamad, Z., "PointsBug versus TangentBug algorithm, a performance comparison in unknown static environment", *2014 IEEE Sensors Applications Symposium, SAS 2014 - Proceedings*, 278–282 (2014).
32. Zohaib, M., Pasha, S. M., Javaid, N., Iqbal, J., and Salaam, A., "An improved algorithm for collision avoidance in environments having U and H shaped obstacles", *Studies In Informatics And Control*, 23 (1): 97–106 (2014).
33. Xie, L., Scheifele, C., Xu, W., and Stol, K. A., "Heavy-duty omni-directional Mecanum-wheeled robot for autonomous navigation: System development and simulation realization", *Proceedings - 2015 IEEE International Conference On Mechatronics, ICM 2015*, 256–261 (2015).
34. Soyaslan, M., Nart, E., and Çetin, Ö., "Stereo kamera sisteminde aykırılık haritaları yardımıyla nesne uzaklıklarının tespit edilmesi", *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (2): 111 (2015).
35. Kutlu, H., Avcı, E., and Çelik, A. İ., "OpenCV ve Kinect ile Stereo Görüntüden Derinlik Algılama", *3rd International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science ISSN: 2148-7464*, 689–694 (2015).
36. Özbay, E. and Çınar, A., "Gerçek Nesnelerin RGB Görüntüleri Üzerine Kinect - Nokta Bulutlarının Uyarlanması", *Fırat Univ. Journal Of Engineering*, 27 (1): 9–14 (2015).
37. Katı, C. S., "Yürüyen Robotlar İçin Bir Çift Kamera ile Elde Edilen Görüntülerden Cisimlerin Konum Bilgilerinin Elde Edilmesi", *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2015).

38. Topuz, R. and YILDIRIM, M., "Sonar Algılayıcılar ve Sezgisel Yöntemler ile Otonom Robotlarda Engelden Sakınım ve Yol Bulma", *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 2016 (2): 363–371 (2015).
39. Güney, C. and Sayın, S. B., "Jeodezik Ölçme Ve Mekansal Karar Destek İçin Robotik Bir Yaklaşım", *XVIII. Akademik Bilişim Konferansı-AB2016*, (2016).
40. Alakshendra, V. and Chiddarwar, S. S., "Adaptive robust control of Mecanum-wheeled mobile robot with uncertainties", *Nonlinear Dynamics*, 87 (4): 2147–2169 (2017).
41. Vlantis, P., Bechlioulis, C. P., Karras, G., Furlas, G., and Kyriakopoulos, K. J., "Fault tolerant control for omni-directional mobile platforms with 4 mecanum wheels", *Proceedings - IEEE International Conference On Robotics And Automation*, 2016-June: 2395–2400 (2016).
42. ADAR, N. G., "Mobil İnsansı Robot Tasarımı İmalatı ve Kontrolü", *Sakarya Üniversitesi*, (2016).
43. Lafcı, M., "Dinamik Engellerin Bulunduğu Ortamda Gezgin Robot İçin Hareket Planlama", *Karabük Üniversitesi*, (2016).
44. Sidharthan, R. K., Kannan, R., Srinivasan, S., and Balas, M. M., "A novel keep zero as zero polar correlation technique for mobile robot localization using LIDAR", *Advances In Electrical And Computer Engineering*, 16 (4): 15–22 (2016).
45. Qian, J., Zi, B., Wang, D., Ma, Y., and Zhang, D., "The design and development of an Omni-Directional mobile robot oriented to an intelligent manufacturing system", *Sensors (Switzerland)*, 17 (9): (2017).
46. Aytaylan, H., "Hiperspektral Görüntü ile LİDAR Verisinin Koşullu Rastgele Alanlar Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Sınıflandırılması", *Hacettepe Üniversitesi*, (2017).
47. Kamil, F., Hong, T. S., Khaksar, W., Moghrabiah, M. Y., Zulkifli, N., and Ahmad, S. A., "New robot navigation algorithm for arbitrary unknown dynamic environments based on future prediction and priority behavior", *Expert Systems With Applications*, 86: 274–291 (2017).
48. Phan, D., Yang, J., Grosu, R., Smolka, S. A., and Stoller, S. D., "Collision avoidance for mobile robots with limited sensing and limited information about moving obstacles", *Formal Methods In System Design*, 51 (1): 62–86 (2017).
49. Karakaya, S., Kucukyildiz, G., and Ocak, H., "A New Mobile Robot Toolbox for Matlab", *Journal Of Intelligent And Robotic Systems: Theory And Applications*, 87 (1): 125–140 (2017).
50. Sadeghian, R., Azizinezhad, P., Sedigh, P., Shahin, S., and Masouleh, M. T.,

