



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



UWB/IMU İLE İÇ MEKAN KONUMLANDIRMA VE İZLEME OPTİMİZASYONU

ŞEHRİNAZ DURMUŞ TAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mekatronik Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Uğur DEMİR

İSTANBUL, 2023



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



INDOOR POSITIONING AND TRACKING OPTIMIZATION WITH UWB/IMU

ŞEHRİNAZ DURMUŞ TAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Uğur DEMİR

İSTANBUL, 2023

ÖNSÖZ

Bu tez sürecinin başından sonuna kadar bana kılavuzluk eden, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, konu belirleme aşamasından yazılı sürece kadar olan tüm evrelerde sonsuz sabır ve desteğiyle yanımda olan kıymetli danışmanım Doç. Dr. Uğur DEMİR'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım. Tecrübelerini benimle cömertçe paylaşan ve desteğini esirgemeyen Arş. Görevlisi Alper YILDIRIM'a teşekkür ederim. Teknik zorluklarla karşılaştığımda bilgi birikimiyle bana destek olan Boğaziçi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Öğrencisi Şener YILMAZ'a teşekkürlerimi iletiyorum. Tez çalışmamın gerçekleştirilmesi için gerekli ofis ve donanımları büyük bir nezaketle paylaşan Wipilot Teknoloji A.Ş.'ye teşekkürlerimi iletiyorum.

Hayatımın her evresinde yanımda olan, sevgiyle dolu kalpleriyle her daim desteklerini esirgemeyen annem Ayfer DURMUŞ ve babam Ersin DURMUŞ'a sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum. Kız kardeşlerim Zehra ve Rüveyda DURMUŞ, her zaman yanımda olan kopmaz bağım ve destekçilerim; size minnettarım.

Tez sürecimdeki destekçim, motivasyon kaynağım olan eşim Oğuzhan TAN'a ve manevi desteklerini esirgemeyen eşimin sevgili ailesine de teşekkürlerimi iletiyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
SEMBOLLER	vii
KISALTMALAR	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. İÇ MEKAN KONUMLANDIRMA	3
2.1 İç Mekan Konumlandırma Zorlukları	7
2.2 Ultra Geniş Bant Teknolojisi	10
2.2.1 Varış Açısı	11
2.2.2 Varış Zamanı	13
2.2.3 Varış Zaman Farkı	14
2.2.4 Alınan Sinyal Gücü	16
2.2.5 Üçgenleme	17
2.2.6 Çember Kesişimi	18
2.3 Ataletsel Navigasyon	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1 Ultra Geniş Bant Teknolojisi ile İç Mekan Konumlandırma	24
3.1.1 İki Yönlü Haberleşme ile Mesafe Ölçümü	25
3.1.2 Konum Tahmini için En Küçük Kareler Yöntemi.....	27
3.2 Konum Tahmini için Sensör Füzyon	29
3.2.1 IMU Koordinat Dönüşümü.....	33
3.2.2 Genişletilmiş Kalman Filtresi.....	35
3.2.3 Kokusuz Kalman Filtre.....	37
3.3 Taguchi Yöntemi ve Deney Tasarımı	39
3.4 Box-Behnken Tasarım	42
3.5 Sistem Donanımı ve Test	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	49
5. SONUÇ	63
KAYNAKLAR.....	66

ÖZET

İç mekan konumlandırma sistemleri, modern yaşantımızın önemli bir parçası haline gelmiştir. Özellikle dinamik, sürekli değişen ortamlarda doğru ve hızlı konum bilgisi elde etmek, operasyonel verimlilik ve güvenlik açısından kritik öneme sahiptir. Bu tez, iki güçlü teknolojinin “Ultra Geniş Bant (UWB)” ve “Ataletsel Ölçü Birimleri (IMU)” sensör füzyonu yardımıyla nasıl daha etkili bir konumlandırma aracı haline getirilebileceğini incelemiştir.

Tez kapsamında, Ultra Geniş Bant teknolojisi ile elde edilen veriler, UWB Anchor cihazlarının ROM belleklerine kaydedilmiştir. Bu veriler MATLAB ortamına aktarılarak detaylı analizler için hazır hale getirilmiştir. IMU sensöründen elde edilen veriler ise seri port üzerinden loglama yapılarak benzer şekilde MATLAB ortamına aktarılmıştır. MATLAB/Simulink platformu, bu iki veri kaynağını bütünleştirerek sensör füzyon uygulamasını gerçekleştirmek için kullanılmıştır. İvmeölçer cihazlarından elde edilen veriler, sensör füzyon uygulamasına eklenmeden önce, alçak geçiren filtre kullanılarak potansiyel gürültü ve hataların önüne geçmek amacıyla işlenmiştir.

Tezin pratiği, Doğrudan Görüş Hattı Olmayan (NLOS) şartları simüle eden bir ofis ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu ortam, iç mekan karmaşıklığını ve dinamikliğini yansıtan bir kolon ile NLOS şartı sağlamaktadır. Bu, UWB ve IMU'nun birleşik performansını sınamak için ideal bir saha deneyi sunmaktadır.

Box-Behnken Tasarımı (BBD) yaklaşımı, farklı parametrelerin konumlandırma performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu metodoloji, özellikle çok faktörlü deneylerde, faktörlerin etkileşimlerini belirlemek ve optimal sonuçlara ulaşmak için oldukça etkilidir. BBD'nin uygulanması sonucunda, sensör füzyonunun optimum parametreleri belirlenmiştir. Bu optimizasyon çalışması, sensör füzyon sürecinin genel performansını artırmak için kritiktir. Ayrıca bu tezde normalleştirilmiş katsayıların incelenmesi ile farklı parametrelerin konumlandırma sonuçları üzerindeki göreceli etkileri de değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak bu tez, UWB ve IMU teknolojilerini entegre etme pratiğini gerçek dünya koşullarında, bir ofis ortamında sunmuştur. Bu çalışma, UWB ve IMU'nun birleşik kullanımının, dinamik ve zorlu iç mekan ortamlarında kesin ve güvenilir konum bilgisi sağlama potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

ABSTRACT

Positioning systems have become an integral part of our modern life. Particularly in dynamic and constantly changing environments, obtaining accurate and quick location information is critical for operational efficiency and safety. This thesis examines how the fusion of two powerful technologies “Ultra Wideband (UWB)” and “Inertial Measurement Units (IMU)” can be transformed into a more effective positioning tool.

Within the scope of this thesis, data obtained through the Ultra Wideband technology was stored in the ROM memories of UWB Anchor devices. This data was then transferred to the MATLAB environment, making it ready for detailed analysis. Data derived from the IMU sensor was logged via serial port and similarly transferred to the MATLAB setting. The MATLAB/Simulink platform was utilized to integrate these two data sources and implement the sensor fusion application. Data from accelerometers were processed using a low-pass filter before being incorporated into the sensor fusion application to preempt potential noise and errors.

The practical part of the thesis was conducted in an office environment simulating Non-Line-of-Sight (NLOS) conditions. This setting, with a column reflecting indoor complexity and dynamism, provides an ideal field test to challenge the combined performance of UWB and IMU.

The Box-Behnken Design (BBD) approach was employed to assess the effects of different parameters on positioning performance. This methodology is particularly effective in multifactorial experiments for determining factor interactions and achieving optimal outcomes. As a result of the BBD application, optimum parameters for sensor fusion were established. This optimization task was crucial in enhancing the overall performance of the sensor fusion process. Furthermore, this thesis evaluated the relative impacts of different parameters on positioning outcomes by examining normalized coefficients.

In conclusion, this thesis presents the practice of integrating UWB and IMU technologies under real-world conditions in an office environment. This research underscores the potential of the combined use of UWB and IMU in providing precise and reliable location information in dynamic and challenging indoor setting.

SEMBOLLER

a	: İvme
A	: Durum Geçiş Matrisi
B	: Giriş Matrisi
C	: Rotasyon Matrisi
c	: Işık hızı
d	: Mesafe
d₀	: Bir Metrelik Mesafeden Alınan Güç
f	: Özgül Kuvvet
H_k	: Gözlem Matrisi
R	: Gözlem Kovaryans Matrisi
t	: Zaman
T	: Alıcı ve Verici Arasındaki Duvar Sayısı
u_k	: Navigasyon Koordinatındaki İvme Vektörü
v	: Hız
v_k	: Ölçüm Gürültüsü
y_i	: i. UWB Anchor'ın Y Eksenindeki Konumu
z_k	: Ölçüm Vektörü
W	: Sigma Noktalarının Ağırlığı
w_k	: Süreç Gürültüsü
WAF	: Duvar Zayıflatma Faktörü
w_{bi}	: Ataletsel Çevreye Göre Dönme Hızı
w_{ie}	: Ataletsel Çevreye Göre Dünya'nın Dönme Hızı
w_{en}	: Navigasyon Çevresinin Dünya Çevresine Göre Dönme Hızı
w_{nb}	: Navigasyon Çevresine Göre Gövdenin Dönme Hızı

x	: Konum
x_i	: i. UWB Anchor'ın X Eksenindeki Konumu
ψ	: x Eksenindeki Açısal Hız
θ	: y Eksenindeki Açısal Hız
φ	: z Eksenindeki Açısal Hız
Q	: Durum Kovaryans Matrisi
α, β, κ	: Sigma Noktaları
β_k	: Katsayı
Δt	: Her Referans Noktasındaki Varış Zaman Farkı

KISALTMALAR

AoA	: Varış Açısı
BBD	: Box-Behnken Tasarım
BLE	: Bluetooth Düşük Enerjili
DoE	: Deney Tasarımı
EKF	: Genişletilmiş Kalman Filtre
FCC	: Federal İletişim Kurulu
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi
IMU	: Ataletsel Ölçü Birimleri
ISM	: Sınai Bilimsel Tıbbi Cihaz
LS	: En Küçük Kareler
LİDAR	: Işın Algılama ve Mesafe Ölçümü
LOS	: Doğrudan Görüş Hattı
LTE	: Uzun Vadeli Evrim
MAPE	: Mutlak Ortalama Hata Yüzdesi
NLOS	: Doğrudan Görüş Hattı Olmayan
RSSI	: Alınan Sinyal Gücü Göstergesi
RFID	: Radyo Frekans ile Tanımlama
RTOF	: Gidiş-Dönüş Uçuş Süresi
TDoA	: Varış Zaman Farkı
ToF	: Varış Zamanı
TWR	: İki Yönlü Haberleşme
UKF	: Kokusuz Kalman Filtre
UWB	: Ultra Geniş Bant
Wi-Fi	: Kablosuz Alan Ağı

WPAN : Kablosuz Kişisel Alan Ağı

WLAN : Kablosuz Yerel Ağı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 İç Mekan Konumlandırma Teknikleri ve Teknolojileri	3
Şekil 2.2 İç Mekan LOS/NLOS Şartları.....	8
Şekil 2.3 İç Mekan Konumlandırma Teknolojileri Frekans Aralıkları[9].....	11
Şekil 2.4 Varış Açısı Tekniği	12
Şekil 2.5 Varış Zamanı Tekniği	13
Şekil 2.6 Varış Zaman Farkı Tekniği	15
Şekil 2.7 Alınan Sinyal Gücü Tekniği	16
Şekil 2.8 Üçgenleme Tekniği	18
Şekil 2.9 Çember Kesişim Tekniği	19
Şekil 2.10 Dünya Üzerindeki Seyrüsefer Çerçevesi[32]	22
Şekil 3.1 UWB ile Konumlandırma Akış Şeması	24
Şekil 3.2 İki Yönlü Haberleşme	26
Şekil 3.3 UWB Anchor Mesafe Ölçüm Sonuçları	27
Şekil 3.4 Sensör Füzyon Akış Şeması.....	30
Şekil 3.5 İvmeölçer Verileri	31
Şekil 3.6 Alçak Geçiren Filtrede İşlenen İvmeölçer Verileri.....	32
Şekil 3.7 Jiroskop Verileri.....	32
Şekil 3.8 IMU Koordinat Dönüşümü Sonrasında x ve y Eksenindeki İvme Değerleri..	35
Şekil 3.9 Sistem Donanımı.....	44
Şekil 3.10 Sistemde USFMAX Modülü Entegre Edilmiş Referans UWB Anchor Donanımı	45
Şekil 3.11 Test Düzeneği	46
Şekil 3.12 Test Ortamındaki NLOS Şart.....	47
Şekil 4.1 6 UWB Anchor ile Konum Tahmin Sonuçlarını Kıyaslamaları	50
Şekil 4.2 6 UWB Anchor x Eksen Referans Konum ve En Küçük Kareler Yöntemi Kıyaslama	51
Şekil 4.3 6 UWB Anchor y Eksen Referans Konum ve En Küçük Kareler Yöntemi Kıyaslama	52
Şekil 4.4 6 UWB Anchor x Eksen Referans Konum ve Genişletilmiş Kalman Filtre Kıyaslama	52

Şekil 4.5 6 UWB Anchor y Eksenine Referans Konum ve Genişletilmiş Kalman Filtre Kıyaslama	53
Şekil 4.6 6 UWB Anchor x Eksenine Referans Konum ve Kokusuz Kalman Filtre Kıyaslama	53
Şekil 4.7 6 UWB Anchor y Eksenine Referans Konum ve Kokusuz Kalman Filtre Kıyaslama	54
Şekil 4.8 x Eksenindeki Genişletilmiş Kalman Filtre ile Normalleştirilmiş Katsayıların İlişkisi	57
Şekil 4.9 y Eksenindeki Genişletilmiş Kalman Filtre ile Normalleştirilmiş Katsayıların İlişkisi	57
Şekil 4.10 x Eksenindeki Kokusuz Kalman Filtre ile Normalleştirilmiş Katsayıların İlişkisi	58
Şekil 4.11 y Eksenindeki Kokusuz Kalman Filtre ile Normalleştirilmiş Katsayıların İlişkisi	58
Şekil 4.12 5 UWB Anchor ile Konum Tahmin Sonuçlarını Kıyaslama	59
Şekil 4.13 5 UWB Anchor x Eksenine Referans Konum ve En Küçük Kareler Yöntemi Kıyaslama	60
Şekil 4.14 5 UWB Anchor y Eksenine Referans Konum ve En Küçük Kareler Yöntemi Kıyaslama	60
Şekil 4.15 6 UWB Anchor x Eksenine Referans Konum ve Genişletilmiş Kalman Filtre Kıyaslama	61
Şekil 4.16 6 UWB Anchor y Eksenine Referans Konum ve Genişletilmiş Kalman Filtre Kıyaslama	61
Şekil 4.17 6 UWB Anchor x Eksenine Referans Konum ve Kokusuz Kalman Filtre Kıyaslama	62
Şekil 4.18 6 UWB Anchor y Eksenine Referans Konum ve Kokusuz Kalman Filtre Kıyaslama	62

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 İç Mekan Konumlandırma Teknolojileri Karşılaştırma	6
Tablo 2.2 İç Mekan Konumlandırma Teknolojileri Zorlukları.....	8
Tablo 3.1 Sistem Parametreleri ve Düzeyleri	41
Tablo 3.2 Ortogonal Deney Matrisi	41
Tablo 3.3 Deney Tasarımı	42
Tablo 3.4 Box Behnken Tasarıma Göre DoE	43
Tablo 4.1 MAPE Açısından Konum Tahmin Değerlendirmesi.....	49
Tablo 4.2 MAPE Sonuçları.....	55
Tablo 4.3 Box Behnken Tasarım	55

1. GİRİŞ

İç mekan konumlandırma sistemleri, modern dünyada bireylerin ve nesnelerin yerlerini hassas ve etkili bir şekilde belirlemek için giderek daha önemli hale gelmektedir [1], [2]. Bu sistemler, bireylerin, ekipmanların ve nesnelerin mekansal konumlarını dinamik olarak tespit ederek hem günlük yaşamda hem de endüstriyel uygulamalarda kritik rol oynamaktadır [3].

