



**T.C.**  
**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TARIMSAL MOBİL ROBOT TASARIMI VE  
GÖRSEL ODOMETRE UYGULAMASI**

**Caner BELDEK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**10-2022**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

**Caner BELDEK**  
Tarih: 27.10.2022

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### TARIMSAL MOBİL ROBOT TASARIMI VE GÖRSEL ODOMETRE UYGULAMASI

Caner BELDEK

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Okan UYAR

2022, 85 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Okan UYAR

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DOĞAN

Dr. Öğr. Üyesi Mücahid BARSTUĞAN

Bu çalışmada mobil bir tarım robotunun tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Üretilen tarım robotunun tekerlek odometresi ve görsel odometre yöntemleri ile tarımsal ve tarımsal olmayan arazilerde lokalizasyon performansı ölçülmüştür. Mobil robotun zor arazi şartları ve değişken sensör gürültüsü altında yanıl kayma ve patınaj problemlerine sıklıkla maruz kalması doğru konum verisinin elde edilmesi zorlaştırır. Farklı mesafe ve açı değerleri ile yapılan sürüşlerde tekerlek odometresi ve görsel odometre yöntemleri karşılaştırılmıştır. Kısa mesafelerde iki yöntem arasında anlamlı bir fark bulunamazken görece daha uzun mesafeden yapılan sürüşlerde görsel odometre tarafından üretilen veriler ile daha doğru konumlandırma yapıldığı sonucu elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Görsel Odometre, Lokalizasyon, Mobil Tarım Robotu, Tarım, Tekerlek Odometresi

**ABSTRACT**

**MS THESIS**

**DESIGN OF AGRICULTURAL MOBILE ROBOT AND VISUAL ODOMETRY  
APPLICATION**

**Caner BELDEK**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
SELÇUK UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY  
IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Asst. Prof. Okan UYAR**

**2022, 85 Pages**

**Jury**

**Asst. Prof. Okan UYAR**

**Asst. Prof. Hüseyin DOĞAN**

**Asst. Prof. Mücahid BARSTUĞAN**

In this study, a mobile agricultural robot was designed and produced. The localization performance of the produced agricultural robot was measured in agricultural and non-agricultural lands with the wheel odometer and visual odometer methods. The frequent exposure of the mobile robot to lateral slip and skid problems under difficult terrain conditions and variable sensor noise makes it difficult to obtain accurate position data. Wheel odometer and visual odome methods were compared in driving with different distance and angle values. While no significant difference could be found between the two methods at short distances, it was concluded that more accurate positioning was achieved with the data produced by the visual odometer in driving from relatively longer distances.

**Keywords:** Agriculture, Localization, Mobile Agricultural Robot, Visual Odometry, Wheel Odometer

## TEŞEKKÜRLER

Tez çalışmasının ilk gününden son gününe kadar bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, heyecanımı, üzüntümü ve mutlğumu paylaşan, yol göstericim ve rol modelim, değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Okan Uyar'a

Tez projeme maddi ve manevi katkılarını esirgemeyen, destekleyen ve tecrübelerini paylaşmaktan imtina etmeyen kıymetli hocalarım Dr. Öğr. Gör. Nevzat Örnek ve Araş. Gör. Salih Bilal Çetinkal'a

Projeme süresince yardımına koşmaktan çekinmeyen sevgili arkadaşlarım A. Furkan Büyükkelek, M. Mirza Türkyılmaz ve Hasan Selim Sındır'a

Bu süreçte her zaman yanımda olan ve manevi desteklerini göstermekten imtina etmeyen değerli dostlarım Beyda Şerbetçi ve Hüseyin Küçüktoka'ya

Her şeyden önemlisi ilk gözümü açtığım andan itibaren hayatımın her anında beni ölçsüz bir büyüklükte destekleyip motive eden kıymetli ailem Eyyüp Beldek, Emine Beldek ve T. Tamer Beldek'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Caner BELDEK  
KONYA-2022

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGELER LİSTESİ .....</b>	<b>xi</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Konusu ve Amacı .....	2
1.2 Tezin Organizasyonu .....	2
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>4</b>
2.1. Sabit Tarım Robotları ile İlgili Çalışmalar .....	4
2.2. Mobil Tarım Robotları ile İlgili Çalışmalar.....	6
2.2.1 Mobil saha keşif robotları ile ilgili çalışmalar.....	8
2.2.2 Mobil tarım robotlarında tekerlek kayması problemi ile ilgili çalışmalar .....	12
2.3. Görsel Odometre ile İlgili Çalışmalar.....	14
2.4. İşbirlikçi Robotlar ile İlgili Çalışmalar .....	16
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>19</b>
3.1. Mobil Tarım Robotunun Tasarımı .....	19
3.1.1. Göreve ve çevreye dayalı fiziksel kısıtlar.....	19
3.2. Mobil Tarım Robotunun Mekanik Tasarımı.....	20
3.2.1. Araba benzeri mobil robot modeli .....	23
3.3. Mobil Tarım Robotunun Elektronik Tasarımı .....	24
3.3.1. Elektronik Ekipmanlar .....	25
3.4. Görsel Odometre.....	29
3.4.1. Etiket tasarımı .....	29
3.4.2. Karekodun okunması ve ölçüm kalibrasyonu.....	30
3.5. Hareket Algoritmaları .....	33
3.5.1 Tarımsal arazide lokalizasyon deneyi algoritması.....	34
3.6. Yörünge Doğruluk Analizi .....	39
3.6.1. HSV uzayı ve renk filtresi .....	40
3.6.2. Gauss bulanıklığı .....	41
3.6.3. Medyan bulanıklığı .....	41
3.6.3. Piksel dönüşümleri.....	42
3.7. Deney .....	44

3.7.1 Deney alanının hazırlanması.....	44
3.7.2 Deneyleerde kullanılan ekipmanlar .....	48
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>49</b>
4.1. Tarımsal Arazide Konumlandırma Deneyi Sonuçları .....	49
4.2. Tarımsal Olmayan Kapalı Arazide Konumlandırma Deneyi Sonuçları .....	52
4.2.1. Tekerlek odometreli konumlandırma sonuçları .....	52
4.2.2. Görsel odometreli konumlandırma sonuçları .....	57
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>63</b>
5.1 Sonuçlar .....	63
5.2 Öneriler .....	63
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>65</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>69</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>73</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Sigma profil kesiti .....	21
Şekil 3.2 Köşe bağlantı elemanı .....	21
Şekil 3.3 Direksiyon mekanizması .....	21
Şekil 3.4 Mekanik tasarım perspektif görünüş .....	22
Şekil 3.5 Mekanik tasarım yan görünüş.....	22
Şekil 3.6 Araba benzeri robot modeli .....	23
Şekil 3.7 Mobil robotun elektronik tasarımı .....	24
Şekil 3.8 Raspberry pi 3b + .....	26
Şekil 3.9 BTS7960 43 A DC Motor sürücüsü .....	27
Şekil 3.10 KORMAS DC 24 V Redüktörlü motor .....	27
Şekil 3.11 (a) 100 pulse manyetik enkoder.....	27
Şekil 3.11 (b) 5V-3.3V TTL Logic seviye dönüştürücü.....	27
Şekil 3.11 (c) 1k ohm dirençler .....	27
Şekil 3.12 TB6600 4A Step motor sürücü.....	28
Şekil 3.13 Leadshine 57HS22-A NEMA 23.....	28
Şekil 3.14 Logitech C-170 webcam.....	28
Şekil 3.15 KINGDATA K-999 webcam.....	28
Şekil 3.16 Ttec marka 12 V 7A akü.....	29
Şekil 3.17 12 V soğutucu fan.....	29
Şekil 3.18 Üretilen QR kod.....	30
Şekil 3.19 Convex hull algoritması gösterimi .....	31
Şekil 3.20 QR koddan mesafe değişkeninin elde edilmesi .....	33
Şekil 3.21 Tarımsal arazide lokalizasyon deneyi hareket senaryoları .....	34
Şekil 3.22 (a) RGB renk uzayı (b) HSV renk uzayı .....	40
Şekil 3.23 (a) 2 boyutlu gauss çanı (b) 3 boyutlu gauss uzayı.....	41
Şekil 3.24 Medyan bulanıklığı.....	42
Şekil 3.25 (a) Filtrelenmiş ve merkezi bulunmuş kırmızı objeler .....	43
Şekil 3.25 (b) Tasarlanan maske altında kırmızı objeler .....	43
Şekil 3.25 (c) Filtrelenmiş ve merkezi bulunmuş referans şeridi .....	43
Şekil 3.25 (d) Tasarlanan maske altında referans şeridi .....	43
Şekil 3.26 Tarımsal arazide lokalizasyon deneyi alanı.....	45

Şekil 3.27 Tarımsal arazi de mobil tarım robotu .....	46
Şekil 3.28 Tarımsal olmayan arazideki deneyde mobil tarım robotu .....	47
Şekil 3.29 Tarımsal olmayan kapalı alan konumlandırma deneyi .....	47
Şekil 3.30 Deneyde kullanılan ekipmanlar (a) Modem .....	48
Şekil 3.30 Deneyde kullanılan ekipmanlar (b) Demir çubuk ve streç film .....	48
Şekil 3.30 Deneyde kullanılan ekipmanlar (c) VNC Viewer yazılımı .....	48
Şekil 4.1 TO'lu tarımsal arazide lokalizasyon deneyi 1. Hareket senaryosu sonuçları .....	49
Şekil 4.2 TO'lu tarımsal arazide lokalizasyon deneyi 2. Hareket senaryosu sonuçları .....	49
Şekil 4.3 TO'lu tarımsal arazide lokalizasyon deneyi 3. Hareket senaryosu sonuçları .....	50
Şekil 4.4 TO'lu tarımsal olmayan arazide kısa mesafe lokalizasyon deneyi;	
(a) 45 derece dönüş .....	53
(b) 60 derece dönüş .....	53
(c) 90 derece dönüş .....	53
Şekil 4.5 TO'lu tarımsal olmayan arazide orta mesafe lokalizasyon deneyi;	
(a) 45 derece dönüş .....	54
(b) 60 derece dönüş .....	54
(c) 90 derece dönüş .....	54
Şekil 4.6 TO'lu tarımsal olmayan arazide uzun mesafe lokalizasyon deneyi;	
(a) 45 derece dönüş .....	56
(b) 60 derece dönüş .....	56
(c) 90 derece dönüş .....	56
Şekil 4.7 GO'lu tarımsal olmayan arazide kısa mesafe lokalizasyon deneyi;	
(a) 45 derece dönüş .....	57
(b) 60 derece dönüş .....	57
(c) 90 derece dönüş .....	57
Şekil 4.8 GO'lu tarımsal olmayan arazide orta mesafe lokalizasyon deneyi;	
(a) 45 derece dönüş .....	59
(b) 60 derece dönüş .....	59
(c) 90 derece dönüş .....	59
Şekil 4.9 GO'lu tarımsal olmayan arazide uzun mesafe lokalizasyon deneyi;	
(a) 45 derece dönüş .....	60
(b) 60 derece dönüş .....	60
(c) 90 derece dönüş .....	60

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1 Göreve ve çevreye dayalı fiziksel kısıtlar.....	20
Çizelge 3.1 Mekanik bileşenler .....	22
Çizelge 3.3 Elektronik ekipmanlar .....	25
Çizelge 4.1 Tarımsal arazide konumlandırma deneyi sonuçları.....	51
Çizelge 4.2 TO 3 metre 45 derece dönüş deneyi sonuçları .....	53
Çizelge 4.3 TO 3 metre 60 derece dönüş deneyi sonuçları .....	53
Çizelge 4.4 TO 3 metre 90 derece dönüş deneyi sonuçları .....	54
Çizelge 4.5 TO 4 metre 45 derece dönüş deneyi sonuçları .....	55
Çizelge 4.6 TO 4 metre 60 derece dönüş deneyi sonuçları .....	55
Çizelge 4.7 TO 4 metre 90 derece dönüş deneyi sonuçları .....	55
Çizelge 4.8 TO 5 metre 45 derece dönüş deneyi sonuçları .....	56
Çizelge 4.9 TO 5 metre 60 derece dönüş deneyi sonuçları .....	56
Çizelge 4.10 TO 5 metre 90 derece dönüş deneyi sonuçları .....	57
Çizelge 4.11 GO 3 metre 45 derece dönüş deneyi sonuçları .....	58
Çizelge 4.12 TO 3 metre 60 derece dönüş deneyi sonuçları .....	58
Çizelge 4.13 TO 3 metre 90 derece dönüş deneyi sonuçları .....	58
Çizelge 4.14 TO 4 metre 45 derece dönüş deneyi sonuçları .....	59
Çizelge 4.15 TO 4 metre 60 derece dönüş deneyi sonuçları .....	59
Çizelge 4.16 TO 4 metre 90 derece dönüş deneyi sonuçları .....	60
Çizelge 4.17 TO 5 metre 45 derece dönüş deneyi sonuçları .....	61
Çizelge 4.18 TO 5 metre 60 derece dönüş deneyi sonuçları .....	61
Çizelge 4.19 TO 5 metre 90 derece dönüş deneyi sonuçları .....	61
Çizelge 4.20 Karşılaştırma deneyi sonuçları .....	62

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\psi$	: Mobil Robotun Yönelim Açısı
$\delta$	: Mobil Robotun Direksiyon Açısı
$\pi$	: Radyan
$\Omega$	: Ohm
$a$	: Mobil Robotun İvmesi
$l$	: Mobil Robotun Ön ve Arka Aksları Arası Mesafe
N	: Newton
P	: Piksel dönüştürme sabiti
V	: Volt
$v$	: Mobil Robotun hızı
$x$	: Mobil Robotun Arka aksının yanal konumu
$y$	: Mobil Robotun Arka aksının boylamsal konumu

### Kısaltmalar

A	: Amper
ABS	: Kilitlenme Karşıtı Frenleme Sistemi
AGRIBOT	: Portakal Hasat Robotu
Canny-VO	: Canny köşe dedektörlü görsel odometre algoritması
cm	: Santimetre
CPU	: Merkezi İşlem Birimi
D3VO	: Derinlik, poz ve belirsizlik tahminli görsel odometre algoritması
DC	: Doğru Akım
DOF	: Serbestlik Derecesi
EKF	: Genişletilmiş Kalman Filtresi
Gb	: Gigabit
GHz	: Gigahertz
GO	: Görsel Odometre
GPIO	: Genel Amaçlı Giriş-Çıkış Pini
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi
HSV	: Renk-Doygunluk-Değer Uzayı
ICP	: Tekrarlamalı En Yakın Nokta Yöntemi
IMU	: Ataletsel Ölçüm Birimi
IoT	: Nesnelerin İnterneti
Kg	: Kilogram
LIDAR	: Işık Tespiti ve uzaklık tayini
LO	: Luenberger Gözlemcisi
m	: metre
microUSB	: Mikro Soketli Evrensel veri yolu
MHz	: Megahertz
mm	: Milimetre
mp	: Megapiksel
ms	: Milisaniye

nm	: nanometre
Pc	: Kişisel bilgisayar
PWM	: Sinyal Genişlik Modülasyonu
QR CODE	: Hızlı Yanıt Kodu
RAM	: Rasgele Erişimli Hafıza Birimi
RANSAC	: Rasgele Örnek Mutabakatı Algoritması
RGB	: Kırmızı Yeşil Mavi Renk Uzayı
RGB-D	: Derinlikli RGB odometre sistemi
RPM	: Birim Dakikadaki Devir
s	: Saniye
SLAM	: Eşzamanlı Konumlandırma ve Haritalama Problemi
SVO	: Yarı-doğrudan Görsel Odometre Algoritması
STORK	: Kavun Hasat Robotu
TO	: Tekerlek Odometresi
TSP	: Gezgin Satıcı Problemi
TV	: Televizyon
TTL	: Transistör – Transistör Mantığı Devresi
USB	: Evrensel veri yolu

## 1. GİRİŞ

Türk Dil Kurumu tarafından “Belirli bir işi yerine getirmek için manyetizma ile kendisine çeşitli işler yaptırılabilen otomatik araç” olarak tanımlanan robot kelimesi ilk olarak Prag Devlet Tiyatrosunda 1920 yılında oynanan R.U.R. - Rossum’s Universal Robots - isimli tiyatro oyununda konu olmuştur. Karel Capek tarafından ilk kez kullanılmıştır. “Robota” kelimesi Çek dilinde hizmet eden ya da hizmetçi anlamına gelirken Almanca Arbeit ("Çalışmak") olarak tercüme edilmektedir.

Günümüzde pek çok farklı tipte robot tasarlanıp üretilmektedir. Sağlık, uzay, otomotiv, tarım ve gündelik hayatta pek çok alanda kullanılmaktadır. Günümüzde robotik sistemlerden ayrı bir otomotiv endüstrisi ve seri üretim yapan fabrika düşünülemez. Özellikle son yıllarda insanların robotik alanına olan ilgisinin ve merakının artmasıyla ticari robotların üretimi ve satışı artmıştır. Böylelikle ev içi kullanım için üretilmiş olan temizlik robotlarının kullanımı artmıştır. Bu durumda özellikle gelişen teknolojiyle beraber robotlar, insanlara uzak, uç noktalarda kullanılan ve sadece yoğun çaba gerektiren işler için tercih edilen maliyetli bir teknoloji olmaktan çıkarak gündelik bir fenomen haline gelmiştir.

Tarımsal araziler için son yıllarda geliştirilen çeşitli dikim ve hasat araçları endüstriyel amaçla yapılan tarıma büyük katkı vermiştir. Özellikle sürdürülebilir tarım anlayışı için tasarlanan çeşitli elektro-mekanik ekipmanlarla tarımsal verimlilik artırılmıştır. Büyük ölçekli tarım yapan çiftliklerde otonom tarım araçlarının kullanıma ağırlık verilmiştir. Otonom ve yarı otonom tarım robotları, hem mahsul kalitesini artırmak için optimuma en yakın çözümü su narken hem de doğal kaynakların kullanımı konusunda daha verimli davranarak sürdürülebilir tarım anlayışına katkı verir.

Tarımsal arazilerde ekim ve hasat işleminin çoğunlukla zor bir süreç olması çiftçileri yeni mekanik çözümler bulmak konusunda teşvik etmiştir. Ancak son zamanlarda tarımsal üretimi iyileştirmek adına toprak, hava koşulları, gübre miktarı ya da sulama gibi temel parametreleri kontrol etmek için robotik teknolojileri kullanmak popülerlik kazanmıştır. Bu amaçla robotlara entegre bulut bilişim, IoT ve sensör teknolojileri kullanımıyla beraber ortaya çıkan sürdürülebilirlik felsefesini benimsemiş verimli tarım anlayışına dijital tarım denir. Bu tanım özelinde tarım robotları dijital tarım dönüşümünde öncü bir rol üstlenmektedir.

## 1.1 Tezin Konusu ve Amacı

Bu çalışmada tarım arazilerinde görev yapacak için mobil tarım robotu tasarlanmış, gerçekleştirilmiş ve çeşitli yöntemlerle yörünge takibi yapılmıştır.

Tarımsal araziler, mobil robotların hareketi söz konusu olduğunda kendi içinde zorluklar barındırır. Zeminden kaynaklı problemler, çetin iklim ve çevre şartları ve buna bağlı olarak yüksek sensör gürültüsü tarımsal arazilerde otonom hareketi zorlaştırmaktadır. Bu sebeple tekerlekli araçlarda sıklıkla patinaj problemi ile karşılaşılır. Patinaj problemi, kaygan ve yumuşak yollarda tekerleklerin kontrolsüz yanal kayma yapması ya da ilerlemeksizin dönmesi anlamına gelir. Enkoder gibi tekerlek odometresi birimleri patinaj durumunda hatalı ölçüm yapmaya devam ederek aracın hata konum bilgisini artırarak büyütür ve konuma bağlı lokalizasyon yöntemlerinde hatalara sebep verir.

Görsel odometre yöntemleri otonom tarım araçlarında çoğunlukla tercih edilen bir kameralı odometre yöntemidir. Öznitelik tabanlı görsel odometre yöntemleri aracın hız ve konum verilerini elde etme konusunda hünerlidir ancak tarımsal arazilerdeki değişken ışık koşulları ve pek çok öznitelik biriminin hareketli olmasından kaynaklı olarak lokalizasyon hatasına sebep olabilir.

Bahsi geçen iki odometre yöntemlerinin de tarımsal arazi özelinde çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. En doğru konum verisini elde etmek ve mobil tarım robotunun yüksek doğruluklu lokalizasyonunu yapmak adına tekerlek odometresi birimi ve görsel odometre yöntemleri, farklı deney alanlarında planlanmış hareket senaryoları ile test edilerek karşılaştırılmıştır. Her bir yöntemin doğruluğunu test etmek için lokalizasyon performansları analiz edilerek yorumlanmıştır.

## 1.2 Tezin Organizasyonu

Yapılan çalışmada mobil bir tarım robotu gerçekleştirilmiş ve çeşitli yöntemlerle lokalizasyonu yapılmıştır. Tez çalışması 5 temel bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde; tez çalışmasının amacı, önemi, organizasyonu ve kapsamı ile ilgili genel ön bilgiler sunulmuştur.

İkinci bölümde; sabit ve mobil tarım robotları, otonom saha keşif robotları, patinaj problemi ve sürü robotiği gibi çalışmanın arka planını oluşturan temel çalışmalara değinilmiştir. Güncel literatür çalışmalarında tarımsal sürdürülebilirlik tanımına dair çeşitli bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölüm; tezin materyal ve yöntem kısmını oluşturmaktadır. Bu bölümde mobil robotun detaylı tasarımında bahsedilmiştir. Ayrıca kullanılan odometre yöntemleri, hareket senaryoları, yörünge analiz ve deney ortamı hakkında kapsayıcı bilgiler verilmiştir. Hareket senaryoları ve yörünge analiz uygulamasını açıklamak için sözde kod yöntemiyle algoritmalar sunulmuştur. Bu bölümde çalışmada kullanılan elektronik ve mekanik bileşenlerle beraber yazılımsal kütüphaneler, paket programlar ve bazı fonksiyonlar hakkında kısa bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde; mobil tarım robotunun gerçek zamanlı lokalizasyonuna dair deney sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Mobil robot hareketinin doğruluk analizi hakkında çıkarımlar verilmiştir.

Beşinci bölümde; karşılaştırmalı deney sonuçları yorumlanmakta ve ilerleyen zamanlardaki olası çalışmalar için çeşitli önerilerde bulunmaktadır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Mobil tarım robotları akademide popürlüğünü gittikçe artıran rekabetçi bir alandır. Bu bölümde mobil tarım robotlarıyla ilgili literatürdeki çalışmalar sunulmaktadır. Tarımsal robotlar ile ilgili literatürdeki çalışmalar çalışmalarda kullanılan robotların yapısına göre sabit robotlar ve mobil robotlar olarak gruplandırılmıştır. İlgilenilen akademik alan özelinde iki tür robotun da sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir.

Tarımsal görevlere uygun robot modellerinin tasarlanıp test edildiği çalışmaların haricinde çalışmanın temel odak noktası olan tekerlek kayması probleminin çözümüne ve görsel odometre yöntemlerine dair çalışmalara da bu bölümde yer verilmiştir. Ayrıca tarımsal mobil robotların en güncel çalışma alanı olan işbirlikçi robotlara dair güncel çalışmalar da bu bölümde yer alır. Bu yönüyle bölüm kapsayıcı ve tamamlayıcı bir bakış açısıyla tüm alanı ele alır.

### 2.1. Sabit Tarım Robotları ile İlgili Çalışmalar

Sabit robotlarla belirli bir zemine bağlı çalışan böylelikle kısıtlı hareket alanında çalışıp mobilitesi zayıf olan ve uzaktan kontrol ya da otonom hareketle geniş sahalarda tarımsal görevler yapamayan robotlardır. Sabit robotlar tarımsal anlamda genellikle mahsul hasatı konusunda araştırmacılar tarafından tercih edilmiştir. Sabit tarım robotlarına robotik kollar, kollara entegre yeni gripper yaklaşımları ve soft robotik alanında ilerlemeler kaydedilmiştir. Literatürde sabit tarım robotlarıyla ilgili güncel ve genel çalışmalar bu başlık altında incelenmiştir.

Çalışmada Henten ve ark (2002) bir salatalık hasat robotu kavramı ve tasarımı ele alınmıştır. Donanımsal ve yazılımsal olarak tanımlanan robot, 7 serbestlik dereceli (DOF) manipülatörü ve kesici gripper mekanizmasıyla insan müdahalesi olmadan saha testlerinde %80'lik bir başarı oranıyla, salatalık toplama yeteneğini sergilemiş ve ayrıca çevre ve meyve tespitinde kullanılan bilgisayarlı görme sistemi salatalıkların %95'inden fazlasını tespit edebilmiştir.

