

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇ ORTAM GPS SİSTEMİ KULLANILARAK HAREKETLİ BİR ROBOTUN
LOKALİZASYONU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖKTUĞ HAMBARCI

AĞUSTOS 2022

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇ ORTAM GPS SİSTEMİ KULLANILARAK HAREKETLİ BİR ROBOTUN
LOKALİZASYONU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖKTUĞ HAMBARCI

DANIŞMAN: Doç. Dr. Gökhan BAYAR

ZONGULDAK
AĞUSTOS 2022

KABUL

Göktuğ HAMBARCI tarafından hazırlanan “İç Ortam Gps Sistemi Kullanılarak Hareketli Bir Robotun Lokalizasyonu” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans olarak oybirliğiyle/oyçokluğuyla kabul edilmiştir. 05/08/2022

Danışman: Doç. Dr. Gökhan BAYAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Yusuf Aytaç ONUR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Recep ÖNLER

Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

..../..../2022

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



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

Göktuğ HAMBARCI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İÇ ORTAM GPS SİSTEMİ KULLANILARAK HAREKETLİ BİR ROBOTUN LOKALİZASYONU

Göktuğ HAMBARCI

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gökhan

BAYAR Ağustos 2022, 72 sayfa

Bu çalışmada, kapalı ortamlarda çok yönlü tekerlek (mekanum tekerlek) kullanan mobil bir robotun konumlandırma doğruluğunu iyileştirmek için ultra geniş bant (UWB) teknolojisi ile çalışan bir sistem geliştirilmiştir. Sistemin geliştirilmesinde Monte Carlo - Latin Hypercube Sampling tabanlı bir makine öğrenme algoritması kullanılmıştır. Monte Carlo - Latin Hypercube Sampling yöntemi, her bir değişken aralığının tam olarak erişilebilir olmasından dolayı konum tahmini yapmak için kullanılabilir. Ayrıca bu özelliğinden dolayı algoritma, çıktıları daha doğru ve güvenilir hale getirir ve de ölçümlerdeki doğruluğu artırır. Çalışmada; kurgulanan donanım, yazılım ve matematiksel modelin test edildiği bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Geliştirilen algoritmanın gerçek bir sisteme uyarlanması ve saha testleri mekanum tekerlek kullanan mobil bir robot üzerine entegre edilerek gerçekleştirilmiştir. Bu mobil robot kullanılarak, önerilen iç mekan konumlandırma sisteminin davranışını incelemek ve doğrulamak için çeşitli deney ortamları oluşturulmuş ve testler yapılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalarda, metodolojinin etkinliği ve kesinliği de test edilmiştir.

ÖZET (devam ediyor)

Uygulanan deneysel çalışmalarda, literatürde sunulan yöntemlere kıyasla, önerilen konum tahmini metodunun doğruluk oranını %20'den fazla arttırdığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mekanum tekerlek, Mobil robot, İç mekan konumlandırma, Konum tahmini, Makine öğrenmesi, Monte Carlo, Latin hypercube sampling, Ultra geniş bant, Kalman filtresi

Bilim Kodu: 625.01.03.



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

LOCALIZATION OF A MOBILE ROBOT USING INDOOR GPS SYSTEM

Göktuğ HAMBARCI

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan

BAYAR July 2022, 72 pages

In this study, an efficient ultra-wideband technology based indoor positioning system is developed to improve the measurement accuracy of a mecanum wheeled mobile robot. Data processing structure of the system is created using Monte Carlo - Latin Hypercube Sampling based machine learning algorithm. Monte Carlo - Latin Hypercube Sampling method can be used to perform the position estimation since it enables the range of each variable is fully accessible. This makes the algorithm outputs more accurate and reliable and thus increases correctness in measurements. An experimental setup including hardware, software and mathematical model is developed. A number of experiments are conducted to validate the indoor positioning system proposed. Efficiency, accuracy and precision of methodology are also tested in the experimental studies. The adaptation of the algorithm in a real system and the field tests are also conducted using a four-mecanum-wheeled mobile robot.

The experimental studies show that the position estimation is improved by more than 20% using the proposed algorithm compared to the methods presented in the literature.

ABSTRACT (continued)

Keywords: Mecanum wheel, mobile robot, Indoor positioning, Position estimation, Machine learning, Monte Carlo, Latin Hypercube Sampling, UWB, Kalman filter.

Science Code: 625.01.03.



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim ve tez çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren ve yardımcı olan danışman hocam Doç. Dr. Gökhan BAYAR'a , 2019-666-3 ve 2022-666-12 No'lu Proje kapsamında bu araştırmaya verdikleri destekleri için Zonguldak KOSGEB Müdürlüğü'ne ve değerli katkıları için Tatmetal firmasına, yardımlarından dolayı Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi'ne ve Zonguldak Teknopark'a teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 LOKALİZASYON YÖNTEMLERİ	7
2.1 KÜRESEL KONUMLANDIRMA SİSTEMİ (GPS)	7
2.2 KIZILÖTESİ RADYASYON İLE KONUMLANDIRMA SİSTEMİ (IR)	7
2.3 RADYO FREKANS TANILAMASI İLE KONUMLANDIRMA (RFID)	7
2.3.1 Bluetooth Haberleşme ile Konumlandırma (BT)	7
2.3.2 Ultra Geniş Bant Konumlandırma (UWB)	8
2.3.3 FM Radyo Tabanlı Konumlandırma	8

2.3.4 Zigbee Konumlandırma Sistemi	8
2.3.5 Hibrit Konumlandırma Sistemi.....	8
2.3.6 Ultrasonik Konumlandırma Sistemi	9
2.3.7 UWB Lokalizasyon Yöntemleri	9
2.3.7.1 AOA (Angle of Arrival – Sinyalin Ulaşma Açısı) Yöntemi	9
2.3.7.2 TOA (Time of Arrival – Sinyalin Ulaşma Zamanı) Yöntemi	10
2.3.7.3 TDOA (Time Difference of Arrival – Sinyalin Ulaşma Zamanı Farkı) Yöntemi	10
2.3.7.4 DOA (Direction of Arrival – Sinyalin Ulaşma Yönü) Yöntemi	11
BÖLÜM 3 KAPALI ORTAMLARDA KONUMLANDIRMA.....	13
3.1 TRİLATERASYON YÖNTEMİ.....	14
3.1.1 İki Boyutlu Konumlandırma	14
BÖLÜM 4 KULLANILAN YÖNTEM VE ALGORİTMALAR.....	19
4.1 MONTE CARLO (MC) YÖNTEMİ	19
4.2 LATİN HYPERCUBE SAMPLİNG TABANLI MONTE CARLO (LHS-MC) YÖNTEMİ.....	21
4.3 EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ (LSE)	22

BÖLÜM 5 MATERYAL METOT	25
5.1 MOBİL ROBOT TASARIM VE İMALATI.....	25
BÖLÜM 6 MATEMATİKSEL MODELLEME.....	33
6.1 MEKANUM TEKERLEK VE ÇALIŞMA PRENSİBİ	33
6.2 MEKANUM TEKERLEK KULLANAN MOBİL ROBOTUN KİNEMATİK MODELİ	34
6.3 MEKANUM TEKERLEK KULLANAN MOBİL ROBOTUN HAREKET YÖNLERİ	37
BÖLÜM 7 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
7.1 İÇ ORTAM TESTLERİ	39
7.1.1 Sensör Kalibrasyonu	43
7.1.2 Kalman Filtresi Entegrasyonu	45
7.1.3 Hareketli Ortalama Filtre	46
7.1.4 Hareketli Ortalama Filtresi İle Kalman Filtesinin Karşılaştırılması.....	47
7.1.5 Önerilen Yöntem Ve Algoritmaların Deneysel Sisteme Entegrasyonu.....	48
7.2 GELİŞTİRİLEN YÖNTEMİN MEKANUM TEKERLEK KULLANAN BİR MOBİL ROBOT ÜZERİNDE TEST EDİLMESİ.....	55
BÖLÜM 8 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61

KAYNAKLAR	63
EK AÇIKLAMALAR	69
ÖZGEÇMİŞ	72



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Ulaşma açısı yöntemi vektör gösterimi.....	10
Şekil 3.1 Bir hedef sensör ve bir sabit sensörün olduğu iki boyutlu sistem.....	14
Şekil 3.2 Bir hedef sensör ve 2 sabit sensörün olduğu iki boyutlu sistem	15
Şekil 3.3 Bir hedef sensör ve üç sabit sensör ile oluşturulan sistem.....	16
Şekil 3.4 Bir hedef sensör ve 3 sabit sensörün oluşturduğu sistem gerçek veriler ile oluşan iki boyutlu ortam.....	17
Şekil 3.5 Bir hedef sensör ve dört sabit sensörün oluşturduğu sistem.....	17
Şekil 3.6 Bir hedef sensör ve dört sabit sensör ile oluşturulan gerçek konumlandırma sonucu	18
Şekil 4.1 Hedef sensörün konumunun MC yöntemine göre elde edilmesi.	21
Şekil 4.2 İki boyutlu LHS-MC yöntemi.....	22
Şekil 6.1 Mekanum tekerlek kullanan mobil robotun hareket yönleri.....	37
Şekil 7.1 İç ortam testlerinde kullanılan 1 adet hedef sensör ve 4 adet sabit sensör ile oluşturulan sistem	39
Şekil 7.2 Kullanılan sabit sensörlerden bir tanesinin görüntüsü	40
Şekil 7.3 İç ortam testlerinin yapıldığı deney alanı.....	41
Şekil 7.4 İletişim protokolü.....	42
Şekil 7.5 Test alanının matris şeklinde kodlanması	42
Şekil 7.6 1 numaralı sabit sensörün kalibrasyon işlemi	44
Şekil 7.7 2 numaralı sabit sensörün kalibrasyon işlemi	44
Şekil 7.8 3 numaralı sabit sensörün kalibrasyon işlemi	45
Şekil 7.9 4 numaralı sabit sensörün kalibrasyon işlemi	45
Şekil 7.10 Hareketli ortalama filtrenin Kalman filtresi ile karşılaştırılması	47
Şekil 7.11 A ₁ numaralı sabit sensörden gelen gürültülü verinin Kalman filtresi ile filtrelenmesi işlemi.....	48
Şekil 7.12 LHS-MC, MC ve LSE metotları kullanılarak yapılan iç ortam konum tahmini sonuçları (Daireler arasında bir kesişimin olduğu durum)	48
Şekil 7.13 LHS-MC, MC ve LSE metotları kullanılarak yapılan iç ortam konum tahmini sonuçları (Daireler arasında bir kesişimin olmadığı durum)	50
Şekil 7.14 LHS-MC yöntemi algoritma detayları	51
Şekil 7.15 (1,1), (1,2), (1,3) - (2,1), (2,2), (2,3) - (3,1), (3,2), (3,3) noktaları için X-ekseni konum tahmini hata değerleri	52
Şekil 7.16 (1,1), (1,2), (1,3) - (2,1), (2,2), (2,3) - (3,1), (3,2), (3,3) noktaları için Y-ekseni konum tahmini hata değerleri	53

Şekil 7.17 Şekil 7.5'te gösterilen ve $L_1, \dots, L_6$ ile ifade edilen dikey yöndeki hücrelerden elde edilen X ve Y yönleri konum tahmini hata değerleri.....	54
Şekil 7.18 MC yöntemi kullanıldığında elde edilen konum tahmini hata değerleri	54
Şekil 7.19 LHS-MC yöntemi kullanıldığında elde edilen konum tahmini hata değerleri.....	55
Şekil 7.20 Minimum hata ile konum tahmini yapabilmek için güvenli bir bölgenin oluşturulması	55
Şekil 7.21 Mekanum tekerlekli mobil robot test alanı (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, merkez kampüsü, basketbol sahası).....	56
Şekil 7.22 Mobil robot ile takip edilen referans yörünge.....	57
Şekil 7.23 Mekanum tekerlekli mobil robot kontrol sistemi iletişim protokolü akış diyagramı	58
Şekil 7.24 İç ortam konumlandırma sisteminin mekanum tekerlekli mobil robot ile test sonuçları.....	58
Şekil 7.25 Şekil 7.24'te gösterilen sonuçların detay görünümü.....	59
Şekil 7.26 LHC-MC yöntemi ile referans yörünge arasında oluşan hata değerleri detay görünümü.....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 X-ekseninde elde edilen tahmin hataları	26
Çizelge 5.2 Y-ekseninde elde edilen tahmin hataları	29
Çizelge 5.3 Y-ekseninde elde edilen tahmin hataları	29
Çizelge 6.1 Y-ekseninde elde edilen tahmin hataları	36
Çizelge 7.1 X-ekseninde elde edilen tahmin hataları	51
Çizelge 7.2 Y-ekseninde elde edilen tahmin hataları	51



EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

Sayfa

EK A KODLAR.....	59
------------------	----





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

θ_1	: Sinyalin Ulaşma Açısı
θ_2	: Sinyalin Ulaşma Açısı
R	: Sabit Sensör Yarıçapı
V	: Sinyalin Yayılma Hızı
t	: Sinyalin Yayılma Süresi
c	: Işık Hızı
β	: Sinyalin varış yönü açısı
σ	: Standart sapma
F	: rastgele seçilen noktalar
e	: ortalama değer
W	: kovaryans matrisi
S	: alt üçgensel matrisi
B_i	: olasılık fonksiyonu
P	: değişken vektörü
G	: dağılım fonksiyonu
θ	: en küçük kareler yöntemi ile hesaplanan minimum hata değeri
X_n	: gözlemlenen değer
S_n	: modelin hesapladığı teorik değer

KISALTMALAR

RFID	: Radio Frequency Identification
QR CODE	: Quick Response Code
AGV	: Automated Guided Vehicle
LSE	: Least Squares Estimator
TOA	: Time Of Arrival
TDOA	: Time Difference Of Arrival
DOA	: Direction Of Arrival
GPS	: Global Positioning Systems
IR	: Infrared Sensor
MC	: Monte Carlo
LHS-MC	: Latin Hypercube Sampling Based Monte Carlo
UWB	: Ultra Wideband
AOA	: Angle Of Arrival
RMS	: Root Mean Square
SPI	: Serial Peripheral Interface
UART	: Universal Asynchronous Receiver Transmitter
MCU	: Microcontroller Unit
T	: Tag
A	: Anchor

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Endüstriyel alanlarda konumlandırma, farklı izleme hedeflerinde karşılaşılan zorluklardan biridir. Bir mobil robot veya insansız bir kara aracı yörünge izleme görevinde uygun bir iç mekan konumlandırma sistemi kullanılarak maksimum verim elde edebilir. Üretim hatlarının performansını artırma amacı ile kullanılan mobil robotların, güvenlik konularında oluşabilecek tehlikelere karşı önlem alabilmesi için doğru bir konumlandırma sistemi kullanması, istenilen yörüngeyi veya yolu izlemesi gerekmektedir. Otonom sistemler için istenen yörünge izleme görevleri genellikle birkaç araç ve sistem kullanılarak gerçekleştirilir. Bunlar endüstride en çok kullanılan araçlar olup: manyetik sensörler, lazer tarama mesafe bulucuları, kızılötesi ve ultrasonik sensörler, kameralar, karekodlar (QR kodları), Radyo Frekansı Tanımlama (RFID) sensörleridir. En yaygın kullanılan metodoloji, manyetik sensörlerin entegrasyonudur. Bu teknikte, referans yolu temsil eden manyetik şeritler zemine yapıştırılır. İnsansız kara aracı (AGV) üzerine yerleştirilen manyetik sensörler şerit çizgisini algılar ve kontrol sistemi tekerleklerin dönüşünü kontrol etmek için gerekli kontrol komutlarını üretir [1]. Bu sistemin kullanımı ve adaptasyonu nispeten kolaydır, ancak manyetik şerit ve sensör sistemi ile donatılmış araç tam otonom olarak kabul edilmez. Aracın izlemesi gereken rota değiştirilirse, yüzeyde manyetik şerit hatlarının yeniden tasarlanması gerekir ki bu endüstriyel bir alan için uygun bir çözüm olmayabilir. Bir AGV'nin konumunu tespit etmek için kullanılan başka bir çözüm ise birden fazla sensörden gelen verilerin işlenmesidir. Genellikle kullanılan sensörler; tekerlekte bulunan enkoder, lazer tarama mesafe bulucu sensörü ve kamera verileridir [2]. Ancak zemin koşullarından dolayı tekerlek kaymasının sürekli olması durumunda bu işlem doğru bir çözüm olarak görülmeyebilir. Hedeflerin konumlandırılmasında kullanılan diğer bir yöntem ise kamera çözümüdür. Bu çözümde AGV üzerine yerleştirilen kameralar önceden tanımlanmış bir renkle boyanmış yolu algılar. Işık yoğunluğu çok düşük olduğunda, ışık dalga boyu doğru seçilmediğinde ve çalışma ortamı kirli olduğunda renkli yol görünmez/tespit edilemez hale gelir. Bu durumda, kamera kullanımı verimli bir çözüm olmayabilir [3]. RFID, QR kod, kızılötesi-ultrasonik sensörler vb. gibi diğer çözümler endüstriyel bölgelerde kontrollü ortamlara ihtiyaç duyar.

Bir endüstriyel bölgede, bir AGV veya mobil robotun konumunu algılamak için (kontrollü ve/veya kontrolsüz) uyarlanabilecek en iyi çözümlerden biri, iç mekan konumlandırma sisteminin kullanılmasıdır. Konumlandırma sistemi doğru bir şekilde entegre edilirse, diğer 2D/3D sensör sistemlerine kıyasla daha güvenilir ve doğru veriler sağlayabilir. Endüstriyel kullanımlarda iç mekan konumlandırma sistemleri beklentilere göre yapılandırılır. Yaygın olarak kullanılan konfigürasyonlardan biri, kapsama alanında en az 3 Anchor (sabit sensör) ve 1 Tag (hedef sensör) içerir. Yaygın olarak kullanılan diğer konfigürasyonda ise en az 4 sabit sensör ve 1 hedef sensör içerir. Genel yaklaşımda, hedef sensörün konumunu tahmin etmek için temel üçgenleme ve birbirini kesen çemberlerin kesişim kuralları kullanılır [4]. Bu yaklaşım teoride güzel sonuçlar vermesine rağmen, gerçek uygulamalarda gürültü, kesişim olmaması, zayıf veri vb. gibi belirsizliklerden dolayı beklenildiği gibi çalışmayabilir.

Konumlandırma sistemleri oluşturmak için kullanılan en yaygın yaklaşımlar en küçük kareler metodu (LSE), varış zamanı tabanlı method (TOA) [5], varış zamanı farkı tabanlı yöntem (TDOA) [5] ve varış yönü tabanlı modeldir (DOA) [6]. Doğruluk beklentisinin birkaç cm düzeyinde olmaması durumunda bu yöntemler konum bilgisini sağlamaktadır. Fakat, doğruluk gereksinimleri birkaç cm düzeyinde olduğunda, yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar beklentileri karşılayacak kadar güçlü değildir [7].

Bu çalışmada, konumlandırma sistemlerinin ölçüm doğruluğunu iyileştirmek için yeni bir bakış açısı önerilmiştir. Bu öneri, tahmin yöntemlerinden biri olan Latin Hypercube Sampling Tabanlı Monte Carlo (LHS-MC) yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu algoritmanın güçlü yanları, herhangi bir geometrik yaklaşımın, sabit sensör ve hedef sensör arasındaki mesafelerin ölçülmesiyle oluşturulan dairelerin kesişimine gerek olmamasıdır [8]. Algoritma temel olarak veri kümesinin komşuluk ilişkisi ilkelerini kullanır. Verilerin özelliklerini öğrenir ve gelecek yönelimini tahmin etmeye çalışır. LHS-MC yönteminin kullanılması, her bir değişken aralığının tanımlandığı bir veri işleme ortamı sağladığı için konum tahmini sonuçlarını iyileştirebilir. Bu da konum tahmin algoritmaları alanına ve literatürde var olan yöntemlere göre tahminde iyileştirmeler sağlar. Bu yöntemin konumlandırma sistemine entegrasyonu, çıktıları daha doğru ve güvenilir hale getirir ve bu nedenle ölçümlerde doğruluğu artırır.

Bu çalışma kapsamında, önerilen bu çözüm çalışmalarının önerildiği şekilde gösterilebilmesi için donanım, yazılım ve matematiksel modelden oluşan bir deney düzeneği geliştirilmiş ve deneysel bir alanda test edilmiştir. Karşılaştırma yapmak ve önerilen metodolojinin etkinliğini,

performansını ve doğruluğunu göstermek için deneysel çalışmalar ayrıca iki farklı yaklaşım kullanılarak da yürütülmüştür: bunlar; Simple Random Sampling-Based Monte Carlo (MC) ve LSE tabanlı TOA yöntemleridir. Deney sonuçları, literatürde sunulan yöntemlere kıyasla önerilen algoritma kullanılarak konum tahmininin %20'den fazla iyileştirildiğini göstermektedir. LHS-MC yöntemi ayrıca, sistemin endüstriyel bir uygulamada kullanılmasını sağlayan cm'lik bir konum tahmini sağlamaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar, önerilen metodolojinin duyarlılığını ve tekrarlanabilirliği de göstermiştir.

Çalışmanın ana hatları şu şekilde oluşturulmuştur: Bir sonraki bölüm lokalizasyon yöntemleri ve yaygın olarak kullanılan ölçüm teknikleri ile ilgilidir. Bölüm 3, kapalı ortam konumlandırma sistemi ve karşılaşılan problemler hakkındadır. Bölüm 4 içerisinde, kullanılan yöntem ve algoritmalar detaylıca açıklanmıştır. MC algoritması, LHS-MC ve LSE algoritmaları da bu bölümde detaylıca gösterilmiştir. Bölüm 5'te, deney düzeneğini ve deneylerin yürütüldüğü test alanı tanıtılmaktadır. Bölüm 6'da, mekanum tekerlek kullanan mobil bir robot tanıtılmış, matematiksel modeli verilmiş, tasarım ve imalat aşamaları anlatılmıştır. Bölüm 7 ve 8, deneysel çalışmaları, sonuçları ve önerileri içermektedir.