Farklı iç mekan konumlandırma yaklaşımları Kablosuz Bağlantı Alanı (Wi-Fi), 5G, UWB ve Uzun Vadeli Evrim (LTE) gibi çok çeşitli teknolojilere dayanmaktadır. Daha gelişmiş yaklaşımlar kamera ve Işın Algılama ve Mesafe Ölçümü (LIDAR) sensörlerinin görüntü işleme ile birleştirilmesini içermektedir[2]–[5]. Ancak bu yöntemler, özellikle belirli kullanım senaryolarında engeller, mimari yapı özellikleri ve donanımsal sınırlamalar nedeniyle birtakım zorluklarla karşılaşmaktadır [2], [3].

Bu tez, iç mekan konumlandırma için Ultra Geniş Bant (UWB) teknolojisinin benzersiz avantajlarına odaklanmıştır. UWB'nin, düşük enerji tüketimi, ekonomik maliyeti, yüksek konumlandırma doğruluğu, çoklu yol veri iletim kapasitesi, geniş bant genişliği ve pikosaniye düzeyindeki minimal gecikme süreleri gibi bir dizi üstün özelliği bulunmaktadır [5]–[8]. IEEE 802.15.4 protokolünü temel alan UWB teknolojisi, hata birikiminin etkilerini sınırlayarak kısa darbe süreleriyle hassas konumlandırmayı garantiler [9]. Ayrıca, 500 MHz'ye kadar bant genişliği sağlar, bu da onu Bluetooth gibi diğer teknolojilere kıyasla daha yüksek veri iletim hızlarına sahip kılar [1], [9], [10]. Ancak UWB'nin avantajlarına rağmen, çevresel faktörlerden kaynaklanan NLOS, çoklu yol etkileri yanıltıcı ölçüm sonuçlarına neden olabilir[1], [9].

Ataletsel Ölçüm Birimleri (IMU) [11], konumlandırma için başka bir yaygın teknolojidir. Ataletsel navigasyon sistemleri, Newton'un hareket yasalarını temel alarak hareketli nesnelerin konumunu belirler. IMU, ivmeölçerlerin sağladığı ivme verilerini entegre ederek hareket değişikliklerini sürekli olarak izler[12],[13], [14]. Standart bir IMU, üç eksen jiroskop ve üç eksen ivme ölçerle donatılmıştır. Bu ölçümlerle elde edilen konum hesaplamaları, zamanla hata birikimine maruz kalabilir [13]–[15].

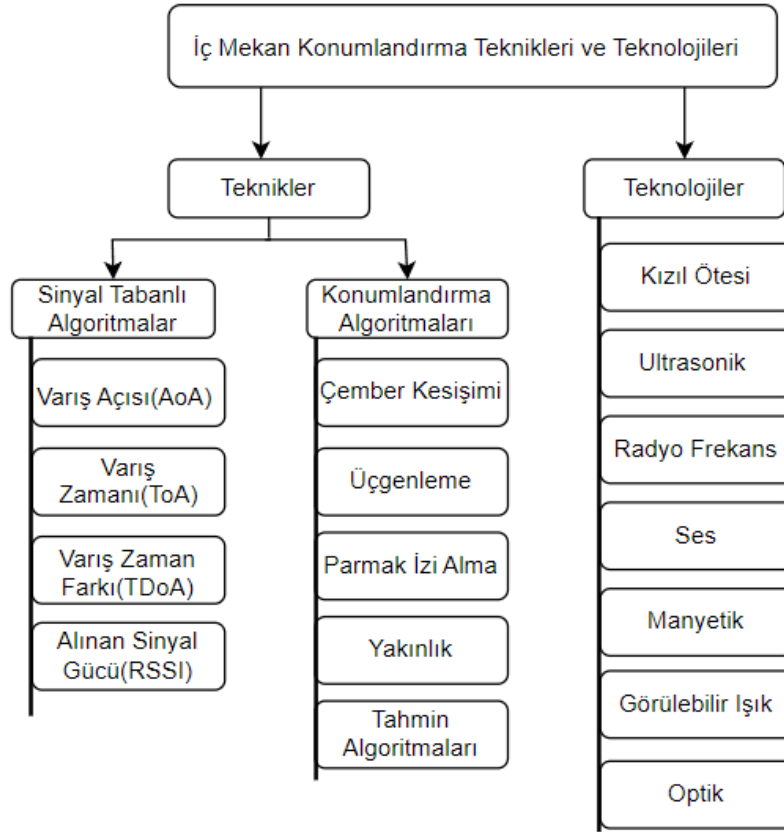
Bu tez, UWB ve IMU teknolojilerinin entegrasyonu ile elde edilen sensör füzyonunun, her iki teknolojinin bağımsız olarak taşıdığı sınırlılıkları nasıl giderdiğini kapsamlı bir

şekilde ele almıştır. Özellikle, UWB ve IMU'nun entegrasyonunda Genişletilmiş Kalman Filtre (EKF) ve Kokusuz Kalman Filtre (UKF) yaklaşımlarını kullanarak ayrıntılı bir değerlendirme yapılmıştır. IMU'dan gelen veri gürültüsünü azaltmak amacıyla alçak geçiren filtre teknolojisi kullanılmış ve bu filtrede işlenmiş veriler EKF ve UKF algoritmalarını beslemiştir. Tezin bir başka önemli yönü, sensör füzyonunun performansının değerlendirilmesi için Deney Tasarımı (DoE) metodolojilerinin, özellikle Taguchi ve Box-Behnken Tasarımı (BBD) teknikleriyle nasıl kullanıldığıdır. Değerlendirmeler tamamlandığında, en iyi konumlandırma sonuçları için hangi parametrelerin ideal olduğunu saptamak için doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.



2. İÇ MEKAN KONUMLANDIRMA

Günümüzde iç mekan konumlandırma sistemleri, insanlar, ekipmanlar ve diğer nesnelerin hassas bir şekilde konumlarını tespit ederek çeşitli alanlarda çözümler sunmaktadır. Depolardan hastanelere, alışveriş merkezlerinden fabrikalara kadar pek çok iç mekan ortamı, verimlilik ve güvenlik ihtiyaçları nedeniyle iç mekan konumlandırma sistemlerine olan talebi artırmıştır. Bu sistemler, iç mekanlarda doğru ve güvenilir bir şekilde konum belirlemenin önemli olduğu durumlarda kullanılır ve farklı teknolojilerden ve yöntemlerden yararlanır [3], [16].



Şekil 2.1 İç Mekan Konumlandırma Teknikleri ve Teknolojileri

İç mekan konumlandırma, ultrason, ışık veya radyo sinyalleri gibi çeşitli teknolojileri kullanarak çoklu laterasyon ve üçgenleme yöntemlerine dayanır ve hedef nesnenin konum bilgisini başarılı bir şekilde sağlar. Üçgenleme yöntemi, hedef konumunu tahmin etmek için üçgenlerin geometrik özelliklerini kullanır. İki farklı türde üçgenleme yöntemi bulunmaktadır: Laterasyon ve Açısal Üçgenleme. Laterasyon türevleri, nesnenin çoklu

referans noktalarından olan uzaklıklarını ölçerek konumunu tahmin eder [2], [3], [17], [18][19]. Mesafe ölçümü genellikle Varış Zamanı (TOF) veya Varış Zamanı Farkı (TDOA) ölçülerek hesaplanır. Bazı sistemlerde mesafe tahmini için Gidiş-Dönüş Uçuş Süresi (RTOF) yöntemi de kullanılabilir. Açısal Üçgenleme yöntemi ise nesnenin bir dizi referans noktasına göre hesaplanan açıları kullanarak konumunu belirler.

Ayrıca ataletsel navigasyon yöntemleri gibi görelî konumlandırma sağlayan diğer teknikler ve yöntemler de mevcuttur. Ancak bu yöntemler tek başına kullanıldığında zamanla hata biriktirme eğilimindedir ve düzenli olarak yeniden kalibrasyon gerektirebilir[2], [3], [17], [19], [20]

İç mekan konumlandırma sistemlerinde Wifi, Bluetooth, Ultra Geniş Bant (UWB), Uzun Süreli Gelişim (LTE)[3], [5], [7] gibi radyo tabanlı kablosuz iletişim teknolojileri kullanılabildiği gibi kamera ile görüntü işleme, Işın Algılama ve Mesafe Ölçümü (LİDAR) gibi bazı lazer teknolojileri de kullanılabilmektedir [2], [3].

Bluetooth, kablosuz kişisel alan ağı (WPAN) için tasarlanmış ve 2.4 GHz Sınai Bilimsel Tıbbi Cihaz (ISM) bandında çalışan bir teknolojidir. Maksimum 100 m civarında menzile sahip olsa da genellikle 10-15 m aralığında kullanılır. Düşük maliyetli ve düşük güç tüketimi gerektiren donanım profilleri sayesinde çoğu telefon, el bilgisayarı ve bilgisayara entegre edilebilir. Ancak iç mekan konumlandırmada doğruluk düşüktür ve 20 saniyelik gecikme süresi büyük bir dezavantajdır. Bu nedenle gerçek zamanlı takip çözümü olarak uygun değildir. Ancak son yıllarda Bluetooth düşük enerjili (BLE) işaretçileri sayesinde nesnelerin izlenmesi ve konumlandırılmasına yönelik ilgi artmıştır. BLE işaretçilerine dayalı konumlandırma yöntemleri parmak izine dayalı ve menzile dayalı olmak üzere iki türe ayrılır. BLE işaretçilerinin menzili yaklaşık 15 metreye kadar çıkabilir ve Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) sensörleri ile karşılaştırıldığında daha geniştir. Bu tür konumlandırmada Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (RSSI) kullanılarak mesafe tahmini yapılır ve üç noktadan kesme (trilaterasyon) yöntemiyle kullanıcının konumu belirlenir[2], [3], [17], [20], [21].

Wi-Fi, kablosuz iletişim için oldukça popüler bir teknolojidir ve 2.4 GHz ISM bandında çalışır. 50-100 metre aralığında bir menzile sahiptir ve IEEE 802.11 tabanlı standartlar dünyanın dört bir yanında kullanılan Wi-Fi cihazlarıyla gelir. İç mekan konumlandırmada mevcut Kablosuz Yerel Ağ (WLAN) altyapısı kullanılarak konumlandırma hizmeti

sunmak mümkündür. Wi-Fi tabanlı konumlandırma sistemleri, varlıkların Wi-Fi tabanlı radyo etiketleri veya akıllı cihazlarla donatılarak kullanılabilir. Wi-Fi tabanlı sistemlerin masrafları, iç mekanda konumlandırmak istenen varlık kategorisine bağlı olarak değişebilir ve doğruluk düzeyi birkaç metre civarında olabilir [2], [3], [17].

LiDAR teknolojisi, çevresel değişikliklere karşı oldukça dayanıklıdır ve bu özelliği sayesinde farklı ışık koşullarında ve dış etkenlere karşı kararlı sonuçlar üretebilir. Ayrıca uzun mesafeleri hassas bir şekilde ölçebilme yeteneği, özellikle otomasyonlu sürüş ve haritalama uygulamaları için hayati bir öneme sahiptir. LiDAR, lazer ışınlarını kullanarak çevredeki nesnelerin uzaklık, yükseklik ve konum bilgisini yüksek hassasiyetle toplar [2], [3].

LiDAR tabanlı bir konumlandırma sistemi, bir aracın veya nesnenin konumunu belirlemek için sensör ölçümlerini ve önceden oluşturulmuş harita bilgisini birleştirir. Bu tür bir konumlandırma özellikle odometri veya Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) sinyalinin zayıf veya kullanılamadığı iç mekan veya karmaşık ortamlarda kullanışlıdır. LiDAR'ın sensör ölçümleri, çevredeki nesnelerin uzaklıklarını hassas bir şekilde ölçer ve bu veriler harita bilgisi ile karşılaştırılarak nesnenin konumu tahmin edilir. Ancak LiDAR teknolojisinin bazı zorlukları vardır. Özellikle tekrarlanan desenlerin bulunduğu ortamlarda hassasiyet kaybına neden olabilir. Örneğin uzun ve düz bir tünel boyunca hareket eden bir araç, her yerde aynı görünüme sahip olduğu için LiDAR tabanlı konumlandırmada zorluklar yaşayabilir. Ayrıca LiDAR teknolojisi genellikle yüksek maliyetlidir ve taşınabilirlik açısından bazı sınırlamalara sahiptir. Öte yandan, kamera tabanlı konumlandırma teknolojisi daha düşük maliyetli bir alternatif ve geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Ancak düşük ışık koşulları ve karmaşık arka planlar gibi faktörler, kamera sistemlerinin performansını olumsuz etkileyebilir[2], [3], [7].