Keicher ve arkadaşları (2000) bir domates çeşidi olan “cherry” için robotik hasat çalışması yapmışlardır. Hasat robotu; manipülatör, tarımsal ürüne uygun bir uç eleman, algılama için bir görsel sensör ve doğrusal hareket platformu olmak üzere 4 ana bileşenden oluşmaktadır.

Bulanon ve ark. (2004) doğal ışık altında elmanın pozlarını tahmin etmek üzerine çalışmalar yapmışlardır. Görüntü işleme teknikleri kullanarak elde ettikleri görüntülerde ağaç dallarının yapraklarının ve elmaların yerini tahmin etmişlerdir.

Arima ve diğer araştırmacılar (2003) yaptığı çalışmada çilek tarlasında çalışacak çoklu görev temelli bir robot tasarımından ve robottan gelen bilgilere dayalı bir izlenebilirlik sisteminden bahsetmişlerdir. Sabit bir zeminde görev yapan çok opsiyonlu robot, bir zirai ilaç püskürtme bileşeninden, bir hasat ve bir sınıflandırma bölümlerinden oluşmaktadır. Bu robot bölümleri, ürünlerle ilgili veri kaydından başka tarımsal hassas işlemler de gerçekleştirdi.

Çalışmada Henten ve ark. (2003) yaptıkları çalışmanın performans verilerini iyileştirmeye odaklanmıştır. Çalışmada ürün başına düşen başarılı hasat döngüsünde önemli iyileştirmeler oldu. Ayrıca kesici uçta yapılan yeniliklerle beraber aynı anda birden fazla salatalık hasadı mümkün olmuştur ancak sistemin hasat hatalarının büyük çoğunluğunun kesici uç mekanizmasındaki hatalardan dolayı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tarladaki bitkilerin görsel lokalizasyonunu kullanan başlı hindibağ sebzesinin hasadı için Foglia ve Reina (2006) uygun maliyetli bir robotik kol önermişlerdir. Tanıtılan biçerdöver, bir çift dört çubuklu bağlantı manipülatöründen ve yeraltında yaklaşık 10 mm'lik özel bir tutucudan oluşmaktadır.

Tanigakive ark. (2008) Çalışmada kiraz hasat robotu üretilmiş ve temel deneyler yapılmıştır. Robotun ana parçaları, 4 DOF'lu bir manipülatör, bir 3 boyutlu görüntü sensörü, bir uç efektör, bir bilgisayar ve hareket mekanizmasıdır. 3 boyutlu görüntü sensörünün etrafına, kırmızı ve kızılötesi lazer diyotları yerleştirilmiştir. Her iki lazer ışını da nesneyi aynı anda tarayıp 3 boyutlu görüntü sensöründen gelen görüntüler işlenerek meyvelerin ve engellerin yerleri tespit eder ve son efektörün yörüngesi belirlemede etkin rol oynar. Çalışmada meyveler, çarpışmalardan kaçınarak son efektör tarafından hasat edilmiştir.

Araştırma Liu ve ark. (2008) geleneksel ayırma yöntemlerinden farklı olarak, meyve hasat robotunun uç efektörüne entegre bir lazerli sap kesme cihazı tasarlamıştır. Sapları kesmek için, hasat robotunun uç efektörüne yerleştirilen ve bir fiberle lazere bağlanan odaklama merceği, bir yatak yapısı aracılığıyla bir mini DC motor tarafından çalıştırılır. Cihaz gerçek deneylerde denenerak yüksek doğruluklu sonuçlar vermiştir.

Çalışmada domates hasadında kullanılmak üzere mekanik bir gripper geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada Li ve ark. (2009) özgün parmak yapısının hassas kavrama becerilerinin test edilmesi üzerine odaklanmıştır.

Çalışmada Hayashi ve ark. (2010) çilek hasadı için kapsayıcı bir test sistemi üzerine çalışmalar yürütmüştür. Uygulama için silindirik bir manipülatör, uç efektör, yapay görme birimi, depolama birimi ve gezici birimden oluşan bir robot geliştirilmiştir. Düşük verim, başarısız algılama, düşük kararlılıkta aydınlatma gibi problemleri aşmak adına bir aydınlatma ünitesi tasarlanmış ve testler gece yapılmak üzere planlanmıştır. Algılama başarısını artırmak için yapay görme birimine meyve olgunluk derecesi tanımı yaptırılmıştır.

Bir diğer çalışmada ise Chowdhary ve ark. (2019), yumuşak manipülatör teknolojisinin avantajları ve sürdürülebilir tarım ve ormancılığa olan etkisini tartışmıştır. Yumuşak uç efektör tasarımlarındaki teknolojik yeniliklerin geleneksel robot kollara göre bitkiye ve mahsule erişim konusunda daha yetenekli olduğu ve tarımsal robotiğin güncel bir akademik gelişim sahası olduğu üzerinde durulmuştur.

Sabit tarım robotları dar alanlarda yüksek manevra kabiliyeti ve gelişmiş gripper tasarımlarıyla hasat uygulamalarında tercih sebebidir ancak diğer tarımsal uygulamaların gereksinimlerini karşılama konusunda yetersizdir. Kısıtlı ve dar alanlarda saha algılama çalışmalarında ve geniş tarım arazilerini ilgilendiren problemlerde çözümsüz kalmaktadır. Araştırma alanı belirlenirken ve deney robotu seçilirken bu kısıtlamalar göz önünde bulundurulmuştur.

## **2.2. Mobil Tarım Robotları ile İlgili Çalışmalar**

Mobil tarım robotları, mobilitesi yüksek ve geniş alanlarda kolaylıkla kullanılabilen tekerlekli ya da bacaklı otonom kara araçlarıdır. Geniş tarım arazilerinde yük taşıma, ilaçlama, hasat ve gezici algılayıcı birim görevlerinde kullanılmaktadır. Alanca büyük çiftliklerde sabit robotlar ile hasat yapmak zordur bu sebeple mobil robotlara entegre kollar yardımıyla hibrit uygulamalar yapılmıştır. Mobil tarım robotlarıyla ilgili temel çalışmalar saha keşif problemleri, tekerlek kayması ve görsel odometre başlıkları altında toplanmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında bu ve benzeri sorunların çözümüne odaklanmıştır.

Monta ve ark (1995) üzüm bağında çalışan çok amaçlı bir tarım robotu üzerinde çalışmışlardır. Bir manipülatör, bir görsel sensör, bir gezici platform ve uç efektörlerden oluşan bu robot, farklı uç efektörleri kullanarak birçok işi yapabilmektedir. Bu robot sistemi için hasat, tane seyreltme, püskürtme ve torbalama için dört farklı uç efektör geliştirilmiştir. Bir araştırma sahasında ve laboratuvarında yapılan deneysel sonuçlardan, her bir uç efektörün verimli bir şekilde performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Arima ve ark.(1996) ; yaptıkları çalışmada görsel sensör, manipülatör, el ve gezici cihazdan oluşan salatalık hasat robotu üzerinde durmuşlardır. Meyvelerin tespiti ve diğer bitki bölümlerinden (yaprak ve gövde) ayırmak için 550 nm ve 850 nm dalga boyu karışma filtresiyle tek renkli bir TV kamerası algılayıcısı kullanmışlardır.

Çalışmada Subrata ve ark. (1997) deneysel amaçlı 3 boyutlu görüntü sensörü ile donatılmış cherry domates hasat robotu yapılmıştır. Cherry domates mahsulünün şekli lazer ışınları taraması yöntemiyle, olgunlaşmış kırmızı cherry domatesler ise kızılötesi yansıyan sinyallerin oranıyla kırmızı rengi baz alınarak tespit edilmiştir. Görüntü işleme yöntemleri kullanılarak sap ve yaprakların konumu belirlenmiştir.

Ağır meyvelerin hasadı için Umeda ve ark. (1999) tarafından “STORK” robotu geliştirildi. STORK geniş kütle ve uzun çalışma aralığına sahipti. Manipülatörün konum doğruluğu ve sürdürülebilir başarısı, vakum ve vakum pedinin konum hatası payı test edildi. Çalışma sonucunda 13 kg’a kadar başarılı karpuz hasadı yapıldı.

Araştırma da Jimenez ve ark. (2000) meyve hasadı için otomatik meyve tanıma için kullanılan lazer tabanlı bir bilgisayarlı görüş sistemini tanıtmıştır. Küresel nesnelerin yerinin tespitinde kullanılan bu lazerli görme sistemi AGRIBOT portakal hasat robotuna uygulandı ve test sonucunda doğru meyve tespit oranları ve olası yanlış tespitler analiz edildi.

Kataoka ve ark. (2001) otomatik bir algılama sistemi kullanarak robotik elma hasadında elmaların yerinin tespiti üzerine çalışma yapmışlardır. Elma gelişim sürecinde değişik renklerde görülür, bu sebeple elmanın hangi renkte olduğuna göre ne zaman toplanması gerektiği bulunmuştur. Çalışmalar sonucunda mobil bir hasat robotuyla elma toplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kondo ve ark. (2005) yüksek kanallar içerisinde ve seralarda yetiştirilen çileklerin hasatı üzerine bir robotik sistem tasarlamışlardır. Hasat işleminde kapsayıcı bir uç efektör tasarımı sayesinde çilekler vakum yardımı ile kesme bıçağı altına sabit tutularak çileğin saplarından kesilmesi amaçlanmıştır. Çilek hasat robotunda renk

algılayıcı sensörler yardımı olgunlaşmış ürünler tanıma kesme ve koparma işleminden önce yapılmıştır.

Henten ve ark. (2005) çalışmalarında görüntü işleme için dijital kamera, kızıl ötesi ve ultrasonic sensörler kullanmıştır. Tarımsal hassas kaynak kullanımını görsel veriler göz önünde bulundurularak hesaplamayı amaçlamışlardır.

Scarfe ve ark. (2009), saatte 14.000 kivi hasat edebilen uzaktan kumandalı bir kivi hasat robotu tasarlamış ve uygulamasını bu robotta yapmışlardır. Robotun hasat sisteminin bir parçası olan kollar üzerine monte edilmiş kamera düzeneği ile gelen görüntü işlendikten sonra diagnostik olarak meyvenin anlık pozisyonunun tanımını yapmışlardır. 360 derece dönebilme kabiliyetine sahip kollar, meyve sertliğini algılayarak ona göre meyveyi kendi eksenini etrafında döndürme hareketi yaptırır. Uygulama neticesinde Yeni Zelanda'da kivi meyvesinin hasadı yapılmış ve hasat sonuçları analiz edilmiştir.

Çalışmada Ji ve ark. (2012) tarafından elma hasat robotu için rehberli bir otomatik tanıma görme sisteminin nasıl geliştirileceğine dair yeni bir metot önerilmiştir. Öncelikle elma görüntülerini yakalamak için rengi baz alan bağlantılı bir cihaz kamerası kullanılmıştır ve ayrıca meyve tanıma için görüntüleri işlemek adına endüstriyel bir bilgisayar tercih edilmiştir Elmanın renkli görüntüsünü ortadan kaldırmak için vektör medyan filtresi uygulanmış ve bölge büyütme ve renk niteliklerine göre görüntü bölütleme yöntemi incelenmiştir. Görüntünün renk ve şekle bağlı özellikleri çıkarılıp, yüksek meyve tanıma doğruluğunu ve verimliliğini korumak adına elma tanıma için destek vektör makinesine dayalı yeni bir sınıflandırma algoritması tanıtılmıştır.

### **2.2.1 Mobil saha keşif robotları ile ilgili çalışmalar**

Tarımsal arazilerde mobil robotlar pek çok farklı görev için özelleştirilmiştir. Araziye, hava şartlarına, bitkiye ve tarımsal zararlılara dair bilgi edinmek çiftçiler için son derece önemlidir. Tarımsal problemlerin çözümü adına bir karar destek sistemi oluşturmak ya da mahsulün güvenliğini sağlamak adına bu ve benzeri parametrelerin sürekli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçlar için özelleştirilmiş keşif robotlarının tarımsal arazilerde otonom sürüşlerine yol planlama ve yörengesi takibi gibi çeşitli problemler tanımlanmış ve çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde literatürde tarımsal alanlarda kullanılan saha keşifleri robotları ve onların kontrolüne dair çalışmalar verilmiştir.

Garcia ve Tornero (2002), araba benzeri bir mobil robot üzerinde çalışarak, tekerlekli mobil robotların hareketini kontrol edebilmek ve bir kontrol algoritması tasarlayabilmek için bir diferansiyel sistem modeli kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; araca sonradan eklenen harici tekerleklerin hareketi için yeni bir yaklaşım tanıtmışlardır. Bu yaklaşım ile temelde karmaşık bir şekilde yapılan kontrol tasarımını daha basite indirgemişlerdir.

Araştırmacılar Webers ve Zimmer (2002), bir mobil robotun deneysel test ortamında var olan statik ve dinamik özelliklerinden dolayı oluşması muhtemel kısıtlamaları dikkate alarak, mobil robotu mümkün olan en hızlı biçimde sürebilmeyi amaçlamışlardır. Özellikle, sistemin kararsızlığı ve gürültüye maruz kalması benzeri mekanik etmenlere odaklanmışlardır. Lyapunov fonksiyonuna ve diferansiyel denklemlerin kontrol denklemlerinden türetilen yaklaşımlarını baz alan yöntemler hareket halindeki mobil robotun hareket halindeki davranışını incelemek için kullanıldığından; yapılan bu çalışmada araştırmacılar matematiksel model olarak Lyapunov fonksiyonunu baz almış ve tek tekerlekli bisiklet modelini kullanmıştır.

Çalışmada Schenoff ve ark. (2003) otonom bir aracın hareket halinde olduğu bir ortamda mevcut olan hareketli nesnelerin karakteristiklerini belirlemeye yönelik bir yaklaşım üzerinde durmuşlardır. Nesnelerin anlık olarak yüksek doğruluklu konumlarını ve gelecekteki olası pozisyonlarının tahminini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar bu yaklaşımlarının özelinde; araç tarafından dinamik nesnelerin algılanabilmesi için bu nesnelere temsil eden sembolik ve denklem benzeri bir kombinasyon kullanmışlardır.

Rezaei ve diğer araştırmacılar (2003) bu çalışmada; çevre tanımlaması yapılamayan ya da yapılandırılmamış dış ortamlarda çalışan bir aracın yörünge izlenmesine yönelik sorunları ele almışlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada problemin çözülmesine yönelik olarak, gerçek zamanlı bir SLAM algoritması üstünde durmuşlardır. Optimal yolun bulunabilmesi için aracın hareket ettiği çevre şartlarının bilinmesinin önemi vurgulanırken bundan kaynaklı oluşan harita belirsizliği dikkate alınmış ve elde edilen görsel veriler çalışmaya dahil edilmiştir.

Yörünge takibi mobil robotlar için önemli bir husustur. Çalışmada Yang ve ark. (2004) holonomik olmayan araba benzeri bir mobil robot üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Halihazırda mevcut çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada araştırmacılar durum kısıtlaması üzerinde durmuştur. Sistemin durum kısıtı altında kontrol edilebilirliği öncelikle doğrusal olmayan geometri ile bağlantılıdır.

Sonrasında ise dinamik geri besleme doğrusallaştırma tekniğinden yararlanarak doğrusal olmayan bir izleme denetleyicisi bulunur. Elde edilen kontrolcü, durum kısıtlı araba benzeri mobil robotun hem izleme hem de iyileştirme problemlerini aynı anda çözmek için kullanılabilir. Tartışılan kontrol algoritmasının yörünge izleme kontrolüne etkisi simülasyonlar ile desteklenmiştir.

Yamamoto ve ark. (2005) çalışmada, garaja park etme problemini aşmak için bir yol planlaması problemine odaklanmışlardır. Çalışma alanının dar olması ve holonomik olmayan araba benzeri mobil robotların kinematik dezavantajlarının fazla olması bu görevi zorlaştırır. Ayrıca beklenmedik dinamik engellerin olması ve olası çarpışmalardan kaçınarak görevin tamamlanması sistemin kontrolünü daha da zorlaştırır. Garaja park etme problemi için, gerçek zamanlı bir optimizasyon olarak değerlendirilip uzaklaşan ufuk kontrol metodu uygulanmıştır ayrıca araba benzeri bir mobil robot sistemi kullanarak yöntem doğrulanmıştır.

Bu tez çalışma ile araştırmacı Holm (2011) kalman filtresi yardımı ile araç kütlesi ve yol yapısından kaynaklı oluşan çevresel etkenlerin yüksek doğrulukla belirlenmesine yönelik çalışmalar yürütmüştür ve bu çalışmasını da geliştirilmiş kalman filtresi ve boylamsal bir araç modeli kullanarak yapmıştır. Duyarlılık ve gözlemlenebilirlik analizi yaparak tahmin model hatalarını minimuma indirmiştir.

Silva ve ark. (2008) bu çalışmada araştırmacılar; dört tekerlekli bir modelin kullanımına giderek dinamik davranış parametrelerini tanımlayan yeni bir sistem üzerinde durmuşlardır. Çalışmanın amacı ve katkısı ise tüm araç dinamiklerinin simüle edilebildiği elektrikli veya hibrit otonom araçlara uygulanabilir bir model tasarlamaktır. Araştırma çıktısı olarak ise simülasyon sonuçları, araç ve sürüş güvenliği ve fiziksel dengesi için çekiş kontrolü ve fren sistemi olarak ABS'nin dahil edilmesinin bir avantaj haline geldiği gerçekleşmesi olağan durumlardan bahsetmektedir.

Hashim ve Lu (2013), çalışmalarında statik bir ortamda holonomik olmayan bir mobil robotun yörünge planlamasını ve gerçek zamanlı kontrolünü üzerine çalışmışlardır. Holonomik olmayan bir mobil robot için yörünge oluşturulurken geometrik bir yaklaşım esas alınmıştır. Yörünge, bu çalışmada zaman açısından ve hedefe varma durumunun kontrolünü açısından önemlidir. Bu yaklaşım, Robotun kısıtlı zamanda büyük bir araziyi taraması ya da takım halinde çalıştığı görev tabanlı çalışmalarda kritiktir. Mobil robot uzaktan kumanda ile kontrol edilebilmek için kablosuz iletişim ağı ile donatılmıştır. Hareket algoritması daha sonra statik çevre

şartlarında test edilmiş ve deneysel çalışmaların çıktıları simülasyon ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Robotik kullanımının artması ve insanların yoğun olarak kullandığı ortamlarda ortak bir çalışma alanı paylaşımına gidilmesi hem yayalar hem de çarpışmadan kaçınma konusunda donanımlı robotlar için kontrolü zorlaştıran bir durumdur. Bu çalışmada Liu ve ark. (2015), yaya ortamında sınırlı veri ile otonom sürüş için bir planlama sistemi tanıtmışlardır. Sadece LIDAR verisi kullanılan sistemin başarısı deneylerle test edilip doğrulanmıştır.

Bu çalışmada Rafaila ve Livint (2015), kara araçları için otonom yön kontrolünün doğrusal olmayan model tabanlı tahminine dayalı kontrolünü sunulmuştur. Teker kuvvetlerinin yanal bileşeni, optimal kontrol problemi ve direksiyon kontrol sistemi gibi en önemli doğrusal olmayanları içeren araç yanal dinamiği matematiksel modeli açıklanmıştır. Araştırmacılar simülasyon sonuçlarında, bu yaklaşımın pratik anlamda iyi çıktılar verebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Wang ve Noguchi (2016) çalışmalarında otonom bir tarım robotuna dair göreve dayalı sıralar arası yer değiştirme, şerit takip ya da dönüşler gibi geniş kapsamlı bir hareket kontrolü problemini ele almıştır. Navigasyon takibi, bir IMU ve gerçek zamanlı bir kinematik GPS'den oluşmaktadır. Kontrol algoritması, mobil robotu tarımsal arazide yüksek doğruluklu bir şekilde yönlendirmek adına yalpalama açısındaki sapmaları belirlemiş ve robotik traktörün zemin eğiminden kaynaklanan yanal sapmasını bu yöntemle kontrol edebilmiştir. Referans yolları oluşturmak için sürülmemiş arazide daire geri dönüş algoritması kullanılmıştır. Ayrıca, sürülmemiş arazideki toprak yüzeyini korumak için hareketli halde şerit değiştirme adına direksiyon manevraları yapılmıştır.

Pham ve ark.(2019) çalışmalarında tarımsal arazide devriye görevi için kapsayıcı bir mobil robot algoritmasına yer vermiştir. Tarımsal arazilerde ekim sırasının takip edilmesi ve her bir ziyaret noktasını optimum hızda dolaşabilmesi koşulları altında kapsayıcı yeni bir algoritma tasarlamıştır. Bu algoritma, gerçek tarım arazilerinde test edilmiş ve başarılı sonuçlar vermiştir. Araştırma sonunda araştırmacılar tarafından yeni problemler açıklanmış ve akademik boşluklar belirtilmiştir.

Saha keşif robotları alanında araştırmacılar çoğunlukla yol planlama ve yörünge takip uygulamaları ile ilgili çeşitli problemlerin çözümüne odaklanmıştır. Çeşitli kontrol algoritmaları ile keşif robotlarının araç ve ortam kısıtlarından kaynaklı sorunlarını

aşmak hedeflenmiştir. Türetilmiş yaklaşımlar, mekanik iyileştirmeler ve sensör füzyonu teknikleri ile manevra problemleri iyileştirilmiştir.

### **2.2.2 Mobil tarım robotlarında tekerlek kayması problemi ile ilgili çalışmalar**

Mobil robotlarda yol takibi ve yol planlaması yapılırken karşılaşılan en önemli sorunlardan biri kayma problemidir. Patinaj olarak da isimlendirilen bu problemin sebebi tarımsal arazilerdeki elverişsiz zemindir. Çevre şartlarında oluşan değişimler ve hava olayları tarımsal arazileri etkileyebilir, yağışla beraber meydana gelen çamurlu ağır zemin robotun hareketini zorlaştırır. Aracın tarımsal arazide konumunun anlık olarak bilinmesi adına kullanılan tekerlek odometresi birimleri zor şartlarda hataya açık bir hale gelir ve hareket devam ettikçe hatalar birbirine eklenerek büyür. Veri iyileştirmesi ve çoklu sensör kullanımı gibi hata azaltıcı yöntemler kullanılarak bu sorunun önüne geçmek mümkündür. Literatürde tekerlek kayması problemini aşmak adına yapılan güncel ve genel çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Fang ve ark. (2005) çalışmalarında, otonom tarım araçlarının kayma durumunda yörünge izleme kontrolü problemi ele alınmaktadır. Kayma etkilerini hesaba dahil etmek için, kayma durumunda geometrik ve hız kısıtlamaları esas alınarak kinematik modele kayma etkilerini karakterize eden iki değişken dahil edilmiştir ve bilinmeyen parametrelerde kaymanın doğasından gelen kinematik modele doğrusallaştırma yöntemi dahil edilmiştir. Araştırmacılar tarafından parametre uyarlama tekniğini geri adımlama yöntemiyle entegre ederek, sağlam bir uyarlanabilir denetleyici tasarlamak için adım adım bir çözüm şeması önerilmiştir.

Uzay araştırmalarında sıklıkla kullanılan roverlar, rocker bogie esasına uygun olarak tasarlanır. Mars ve Ay gibi engebeli ve zor arazilerde kullanılır ancak tekerlek kayması problemi farklı kinematik modellerde tasarlanmış mobil robotlar için de geçerlidir. Thianwiboon ve ark. (2006) çalışmalarında bir yüzey gezgininde tekerlek kayması problemini ele alıp jacobian matrislerine göre tekerlek-zemin açısı belirleme üzerine bir yöntem geliştirmişlerdir. 6 tekerlekli bir rocker bogie robotu üzerinde yaptıkları çalışmada tekerlek kayması problemini aşmak adına çeşitli sensörler kullanmışlardır.

Bu çalışmada Lenain ve ark. (2006), mobil arazi robotlarının otomatik olarak yönlendirilmesi adına, uyarlanabilir ve tahmine dayalı gözlemci tabanlı kontrole dayanan çeşitli yenilikçi yaklaşımlar sunulmuştur.

Güvenli sürüş; yol geometrisinin ve aracın dinamik durumunun takip edilmesiyle, oluşabilecek riskli durumların sistemden çıkarılmasıyla mümkündür. Bu sebepten ötürü araca etki eden parametrelerin bilinmesi son derece önemlidir. Bir araçta boylam hareketine etki eden yol parametreleri arasında, düşük maliyetli sensör ile doğru bir şekilde ölçülemeyen eğim bulunabilirken; aracın yanal hareketi, temelde ölçülemeyen yanal hız değerinden etkilenir. Bu çalışmada Sebsadji ve ark. (2008), doğrusal olmayan bir araç modeli tercih etmiş ayrıca araç dinamiğinin tahmini için EKF ve Luenberger Observer (LO) kombinasyonunu kullanarak gözlemci tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada gözlemciler, geliştirilen bir prototip araçta sapma oranı, her bir lastiğin direksiyon açısı ve dönüş hızı olmak üzere birkaç standart ölçüm kullanır. Yapılan deneysel çalışmalarla yeni yaklaşımın doğruluğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, Eaton ve diğer araştırmacılar (2009), yanal ve boylamsal hız kaymasının etkisi altında bir tarım traktörünün yüksek doğruluklu yörünge takibine alternatif bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşım, direksiyon sisteminin dinamiklerini hesaba katarak sınırlı ve zamana bağımlı kayma hızlarını esas alır. Simülasyon neticesinde, önerilen alternatif yöntemin yüksek doğruluklu yörünge takibi yaptığı gösterilmektedir.