[9] numaralı çalışma ile, kapalı ortamlarda konumlama hatasını azaltabilmek için ultra geniş bant radyo sinyallerinin ham kanal tepkileri incelenmiş ve testler yapılmıştır. [10] numaralı çalışmada, ultra geniş bant bir konumlama sistemi insan takibi için mobil bir robot üzerinde test edilmiştir. [11] numaralı çalışma ile araştırmacılar, ultra geniş bant sensörü kullanarak çoklu hedef takibi için “spatial-temporal constrained particle filter” yöntemini uygulamışlardır. [12] numaralı çalışma ile araştırmacılar, ultra geniş bant sensörlerini ataletsel ölçüm birimi sensörü ile birlikte kullanmışlar ve genişletilmiş Kalman filtresi ve sigma bazlı Kalman filtresi modellerini sisteme entegre etmişlerdir. Bu sayede yüksek doğruluk oranı elde edilmiştir. [13] numaralı çalışma ile araştırmacılar, konumlama hatasını azaltmak amacıyla optimize edilmiş pozisyon tahmini yöntemini önermişler, konum tahminini Gauss-Newton ve Levenberg-Marquardt yöntemleri ile sağlamışlardır. [14] numaralı çalışma ile, UWB teknolojisi TOA tabanlı konumlama algoritması ile kullanılmış, konum tahmini algoritması için ortalama hata bulma (RMS) yöntemi tercih edilmiştir. [15] numaralı çalışma ile araştırmacılar, online ve offline durumlar için wi-fi teknolojisi kullanılarak rastgele istatistiksel yöntem ile iç ortamda hedef konumun tespiti üzerine çalışmışlardır. [16] numaralı çalışma ile araştırmacılar, kapalı ortamdaki hedefin konumunu 3 boyutta değerlendirip düşük hata değeriyle bulabilmek için görülebilir ışık iletişim teknolojisinden yararlanmışlar, genetik algoritma tabanlı bir

konumlandırma metodu geliştirmişlerdir. [17] numaralı çalışma ile, yeni bir kapalı ortam konumlama sistemi önerilmiş, UWB iletişimi ile çalışan sistemin endüstriyel ortamda test edilmesi sağlanmıştır.

[18] numaralı çalışma ile araştırmacılar; Bluetooth teknolojisi kullanılarak düşük enerji ile iç ortamda konumlama sistemi önermişlerdir. Konumlama hataları k-en yakın komşu (kNN) ve ağırlıklı k-en yakın komşu (wkNN) sınıflandırıcıları kullanılarak azaltılmıştır. Çalışmada önerilen algoritmanın etkinliğini göstermek için farklı metrik fonksiyonlar kullanılarak hazırlanmış hata grafiklerine yer verilmiştir. [19] numaralı çalışma ile araştırmacılar, parçacık optimizasyon algoritmasını ZingBee tabanlı sensörler ile birlikte kullanarak bir iç ortam konumlandırma sistemi önermişlerdir. [20] numaralı çalışma ile, düşük maliyetli 3 boyutlu bir kapalı ortam hedef konum belirleme yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem mikro elektro-mekanik sensor (MEMS) kullanarak hedefin konumunu bulmayı amaçlamaktadır. Kullanılan sistem içerisinde bulunan ivmeölçer, jiroskop ve basınçölçer sensörlerinden gelen veriler kullanılarak hedefin konum tahmin edilmeye çalışılmıştır. [21] numaralı çalışma ile, inşaat şantiyesi ortamında iş takibi için wi-fi tabanlı bir konumlandırma sistemi önerilmiş, sistem gerçek ortamda test edilerek sonuçlar paylaşılmıştır.

[22] numaralı çalışmada, Monte Carlo (MC) yöntemi, farklı doğrulama parametrelerinin etkilerini analiz etmeyi sağlayan yeni bir kalibrasyon aracı oluşturmak için kullanılmıştır. Geliştirilen model bir freze tezgahında test edilmiş ve geometrik hatalar tahmin edilmiştir. [23] numaralı çalışmada, daha güvenilir sonuçlar elde etmek için sapma ve hata bilgileri nesne tabanlı bir makine öğrenmesi ile düzeltilmiştir. Bu sistemi geliştirmek için Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) ve Monte Carlo yöntemi birlikte kullanılmıştır. Bu şekilde Lazer Görüntüleme Algılama ve Mesafelendirme (LIDAR), hava görüntüsü ve Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK) GPS verileri kullanılarak nesne tabanlı bir konum düzeltme yöntemi geliştirilmiştir. [24] numaralı çalışmada, GPS vektörleri kullanılarak hesaplanan gerinim oranları için bir hata analiz aracı önerilmiştir. Sistem, GPS verilerinin tahminini ve gerçek değerler ile ortaya çıkan hata değerlerini gösteren MC yöntemini kullanmaktadır. [25] nolu çalışmada araştırmacılar, silindiriklik hatasını ölçmek için Quasi-MC yöntemini kullanmıştır. [26] numaralı çalışma ile, MC yöntemi kullanarak tolerans analiz aracı geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem geometrik tolerans uygulamasına uyarlanmıştır. Önerilen modelin doğruluğu simülasyon çalışmaları yapılarak test edilmiştir.

[27] numaralı çalışmada araştırmacılar, yüzeyi aşınmış boru hatlarının güvenilirliğini test etmek amacıyla geliştirilmiş bir yöntem önermiştir. MC ve LHS-MC yöntemleri ayrı ayrı test edilmiş, karşılaştırma tabloları hazırlanmış ve bunun sonucunda boru yüzeyindeki aşınmanın derinliği ve uzunluğu tahmin edilmeye çalışılmıştır. [28] numaralı çalışmada araştırmacılar, belirsizlik analizi yapmak için LHS-MC yöntemi kullanmıştır. Yapılan analizlerde hedef, doğruluk oranlarının artırılmasıdır. [29] numaralı çalışmada araştırmacılar, Quasi-MC örnekleme metodu, LHS-MC, Sobol, Niederreiter-Xing and Lattice yöntemlerinin örnekleme verimliliğini test etmişlerdir. Çalışma ayrıca MC tabanlı algoritmalar kullanılarak belirsizlik analizi sağlamak için de yapılmıştır. [30] numaralı çalışmada araştırmacılar, LHS-MC yöntemini kullanarak karmaşık sistemlerdeki belirsizliğin dağılımını incelemişlerdir. LH-MC yönteminin karmaşık problemlerde uygulanabilmesi için öneriler sunmuşlardır. [31] numaralı çalışmada araştırmacılar, gaz boru hatlarındaki arz yeterliliğinin değerlendirilmesini, LHS-MC yöntemine dayalı olarak geliştirilen bir model kullanarak yapmışlardır. Model gaz boru hatlarının tüm fiziksel ve yasal kısıtlamaları dikkate alınarak geliştirilmiştir. Kurgulanan simülasyon ortamında gerekli test çalışmaları yapılmıştır.

Literatür çalışmaları göstermiştir ki; MC ve LHS-MC yöntemleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu yöntemler farklı araştırma alanlarında kullanılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Fakat, LHS-MC yöntemi mekanum tekerlekli bir mobil robotun iç ortam konumlandırması amacıyla kullanılmamıştır. Mobil robot uygulamalarında, iç ortam konumlandırma çok önemli olup hata payının önceden belirlenen bir hata aralığında kalması istemektedir. Bu hem yörünge takibi performansını iyileştirecek hem de iş güvenliğini istenilen seviyede sağlayacaktır. LHS-MC yönteminin hata oranlarını kendi tahmin algoritmasını kullanarak düşürdüğü, literatürde verilen örnek çalışmalarda görülmektedir. Bu çalışmalarda, örnekleme farklılığının tahmin üzerindeki etkileri deneysel olarak da kanıtlanmış ve LHS-MC algoritmasının tahmin amaçlı kullanımlarda iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada mekanum tekerlekli bir mobil robotun iç ortam konumlandırma doğruluğunu arttırmak amacıyla LHS-MC yöntemi ana sisteme entegre edilmiştir. LHS-MC yönteminin herhangi bir matematiksel model kullanımına ihtiyacının olmaması, uygulanabilirliğini kolaylaştırdığı gibi ana konumlardırma algoritmasının da çalışma verimliliğini arttırmıştır. Bu sayede kullanımı kolay, düşük maliyetli ve hızlı bir konumlandırma algoritması elde edilmektedir.



BÖLÜM 2

LOKALİZASYON YÖNTEMLERİ

2.1 Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS)

Küresel konumlandırma sistemi, dış ortamda hedef konumun tespitinde kullanılan yaygın bir yöntemdir. Dünya yörüngesinde bulunan sabit sensörlerin gönderdiği elektromanyetik dalgaların iç ortamda bulunan hedef sensörlere ulaşması mümkün değildir. Bu yüzden iç ortam konumlandırma uygulamalarında tercih edilmez [32].

2.2 Kızılötesi Radyasyon ile Konumlandırma Sistemi (IR)

Kablosuz teknolojiler arasında kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Kızılötesi sensörler küçük boyutlu, hafif ve kolay taşınabilir cihazlardır. Ancak güvenlik açısından diğer yöntemlere göre daha az tercih edilirler. Elektromanyetik dalgalar ortam ışıklarına ve özellikle güneş ışığına çok duyarlıdır. Bu nedenle konumlandırma uygulamalarında fazla tercih edilmezler [33].

2.3 Radyo Frekans Tanılaması ile Konumlandırma (RFID)

RFID tabanlı sistemler günümüzde insan veya obje konumlandırması için kullanılmaktadır. Kullandığı elektromanyetik dalgalar radyo frekansıdır. Kablosuz bir şekilde tek yönlü haberleşme iletişim yöntemi ile haberleşirler, fakat, çoğu uygulamada çalışma mesafesi 1-2 metreyi geçmez [34].

2.3.1 Bluetooth Haberleşme ile Konumlandırma (BT)

Bluetooth haberleşme protokü 2.5 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Günümüzde kullandığımız telefon, bilgisayar gibi çoğu mobil cihazda bulunmaktadır. Bluetooth iletişim protokolü yüksek güvenli, düşük maliyetli ve düşük güç tüketimine sahiptir. Her bluetooth

cihazı kendine ait özel ID numarasına sahiptir. Bu sayede konumlandırma uygulamalarında kullanılabilir. Bluetooth cihazları her veri alışverişi öncesinde tanımlama işlemi yaparlar; bu yüzden gerçek zamanlı konumlama uygulamalarında bu işlem sistemde gecikmelere sebep olacağından yaygın olarak tercih edilmezler [35].

2.3.2 Ultra Geniş Bant Konumlandırma (UWB)

UWB cihazları kısa mesafede yüksek bant genişliğine sahip radyo frekans teknolojisini kullanmaktadır. Ancak diğer radyo frekansı ile çalışan cihazlardan farklı olarak çok yüksek frekans aralığı kullanmasıdır. Bu sayede kullandığı radyo sinyalleri etrafındaki engellerden daha az yansır veya sönümlenir. Konumlandırma uygulamalarındaki hata değeri genellikle 30 cm veya daha düşüktür [36].

2.3.3 FM Radyo Tabanlı Konumlandırma

FM tabanlı sistemler uzun süredir kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan örnekleri radyolardır. FM tabanlı sistemler sinyalin bant aralığını bölerek farklı kaynaklardan gelen verilerin ayırt edilmesini sağlar. Konumlandırma hatasının yüksek olması sebebi ile yaygın olarak kullanılmayan bir yöntem olan FM tabanlı konumlandırma ile ilgili yakın zamanda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır [37, 38].

2.3.4 Zigbee Konumlandırma Sistemi

ZigBee teknolojisi yakın zamanda yaygınlaşmış olan radyo sinyali tabanlı bir sistemdir. Kısa ve orta mesafelerde kullanılır [39]. Tercih edilme sebebi diğer tüm yöntemler arasında en az enerji tüketen yöntem olmasıdır. Ancak lisanssız açık frekans bandını kullandığından dolayı veri alışverişi sırasında çevredeki radyo sinyallerinden kaynaklı sinyalde parazit oluşma riski fazladır. Ancak kapalı ortamlar için konumlama amaçlı kullanılabilir [40].

2.3.5 Hibrit Konumlandırma Sistemi

Hibrit konumlandırma sistemi, uygulamanın ihtiyacına göre farklı konumlandırma sistemlerinin veya matematiksel algoritmaların birlikte çalıştığı sistemlerdir. Örneğin, küresel konumlandırma sistemi (GPS) dış ortamda iyi çalışırken iç ortamlarda çalışmamaktadır.

Bununla birlikte iç ortamda daha uygun ancak dış ortamda iyi performans göstermeyen başka bir sistem ile birleştirildiğinde hibrit bir konumlandırma sistemi elde edilebilir [41].

2.3.6 Ultrasonik Konumlandırma Sistemi

Ultrasonik konumlandırma sistemi doğadaki bazı hayvanlarında kullandığı, diğer konumlandırma yöntemlere göre daha düşük frekans aralığı kullanan, sinyal tabanlı bir sistemdir. Ultrasonik sinyali gönderen bir verici sinyali alan bir alıcı olmak üzere iki cihazdan oluşur. Ultrasonik sinyaller engelleri aşamazlar. Ancak konumlandırmadaki hata değerleri mesafenin kısa olması durumunda cm düzeyinde olabilir [42, 43].

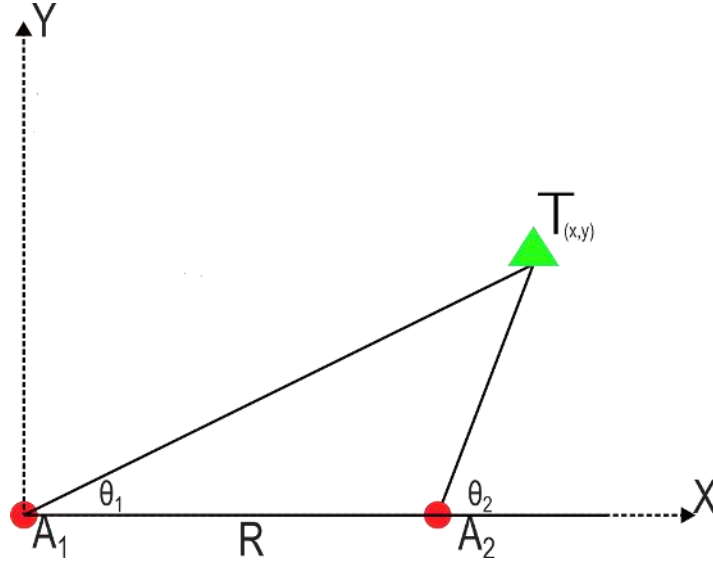
2.3.7 UWB Lokalizasyon Yöntemleri

2.3.7.1 AOA (Angle of Arrival – Sinyalin Ulaşma Açısı) Yöntemi

Sinyalin ulaşma açısı yöntemi, pozisyonlama yöntemlerinden bir tanesidir. Trilaterasyon (Triangulation) yöntemini kullanan bu teknikte hedef sensör ile sabit sensör arasında Şekil 2.1’de gösterildiği gibi iki noktayı birleştiren bir vektör çizilir. Bu yöntemde, açı ölçümü yapabilmek için en az iki sabit sensör ile yönlü antenlere ihtiyaç vardır. Ulaşma açısı yöntemi üç farklı şekilde bulunabilir; gelen sinyalin anten elemanları arasındaki faz farkı ölçülebilir, ikinci yöntem ise anten dizi elemanları boyunca ışın hızını ölçerek veya spektral yoğunluğu ölçerek belirlenebilir, üçüncü yöntem ise özel bir anten çeşidi kullanılarak bulunabilir [44]. Konum modeli aşağıda verilen denklemler ile bulunabilir. θ_1 ve θ_2 ile açısal yönelimler, R ile sabit sensör uzaklıkları gösterilmektedir (Şekil 2.1).

$$X = \frac{R(\tan \theta_2)}{\tan \theta_2 - \tan \theta_1} \quad (2.1)$$

$$Y = \frac{R(\tan \theta_1)(\tan \theta_2)}{\tan \theta_2 - \tan \theta_1} \quad (2.2)$$



Şekil 2.1 Ulaşma açısı yöntemi vektör gösterimi.

2.3.7.2 TOA (Time of Arrival – Sinyalin Ulaşma Zamanı) Yöntemi

Sabit sensör ile hedef sensör arasındaki mesafe, iki farklı noktadan birbirlerine gönderilen sinyalin zamanının belirlenmesiyle bulunur. İki boyutlu ortamda, TOA yönteminin uygulanabilmesi için en az üç doğrusal olmayan noktaya ihtiyaç vardır. Nokta sayısı artırıldığında, doğruluk ve hassasiyet artar. Bu modda uygulanan sabit sensör ve hedef sensör iki yönlü iletişim halindedir. Bu sebepten olayı zaman senkronizasyonu TDOA yöntemindeki kadar etkili değildir. Fakat, hedef sensör ve sabit sensör enerji tüketimleri TDOA yöntemine göre daha fazladır. Bu yöntemin basit matematiksel denklemi aşağıdaki gibidir [44]:

$$D_i(x) = V(t_i - t) \quad (2.3)$$

Burada sinyalin yayılma hızı V , yayılma süresi t ile gösterilmiştir. Her ölçüm birimi (i) ile tanımlanır. Hedef sensör (x_0, y_0) konumunda bulunur ve t_i zamanında haberleşir.

2.3.7.3 TDOA (Time Difference of Arrival – Sinyalin Ulaşma Zamanı Farkı) Yöntemi

Varış zamanı farkı yöntemi en çok kullanılan ikinci yöntemdir. Bu yöntemde hedef sensörün herhangi bir sinyal göndermesine ihtiyaç yoktur. Yalnızca sabit sensörlerin gönderdiği

sinyallerin varış zamanı yeterlidir. Hedef sensör, en az iki farklı sabit sensörden gelen sinyallerin zaman farkına bakarak konumunu hesaplar.

$$\Delta d = c(\Delta t) \quad (2.4)$$

2.3.7.4 DOA (Direction of Arrival – Sinyalin Ulaşma Yönü) Yöntemi

Sinyalin ulaşma yönü tekniği kullanılarak konum tahmini yapmak için yönlü antenler, aşamalı diziler ve akıllı antenler kullanır. Basit bir şekilde yön açısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\beta_{i,j} = \phi_i - \phi_j = \text{atan}\left(\frac{y-y_i}{x-x_i}\right) - \text{atan}\left(\frac{y-y_j}{x-x_j}\right) \quad (2.5)$$



BÖLÜM 3

KAPALI ORTAMLARDA KONUMLANDIRMA

Tüm konumlandırma yöntemleri temelde iki cihazdan gelen verileri kullanarak konum tahmini yapmak üzerine kurgulanmıştır. Bunlardan biri alıcı diğeri ise verici konumunda olan cihaz ya da cihazlardan oluşmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan konumlandırma sistemi, küresel pozisyon belirleme (GPS) yöntemi de bu prensiple çalışmaktadır. Alıcı konumundaki cihaz örneğin cep telefonu veya bilgisayar konumunda olurken, verici olarak adlandırdığımız cihaz ise dünya dışındaki yörüngelere oturtulmuş birden fazla uydudur. Uydular ile konumlandırma yapmak istediğimiz cihaz haberleşerek, cihazın konumu bulunabilir. Dış ortamlarda başarı ile kullanılan küresel konumlandırma sistemi, kapalı ortamlarda uydular ile cihazlar arasında haberleşmenin gerçekleşmemesinden dolayı kullanılamamaktadır.

Küresel pozisyon belirleme yönteminde kullanılan uydular ile aynı temel prensibi kullanan cihazların iç ortamlarda sabit bir şekilde konumlandırılarak, iç ortamlarda da konumlandırma yapılabilmesi mümkün kılınmıştır. Bu yüzden günümüzde çeşitli kapalı ortam konumlandırma yöntemleri denenmiş ve kullanılmaktadır. Ultra geniş bant konumlandırma metodu, kullanılan yöntemler içerisinde en çok tercih edilendir.

Bu çalışmada kullanılan ultra geniş bant yöntemi, zaman tabanlı konumlandırma yapan alıcı ve verici olmak üzere iki çeşit sensörden oluşmaktadır. Alıcı olarak adlandırılan cihaz hedef sensörü, verici olarak kullanılan cihaz ise sabit sensör olarak adlandırılmaktadır.

Konumlandırma sisteminin çalışma prensibi ve aşamaları sırasıyla aşağıda verildiği gibi özetlenebilir:

3.1 Trilaterasyon Yöntemi

İki boyutlu bir ortamda konumlandırma yapılabilmesi için en az üç verici bir de alıcı cihazın bulunması gerekmektedir. Bu durumun matematiksel olarak kurgulanması trilaterasyon yöntemi ile yapılabilir. Trilaterasyon yöntemi genelde alıcı ile verici arasındaki sinyalin uçuş süresinin ölçülmesiyle hesaplanan mesafe verisini kullanmaktadır. İki cihaz arasındaki mesafe bilgisi aşağıda verilen temel denklem ile bulunabilir:

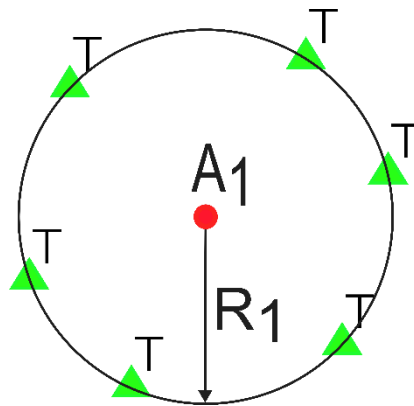
$$\text{Mesafe} = \text{Hız} \times \text{Zaman} \quad (3.1)$$

Radyo sinyallerinin hızı 299.792.458 m/s'dir. Bu hız bilgisi, ölçümü gerçekleştirilen alıcı ile verici arasındaki sinyal uçuş zamanı verisi ile birleştirilerek mesafe bilgisi elde edilmektedir.

3.1.1 İki Boyutlu Konumlandırma

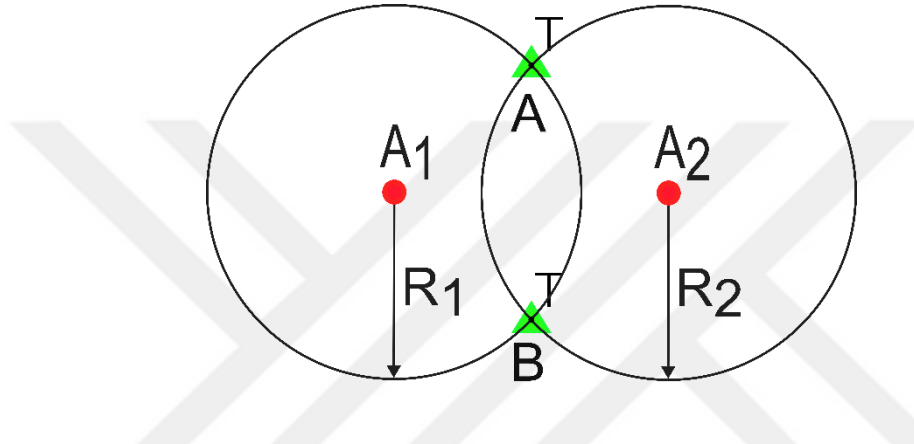
Konumlandırma sistemi anlatılırken alıcı ve verici cihazlarına sırasıyla hedef sensör ve sabit sensör olarak isimlendirme yapılacaktır. Bu şekilde ifade edildikten sonra şekillerin anlaşılması açısından sabit sensör A ile hedef sensör ise T harfleriyle gösterilerek anlatılacaktır (Şekil 3.1).