İç mekanlarda kişilerin ve nesnelerin konumlarını tahmin etmek, iç mekanın bazı dezavantajları nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadır. Özellikle duvarlar, mobilyalar, metaller gibi yüzeylerden gelen sinyallerin yansımaları nedeniyle şiddetli çoklu yol (multipath) etkisi ortaya çıkar. Ayrıca NLOS koşulları, yani doğrudan görüş hattının engellendiği durumlar da iç mekan konumlandırma için zorlayıcı etkiler yaratır. Geometrik nedenlerden dolayı da iç mekanda konum tahmini güçleşebilir[8], [19], [22], [23].

Şekil 2.1’de gösterilen iç mekan konumlandırma teknolojileri[24] tek başına kullanıldığında bazı eksiklikler barındırabilir. Örneğin radyo tabanlı teknolojiler, iç mekanlarda şiddetli çoklu yol etkisi ve NLOS koşullarından dolayı doğruluk ve kapsama alanı açısından zorlanabilirler [8], [9], [19], [25]. Diğer yandan kamera ile görüntü işleme veya LİDAR gibi optik teknolojiler, iç mekanlardaki engeller ve aydınlatma koşullarından etkilenebilir, bu da doğruluklarını etkileyebilir.

Tablo 2.1 İç Mekan Konumlandırma Teknolojileri Karşılaştırma

Teknoloji	Avantajları	Dezavantajları	Doğruluk	Enerji	Altyapı ve Maliyet	Kullanılan Yöntemler	Entegrasyon Kolaylığı
Wi-Fi	Genellikle mevcut. Yüksek kapsama.	Fiziksel engellere ve yansımalara duyarlı.	2-5 m	Orta	Düşük-Makul	RSSI	Yüksek
Bluetooth	Düşük enerji. Uygun maliyet.	Sınırlı kapsama. Yansımalarından etkilenir.	1-3 m	Düşük	Makul	RSSI	Yüksek
UWB	Yüksek doğruluk. Engellere az duyarlı.	Yüksek maliyet. Özel donanım.	<10 cm	Yüksek	Yüksek	ToF, TDoA	Orta
RFID	Pasif etiketler için enerji gerektirmez.	Kısa menzil. Doğrudan hat gerekliliği.	<1 m	Değişken	Makul Yüksek	TDoA	Orta
Ultrasonik	Yüksek doğruluk. Engellere az duyarlı.	Donanım ihtiyacı. Sınırlı kapsama.	<10 cm	Orta	Yüksek	ToF	Orta
ZigBee	Düşük enerji.	Sınırlı kapsama. Özel donanım.	1-3 m	Düşük	Makul	RSSI	Orta
Kamera	Zengin veri toplama.	Işık ve görüş açısına duyarlı.	Değişken	Yüksek	Yüksek	Görüntü İşleme	Orta
Manyetik	Cihaz tabanlı, özel donanıma gerek yok.	Kalibrasyon ve dış etkenlere duyarlı.	Değişken (mm-m)	Düşük	Düşük	RSSI	Orta
Ses	Düşük maliyet potansiyeli.	Gürültüye ve yakınlara duyarlı.	Değişken (cm)	Orta	Düşük Makul	ToA	Düşük

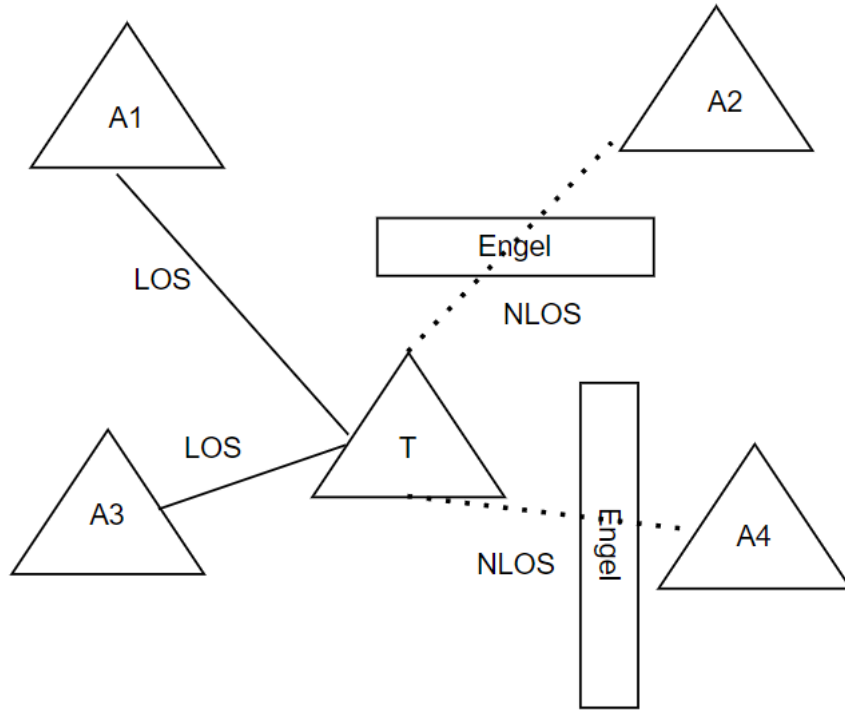
Yüksek doğruluk sağlayan sistemler genellikle daha kısa dalga boyu kullanan teknolojilerdir. Bu tür teknolojiler, kısa dalga boylarının daha hassas ve detaylı ölçümlere izin vermesi nedeniyle iç mekanda daha iyi performans gösterebilir [3], [8][24]. Tablo 2.1’ de iç mekan konumlandırma teknolojileri farklı açılardan kıyaslanmıştır.

2.1 İç Mekan Konumlandırma Zorlukları

İç mekanlar, duvarlar, ekipmanlar, mobilyalar ve hatta insanlar gibi çeşitli nesnelerle doludur. Bu nedenle iç mekan konumlandırma sistemleri, dış mekanlardan çok daha karmaşık ve zorluklarla dolu bir ortamda çalışmak zorundadır. İç mekanda bulunan nesneler, sinyalleri yansıtma ve çoklu yol ile gecikme gibi problemlere neden olur. Yani bir sinyal alıcıya birden fazla yoldan doğrudan ve bir veya daha fazla yansıma yoluyla ulaşabilir. Bu, alıcının sinyalin tam olarak nereden geldiğini belirlemesini zorlaştırır ve konum hatasına yol açabilir[2], [3], [17], [19], [24], [25].

İç mekan ortamları sinyal gücünün dalgalanmasına neden olan birçok parazit kaynağına ev sahipliği yapar. Mobil cihazlar, Zigbee cihazları, Bluetooth cihazları ve daha birçok cihaz, sinyal enterferansına neden olabilir. Bu parazitler sinyalin istikrarını etkileyebilir ve alıcının konum bilgisini doğru bir şekilde belirlemesini zorlaştırabilir[3], [17], [21], [24].

Dış mekanda sinyaller genellikle verici ile alıcı arasında doğrudan bir yol izler. Ancak iç mekanda, sinyaller genellikle verici ile alıcı arasında doğrudan bir yolu izleyemez. Bu, sinyalin NLOS yoluyla hareket ettiği anlamına gelir. Şekil 2.2’ de gösterilmiş olan T üçgeni konum takibi yapılacak nesneyi ifade eder. A1,..A4 üçgenleri T üçgeni ile ölçüm yapacak anchorları ifade eder. Görüldüğü gibi A2 ile T ve A4 ile T arasında bir engel olduğu için burada görüş alanı kaybolmaktadır. NLOS koşulları, konum belirleme hatasına neden olabilir, çünkü sinyalin alıcıya ulaşması için gereken zamanı doğru bir şekilde ölçmek zordur [22], [23], [26], [27].



Şekil 2.2 İç Mekan LOS/NLOS Şartları

Tablo 2.2 İç Mekan Konumlandırma Teknolojileri Zorlukları

Teknoloji	Zorluklar
Wi-Fi	NLOS: Duvarlar ve diğer engeller, Wi-Fi sinyallerinin doğrudan alıcıya ulaşmasını engeller. Çok Yolluluk: Wi-Fi sinyalleri engellerden yansıyarak farklı yollardan alıcıya ulaşabilir, bu da hatalı konumlandırmaya neden olabilir.
Bluetooth	NLOS: Fiziksel engeller Bluetooth sinyal yollarını keser. Çok Yolluluk: Bluetooth sinyalleri engellerden yansıyarak alıcıya farklı yollardan gelebilir.
Ultrasonik	NLOS: Fiziksel engeller ultrasonik dalgaların yollarını keser. Çok Yolluluk: Ultrasonik dalgalar yüzeylerden yansıyarak alıcıya farklı yollardan ulaşabilir, bu da zamanlamada ve konumlandırmada hatalara yol açabilir.
Kızıl Ötesi	NLOS: IR için doğrudan bir görüş hattı gereklidir, bu nedenle her türlü engel sinyali

(IR)	keser. Çok Yolluluk: IR sinyalleri yansıtıcı yüzeylerden alıcıya geri dönebilir.
ZigBee	NLOS: Duvarlar ve diğer engeller ZigBee sinyal yollarını keser. Çok Yolluluk: ZigBee sinyalleri engellerden yansıyarak alıcıya farklı yollardan gelebilir.
UWB	NLOS: UWB sinyalleri için engeller problem oluşturabilir. Çok Yolluluk: UWB'nin yüksek bant genişliği, çok yolluluğun etkilerini azaltabilir; fakat tamamen ortadan kaldırmaz. UWB sinyalleri engellerden yansıyarak alıcıya farklı yollardan ulaşabilir.
Manyetik	NLOS: Manyetik alanlar fiziksel engellerden genellikle etkilenmez. Çok Yolluluk: Manyetik konumlandırma genellikle çok yolluluğun etkilerinden muaf olabilir, fakat büyük metal nesneler manyetik alanları deforme edebilir.
Ses	NLOS: Ses dalgaları fiziksel engellerle bloke olabilir veya absorbe edilebilir. Çok Yolluluk: Ses dalgaları engellerden yansıyarak çok yolluluk problemlerine neden olabilir.
RFID	NLOS: RFID okuyucuları ve etiketleri arasındaki iletişim, fiziksel engeller tarafından engellenebilir. Çok Yolluluk: RFID sinyalleri, engellerden yansıyan sinyaller nedeniyle yanıltıcı okumalara neden olabilecek çok yolluluk problemleri yaşayabilir.
Ataletsel Navigasyon	Entegrasyon Hataları: Uzun süreler boyunca ivmeölçerden gelen verinin entegrasyonu, zamanla konum hatasının birikmesine neden olabilir. Jiroskop Hataları: Jiroskopların ölçtüğü açısal hızda küçük hatalar, zamanla büyük oryantasyon hatalarına yol açabilir. Sensör Gürültüsü: Düşük kaliteli veya ucuz sensörler yüksek gürültüye sahip olabilir, bu da doğrulukta düşüşlere neden olur. Manyetik Girişim: Manyetometrelerin doğru çalışması için manyetik alanın homojen olması gerekir. İç mekanlarda bulunan elektronik cihazlar veya yapı malzemeleri manyetik alanın değişken olmasına neden olabilir, bu da hatalı okumalara yol açabilir. Dinamik Hareket: Ani hareketler, ataletsel sensörlerin ölçümlerini zorlaştırabilir ve hatalı verilere neden olabilir.

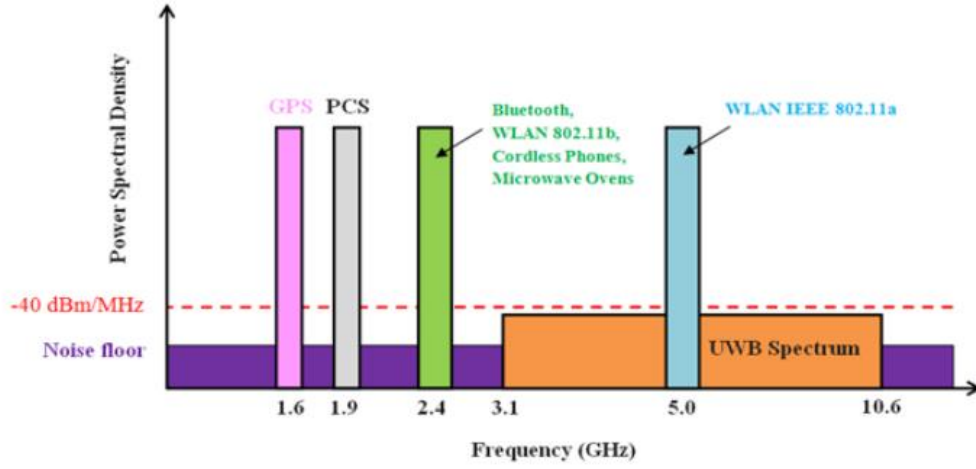
2.2 Ultra Geniş Bant Teknolojisi

Ultra Geniş Bant (Ultra-Wideband- UWB), başlangıçta sadece radar, algılama ve askeri iletişim gibi özel alanlarda kullanılan UWB, 2002 yılında Federal İletişim Kurulu (FCC) tarafından alınan kararla veri iletişimi, radar ve güvenlik uygulamaları için kullanılabilir hale getirilmiştir[2], [3], [8]. Bu karar, UWB'nin kullanım alanını genişleterek teknolojiye önemli bir kilometre taşı olmuştur.