Çalışmada Matveev ve ark. (2010), tarım uygulamaları için karakteristik bir problem olan otonom tarım araçlarının tekerlek kayması ve bu etki altındayken otomatik yol takibi sorununu ele alınmıştır. Problemi çözmek adına iki farklı yaklaşım önerilmiştir ve her ikisi de direksiyon açısı üzerindeki kısıtlamaları hesaba katarak kavisli ve engebeli bir yolun takip edilmesini esas alır. Sunulan yaklaşımda küresel yakınsamanın ve aracın yola göre kararlılığının matematiksel olarak ispatları gözlemlenmiştir. Çalışma özelinde kayma etkileri sınırlı belirsizlikler olarak kabul edilmiştir.

Tekerlek kayması probleminin çözümü adına araştırmacılar çoğunlukla araç kinematik modelinde yeniliklere gitmiş ve yanal kuvvetleri de kontrol algoritmasına dahil etmişlerdir. Ayrıca sıklıkla kalman filtresi gibi sensör füzyonu uygulamaları ile direksiyon açısının kontrolünü esas alan çalışmalar da yapılmıştır.

### 2.3. Görsel Odometre ile İlgili Çalışmalar

Kameraların endüstriyel ortamlarda sıklıkla kullanılmasıyla başlaması görsel sensörlerde yeniliklere yol açtı. Yazılımsal yenilikler ve sürekli olarak kalitesi artan kamera donanımları günlük teknolojiye uyum sağladı. Görsel girdileri kullanarak mesafe ölçümü yapılması ise 1980lerden itibaren akademik çalışmalarda kendine yer buldu. Görsel odometre terimi sadece kamera verilerini kullanarak bir aracın ego hareketini tahmin etme sürecidir. Tekerlek odometresinden bu yönüyle farklıdır. Aşağıda görsel odometrelerin tarımsal arazilerde kullanımı ve tekerlek kaymasıyla ilişkisinin direkt çıktısı olan ilgili yörünge takibi çalışmalarını içeren literatür sunulmuştur.

Sadece görsel veriler kullanarak bir robotun ego hareketini tahmin etme probleminin tanımı ilk kez bu çalışmada Moravec (1980) tarafından yapılmıştır. Köşeleri algılayıp takip etme ve üçgenler oluşturma yöntemi ilk kez kullanılmıştır. 9 farklı istasyonda fotoğraflar çekilerek hizalandıktan sonra en küçük kareler yöntemiyle çözülmüştür.

Bu çalışmada Nister ve ark. (2004) görsel odometre ile ilgili ilk deneysel gerçek hayat çalışmasını yapmışlardır. 3 boyutlu veriyi 2 boyutta okuyarak ve 5 noktalı RANSAC çözücüsü yardımı ile yüksek doğruluklu bir hata ayıklama şeması oluşturmuşlardır.

Bu çalışmada Miella ve Siegwart (2006) , Tekrarlamalı En Yakın Nokta (ICP) şemasında görüntü yoğunluğu bilgisini ve 3B stereo verilerini birleştiren gerçek zamanlı 6 serbestlik dereceli ego-hareket tahmini için bir stereo vizyon algoritması sunmuştur. Önerilen yöntem, standart ICP'nin temel bir sorununu, yani veri noktalarının bölümlenmesini gerçekleştirememesi ve büyük kaymalarla başa çıkamaması sorununu ele almaktadır. Görsel odometre uygulamasında, algoritmanın çeşitli adımları detaylandırılmış ve saha robotu ile gerçekleştirilen testlerin sonuçları paylaşılmıştır.

Bu çalışmada Forster ve ark. (2014) mevcut en gelişmiş yöntemlerden daha hızlı olan yarı doğrudan monoküler görsel odometri algoritması önermişlerdir. Yaklaşım SVO (Yarı-doğrudan Görsel Odometri) adını verilmiştir. Yarı doğrudan yaklaşım, hareket tahmini için son derece maliyetli olan özellik çıkarma ve yüksek doğruluklu eşleştirme tekniklerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır. Algoritma direkt piksel yoğunlukları üzerinde çalışır, bu da yüksek kare hızlarında alt piksel hassasiyetiyle sonuçlanır. Aykırı değer ölçümlerini modelleyen olasılıksal bir haritalama yöntemi

kullanılarak 3 boyutlu noktalar tahmin edilmiştir. Algoritma, GPS'in reddedildiği ortamlarda mikro hava aracı durum tahminine uygulanmış ve başarılı neticeler alınmıştır.

Bu çalışmada Scaramuzza ve Fraundorfer (2011) görsel odometreye dair tanımlamalar, görsel odometrenin tarihsel gelişimi ve çeşitli yaklaşımlarını içeren geniş bir literatür sunulmuştur. Görsel veriye dayalı hareket tahmini ve mesafe ölçümüyle ilgili çalışmalara yer verilen çalışmada araştırmacılar kamera modelleme ve farklı boyutlar arası hareket tahmini gibi konulara değinmiştir.

Çalışmada Yang ve ark. (2020) derin ağları üç düzeyde (derinlik, poz ve belirsizlik tahmini) kullanan monoküler görsel odometre için yeni bir yaklaşım olan D3VO'yu tanıtmışlardır. Araştırmacılar yeni bir monoküler derinlik tahmin ağı önermiş ve sonrasında ağırlıklandırma yöntemine giderek yaklaşımlarını oluşturmuşlardır. Bu yeni yaklaşımın klasik görsel odometre yöntemlerine karşı başarısı test edilmiştir. D3VO'nun geleneksel monoküler GO yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiğini bildirilmiştir.

Görsel odometre algoritmalarının tasarımında öz nitelik tabanlı yöntemler daha doğru sonuçlar verir. Yapılan alakalı çalışmaların çoğunda köşe dedektörleri kullanılmıştır. Görüntüler arası hizalama problemini ortadan kaldırmak adına 2 boyutlu kamera pozları arası köşe izlemek daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada Zhou ve ark. (2019), klasik serbest biçimli eğri kaydı problemi ele alınmıştır. Köşe izleme yerine kenar izleme yönteminin kullanıldığı çalışmada görüntülerden çıkarılan tüm Canny kenar özellikleri verimli bir şekilde izlenmiştir. Canny-VO adlı verimli bir RGB-D görsel odometre sistemine uygulamaktadır.

Xue ve diğer araştırmacılar (2019), Bellek ve Onarma adı verilen iki ek bileşeni entegre ederek bir Görsel odometre yöntemi önermiştir. Bellek bileşeni, uyarlanabilir ve verimli bir seçim stratejisi kullanarak küresel bilgileri korur. Onarma bileşeni ise özellik çıkarma için bir uzamsal-zamansal bir önlem mekanizması benimseyerek bellekte depolananlarla beraber önceki sonuçları iyileştirir. Önerilen model diğer öğrenme temelli yaklaşımlara göre daha iyi bir performans sergiler özellikle dokusuz bölgeler ve ani hareketler gibi zorlu senaryolarda üstünlük sağlar.

Zaman ve ark. (2019) çalışmalarında tarımsal araziler için ergonomik ve verimli bir görsel odometre algoritmasını test etmiştir. Farklı zemin tiplerinde karşılaştırmalı sonuçları içeren çalışmada algoritmanın doğruluğu ve hesaplama hızı iyileştirilmiştir. Çalışmada hesaplama hızının veri seti büyüklüğü ile alakalı olduğu vurgulanmıştır.

İncelenen görsel odometre çalışmalarında aracın yörünge takibi performansını artırmaya yönelik çalışmalar çoğunluktadır. Ayrıca kenar takibi ve görsel odometrenin öğrenme yöntemleriyle birleştirilmesi gibi metodik yöntemler literatürde yer bulmuştur. Görsel odometre uygulamalarının hız ve doğruluk değerlerinin iyileştirilmesi ise rekabetçi bir alan olarak çalışmalarda kendine yer bulmuştur.

Çalışmada mobil saha keşif robotları için tekerlek kayması probleminin tespiti üzerine bir çalışma planlanmaktadır. Bu anlamda çözülmeye çalışılan kayma problemine sensör füzyonu metotları, veri iyileştirme yöntemleri ve özgün saha etiketi uygulamalarına entegre görsel odometre kullanımı ile çözüm aranması ve sonuç olarak yörünge takibi başarısının iyileştirilmesi planlanmaktadır. Bu çalışma ile literatürde gerçek tarımsal saha koşullarında görsel odometre kullanımı ile mevcut yöntemlere kıyasla daha maliyetsiz, kolay ve verimli yöntemlerin sunulmasına dair boşluğun doldurulması amaçlanmaktadır.

#### **2.4. İşbirlikçi Robotlar ile İlgili Çalışmalar**

Görev tabanlı tarımsal uygulamalar doğası gereği karmaşıktır ve kontrolü zordur. Bu sebepten dolayı yapılan çalışmalar uzun yıllar geçmesine rağmen ticari ürünlere dönüşmemiş ve güncel tarım ikliminin bir parçası haline gelememiştir. Otonom araçların tarım arazilerinde ve çiftliklerde kullanımı gerçek hayat uygulamalarında klasik tarım anlayışına göre verimsiz olduğu gerekçesiyle tarım arazilerinde yörünge planlama ve izleme çalışmalarını yüksek verimlilikle yapma ihtiyacı doğmuştur.

Gezgin Satıcı Problemi (TSP) pek çok zeminde ve çevre şartında çeşitli algoritmalarla çözülmüştür. Özellikle son 10 yılda bu konuda pek çok araştırma, sürü zekasını temelli yaklaşımların yüksek doğruluklu problem çözme becerisiyle klasik optimum yol bulma algoritmalarına iyi bir alternatif olacağını doğruladı. Sürü zekâsı yöntemleri doğada sürü halinde yaşayan canlıların yem bulma, avlanma ve yuvaya dönme gibi biyolojik davranışlarından ilham alır. Tarımsal arazilerde sürü robotiği yöntemleriyle yol planlama ve yörünge izleme uygulamalarına ilişkin literatür taraması aşağıda sunulmuştur.

Bu çalışmada (Guillet, Lenain et al. 2014), tarımsal arazide çalışan bir mobil robot filosunun yüksek doğruluklu kontrolü için bir kontrol şeması sunulmuştur. Robotlar arası iletişim temelli merkezsiz kontrol tercih edilmiştir. Bu yöntemle robotlar

arası hiyerarşi ortadan kaldırılmıştır. Yüksek bir göreceli konumlandırma sağlamak için uyarlanabilir ve tahmine dayalı kontrol teknikleri göz önünde bulundurulmuştur.

Bu çalışmada Santos ve ark (2020), çeşitli tarımsal uygulamalarda kullanılan yol planlama teknikleri için farklı uygulamaların bir araştırmasını yapmaktadır ayrıca farklı tarımsal uygulamaları ve kullanılan yol planlama yöntemiyle ilgili ayrıntıları analiz etmektedir. Sonuç olarak, kapsama alanı planlamasının kullanımının bu alanda daha başarılı olması nedeniyle, yol planlamasının arazi kapsamı ve noktadan noktaya navigasyon için tarım robotlarına başarıyla uygulandığı görülmektedir. Çalışmada tarımsal sürdürülebilirlik ve gelecekteki tarımsal uygulamalara dair çıkarımlar tartışılmıştır.

Sürü robotiğine ilham kaynağı olan arılar, kuşlar ve karıncalar işbirlikçi şekilde davranarak zor işleri sürü menfaati için kolay bir şekilde yapar. Gerçek zamanlı mühendislik uygulamalarında bu yaklaşım henüz tam anlamıyla kurulamamıştır. Araştırmacılar çalışmalarında literatürdeki çalışmaları tartışmış, gerçek sürü algoritmalarını uygulayan gerçek dünyadaki sürü uygulamalarına ışık tutmuştur. Temel sürü davranışları; mekâna bağlı organizasyon, navigasyon, karar verme ve diğer çalışmalar olarak sınıflandırılıp kategorize edilmiştir. Sınıflandırma ile sürülerin davranış biçimlerini sınamak ve değerlendirmek için kullanılacak çeşitli araştırma platformları, hali hazırda piyasada kullanılan sistemler ve belirli bir ticari amaca hizmet eden projeler hakkında kapsamlı bir genel bakış sunulmuştur.(Schranz, Umlauf et al. 2020)

Bu çalışmada Lowenberg-DeBoer ve Erickson (2019) İngiltere'deki küçük ölçekli çiftliklerde sürü robotiği kullanımının ekonomik ve sosyal yapıya etkisi üzerinde durmuştur. İşçi maliyetleri ve günlük çiftlik giderleri gibi standart harcamalar ile işbirlikçi robot kullanımı senaryoları karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Araştırma çıktılarından biri de 2019 yılı istatistiki verilerine göre bir tarım işçisi ile bir tarım robotunun çiftlik sahibine günlük maliyeti neredeyse aynı olmasıdır.

Çalışmada araştırmacılar mevcut iş alanlarında sürü robotiği kullanımına dair nitel bir araştırma yapmışlardır. Kullanıcıların robotik yeniliklere bakış açısı ve sürü robotiği uygulamalarının gerçek dünyadaki yeri üzerinde durulmuştur. Farklı meslek gruplarının dahil edildiği araştırmada bilgi toplama gibi basit süreçlerde robotik teknoloji unsurları başarılı bulunurken, arama kurtarma ve anlık karar verme gibi kritik durumlarda ise kullanıcıların sürü robotiğine karşı güven eksikliği hissettiği belirtilmiştir. (Carrillo-Zapata, Milner et al. 2020)

Çalışmada Wen ve ark. (2018) akıllı depo ve lojistik sektöründe sürü robotiğinin kontrolü ve iletişimine dair çalışmıştır. Lojistik sektörünün güncel problemlerine ve ihtiyaçlarına yönelik sürü zekâsı yaklaşımlarının başarısı ve uygunluğu tartışılmıştır. Ayrıca, lojistikte sürü robotiğine dair yakın gelecekte karşılaşılabilecek birkaç zorluğuna atıfta bulunulmuş ve yeni nesil lojistik için bazı yenilikçi uygulamaları gözden geçirilmiştir.

Bu çalışmada Pochon ve ark. (2018) bal arılarının demokrasi davranış koleksiyonunu birleştirip, işbirlikçi robotlara uygulayan, optimum koşullarda karar verme için doğadan ilham alan yenilikçi bir metot önermiştir. Modelin fizibilitesi, Kilobot isimindeki gerçek donanımlı sürü robotları kullanılarak test edilmiştir. Önerilen demokratik modelin başarısı grup içerisindeki kötü niyetli çeldirici robotlarla sınanmış ve uzlaşım sürecinde kötü niyetli manipölatörlere karşı dirençli olduğu gösterilmiştir.

Çalışmada, Singh ve ark. (2020) sürü robotiği birimlerinin güvenli iletişimi üstünde durulmuştur. Hiyerarşik merkezi bir yapıyla hareket eden robotlardaki güvenlik açıklarından ve mevcut kontrol yöntemlerinin verimsizliğinden bahsedilmiştir. Bunun önüne geçmek adına Block chain teknolojisi ile akıllı sözleşmeler oluşturan bir yaklaşım önerilmiştir. Raspberry Pi tabanlı uzlaşım bir renk oyunu oluşturularak yaklaşımın başarısı test edilmiştir.

Çalışmada Almadhoun ve ark. (2019) sürü robotiği alanının önemli alt başlıklarından biri olan kapsayıcı yol bulma alanında geniş çaplı bir literatür taraması yapılmıştır. Karar verme, yolu bulma, robotlar arası iletişim ve haritalama konularında sınıflandırmalar yapılmıştır.

Sürü robotiği alanında araştırmacılar, çoğunlukla hareket kontrolü, sürü içi haberleşme, karar verme ve uzlaşım problemleri üzerinde durmuşlardır. Sürü robotiği görece yeni bir alan olmasına rağmen son derece popüler ve rekabetçidir. Özellikle hiyerarşi ve demokrasi gibi pek çok yönetimsel ve toplumsal kavram üzerine disiplinler arası çalışma kendine sürü robotiği ve sürü zekâsı alanı altında yer bulmuştur.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde saha deneylerinde kullanılmak üzere tasarlanan mobil tarım robotunun detaylı tasarımı, kavramsal tasarım esnasında belirlenen göreve ve çevreye bağlı kısıtlar ve robot modeli incelenecektir. Daha sonra tekerlek odometresi ve görsel odometre yöntemlerine değinilerek etiket tasarımları ve kamera hesaplamaları sunulacaktır. Video analiz algoritması, hareket algoritmaları ve deneylere dair ayrıntılı bilgiler de bu bölümde yer almaktadır.

#### 3.1. Mobil Tarım Robotunun Tasarımı

Tarım robotunun tasarımına başlanmadan önce çevre ve görevden kaynaklı kısıtların belirlenmesi ile aracın bu kısıtlar hesaba katılarak kavramsal düzeyde tasarlanması ve sonrasında montaj aşamasına geçilmesi gerekmektedir. Kavramsal tasarımı yapılarak belirlenen kısıtlarla beraber çalışmayı kurgulamak aracın üretilebilirliğini artırır. Göreve ve çevreye dayalı fiziksel kısıtlar daha sonra ayrıntılı olarak incelenecektir.

Bu çalışmada robotun, tarımsal bir arazide önceden belirlenmiş hareket senaryolarında hareketi amaçlanmaktadır. Aracın tarımsal bir görevi kurgulanmamıştır. Hareketi esnasında oluşturulmuş rotaları doğru bir şekilde takip edebilmesi ve tekerlek kayması problemini aşması adına çeşitli sensör füzyonu ve görsel odometresi uygulamalarıyla veri doğrultma işlemleri gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu görev tanımında aracın manevra kabiliyeti ve dayanıklılık esaslarını göz önünde bulundurulmuştur.

##### 3.1.1. Göreve ve çevreye dayalı fiziksel kısıtlar

Tarım arazisinde çalışması için tasarlanacak olan bir mobil robot, çalışma esnasında arazinin bir parçasıdır. Bu sebeple araziden kaynaklı zorluklara karşı dayanıklı olmalı ve üstün hareket kabiliyetiyle çarpışmadan kaçınarak gezinebilmelidir. Ergonomik anlamda tarımsal araziye uyumlu mobil bir robot tasarlama işlemi fiziksel kısıtların belirlenmesiyle mümkün olabilir. Araca dair kütle, yükseklik ve gövde yapısı gibi temel fiziksel parametreler sebepleriyle beraber belirlenerek Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Fiziksel kısıtlar, aracın tasarımına ve üretilebilirliğine katkı verdiği kadar

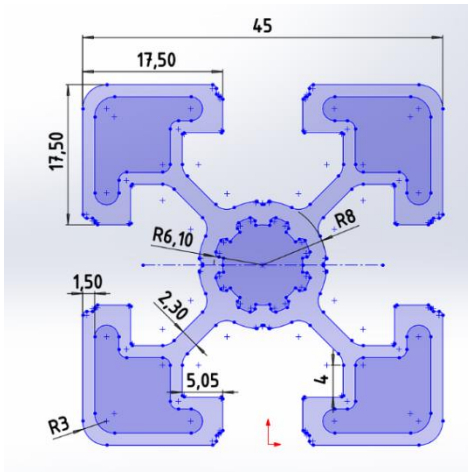
uygulama ve üretim aşamasında yaşanabilecek olası problemlerin önüne geçmek adına da faydalı olabilir.

**Çizelge 3.1** Göreve ve çevreye dayalı fiziksel kısıtlar

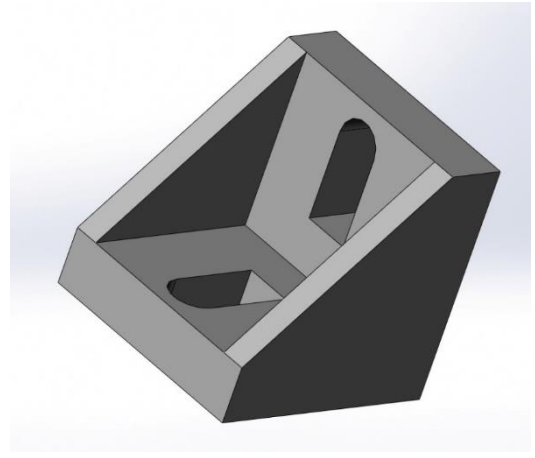
Fiziksel standartlar	Tasarım kısıtları	Kısıt sebebi
Kütle	Maks. 10 kg	Ekili araziye verilebilecek zararı minimize etmek
Boy	80 – 100 cm	Dönüş hareketlerinde mobiliteyi artırmak
Genişlik	60 – 75 cm	Ekili arazilerdeki sıra genişliğine uyum sağlamak
Yükseklik	Min. 75 cm	Robotu zemindeki yabancı maddelerden korumak
Tekerlek çapı	20 – 30 cm	Yükseklik sağlamak ve mobilite kazandırmak
Tekerlek kalınlığı	Kalın, 3 – 5 cm	Zeminde tutuşun sağlanması
Gövde yapısı	Kafes	Dayanıklılığın artırılması ve elektronik ekipman taşımada kolaylık sağlamak
Materyal	Alüminyum sigma profil	Modüler, dayanıklı ve yeniden kurulabilir olması tasarımda esneklik sağlaması

### 3.2. Mobil Tarım Robotunun Mekanik Tasarımı

Mekanik tasarım aşamasında sigma profil kullanımı ve kafes yapısı tercih edilmiştir. Eklemeli imalat yöntemiyle 45mm\*45mm ve 45mm\*90mm sigma profiller yardımıyla aracın gövdesi oluşturulmuştur. Modüler yapısı, yeniden montajlanabilir olması, hafif ve dayanıklı olması sebebiyle sigma profiller tercih edilmiştir (Şekil 3.1). Profillerden kafes montajı işlemi için sigma profiller için özel olarak tasarlanmış köşeli montaj ekipmanları kullanılmıştır (Şekil 3.2). Ana gövde yapısı 45mm\*45mm sigma profillerden oluşurken direksiyon ekipmanları taşıyıcısı olarak için 45mm\*90mm profil tercih edilmiştir. Ayrıca tahrik tekerlerinin gövdeye bağlantısı için yine 45mm\*90mm profiller kullanılmıştır.

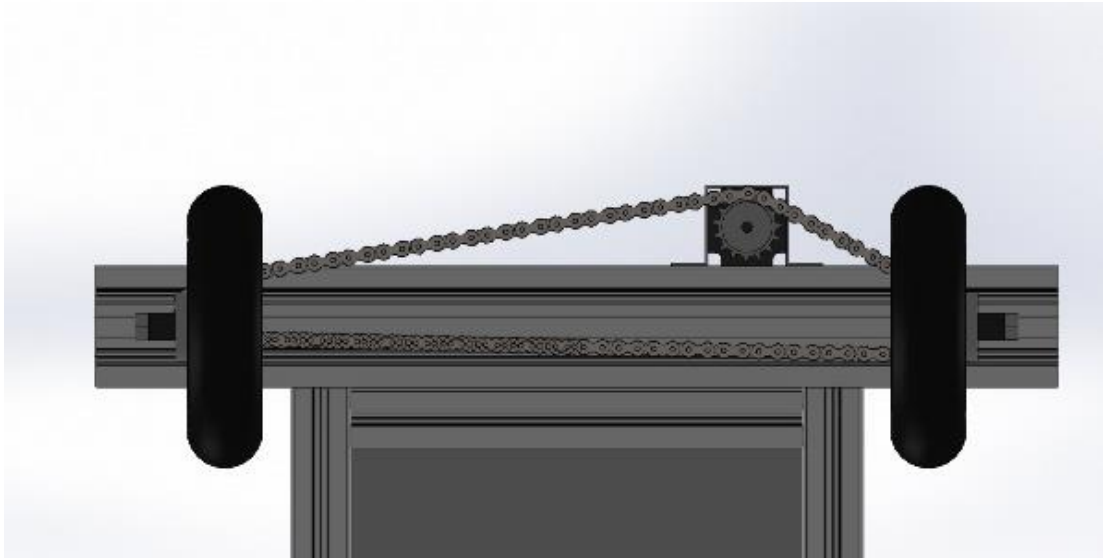


Şekil 3.1 Sigma profil kesiti



Şekil 3.2 Köşe bağlantı elemanı

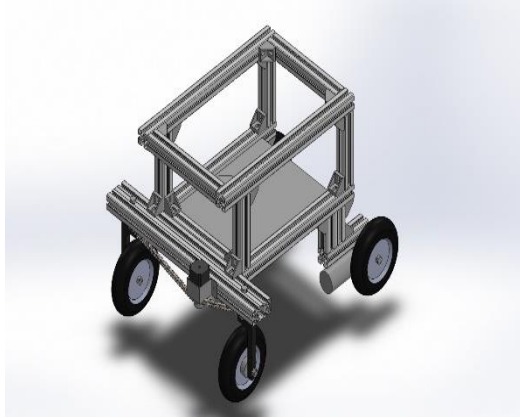
Araç 4 tekerlekli olarak tasarlanıp üretilmiştir. Arkada aracın ileri geri hareketi için 2 redüktörlü dc motor ve redüktör millerine doğrudan bağlı 2 tekerlek kullanılmıştır. Aracın ön tarafında yönlendirilme görevi için direksiyon mekanizması tasarlanmıştır (Şekil 3.3). Taşıyıcı profil üstüne step motor ve iki oryantasyon tekeri konumlandırılmıştır. Step motor oryantasyon tekerlerinin yönünü tahrik ederek aracı yönlendirir. Güç aktarımı için dişli ve zincir bağlantısı tercih edilmiştir. Step motorun miline ve oryantasyon tekerlerine yerleştirilen dişliler eşit oranda dönerek aracın yönlendirilmesini sağlar.