İki boyutta bir objenin konumlandırılması yapılırken, bir sabit sensör ve bir hedef sensör kullanılarak oluşturulan senaryo Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu gösterimde, yarıçap ile mesafe bilgisi, merkez nokta ile ise sabit sensörün konumu gösterilmektedir. Şekil 3.1'de de gösterildiği gibi hedef sensör R yarıçaplı daire üzerinde herhangi bir noktada olabilir.



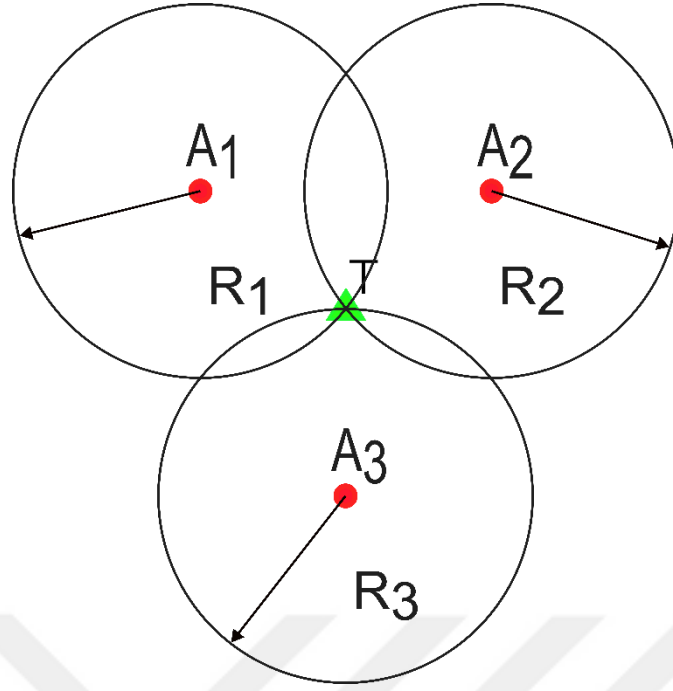
Şekil 3.1 Bir hedef sensör ve bir sabit sensörün olduğu iki boyutlu sistem.

Hedef sensörün konumunu, sabit sensör sayısını ikiye çıkartarak tekrar düzenlediğimizde Şekil 3.2’de gösterildiği gibi bir senaryo ortaya çıkacaktır. Bu senaryoda, hedef sensörün konumunun olabileceği seçenekler iki’ye düşürülmektedir. İki sabit sensör kullanılarak, merkezi bu sensörler ve yarıçapları mesafe verisi olan iki çember oluşmaktadır. Sabit sensörlerin merkez konumlarını oluşturdukları çemberlerin birbirlerini kesecekleri şekilde konumlandırıldığımızda, A ve B noktaları olmak üzere iki farklı noktada kesiştiklerini görmekteyiz. Bunun sonucunda konumunu bulmayı hedeflediğimiz hedef sensörün bu noktalardan birinde olacağı sonucu çıkmaktadır.



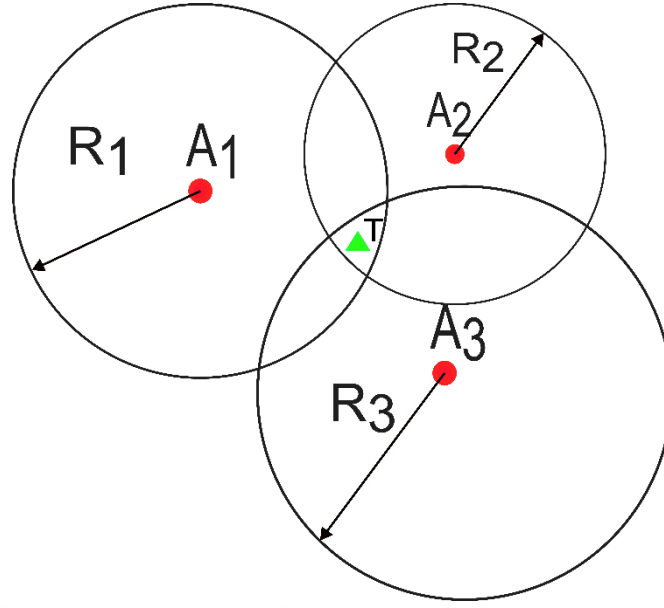
Şekil 3.2 Bir hedef sensör ve 2 sabit sensörün olduğu iki boyutlu sistem.

Şekil 3.3’de gösterildiği gibi birbirlerini kesen üç farklı çemberin bir kesişim noktasının olduğu bilindiğinden hedef sensörün konumunun olabileceği noktalar kümesini bire indirebilmek için, sabit sensör sayısı ikiden üçe çıkartılmıştır. Bunun sonucunda matematiksel olarak hedef sensörün konumu kesin bir şekilde bulunmaktadır.



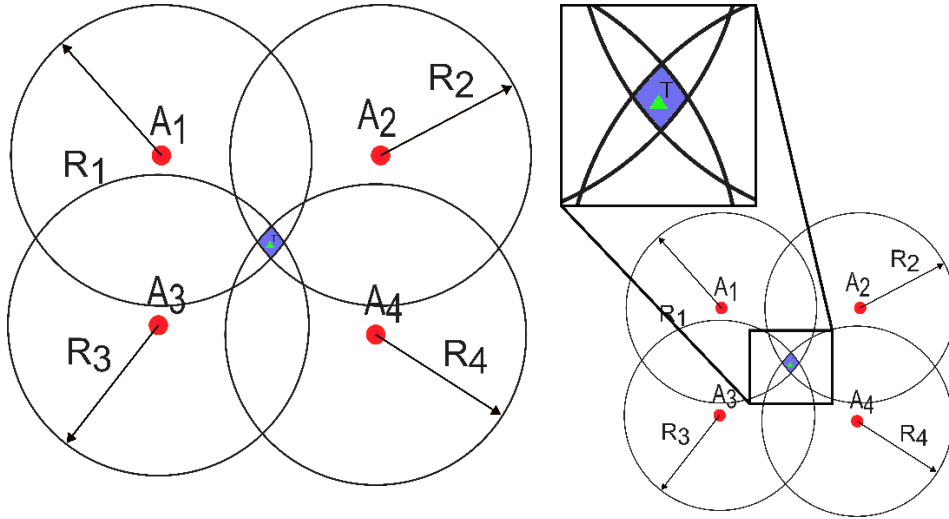
Şekil 3.3 Bir hedef sensör ve üç sabit sensör ile oluşturulan sistem.

Yukarıda anlatılan konumlandırma yönteminde hedef sensörün konumunun matematiksel olarak kesin bir şekilde bulunması mümkündür. Ancak gerçek ortamda bunun mümkün kılınabilmesi için konumlandırma sensörlerinin mükemmel bir şekilde çalışması yani sıfır hata oranı ile veri vermesi gerekmektedir. Fakat gerçek ortamda çalışan sensörler, ortam şartları, sinyallerin yansıması gibi faktörlerden dolayı belirli bir hata oranı ile veri vermektedir. Bu sebeple örneğin üç sabit sensörün bulunduğu sistemde oluşturdukları çemberler her durumda tek bir noktada kesişmemektedir. Şekil 3.4’de gösterildiği gibi A_1 , A_2 ve A_3 sabit sensörleri tek bir noktada değil ancak bir bölgede kesişmektedir. Bu durumda hedef sensörün konumu için bir noktadan bahsedilememektedir. Hedef sensörün konumu, üç sabit sensörün oluşturdukları kesişim bölgesinin içerisinde bulunan herhangi bir noktadır.



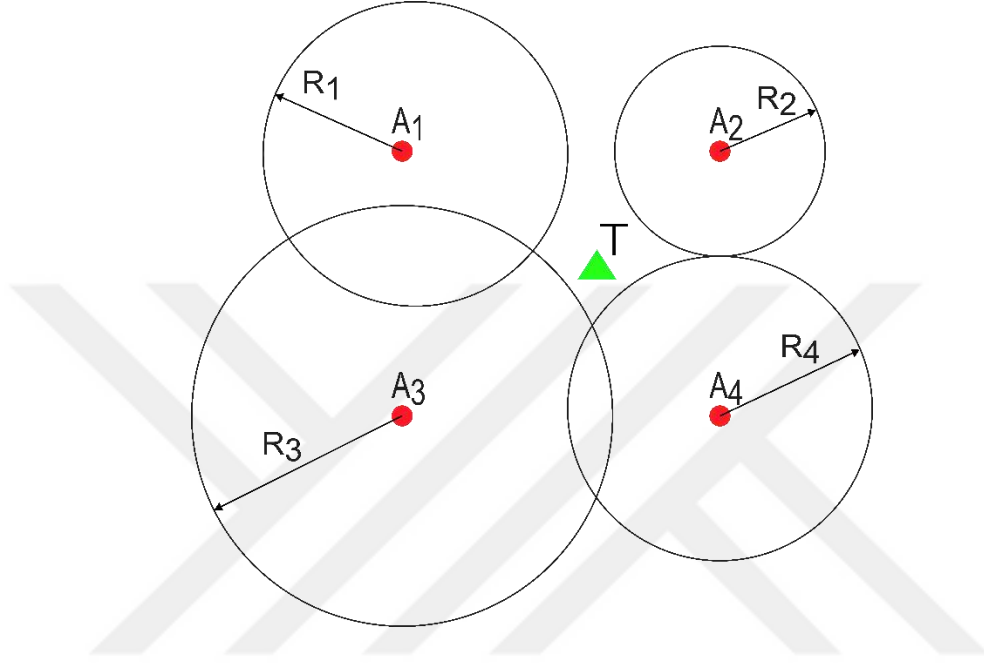
Şekil 3.4 Bir hedef sensör ve 3 sabit sensörün oluşturduğu sistem gerçek veriler ile oluşan iki boyutlu ortam.

Gerçek ortamda daha az hatalı sonuçlar elde edebilmek için, üç sabit sensörün oluşturduğu çemberlerin kesişim bölgesi, dördüncü sabit bir sensör eklenerek küçültülebilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Bir hedef sensör ve dört sabit sensörün oluşturduğu sistem.

Bu durum gerçek ortamda, Şekil 3.6 ile gösterildiği gibi sonuç verebilir. Yani; hedef sensörün herhangi bir kesişim bölgesinde olmadığı veya çemberlerden biri ya da daha fazlasının kesişmediği durumların da oluştuğu gözlemlenmektedir. Böyle bir durumda, hiçbir matematiksel model istenilen konum bilgisini verememekte ve güvenliğin önemli olduğu konumlandırma uygulamalarında olumsuz sonuçlar yaratmaktadır.



Şekil 3.6 Bir hedef sensör ve dört sabit sensör ile oluşturulan gerçek konumlandırma sonucu.

BÖLÜM 4

KULLANILAN YÖNTEM VE ALGORİTMALAR

4.1 Monte Carlo (MC) Yöntemi

Monte carlo yöntemi rastgele sayılar kullanarak çeşitli karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan bir istatistiksel yöntemdir. Çok fazla parametrenin tahmin edilmesinin gerekli olduğu karmaşık problemlerin çözümünde hızlı ve etkili bir çözüm sağlamaktadır. Monte Carlo simülasyonları, uygulamalı bilimler ve mühendislik alanında önemli bir rol oynamaktadır. Monte Carlo yöntemi fizikten finans sektörüne, bilgisayar oyun algoritmalarından kuantum fiziğine kadar çok geniş bir alanda sıkça kullanılmaktadır [45]. Bunun yanı sıra, farklı deterministik problemler rastgele sayı üretimine dayanan uygun bir MC algoritması ile de başarı ile çözülebilmektedir. MC metodunda, olasılıksal bir çözüm yöntemi kullanmasından dolayı teorik bir sonuca ulaşılması beklenemez. Bilgisayar algoritmaları için çok uygun olan bu yöntem, örnekleme sayısının artmasıyla çözümde hata oranının azalmasına olanak sağlayacaktır. Örnekleme sayısını problemin ilk aşamasında sabit olarak belirlemeyip, değişken olarak parametrize edildiğinde MC yönteminin farklı bir versiyonu olan Latin Hypercube Sampling Based Monte Carlo (LHS-MC) yöntemi elde edilmiş olur. Bu sayede sürekli değişebilen örnekleme sayısı ile hata oranında azalma olacak, değişen çalışma şartlarına göre algoritmanın ayarlanabilmesine olanak sağlanmış olacaktır.

Monte Carlo algoritmasını matematiksel olarak ifade etmek gerekirse:

Genel bir normal dağılım fonksiyonu denklem 4.1’de verilmiştir [46]:

$$P^* = (\sigma)F + e \quad (4.1)$$

σ : standart sapma

e: ortalama değer

F: rastgele seçilen noktalar

F ve e değerleri 0 ile 1 aralığında seçilmektedir. Çalışma [47]'de çok değişkenli normal dağılım fonksiyonu “triangular decomposition” (LU Decomposition) yöntemi kullanılarak uygulanmıştır. Bu yaklaşım denklem 4.2'de gösterildiği gibidir:

$$W = SS^T \quad (4.2)$$

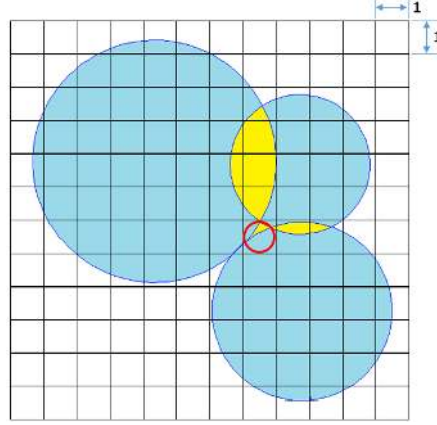
W: kovaryans matrisi

S: alt üçgensel matrisi

S matrisinin denklem 4.1'e dahil edilmesiyle rastgele değişken vektör denklemi elde edilir (denklem 4.3):

$$P = (S)F + e \quad (4.3)$$

MC yönteminin çalışma prensibini basit bir örnekle ifade edebilmek için Şekil 4.1 ile gösterilen grafik hazırlanmıştır. Bu örnekte, üç sabit sensör ve bir hedef sensörden oluşan sistem gösterilmiştir. Sabit ve hedef sensör arasında oluşan mesafe bilgileri çemberler ile gösterilmektedir. Şekil 4.1'de gösterilen ve üç çemberin kesişme alanını belirten sistem, her biri eşit ve boyutu 1x1 olacak şekilde N sayıda kare hücreye bölünmüştür. Oluşturulan N sayıdaki hücre (alan) rastgele seçilerek hedef sensörün bu noktada olup olmadığına bakılmaktadır. MC tabanlı algoritma gerekli taramayı yapmakta ve sonuç olarak hedef sensörün olabileceği konumu Şekil 4.1'de gösterildiği gibi kırmızı daire içinde göstermektedir. Sonuç olarak kırmızı ile gösterilen dairenin yarıçapı algoritmanın doğruluk oranını vermektedir. Dairenin yarıçapı ne kadar küçük olursa tahmin edilen lokasyon verisi o derece doğru olacaktır. Bu noktada çalışmanın literatüre katkısı şu şekilde ifade edilebilir: elde edilen bu doğruluk oranını arttırmak için LHS-MC tabanlı bir tahmin algoritması sisteme entegre edilebilir ve algoritmanın değişken yapısı ile doğruluk oranı iyileştirilebilir.



Şekil 4.1 Hedef sensörün konumunun MC yöntemine göre elde edilmesi.

4.2 Latin Hypercube Sampling Tabanlı Monte Carlo (LHS-MC) Yöntemi

Çalışma [48]'de, değişken setinin $P_1, P_2, \dots, P_k$ olduğu bir olasılık fonksiyonunun örneklenmesini sağlayan “Latin Hypercube Sampling” yöntemi önerilmiştir. Her bir değişkenin dağılımı N sayıda eşit aralığa bölünmüştür. Her bir aralık için oluşturulan listeden rastgele bir değer seçilir, daha sonra her bir değişken N değerine sahiptir ve diğer değişkenler ile bağlıdır. Bu, Latin Hypercube Sampling (LHS) yönteminin standart MC yönteminden farkını göstermektedir. Buna göre; LHS algoritmasının ilk adımında, her bir değişkenin kümülatif dağılımı N eşit aralığa bölünür. İkinci adımda ise oluşturulan her aralık içerisinde rastgele bir değer seçilir. Oluşturulan her bir aralığın olasılık fonksiyonu ve elde edilen değişken vektör denklemi denklem 4.4 ve 4.5’de de gösterilmiştir [46, 49].

$$B_i = \frac{F_d + (i-1)}{N} \quad (4.4)$$

B_i : Olasılık fonksiyonu

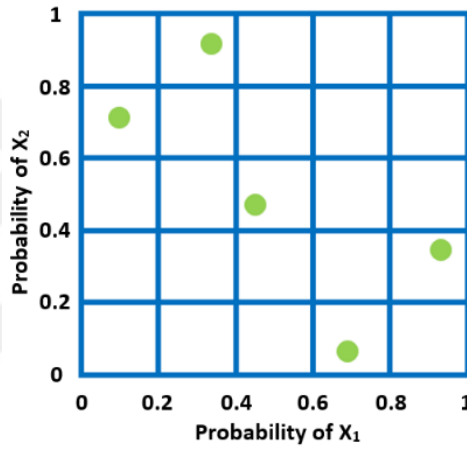
F_d : 0 ile 1 aralığında rastgele üretilen sayısal değer

$$P = G^{-1}(B) \quad (4.5)$$

P : Değişken Vektörü

G = Dağılım Fonksiyonu

LHS-MC yöntemi ile oluşturulan algorithmada, her X değeri için bir N değeri elde edilir ve diğer değişkenler rastgele seçilerek birbirine bağlanır. Birbirinden bağımsız olduğu kabul edilen, P_1 ve P_2 olarak gösterilen iki değişken için ayrı ayrı tek boyutlu örneklemeler elde edebilmek için tek boyutlu bir yöntem izlenir. Sonrasında, oluşturulan bu iki ayrı listeden rastgele seçilen değerler ile iki boyutlu çiftler oluşturulur ve oluşan bu çift veri seti rastgele olacak şekilde satır ve sütun hücrelerine yerleştirilir. Bu işlem sırasına uyularak çok fazla değişkene sahip karmaşık problemler için de uygulanabilir. İki boyutlu LHS-MC yönteminin temel prensibi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 İki boyutlu LHS-MC yöntemi.

4.3 En Küçük Kareler Yöntemi (LSE)

En küçük kareler yöntemi, elde edilen teorik değerler ile deney sonuçlarından gelen gerçek veriler arasındaki farkların karelerinin toplamını küçültme prensibine dayanmaktadır. Genel ifade denklem 4.6’da verilmiştir.

$$J(\theta) = \sum_{n=1}^N (x_n - s_n)^2 \quad (4.6)$$

Burada, θ en küçük kareler yöntemi ile hesaplanan minimum hata değerini, s_n modelin hesapladığı teorik değeri, x_n ise gözlemlenen değeri ifade etmektedir.

Sabit sensör ile hedef sensör arasındaki mesafeyi Öklit uzaklığı denklemini kullanarak aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$d_i = \|\hat{P}_T - P_A\| \quad (4.7)$$

Denklem 4.7’de, d_i sabit sensör ile hedef sensör arasındaki mesafeyi, $\hat{P}_T$ konumu bilinmeyen hedef sensörü, P_A ise konumları bilinen sabit sensör noktalarını göstermektedir.

İki boyutlu konumlandırma sistemi için Öklit denklemi yeniden yazılırsa:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (4.8)$$

Burada, x_i ve y_i bilinen sabit sensör konumlarını, x ve y ise bilinmeyen hedef sensör konumunu ifade etmektedir.

En küçük kareler yöntemi skalar ifadeler için tekrar ifade edilirse:

$$s_n = \theta(h_n) \quad (4.9)$$

Burada h_n ile gözlemlenen değerler belirtilmektedir. Denklem 4.9’u denklem 4.6’da yerine yazılırsa, denklem 4.10 elde edilmiş olur.

$$J(\theta) = \sum_{n=1}^N (x_n - \theta h_n)^2 \quad (4.10)$$

Denklem 4.9 ile ifade edilen hesaplanan teorik değer $s = [s_0, \dots, s_n]^T$ ve H ile verilen $(N \times p)$ boyutunda değerleri bilinen gözlem matrisi olmak üzere:

$$s = H\theta \text{ ve } \hat{\theta} = (H^T H)^{-1} H^T x \quad (4.11)$$

Denklem 4.8 ile verilen ifade ayrıntılı olarak yazılırsa denklem 4.12 elde edilmiş olur:

$$-2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 = \hat{d}_i^2 - x_i^2 - y_i^2 \quad (4.12)$$

Denklem 4.12’de verilen ifade görüldüğü üzere lineer olmayan bir denklemdir. Denklemi lineer hale getirmek için denklem 4.13’de verilen ifade yerine yazılırsa:

$$R = x^2 + y^2 \quad (4.13)$$

Sonuç olarak, hatanın minimum olduğu en küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç matrisi denklem 4.14’te verildiği gibidir:

$$\hat{\theta} = [x \ y \ R]^T \quad (4.14)$$

H ile x değerlerini matris formunda yazılırsa:

$$H = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_n & -2y_n & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$x = \begin{bmatrix} \hat{d}_1^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ \hat{d}_2^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ \vdots \\ \hat{d}_n^2 - x_n^2 - y_n^2 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

İfadeler yerine koyulup, denklem 4.11 çözüldüğünde en küçük kareler yönteminin hesaplamış olduğu hedef sensörün konumu bulunabilir [50]. Not: LSE algoritmasının daha iyi anlaşılabilmesi için örnek Matlab kodu hazırlanmış ve ekler kısmında gösterilmiştir.