UWB'nin en dikkat çekici özelliği muazzam bant genişliğidir, bu da potansiyel olarak Gbps düzeyinde veri hızları sunma kapasitesi sağlar. Bu geniş bant, iç mekanlarda ve kısa mesafelerde yüksek veri hızlarına veya uzun bağlantı mesafelerinde düşük veri hızlarına ulaşmayı mümkün kılar. Bu nedenle kablosuz UWB ve kişisel alan ağları gibi uygulamalarda tercih edilen bir iletişim teknolojisi haline gelmiştir [2], [3], [8], [18].

UWB'nin bant genişliği avantajı güvenilir kablosuz iletişimi artırmaktadır. Özellikle hassas veri iletimi, konum tespiti ve düşük gecikme süresi gerektiren bu tür uygulamalarda UWB büyük bir potansiyele sahiptir. Ultra Geniş Bant, çok kısa zaman aralıklı darbelerin kullanıldığı bir iletişim teknolojisidir ve bant genişliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu kısa darbelerin varış zamanı belirsizliği düşük olduğunda darbenin kaynağından gittiği mesafe doğru bir şekilde tahmin edilebilir. Birden çok alıcı kullanılarak tahmin edilen mesafelerin birleştirilmesiyle kaynağın konumu basit çember kesiştirme teknikleri ile tahmin edilebilir. Bu nedenle, UWB sistemleri ile iletişim ve konumlama birlikte kullanılabilir [18], [25].

Federal İletişim Kurulu tarafından 2002 yılında atanmış olan 3.1-10.6 GHz spektrumu, UWB teknolojilerine olan ilgiyi artırmıştır. FCC'ye göre, UWB sinyali, bant genişliği $B \geq 500$ MHz veya kesirli bant genişliği $B_f \geq 20\%$ olan herhangi bir sinyal olarak tanımlanır [8], [18]. Darbe tabanlı UWB sistemleri (IR-UWB), çok kısa süreli (<1 ns) darbelerin kullanıldığı sistemlerdir[8]. Bu darbeler, Fourier dönüşümü teorik olarak sonsuz bant genişliğine sahiptir, bu nedenle ultra geniş bant genişliğini işgal ederler[8].



Şekil 2.3 İç Mekan Konumlandırma Teknolojileri Frekans Aralıkları[9]

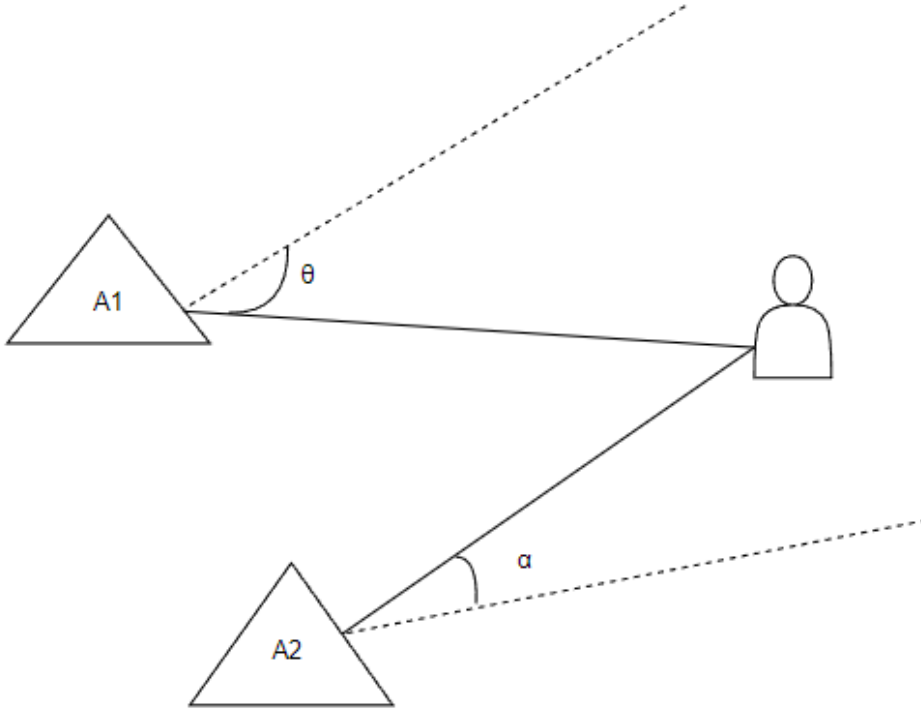
UWB sistemlerinin potansiyel bant genişliği 7.5 GHz ise bir darbenin maksimum zaman çözünürlüğü yaklaşık 133 pikosaniye düzeyinde olabilir. Bu, darbenin varış zamanının 133 pikosaniyeden daha az bir belirsizlikle bilinebileceği anlamına gelir ve bu zaman belirsizliği 4 cm'lik uzaysal belirsizliğe karşılık gelir. Eğer bant genişliği daha ılımlı, yani 500 MHz ise ilgili zaman çözünürlüğü 2 nanosaniye olur ve bu da yaklaşık 60 cm'lik uzaysal belirsizliğe denk gelir[8], [19], [25]Bu, UWB sinyalleri ile metre altı doğruluğunda konumlandırma yapmanın teorik olarak mümkün olduğu anlamına gelir.

Ultra Geniş Bant teknolojisi kullanılarak yapılan iç mekan konum tahmini, sabit bir noktada bulunan ve "Anchor" olarak adlandırılan konumu bilinen cihaz ile hareketli bir cihaz olan "Tag" arasındaki iletişime dayanır. Konum tespiti için Varış Zamanı (ToA), Uçuş süresi (ToF), Varış Zaman Farkı (TDOA), Varış açısı (AoA) ve Alınan Sinyal gücü (RSSI) gibi konumlandırma teknolojileri kullanılarak çözümlenebilir [8], [16], [18], [19], [25], [28].

2.2.1 Varış Açısı

Varış Açısı (Angle of Arrival - AoA) teknolojisi, iç mekan konumlandırma sistemlerinde önemli bir yöntem olarak kullanılır. Varış açısı, hareketli bir cihazın konumunu belirlemek için o cihazın bulunduğu yönleri tahmin eder. Bu yöntem hareketli cihazın konumunu tespit etmek için kullanılacak hedef cihaz ile referans cihazları arasındaki açılara dayanır [2], [3], [17], [19], [20].

Varış Açısı ile açı ölçümü yapılırken, konumları bilinen referans düğümler, anten dizileri ile donatılır ve hedef cihaz tarafından gönderilen sinyalin bu referans düğümlerine varış süreleri arasındaki farklar, bilinen anten dizisi geometrisi kullanılarak açı bilgisine dönüştürülür. Her referans düğümünden çıkan açı çizgileri, hedef nesnesin konumunun kesiştiği bir nokta oluşturur ve bu şekilde konum tahmin edilir [2], [3], [17], [20], [25].



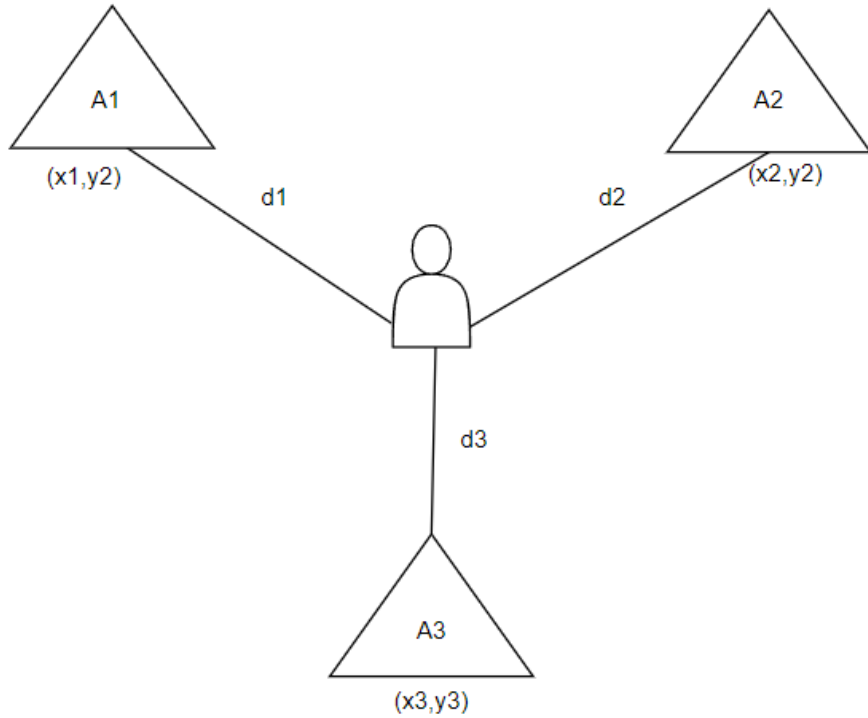
Şekil 2.4 Varış Açısı Tekniği

Varış Açısı tabanlı yöntem, konum tahminini gerçekleştirebilmek için birden fazla referans düğümünün kullanılmasını gerektirir. UWB teknolojisi ile iç mekan konum tahmini için AoA yöntemi yaygın değildir. Bunun nedeni UWB vericilerinin düşük maliyetli donanım profiliyle cazip olmasına rağmen AoA için anten dizisi kullanımının maliyeti artırmasıdır [17], [19]. Ayrıca UWB sinyallerinin geniş bant genişliğine sahip olması kapalı ortamlarda saçılma etkilerine yol açarak doğru açı tahminini zorlaştırabilir. Bu yöntem, alınan sinyalin yayılma yönü ile iki veya daha fazla önceden belirlenmiş referans arasındaki açıları belirlemeye dayanır. Bir mobil cihazın konumunu tahmin etmek için en az iki farklı referans noktasından iki AoA ölçümü gereklidir.

Doğruluğu artırmak için konum tahmini için üç veya daha fazla referans noktası kullanılır. Bu ölçüm yönlü antenler veya anten dizileri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Konum tahmini birden fazla anten üzerinde taşıyıcı fazı veya sinyal şiddetini karşılaştırarak yapılır. AoA yöntemi, düğümler arasında zaman senkronizasyonu gerektirmez. Ancak bu teknik, mesafe arttıkça doğruluk azaldığı için bazı sınırlamalara sahiptir. Çoklu yol yayılımı ve NLOS olgusu bu yöntemi etkileyebilir[3], [9], [17], [20], [21].

2.2.2 Varış Zamanı

Varış Zamanı (Time of Arrival - ToA), konum tahmini için temel bir mesafe ölçüm yöntemidir. Bu yöntem, bir vericiden gönderilen sinyalin alıcıya olan ulaşma süresini ölçerek hedefin konumunu tespit etmeyi amaçlar. ToA, farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılan etkili bir yöntemdir ve GPS gibi birçok sistemde önemli bir rol oynar [2], [3].



Şekil 2.5 Varış Zamanı Tekniği

ToA yönteminde verici (tag), bir sinyal gönderir ve alıcı (anchor), bu sinyali alır. ToA, sinyalin vericiden alıcıya olan yolculuk süresini ölçer. Sinyalin hızı, genellikle elektromanyetik dalgaların hızı olan ışık hızı (c) olarak kabul edilir. ToA ile mesafe hesaplamak için sadece sinyalin gönderildiği ve alındığı zamanları bilmek yeterlidir. Denklem 2.1’de gösterildiği gibi sinyalin alındığı ve gönderildiği zaman farkı ile ışık hızının çarpımı sonucunda mesafe elde edilmektedir [2], [3], [17], [19], [20], [25][29]

$$d = c * (t_{arrival} - t_{sent}) \quad (2.1)$$

ToA yöntemi, birçok avantaja sahiptir. Örneğin sinyal hızının bilinmesi nedeniyle mesafe doğrudan hesaplanabilir. Ayrıca alıcılar arasında senkronizasyona ihtiyaç duyulmaz, çünkü sadece sinyalin varış zamanları önemlidir. Bu nedenle ToA yöntemi, diğer bazı yöntemlere kıyasla uygulama açısından daha basit ve uygun maliyetlidir[3], [17], [19], [21][30].

ToA, özellikle acil durum ve askeri uygulamalarda önemli bir rol oynar [8], [17], [21]. Hedefin konumunun doğru ve hızlı bir şekilde belirlenmesi, acil durumlarda yaşamsal öneme sahiptir. Aynı zamanda askeri operasyonlarda hedefin hassas bir şekilde tespit edilmesi ve izlenmesi gereklidir. ToA, bu tür uygulamalarda yüksek doğruluk ve güvenilir sonuçlar sağlar [8], [17], [19], [21][30].

ToA yöntemi kullanırken dikkat edilmesi gereken bazı faktörler vardır. Sinyalin yayılma hızı, çevresel koşullara bağlı olarak değişebilir, bu nedenle doğru bir hız değeri seçmek önemlidir. Ayrıca çoklu yol etkileri ve yansımalar gibi sinyal bozulmaları dikkate alınmalıdır. Bu faktörler konum tahmininin doğruluğunu etkileyebilir ve hassas sonuçlar elde etmek için doğru önlemlerin alınmasını gerektirir[3], [8], [16], [25].