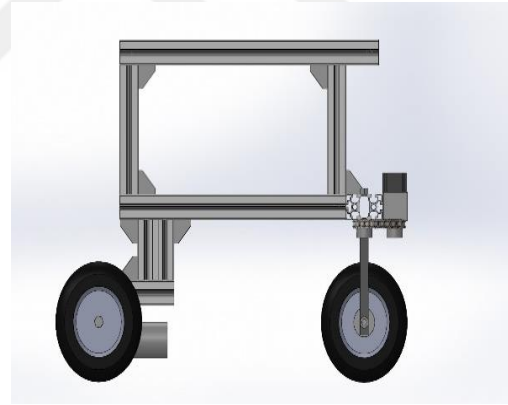
Şekil 3.3 Direksiyon mekanizması

Çizelge 3.2 Mekanik bileşenler

Bileşen ismi	Kullanım yeri veya görevi	Adet
45mm x 45mm x 33.5cm sigma profil	Alt ve üst gövde	3 adet
45mm x 45mm x 6 cm sigma profil	Üst gövde	2 adet
45mm x 90mm x 71.5cm sigma profil	Direksiyon	1 adet
45mm x 90mm x 55 cm sigma profil	Alt gövde	2 adet
45mm x 45mm x 22.5 cm sigma profil	Dik taşıyıcı	4 adet
45mm x 90mm x 10.5 cm sigma profil	Arka gövde	2 adet
45mm x 45mm x 20.5 cm sigma profil	Motor bağlantı	2 adet
Zincir – 120cm	Güç iletimi	1 adet
Dişli	Step motor güç aktarımı	3 adet
35cm*50cm düzlem	Elektronik ekipman taşıyıcısı	1 adet
21cm *5cm tekerlek	Hareket elemanı	4 adet
Köşe bağlantı elemanı	Mekanik montaj	16 adet

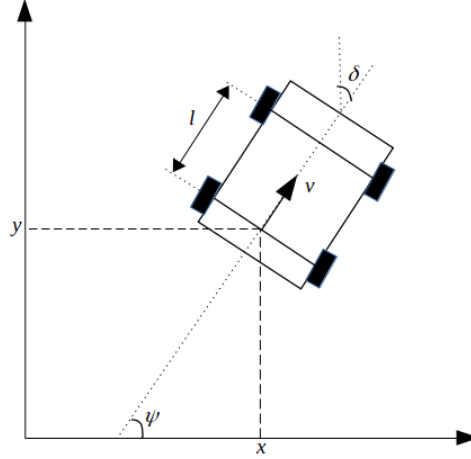


Şekil 3.4 Mekanik tasarım perspektif görünüş



Şekil 3.5 Mekanik tasarım yandan görünüş

### 3.2.1. Araba benzeri mobil robot modeli



Şekil 3.6 Araba benzeri robot modeli

Modern otomobillerin büyük çoğunluğu, arkadan itişli önden direksiyonlu araç modelini benimsemiştir. Araba benzeri model olarak isimlendirilen bu araç yapısında ön aks arkadan bağımsızdır. Arka aks, eksenel bir hareket yapmazken ön aks hareketli bir yapıdadır. Bu da aracın genel oryantasyon açısından ( $\psi$ ) farklı olarak direksiyon açısı ( $\delta$ ) isimli yeni bir açıyı meydana getirir. Holonomik bir yapıda olmayan araba benzeri araç modeli çeşitli hareket kısıtlarına sahiptir. Arkadan itişli önden direksiyonu araba benzeri mobil robot kinematiği Şekil 3.6'da gösterilmiştir ve dört farklı durum bileşeni  $x = [x(t) \ y(t) \ \Psi(t) \ v(t)]^T$  ve 2 farklı kontrol girişi  $u(t) = [\delta(t) \ a(t)]^T$  içerir.(Majd, Razeghi-Jahromi et al. 2020)

Gösterimde t zamanken, 'l' mobil tarım robotunun ön ve arka aksları arasındaki uzunluktur. X ve y arka aksın orta noktasının boylamsal ve yanal konumlarıdır. V , Aracın hızını temsil eder ve arka ekseninin merkezinden gösterilmiştir bunun sebebi aracın ileri geri hareketinin arka tekerleklerinden elde edilmesidir.  $\Psi \in [-\pi, \pi]$  ise aracın yönelim açısıdır.  $\delta$  , aracın konumuna göre ön tekerleklerin direksiyon açısıdır. Gösterimden de anlaşılacağı üzere ön tekerleklerin eksenel açısı aracın oryantasyon açısıyla aynı olmak zorunda değildir, bu özellik modelin karakteristik yanlarından biridir.

$$\dot{x}(t) = v(t) \cos \Psi(t) \quad (3.1)$$

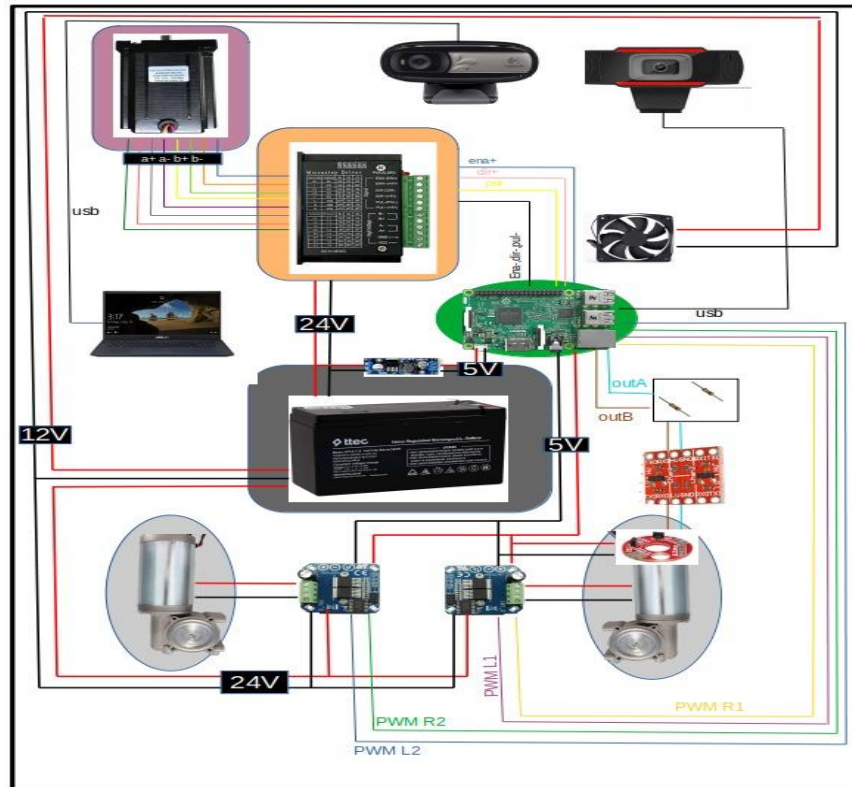
$$\dot{y}(t) = v(t) \sin \Psi(t) \quad (3.2)$$

$$\dot{\Psi}(t) = \frac{1}{l} v(t) \tan \delta(t) \quad (3.3)$$

$$\dot{v}(t) = a(t) \quad (3.4)$$

Araç tasarımında aks yapılarına yer verilmemiştir. Direksiyon mekanizması için aks yapısı ile aynı görevi üstlenen gergin zincir kullanılmıştır ve tekerlek merkezleri aksel olarak eşit ve simetrik olarak konumlandırılmıştır. Arka tekerler ise yine aynı şekilde aksel olarak eşit ve simetrik. Ayrıca eşit dönme sağlanması için aynı sürücülerden sürülmesi hedeflenmiştir. Arkaya konumlandırılmış tahrik motorlarında farklılıkların önüne geçmek için aynı markanın aynı değerlere sahip ürünleri kullanılmıştır. Böylece aks yapısının özellikleri korunmuştur ve aracın araba benzeri mobil robot modeline benzetimi tamamlanmıştır.

### 3.3. Mobil Tarım Robotunun Elektronik Tasarımı



Şekil 3.7 Mobil robotun elektronik tasarımı

Mobil tarım robotunun elektronik tasarımı kullanılan ekipmanlara göre ergonomik ve kablo yönetimi esaslarına uygun tamamlanmıştır (Şekil 3.7). Herhangi bir arıza durumunda müdahaleye uygun olarak tasarlanmıştır. Tüm elektronik ekipmanların montajı mekanik tasarım ve montaj bittikten sonra araç üzerine taşınmış ve sabitlenmiştir. Saha deneylerinden önce DC motorların ve step motorların kararlılıkla çalışıp çalışmadığı tekerlerin yerden bağlantısı kesilerek kontrol edilmiştir. Tarım robotunda kullanılan elektronik ekipmanların tamamı tabloda sunulmuştur.

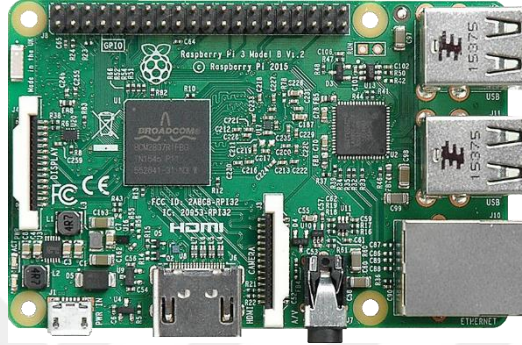
**Çizelge 3.3** Elektronik ekipmanlar

Ekipman	Görevi	Adet
Raspberry pi 3 b+	Temel hareket, sensör verileri ve matematiksel hesaplamalar için kontrol bilgisayarı	1 adet
Pc	Yörünge doğruluk analizi için kontrol bilgisayarı	1 adet
Kormas 24V dc motor	Aracın ileri-geri hareketi sağlamak	2 adet
Leadshine 57hs22-a step motor	Robotun yönelim hareketini sağlamak	1 adet
BTS7960 DC Motor sürücüsü	Dc motorların hız kontrolü	2 adet
TB6600 MicroStep Motor Sürücüsü	Step motorun konum ve hız kontrolü	1 adet
100 pulse manyetik enkoder	Tekerlek odometresi birimi	1 adet
5V – 3.3V TTL logic seviye dönüştürücü	Raspberry pi 3 b+ bilgisayarının GPIO pinlerini yüksek voltajdan korumak	1 adet
10k $\Omega$ direnç	Olası yüksek gerilimi düşürüp devre elemanlarını korumak	2 adet
Logitech C-170 Webcam	Görsel odometre birimi	1 adet
Kingdata KD999	Yörünge doğruluk analizi için görsel girdi sağlamak	1 adet
24 volt soğutucu fan	Raspberry pi 3 b+ bilgisayarının işlemcisini soğutmak	1 adet

### 3.3.1. Elektronik Ekipmanlar

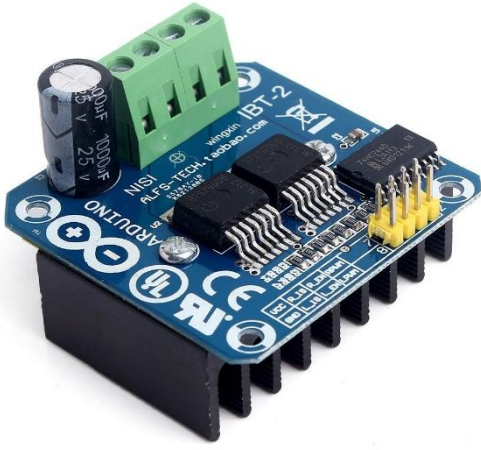
Raspberry pi 3B+ : Broadcom BCM2837 ana kartlı ve 1.2 GHz 64-bit dört çekirdekli ARM Cortex-A53 merkezi işlem birimli (CPU) tek kartlı bilgisayardır (Şekil 3.8). Broadcom VideoCore IV @ 250 MHz Görsel işlem birimi ve 1 GB paylaşımlı RAM özellikleriyle robotik projelerde sıklıkla tercih edilen Raspberry pi model 3B+ ülkemizde uygun fiyatı ve eğitici kaynak mevcudiyeti sebebiyle de en popüler Raspberry Pi ürünüdür. GNU/Linux tabanlı işletim sistemlerini destekleyen bilgisayar biriminin kendi özgün Debian tabanlı Raspbian işletim sistemiyle kullanılması tavsiye

edilir. MicroSDHC slotu yardımıyla depolama işlemi yapılan Raspberry Pi'de 17 adet GPIO pini, 4 adet USB portu, ethernet girişi, bluetooth 4.1 bulunur. 5V MicroUSB ya da GPIO pinlerinden beslenilerek projelerde rahatlıkla kullanılabilir. Tez çalışmasında aracın temel kontrolcüsü olarak raspberry pi kullanılmıştır. Tekerlek odometresi birimlerinin çalışması ve görsel odometre görüntü işleme uygulamalarının tamamı Raspberry Pi kontrolcüsünde python3 programlama dili ile kodlanmıştır.



Şekil 3.8 Raspberry pi 3b +

BTS7960 43A DC motor sürücü ve KORMAS DC 24V redüktörlü motor: BTS7960 entegresi yüksek akım verebilen yarım köprü (Half Bridge) entegredir (Şekil 3.9). İki tane kullanılarak tam köprü (H-Bridge) şeklinde üretilen modülde DC motorun yön ve devir kontrolü yapılabilir. 5,5 – 27 V besleme voltajını destekleyen sürücü kartında 43 ampere kadar çıkış akımını destekler. Çalışmada DC motor sürücü entegresi aracın ileri geri hareketini sağlayan DC 24V redüktörlü motor çiftinin hız kontrolü için kullanılmıştır. Kullanılan KORMAS DC motor 24 volt 230 RPM değerlerine sahiptir (Şekil 3.10). Mekanik montaj kolaylığı sebebiyle 1/15 redüktör oranlı tercih edilmiştir. Ayrıca tekerlek odometresi birimi enkoder dc motorun miline entegredir.

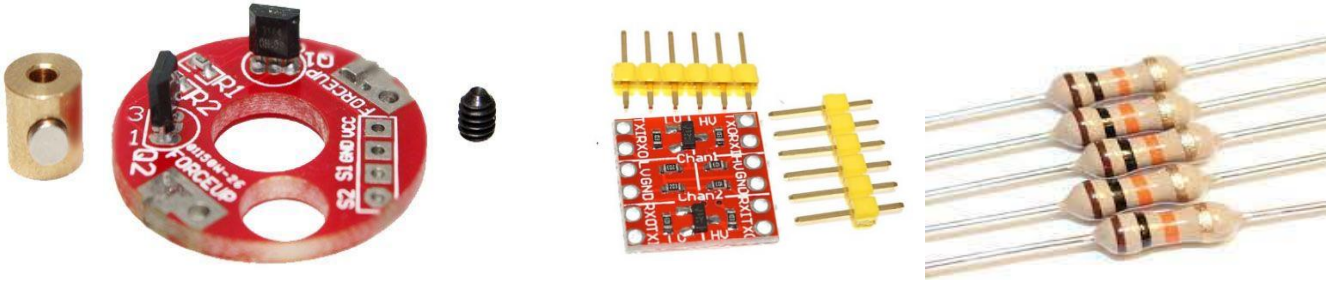


Şekil 3.9 BTS7960 43A DC motor sürücü



Şekil 3.10 KORMAS DC 24V redüktörlü motor

5V manyetik enkoder: Temelde, Manyetik enkoder, konum bilgilerini manyetik alandaki değişiklikleri olarak tanımlayarak, elektriksel sinyallerine dönüştürür ve çıkış elde edilir. Çalışmada DC motora entegre 5V beslemeli, 4 kablolu, 100 pulse manyetik enkoder kullanılmıştır. Enkoder geri besleme voltajını düşürmek ve Raspberry pi pinlerini korumak için 2 adet 1k  $\Omega$  direnç ve 1 adet 5V – 3.3v TTL logic seviye dönüştürücü kullanılmıştır. Beraber kullanılan bu elektronik ekipmanlar Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



(a)

(b)

(c)

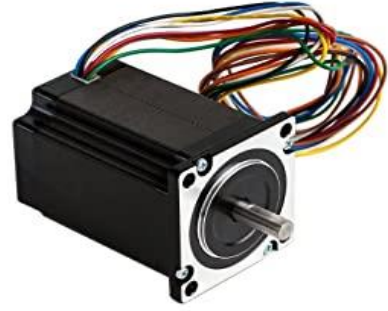
Şekil 3.11 (a) 100 pulse manyetik enkoder (b) 5V-3.3V TTL logic seviye dönüştürücü (c) 1k  $\Omega$  dirençler

TB6600 4A Step motor sürücü ve leadshine 57HS22-A nema 23 step motor: TB6600 4A Step motor sürücü 9-42 V aralığında çalışan mikrostep sürücü kontrol kartı maksimum 4A akım çeken step motorların kontrolünde kullanılır. Dahili aşırı ısınma, aşırı akım, ters gerilim koruması özellikleriyle ve uygun fiyatıyla sıklıkla tercih edilen bir motor sürücü kartıdır (Şekil 3.12). Tez çalışmasında Leadshine 57HS22-A Nema 23 Step motoru kontrol etmek için kullanılmıştır(Şekil 3.13). Leadshine 57HS22-A Nema

23, 2 fazlı, 1.8 adım açılı, 2.2 N\*m torklu step motordur. 8 kablolu yapısıyla bipolar seri, bipolar paralel ve tek kutuplu olarak farklı şekiller bağlanabilir. Tez çalışmasında aracın yönlendirilmesinden görevli olan step motor ve sürücü çifti dişlileri ve güç aktarım zincirini tahrik ederek ön tekerleklerin oryantasyonunu sağlar.



Şekil 3.13 TB6600 4A Step motor sürücü



Şekil 3.13 Leadshine 57HS22-A Nema 23

Web Kameralar – Logitech C-170 ve KINGDATA K999: Aracın görsel odometre uygulaması için 640 x 480, 5mp, USB 2.0 bağlantılı Logitech C-170 web kamera kullanılırken, yörünge takibi performansını ölçmek adına 640 x 480, 5mp, USB 2.0 KINGDATA K999 model web kamera kullanılmıştır.



Şekil 3.14 Logitech C-170



Şekil 3.15 KINGDATA K999

Ttec 12V – 7A güç kaynağı ve 12v soğutucu fan: Aracın arımsal arazideki deneylerinde ihtiyacı olan enerjiyi sağlaması adına Ttec marka 12V ve 7A çıkış değerleri olan yeniden şarj edilebilir kuru akü çifti kullanılmıştır. Sistemin ihtiyacı olan

tüm enerji akü vasıtasıyla temin edilmiştir. Ayrıca Raspberry pi kartının deney esnasında ısınması probleminin önüne geçmek için mobil tarım robotunda 12V soğutucu fan kullanılmıştır.



Şekil 3.16 Ttec marka 12V 7A akü



Şekil 3.17 12V soğutucu fan

### 3.4. Görsel Odometre

Görsel odometre yöntemi 80'li yıllardan bu yana kullanılan ve tekerlek odometresi birimlerinden farklı olarak tekerlek kayması ve patinaj durumuna duyarlı bir odometre yöntemidir. Tez çalışmasında görsel odometre yöntemi QR kodla beraber test edilmiş ve deney ortamına eklenmiştir. Araç konumlandırmasında oluşturulan QR kod ile araç önüne konumlandırılmış kamera arası mesafe kullanılmıştır.

#### 3.4.1. Etiket tasarımı

1994 yılında Japonya merkezli Denso firması tarafından geliştirilip patentlenen QR (Quick Response) kodlar, kare kod olarak da bilinir. <https://www.qrcode.com/en/history/> 21.09.2022 Siyah ve beyaz motiflerden oluşan kod tasarımları ilk başta otomotiv endüstrisi için geliştirilse de sonrasında hayatın pek çok alanında popüler olmuştur. Özellikle uzak doğu ülkelerinde eğlence sektöründe ve multimedya iletiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Üretmenin ve saklamanın son derece kolay olduğu karekodlar için NTT DoCoMo firması tarafından çeşitli standartlar getirilmiştir. Karekodlar ile internet sitesi adresleri, yazı, ses, görseller şifrelenebilir ve

paylaşılabilir. Günümüzde pek çok mobil cihazla QR kod okuyucular bulunmakta ve yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Görsel odometreli yörünge kontrolü için deney sahasına yerleştirmek üzere karekod üretilmiştir. Karekodun üretimi için ücretsiz QR kod üretici internet sitesi <https://tr.qr-code-generator.com/> ile 300 x 300 piksel boyutunda karekod oluşturulmuştur. Üretilen kodun içerisine ise binary sayı sistemi sayılarından 0001 yani 1 gömülmüştür. Görsel odometre deneylerinde kullanılacak QR kod Şekil 3 .18 de görülebilir. Üretilen karekod Kamera okumaları esnasında bu değer döndürülerek yeniden desimal sayılar elde edilecektir.



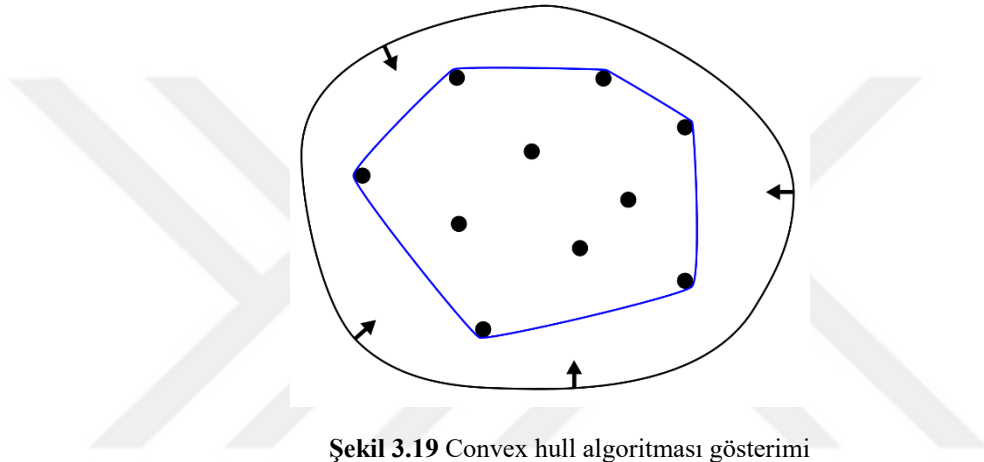
Şekil 3.18 Üretilen QR kod

### 3.4.2. Karekodun okunması ve ölçüm kalibrasyonu

Çalışma, karekodların okunması ve gömülü değerlerin elde edilmesi için pyzbar kütüphanesi, temel görüntü işleme uygulamalarının yapılması için opencv kütüphanesi, mtaris işlemleri için numpy kütüphanesi ve temel matematik işlemleri için math kütüphanesi kullanılarak python3 programlama dilinde ve Pycharm derleyicisinde yapılmıştır. Mesafenin elde edilmesi için temel öklid uzaklığından ve convex hull algoritmasından ve yararlanılmıştır. Kalibrasyon ile ölçümlerin gerçek değerlere yakınsamak adına referans olarak tanımlanan karekod tanımlanmış ve referans ölçümleri yapılmıştır.