BÖLÜM 5

MATERYAL METOT

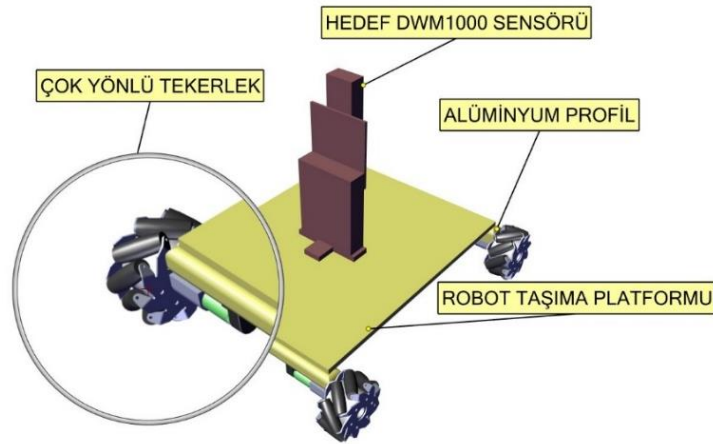
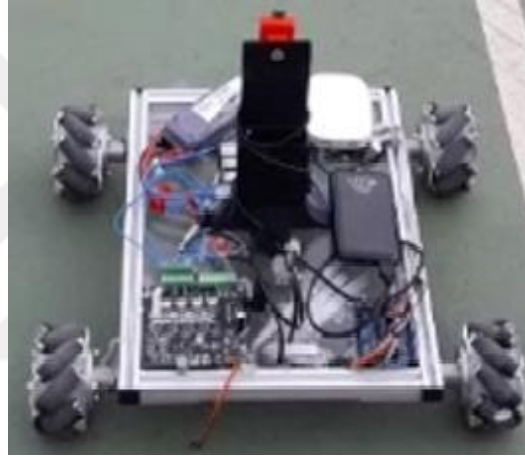
5.1 Mobil Robot Tasarım ve İmalatı

Geliştirilen LHC-MC ve MC yöntemlerini kullanan konumlandırma algoritmalarını test etmek ve gerekli karşılaştırmaları yapabilmek için Şekil 5.1’de gösterilen dört mekanum tekerleğe sahip mobil bir robot tasarlanmış ve imal edilmiştir. Şekil 5.2’de mekanum tekerleğinin iç yapısı ve elemanları detaylıca gösterilmiştir. İmal edilen mekanum tekerlek kullanan mobil robota aşağıda maddeler halinde verilen donanımlar eklenmiştir. Ayrıca mobil robotun teknik özellikleri çizelge 5.2’de verilmiştir.

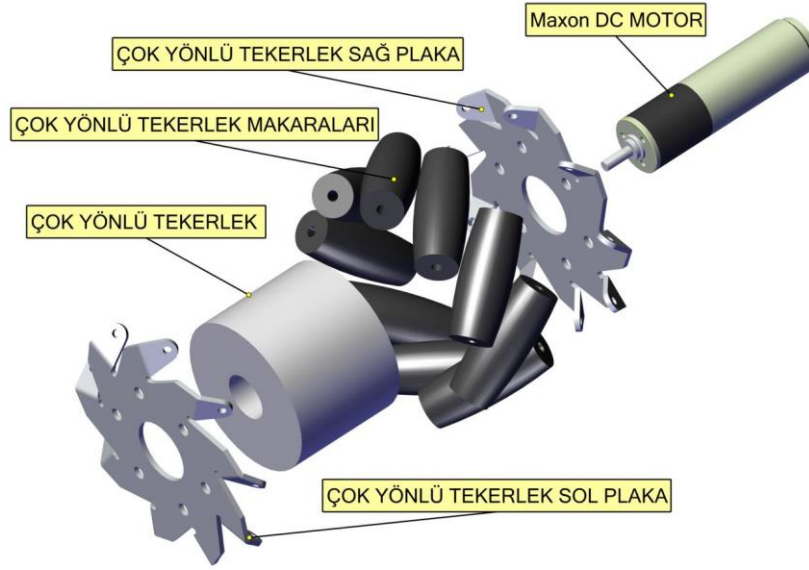
- DC Motor
- DC Motor Sürücü ve kontrol devresi
- Batarya
- Bluetooth modülü
- Enkoder okuma kartı ve enkoder okuma bağlantı kartı
- Enkoder bağlantısı için çoklu modül
- Server olarak kullanılan ESP8266 tabanlı mikroişlemci

Çizelge 5.1 Mekanum tekerlekli mobil robotun teknik özellikleri.

Robotun Taşıma Kapasitesi	30 kg
Robotun Hızı	1 – 3 m/s
Maksimum ivme	0.5 – 2 m/s ²
Robot ölçüleri	0.38 m x 0.48 m



Şekil 5.1 Mekanum tekerlek kullanan mobil robot ve 3D tasarımı.



Şekil 5.2 Mekanum tekerlek detaylı görünümü.

Mekanum tekerlek kullanan robot için 60 W gücünde grafit bazlı Şekil 5.3'te gösterilen fırçalı DC motor seçilmiştir. Motorun çalışma voltajı 12 V, yüksüz durumda çektiği akım 0.8 A, yüksüz durumda ürettiği tork 0.17 Nm ve yüksüz durumda maksimum dönme hızı 2000 RPM'dir. Ek olarak; 18:1 oranında dişli kutusu kullanılmış, tork ve dönme hızı değerleri 57.14 RPM ve 3 Nm değerlerine ulaştırılmıştır. Ayrıca seçilen motorlara, 1024 PPR'lık artımsal enkoderler de eklenmiştir.



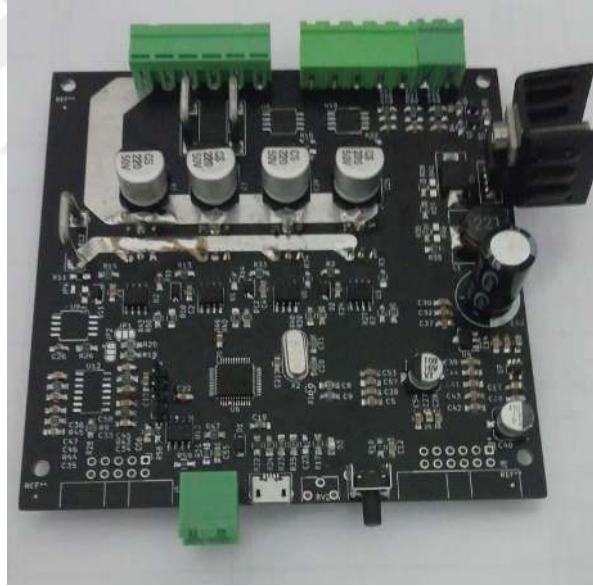
Şekil 5.3 Mobil robot hareketini sağlayan DC motor.

Robot üzerinde lityum polimer bazlı batarya kullanılmıştır (Şekil 5.4). Batarya voltajı 14.8 V, akım kapasitesi ise 4200 mAh'dir.



Şekil 5.4 lityum polimer pil.

Şekil 5.5'te DC motorları sürmek amacıyla tasarlanan ve imal edilen motor sürücüsü ve kontrol devresi gösterilmiştir. Sürücünün teknik özellikleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.5 DC motor sürücü ve kontrol devresi.

Çizelge 5.2 Dc motor sürücü ve kontrol devresi teknik özellikleri.

Mikrodenetleyici	STM32F103
Bağlantı arayüzleri	RS232, CANBus
Maksimum çıkış akımı	10 Amper
Maksimum giriş voltajı	40 Volt
Minimum çalışma voltajı	10 Volt

Şekil 5.6’da aracın uzaktan mobil telefon uygulaması ile bluetooth haberleşme yöntemi ile kontrol edilmesini sağlayan bluetooth modülü gösterilmiştir. Bu modülünün teknik özellikleri Çizelge 5.3’te verilmiştir.

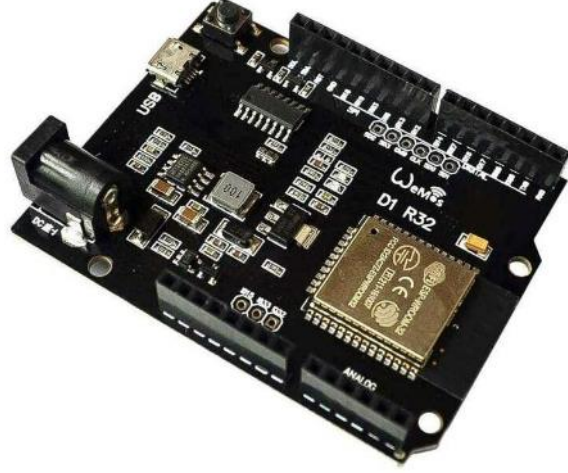


Şekil 5.6 HC-05 bluetooth modülü.

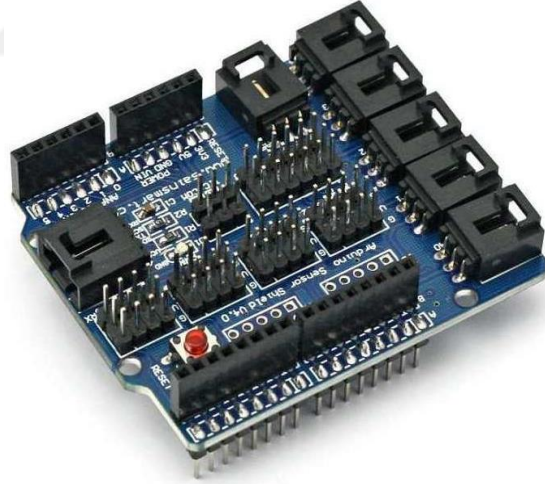
Çizelge 5.3 Hc-05 bluetooth modülü.

Model	HC-05
Giriş voltajı	DC 5 Volt
Haberleşme protokolü	RS232
Kullanım modları	Master, Slave

Şekil 5.7 ve 5.8’de DC motor enkoderlerinden gelen konum bilgisini okumak için kullanılan ESP32 tabanlı mikrodenetleyici kartı ve enkoder bağlantılarının kolay bir şekilde yapılabilmesi için kullanılan çoklu okuma modülü gösterilmiştir. ESP32 tabanlı mikrodenetleyeci enkoder verilerini okumaya uygun hızlı donanımsal okuma modüllerine sahiptir ve üzerinde bulunan Wi-Fi modülü sayesinde veri transferi yapma imkanı sağlamaktadır.

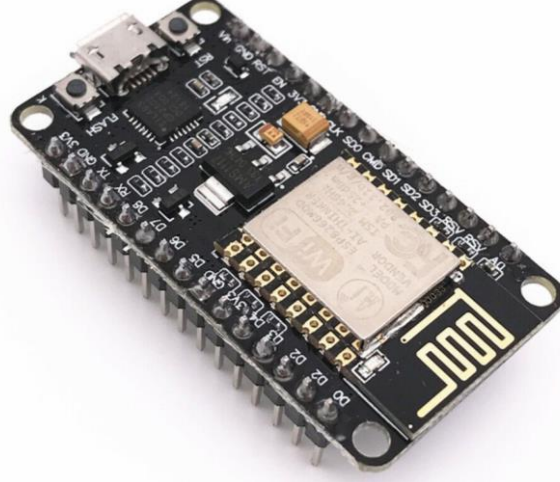


Şekil 5.7 ESP32 tabanlı mikroişlemci - enkoder okuma kartı.



Şekil 5.8 Enkoder bağlantısı için çoklu modül.

Şekil 5.9’da, dahili server olarak kullanılan ESP8266 tabanlı mikrodnetleyici gösterilmiştir. Üzerinde bulunan, kullanıma hazır Wi-Fi modülü sayesinde hızlı bir şekilde kablosuz veri iletişimine olanak sağlamaktadır.



Şekil 5.9 Server olarak kullanılan ESP8266 tabanlı mikroişlemci.



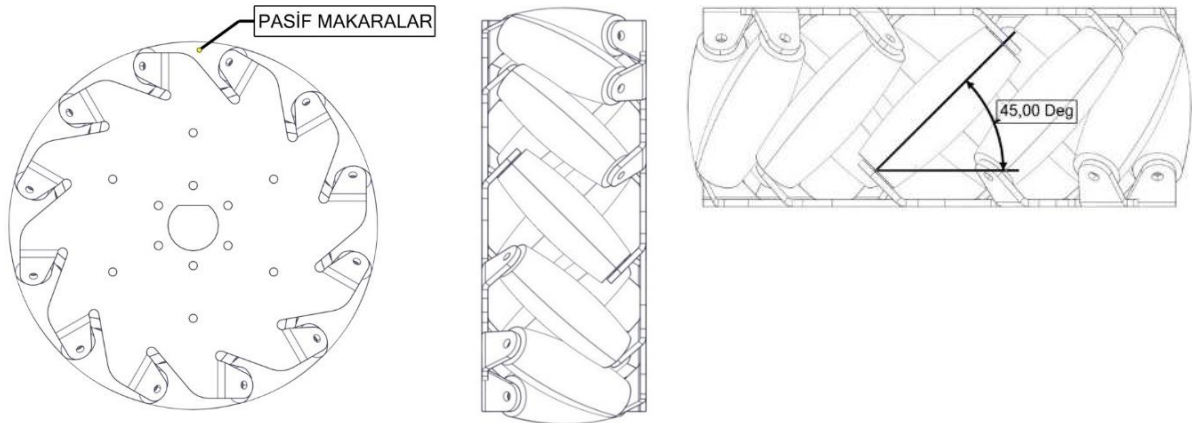
BÖLÜM 6

MATEMATİKSEL MODELLEME

6.1 Mekanum Tekerlek Ve Çalışma Prensibi

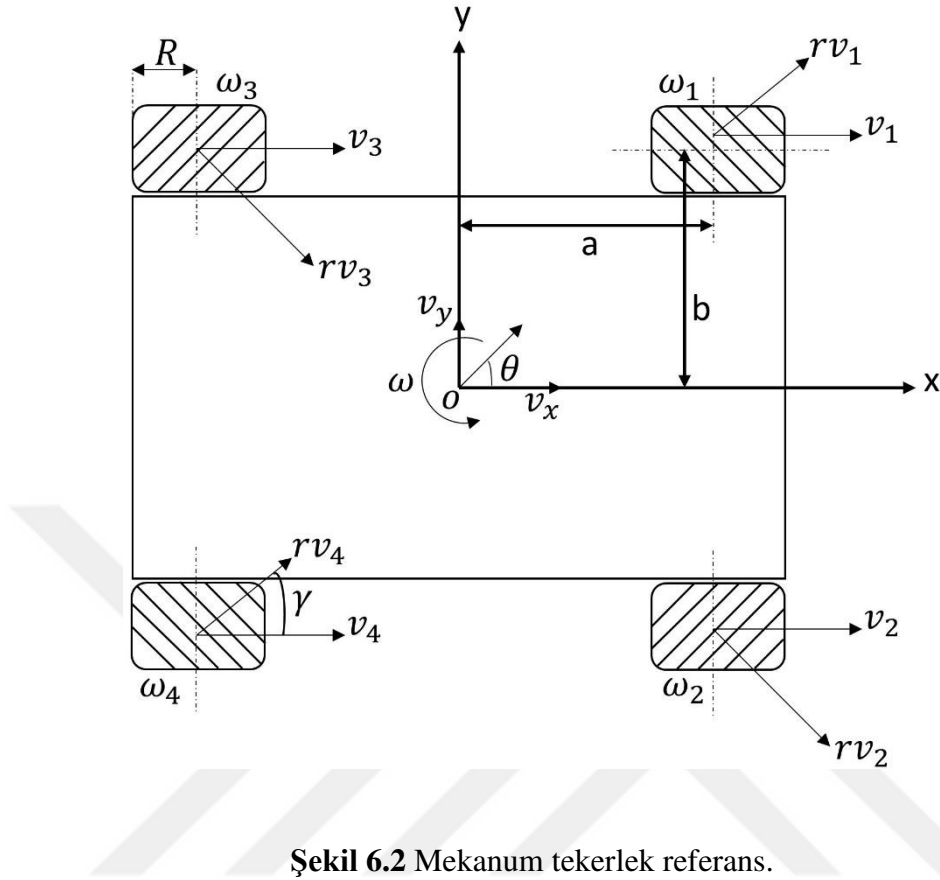
Mekanum tekerlek veya diğer adıyla İsveç tekerleği, 1973 yılında İsveçli bir mühendis olan Bengt Ilon tarafından icat edilmiş olup çok yönlü hareket kabileti olan bir tekerlek çeşididir [54]. Çok yönlü tekerlek olarak da ifade edilen bu teker çeşidi, her biri tekerlek göbeğine 45 derecelik açıyla bağlı ancak kendi eksenini etrafında serbestçe dönebilen makara adını verdiğimiz özel bir yüzey profiline sahip bir dizi elemandan oluşmaktadır. Şekil 6.1’de gösterilen bu özel profile sahip makaralar tekerleğe yan görünüşünden bakıldığında, tekerlek bütünüünün dairesel olmasını sağlamaktadır.

Dört adet mekanum tekerlek uygun sıralama ile uygun bir platforma monte edildiğinde, platformun her yöne kendi oryantasyon açısını değiştirmeden hareket edebilmesine imkan vermektedir. Bu teker çeşidinde çok yönlü makaralar bulunması nedeniyle mekanik tasarım yaygın kullanılan bir tekerleğe göre çok daha zordur. Ancak bunun yanında yaygın olarak kullanılan hava basınçlı bir tekerlek sistemine göre daha fazla yük taşıyabilmektedir [55].



Şekil 6.1 Mekanum tekerlek tasarımı.

6.2 Mekanum Tekerlek Kullanan Mobil Robotun Kinematik Modeli



Şekil 6.2 Mekanum tekerlek referans.

Şekil 6.2’de gösterilen 4 tekerlekli mekanum tekerlek kullanan mobil robot sistemi XYZ koordinat sistemi referans alındığında aşağıda verilen denklem sistemi kurgulanabilir:

$$v_x = v \cos \theta \quad (6.1)$$

$$v_y = v \sin \theta \quad (6.2)$$

Yukarıda verilen denklemlerde v ile robotun çizgisel hızı, v_x ile robotun çizgisel hızının x bileşeni, v_y ile robotun çizgisel hızının y bileşeni, θ ile robotun yanal yön açısı (oryantasyon-yönelim) gösterilmektedir. Robotun çizgisel hızı, robotun tekerlek konumları ve robot merkezinin tekerleklere olan uzaklıkları kullanılarak aşağıdaki gibi kurgulanabilir:

$$v_i + rv_i \cos \gamma_i = v_x - b_i \omega \quad (6.3)$$

$$rv_i \sin \gamma_i = v_y + \alpha_i \omega \quad (6.4)$$

Burada, v_i ile mekanum tekerlek çizgisel hızı, rv_i ile mekanum tekerlek makaralarının yer ile yapmış olduğu hız, γ_i ile mekanum tekerdeki makaraların konumlandırma açısı (45°), α_i ile mekanum tekerlerin x ekseninde araç merkezine olan uzaklığı, b_i ile mekanum tekerlerin y ekseninde araç merkezine olan uzaklığı ve ω ile robotun açısal hızı gösterilmektedir.

Mekanum tekerlerde bulunan makaralar serbest bir şekilde dönebildikleri için hızlarının kontrol edilmesi mümkün değildir. Bu yüzden denklem 6.3 ve denklem 6.4 tekrar çalışılarak aşağıda verilen ifade elde edilir:

$$v_i = v_x - b_i \omega - \frac{v_y a_i \omega}{\tan \gamma_i} \quad (6.5)$$

Denklem 6.5'e Çizelge 6.1'de verilen değerler yerine konulursa sırasıyla her bir mekanum tekerleğin çizgisel hızı bulunmuş olur:

$$v_1 = v_x - v_y - a\omega - b\omega \quad (6.6)$$

$$v_2 = v_x + v_y + a\omega + b\omega \quad (6.7)$$

$$v_3 = v_x + v_y - a\omega - b\omega \quad (6.8)$$

$$v_4 = v_x - v_y + a\omega + b\omega \quad (6.9)$$

Çizelge 6.1 Tekerlek numarası.

Tekerlek numarası	1	2	3	4
a_i	a	a	-a	-a
b_i	b	-b	b	-b
γ_i	45°	-45°	-45°	45°

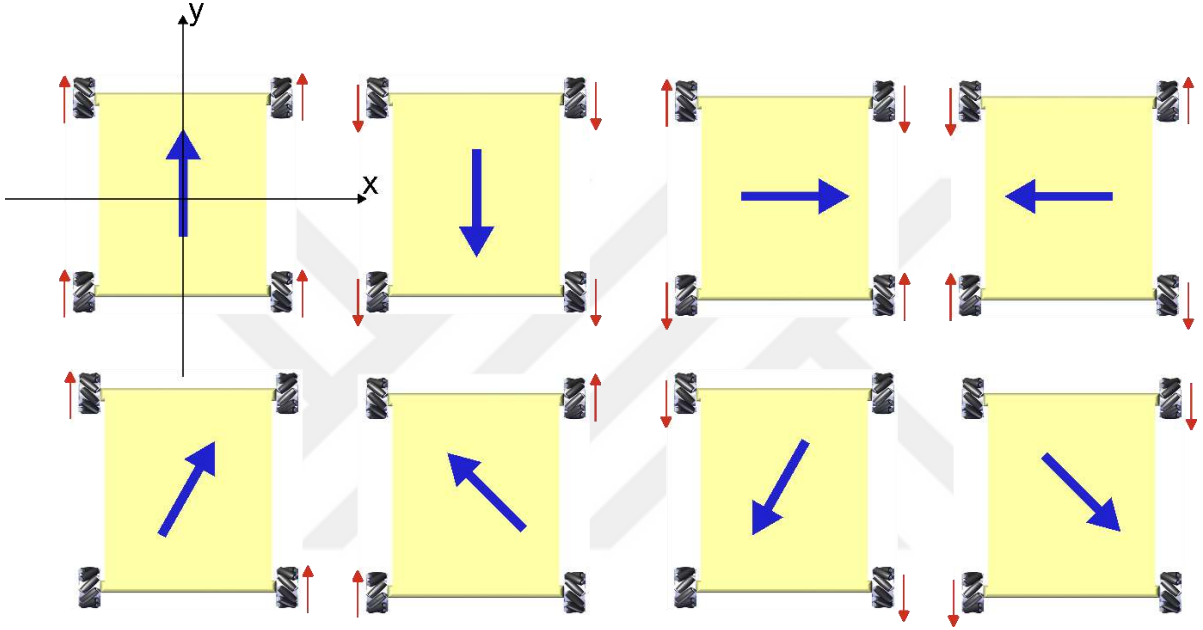
Açısal hız formülünden yararlanılarak $v_i = \omega_i R$ eşitliği denklem 6.6 - 6.9'da yerine yazılırsa, her bir mekanum tekerlek açısal hızı şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(a+b) \\ 1 & 1 & (a+b) \\ 1 & 1 & -(a+b) \\ 1 & -1 & (a+b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Burada, R ile mekanum tekerlek yarıçapı gösterilmektedir. Denklem 6.10 ile dört mekanum tekerlek kullanan bir mobil robotun ters kinematik modeli elde edilmiştir [56].

6.3 Mekanum Tekerlek Kullanan Mobil Robotun Hareket Yönleri

Mekanum tekerleğe sahip mobil bir robot, mekanum tekerlek özelliklerinden yararlanarak her yönde hareket edebilme özelliğine sahiptir. Tekerleklerin çeşitli yönlerde dönerek oluşturdukları hareket yönleri Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Mekanum tekerlek kullanan mobil robotun hareket yönleri.