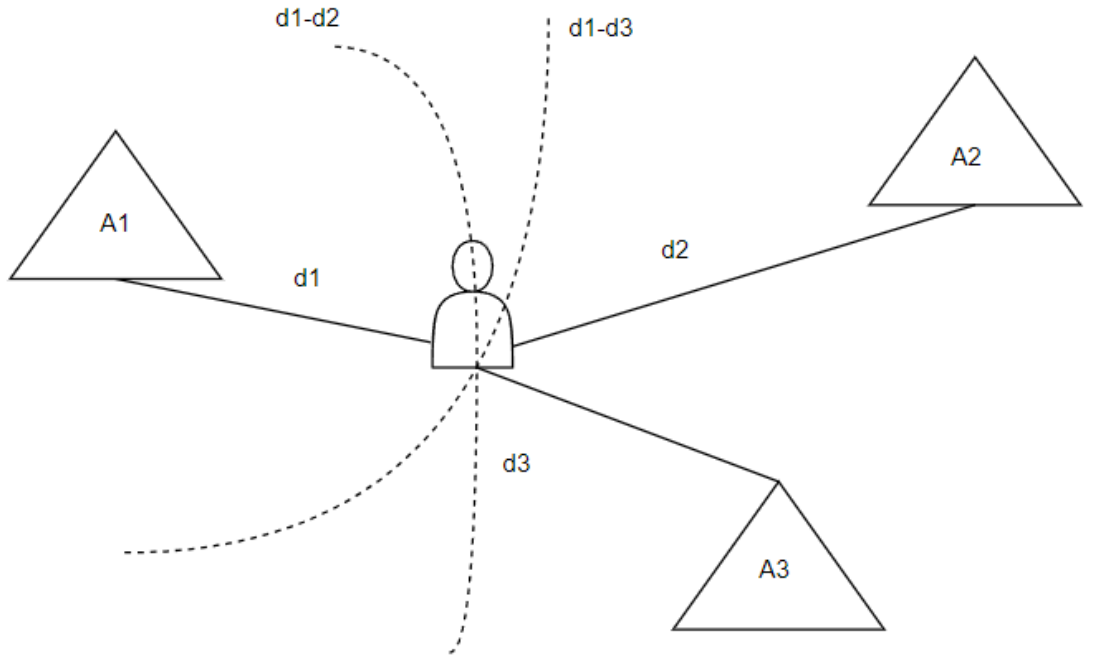
2.2.3 Varış Zaman Farkı

Varış Zaman Farkı (TDoA), konum belirleme amacıyla kullanılan bir başka tekniktir ve bilinen konumları olan sensör düğümlerini kullanarak hedeflerin tespit edilmesini sağlar. Bu yöntem, mesafe ölçümünde ikinci en yaygın kullanılan teknik olarak öne çıkar ve ToA yönteminden daha esnek bir yapı sunar [17], [30]. TDoA, sadece sinyalin alındığı zamanı ve hareket ettiği hızı kullanarak hedeflerin konumunu belirleyebilir ve sinyalin hedeften gönderildiği zamanı bilmeye ihtiyaç duymaz [2], [3], [20], [21]. Denklem 2.2’de gösterildiği gibi c ışık hızı ile Δt , her referans noktasındaki varış zaman farkının çarpımı

ile mesafe ölçümü yapılır.

$$\Delta d = c * \Delta t \quad (2.2)$$

TDoA, düşük güç seviyelerine sahip sinyaller dahil olmak üzere diğer konumlandırma yöntemlerine kıyasla yüksek doğrulukta sonuçlar sunar. Bu özelliği sayesinde gürültü seviyesinin altındaki sinyallerle bile başarılı bir şekilde hedeflerin konumunu tespit edebilir[8], [17], [19]–[21], [28], [29].



Şekil 2.6 Varış Zaman Farkı Tekniği

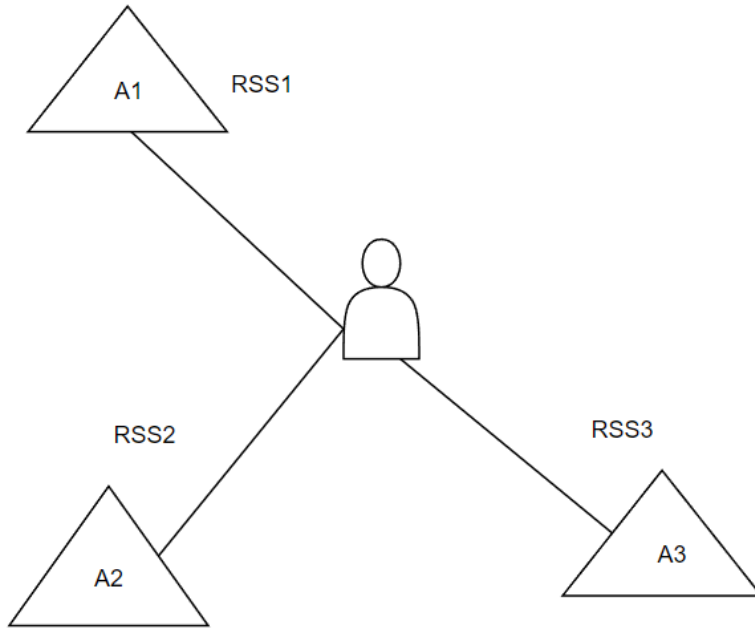
Ancak yüksek doğruluklu TDoA elde etmek için alıcılar arasında hassas senkronizasyon gereklidir [17], [19], [21]. Referans düğümlerin tam olarak senkronize olması önemlidir ve bu senkronizasyon işaretlerinin kullanılmasını gerektirir. Senkronizasyon sağlanmadığında elde edilen sonuçların doğruluğu düşebilir [2], [3], [16], [17], [20].

TDoA, güvenilir ve etkili bir hedef konumlandırma yöntemi olarak kabul edilir ve birçok alanda kullanılır. Özellikle askeri, acil durum ve güvenlik uygulamalarında, TDoA'nın yüksek doğruluğu ve hassasiyeti, kritik önem taşıyan hedeflerin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlar. TDoA'nın esnek yapısı ve düşük güç seviyeleriyle çalışabilme kabiliyeti, çeşitli uygulama alanlarında kullanılmasına olanak tanır. Ancak senkronizasyonun doğru sağlanması, yöntemin güvenilirliği ve hassasiyeti açısından

kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, TDoA'nın uygulanacağı sistemlerde senkronizasyon süreçleri dikkatle planlanmalı ve yönetilmelidir [17], [19]–[21], [24], [29].

2.2.4 Alınan Sinyal Gücü

Alınan Sinyal Gücü (Received Signal Strength Indicator (RSSI)), alınan bir radyo sinyalinin gücünün ölçüldüğü değerdir ve çoğu kablosuz iletişim yönteminde kullanılır[29]. RSSI, özellikle kablosuz sensör ağları gibi uygulamalarda referans düğümlerindeki alınan güç durumunu göstermek için yaygın olarak kullanılır[3], [25], [28], [29]. RSSI tabanlı konumlandırma, basitliği sayesinde tercih edilen bir yöntemdir [2], [3], [17], [20], [21], [24].



Şekil 2.7 Alınan Sinyal Gücü Tekniği

RSSI tabanlı konumlandırmada, RSSI verileri kullanılarak sensör ve hedef arasındaki mesafe bilgisi elde edilir. Ancak sensör sayısı yetersiz olduğunda veya birden çok hedefin aynı anda aktif olduğu çoklu hedef konumlandırma ortamlarında geleneksel RSSI tabanlı yaklaşım doğru sonuçlar elde etmekte zorlanabilir[2], [3], [21], [29]. Bu durumda sinyalin zayıflaması, gölgeleme ve yansımalar gibi etkiler doğruluk üzerinde olumsuz etkiler yapabilir. Dolayısıyla çeşitli hedefler için etkili RSSI tabanlı konumlandırma teknikleri

geliştirmek önemli bir hale gelmiştir[17], [20], [21], [28], [29].

RSSI tabanlı konumlandırma yöntemi, üç temel süreçten oluşur. İlk olarak, sensörlerden RSSI değerleri toplanır ve ölçülür. Ardından bu değerler kullanılarak sensör ve hedef arasındaki mesafe hesaplanır. Mesafe tahminleri, konum tahmini için temel verileri sağlar. Denklem 2.3' te $P_r(d_0)$ başlangıç değerini ifade etmektedir, d_0 , bir metrelik mesafeden alınan gücü ifade etmektedir. d_i , verici ve alıcı arasındaki mesafeyi ve T, alıcı ve verici arasındaki duvar sayısını ifade etmektedir. WAF, duvar zayıflatma faktörünü ve n, yol kaybını ifade etmektedir[2], [3], [17], [29].

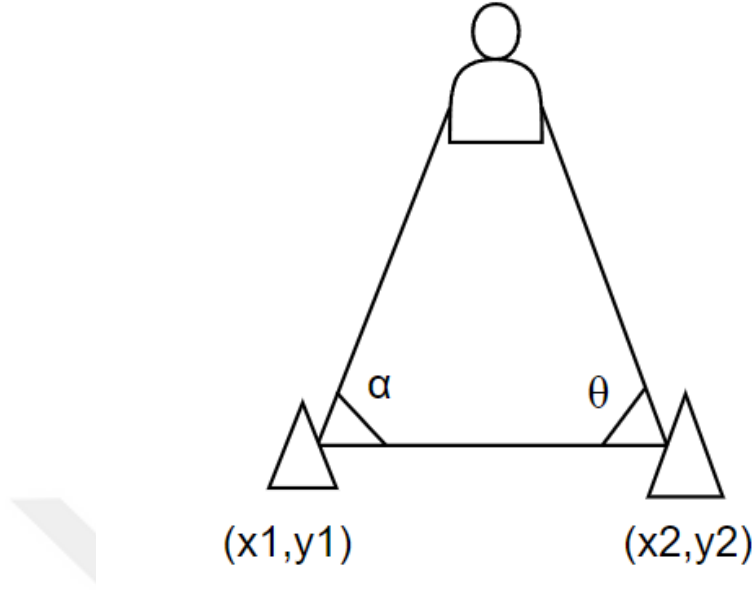
$$P_r(d_i) = P_r(d_0) - 10n \log(d_i / d_0) + (-T) * WAF \text{ (dbm)} \quad (2.3)$$

$$d = e^{(P_r(d_0) - P_r(d_i) - T * WAF) / 10} \quad (2.4)$$

2.2.5 Üçgenleme

Üçgenleme, referans noktası ile konum tahmini yapılacak hedef nokta arasındaki mesafe ve açı bilgisini kullanarak konum tahmini yapılan bir yöntemdir [2], [3], [18], [21], [28]. Üçgenleme yöntemi ile konum tahmini yaparken konumu tahmin edilecek hedef düğüm iki referans düğümüne olan açıyı AoA yöntemi ile ölçülebilir [8], [17], [21], [28], [30] .

Şekil 2.8'de gösterildiği gibi üçgenleme yönteminde açı bilgisi önemlidir. Alfa ve teta açıları, referans düğümlerinin önceden belirlenmiş koordinatları temel alınarak hedef düğümün fiziksel konumunu hesaplamak için kullanılır.



Şekil 2.8 Üçgenleme Tekniği

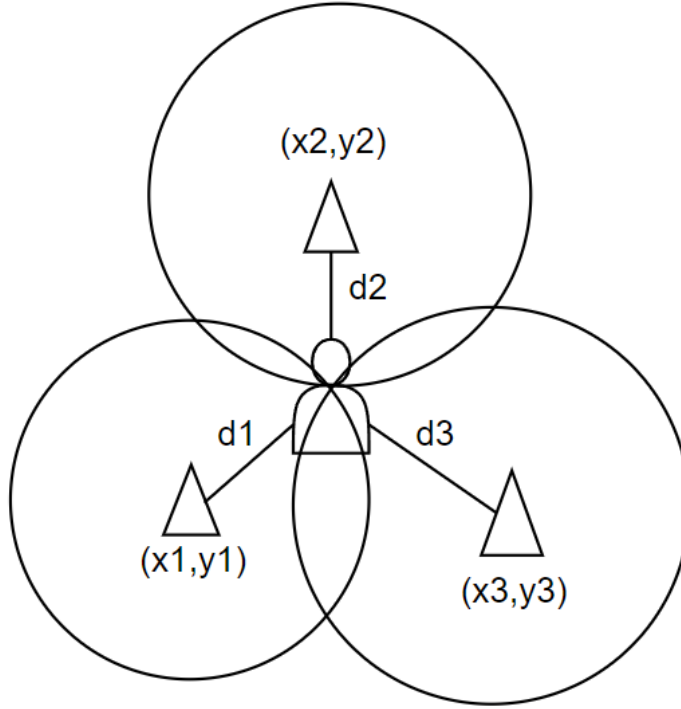
Üçgenleme yöntemi, konum tespiti için iki veya üç referans noktasının kullanıldığı için düşük maliyetli bir yöntem olarak kabul edilir [2], [3], [30]. Ancak konum tahmini yapılacak alanın büyüklüğüne göre çok sayıda referans noktasına ihtiyaç duyulacağından bu durum konum bilgisinde belirsizliğe neden olabilir. Bunun yanı sıra büyük hacimli alanlarda bu yöntemin alt donanımını kurmak karmaşık ve maliyetli olabilir.

2.2.6 Çember Kesişimi

Çember Kesimi Tekniği, bir nesnenin konumunu belirlemek için kullanılan temel konum belirleme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem üç veya daha fazla referans düğümünün bilinen konumlarından eş zamanlı mesafe ölçümleri kullanarak nesnenin konumunu hesaplar [2], [3], [28]. Özellikle GPS teknolojisinde yaygın olarak kullanılan çember kesimi, doğru konum belirleme için önemli bir araçtır[2], [3].

Çember kesişim yöntemi, en az üç referans düğümünden eş zamanlı mesafe ölçümleri kullanır. Referans düğümleri, bilinen konumlarına dayanarak sinyallerin hedef nesneye olan ulaşma sürelerini ölçer. Bu mesafe bilgileri ile matematiksel formüller kullanılarak hedef nesnenin konumu hesaplanır. İki boyutlu bir uzayda çember kesişim yöntemi ile konum tahmini yaparken minimum üç referans noktası kullanılması gerekirken üç

boyutlu bir uzayda minimum dört referans noktası gerekmektedir [2], [3], [17], [19], [25], [29].



Şekil 2.9 Çember Kesişim Tekniği

$$d1^2 = (x - x1)^2 + (y - y1)^2 \quad (2.5)$$

$$d2^2 = (x - x2)^2 + (y - y2)^2 \quad (2.6)$$

$$d3^2 = (x - x3)^2 + (y - y3)^2 \quad (2.7)$$

2.3 Ataletsel Navigasyon

Ataletsel ölçüm birimleri tarafından elde edilen ölçümler ile yapılan konumlandırmaya ataletsel navigasyon denir[13], [15], [31]. Ataletsel navigasyonun temel prensipleri Newton'un hareket yasalarına dayanır. Newton'un birinci hareket yasası, bir cismin üzerine etki eden kuvvetlerle zorlanmadıkça durma halinde veya düz bir çizgide sabit hareketine devam edeceğini ifade eder. Bu nedenle, bir cismin konumunu, hızını ve yönelimini belirlemek için ona etki eden kuvvetleri ve açısal hızları ölçmek yeterlidir [13]–[15], [17], [21], [31].