### 3.4.2.1. Convex hull yöntemi

Bir şeklin veya noktalar kümesinin tüm elemanlarını içeren en küçük dış noktalar kümesi convex hull (dış kabuk) olarak isimlendirilir. Hesaplamalı geometride şeklin dış hatlarını belirlemek için pek çok algoritma geliştirilmiştir. Tez çalışmasında karekod şeklinin mesafe ölçümü öncesinde dış kısımdan işaretlemek ve matematiksel dönüşümleri yapmak için kullanılmıştır. Şekil 3.19 da convex hull algoritmasının çalışma mantığı bulunabilir



Şekil 3.19 Convex hull algoritması gösterimi

Çalışmada Asadullah Dal tarafından geliştirilen Convex hull algoritması kullanılmıştır. Algoritma dış nokta arama ile işe başlar eğer noktaların sayısı köşe sayısı olan dörtten fazla ise birleştirerek farklı renkte boyar ve kare kodu çevreler ancak; hull noktası sayısı 4'ten küçük ise sadece bulunduğu noktaları yani köşeleri işaretler. Sonra noktaları birleştirerek kare kodun dış kabuğunu oluşturur. Mesafe tanıma işlemi oluşturulan dış kabuğun genişliği üzerinden yapılır. Aşağıda convex hull oluşturma işlemine dair algoritma verilmiştir.

1. BAŞLA
2. TANIMLA  $x = 0, y = 0$ , kabuk genişliği = 0 ve öklid uzaklığı = 0
3. RGB resim> DÖNÜŞTÜR> siyah-beyaz resim
4. OLUŞTUR> QR kod objesi
5. OLUŞTUR> noktalar
6. EĞER;
7. noktaların sayısı >5;

Dış kabuk = çokgen

8.Değilse;

Dış kabuk = noktalar

9. dış kabuk sayısı>> ÇİZ >> çokgen

### 3.4.2.2. Öklid uzaklığının elde edilmesi

Çokgen oluşturma işleminden sonra kare kodun etrafını saran renkli bir çokgen oluşur, sonrasında da çizdirilir. Görüntü çerçevesindeki QR kodun genişliğini bulmak için ise, ilk sifıra eşit noktalar kabuğun ilk değerleri olarak atanır ve atanmış değerler artırılarak değiştirilir.  $x$ ,  $y$ ,  $x_1$  ve  $y_1$  değerleri elde edilerek referans resminin genişliğini tahmin etmek için öklid uzaklığı (Eşitlik 3.40) hesaplanır.

$$\text{Öklid uzaklığı} = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (3.5)$$

Mesafe hesaplama yöntemi bir referans görseline ve gerçek kare kod genişlik ve kameraya olan gerçek uzaklık değerlerine ihtiyaç duyar bu işlemi piksel birimli yerel uzunluk değeri ve cm birimli mesafe değerini hesaplarken kullanır.

Çalışmada kamera ile nesne arasındaki uzaklığını tahmin etmek için Eşitlik 3.41 kullanılır.

$$\text{yerel uzunluk} = \frac{\text{sanal obje genişliği (piksel)} * \text{bilinen mesafe (cm)}}{\text{bilinen genişlik (cm)}} \quad (3.6)$$

Eşitlik Yerel uzunluk değeri sanal cm cinsinden olan gerçek genişlik ile çarpılarak sanal değere bölünür, bu bağlantıdan elde edilen elde edilen değer mesafedir (Eşitlik 3.42).

$$\text{mesafe} = \frac{(\text{bilinen genişlik} * \text{yerel uzunluk})}{\text{sanal obje genişliği}} \quad (3.7)$$

Elde edilen mesafe değişkeni Şekil 3.20’de görüleceği üzere hesaplanmıştır ve hareket algoritmalarında mobil robot konumlandırmasında kullanılmıştır.

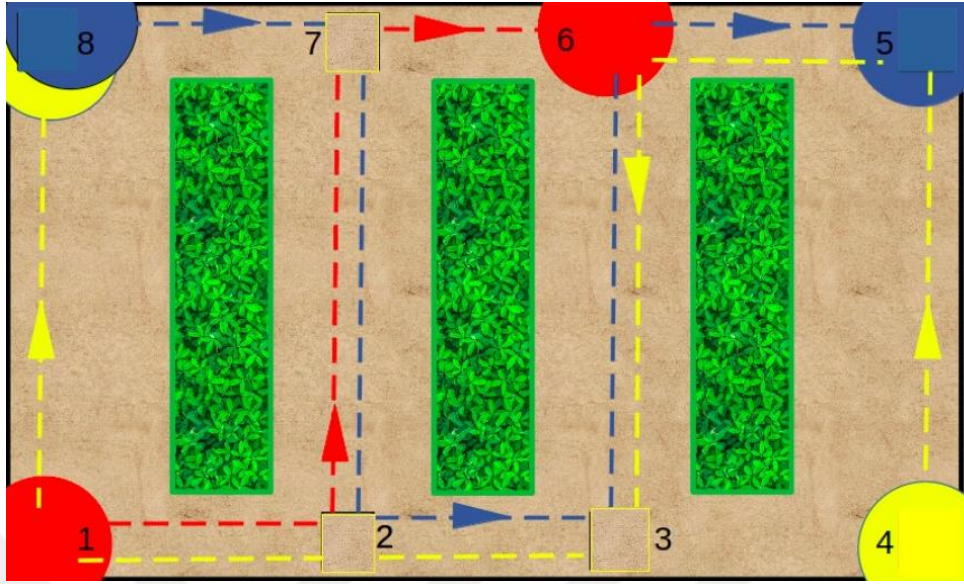


Şekil 3.20 QR koddan mesafe değişkeninin elde edilmesi

### 3.5. Hareket Algoritmaları

Mobil tarım robotunun lokalizasyonunun yapılmasının arkasındaki fikir alınan doğru konum verisini artırmaktır. Hareketin türüne göre ya da araziye ve evre Şartlarına göre alınan doğru konum bilgisi performansı değişebilir. Bu sebeple mobil robotun tarım arazisinde hareketlerinin kurgulandığı n çalışma planlanmıştır. Gerçek çıkarımların yapılacağı deney ise kapalı ortamda tarımsal olmayan arazide gerçekleştirilecektir.

### 3.5.1 Tarımsal arazide lokalizasyon deneyi algoritması



Şekil 3.21 Tarımsal arazide lokalizasyon deneyi hareket senaryoları

Tasarlanan ve gerçekleştirilen mobil tarım robotunun konumlandırma performansını ölçmek için 3 farklı hareket senaryosu kurgulanmıştır. Senaryoları anlatan görsel Şekil 3.21’de verilmiştir. Hareket senaryolarındaki temel amaç başlangıç istasyonundan harekete başlayarak tarımsal ürünlere zarar vermeden ve ekili olmayan alanları kullanarak hareketi tamamlamaktır. Tarımsal görevler özelinde düşünülürse hareket senaryoları mahsul ve tarım ekipmanlarının iki nokta arasında taşınmasına benzetilebilir.

İlk senaryoda robot 1 numaralı istasyondan harekete başlar ve 2 numaralı istasyondan sola dönerek 7 numaralı istasyon yönünde hareket eder. Sonrasında 7 Numaralı istasyondan sağa döner ve hareketini 6 numaralı istasyonda bitirir. Şekilde kırmızı renkli güzergâh birinci senaryoya aittir.

İkinci senaryoda 8 numaralı istasyondan harekete başlayan mobil tarım robotu 7 numaralı istasyon hizasına kadar yatay yönde hareket eder. Şekilde mavi renkli güzergahta görüldüğü üzere 7 numaralı istasyondan sağa dönerek 2 numaralı istasyon yönüne doğru ilerler. 2 numaralı istasyondan sola döner ve 3 numaralı istasyona ulaşır. Sonrasında sola dönerek 6 numaralı istasyona hareket eder. 6 numaralı istasyondan sağa döner ve hareketini 5 numaralı istasyonda bitirir.

Üçüncü senaryoda ise araç 4 numaralı istasyondan harekete başlar ve 5 numaralı istasyona doğru hareket eder. Daha sonra sola dönerek 6 numaralı istasyona ulaşır ve

tekrar sola dönerek 3 numaralı istasyona doğru ilerler. 3 numaralı istasyona ulaşınca sola dönerek önce 2 numaralı sonra 1 numaralı istasyona ulaşır. 1 numaralı istasyondan sağa dönerek 8 numaralı istasyona doğru hareket eder ve hareketini 8 numaralı istasyonda sonlandırır.

### 3.5.1.1 Tarımsal arazide tekerlek odometreli hareket algoritmaları

Tez Çalışmasında DC bağlantılı tahrik tekerlerinden bir tanesinde enkoder kullanılarak tekerlek odometreli deney öncesi uygulama yapılmıştır. Hareket algoritması sadece enkoderin adım sayısı kullanılarak oluşturulmuş ve bu şekilde senaryolar tamamlanmıştır. Birinci hareket senaryosu algoritması aşağıda verilmiştir.

1. counter == 0
2. counter == enkoder\_verisi
3. enkoder>> OKU
4. normal mod == 80/100 PWM
5. yavaş mod == 25/100 PWM
6. durdurma modu = 0/100 PWM
7. BAŞLA
8. normal mod>> DÜZ GİT
9. counter>> ARTTIR
10. EĞER;
11. counter == 80
12. yavaş mod>> DÜZ GİT
13. EĞER;
14. counter == 100
15. sol yön>> DÖN
16. EĞER;
17. counter > 100 ve counter < 160
18. normal mod>> DÜZ GİT
19. EĞER;
20. counter >= 160 ve counter < 180
21. yavaş mod>> DÜZ GİT
22. EĞER;

23. counter == 180
24. sağ yön>> DÖN
25. EĞER;
26. counter > 181 ve counter < 280
27. normal mod>> DÜZ GİT
28. DEĞİLSE;
29. durdurma modu>> DUR

İkinci hareket senaryosu algoritması aşağıda verilmiştir.

1. counter == 0
2. counter == enkoder\_verisi
3. enkoder>> OKU
4. normal mod == 80/100 PWM
5. yavaş mod == 25/100 PWM
6. durdurma modu = 0/100 PWM
7. BAŞLA
8. normal mod>> DÜZ GİT
9. counter>> ARTTIR
10. EĞER;
11. counter == 80
12. yavaş mod>> DÜZ GİT
13. EĞER;
14. counter == 100
15. sağ yön>> DÖN
16. 18. EĞER;
17. counter > 100 ve counter < 160
18. normal mod>> DÜZ GİT
19. EĞER;
20. counter >= 160 ve counter < 180
21. yavaş mod>> DÜZ GİT
22. EĞER;
23. counter == 180
24. sol yön>> DÖN

25. EĞER;
26. counter > 181 ve counter < 260
27. normal mod >> DÜZ GİT
28. EĞER;
29. counter >= 260 ve counter < 280
30. yavaş mod >> DÜZ GİT
31. counter == 280
32. sağ yön >> DÖN
33. counter > 180 ve counter < 340
34. normal mod >> DÜZ GİT
35. EĞER;
36. counter >= 340 ve counter < 360
37. yavaş mod >> DÜZ GİT
38. EĞER;
39. counter == 360
40. sağ yön >> DÖN
41. EĞER;
42. counter > 361 ve counter < 460
43. normal mod >> DÜZ GİT
44. DEĞİLSE;
45. durdurma modu >> DUR

Üçüncü hareket senaryosu algoritması ise;

1. counter == 0
2. counter == enkoder\_verisi
3. enkoder >> OKU
4. normal mod == 80/100 PWM
5. yavaş mod == 25/100 PWM
6. durdurma modu = 0/100 PWM
7. BAŞLA
8. normal mod >> DÜZ GİT
9. counter >> ARTTIR
10. EĞER;

11. counter == 60
12. yavaş mod >> DÜZ GİT
13. EĞER;
14. counter == 80
15. sol yön >> DÖN
16. EĞER;
17. counter > 80 ve counter < 160
18. normal mod >> DÜZ GİT
19. EĞER;
20. counter >= 160 ve counter < 180
21. yavaş mod >> DÜZ GİT
22. EĞER;
23. counter == 180
24. sol yön >> DÖN
25. EĞER;
26. counter > 180 ve counter < 240
27. normal mod >> DÜZ GİT
28. EĞER;
29. counter >= 240 ve counter < 260
30. yavaş mod >> DÜZ GİT
31. EĞER;
32. counter == 260
33. sağ yön >> DÖN
34. EĞER;
35. counter > 260 ve counter < 440
36. normal mod >> DÜZ GİT
37. EĞER;
38. counter >= 440 ve counter < 460
39. yavaş mod >> DÜZ GİT
40. EĞER;
41. counter == 460
42. sağ yön >> DÖN
43. EĞER;
44. counter > 460 ve counter < 520

- 45. normal mod >> DÜZ GİT
  - 46. EĞER;
  - 47. counter  $\geq$  520 ve counter  $<$  540
  - 48. yavaş mod >> DÜZ GİT
  - 49. DEĞİLSE;
  - 50. durdurma modu >> DUR
- Olarak planlanıp kodlanmıştır.

### 3.6. Yörünge Doğruluk Analizi

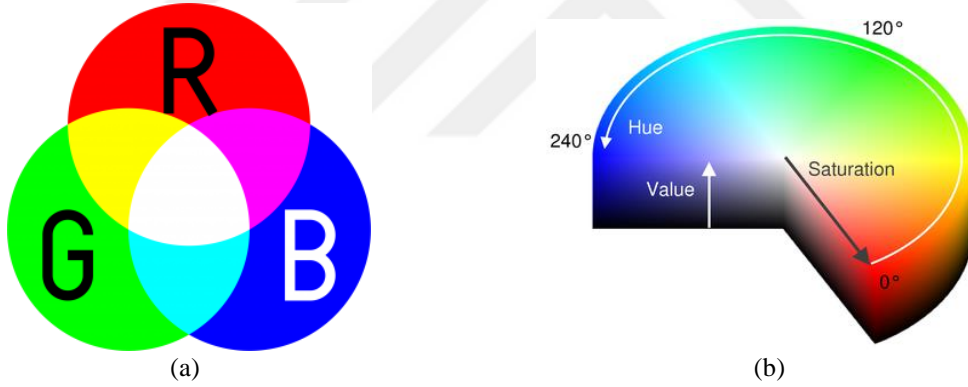
Yörünge doğruluk analizi, aracın kurgulanan planlanan hareketi esnasında ne kadar doğrulukla hareket ettiğini ölçmek için kullanılır ve aracın otonom hareket performansına dair fikir verir. Çalışmada kullanılan odometre ekipmanlarının, mekanik ve elektronik bileşenlerin ve hareket algoritmasının gerçek zamanlı olarak görev özelinde test edilmesi amacıyla yörünge doğruluk analizini elde etme uygulamasının geliştirilmesi ve kullanılması planlanmıştır.

Pek çok simülasyon ortamında hazır analiz uygulamaları bulunur ve kolaylıkla gerçek zamanlı uygulamalara entegre edilebilir. Ancak bu çalışmada simülasyon ortamları kullanılmamıştır. Lokalizasyon performansını ölçmek için referans şeridi ve kamera kullanımı tercih edilmiştir. Deney esnasında aracın önüne yolu ve referans şeridini görecektir şekilde konumlandırılan kamera video kaydı alır. Video kaydı deneyden sonra yazılımsal olarak belirli bir örnekleme zamanı ile fotoğraf çerçevelerine ayrılır. Analiz işlemine geçmeden önce fotoğraflara Gauss bulanıklığı, medyan bulanıklığı ve renk filtresi uygulanmıştır. Filtrelerin her bir çerçevede kameranın referans şeridine göre konumu aracın yanal kaymalarını ölçmek için kullanılarak elde edilen kaymalar piksel-metre dönüşümü ile gerçek değerlere döndürülür. Video analizinden sonra gerçek değerler yazılımsal olarak grafiklendirip aracın anlık hatası görselleştirilir. Yörünge takibi uygulaması ile gerçek hata değerlerinin elde edilmesi ve grafiklendirme işlemi gerçek zamanlı olarak değil deneylerden sonra yapılmıştır. Deney esnasında yalnızca video kamera ile görüntü alınmıştır. Gerçek zamanlı yapılmamasının arkasındaki temel fikir, kontrolcünün filtreleme işlemi ve fazla sayıdaki sensör okumaları yapması sebebiyle performansında yaşanabilecek olası problemlerin önüne geçmektir. Kameralı yörünge takibi uygulamasının geliştirilmesinde gerçek zamanlı

bilgisayar görsü kütüphanesi olan Open.CV ve 640\*480 piksel çözünürlüklü Logitech C170 model webcam kullanılmıştır.

### 3.6.1. HSV uzayı ve renk filtresi

RGB renk uzayı renkleri farklı tonlardaki üç temel rengin (kırmızı, yeşil, mavi) karışımı ile tanımlar. HSV renk uzayı ise Hue, Saturation ve Value terimleri ile rengi tanımlar. RGB de renklerin karışımı kullanılmasına karşın HSV de renk, doyumluk ve parlaklık değerleri kullanılır. RGB ve HSV renk uzaylarını temsil eden görseller Şekil 3.22’de verilmiştir. Doyumluk rengin canlılığını belirlerken parlaklık rengin tonunu yani aydınlığını ifade eder. HSV uzayında siyah renk için renk ve doyumluk değerleri 0 ile 255 arasında herhangi bir alabilir iken parlaklık değeri sıfırdır. Beyaz renkte ise parlaklık değeri 255’tir. Bu özellikleriyle HSV renk uzayı görüntü işleme uygulamalarında renk filtresi oluştururken RGB renk uzayına göre daha avantajlıdır.

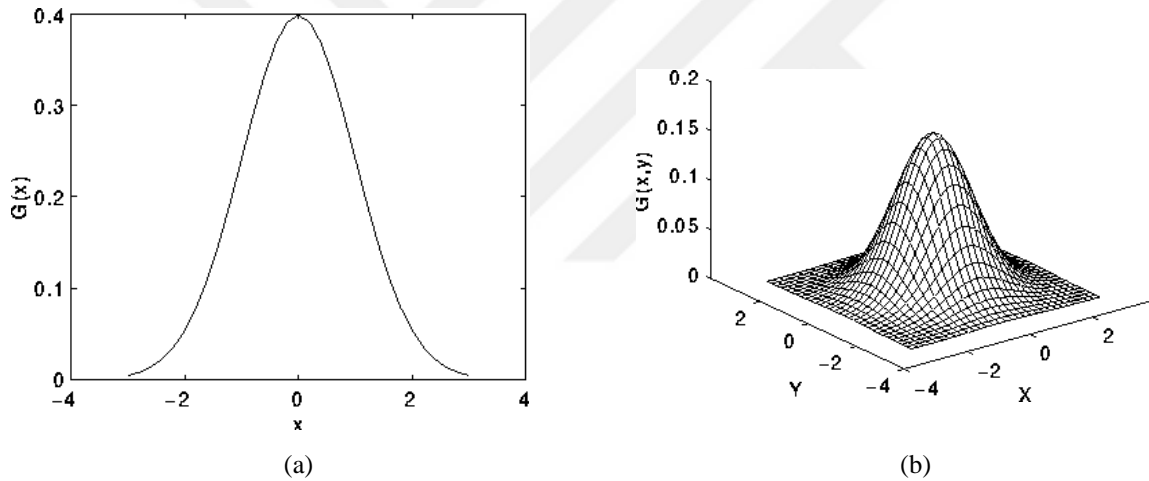


Şekil 3.22(a) RGB renk uzayı (b) HSV renk uzayları

### 3.6.2. Gauss bulanıklığı

Gauss bulanıklığı filtresi, görüntüleri bulanıklaştırarak, görüntüdeki ayrıntı ve gürültüyü azaltmak için kullanılan 2 boyutlu konvolüsyon filtresidir. Konvülüsyon, resimdeki çekirdek matris ile piksellerin çarpılması ile elde edilir. Gauss bulanıklığı filtresi aşağıda resmi verilen çan şeklindeki grafikte temsil edilebilecek farklı bir çekirdek matris kullanır. Temel de görüntüdeki standart sapmayı kullanarak görüntüyü yumuşatır. Gaussian filtrelemesi aynı zamanda bir fourier dönüşümü olarak adlandırılabilir. Gauss bulanıklığı filtresinde filtreleme işlemi önce yatay düzlemde ardından elde edilen sonuçla beraber dikey ekseninde gerçekleştirilebilir.

Gauss'un çan şeklindeki grafiğini veren ifade Şekil 3.23'te 2 boyutlu düzlem ve 3 boyutlu uzay olarak gösterilmiştir.

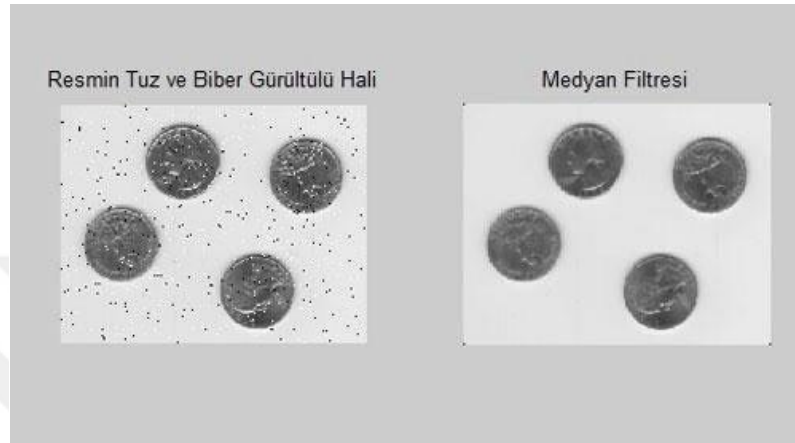


Şekil 3.23 (a) 2 boyutlu gauss çanı (b) 3 boyutlu gauss uzayı

### 3.6.3. Medyan bulanıklığı

Medyan bulanıklığı görseldeki gürültüyü azaltmak için kullanılır ve şablon boyutu arttıkça görselde dahaki yumuşatma oranı artar. Filtre her pikselin değerini hesaplamak için yakınındaki komşu piksellerin değerlerini esas alır. Medyan bulanıklığında bir piksel değeri komşu pikselleri sıralayarak sıranın ortasındaki değeri alır. Eğer incelenen bölgede çift sayıda piksel varsa, orta değer ortada bulunan iki pikselin ortalaması kullanılarak hesaplanır. Bu filtre tipi uzaysal çözünürlüğü bozmadan, hedef görüntüden farklı noktasal boyutta veya çizgisel gürültülerini

temizlemek için idealdir. Bu sebeple ikili (binary) tipte gürültülerde başarılı sonuçlar vermesine rağmen Gauss gürültüsünde hedeflenen başarılı filtreleme işlemini yakalayamaz. Gürültü miktarının filtrenin uygulanmasını güçleştirdiği görüntülerde yani gürültülü piksellerinin sayısı komşu piksellerin sayısının yarısına eşit veya daha fazla olduğu durumlarda bu medyan bulanıklığı filtresi anlamlı seviyede başarılı sonuçlar üretmez. Medyan bulanıklığının yaygın bir örneği Şekil 3.24'te görülebilir.



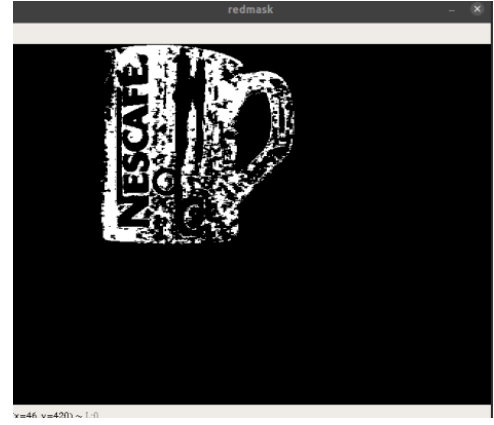
Şekil 3.24 Medyan bulanıklığı

### 3.6.3. Piksel dönüşümleri

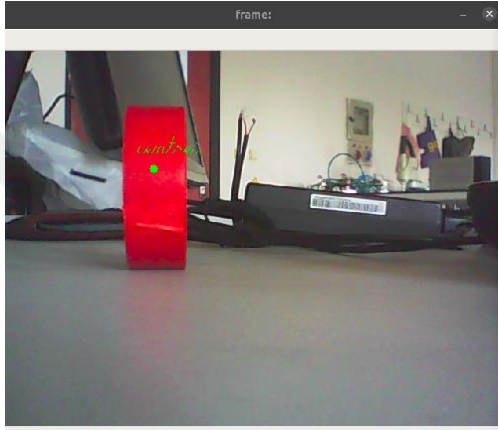
Çalışmada kırmızı rengi diğer renklerden ayırmak için HSV–RGB renk dönüşümü uygulanmıştır. Minimum [161, 155, 84] ile maksimum [179, 255, 255] değerleri arası filtrelenmiştir. Referans şeritlerinin kenarları belirginleştirmek için kontur işlemi yapılmış ve çizilen konturlara göre de şeritlerin alanı ve merkezleri 1000 ms örnekleme zamanı ile piksel cinsinden hesaplanmıştır. Filtrelenen ve merkezleri bulunan kırmızı renkli cisimler Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Kameranın konumlandırılacağı yer ile referans şeridi arası mesafe 26 cm olarak ölçülmüştür. Piksel dönüşümü yapılırken bu değer kullanılmıştır. Piksel sayıları ile gerçek ölçüler karşılaştırıldığında  $2.88 \text{ piksel} = 1 \text{ mm}$  değeri deneysel olarak bulunmuştur. Hata değeri cm olarak elde edilmek istendiğinden piksel dönüştürme sabiti (P) = 0.347 cm olarak belirlenmiştir.