BÖLÜM 7

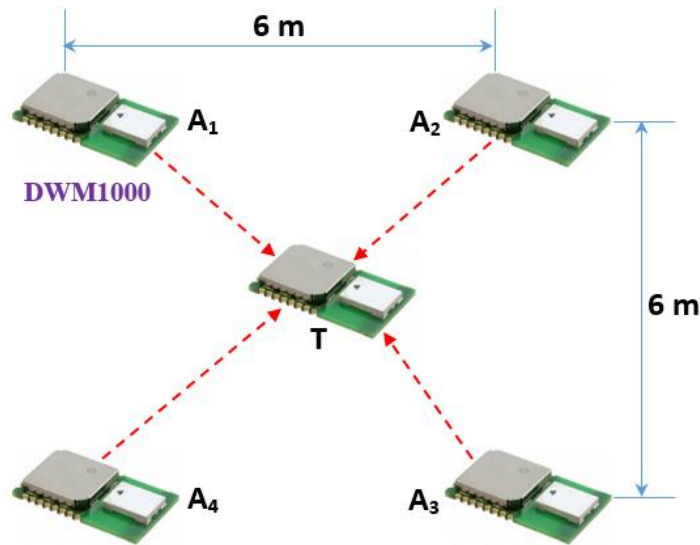
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında ortaya konulan yöntemlerin deneysel olarak test edilmesi için iki farklı deney ortamı hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, TeknoLab ve basketbol sahasında gerçekleştirilmiştir.

7.1 İç Ortam Testleri

İç ortam testleri hem sensörlerin kalibrasyonunu yapmak hem de geliştirilen LHS-MC tabanlı algoritmanın konum tahmininde hata oranını azalttığını göstermek için yapılmıştır. Bunun yanı sıra, testlerin LHS-MC metodunun yanı sıra MC ve LSE metotları ile de yapılması ve gerekli karşılaştırmaların yapılması hedeflenmiştir.

İç ortam testlerinde, 4 adet sabit sensör ve 1 adet hedef sensör kullanılmıştır (Şekil 7.1). Sabit sensörler sırasıyla A_1 , A_2 , A_3 ve A_4 ile gösterilmiştir. Hedef sensör ise T ile ifade edilmiştir.



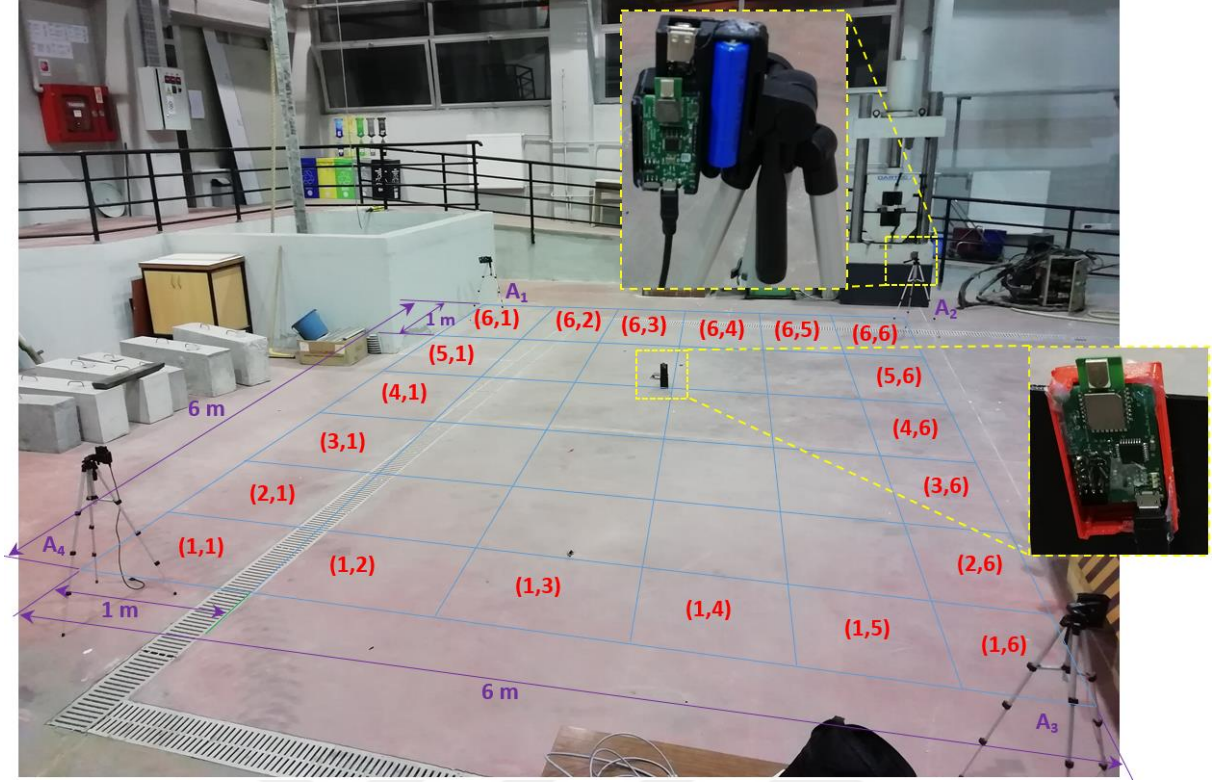
Şekil 7.1 İç ortam testlerinde kullanılan 1 adet hedef sensör ve 4 adet sabit sensör ile oluşturulan sistem.

Testlerde kullanılan konumlandırma sensörleri, Decawave firmasının üretmiş olduğu DWM1000 IC UWB sensörleridir. Testler sırasında 4 sabit sensör, sabit noktalara konumlandırılarak hedef sensörün konumu belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanılan sabit ve hedef sensörler fiziksel olarak birbirleriyle aynı sensörlerdir. Ancak yazılımsal olarak kullanım amacına göre sabit sensör veya hedef sensör olarak ayarlanabilmektedir. Bu işlemi yapabilmek için her bir DWM1000 IC UWB sensörünün yanında bir de mikrodnetleyici eklenmiştir. Kullanılan mikrodnetleyici ARM firmasının üretmiş olduğu 72 MHz işlem hızında çalışan STM32F103 kodlu mikrodnetleyicidir. Deneysel sisteme, mesafe verilerinin okunabilmesi ve aynı zamanda kaydedilebilmesi için Espressif firmasının üretmiş olduğu 120 MHz işlem hızında çalışan ESP8266 tabanlı mikrodnetleyici de eklenmiştir. Bu mikrodnetleyici dahili bir Wi-Fi modülüne sahip olup, mesafe verilerini kablosuz olarak ana kontrol merkezine gönderebilmektedir. Kurgulanan sistem modüllerinden bir tanesi (sabit sensör modülü) Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



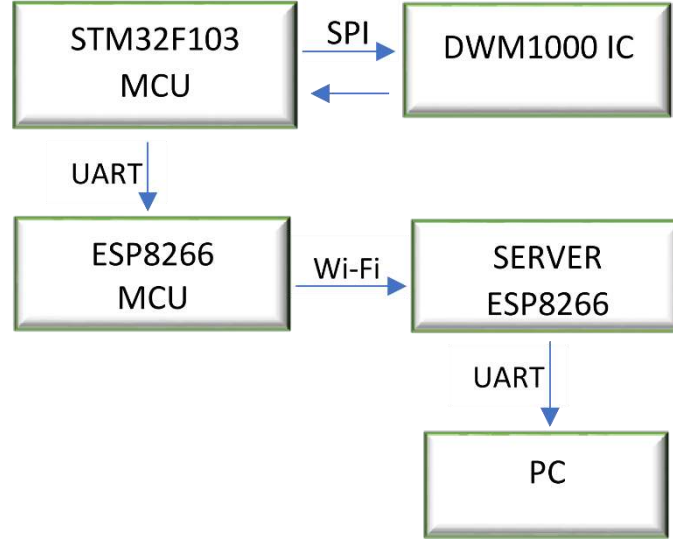
Şekil 7.2 Kullanılan sabit sensörlerden bir tanesinin görüntüsü.

Deney ortamının genel görünümü Şekil 7.3’te gösterilmektedir. Lazer metre yardımıyla belirlenen 36 adet konum, 6 x 6 m genişliğindeki kare alanda işaretlenmiştir. 4 adet sabit sensör tripotlar üzerine konumlandırılarak konumu bilinen köşe noktalara sabitlenmiştir.



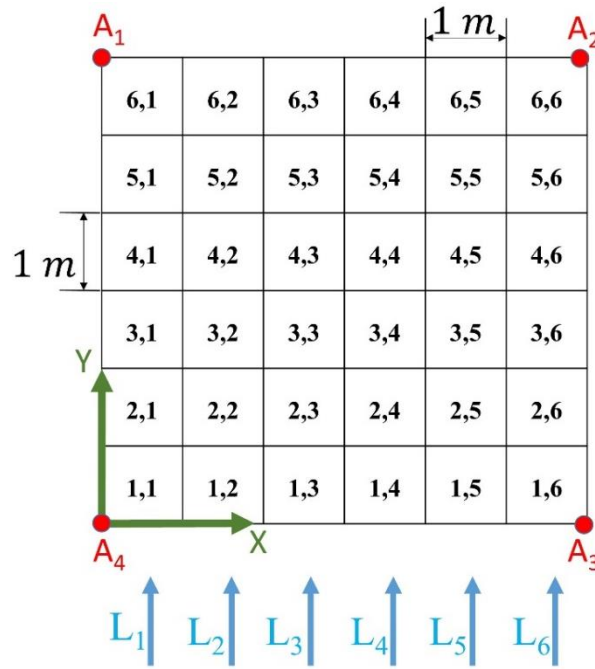
Şekil 7.3 İç ortam testlerinin yapıldığı deney alanı.

Ultra geniş bant (Ultra Wide Band - UWB) sensörler ile STM mikrodnetleyiciler arasındaki veri iletişimi SPI protokolü kullanılarak yapılmıştır. İletişim hızı 1 Mbit/s olarak ayarlanmıştır. STM mikrodnetleyici ve ESP mikrodnetleyici arasındaki iletişim UART protokolü ile sağlanmıştır. Bu protokolde iletişim hızı 115200 bit/s olarak ayarlanmıştır. Her bir sabit sensör modülünde 1 adet ESP mikrodnetleyici olmak üzere toplamda 4 ESP mikrodnetleyicisi vardır. Her bir ESP, STM mikrodnetleyicisinden aldığı verileri dahili Wi-Fi modülü sayesinde server olarak ayarlanmış beşinci bir ESP mikrodnetleyiciye göndermektedir. Kablosuz olarak alınan bu veriler bilgisayar veya taşınabilir gömülü bir bilgisayar ile okunabilir ve kaydedilebilir. Bu altyapı, mesafe verilerinin gerçek zamanlı olarak takip edilmesi imkanını sağlamaktadır. İletişim protokolü akış diyagramı Şekil 7.4'te gösterilmiştir.



Şekil 7.4 İletişim protokolü.

6 x 6 m olarak oluşturulan kare alan, bir matris oluşturacak şekilde satır ve sütunlara bölünmüştür (Şekil 7.5). Her bir nokta (i, j) şeklinde gösterilerek 36 adet nokta oluşturulmuştur ($i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, 6$). Oluşturulan noktalar 1 m aralıklarla seçilmiştir. A_1 , A_2 , A_3 ve A_4 olarak gösterilen sabit sensörler oluşturulan alanın köşe noktalarına sabitlenmiştir. Hedef sensör ise önceden belirlenen 36 konumun her bir noktasına sırayla konularak mesafe verileri toplanmıştır.



Şekil 7.5 Test alanının matris şeklinde kodlanması.

7.1.1 Sensör Kalibrasyonu

Deneyisel çalışmaya başlamadan önce her bir UWB sensörü için filtre ve kalibrasyon işlemi yapılmıştır [9,12]. Özellikle zaman tabanlı mesafe ölçüm sensörleri için kalibrasyon işlemi çok önemlidir [10]. Sinyal filtreleme ve kalibrasyon çalışmaları öncesinde DWM1000 sabit sensörü ile DWM1000 hedef sensörü arasında okunan mesafe ile gerçek mesafe arasındaki hata oranı çok yüksek olarak gözlenmiştir. Bu hata oranının oluşmasında rol oynayan etkenler şu şekilde sıralanabilir:

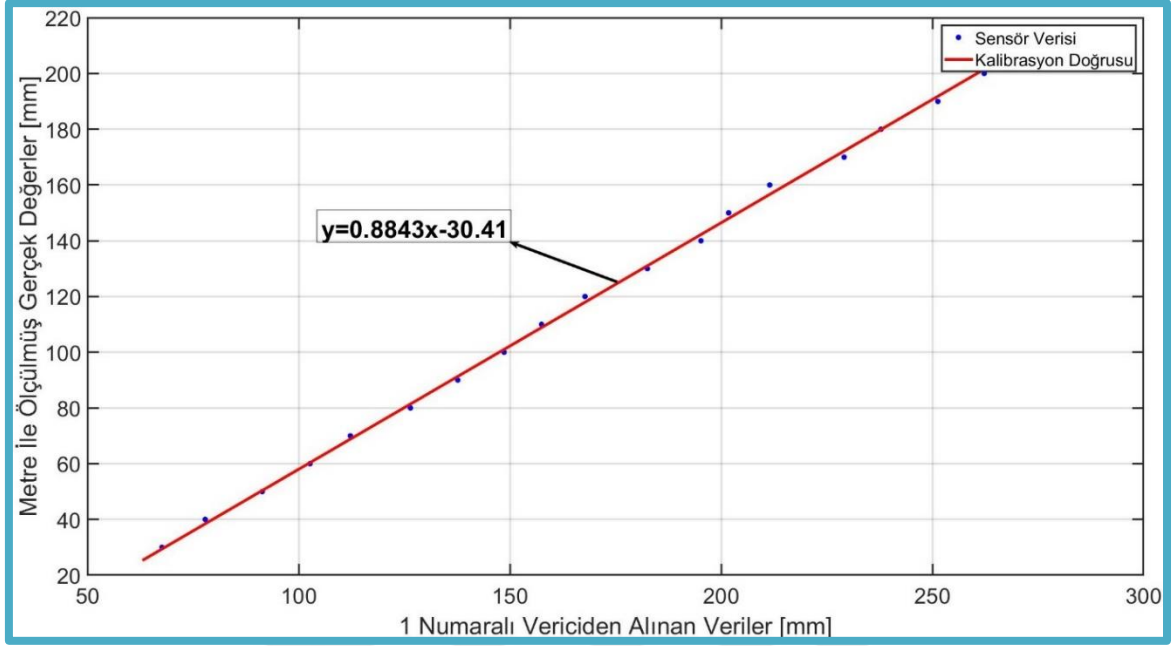
- Ortam şartlarına bağlı olarak sinyallerin yansıması
- Sensörlerin zaman tabanlı çalışması için gerekli olan osilatör elemanlarının farklı olması
- Ultra geniş bant sinyallerinin aktarılmasında kullanılan dahili antenlerin sensör devresi üzerindeki konumları

DWM1000 sensörlerinin kalibrasyon işlemi için şu yollar izlenmiştir:

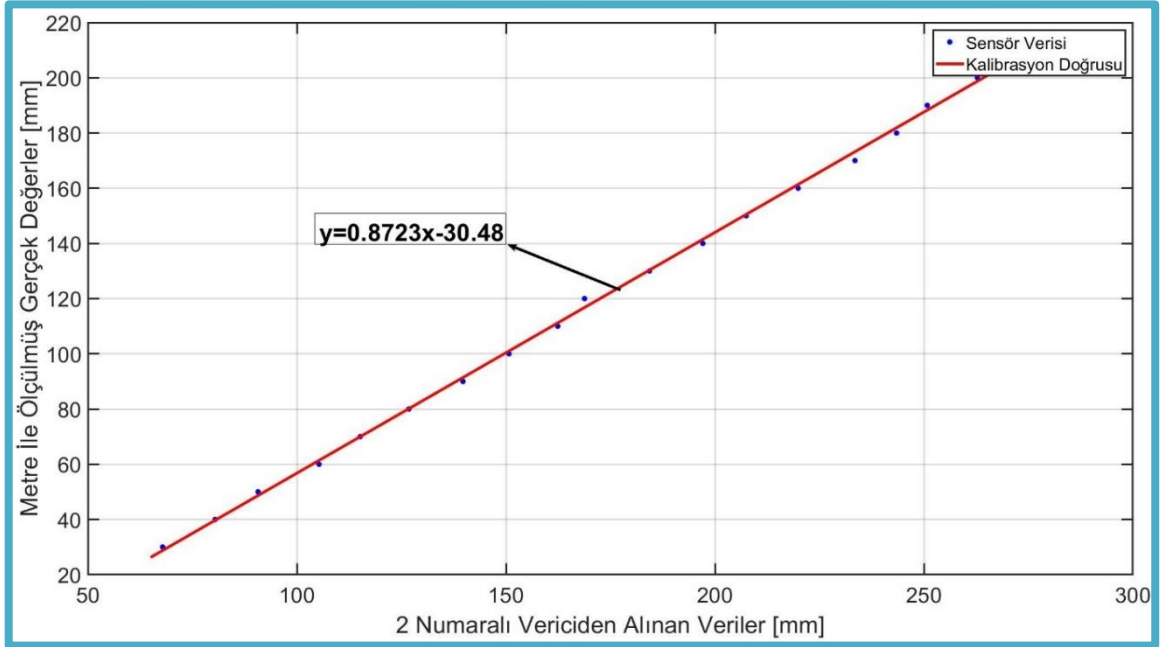
1. DWM1000 hedef sensörü bir tripod yardımıyla sabit bir yere konumlandırılmıştır.
2. DWM1000 sabit sensörü, hedef sensör ile aynı doğrultuda ve aynı yükseklikte olması koşuluyla 30 cm uzağa konulmuştur.
3. 1 numaralı DWM1000 sabit sensörü, 10 cm aralıklarla uzaklaştırılarak mesafe verisi kaydedilmiştir. Gerçek mesafe verisi bir lazer metre yardımıyla ölçülmüştür. Bu işlem 200 cm mesafeye kadar yapılmıştır.
4. İlk üç aşamadaki işlemler, diğer bir, iki ve üç numaralı DWM1000 sabit sensörler ile de tekrarlanmıştır.

Yapılan kalibrasyon işleminde hatanın doğrusal olarak değiştiği görülmüş ve dört adet birinci derece denklem elde edilerek kalibrasyon işlemi gerçek zamanlı kullanılmak üzere tamamlanmıştır.

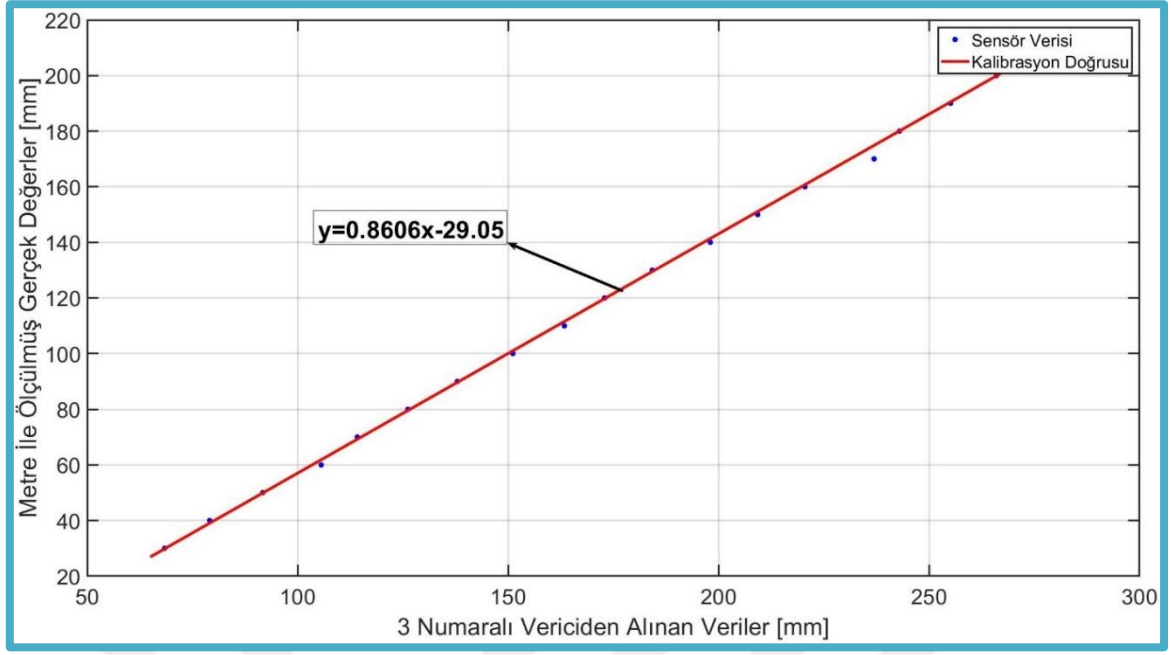
Şekil 7.6, 7.7, 7.8 ve 7.9’da deney mesafe verileri ve her bir sabit sensör için kalibrasyon işlemi sonucunda oluşturulmuş birinci derece denklemler gösterilmektedir.



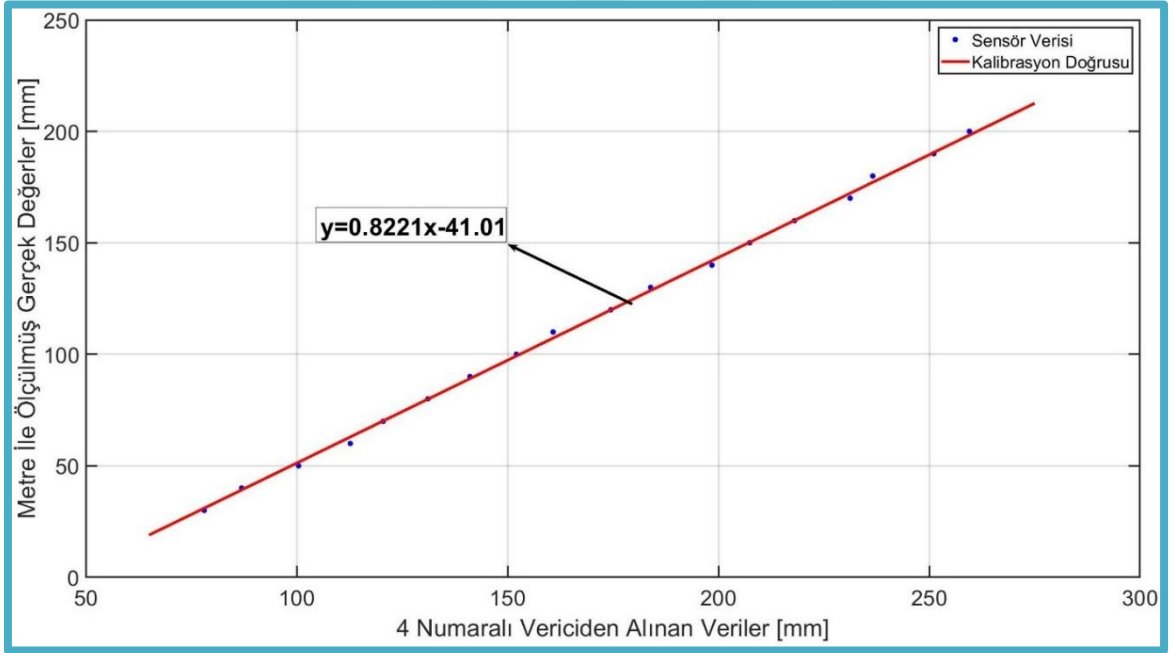
Şekil 7.6 1 numaralı sabit sensörün kalibrasyon işlemi.