- "Control of a Four-Mecanum wheeled Robot With a Soft-robotic Glove", *4th International Conference On Knowledge-Based Engineering And Innovation*, 310–314 (2017).
51. Wang, C., Liu, X., Yang, X., Hu, F., Jiang, A., and Yang, C., "Trajectory tracking of an omni-directional wheeled mobile robot using a model predictive control strategy", *Applied Sciences (Switzerland)*, 8 (2): (2018).
  52. Tsai, C. C., Tai, F. C., and Feng, K. H., "Fuzzy sliding-mode consensus formation control of networked heterogeneous mecanum-wheeled multi-robots with dynamic effects", *IEEE International Conference On Fuzzy Systems*, 2018-July: 1–7 (2018).
  53. Zhang, L. and Li, D., "Research on mobile robot target recognition and obstacle avoidance based on vision", *Journal Of Internet Technology*, 19: 1879–1892 (2018).
  54. Lu, X., Zhang, X., Zhang, G., Fan, J., and Jia, S., "Neural network adaptive sliding mode control for omnidirectional vehicle with uncertainties", *ISA Transactions*, 86: 201–214 (2018).
  55. Nasrinahar, A. and Chuah, J. H., "Intelligent motion planning of a mobile robot with dynamic obstacle avoidance", *Journal On Vehicle Routing Algorithms*, 1 (2–4): 89–104 (2018).
  56. Sharma, N., Thukral, S., Aine, S., and Sujit, P. B., "A virtual bug planning technique for 2D robot path planning", *Proceedings Of The American Control Conference*, 2018-June (i): 5062–5069 (2018).
  57. Dobhada, A., Bhala, S., Shah, P., and Kamble, M., "Collision detection and avoidance using extrapolation", *RTEICT 2017 - 2nd IEEE International Conference On Recent Trends In Electronics, Information And Communication Technology, Proceedings*, 2018-Janua: 1694–1698 (2018).
  58. Khan, F., Alakberi, A., Almaamari, S., and Beig, A. R., "Navigation algorithm for autonomous mobile robots in indoor environments", *2018 Advances In Science And Engineering Technology International Conferences, ASET 2018*, 1–6 (2018).
  59. Zijie, N., Qiang, L., Yonjie, C., and Zhijun, S., "Fuzzy Control Strategy for Course Correction of Omnidirectional Mobile Robot", *International Journal Of Control, Automation And Systems*, 17 (9): 2354–2364 (2019).
  60. Internet: Xiao, J. J., "Mobot: Mobile Robot", <https://www.slideshare.net/adorepump/introduction-to-robotics-presentation> (2019).
  61. Internet: Robotics, C. L. B., "Introduction to Basic Robotics Parts/Systems", <https://slideplayer.com/slide/10256583/> (2019).

62. Tzafestas, S. G., "Mobile Robot Control and Navigation : A Global Overview", *Journal Of Intelligent And Robotic Systems*, (February): (2018).
63. Li, G., Tamura, Y., Yamashita, A., and Asama, H., "Effective improved artificial potential field-based regression search method for autonomous mobile robot path planning", *International Journal Of Mechatronics And Automation*, 3 (3): 141 (2013).
64. Borestein, J. and Koren, Y., "The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots", *IEEE Transactions On Robotics And Automation*, 7 (3): 278–288 (1991).
65. J. Oroko, a. and N. Nyakoe, G., "Obstacle Avoidance and Path Planning Schemes for Autonomous Navigation of a Mobile Robot: A Review", *Proceedings Of The 2012 Mechanical Engineering Conference On Sustainable Research And Innovation*, 4 (May): 314–318 (2012).
66. Ng, J. and Bräunl, T., "Performance comparison of Bug navigation algorithms", *Journal Of Intelligent And Robotic Systems: Theory And Applications*, 50 (1): 73–84 (2007).
67. Yufka, A. and Parlaktuna, O., "Performance Comparison of the BUG's Algorithms for Mobile Robots", *International Symposium On INnovations In Intelligent SysTems And Applications*, (January 2009): 416–420 (2009).
68. Noborio, H., "Several Path-Planning Algorithms of a Mobile Robot for an Uncertain Workspace and their Evaluation", *Proceedings Of The IEEE International Workshop On Intelligent Motion Control*, 289–294 (1990).
69. Sankaranarayanan, A. and Vidyasagar, M., "Path Planning For Moving A Point Object Amidst Unknown Obstacles In A Plane: A New Algorithm And A General Theory For Algorithm Development", *29th IEEE Conference On Decision And Control*, (December): 1111–1119 (1990).
70. Sankaranarayanan, A. and Vidyasagar, M., "A New Path Planning Algorithm For Moving A Poaint Object Amidst Unknown Obstacles In A Plane", *IEEE International Conference On Robotics And Automation*, 1930–1936 (1990).
71. Sezer, V. and Gokasan, M., "A novel obstacle avoidance algorithm: "Follow the gap method""", *Robotics And Autonomous Systems*, 60 (9): 1123–1134 (2012).
72. Janglová, D., "Neural networks in mobile robot motion", *International Journal Of Advanced Robotic Systems*, 1 (1): 15–22 (2004).
73. Lin, L.-C. and Shih, H.-Y., "Modeling and Adaptive Control of an Omni-Mecanum-Wheeled Robot", *Intelligent Control And Automation*, 04 (02): 166–179 (2013).
74. Mahmut Çimen, "Çok Yönlü Tekerleklere Sahip Bir Çatallı Yükleyicinin