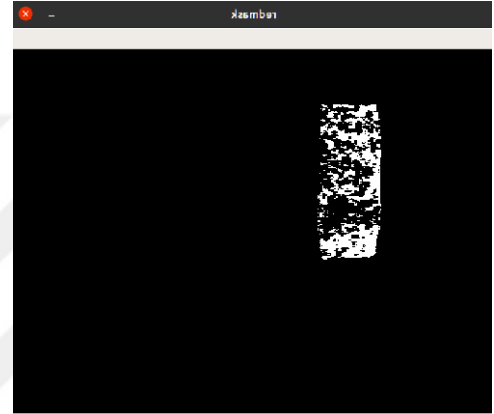
(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 3.25** (a) Filtrelenmiş ve merkezi bulunmuş kırmızı objeler (b) Tasarlanan maske altında kırmızı cisimlerin görüntüsü (c) Filtrelenmiş ve merkezi bulunmuş referans şeridi parçası (d) Tasarlanan maske altında referans şeridi parçasının görüntüsü

Piksel dönüşümlerinin algoritması:

1. BAŞLA

2. Örnekleme zamanı = t

3. Video >> DÖNÜŞTÜR >> Fotoğraf\_Kümesi

4. Fotoğraf\_Kümesi = t \* Fotoğraf

5. Merkez >> BUL >> Fotoğraf

6. Fotoğrafın merkezi = M\_Fot

7. Renk filtresi >> UYGULA >> Fotoğraf

8. Gauss bulanıklık filtresi >> UYGULA >> Fotoğraf

9. Medyan bulanıklık filtresi >> UYGULA >> Fotoğraf

8. Filtrelenmiş fotoğraf = Filt\_Fot

10. Merkez >> BUL >> Filt\_Fot

11. Filtrelenmiş fotoğrafın merkezi = M\_Filt\_Fot

12.  $M_{Fot} - M_{Filt\_Fot} = e$
13. Piksel dönüştürme sabiti = P
14.  $P * MutlakDeğer e = E$
15. EĞER;
16.  $E \geq 0$ ;
17.  $E = HATA$
18.  $HATA \gg BUL \gg Fotoğraf\_Kümesi$
19.  $HATA \gg GRAFİK ÇİZ$
20. BİTİR

### 3.7. Deney

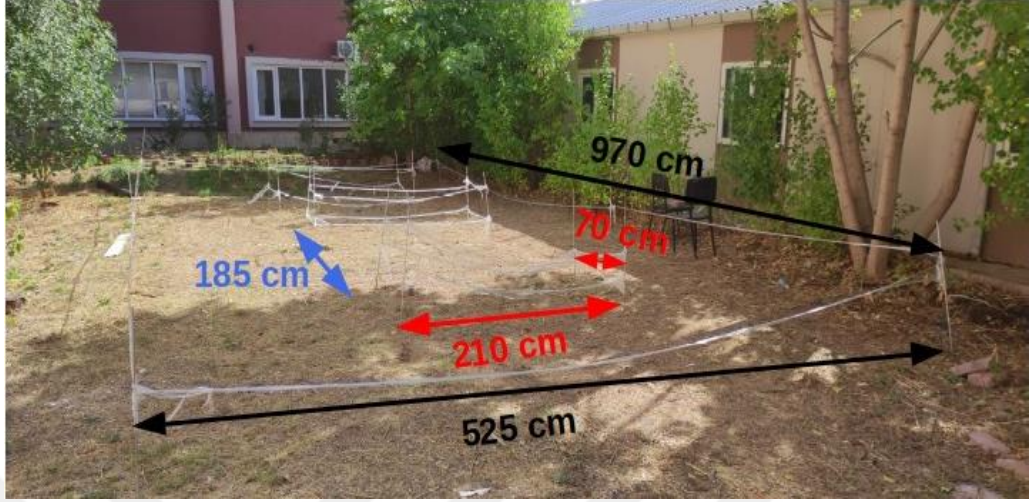
Tez çalışmasında tarımsal arazide ve kapalı ortamda olmak üzere iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Bunlardan tarımsal arazide yapılan lokalizasyon deneyi ön çalışma olarak nitelendirilmiş ve kapalı ortam deneylerinden önce tamamlanmıştır. Belirli bir tarım arazisini çevirerek yapılan deneyde araç mekaniği ve yazılımı test edilmiştir. Bölüm 3.5.1'de bahsedilen hareket senaryoları tekerlek odometresi birimi ile konumlandırma yapılarak tamamlanmıştır. Sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır.

Kapalı alanda kurgulanan deneyde ise aracın ileri hareketi ve sağa dönüşü planlanmıştır. Dönüş öncesinde ve esnasında ne kadarlık bir başarıyla konumlandırma yaptığı test edilmiştir. Farklı mesafelerde ve açılarda gerçekleştirilen deneyde her deney 3 kez tekrarlanarak sonuçların ortalaması alınmış yorumlanarak analiz edilmiştir.

#### 3.7.1 Deney alanının hazırlanması

Tarımsal arazide yapılacak ön çalışma için Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi C blok arazisi içindeki tarım arazisi kullanılmıştır. Kullanılan tarım arazisinin bir bölümünde hali hazırda deneysel tarım çalışmaları yürütülmektedir. Tarımsal olmayan konumlandırma deneyleri ise Teknoloji Fakültesi B blok koridorlarında tamamlanmıştır.

### 3.7.1.1 Tarımsal arazide deney alanının hazırlanması

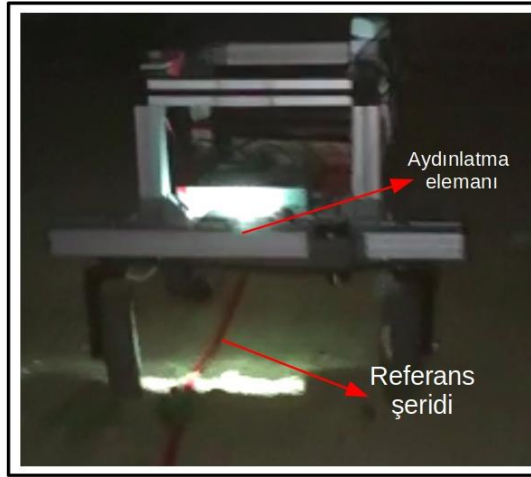


Şekil 3.26 Tarımsal arazide lokalizasyon deneyi alanı

Tarımsal arazideki konumlandırma deneyleri için arazi deney şartlarına uygun hale getirilmiştir. Alan 120 cm demir çubuklarla çevrilerek dışarıdan izole edilmiştir. Aynı demir çubuklar kullanılarak arazi içindeki tarımsal ürünü temsil eden alanlar oluşturulmuş ve demir çubuklar ile çevrelenmiştir. Çubuklar arasına streç filmler bağlanarak ayırma işlemi tamamlanmıştır. Şekil 3.26’da deneyde kullanılacak tarımsal arazi görseli bulunabilir. Mobil robotun açık alanda kullanıcı ile bağlantısını oluşturmak için kablosuz bağlantı yöntemine gidilmiştir. VNC viewer aynı ağa bağlı cihazların IP adreslerinden yararlanarak bu cihazların haberleşmesine imkan veren paket programdır.

Modem yardımı ile ortak ağ oluşturularak uzaktan masaüstü bağlantı programı Vnc viewer ile ağlar eşleştirilmiş ve bilgisayarın kullanıcı ara yüzüne erişilmiştir.

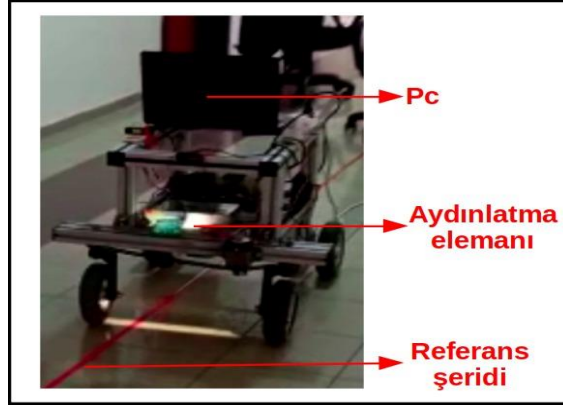
Deney sonuçlarının elde edilmesi için zemin kırmızı şeritlerle kaplanmıştır. Deneyin gece yapılan bölümlerinde harici aydınlatma kullanılarak şeridin kamera tarafından okunan görüntüsü aydınlatılmıştır. Mobil robotta aydınlatma donanımı bulunmamaktadır. Tarım arazisinde mobil tarım robotu görseli Şekil 3.27’de verilmiştir.



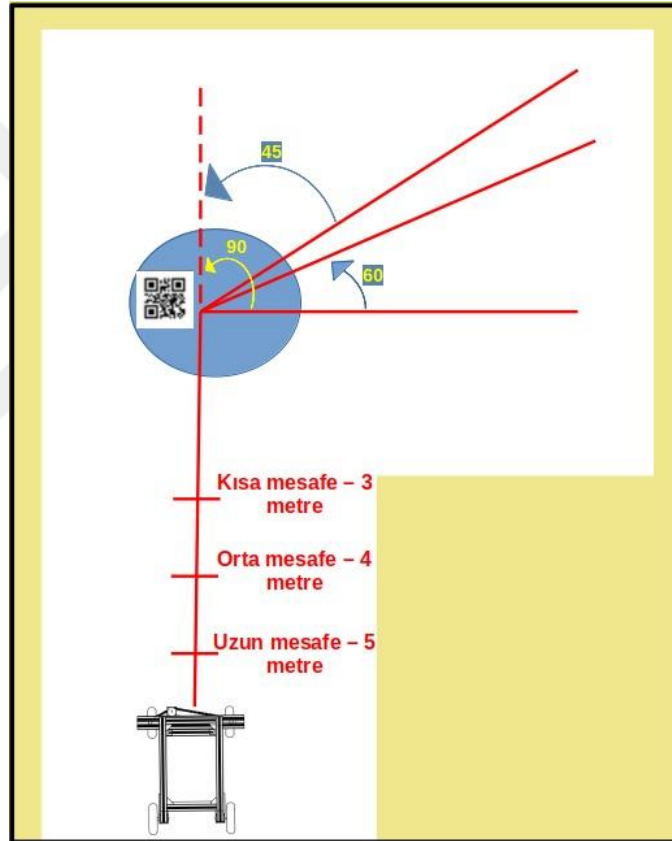
Şekil 3.27 Tarımsal arazide mobil tarım robotu

### 3.7.1.2 Tarımsal olmayan kapalı ortamda deney alanının hazırlanması

Tarımsal olmayan kapalı ortamdaki konumlandırma deneylerinde ön çalışmada yapıldığı gibi modem kullanımıyla ortam ağ oluşturularak uzaktan erişim sağlanmıştır. Ayrıca kırmızı referans şeritleri ile deney için video analizi yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Video analizi tarımsal arazideki lokalizasyon deneyi gibi dizüstü bilgisayar kullanılarak yapılmıştır. Hareket esnasında video kaydı için dizüstü bilgisayar aracın üstüne güvenli bir şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.28). Aracın kısa, orta ve uzun mesafede sürüşleri yapılarak ileri hareketin ardından dönüş alanına ulaşması ile beraber sağa farklı açılarla dönüşü kurgulanmıştır. Deneyin nasıl yapıldığını anlatan görsel Şekil 3.29'da görülebilir. Dönüşle beraber lokalizasyon işlemi tamamlanır. Deneylerde ileri hareket ve dönüş hareketi bir bütün olarak ele alınmıştır. Aracın hem TO hem de GO yöntemiyle konumlandırılması her mesafe ve her açı değeri için 3 kez tekrarlanıp toplamda 54 sürüş gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.28 Tarımsal olmayan kapalı alanlardaki deneyde mobil tarım robotu



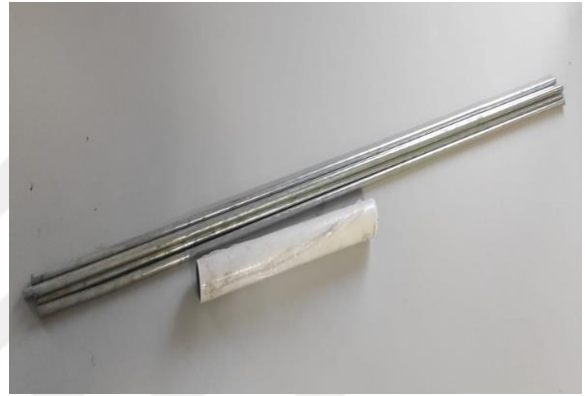
Şekil 3.29 Tarımsal olmayan kapalı alan konumlandırma deneyi

### 3.7.2 Deneylerde kullanılan ekipmanlar

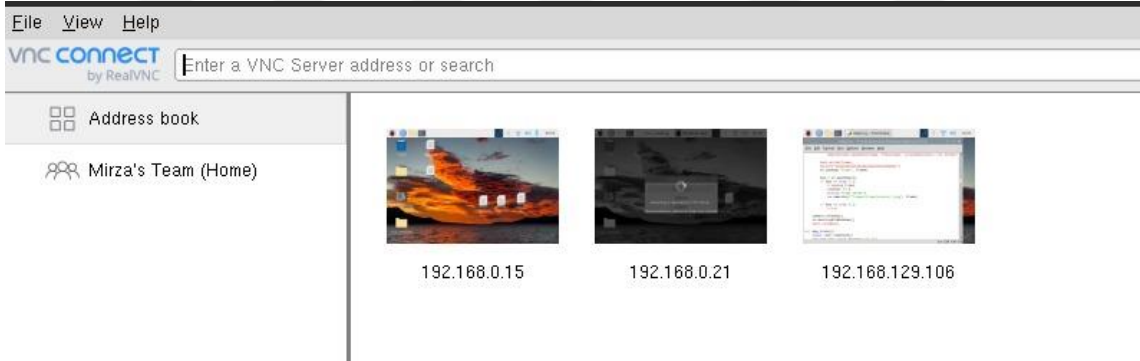
Deneylerde mobil robot yazılım ve donanımından farklı olarak aydınlatma için ışık kaynağı, kontrol kartı ile haberleşmek için Vnc viewer programı ve ortak ağ dağıtıcı olarak modem kullanılmıştır. Her iki ortamda da kırmızı referans şeritleri konumlandırma performansını ölçmek için kullanılırken, tarım arazisinden demir çubuklar ve streç film deney ortamını dış çevreden ayırmak için kullanılır.



(a)



(b)



(c)

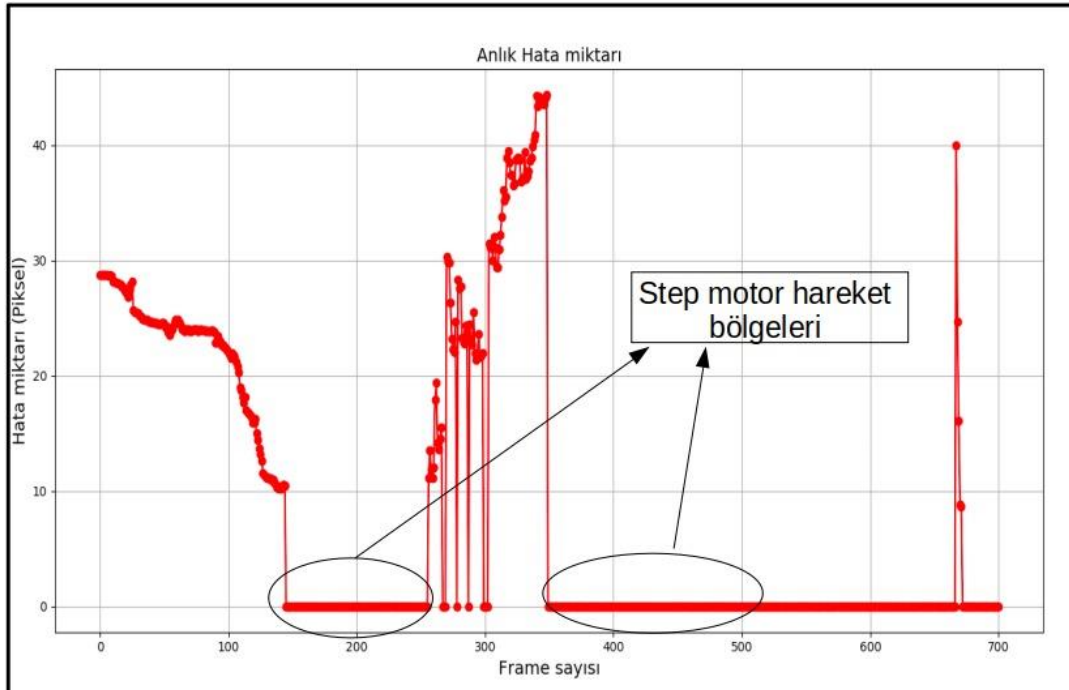
**Şekil 3.30** Deneyde kullanılan ekipmanlar (a) modem (b) demir çubuklar ve streç film (c) Vnc viewer yazılımı

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

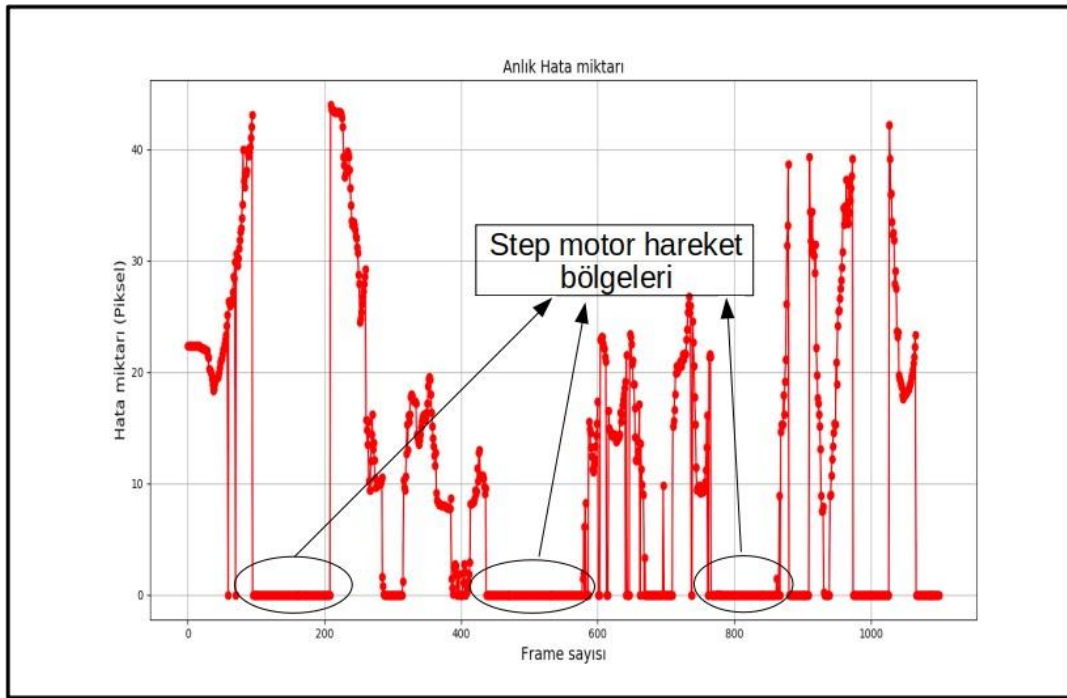
Tezin bu bölümünde tasarlanan ve gerçekleştirilen mobil tarım robotunun farklı ortam ve şartlar altında lokalizasyonu incelenmiştir. Öncelikle temel lokalizasyon çalışmasından önce robot tarımsal arazide denenerak önceki bölümlerde bahsedilen 3 temel hareketin TO ve GO özelinde lokalizasyonu incelenmiştir. Sonrasında ise tarımsal olmayan kapalı ortam koşullarında Bölüm 3.5.1’de verilen hareket senaryoları ile hem TO hem GO için konumlandırma deneyleri 3 iterasyonlu olmak üzere tamamlanmıştır. Deney sonuçları daha öncesinde bahsedilen video analiz uygulaması kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar yorumlanarak tartışılmıştır.

##### 4.1. Tarımsal Arazide Konumlandırma Deneyi Sonuçları

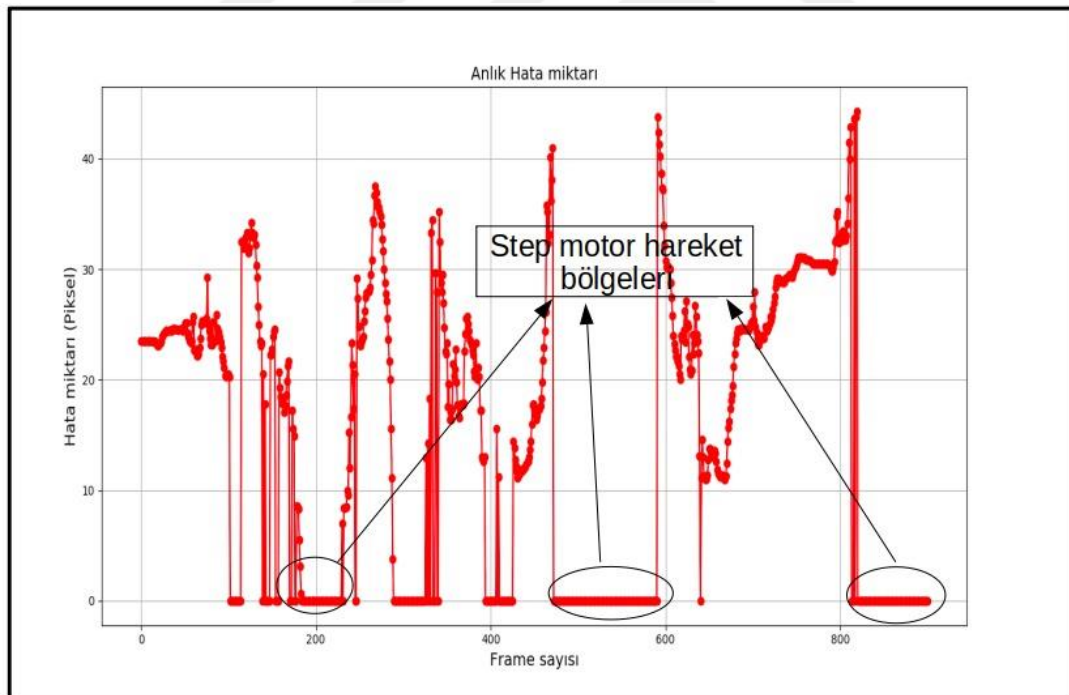
Deney sadece tekerlek odometresi kullanılarak yapılmış ve araziden kaynaklı oluşabilecek problemleri belirlemek için kurgulanmıştır. Ön çalışma olarak nitelendirilebilecek çalışma da her senaryo bir kez tekrar edilmiştir. Tarımsal arazide yapılan konumlandırma deneyinin sonuçlarına dair 1. hareket senaryosu Şekil 4.1’de, 2. hareket senaryosu Şekil 4.2’de ve 3. hareket senaryosu Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.1 TO'lu tarımsal arazide lokalizasyon deneyi 1. hareket senaryosu sonuçları



Şekil 4.2 TO'lu tarımsal arazide lokalizasyon deneyi 2. hareket senaryosu sonuçları



Şekil 4.3 TO'lu tarımsal arazide lokalizasyon deneyi 3. hareket senaryosu sonuçları

Konumlandırma deneyinde robot modelinin ve robot yazılımının başarısı hazırlanan video analizcisi ile test edilir. İlk deneye ait grafik (Sekil 4.1) incelendiğinde hata miktarının piksel cinsinden ölçüldüğü ve araç hareketi esnasında yapılan video kaydının fotoğraf çerçevelerine bölünerek her bir çerçevede hesaplanan hata ile grafik

oluşturulduğu görülebilir. Video analiz için kullanılan kamera mobil robotun altına yerden 26 cm yükseklikte olacak şekilde konumlandırılmıştır. Araç genişliği en geniş noktada 76 cm iken kameranın takıldığı profil 43 cm genişliğindedir. Kameranın görüş açısının sınırlı olması ve aracın bir eğriyle dönmesinden kaynaklı olarak video analizcisi için referans olan kırmızı şeritler dönüş durumlarında kamera tarafından algılanamamaktadır. Aracın hatasının arttığı sonrasında agresif düşüşlerin yaşandığı ve konumlandırmanın sıfır hata ile yapıldığı bölümler aracın dönüş noktalarıdır. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te step motorun dönüş bölgeleri işaretlenmiştir.