Şekil 7.7 2 numaralı sabit sensörün kalibrasyon işlemi.



Şekil 7.8 3 numaralı sabit sensörün kalibrasyon işlemi.



Şekil 7.9 4 numaralı sabit sensörün kalibrasyon işlemi.

7.1.2 Kalman Filtresi Entegrasyonu

Kalman filtresi R. E. Kalman tarafından icat edilmiş çok güçlü bir filtredir [51]. Çalışma mantığı, geçmiş verilerden yola çıkarak gelecekteki veriyi tahmin etme üzerine kurgulanmıştır.

Kalman filtresi, ölçülen verilerdeki istenmeyen gürültüleri veri havuzundan uzaklaştıran ve bunu hızlı bir şekilde yapan en iyi filtrelerden bir tanesidir.

Kalman filtresinin genel matematiksel modeli aşağıda verilmiştir. Burada geçen t , şimdiki durum, $t-1$ ise bir önceki durumu ifade etmektedir [52].

$$x_{t,t-1} = F_t x_{t-1,t-1} + B_t u_t \quad (7.1)$$

$$P_{t,t-1} = F_t P_{t-1,t-1} F_t^T + Q_t \quad (7.2)$$

$$x_{t,t} = x_{t,t-1} + K_t (y_t - H_t x_{t,t-1}) \quad (7.3)$$

$$K_t = \frac{P_{t,t-1} H_t^T}{H_t P_{t,t-1} H_t^T + R_t} \quad (7.4)$$

$$P_{t,t} = (1 - K_t H_t) P_{t,t-1} \quad (7.5)$$

Burada; x ile tahmin edilen durum, F ile durum geçiş matrisi, u ile kontrol değişkeni, B ile kontrol matrisi, P ile durum kovaryans matrisi, Q ile gürültü kovaryans matrisi, y ile ölçülen gürültülü veri, H ile ölçüm matrisi, K ile kalman kazancı ve R ile de ölçüm matrisi

7.1.3 Hareketli Ortalama Filtre

Bu çalışmada bir karşılaştırma ve performans analizi yapabilmek adına veriler Kalman filtresi dışında hareketli ortalama filtre ile de test edilmiştir. Hareketli ortalama filtre belirlenen sayıda sensör verisini toplayıp ortalaması alınarak uygulanan bir filtre yöntemidir [53]. Denklem 7.6'de hareketli ortalama filtrenin genel matematiksel modeli verilmiştir.

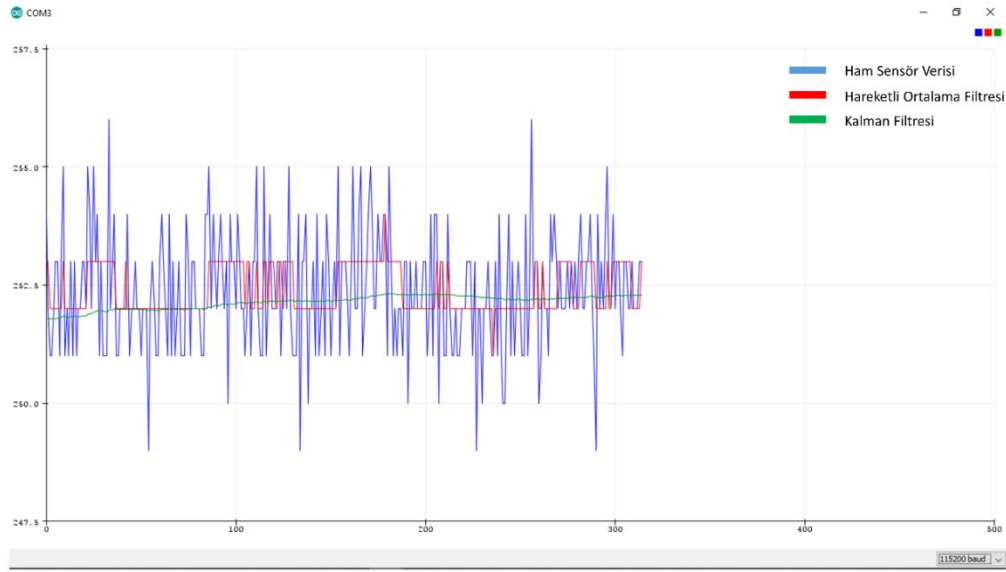
$$y_i = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i+j] \quad (7.6)$$

Burada; $x[i]$ ile giriş sensör verisi, $y[i]$ ile filtrelenmiş sensör verisi ve M ile de ortalaması alınacak sensör sayısı gösterilmiştir.

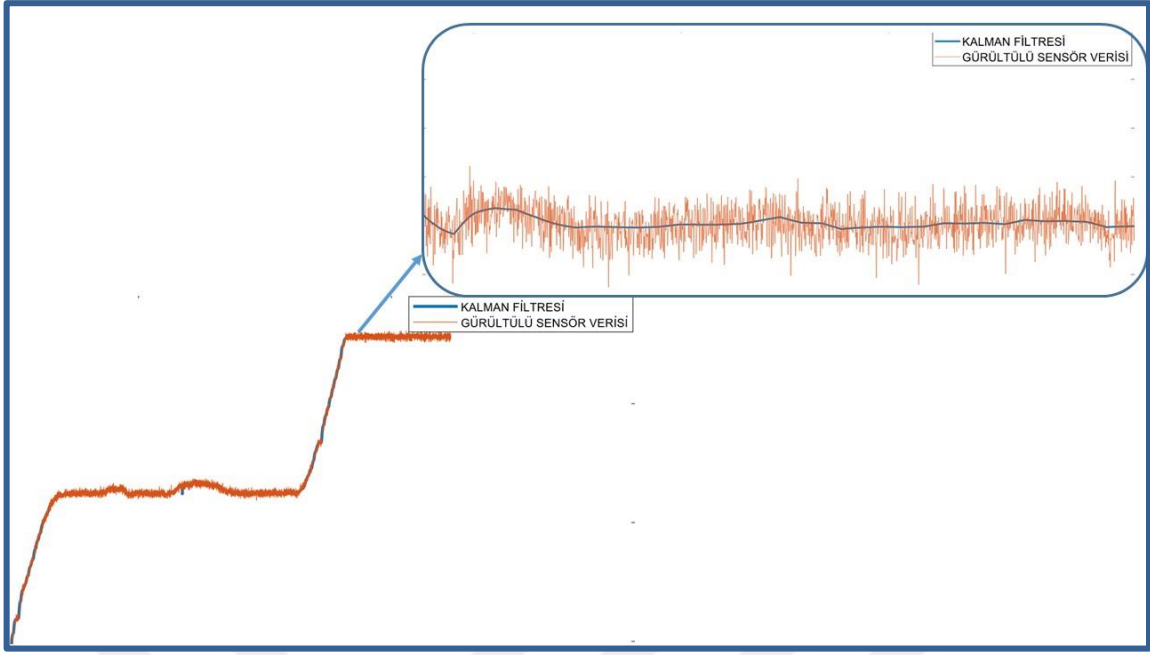
Hareketli ortalama filtre, matematiksel olarak kolay uygulanabilen basit bir filtredir, fakat, ortalaması alınacak sensör veri sayısı belirlenen sayıya ulaşana kadar sonuç vermemektedir.

7.1.4 Hareketli Ortalama Filtresi İle Kalman Filtresinin Karşılaştırılması

Şekil 7.10’da hareketli ortalama filtre ve Kalman filtresi karşılaştırma grafiği verilmiştir. Verilen grafikte mavi ile gösterilen sinyal ham sensör verisini, kırmızı ile gösterilen sinyal hareketli ortalama filtre verisini, yeşil ile gösterilen sinyal ise Kalman filtresi çıktısını göstermektedir. Ortalama filtre’de M değeri 10 olarak alınmıştır. Yani her 10 veride bir filtrelenmiş veri elde edilmiştir. Şekil 7.10’da da görüldüğü gibi en iyi performansı Kalman filtresi göstermiştir. Şekil 7.11’de Kalman filtresinin A_1 numaralı sabit sensör için uygulama sonucu verilmiştir.

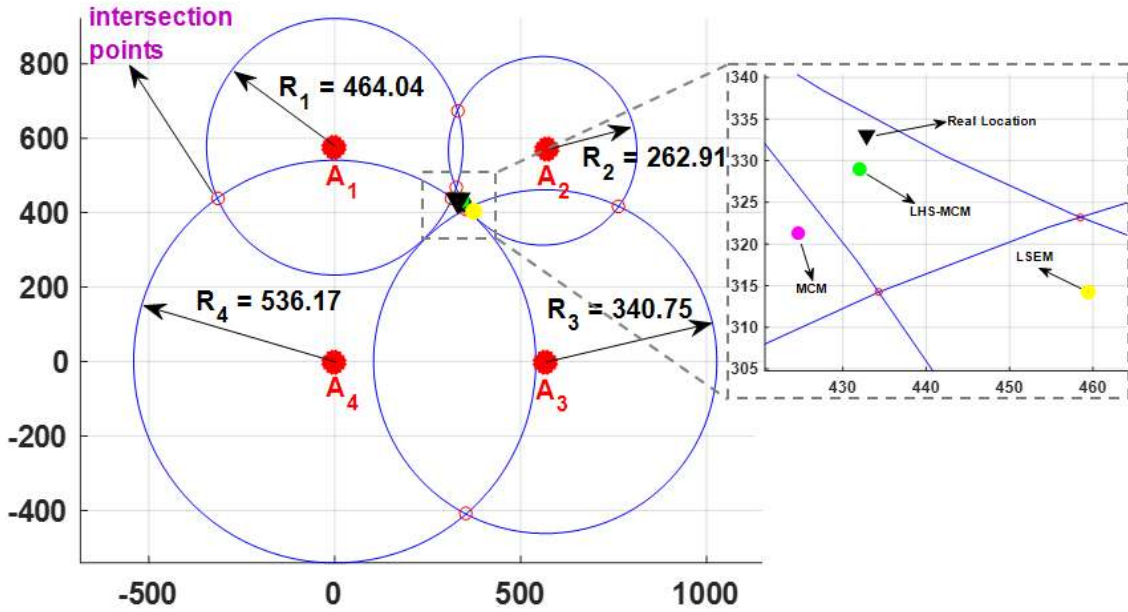


Şekil 7.10 Hareketli ortalama filtrenin Kalman filtresi ile karşılaştırılması.



Şekil 7.11 A_1 numaralı sabit sensörden gelen gürültülü verinin Kalman filtresi ile filtrelenmesi işlemi.

7.1.5 Önerilen Yöntem Ve Algoritmaların Deneysel Sisteme Entegrasyonu



Şekil 7.12 LHS-MC, MC ve LSE metotları kullanılarak yapılan iç ortam konum tahmini sonuçları (Daireler arasında bir kesişimin olduğu durum).

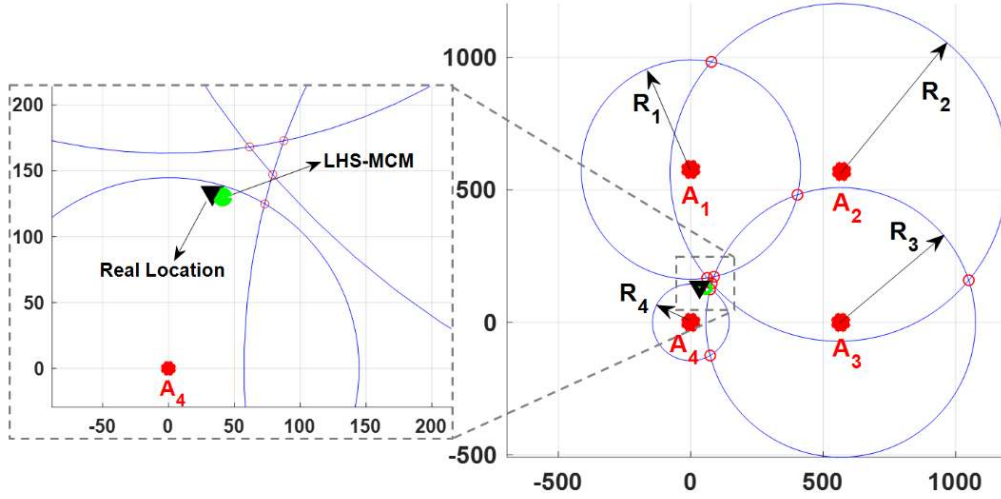
Her bir UWB sensörü kalibre edilmiş ve elde edilen mesafe verileri iç ortam konum tahmini için kullanılmıştır. Konum tahmininde, geliştirilen LHS-MC yönteminin yanı sıra LSE ve MC yöntemleri de kullanılmış, bu sayede sonuçlar arasında bir karşılaştırma yapılabilmiştir. Kullanılan yöntemlerin sonuçlarının yer aldığı karşılaştırma grafiği ve detay görünüm Şekil 7.12’de gösterilmiştir.

A_1 , A_2 , A_3 , A_4 ile gösterilen sabit sensörler şekilde gösterildiği gibi köşe noktalara sabitlenmiştir. Hedef sensör ise belirlenen noktaya konumlandırılmıştır. Hedef sensörün gerçek konumu yatayda $X = 432.90$ cm ve dikeyde $Y = 333.0$ cm’dir. Sabit sensörlerin hedef sensör ile oluşturdukları yarıçap mesafeleri sırasıyla, $R_1 = 464.04$ cm, $R_2 = 262.91$ cm, $R_3 = 340.75$ cm ve $R_4 = 535.17$ cm’dir. LHS-MC yöntemi ile belirlenen hedef sensör konumu, $x = 432.04$ cm ve $y = 328.96$ cm’dir. Gerçek değer ile karşılaştırıldığında hata, yatayda $x = 0.86$ cm, dikeyse $y = 4.04$ cm olarak gözlemlenmiştir.

MC yöntemi uygulandığında tahmin edilen mesafe verisi, $x = 427.70$ cm ve $y = 321.28$ cm’dir. Gerçek değerler ile aradaki fark ise; yatada $x = 8.2$ cm, dikeyde ise $y = 11.72$ cm olarak bulunmaktadır.

Son olarak LSE yöntemi ile elde edilen sonuçlar: $x = 459.46$ cm ve $y = 314.19$ cm’dir. Hatalar ise: $x = -26.56$ cm, $y = 18.80$ cm olarak bulunmaktadır.

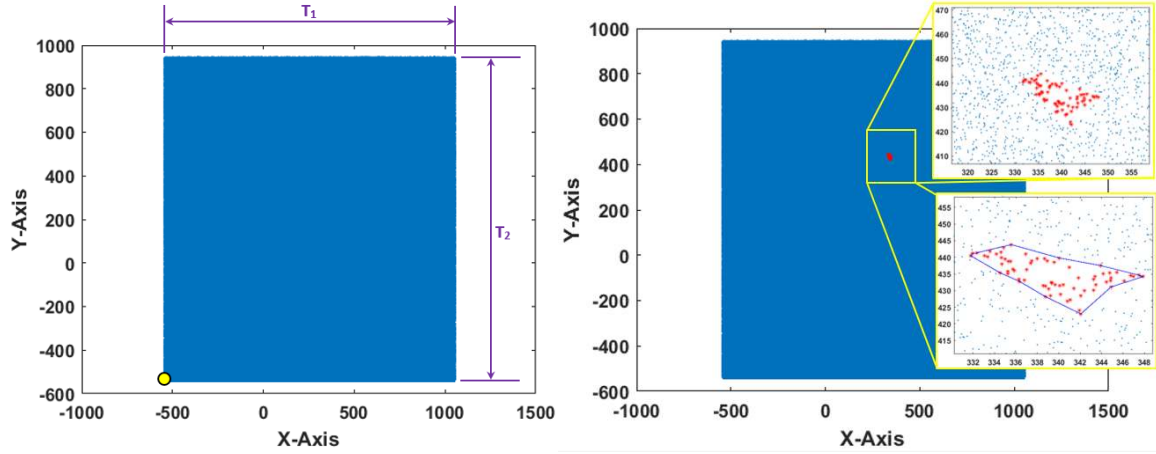
Karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 7.12’de detaylı görünümde verilmiştir. LHS-MC yöntemi ile bulunan hedef sensörün (yeşil renkli daire) konum bilgisinde; x yönünde 1 cm’den, y yönünde ise 5 cm’den az hata değeri elde edilmiştir. MC yöntemi ile tahmin edilen hedef sensör konumunun (pembe renkli daire) hata değerleri x yönünde yaklaşık 8 cm, y yönünde ise yaklaşık 12 cm olarak bulunmuştur. Son olarak LSE yöntemi ile belirlenen hedef sensörün (sarı renkli daire) hata değerleri ise x yönünde 25 cm’den fazla, y yönünde ise yaklaşık 19 cm olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 7.13 LHS-MC, MC ve LSE metotları kullanılarak yapılan iç ortam konum tahmini sonuçları (Daireler arasında bir kesişimin olmadığı durum).

LHS-MC metodu Şekil 7.13’de gösterilen bir durum için de kullanılmıştır. Bu durumda, daireler arasında net bir kesişim yoktur. Detaylı şekilde de gösterildiği gibi hedef sensörün konumu dört numaralı sabit sensöre yakın olarak görünmektedir. LHS-MC yöntemi (yeşil renkli daire) ile bulunan hedef sensörün konumu, gerçek değer (siyah renkli üçgen) ile karşılaştırıldığında hata değeri x yönünde 1.8 cm, y yönünde ise 0.1 cm’den düşük bulunmuştur. Gösterilen bu senaryo gerçek hayatta karşılaşma ihtimali oldukça yüksek bir durumdur ve geliştirilen LHS-MC yöntemi düşük hata değeri ile başarılı sonuçlar verdiğini kanıtlamıştır.

Şekil 7.13’te gösterilen LHS-MC yönteminin deneysel sonucu ve uygulanan yöntemin detaylı açıklaması Şekil 7.14’te verilmiştir. Şekil 7.3’te gösterilen deney alanındaki toplam 36 alanın herbiri önceden tanımlanmış hücrelere bölünmüştür. Bu deney alanı için seçilen toplam hücre sayısı 10^6 ’dır. Herbir hücre mavi nokta ile gösterilmiştir (Şekil 7.14). LHS-MC yöntemi, hedef sensörün konumunu bulabilmek/tahmin edebilmek için her bir hücreyi tek tek inceleyip hedef sensörün konumunu doğrulayacak uygun şartları sağlayıp sağlamadığına karar vermektedir. Algoritmasının sınır ölçüleri T_1 ve T_2 ile belirlenmiş olup başlama noktası ise sarı daire ile gösterilmiştir (Şekil 7.14). Kırmızı daire ile gösterilen noktalar hedef sensör konumunun olabileceği konumları temsil etmektedir. Hedef sensörün olabileceği konumlar işaretlendikten sonra, sadece bu noktaların oluşturduğu, sınırları belirli bir alan oluşturulmaktadır (Şekil 7.14-Sağ). Çalışma kapsamında, bu alanın oluşturulabilmesi için noktaların sınırlarını belirlemekte kullanılan bir sınır (boundary) fonksiyonu oluşturulmuştur.



Şekil 7.14 LHS-MC yöntemi algoritma detayları.

Önerilen algoritma Şekil 7.3'te gösterilen tüm noktalara ayrı ayrı uygulanmıştır. Sonuçlar tablo halinde Çizelge 7.1 ve 7.2'de verilmiştir. Çizelgedeki değerler, her bir nokta için LHS-MC yöntemi ile elde edilen konum değerleri ile gerçek değerler arasındaki farkları göstermektedir. X eksenindeki farklar Çizelge 7.1'de Y eksenindeki farklar ise Çizelge 7.2'de verilmiştir.

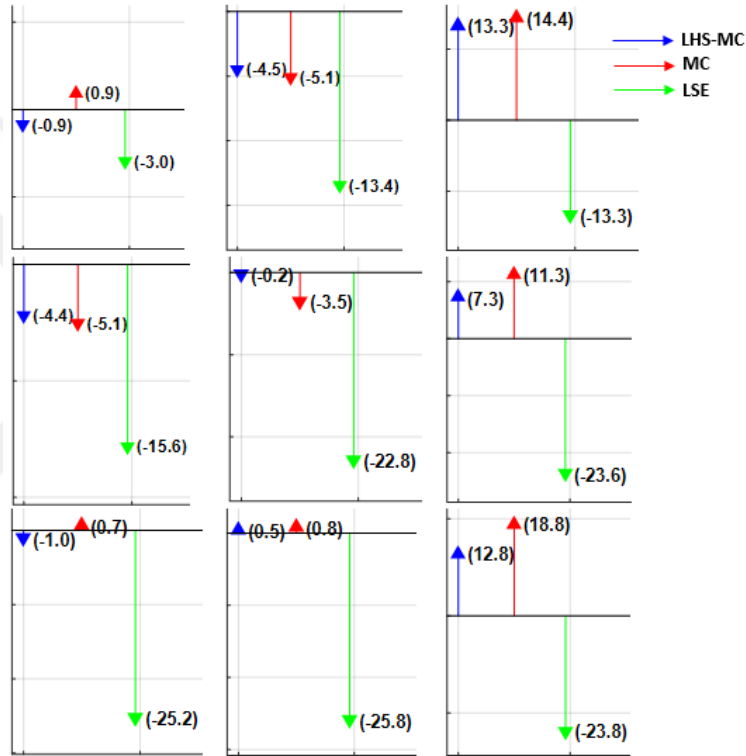
Çizelge 7.1 X-ekseninde elde edilen tahmin hataları.