Ataletsel navigasyon sistemlerinde, temel bir fiziksel büyüklük olan ivme, büyük önem taşır [13], [31]. Bu durumun temel nedeni hız ve konum bilgilerinin, ivme bilgisinden türetilmesidir. İvme, bir cismin hızının zamanla değişim hızını ifade eder ve bu nedenle hareketli bir cismin konumunu ve hızını belirlemek için kritik bir rol oynar [3], [13]–[15], [31].

Ataletsel navigasyon sistemleri, genellikle içerisinde bulundukları cismin hareketini ve yönelimini doğrudan ölçme yeteneğine sahiptir. Bu sistemler, ivmeölçerler ve jiroskoplar gibi çeşitli sensörleri kullanarak cismin ivmesini hassas bir şekilde tespit eder. Bu bilgi daha sonra integral ve türevleme yöntemleriyle hız ve konum bilgilerine dönüştürülür [3], [7], [13], [14].

İvmenin türetilmesi Denklem 2.9'da gösterilmektedir. Burada $\frac{dv}{dt}$, hızın zamanla değişimidir. $\frac{dx}{dt}$, yer değiştirmenin zamanla değişimidir.

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.8)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.9)$$

Benzer şekilde, ivmenin integrasyonu ile hız ve konumun elde edilmesi Denklem 2.11'de gösterilmiştir.

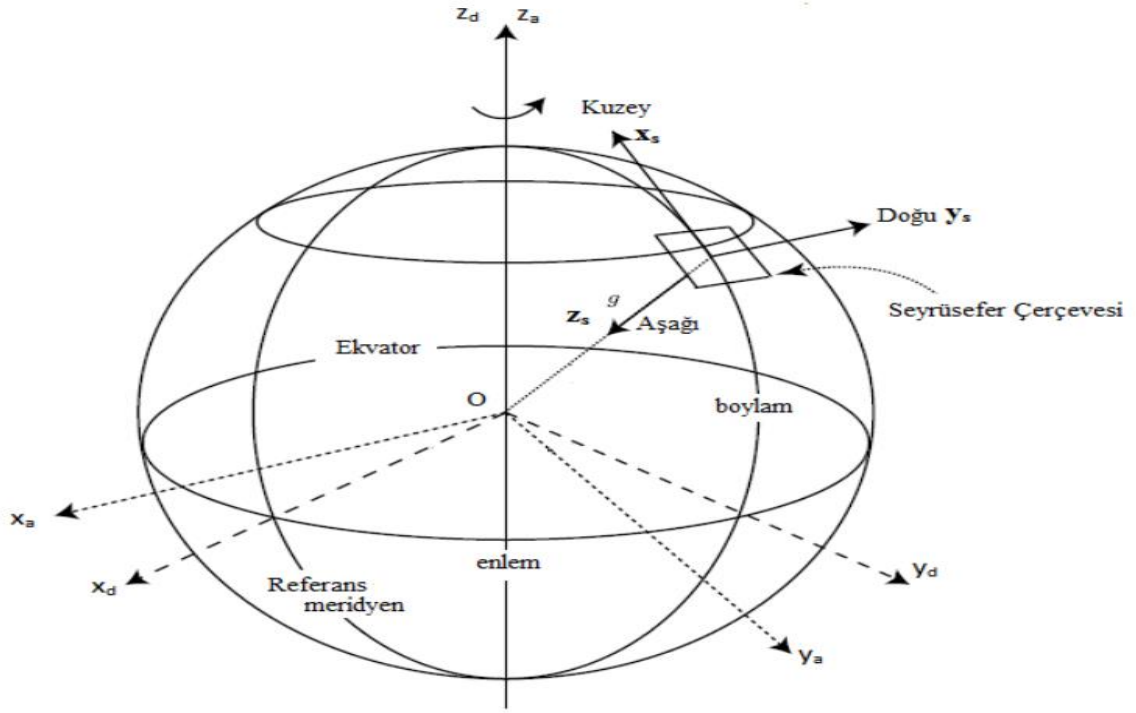
$$v = \int a dt \quad (2.10)$$

$$x = \int v dt = \iint a dt dt \quad (2.11)$$

Ataletsel navigasyon, ivmeölçer, jiroskop, manyetometre sensörlerini içeren bir birim aracılığıyla sensör verilerini kullanarak gerçekleştirilir. Bu birime ataletsel ölçü birimleri (IMU) adı verilir [13]. Geleneksel bir IMU’da üç eksen jiroskop ve üç eksen ivmeölçer kullanılır. İvmeölçer, karşılıklı üç yönde doğrusal hareketi ölçerken jiroskop karşılıklı üç yönde açısal hareketi ölçmektedir. Sensör eksenleri, IMU’nun gövdesine sabitlendiğinden bu eksenlere gövde çerçevesi ismi verilir [13]–[15].

Ataletsel navigasyon yaparken, seçilmiş bazı kartezyen koordinat referans çerçevelerine göre dönüşüm yapmak gerekmektedir. Şekil 2.10 Dünya üzerindeki seyrüsefer çerçeveleri göstermektedir [12]–[14], [32]. Burada;

- **Atalet Çerçevesi:** Orijini Dünya’nın merkezidir. Şekil 2.10’da kısa kesikli çizgi ile gösterilen eksen takımudur. Eksenleri dönüş yapmaz ve sabit yıldızlara göre ayarlanmıştır. Z eksenini dünyanın kuzey kutbundan geçmektedir [13], [14], [32].
- **Dünya Çerçevesi:** Dünya ile dönen ve orijini Dünya’nın merkezi olan eksen takımudur [13], [14], [32].
- **Seyrüsefer Çerçevesi:** Eksen olarak kuzey ve doğu yönlerini kullanır. Eksenleri, IMU cihazının yerel olarak merkezinden Kuzeye, Doğuya ve Dünya’nın merkezine doğrudur [12]–[14], [32].
- **Gövde Çerçevesi:** IMU sensörü üzerine dikey, yatay ve düşey eksenlere göre ayarlanmış eksen takımudur [13], [14], [32]



Şekil 2.10 Dünya Üzerindeki Seyrüsefer Çerçeveleri[32]

İvmeölçerler, tipik olarak bir denge kütlesinin kutuya bağlı olduğu ve bir çift yay tarafından tutulduğu yapıya sahiptir. İvme, denge kütlesini denge pozisyonundan uzaklaştırır ve bu uzaklaşma miktarı, cismin ivmesiyle doğru orantılıdır. İvmeölçerin çıktısı özgül kuvvet olarak adlandırılır ve cismin ivmesini ve yerçekimi ivmesini içerir [12]–[15]. Denklem 2.12’de gösterildiği gibi f özgül kuvveti, a ataletsel referans çerçevesine göre ivmeyi ve g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

$$f = a - g \quad (2.12)$$

Ancak ivmeölçerlerin bir özelliği nedeniyle bazen anlaşılması zor olabilir. Eğer ivmeölçer yerçekimi alanında dikey olarak bir tezgâh üzerine yerleştirilirse yerçekimi ivmesi nedeniyle denge kütlesi kutuya göre aşağıya doğru yer değiştirir ve pozitif ivmeyi gösterir. Bu durumda ivmeölçerin çıktısı yerçekimi ivmesinin negatifini içerir. Bu nedenle, ivmeölçerlerin kullanımı sırasında doğru anlamayı sağlamak için dikkatli olunmalı ve özgül kuvvet kavramının yerçekimi bileşeniyle ilişkisinin farkında olunmalıdır[3], [12]–[15].

Jiroskop, bir cismin navigasyon çerçevesine göre açısal hızını, navigasyon çerçevesinin Dünya sabit çerçevesine göre dönüşünü ve Dünya’nın eksen etrafındaki dönüşünü ölçerek

çalışır. Bu ölçümler, IMU'nun gövde çerçevesinde gerçekleşir. Denklem 2.13'te w_{bi} , ataletsel çerçeveye göre gövdenin dönme hızını, w_{ie} , ataletsel çerçeveye göre Dünya'nın dönme hızını, w_{en} , navigasyon çerçevesinin Dünya çerçevesine göre dönme hızını ve w_{nb} , navigasyon çerçevesine göre gövdenin dönme hızını ifade etmektedir [3], [12]–[15], [31], [32].

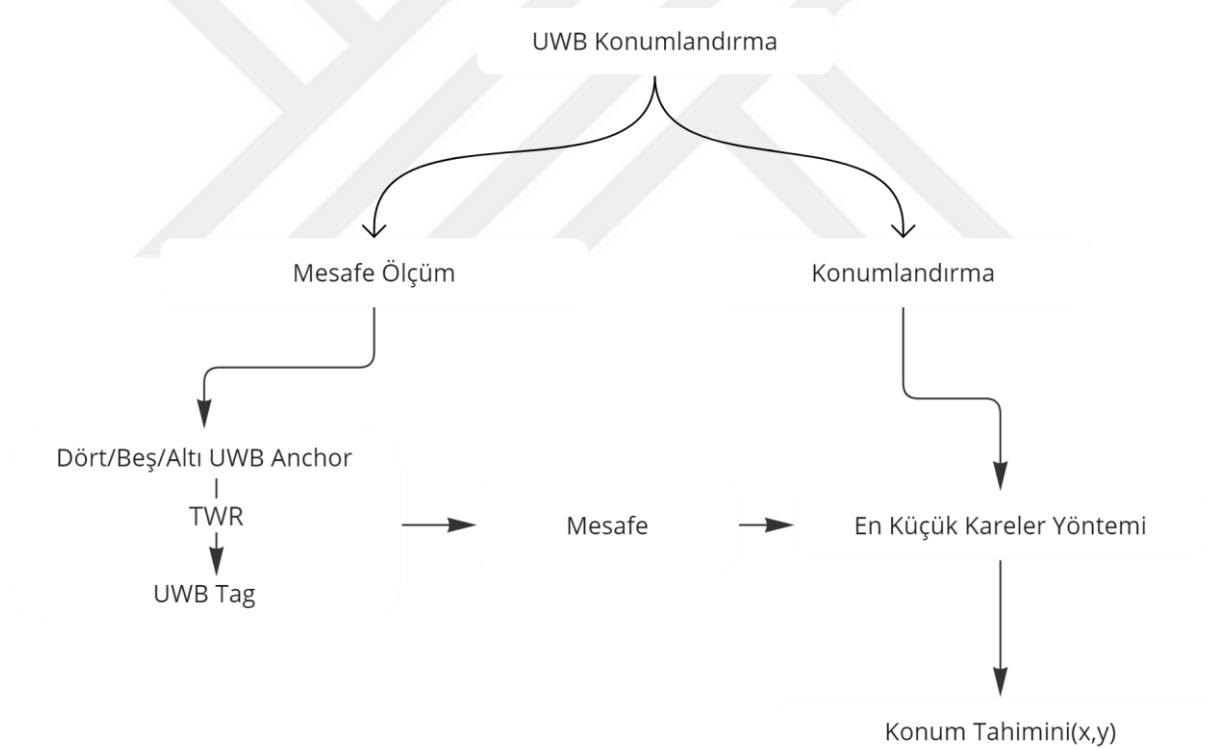
$$w_{bi} = w_{ie} + w_{en} + w_{nb} \quad (2.13)$$



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Ultra Geniş Bant Teknolojisi ile İç Mekan Konumlandırma

UWB ile konumlandırmada, Ultra Geniş Bant sensörleri kullanılarak Uçuş Zaman Farkı (ToF) tabanlı İki Yönlü Haberleşme (TWR) yöntemi ile mesafe ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu mesafe verileri, UWB konumlandırma için kullanılan çember kesişimi yöntemi ya da en küçük kareler yöntemi ile konum tahminlemesi yapmak üzere kullanılmıştır. Çember kesişimi yöntemi, konum tahminini gerçekleştirmek için en az üç anchor ve bir tag ile ölçülen mesafelerinin kesişimini kullanır [18]. Ancak gerçek dünya uygulamalarında mesafe ölçümleri hatalar içerebilir ve bu da kesişme noktalarının doğru bir şekilde belirlenmesini zorlaştırır [33][34] Bu nedenle en küçük kareler yöntemi kullanılarak hatalar minimize edilmiştir.