Bu durumlarda hatanın sıfır olduğu varsayımında bulunmak deney sonuçları için son derece yanıltıcı olduğundan hatanın sıfır olduğu durumlar şerit görüşünün olmadığı durumlar olarak yorumlanır. Tarımsal arazilerde yapılan konumlandırma deneyleri her ne kadar ön çalışma niteliği taşısa da TO birimim enkoderde zamanla artarak büyüyen adım hatalarının gösterilmesi ve dönüşlerdeki veri kaybının sebebinin anlaşılması adına önemlidir.

**Çizelge 4.1** Tarımsal Arazide Konumlandırma Deneyi Sonuçları

Deney	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
Senaryo-1	24.936	44.346	8.640
Senaryo-2	19.842	43.999	0.069
Senaryo-3	23.997	44.277	0.659

Tüm senaryolarda anlamlı bir ortalama hata farkı bulunmamaktadır. Ortalama hata 1.hareket senaryosunda 24.936 pikselken ikinci hareket senaryosunda 19.842 piksel olarak ölçülmüştür. Son senaryoda ise ortalama hata 23.997 pikseldir. Tüm senaryolarda maksimum hata 44 piksel civarı ölçülmüştür. Ön çalışmada, toprak zeminde, dikkat çekici fark minimum hata kısmında görülmektedir. 1.hareket senaryosu ve 2.hareket senaryosunda minimum hata sıfıra yakın olarak ölçülmüştür. Ancak 1.hareket senaryosunda en düşük hata ölçümü 8.640 piksel olarak yapılmıştır. Minimum değerdeki fazlalığın temel sebebi, senaryoda sağ ve sol dönüşlerin ardı ardına yapılmasıdır. Kontrolsüz gerçekleştirilen bu harekette yani konum düzelticisinin olmayışı, mobil robotun zıt yönlü dönüşlerinde şerit kaybı yaşayarak rotasına oturmasına sebep olur.

## 4.2. Tarımsal Olmayan Kapalı Arazide Konumlandırma Deneyi Sonuçları

Tarımsal olmayan kapalı arazilerdeki konumlandırma deneylerinde tarımsal arazide olduğu gibi şeritler ve video analizcisi kullanılmıştır. Hem tekerlek odometresi hem de görsel odometre kullanılarak konumlandırma yapılan deneyde mobil robot farklı mesafeler ve farklı dönüş açıları altında test edilmiştir. 3 metre, 4 metre ve 5 metre yol uzunluğunu kat ederek dönme alanına gelen robotlar 90, 60 ve 45 derece açı ile dönüş gerçekleştirmiştir. Deney kontrolcüsüz olarak yapıldığı için mekanik ve elektronik bozulmaları telafi etmek ve güvenilir sonuçlar elde etmek adına deneyler 3 iterasyon olarak tamamlanmıştır.

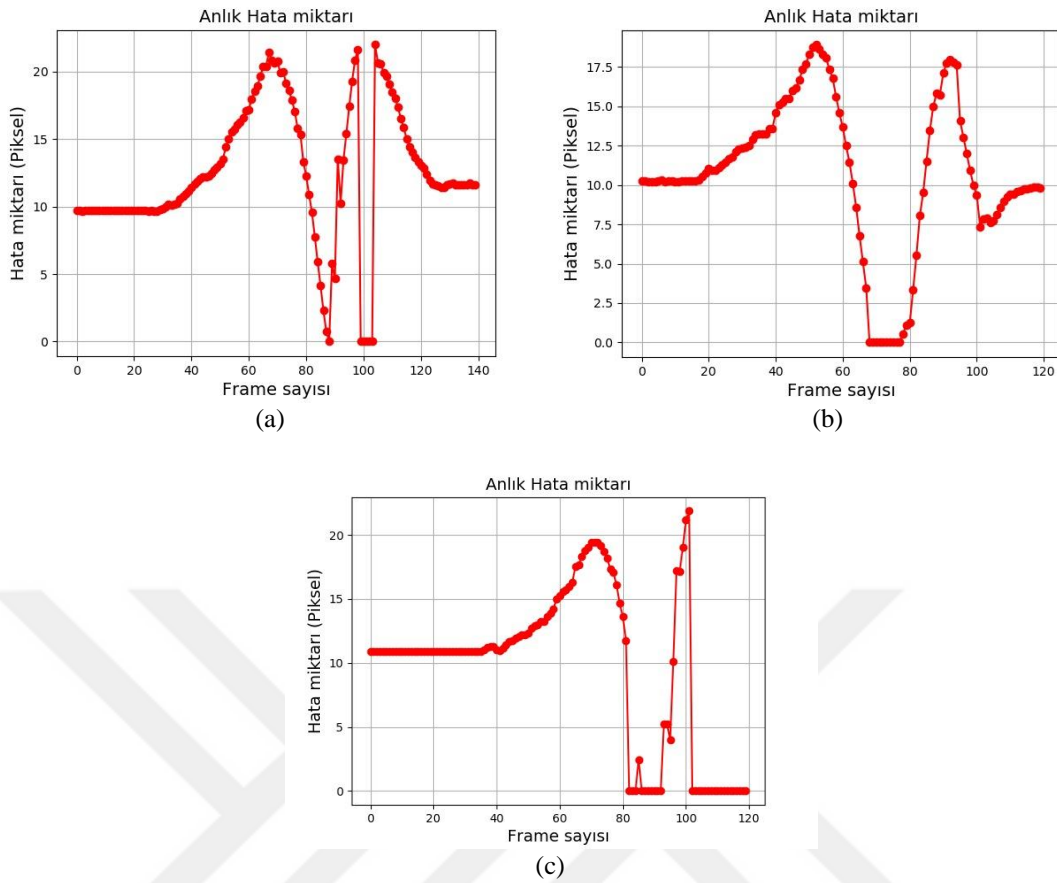
Araçta kullanılan tahrik motorları aynı firmadan alınmış olsa da mil hızları arasında farklılıklar olmaktadır. Ayrıca araç tekerleklerinin salınım yapmaları ve montaj hatalarından dolayı standart bir uyartım gerilimi ile araç doğrultusunu bir süre sonra kaybetmektedir. Deney sırasında aracın düz doğrultuyu koruyabilmesi için tekerlek hızları arasında PWM yardımıyla hız ayarlaması yapılmıştır. Böylece aracın deney alanı boyunca düz doğrultuda gitmesi sağlanmıştır.

### 4.2.1. Tekerlek odometreli konumlandırma sonuçları

Bu bölümde tekerlek odometresi birimi enkoder kullanılarak yapılan konumlandırma deneyinin sonuçları verilmiştir.

#### 4.2.1.1 Kısa mesafeden tekerlek odometreli konumlandırma sonuçları

Kısa mesafe deneylerinde 45 derece için ortalama hata değeri 13.096 piksel olarak ölçülmüştür. 60 derecede ortalama hata değeri 11.698 iken 90 derecede 12.889'dur. 3 metreden yapılan mobil robot lokalizasyonlarında tekerlek odometresinin artan hatası henüz büyümeden deney tamamlandığı için benzer ortalama hata sonuçları elde edilmiştir.



**Şekil 4.4** TO'lu tarımsal olmayan arazide kısa mesafe lokalizasyon deneyi (a) 45 derece dönüş (b) 60 derece dönüş (c) 90 derece dönüş sonuçları

**Çizelge 4.2** TO 3 m 45 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney - 3m45	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	14.962	22.358	0.051
İterasyon-2	11.849	30.999	1.509
İterasyon-3	12.477	12.640	0.729
Ortalama değerler	13.096	21.999	0.763

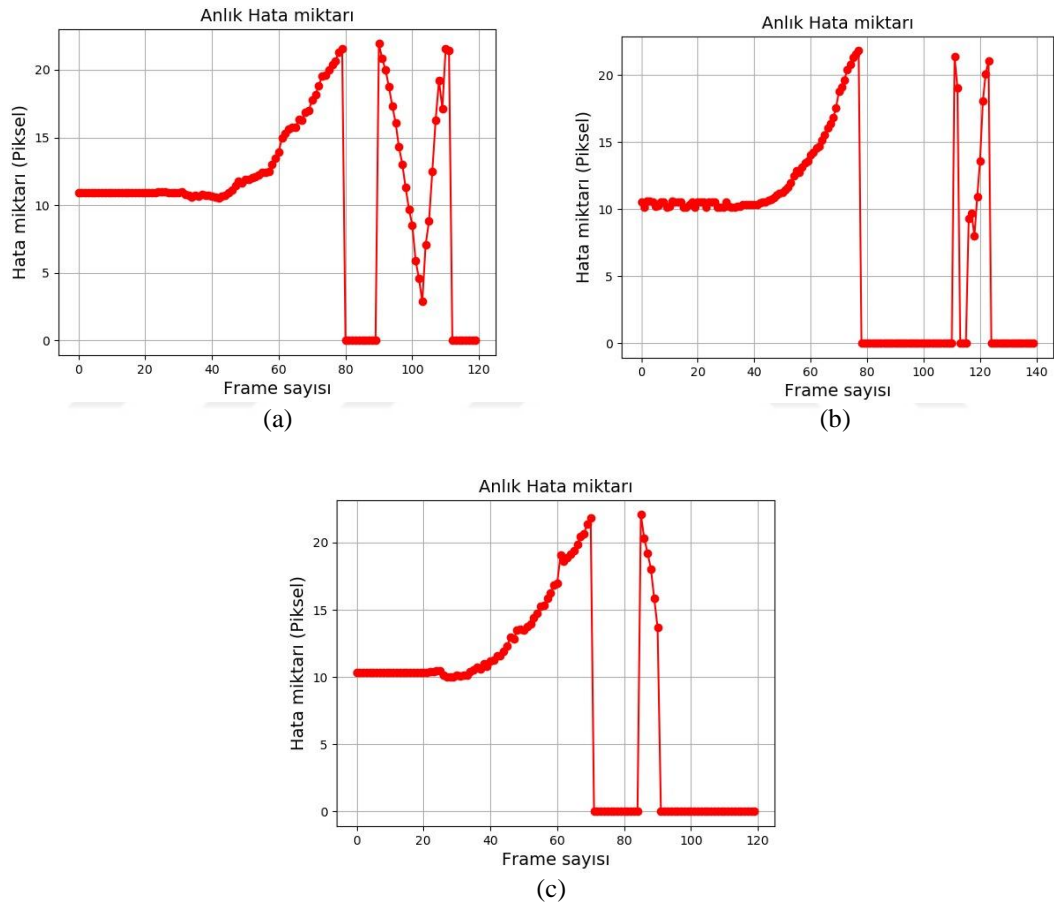
**Çizelge 4.3** TO 3 m 60 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney - 3m60	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	9.980	14.623	0.247
İterasyon-2	11.339	18.451	0.461
İterasyon-3	13.775	23.899	0.947
Ortalama değerler	11.698	18.911	0.555

**Çizelge 4.4** TO 3 m 90 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 3m90	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	12.182	20.786	1.869
İterasyon-2	13.965	23.687	3.004
İterasyon-3	12.520	21.110	2.414
Ortalama değerler	12.889	21.861	2.429

#### 4.2.1.2. Orta mesafeden tekerlek odometreli konumlandırma sonuçları



**Şekil 4.5** TO'lu tarımsal olmayan arazide orta mesafe lokalizasyon deneyi (a) 45 derece dönüş (b) 60 derece dönüş (c) 90 derece dönüş sonuçları

Çizelge 4.5 TO 4 m 45 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 4m45	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	12.444	20.621	1.861
İterasyon-2	14.007	24.742	3.570
İterasyon-3	12.789	20.727	3.209
Ortalama değerler	13.080	21.930	2.880

Çizelge 4.6 TO 4 m 60 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 4m60	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	13.147	22.518	7.616
İterasyon-2	11.995	21.965	8.150
İterasyon-3	12.874	20.890	8.177
Ortalama değerler	12.672	21.791	7.981

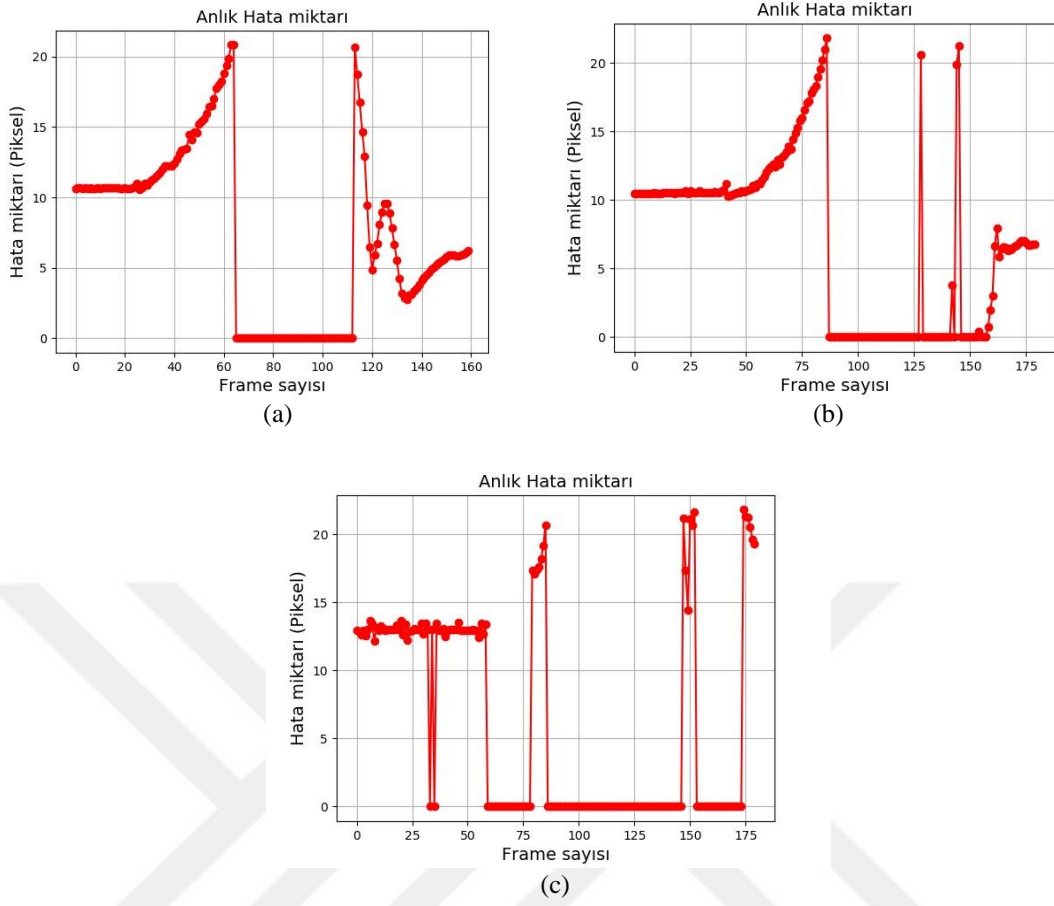
Çizelge 4.7 TO 4 m 90 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 4m90	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	13.659	22.874	7.500
İterasyon-2	12.885	23.156	10.162
İterasyon-3	12.876	20.177	12.317
Ortalama değerler	13.140	22.069	9.993

4 metre mesafeden enkoder kullanımıyla elde edilen deney sonuçlarında ölçülen en düşük hatanın 90 dereceden yapılan ölçümler olduğu gözlemlenmiştir. Açık büyüdükçe ölçülen minimum hatanın arttığı sonucu elde edilmiştir. 45 derece için minimum hata 2.880 iken 60 derece için 7.981 olarak ölçülmüştür.

#### 4.2.1.3. Uzun mesafeden tekerlek odometreli konumlandırma sonuçları

5 metreden 90 derece dönüş ile yapılan lokalizasyon işleminde minimum hata 12.145 piksel olarak ölçülmüştür. 90 derecelik dönüşlerde kısa mesafe için (3 metre) 2.429 piksel ortalama minimum piksel hatası ve orta mesafede (4 metre) 9.993 ortalama minimum piksel hatası ölçülmüştür. Mesafe uzadıkça ölçülen en küçük hata değerindeki artış hatalı enkoder okumalarıyla ilişkilendirilebilir. Uzun mesafelerde TO birimleriyle yapılan lokalizasyon işlemindeki temel problem 5 metre ileri sürüş sonrasında da 90 derecelik dönüş deneyiyle doğrulanmıştır.



Şekil 4.6 TO'lu tarımsal olmayan arazide uzun mesafe lokalizasyon deneyi (a) 45 derece dönüş (b) 60 derece dönüş (c) 90 derece dönüş sonuçları

Çizelge 4.8 TO 5 m 45 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 5m45	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	11.585	21.602	1.341
İterasyon-2	9.333	20.431	4.520
İterasyon-3	10.180	20.427	2.467
Ortalama değerler	10.366	20.820	2.776

Çizelge 4.9 TO 5 m 60 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 5m60	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	11.212	22.009	0.645
İterasyon-2	11.083	20.587	0.358
İterasyon-3	10.957	22.777	0.245
Ortalama değerler	11.084	21.791	0.416

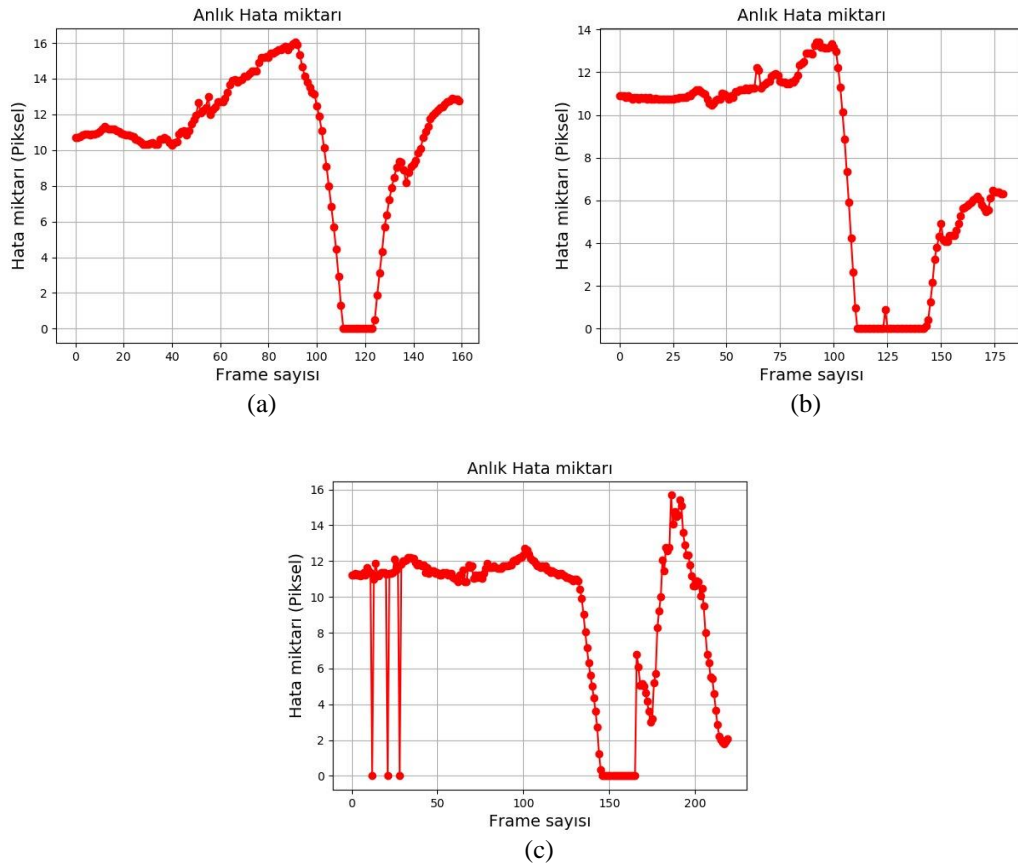
Çizelge 4.10 TO 5 m 90 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 5m90	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	10.502	22.652	5.424
İterasyon-2	14.323	21.997	13.880
İterasyon-3	18.912	20.724	17.131
Ortalama değerler	14.579	21.791	12.145

#### 4.2.2. Görsel odometreli konumlandırma sonuçları

Görsel odometreli deneylerin tamamı, tekerlek odometreli deneylerle aynı şartlarda yapılmıştır. Aracın kontrolsüz serbest ileri hareketini takip eden GO okuması ve dönüş hareketi kurgulanmıştır.

##### 4.2.2.1.Kısa mesafeden görsel odometreli konumlandırma sonuçları



Şekil 4.7 GO'lu tarımsal olmayan arazide kısa mesafe lokalizasyon deneyi (a) 45 derece dönüş (b) 60 derece dönüş (c) 90 derece dönüş sonuçları

Çizelge 4.11 GO 3 m 45 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 3m45-go	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	10.417	16.652	0.510
İterasyon-2	11.564	15.130	0.399
İterasyon-3	12.144	16.311	0.546
Ortalama değerler	11.375	16.031	0.485

Çizelge 4.12 GO 3 m 60 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 3m60-go	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	8.996	12.461	0.070
İterasyon-2	9.125	14.837	0.215
İterasyon-3	10.247	12.884	0.129
Ortalama değerler	9.456	13.394	0.138

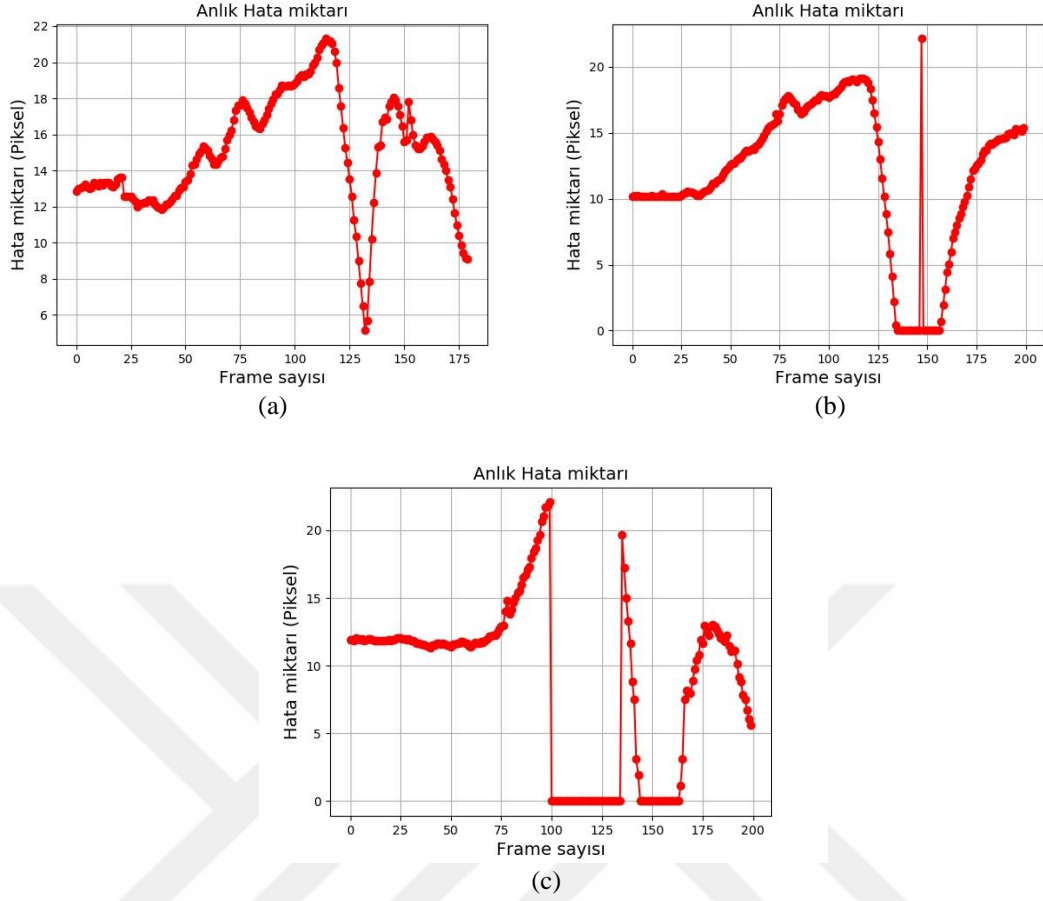
Çizelge 4.13 GO 3 m 90 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 3M90-go	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	10.333	14.294	0.340
İterasyon-2	9.741	16.329	0.385
İterasyon-3	10.772	16.429	0.316
Ortalama değerler	10.282	15.684	0.347

Görsel odometreli kısa mesafe sürüşlerde birbirine yakın ortalama hata değerleri elde edilmiştir. Tekerlek odometreli deneylere göre daha düşük ortalama hata, maksimum hata ve minimum hata değerleri elde edilmiştir.