	1	2	3	4	5	6
6	-0.8304	0.3355	-3.2418	-5.2615	-3.0543	8.5867
5	0.6191	0.5313	-2.5064	-4.9629	-1.8551	7.7895
4	-11.9704	-10.0948	-5.4941	-2.9905	-0.1390	8.4407
3	-21.3177	-9.0318	-1.9632	-1.0188	0.4625	12.7785
2	-15.5629	1.2040	2.5436	-4.3906	-0.1666	7.2643
1	26.5901	1.5846	-0.5984	-0.8729	-4.4980	13.2972

Çizelge 7.2 Y-ekseninde elde edilen tahmin hataları.

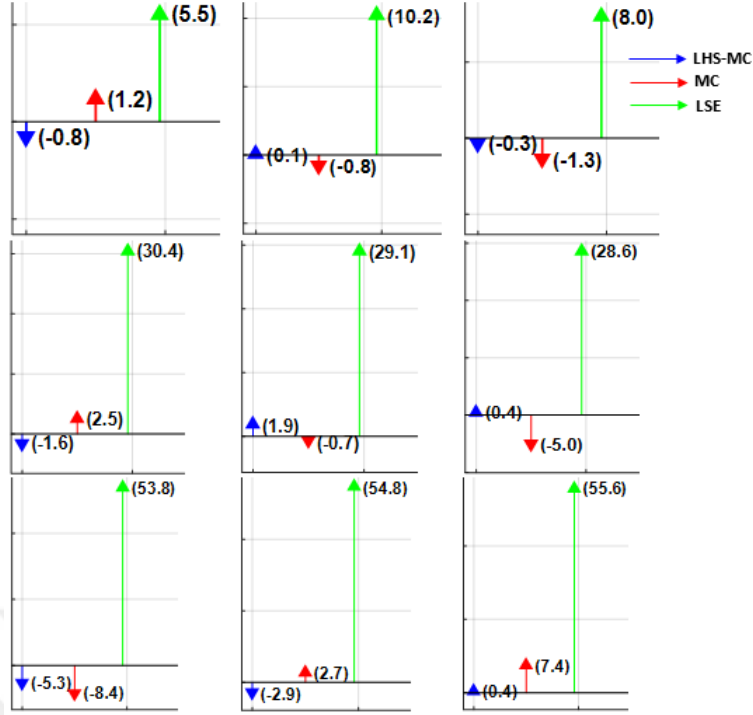
	1	2	3	4	5	6
6	-5.2684	-2.8636	0.4057	6.3649	-2.3503	-0.7094
5	-1.5646	1.9140	0.4442	0.9954	2.6179	-9.7857
4	-0.7979	0.0815	-0.3228	2.6932	4.6383	1.5106
3	-4.5735	-7.3671	3.0940	-0.0291	2.2159	2.6142
2	-4.4154	6.7142	-8.7320	7.6614	1.6208	6.0505
1	26.2284	-4.1083	0.5902	2.0695	-0.6773	2.0960

Ayrıca deney alanından seçilen 9 nokta için LHS-MC, MC ve LSE metodlarının gerçek konum değerleri ile hesaplanmış X eksenindeki hata değerleri Şekil 7.15’te verilmiştir. Seçilen noktalar sırasıyla (1,1), (1,2), (1,3) - (2,1), (2,2), (2,3) - (3,1), (3,2), (3,3) noktalarıdır. Şekil 7.15’te mavi ok ile LHS-MC yöntemi tahmin hatası değerleri, kırmızı ok ile MC yöntemi tahmin hatası değerleri, yeşil ok ile ise LSE yöntemi tahmin hatası değerleri gösterilmektedir. Verilen grafikten de görüleceği üzere en fazla hata değeri LSE yönteminde gözlenmiştir. MC yöntemi LSE yönteminden daha başarılıdır. Ancak hedef sensörün konumunu en az hata değeri ile LHS-MC metodu vermektedir.



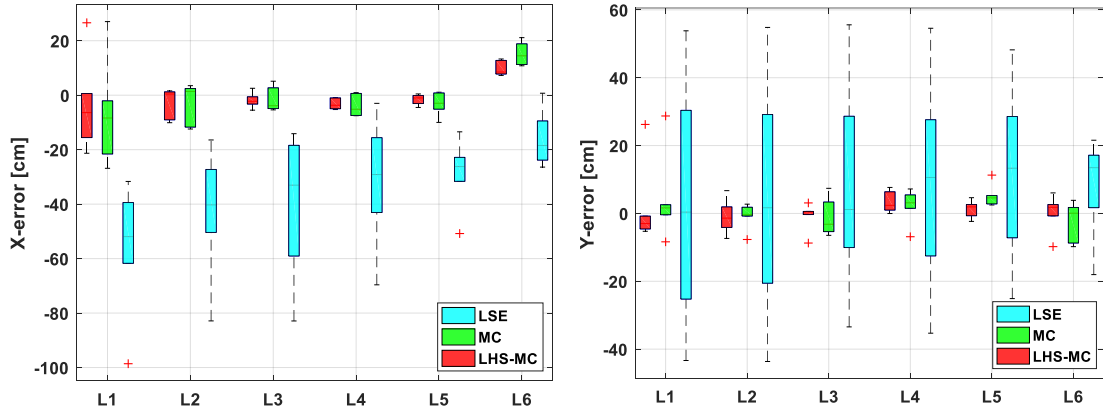
Şekil 7.15 (1,1), (1,2), (1,3) - (2,1), (2,2), (2,3) - (3,1), (3,2), (3,3) noktaları için X-ekseni konum tahmini hata değerleri.

Y-ekseni konum tahmini hata değerleri de Şekil 7.16’da verilmiştir. Y-eksenindeki konum tahmini hata değerlerine bakıldığında; LHS-MC yönteminde mutlak hata değeri aralığı 0.1 cm ile 5.3 cm arasında olduğu görülmektedir. MC ve LSE yöntemlerine bakıldığında, bu aralık sırasıyla 0.8 cm - 8.4 cm ve 5.5 cm - 55.6 cm olmaktadır. Geliştirilen LHS-MC yönteminin doğruluk oranının diğer yöntemlere göre önemli bir fark yarattığı görülmektedir.



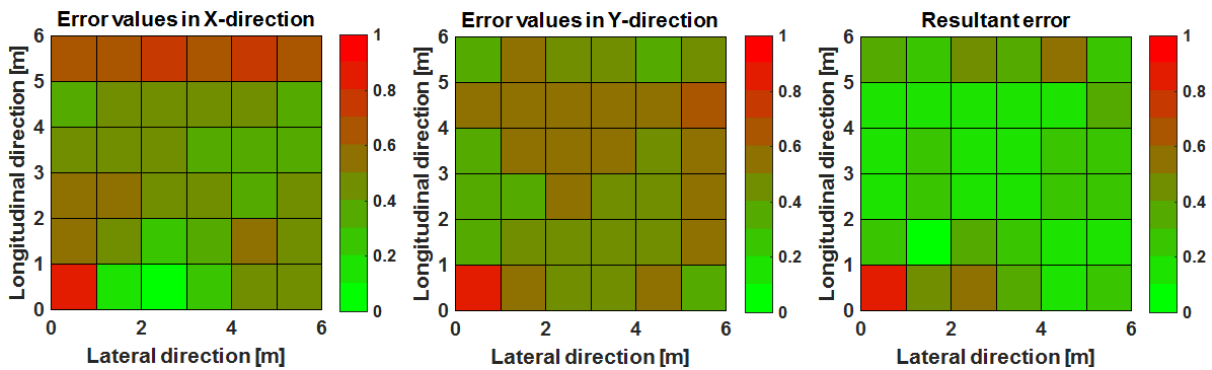
Şekil 7.16 (1,1), (1,2), (1,3) - (2,1), (2,2), (2,3) - (3,1), (3,2), (3,3) noktaları için Y-ekseni konum tahmini hata değerleri.

Elde edilen sonuçlar Şekil 7.17’de LHS-MC, MC ve LSE yöntemlerinin olduğu ayrı bir bar grafiği olarak da verilmiştir. Burada hata değerlerini farklı renge boyanmış barlar temsil etmektedir. Hata değerleri X (Şekil 7.17-Sol) ve Y (Şekil 7.17-Sağ) eksenleri için ayrı ayrı verilmiştir. Kırmızı ile LHS-MC, yeşil ile MC ve mavi ile LSE yöntemi sonuçları gösterilmiştir. Verilen bu grafikte, Şekil 7.5’te gösterilen ve $L_1, \dots, L_6$ ile ifade edilen dikey yöndeki hücrelerden elde edilen hata değerleri gösterilmiştir. X ve Y eksenindeki hata değerleri; LSE yönteminde yaklaşık 40 cm, MC yönteminde yaklaşık 8 cm olarak elde edilmiştir. Bu hata değerleri LHS-MC yöntemi kullanıldığında ise X ekseninde 2 cm , Y ekseninde yaklaşık 1 cm olarak bulunmuştur.

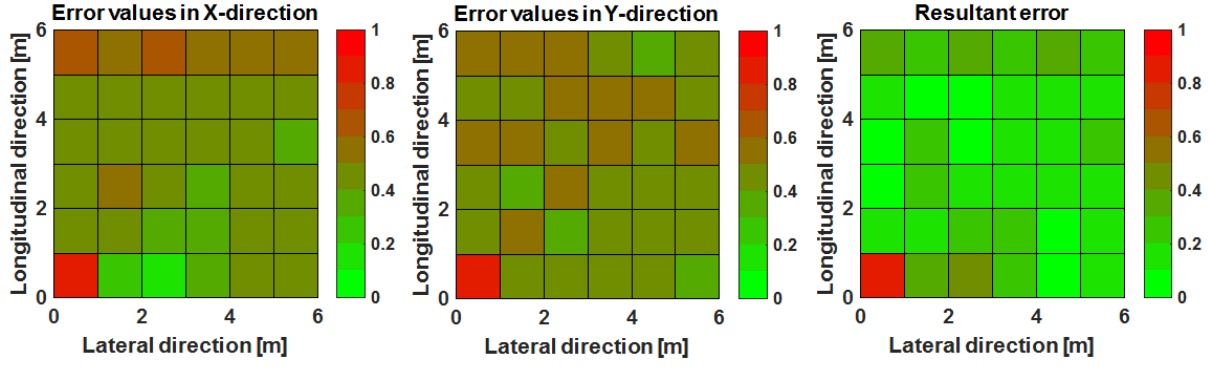


Şekil 7.17 Şekil 7.5'te gösterilen ve $L_1, \dots, L_6$ ile ifade edilen dikey yöndeki hücrelerden elde edilen X ve Y yönleri konum tahmini hata değerleri.

Şekil 7.3'de gösterilen deney ortamında her bir hücreden elde edilen hata oranları incelenmiş ve en az hata oranına sahip güvenli bir bölge seçilmesi Şekil 7.18, 7.19 ve 7.20'de verilen grafikler hazırlanmıştır. Bu şekillerde gösterilen alanlar 6 x 6 boyutunda oluşturulmuş olup 36 adet deney hücresini temsil etmektedir. (0,0), (6,0), (6,6) (0,6) noktalarının bulunduğu köşeler ise sırasıyla A_4 , A_3 , A_2 ve A_1 numaralı sabit sensörlerin bulunduğu konumlardır. Şekillerde verilen grafikler soldan sağa doğru X, Y ve bileşke hatalarını göstermektedir. Burada hata değerlerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve görselleştirilmesi için renk aralıklarına bölünmüştür. Yeşil renk sıfır hata değerini temsil ederken, kırmızı renk maksimum hata değerini göstermektedir. Renk tonlarının karşılık geldiği hata değerleri grafiklerin yanında verilmiştir. MC ve LHS-MC yöntemi grafikleri Şekil 7.18 ve 7.19'da verilmiştir.

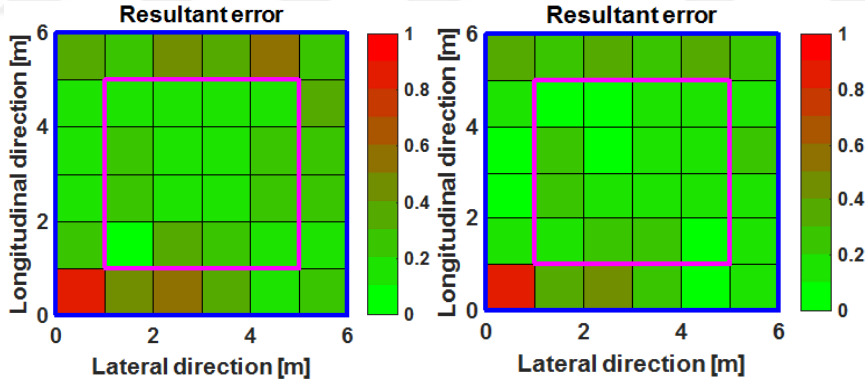


Şekil 7.18 MC yöntemi kullanıldığında elde edilen konum tahmini hata değerleri.



Şekil 7.19 LHS-MC yöntemi kullanıldığında elde edilen konum tahmini hata değerleri.

Sonuçlar incelendiğinde köşe noktalara yakın olan hücrelerin hata değerlerinin diğer hücrelere oranla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu, hedef sensörün köşelerde bulunan sabit sensörlere yaklaştığında hata oranının arttığı sonucuna ulaşmamızı sağlamıştır. Mobil bir robotun konumlandırılması sırasında en az hata değeri ile lokasyonun tespit edilebilmesi için hedef sensörlere belirli bir uzaklıkta güvenli bir bölge seçilmesi, minimum hata ile konum tahmini elde edilmesini sağlayacaktır. Bu durum, Şekil 7.20’de pembe çizgiler ile oluşturulmuş kare alanda göstermektedir.

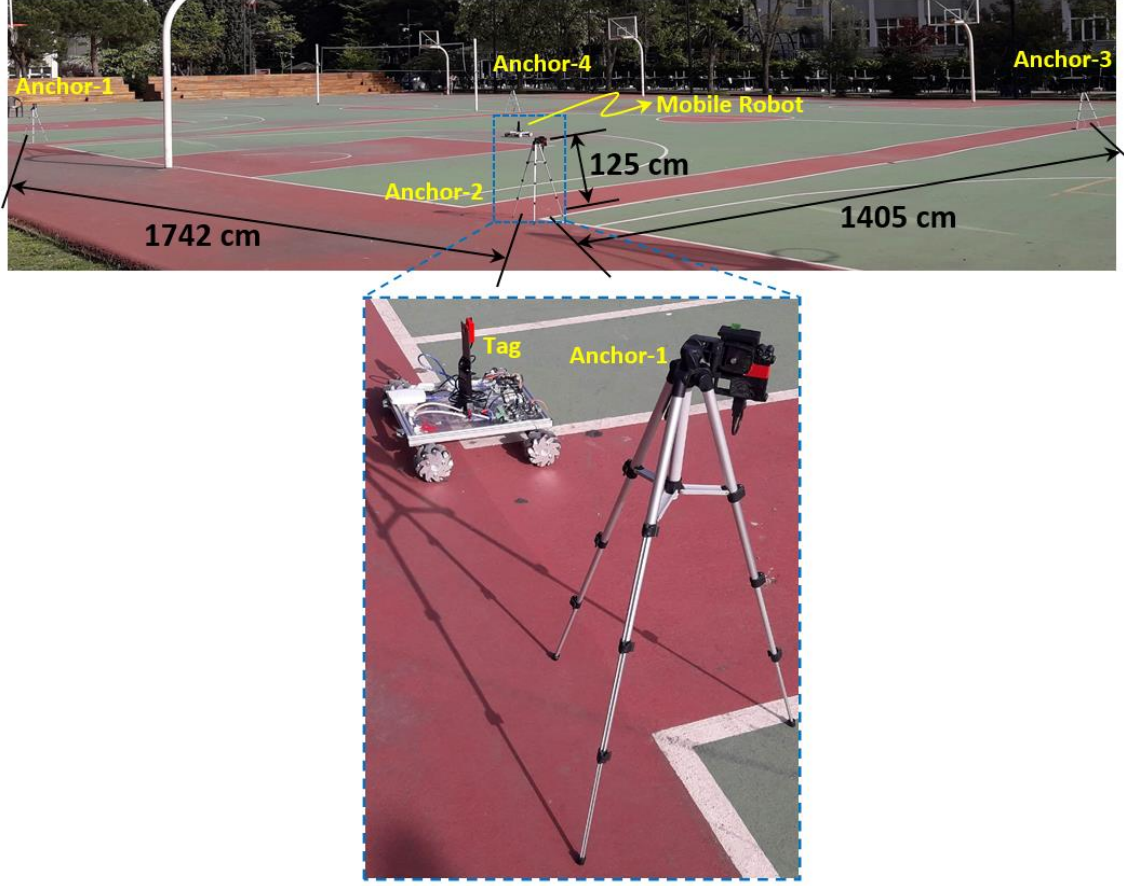


Şekil 7.20 Minimum hata ile konum tahmini yapabilmek için güvenli bir bölgenin oluşturulması.

7.2 Geliştirilen Yöntemin Mekanum Tekerlek Kullanan Bir Mobil Robot Üzerinde Test Edilmesi

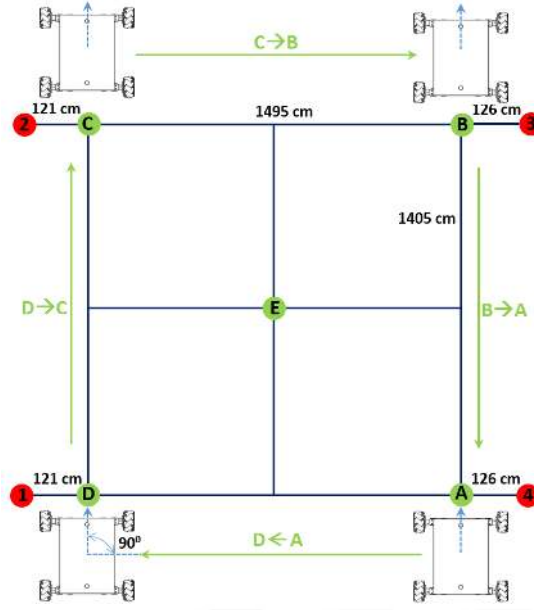
Geliştirilen yöntem mekanum tekerlek kullanan bir mobil robot üzerinde test edilmiştir. Deneyisel çalışmalar Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, merkez kampüsü, basketbol

sahasında yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı test alanı 1742 cm x 1405 cm ölçülerinde bir dikdörtgen bölgedir (Şekil 7.21).



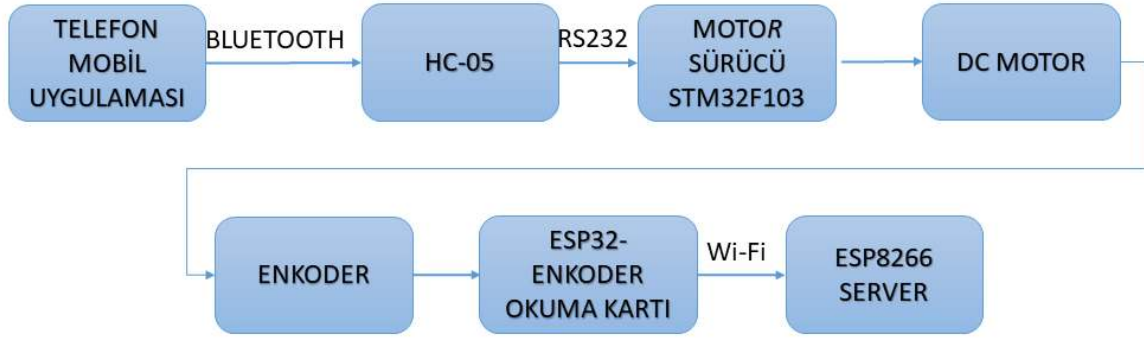
Şekil 7.21 Mekanum tekerlekli mobil robot test alanı (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, merkez kampüsü, basketbol sahası).

Hedef sensör (TAG – Şekil 7.21) mobil robotun geometrik merkezinden 35 cm yüksekliğe konumlandırılmıştır. Kullanılan 4 adet sabit sensör tripod yardımıyla deney alanının köşe noktalarına sabitlenmiştir. Sabit sensörlerin yerden yüksekliği 125 cm olarak ayarlanmıştır (Şekil 7.22).



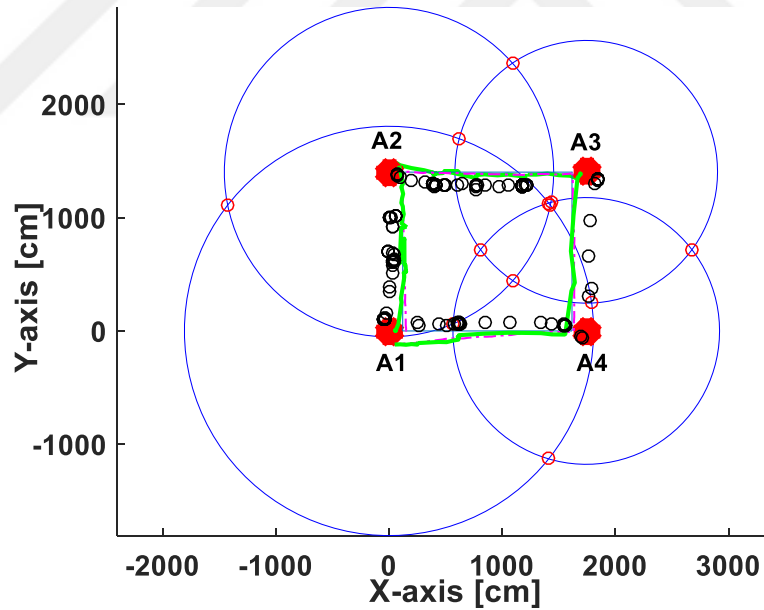
Şekil 7.22 Mobil robot ile takip edilen referans yörünge.

Telefon mobil uygulaması ve HC-05 modülü ile bluetooth haberleşme protokolü kullanılmış, mobil robot Şekil 7.22’de verilen referans yörüngeyi izlemesi için uzaktan komuta edilmiştir. HC-05 modülü ise iletilen hareket komutları UART iletişim protokolü yardımıyla STM32F103 mikrodenetleyicisine sahip motor kontrol kartına iletmektedir. Kullanılan iletişim protokolü Şekil 7.23’te detayları ile gösterilmiştir. Şekil 7.22’de gösterilen referans yörünge D-C-B-A-D sıralamasıyla takip edilmiştir. Takip sırasında mobil robot çok yönlü teker özelliklerini kullanarak, başlangıç oryantasyon açısını değiştirmeden tüm noktalardan geçerek hedef noktaya ulaşmıştır. Mobil robotun başlangıç oryantasyon açısı 90 derecedir. DC motorlarda bulunan enkoder değerlerinin okunabilmesi ve kaydedilebilmesi için Şekil 5.7 ve 5.8’de bulunan enkoder okuma kartı kullanılmıştır. Okunan enkoder verileri, enkoder okuma kartında bulunan dahili Wi-Fi modülü sayesinde, server olarak kullanılan ESP8266 kartına aktarılmıştır. ESP8266 kartı verilerin kaydedilebilmesi amacıyla sabit konumda duran bilgisayara bağlıdır. Takip edilen referans yörünge enkoder verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yörünge LHC-MC ve MC yöntemlerinin karşılaştırılması yapılırken referans doğru olarak kabul edilmiştir.