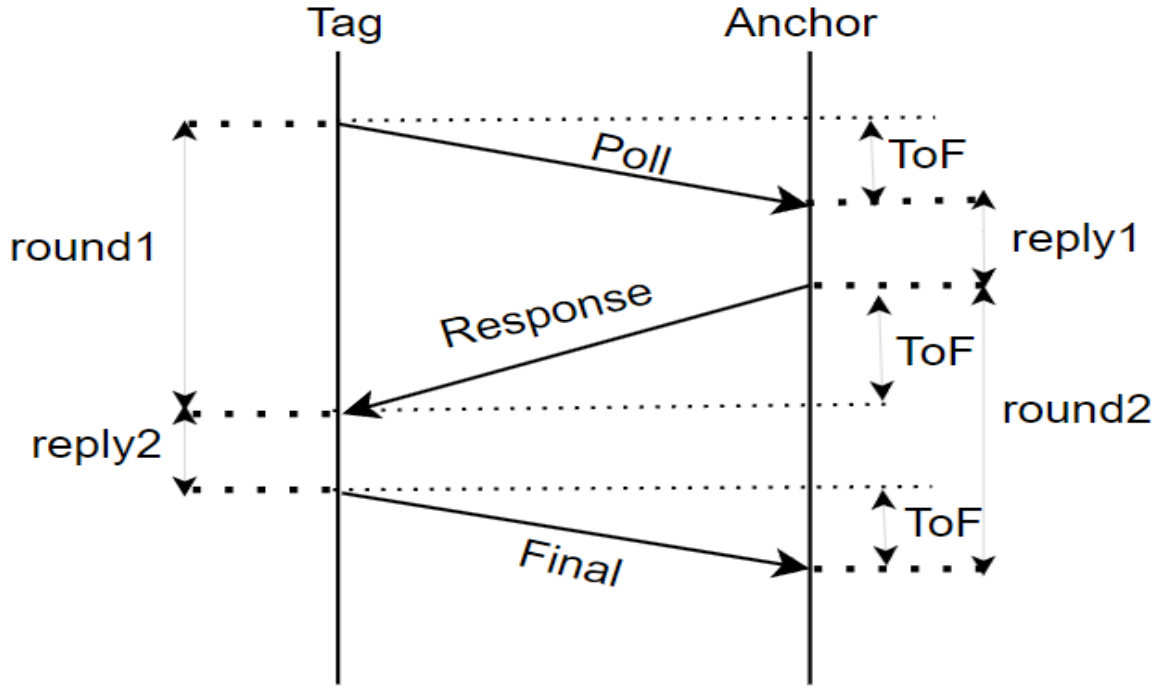


Şekil 3.1 UWB ile Konumlandırma Akış Şeması

3.1.1 İki Yönlü Haberleşme ile Mesafe Ölçümü

İki Yönlü Haberleşme (TWR), iki kablosuz verici arasındaki mesafeyi ölçmek için kullanılan bir yöntemdir [8], [35], [36] Bu yöntem, vericiler arasında gerçekleştirilen uçuş zaman farkı (ToF) ölçümüyle mesafeyi hesaplar. ToF, optik ve akustik sinyallerin bir nesneden yansıyıp geri dönme süresini kullanarak mesafe ve derinlik bilgisinin elde edildiği bir tekniktir [3], [7], [8]. TWR ile mesafe ölçümü, genellikle kablosuz iletişim sistemlerinde konum belirleme, konum tabanlı hizmetler ve sensör ağları gibi uygulamalarda kullanılır. TWR, iki yönlü haberleşme protokolüdür [20], [35] İlk adımda bir verici (genellikle bir cihaz veya sensör) bir sinyal gönderir ve alıcı (genellikle bir başka cihaz veya sensör) bu sinyali alır. İkinci adımda alıcı, aldığı sinyali geri gönderir ve verici bu sinyali alır. TOF, gönderilen sinyalin verici ve alıcı arasında geçen süreyi temsil eder. Bu süre, sinyalin hızı ve mesafe arasındaki ilişki kullanılarak mesafe hesaplanır [19], [25], [26], [35]–[38] Bu çalışma kapsamında hareketli bir nesnenin konum tahmini yapılmıştır ve konumları bilinen sabit noktalarda bulunan cihazlar “Anchor” olarak adlandırılmıştır. Hareketli nesne ise “Tag” olarak ifade edilmiştir.

Şekil 3.2’de gösterildiği gibi Tag, iki yönlü haberleşmeyi başlatmak için “Poll” adı verilen bir mesaj gönderir. Anchor cihazları “Response” olarak adlandırılan bir mesaj ile yanıt verir. Bu iki yönlü haberleşme Tag’in “Final” mesajıyla sonlandırılır. Mesajların gönderim zamanları arasındaki fark olan gidiş-dönüş süresi hesaplanır.

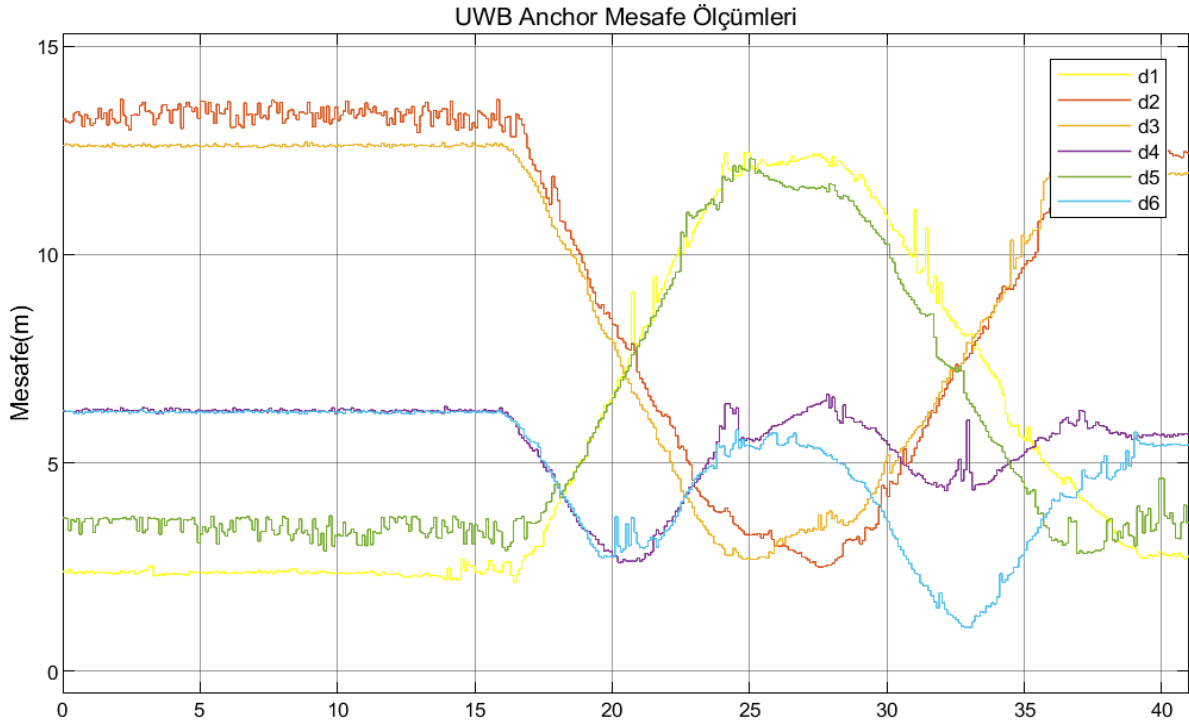


Şekil 3.2 İki Yönlü Haberleşme

$$ToF = \frac{((round1-reply1) + (round2-reply2))}{4} \quad (3.1)$$

$$d = ToF * C \quad (3.2)$$

Şekil 3.3'te sırasıyla her bir UWB anchor'dan yapılan ölçüm sonuçları görülmektedir. Grafik üzerinde gösterilen d1,.. d6 sırasıyla A1,..A6 anchorları ile yapılan ölçüm sonucunda hesaplanan mesafeyi ifade etmektedir.



Şekil 3.3 UWB Anchor Mesafe Ölçüm Sonuçları

3.1.2 Konum Tahmini için En Küçük Kareler Yöntemi

En küçük kareler yöntemi, ölçüm verileri arasındaki hataları minimize ederek konum tahmini yapmak için kullanılan bir istatistiksel optimizasyon yöntemidir [33], [34]. Bu yöntemde, UWB sensörleriyle elde edilen mesafe verileri ve sabit referans noktalarının konum bilgileri kullanılarak bir hesaplama matrisi oluşturulmuştur. En küçük kareler yöntemi, bu hesaplama matrisini kullanarak konum tahminini optimize etmek üzere iteratif bir yaklaşım kullanmıştır [28], [33], [34], [39]. Bir tagin konumunu en küçük kareler yöntemiyle hesaplayabilmek için mesafeyi en az 3 anchor ile ölçmek gerekmektedir.

Denklem 3.3 bir nesnenin x ve y koordinatlarındaki konumu için i. UWB Anchor'dan gelen mesafeyi hesaplar. Burada x_i ve y_i , i. UWB Anchor'ının konumunu ve d_i , i. UWB Anchor cihazları ile UWB Tag arasındaki mesafeyi ifade eder.

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3.3)$$

Bu çalışmada dört, beş ve altı UWB Anchor kullanılmıştır. Altı UWB Anchor için denklemler şu şekilde ifade edilir:

$$d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (3.4)$$

$$d_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \quad (3.5)$$

$$d_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \quad (3.6)$$

$$d_4 = \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2} \quad (3.7)$$

$$d_5 = \sqrt{(x - x_5)^2 + (y - y_5)^2} \quad (3.8)$$

$$d_6 = \sqrt{(x - x_6)^2 + (y - y_6)^2} \quad (3.9)$$

Bu denklemleri doğrusallaştırmak için, altı denklemin her birinden bir diğeri çıkarılır. Denklem 3.10 iki denklemin farkını ifade etmektedir.

$$d_1^2 - d_2^2 = (x^2 - 2xx_1 + x_1^2 + y^2 - 2yy_1 + y_1^2) - (x^2 - 2xx_2 + x_2^2 + y^2 - 2yy_2 + y_2^2) \quad (3.10)$$

Denklem 3.10 sadeleştirildiğinde:

$$2x(x_2 - x_1) + 2y(y_2 - y_1) = d_1^2 - d_2^2 - x_2^2 + x_1^2 - y_2^2 + y_1^2 \quad (3.11)$$

Bu şekilde Denklem 3.5 ile 3.9 arasındaki diğerk denklemler Denklem 3.10 referans alınarak doğrusallaştırılır. Elde edilen denklemler için en küçük kareler yöntemi kullanılır. Denklem 3.12’de en küçük kareler yöntemi ile x ve y konumu hesaplanmaktadır.

$$(x,y)=\text{argmin}(x,y) \sum_{i=1}^k (d_i - ||(x,y)-A_i||)^2 \quad (3.12)$$

Bu denklemler kullanılarak Denklem 3.13’te sistem modeli gösterilmiştir.

$$A \cdot x = b \quad (3.13)$$

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_i - x_1) & 2(y_i - y_1) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + d_2^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_1^2 - x_i^2 + y_1^2 - y_i^2 + d_i^2 - d_1^2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3.17)$$

3.2 Konum Tahmini için Sensör Füzyon

Sensör füzyonu, birden fazla sensör kaynağından gelen bilgilerin entegrasyonunu ifade eder. Bu, çoklu sensör sistemlerinin karmaşık ortamlarda daha doğru ve güvenilir bilgi sağlaması için kullanılır. Özellikle farklı türden sensörlerin birleştirilmesi, bütünü parçalarının toplamından daha fazla bilgi sağlayabilir. Havadan toplanan veriler, yer tabanlı radarlar, kameralar veya diğer sensörler gibi farklı kaynaklardan toplanan verilerle entegre edildiğinde bu sistemler özellikle tehlikeli ortamlarda, zorlu hava koşullarında veya düşman etkinliğinin potansiyel olarak tehdit edici olduğu durumlarda daha etkili hale gelebilir. Sensör füzyonunun temel avantajlarından biri, farklı sensörlerin sınırlamalarını ve hatalarını telafi etme yeteneğidir [5], [6], [38], [40], [41]

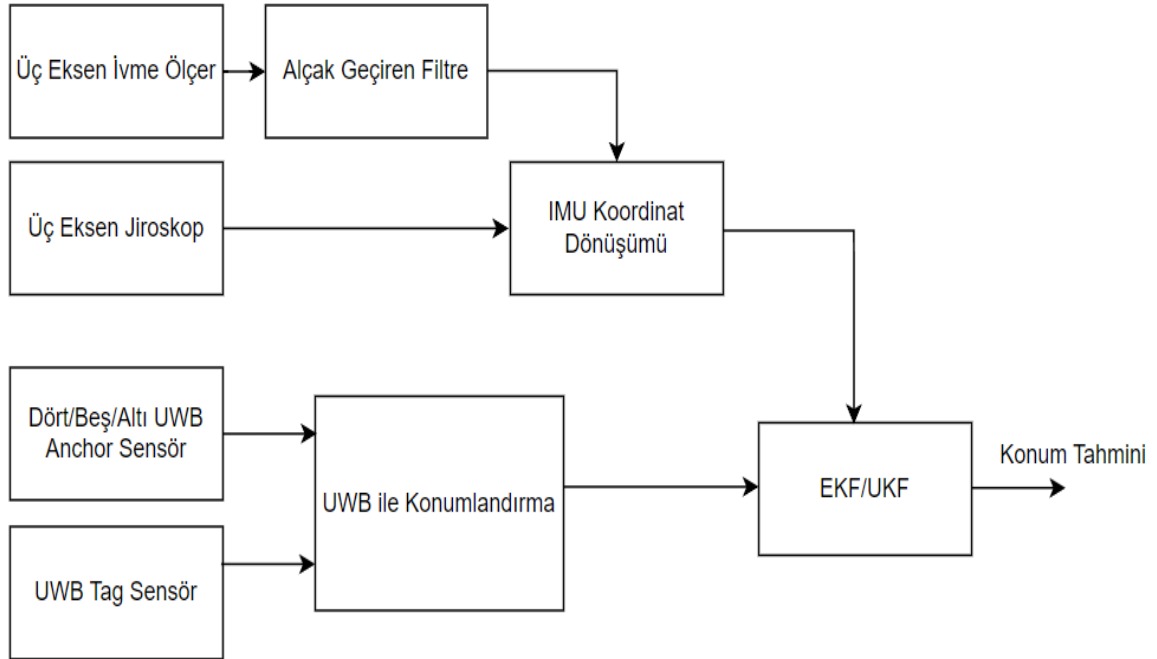
Bu çalışmada sensör füzyon uygulaması yapmak için UWB konumlandırma sistemine entegre edilmek üzere üç eksen ivmeölçer ve üç eksen jiroskop içeren bir IMU kullanılmıştır. IMU verilerinin UWB Anchor'larının olduğu koordinat düzlemine taşınması için USFSMAX modülü kullanılarak açılar elde edilmiş ve bu açılar aracılığıyla koordinat dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Bu dönüşüm süreci, IMU verilerini UWB verileriyle tutarlı bir şekilde birleştirebilmek için yapılmıştır.

İvmeölçer sensöründen elde edilen ivme değerleri gürültüden arındırılmış hale getirmek amacıyla alçak geçiren filtre tarafından işlenmiştir. Alçak geçiren filtreler genellikle belirli bir kesme frekansından daha düşük frekansta bulunan sinyal bileşenlerini geçirirken, bu frekanstan daha yüksek frekanstaki bileşenleri bastıran bir filtre türüdür.