#### 4.2.2.2. Orta mesafeden görsel odometreli konumlandırma sonuçları

Orta mesafeden (4 metre) yapılan görsel odometreli lokalizasyon deneylerinde, tekerlek odometreli sürüşlere göre ortalama hata değerlerinde anlamlı bir değişiklik olmamıştır. 60 derece ve 90 derecelik dönüşlerde minimum hata değerinin tekerlek odometresine göre çok daha az olduğu görülmüştür. 60 derece dönüşte tekerlek odometresinin minimum hatası 7.981 pikselken; görsel odometrenin değeri 0.416'tır. 90 derece dönüşte ise tekerlek odometreli deney sonucu 9.993 piksel; görsel odometreli deneyde ise 1.110 piksel değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.8 GO'lu tarımsal olmayan arazide orta mesafe lokalizasyon deneyi (a) 45 derece dönüş (b) 60 derece dönüş (c) 90 derece dönüş sonuçları

Çizelge 4.14 GO 4 m 45 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 4m45go	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	13.888	21.517	5.300
İterasyon-2	15.041	20.382	5.260
İterasyon-3	15.894	22.016	4.845
Ortalama değerler	14.941	21.305	5.135

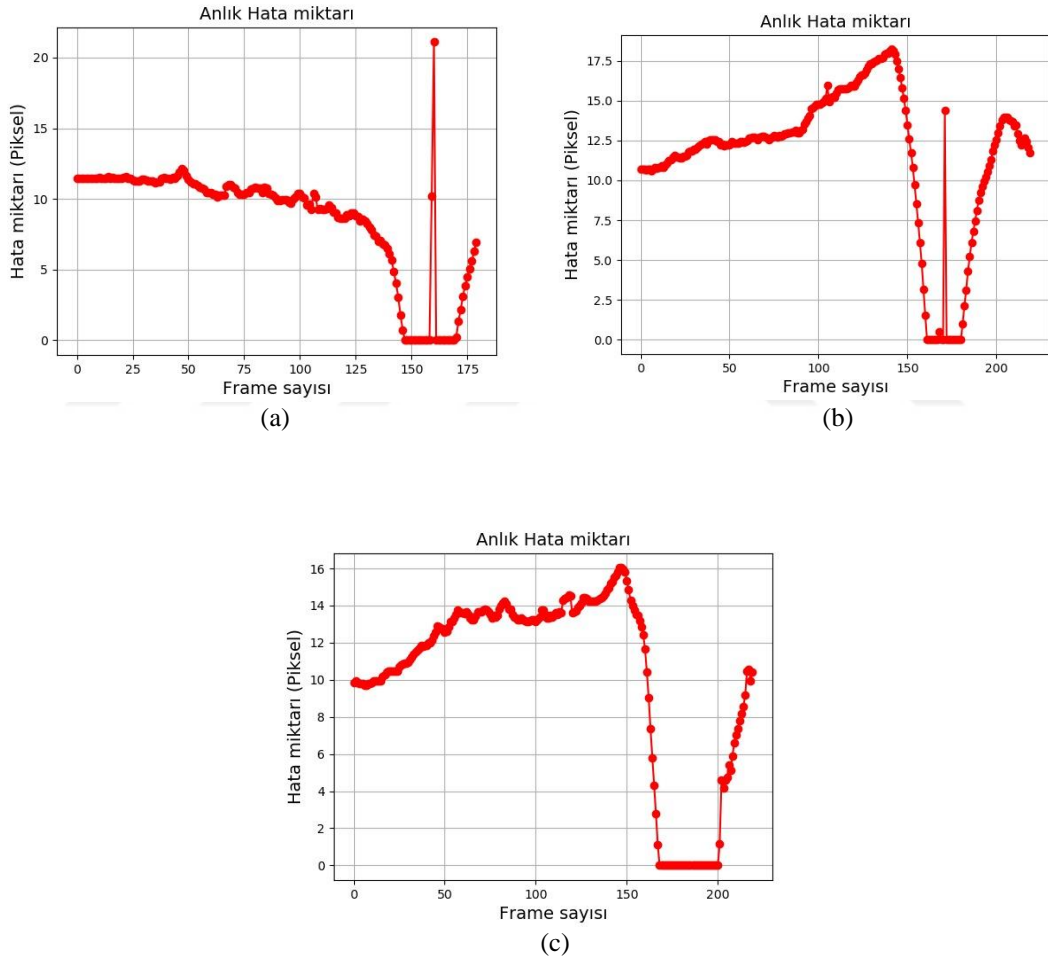
Çizelge 4.15 GO 4 m 60 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 4m60go	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	13.360	21.277	0.440
İterasyon-2	13.145	22.850	0.548
İterasyon-3	13.218	22.287	0.260
Ortalama değerler	13.241	22.138	0.416

Çizelge 4.16 GO 4 m 90 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 4m90go	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	11.900	20.899	0.996
İterasyon-2	12.469	23.063	1.110
İterasyon-3	12.198	22.245	1.224
Ortalama değerler	12.189	22.069	1.110

#### 4.2.2.3. Uzun mesafeden görsel odometreli konumlandırma sonuçları



Şekil 4.9 GO'lu tarımsal olmayan arazide uzun mesafe lokalizasyon deneyi (a) 45 derece dönüş (b) 60 derece dönüş (c) 90 derece dönüş sonuçları

Uzun mesafeli (5 metre) görsel odometre deneylerinde tekerlek odometresi deneyine kıyasla 60 ve 90 derecelik dönüşlerde maksimum ve minimum hata değerinde

daha düşük değerler vererek daha doğru konumlandırma yapılmıştır. 45 derecelik dönüşte iki farklı odometre arasında anlamlı bir fark oluşmamıştır.

Çizelge 4.17 GO 5 m 45 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 5m45go	Ortalama Hata	Maksimum Hata	Minimum Hata
İterasyon-1	10.100	21.090	0.282
İterasyon-2	9.218	22.201	0.293
İterasyon-3	9.797	20.000	0.151
Ortalama değerler	9.705	21.097	0.242

Çizelge 4.18 GO 5 m 60 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 5m60go	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	9.961	18.553	0.453
İterasyon-2	13.777	17.622	0.537
İterasyon-3	14.621	18.476	0.465
Ortalama değerler	12.683	18.217	0.485

Çizelge 4.19 GO 5 m 90 derece dönüş deneyi sonuçları

Deney – 5m90go	Ortalama hata	Maksimum hata	Minimum hata
İterasyon-1	11.821	18.632	0.884
İterasyon-2	12.250	17.712	1.200
İterasyon-3	12.100	11.749	1.246
Ortalama değerler	12.057	16.031	1.110

DeneySEL sonuçlar karşılaştırıldığında şerit kayması durumunda aracın davranışı minimum hata parametresi üzerinden yorumlanmıştır. Aracın hareket süresinin kısa olması ve mobil robotun var olan yönelimi koruma eğiliminde olması sebebiyle lokalizasyonun tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 4 .20’de görüleceği üzere Deney sonuçları incelendiğinde 3 metreden yapılan kısa mesafe deneylerinde TO ve GO yöntemleri arasında tüm açđ değerlerinde dönüş için anlamlı bir lokalizasyon farkı gözlemlenmemiştir. TO biriminin dönme hareketi öncesinde kat ettiği mesafe olan 3 metrede enkoder verisinin eklenerek büyümemiş olması, lokalizasyon farkının oluşmamasını açıklar. Enkoderin kısa mesafelerde uzun mesafelere göre daha başarılı olduğu doğrulanmıştır.

4 metreden yapılan orta mesafeli deneylerde TO yöntemiyle elde edilmiş sonuçlara nazaran GO’lu deneylerde hata miktarı ölçümlerinde daha az 0 değeri elde

edilmiştir. Bu da GO'lu konumlandırmada aracın hareketi esnasında daha az yanıl kaymalara maruz kalması anlamına gelir. GO yöntemi ile orta mesafeden yapılan deneylerde şerit kaybının daha az olması sebebiyle daha doğru konum verileri elde edilmiştir.

5 metreden yapılan deneylerde enkoderli sürüşler sonucunda büyüyen konum hatası dikkat çekmiştir. GO yöntemiyle elde edilen konum verilerinde çok daha düşük hatalı konumlandırma yapmıştır.

Orta ve uzun mesafeden yapılan konumlandırma deneylerinde her açı değeri için GO yöntemi daha başarılı sonuçlar üretirken. Kısa mesafeden yapılan ölçümlerde anlamlı bir oluşmamıştır. Dönüş öncesi artan mesafeye bağlı olarak enkoder verisinde doğru orantılı bozulmalar olmuştur.

GO deneylerinde çoğunlukla dönüş öncesinde konumlandırma hatasının arttığı belirlenmiştir. Hareketin ilerlemesi ve kameranın görüş açısının daralması ile beraber kare kodun okunamaması ve GO yazılımındaki yavaşlıktan dolayı dönüş öncesi konumlandırma problemi yaşanmıştır. Ancak neredeyse deneylerin tamamında GO daha başarılı konumlandırma yapmıştır.

Çizelge 4.20 Karşılaştırma tablosu

Minimum hata	Deneyler	45 derece	60 derece	90 derece
TO	3 metre (kısa mesafe)	0.763	0.555	2.429
	4 metre (orta mesafe)	2.880	7.981	9.993
	5 metre (uzun mesafe)	2.776	0.416	12.145
GO	3 metre (kısa mesafe)	0.485	0.138	0.347
	4 metre (orta mesafe)	5.135	0.416	1.110
	5 metre (uzun mesafe)	0.242	0.485	1.110

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Dijital tarım uygulamalarında tarım robotiği gittikçe popülerliğini artıran bir çalışma alanıdır. Tarımsal arazi doğası gereği zor koşullar içerir ve mobil robot hareketini zorlaştırır. Patinaj problemi, yanal kaymalar ve sensör gürültüsü problemleri tarımsal arazide görev yapan otonom ve otonom olmayan tüm araçlar için son derece olağandır. Mobil robotların tarımsal arazide hareketi sırasında zor tarımsal şartlarda doğru konum verisi elde etmek, hareketin doğru bir şekilde yapılması ve tarım ürününün güvenliği için son derece önemlidir.

Tez çalışması mobil bir tarım robotu tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Özgün mekanik tasarımı yapılan ve elektronik montajı tamamlanarak gerçekleştirilen mobil robotunun TO ve GO yöntemleri ile farklı yol koşullarında ve farklı hareket senaryoları altındaki lokalizasyon performansı test edilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen nümerik veriler ile TO ve GO yöntemi karşılaştırılmıştır ve sonuçlar grafiklendirilmiştir. Karşılaştırılan yöntemlerde uzun mesafe deneylerinde görsel odometre yönteminin tekerlek odometresine göre daha iyi konumlandırma yaptığı görülmüştür.

### 5.2 Öneriler

Tez çalışması için üretilen mobil tarım robotunun mekanik, elektronik ve yazılımsal bileşenlerinin tamamının deney sahalarında deney sonuçlarına etki ettiği gözlemlenmiştir. Mekanik anlamda araba benzeri bir yapıda üretilen mobil robot tarımsal arazide kurgulanan deneyde zorluklar yaşamıştır. Yüksek PWM değerleriyle kontrol edilen DC motorlar ile aracın manevra kabiliyeti azalmış ve konumlandırmaya negatif anlamda etki etmiştir. Güç aktarım organı olarak kullanılan zincirlerdeki boşluklar aracın yönelimini bozarak istenilen dönüş açısını sağlamada zorlanmıştır. Bu sebeplerden dolayı aracın direksiyon mekanizması rijit bir tasarımla değiştirilebilir.

Araba benzeri mobil robot tasarımı yerine 4 tekerlekli diferansiyel sürürlü mobil robot ile arazi performansları değerlendirilebilir.

Çalışmada gerçekleştirilen mobil robot donanımları ileri seviye çalışmalara uygundur. 9 DOF'lu bir IMU'dan elde edilen euler açılarına eğim telafisi ve EKF uygulanarak güncellenmiş bir oryantasyon açısı elde edilebilir. Bu açı oransal bir kontrolcü ile aracın konumlandırmasında kullanılarak yörünge takibi uygulamalarında kullanılabilir.

Hem TO hem de GO çeşitli sıkıntıları beraberinde getirir. Her yöntem tek başına güvenilmezdir. Bu sebeple yapılan konumlandırma deneylerinde çeşitli yöntemlerin beraber kullanılması daha doğru konumlandırma yapmak için önemlidir. Tarımsal araziye uygun bir robot modeliyle ve sensör füzyonuyla desteklenmiş melez konumlandırma teknikleriyle daha yüksek doğruluklu lokalizasyon yapılarak araştırma sonuçları iyileştirilebilir.



## KAYNAKLAR

- Almadhoun, R., et al. (2019). "A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping." *Sn Applied Sciences* 1(8).
- Anonim, 2022, Karel Čapek, [online],  
[https://tr.wikipedia.org/wiki/Karel\\_%C4%8Capek](https://tr.wikipedia.org/wiki/Karel_%C4%8Capek) [Ziyaret Tarihi 12 Elim 2022]
- Arima, S. and N. Kondo (2003). "Traceability based on multi-operation robot; Information from spraying, harvesting and grading operation robot." *Proceedings of the 2003 Ieee/Asme International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Aim 2003)*, Vols 1 and 2: 1204-1209.
- Arima, S., et al. (1996). "Development of robotic system for cucumber harvesting." *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly* 30(4): 233-238.
- Bulanon, D. M., et al. (2004). "Development of a real-time machine vision system for the apple harvesting robot." *Sice 2004 Annual Conference*, Vols 1-3: 595-598.
- Carrillo-Zapata, D., et al. (2020). "Mutual Shaping in Swarm Robotics: User Studies in Fire and Rescue, Storage Organization, and Bridge Inspection." *Frontiers in Robotics and Ai* 7.
- Chowdhary, G., et al. (2019). "Soft Robotics as an Enabling Technology for Agroforestry Practice and Research." *Sustainability* 11(23).
- Eaton, R., et al. (2009). "Robust sliding mode control of an agricultural tractor under the influence of slip." *2009 Ieee/Asme International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Vols 1-3: 1862-+.
- Fang, H., et al. (2005). "Trajectory tracking control of farm vehicles in presence of sliding." *2005 Ieee/Rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vols 1-4: 1720-1725.
- Fisher R., Perkins S., Walker A. and Wolfart E., 2000, Gaussian Smoothing [online],  
<https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm> [Ziyaret Tarihi : 12 Ekim 2020]
- Foglia, M. M. and G. Reina (2006). "Agricultural robot radicchio harvesting." *Journal of Field Robotics* 23(6-7): 363-377.
- Forster, C., et al. (2014). "SVO: Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry." *2014 Ieee International Conference on Robotics and Automation (Icra)*: 15-22.
- Gracia, L. and J. Tornero (2002). "Kinematic control system for car-like vehicles." *Advances in Artificial Intelligence - Iberamia 2002, Proceedings* 2527: 882-892.
- Guillet, A., et al. (2014). "Adaptable Robot Formation Control Adaptive and Predictive Formation Control of Autonomous Vehicles." *Ieee Robotics & Automation Magazine* 21(1): 28-39.

- Gül, Ç., 2020, EmguCV Uzaysal Filtreleme (Spatial Domain) [online], <https://medium.com/caglargul-blog/emgucv-uzaysal-filtreleme-spatial-domain-75b703da5cf0> [Ziyaret Tarihi: 12 Ekim 2022].
- Hashim, M. S. M. and T. F. Lu (2013). "Time-critical Trajectory Planning for a Car-like Robot in Unknown Environments." 2013 Ieee Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (Beiac 2013): 836-841.
- Hayashi, S., et al. (2010). "Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test." Biosystems Engineering **105**(2): 160-171.
- Ji, W., et al. (2012). "Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot." Computers & Electrical Engineering **38**(5): 1186-1195.
- Keicher, R. and H. Seufert (2000). "Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe." Computers and Electronics in Agriculture **25**(1-2): 169-194.
- Lenain, R., et al. (2006). "Mobile robot control in presence of sliding: Application to agricultural vehicle path tracking." Proceedings of the 45th Ieee Conference on Decision and Control, Vols 1-14: 6005-+.
- Li, Z. G., et al. (2009). "Study on the collision-mechanical properties of tomatoes gripped by harvesting robot fingers." African Journal of Biotechnology **8**(24): 7000-7007.
- Liu, J. Z., et al. (2008). "Design of a Laser Stem-cutting Device for Harvesting Robot." 2008 Ieee International Conference on Automation and Logistics, Vols 1-6: 2370-2374.
- Liu, W., et al. (2015). "Autonomous Vehicle Planning System Design under Perception Limitation in Pedestrian Environment." Proceedings of the 2015 7th Ieee International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (Cis) and Robotics, Automation and Mechatronics (Ram): 159-166.
- Lowenberg-DeBoer, J. and B. Erickson (2019). "Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption." Agronomy Journal **111**(4): 1552-1569.
- Matveev, A. S., et al. (2010). "Mixed Nonlinear-Sliding Mode Control of an Unmanned Farm Tractor in the Presence of Sliding." 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (Icarcv 2010): 927-932.
- Nister, D., et al. (2004). "Visual odometry." Proceedings of the 2004 Ieee Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol 1: 652-659.
- Pham, H. V., et al. (2019). "Proposed Smooth-STC Algorithm for Enhanced Coverage Path Planning Performance in Mobile Robot Applications." Robotics **8**(2).

- Pochon, Y., et al. (2018). "Investigating the Democracy Behavior of Swarm Robots in the Case of a Best-of-n Selection." 2018 Ieee Symposium Series on Computational Intelligence (Ieee Ssci): 743-748.
- Rafaila, R. C. and G. Livint (2015). "Nonlinear Model Predictive Control of Autonomous Vehicle Steering." 2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (Icstcc): 466-471.
- Rezaei, S., et al. (2003). "Car-like robot path following in large unstructured environments." Iros 2003: Proceedings of the 2003 Ieee/Rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vols 1-4: 2468-2473.
- Santos, L. C., et al. (2020). "Path Planning for ground robots in agriculture: a short review." 2020 Ieee International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (Icarsc 2020): 61-66.
- Scaramuzza, D. and F. Fraundorfer (2011). "Visual Odometry Part I: The First 30 Years and Fundamentals." Ieee Robotics & Automation Magazine **18**(4): 80-92.
- Scarfe, A. J., et al. (2009). "Development of An Autonomous Kiwifruit Picking Robot." Proceedings of the Fourth International Conference on Autonomous Robots and Agents: 639-643.
- Schlenoff, C., et al. (2003). "Representing dynamic environments for autonomous ground vehicle navigation." Iros 2003: Proceedings of the 2003 Ieee/Rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vols 1-4: 644-649.
- Schranz, M., et al. (2020). "Swarm Robotic Behaviors and Current Applications." Frontiers in Robotics and Ai **7**.
- Sebsadji, Y., et al. (2008). "Road slope and vehicle dynamics estimation." 2008 American Control Conference, Vols 1-12: 4603-+.
- Silva, L. I., et al. (2008). "Vehicle Dynamics Using Multi-Bond Graphs: Four Wheel Electric Vehicle Modeling." Iecon 2008: 34th Annual Conference of the Ieee Industrial Electronics Society, Vols 1-5, Proceedings: 2756-2761.
- Singh, P. K., et al. (2020). "An efficient blockchain-based approach for cooperative decision making in swarm robotics." Internet Technology Letters **3**(1).
- Song, C. L., et al. (2019). "Mixed-Degree Cubature H-infinity Information Filter-Based Visual-Inertial Odometry." Applied Sciences-Basel **9**(1).
- Subrata, I. D. M., et al. (1997). "3-D vision sensor for cherry tomato harvesting robot." Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly **31**(4): 257-264.
- Tanigaki, K., et al. (2008). "Cherry-harvesting robot." Computers and Electronics in Agriculture **63**(1): 65-72.

Thianwiboon, M. and V. Sangveraphunsiri (2006). "Traction control for a rocker-bogie robot with wheel-ground contact angle estimation." Robocup 2005: Robot Soccer World Cup IX **4020**: 682-690.

van Henten, E. J., et al. (2002). "An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses." Autonomous Robots **13**(3): 241-258.

Van Henten, E. J., et al. (2003). "Field test of an autonomous cucumber picking robot." Biosystems Engineering **86**(3): 305-313.

van Henten, E. J., et al. (2005). "Autonomous robot for de-leafing cucumber plants grown in a high-wire cultivation system." Proceedings of the International Conference on Sustainable Greenhouse Systems, Vols 1 and 2(691): 877-884.

Wang, H. and N. Noguchi (2016). "Autonomous Maneuvers of a Robotic Tractor for Farming." 2016 Ieee/Sice International Symposium on System Integration (Sii): 592-597.

Webers, C. and U. R. Zimmer (2002). "Motion control of mobile robots-from static targets to fast drives in moving crowds." Autonomous Robots **12**(2): 173-185.

Wen, J. M., et al. (2018). "Swarm Robotics Control and Communications: Imminent Challenges for Next Generation Smart Logistics." Ieee Communications Magazine **56**(7): 102-107.

Yamamoto, M., et al. (2005). "Garage parking planning and control of car-like robot using a real time optimization method." Isatp 2005: Ieee International Symposium on Assembly and Task Planning (Isatp): 248-253.

Yang, N., et al. (2020). "D3VO: Deep Depth, Deep Pose and Deep Uncertainty for Monocular Visual Odometry." 2020 Ieee/Cvf Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cvpr): 1278-1289.

Zaman, S., et al. (2019). "Cost-effective visual odometry system for vehicle motion control in agricultural environments." Computers and Electronics in Agriculture **162**: 82-94.

Zhou, Y., et al. (2019). "Canny-VO: Visual Odometry With RGB-D Cameras Based on Geometric 3-D-2-D Edge Alignment." Ieee Transactions on Robotics **35**(1): 184-199.

**EKLER****EK-1** Video analiz Python kodu

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import cv2
import time

def calculate_pixel_error(list_of_error):
    local_counter = 0
    total_error = 0
    new_list = []
    for i, value in enumerate(list_of_error):
        print("i, value: ", i, value)
        if value != 0:
            total_error += value
            local_counter += 1
            new_list.append(value)

    new_error = total_error / local_counter

    return new_error, max(list_of_error), min(new_list)

list_of_errors = []
list_of_number_of_frame = []
counter = 0

cap = cv2.VideoCapture("3m_90.mkv")

frame_width = int(cap.get(3))
frame_height = int(cap.get(4))
print("w, h: ", frame_width, frame_height)

t0 = time.time()
while True:
    t1 = time.time()
    ret, frame = cap.read()
    print("ret: ", ret)

    if ret == 1:
        blurred_frame = cv2.GaussianBlur(frame,(5,5), 0)
        median = cv2.medianBlur(frame,5)
        hsv_frame = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)
        w, h = frame.shape[1], frame.shape[0]
        center = (w/2, h/2)
        print("w, h, center: ", w, h, center)

        #red
        low_red = np.array([161, 155, 84])

```

```

high_red = np.array([179, 255, 255])

red_mask = cv2.inRange(hsv_frame, low_red, high_red)
#red= cv2.bitwise_and(frame, frame, mask= red_mask )

#contours
cnts, hierarchy = cv2.findContours(red_mask,
cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
print("len(cnts): ", len(cnts))

if len(cnts) != 0:
    sorted_contours = sorted(cnts, key=cv2.contourArea,
reverse = True)

    cnts = sorted_contours[0]

    x, y, w, h = cv2.boundingRect(cnts)
    cx, cy = x + w / 2, y + h / 2

    cv2.circle(frame, (int(cx), int(cy)), 5, (0, 255, 0), -1)
    cv2.putText(frame, "centre:", (int(cx)-20, int(cy)-20),
cv2.FONT_HERSHEY_SCRIPT_SIMPLEX, 1, (0,255,0), 1)

    dv = float(0.0347*(abs(cx-(w/2))))
    list_of_errors.append(dv)

    print("center of the object :", cx, cy)
    print("hata cm :", dv)

else:
    list_of_errors.append(0.0)

k = cv2.waitKey(1)
if k == 27:
    break

t2 = time.time()
print("* FPS: ", 1/(t2-t1))

cv2.imshow("frame:", frame)
cv2.imshow("redmask", red_mask)

list_of_number_of_frame.append(counter)
counter += 1

else:
    break

cap.release()
cv2.destroyAllWindows()

```

```
t3 = time.time()
print("* Total time: ", t3-t1)

#print(list_of_errors)
#print(list_of_number_of_frame)

print(len(list_of_errors))
print(len(list_of_number_of_frame))

if len(list_of_errors) != len(list_of_number_of_frame):
    print("Frame ve hata bilgisi eşit değil !!")

else:
    plt.plot(list_of_number_of_frame, list_of_errors, color = "red", linewidth
= 1.5, marker = "o"), plt.title("Anlık Hata miktarı", fontsize=14), \
    plt.xlabel('Frame sayısı', fontsize=14), plt.ylabel('Hata miktarı (Piksel)',
    fontsize=14), plt.grid(True), plt.show() # RGB görüntü, matplotlib ile daha düzgün
görselleştirmek için BGR a dönüştürüldü.

    average_error, max_error, min_error = calculate_pixel_error(list_of_errors)
    print("Average error: ", average_error)
    print("Max error: ", max_error)
print("Min error: ", min_error)
```

**EK-2** Mobil robot üretim aşaması görselleri.