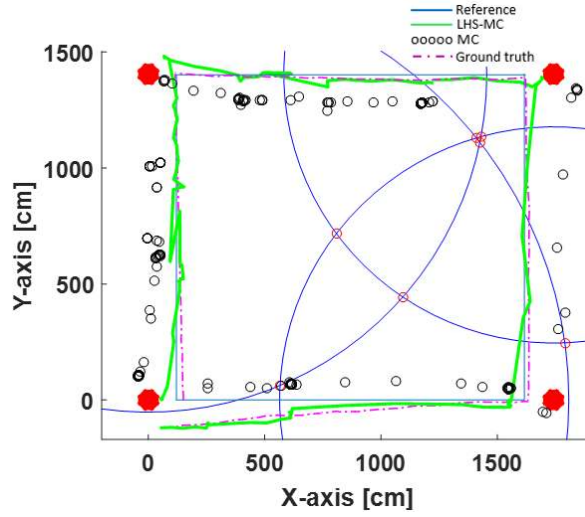


Şekil 7.23 Mekanum tekerlekli mobil robot kontrol sistemi iletişim protokolü akış diyagramı.

Deney sonuçları Şekil 7.24 ve 7.25'te gösterilmiştir. Şekil 7.24'te verilen A_1 , A_2 , A_3 ve A_4 ile gösterilen sabit sensörler sırasıyla D, C, B ve A noktalarına konumlandırılmıştır. Şekil 7.25'te verilen detaylı görünümde, pembe renkli çizgi-noktalar enkoderden gelen veriler ile oluşturulmuş referans yörüngeyi, siyah renkli daireler ve yeşil renkli çizgiler ise sırasıyla, MC ve LHC-MC yöntemleri ile elde edilen sonuçları göstermektedir.

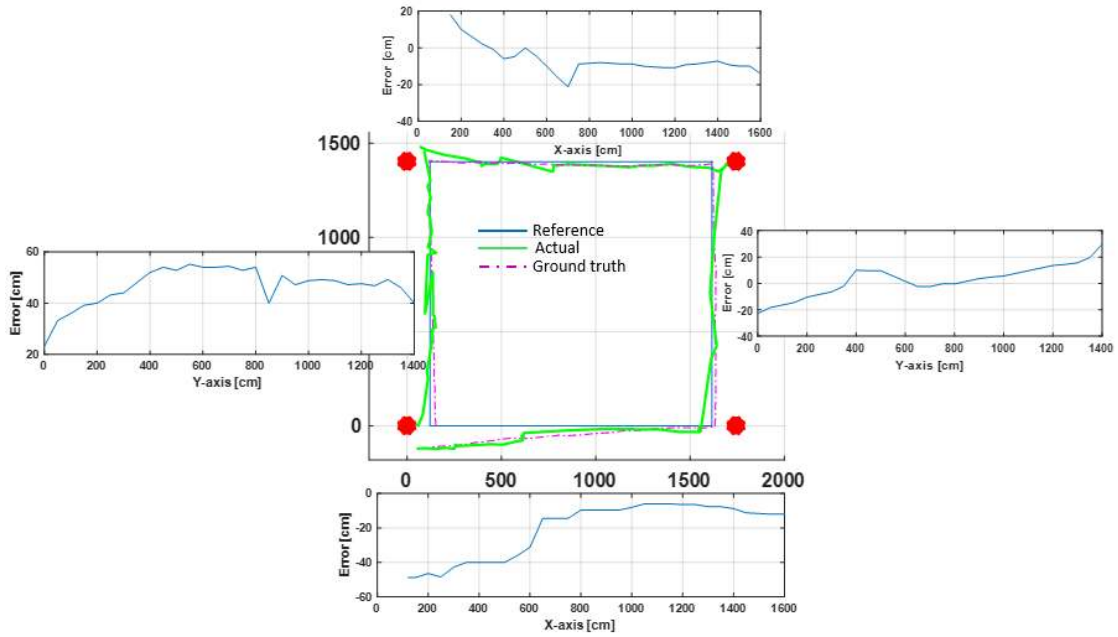


Şekil 7.24 İç ortam konumlandırma sisteminin mekanum tekerlekli mobil robot ile test sonuçları.



Şekil 7.25 Şekil 7.24'te gösterilen sonuçların detay görünümü.

Şekil 7.26'da LHC-MC yöntemi ile referans yörünge arasında oluşan hata değerleri gösterilmiştir. D-C-B-A ile oluşturulan takip yörüngesi D-A, D-C, C-B ve B-A olmak üzere 4 bölgeye ayrılarak 4 hata grafiği elde edilmiştir. Mekanum tekerlek kullanan mobil robot ile yapılan test sonucunda, hedef sensörün, sabit sensörlerden herhangi birine yaklaştıkça hata oranının arttığı sonucu çıkartılmıştır. Bu yüzden, iç ortam konumlandırması yapılacak bölgenin hata oranlarının kabul edilebilir seviyede olabilmesi için sabit sensörlerin konumları önem arz etmektedir.



Şekil 7.26 LHC-MC yöntemi ile referans yörünge arasında oluşan hata değerleri detay görünümü.



BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, konum tahmin doğruluğunu artırmak için bir iç ortam konumlandırma yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem LHS-MC tabanlı bir öğrenme algoritmasıdır. Algoritmanın gerçek zamanlı performansını ölçebilmek ve çalışmada yer verilen diğer yöntemler ile karşılaştırabilmek için sistem mekanum tekerlek kullanan bir mobil robota entegre edilmiştir. Deneysel konumlandırma sistemi UWB teknolojisini kullanan 4 sabit sensör ve 1 hedef sensör içermektedir. Bu çalışmada LHS-MC yönteminin yanı sıra MC ve LSE yöntemleri de kullanılmış, bu sayede gerekli karşılaştırmalar yapılarak önerilen metodun performans analizi yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar önerilen algoritmanın konum tahmin hatalarını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ayrıca önerilen bu yöntem, kullanım kolaylığı sağlaması ve düşük maliyetli olması sebebiyle endüstriyel alanlarda kullanım fırsatı da sunmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **Skrabanek P and Vodicka P** (2016) Magnetic strips as landmarks for mobile robot navigation. *International Conference on Applied Electronics (AE)*, 1-6 September 2016 Pilsen, Czech Republic, 227-232.
- [2] **Roshanianfard A, Noboru N, Koku A, Hiroshi O and Ishii K** (2020) A review of autonomous agricultural vehicles (The experience of Hokkaido University). *Journal of Terramechanics*, 91: 155-183.
- [3] **Vale R T S, Barros E A and Martins T C** (2015) GPU-accelerated Monte Carlo localization for underwater robots. *IFAC-PapersOnLine*, 48 (2): 76-81.
- [4] **Hao Z, Li B and Dang X** (2018) A Method for Improving UWB Indoor Positioning. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018 (2): 1-17.
- [5] **Tian W, Zhao L W and Li G X** (2014) A support vector data description approach to NLOS identification in UWB positioning. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014:1-6.
- [6] **Mani V V and Bose R** (2011) Direction of Arrival Estimation of Multiple UWB Signals. *Wireless Personal Communications*, 57 (2): 277–289.
- [7] **Ridolfi M, Vandermeeren S, Defraye J, Steendam H, Gerlo J, De Clercq D, Hoebeke J, De Poorter E** (2018) Experimental Evaluation of UWB Indoor Positioning for Sport Postures. *Sensors*, 18(1): 168.
- [8] **Abyani M and Bahaari M R** (2020) A comparative reliability study of corroded pipelines based on Monte Carlo Simulation and Latin Hypercube Sampling methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 181, 104079.
- [9] **Bregar K and Mohorcic M** (2018) Improving indoor localization using convolutional neural networks on computationally restricted devices. *IEEE Access*, 6: 17429-17441.
- [10] **Feng T, Yu Y, Wu L, Bai Y, Xiao Z and Lu Z** (2018) A human-tracking robot using ultra wideband technology. *IEEE Access*, 6: 42541-42550.
- [11] **Xu C, Wang X, Duan S and Wan J** (2021) Spatial-temporal constrained particle filter for cooperative target tracking. *Journal of Network and Computer Applications*, 176, 102913.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [12] **Feng D, Wang C, He C, Zhuang Y and Xia X G** (2020) Kalman-filter-based integration of IMU and UWB for high accuracy indoor positioning and navigation. *IEEE Internet of Things Journal*, 7 (4): 3133-3146.
- [13] **Kasmi Z, Guerchali N, Norrdine A and Schiller J H** (2019) Algorithms and position optimization for a decentralized localization platform based on resource-constrained devices. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 18(8): 1731-1744.
- [14] **Yu K and Oppermann I** (2004) Performance of UWB position estimation based on time-of-arrival measurements. *International Workshop on Ultra Wideband Systems Joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*, June 2004, Kyoto, Japan, 400-404.
- [15] **Ninh D B, He J, Trung V T and Huy D P** (2020) An effective random statistical method for Indoor Positioning System using WiFi fingerprinting. *Future Generation Computer Systems*, 109: 238-248.
- [16] **Chen H, Guan W, Li S and Wu Y** (2018) Indoor high precision three-dimensional positioning system based on visible light communication using modified genetic algorithm. *Optics Communications*, 413: 103-120.
- [17] **Silvia Z, Martina C, Fabio S and Alessandro P** (2018) Ultra wide band indoor positioning system: analysis and testing of an IPS technology. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11): 1488-1492.
- [18] **Pu Y C and You P C** (2018) Indoor positioning system based on BLE location fingerprinting with classification approach. *Applied Mathematical Modelling*, 62: 654-663.
- [19] **Guo H, Li H, Xiong J and Yu M** (2019) Indoor positioning system based on particle swarm optimization algorithm. *Measurement*, 134: 908-913.
- [20] **Zheng L, Zhou W, Tang W, Zheng X, Peng A and Zheng H** (2016) A 3D indoor positioning system based on low-cost MEMS sensors. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 65: 45-56.
- [21] **Woo S, Jeong S, Mok E, Xia L, Choi C, Pyeon M and Heo J** (2011) Application of WiFi-based indoor positioning system for labor tracking at construction sites: A case study in Guangzhou MTR. *Automation in Construction* 20(1): 3-13.
- [22] **Aguado S, Pérez P, Albajez J A, Velázquez J and Santolaria J** (2017) Monte Carlo method to machine tool uncertainty evaluation, *Procedia Manufacturing*, 13: 585-592.
- [23] **Cooper H M, Zhang C, Davis S E and Troxler T G** (2019) Object-based correction of LiDAR DEMs using RTK-GPS data and machine learning modeling in the coastal Everglades, *Environmental Modelling & Software*, 112: 179-191.
- [24] **Zhu S and Shi Y** (2011) Estimation of GPS strain rate and its error analysis in the Chinese continent. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(1): 351-362.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [25] **Lifei R, Ting L, Qijian Z, Jiangxin Y and Yanlong C** (2018) Method for measurement uncertainty evaluation of cylindricity error based on good point set. *Procedia CIRP*, 75: 373-378.
- [26] **Yan H, Wu X and Yang J** (2015) Application of Monte Carlo method in tolerance analysis. *Procedia CIRP*, 27: 281-285.
- [27] **Abyani M and Bahaari M R** (2020) A comparative reliability study of corroded pipelines based on Monte Carlo Simulation and Latin Hypercube Sampling methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 181, 104079.
- [28] **Rajabi M M, Ashtiani B A and Janssen H** (2015) Efficiency enhancement of optimized Latin hypercube sampling strategies: Application to Monte Carlo uncertainty analysis and meta-modeling. *Advances in Water Resources*, 76: 127-139.
- [29] **Hou T, Nuyens D, Roels S and Janssen H** (2019) Quasi-Monte Carlo based uncertainty analysis: Sampling efficiency and error estimation in engineering applications. *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106549.
- [30] **Helton J C and Davis F J** (2003) Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 81(1): 23-69.
- [31] **Chen Q, Zuo L, Wu C, Bu Y, Huang Y, Chen F and Chen J** (2019) Supply adequacy assessment of the gas pipeline system based on the Latin hypercube sampling method under random demand. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 71, 102965.
- [32] **Seco F, Jimenez A R, Prieto C, Roa J, and Koutsou K** (2009) A survey of mathematical methods for indoor localization. *6th IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, 26-28 August 2009, Budapest, Hungary, 9–14.
- [33] **Xiao J, Liu Z, Yang Y, Liu D, and Xu H** (2011) Comparison and analysis of indoor wireless positioning techniques. *International Conference on Computer Science and Service System*, 27-29 June 2011, 293–296.
- [34] **Vossiek M, Wiebking L, Gl'anzer M, Mastela D and Christmann M** (2003) Wireless local positioning - concepts, solutions, applications, *IEEE Radio and Wireless Conference*, 13 August 2003, Boston, MA, USA, 219–224.
- [35] **Iglesias H J P, Barral V and Escudero C J** (2012) Indoor person localization system through RSSI Bluetooth fingerprinting. *19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP '12)*, 11-13 April 2012, Vienna, Austria, 40-43.
- [36] **Li Z, Dehaene W and Gielen G** (2007) System design for ultralow- power UWB-based indoor localization. *IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB '07)*, 24-26 September 2007, Singapore, 580–585.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [37] **Popleteev A, Osmani V and Mayora O** (2012) Investigation of indoor localization with ambient FM radio stations. *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '12)*, 19-23 March 2012, Lugano, Switzerland, 171-179.
- [38] **Moghtadaiee V, Dempster A G and Lim S** (2011) Indoor localization using FM radio signals: a fingerprinting approach. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN '11)*, 21-23 September 2011, Guimaraes, Portugal, 1-7.
- [39] **Xin H, Cheng L and Zhang G** (2011) A Zigbee - Based Localization Algorithm for Indoor Environments. *International Conference on Computer Science and Network Technology*, 24-26 December 2011, Harbin, 1776-1781.
- [40] **Fernández S, Gualda D, García J C, García J J, Ureña J and Gutiérrez R** (2011) Indoor location system based on ZigBee devices and metric description graphs. *7th IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP '11)*, 19-21 September 2011, Floriana, Malt, 4-8.
- [41] **Lee D-H, Y. Shim Y-B, M. Kim M-J and Moon Y-K** (2018) Hybrid positioning system for improving location recognition performance in offshore plant environment. *International Conference on Information Networking (ICOIN)*, 10-12 January 2018, Chiang Mai, Thailand, 891-893.
- [42] **Runge A, Baunach M and Kolla R** (2011) Precise self-calibration of ultrasound based indoor localization systems. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN '11)*, 21-23 September 2011, Guimaraes, Portugal, 1-8.
- [43] **Medina C, Segura J C and Holm S** (2012) Feasibility of ultrasound positioning based on signal strength. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN '12)*, 13-15 November 2012, Sydney, NSW, Australia, 1-9.
- [44] **Xu C, Wang X, Duan S and Wan J** (2021) Spatial-temporal constrained particle filter for cooperative target tracking. *Journal of Network and Computer Applications*, 176, 102913.
- [45] **Metropolis N, Rosenbluth A W, Rosenbluth M N and Teller A H** (1953) Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J. Chemical Physics*, 21(6): 1087-1092.
- [46] **McKenzie N J , Grundy M J, Webster R and Voase A J R** (2008) Guidelines for surveying soil and land resources. *CSIRO Publishing*, 47(2): 224-225.
- [47] **Davis E L** (1987) Asymptotic behavior of S-estimates of multivariate location parameters and dispersion matrices. *Arm. Statist.* 15:1269-1292
- [48] **Iman R L and Conover W J** (1980) Small sample sensitivity analysis techniques for computer models with an application to risk assessment. *Communications in Statistics: Theory and Methods A*, 9(17): 1749-1874.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [49] **Wyss G D and Jorgensen K H** (2004) A user's guide to LHS: Sandia's Latin Hypercube Sampling software. *Sandia National Laboratories*, SAND2004-2439.
- [50] **Bregar K and Mohorčič M** (2018) Improving Indoor Localization Using Convolutional Neural Networks on Computationally Restricted Devices. *IEEE Access*, 6: 17429-17441.
- [51] **Kalman R E** (1960) A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, 82(1): 35-45.
- [52] **Ma'arif A, Iswanto I, Nuryono A A and Rio I A** (2020) Kalman Filter for Noise Reducer on Sensor Readings. *Signal and Image Processing Letters*, 1: 11-22.
- [53] **Smith S W** (1999) The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing 2st edition, ISBN 0-9660176-6-8, *California Technical Publishing*, e-book, 277-284.
- [54] **Diegel O, Badve A, Bright G, Potgieter J and Tlale S** (2002) Improved Mecanum Wheel Design for Omni-directional Robots, *Australasian Conference on Robotics and Automation*, 27-29 November 2002, Auckland, 117-121.
- [55] **van Haendel R P A** (2005) Design of an omnidirectional universal mobile platform. National University of Singapore, *Mechanical Engineering*, Eindhoven, 60.
- [56] **Guo S, Jin Y, Bao S and Xi F F** (2016) Accuracy analysis of omnidirectional mobile manipulator with mecanum wheels. *Advances in Manufacturing*, 4(4): 363–370.



EK AÇIKLAMALAR

EK A: Kodlar

```
%https://ww2.mathworks.cn/matlabcentral/fileexchange/113705-2d-lse-localization
%-----
%
%
% LSE model is
% Theta = (transpose(H)*H)^-1*transpose(H)*X
%
% H = [ H1,H2,H3,.....]      Observation Data
% X = [X1,X2,X3,.....]      Model Data
%-----
%
%
% Usage=just generate random circle diameter
% pre-define Anchor location can be change A1,A2,A3
% result matrix is res=[X Y r]  X,Y Tag location based on Lse

random = 100 * rand(1, 10);
d1 = random(1) + 10;
d2 = random(2) + 10;
d3 = random(3) + 10;

x1 = 0; % Anchor1 location user define
y1 = 100;

x2 = 100; % Anchor2 location user define
y2 = 100;

x3 = 0; % Anchor3 location user define
y3 = 0;

H = [-2 * x1, -2 * y1, 1; -2 * x2, -2 * y2, 1; -2 * x3, -2 * y3, 1];

X = [(d1)^2 - (x1)^2 - (y1)^2; (d2)^2 - (x2)^2 - (y2)^2; (d3)^2 - (x3)^2 - (y3)^2];

res = ((transpose(H) * H)^-1) * transpose(H) * X;
res(1);
res(2);
```

EK AÇIKLAMALAR (devam ediyor)

```
res(3);

% -----Just Visualize the result-----

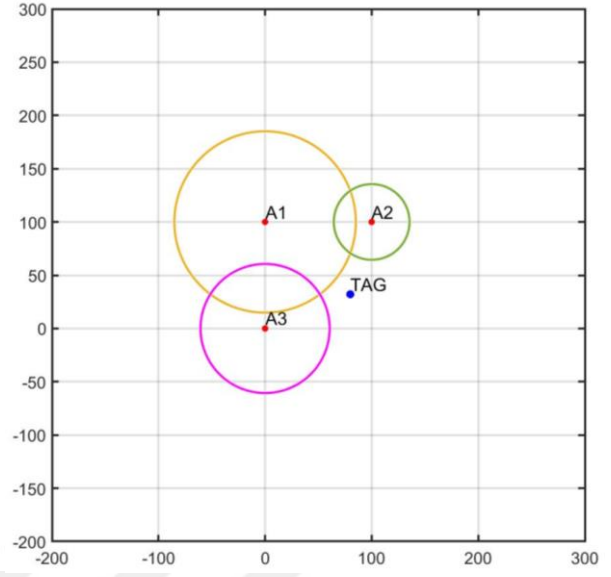
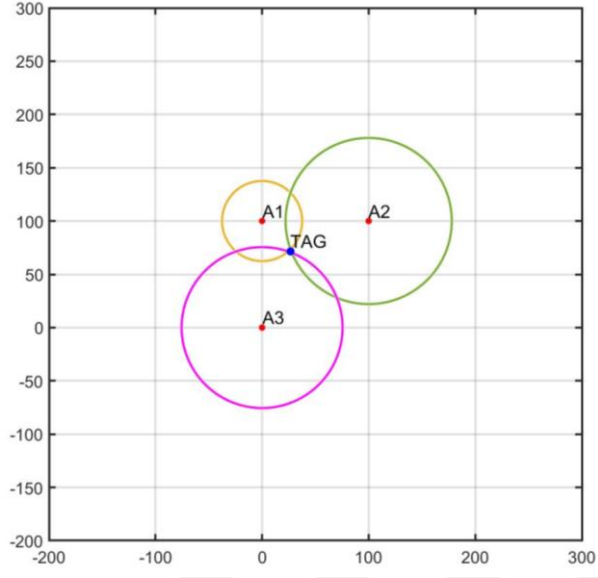
axis equal
hold on
grid on
xlim([-200, 300])
ylim([-200, 300])
viscircles([x1, y1], d1, 'color', '[0.9290 0.6940 0.1250]'); % Draw Anchor Circle
viscircles([x2, y2], d2, 'color', '[0.4660 0.6740 0.1880]');
viscircles([x3, y3], d3, 'color', 'm');

plot(x1, y1, '.', 'MarkerSize', 20, 'Color', 'r');
plot(x2, y2, '.', 'MarkerSize', 20, 'Color', 'r');
plot(x3, y3, '.', 'MarkerSize', 20, 'Color', 'r');
plot(res(1), res(2), '.', 'MarkerSize', 25, 'Color', 'b'); % Calculated Tag Location

txt = 'TAG';
text(res(1), res(2)+10, txt, 'FontSize', 16)
txt2 = 'A1';
text(x1, y1+10, txt2, 'FontSize', 16)
txt3 = 'A2';
text(x2, y2+10, txt3, 'FontSize', 16)
txt4 = 'A3';
text(x3, y3+10, txt4, 'FontSize', 16)

ax = gca;
ax.FontSize = 15; % Font Size of 15
box on
ax = gca;
ax.LineWidth = 2;
```

EK AÇIKLAMALAR (devam ediyor)



ÖZGEÇMİŞ

Göktuğ HAMBARCI, İlk, orta ve lise öğrenimini Sakarya’da tamamladıktan sonra 2012 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başlamıştır. Lisans eğitimini tamamladıktan sonra mezun olduğu üniversitede yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Yüksek lisans eğitimi sürecinde robotik, mekatronik ve kontrol alanlarında çalışmalar yapmıştır.