- Tasarımı ve Kontrolü", *Selçuk Üniversitesi*, (2018).
75. Intel, "Intel ® NUC Board NUC5i7RYB and Intel ® NUC Board NUC5i7RYBR Technical Product Specification", (2017).
  76. Internet: Pololu, "RoboClaw 2x15A Motor Controller (V5E)", <https://www.pololu.com/product/3285/resources> (2019).
  77. Internet: Elektronik, K., "Linux 24V 95W 7A 220r/Min Kapı Motoru", <http://keskinlerelektronik.com.tr/-U-RDc - 63ZYM24.Aspx> (2019).
  78. Internet: LinuxMotor, "PMDC Motor (Door Brushless Motor)", <http://www.linuxmotor.com/2-Brushless-Motor.html> (2019).
  79. Internet: SlamTech, "RPLIDAR A2", <https://www.slamtec.com/en/Lidar/A2> (2019).
  80. Internet: Office, R.-, "Driving Mecanum Wheels Omnidirectional Robots", <https://www.robotiq.com/index.php/applications/applications-blog/entry/driving-mecanum-wheels-omnidirectional-robots> (2019).
  81. Internet: Robot, N., "203MM STAINLESS STEEL MECANUM WHEEL LEFT WITH RUBBER ROLLERS 14151L", <https://www.nexusrobot.com/product/203mm-stainless-steel-mecanum-wheel-left-with-rubber-rollers-14151l.html> (2019).
  82. Internet: Robotistan, "203 Mm Çelik Mecanum Tekerlek Seti - Lastik Rulo, 14151", <https://www.robotistan.com/203mm-metal-mecanum-tekerlek-seti-rulmanli-rulo-20510> (2019).
  83. Turğut, M., "Elektrikli Araçlar İçin Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Geliştirilmesi", *Karabük Üniversitesi*, (2018).
  84. Internet: Scikit, "Scikit Fuzzy Library for Python", <https://pypi.org/project/scikit-fuzzy/> (2019).
  85. Sallam, H. and West, M., "Fuzzy Logic: Theory and Healthcare Application", *American Journal Of Management*, 19 (3): 122–131 (2019).
  86. Vicente, M., Batista, F., and Carvalho, J. P., "Twitter gender classification using user unstructured information", *IEEE International Conference On Fuzzy Systems*, 2015-November: 1–7 (2015).
  87. El-Manzalawy, Y., Buxton, O., and Honavar, V., "Sleep/wake state prediction and sleep parameter estimation using unsupervised classification via clustering", *Proceedings - 2017 IEEE International Conference On Bioinformatics And Biomedicine, BIBM 2017*, 2017-January: 718–723 (2017).
  88. Team, T. scikit-image, "The scikit-fuzzy Documentation", (2016).

## ÖZGEÇMİŞ

Musa MATLI 1994 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. İSOV Dinçök A.T.L. Endüstriyel Otomasyon Bölümü Mekatronik Dalından bölüm birincisi okul ikincisi olarak mezun oldu. Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliğinden bölüm ikincisi fakülte üçüncüsü olarak mezun oldu. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği A.B.D. da yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Eğitim hayatı boyunca çeşitli projelere ve yarışmalara katılmıştır.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

Tel : -

E-posta : matlimusa@gmail.com