Elektronikte bu filtreler genellikle istenmeyen yüksek frekanslı parazitleri veya gürültüleri temizlemek için kullanılır. Sinyal işlemede alçak geçiren filtreler, örneğin ses sinyallerinde istenmeyen yüksek frekansta bulunan bileşenleri ortadan kaldırmak veya dijital görüntü işlemede gürültüyü azaltmak amacıyla kullanılır. Bu filtreler, analog devrelerde pasif elemanlar (direnç, kapasitör, endüktör) veya aktif elemanlar (transistörler, opamp) kullanılarak veya dijital sinyal işlemede matematiksel algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilebilir[42], [43] Bu işlem sensör füzyon uygulamasına daha güvenilir ve temiz ivme verileri sağlamayı hedeflemiştir.

Elde edilen ivme verileri ve UWB verileri, sensör füzyonu algoritmaları olan Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ve Kokusuz Kalman Filtresi (UKF) kullanılarak bir sensör füzyon uygulamasına tabi tutulmuştur.

Genişletilmiş Kalman Filtresi, lineer olmayan sistemler için bir genelleme olan Kalman Filtresinin bir uzantısıdır ve UKF, genel bir süzgeçleme ve tahminleme yaklaşımıdır. Her iki filtre de IMU ve UWB verilerini entegre ederek, hata düzeltmesi, tahmin iyileştirmesi ve konumlandırma doğruluğunu artırma amacıyla kullanılmıştır.

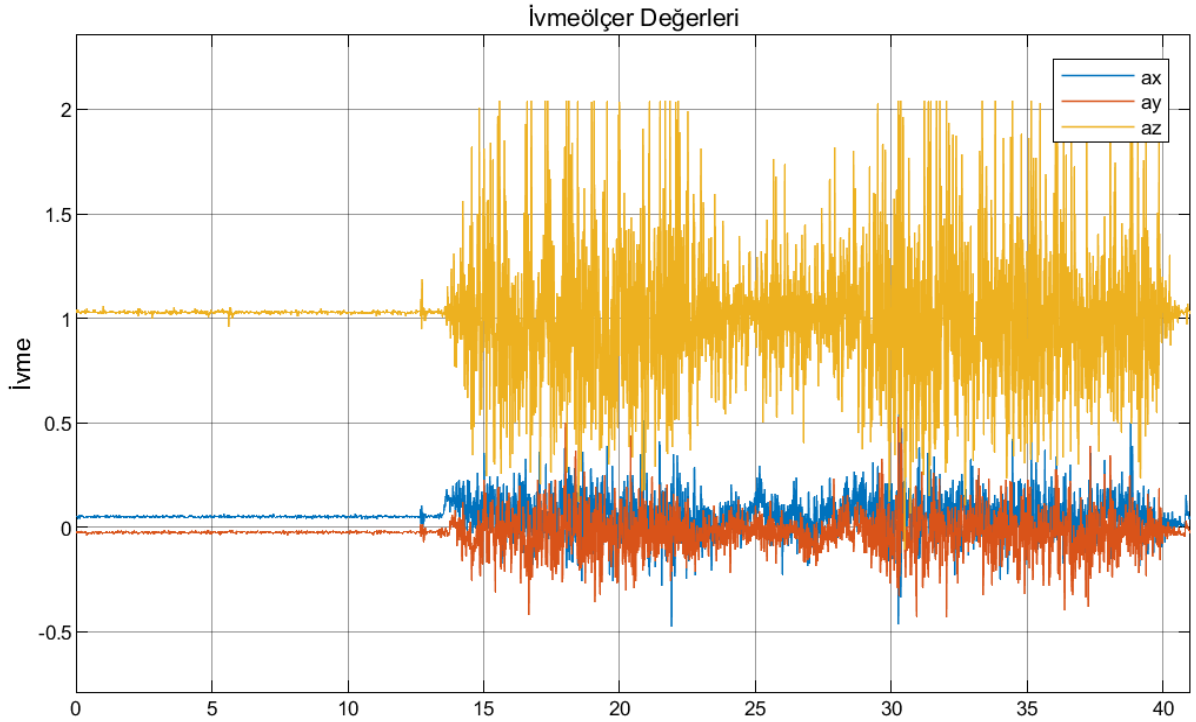


Şekil 3.4 Sensör Füzyon Akış Şeması

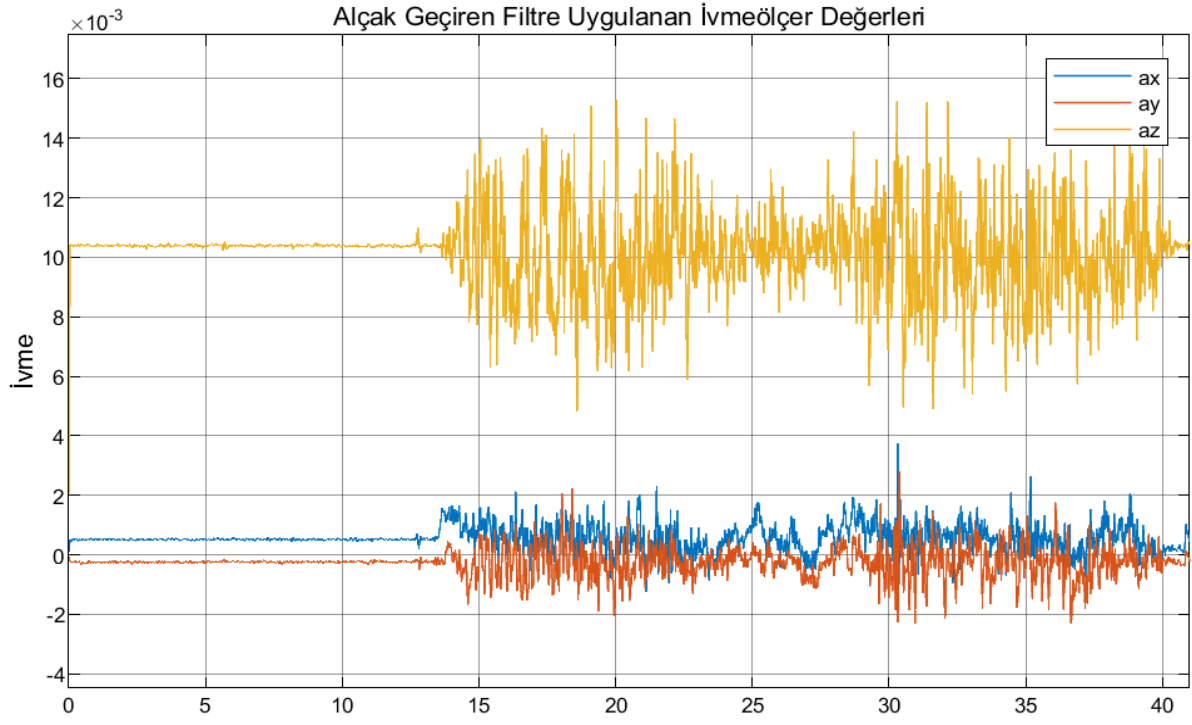
USFMAX modülü ile elde edilen ivme değerleri, Şekil 3.5'teki grafikte sunulmuştur. Grafik, gösterilen ivme değerlerinin gürültülü olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Sensör füzyon uygulamalarında daha hassas ve güvenilir ivme değerlerini elde edebilmek amacıyla uygulanan alçak geçiren filtresine tabi tutulmuş ivme değerleri, Şekil 3.6'da sunulmuştur. Burada ax, x eksenindeki ivme değerini, ay, y eksenindeki ivme değerini ve az, z eksenindeki ivme değerini ifade etmektedir.

Bu işlem, daha sağlam verilere sahip olmayı amaçlayan bir filtreleme sürecini temsil etmektedir. İvme verilerini düzeltmek ve gürültüyü azaltmak, sensör füzyonunda daha iyi sonuçlar elde etmek için önemli bir adım olmuştur.

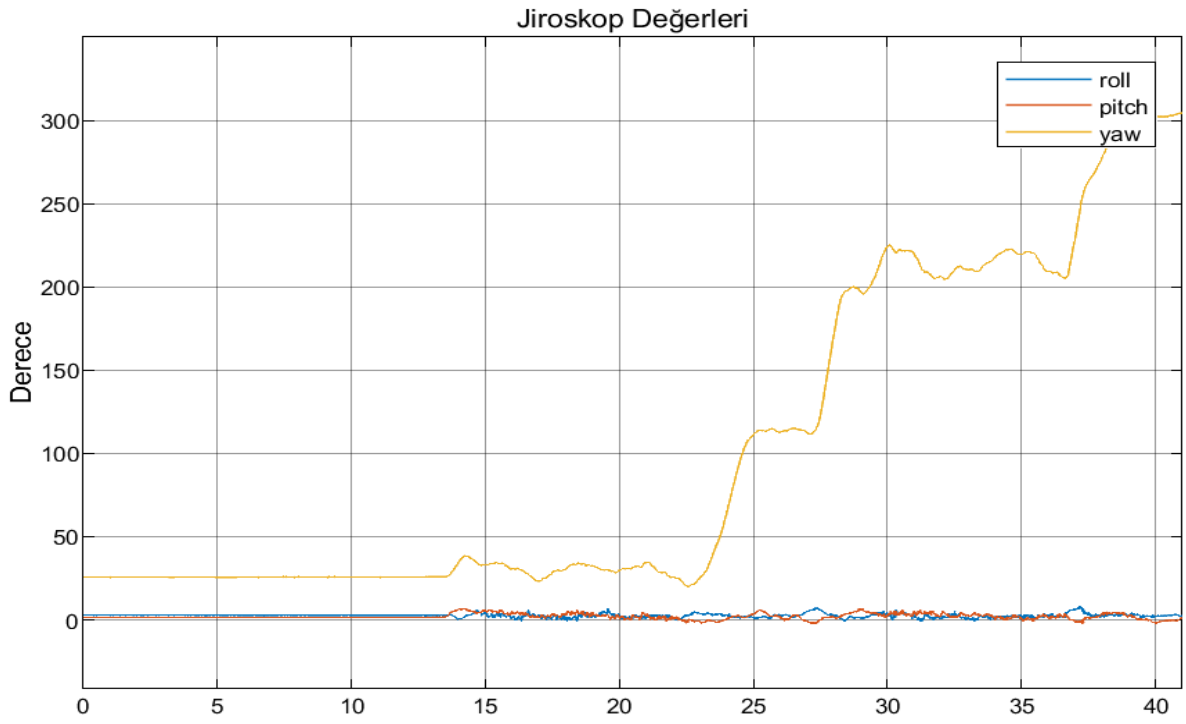
Şekil 3.7'de USFMAX modülünden elde edilen jiroskop verilerinin yer aldığı grafiği göstermektedir. Jiroskop verileri, koordinat dönüşümünde rotasyon matrisini beslemiştir.



Şekil 3.5 İvmeölçer Verileri



Şekil 3.6 Alçak Geçiren Filtrede İşlenen İvmeölçer Verileri



Şekil 3.7 Jiroskop Verileri

3.2.1 IMU Koordinat Dönüşümü

İvmeölçer, nesnenin karşılaştığı toplam ivmeleri ölçer. Yani yerçekiminden ya da ataletten kaynaklı ivmeleri ayırt edemez [13], [14] Dünyanın yüzeyine göre hareketsiz olan ivmeölçer, yerçekiminden kaynaklı ve dünyanın dönmesinden kaynaklı merkezkaç kuvvetlerini de algılayacaktır[13]–[15], [32]. İvmeölçerin algıladığı bu kuvvetleri ayırt edebilmek için sensörün yerleştirildiği platform ile yerel koordinat arasındaki eğimini bilmek gerekir. Bu nedenle jiroskoplardan gelecek açısal konuma ihtiyaç vardır [12]–[15], [32].

Bu tezde IMU verilerini birleştiren bir hareket yardımcı işlemcisi olan USFSMAX modül kullanılarak veriler elde edilmiştir. UWB Anchor'larının bulunduğu düzlem, navigasyon koordinatı olarak adlandırmıştır. Sistemde bir UWB Anchor, IMU verilerini navigasyon koordinatına taşımak için referans anchor olarak seçilmiştir. Referans anchor olarak seçilen donanıma USFSMAX modülü entegre edilmiştir ve bu modül aracılığıyla Euler açı seti elde edilmiştir. Benzer şekilde tag donanımına da USFSMAX modül entegre edilmiştir ve tag üzerinden 3 eksen ivmeölçer, 3 eksen jireskop verileri toplanmıştır.

Referans anchor cihazından elde edilen yaw, pitch,roll açı seti ZYX Euler açı seti kullanılarak anchor rotasyon matrisi elde edilmiştir. Tag üzerinden alınan yaw, pitch, roll açıları da aynı şekilde ZYX Euler açı seti kullanılarak tag rotasyon matrisi elde edilmiştir. Navigasyon rotasyon matrisi, tag rotasyon matrisinin transpozunu alıp anchor rotasyon matrisiyle çarpılarak hesaplanmıştır. Tag üzerinden okunan ivme değerleri, navigasyon rotasyon matrisi ile çarpılarak ivme değerleri navigasyon koordinatına taşınmıştır.

Denklem 3.18' de a^N , IMU koordinat dönüşümü sonucu elde edilen, navigasyon koordinatında yer alan sırasıyla x, y ve z eksenindeki ivmeölçer değerlerini ifade eder. $[C_B^N]$, IMU verilerinin, navigasyon koordinatına dönüşümünü sağlayan rotasyon matrisini ifade eder. $[a^B]$, IMU verilerinin, gövde çerçevesindeki değerlerini ifade eden matristir.

$$a^N = [C_B^N][a^B] \quad (3.18)$$

$$a^N = \begin{bmatrix} a_x^N & a_y^N & a_z^N \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$a^B = \begin{bmatrix} a_x^B \\ a_y^B \\ a_z^B \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$[C_B^N] = [C^T]^T [C^A] \quad (3.21)$$

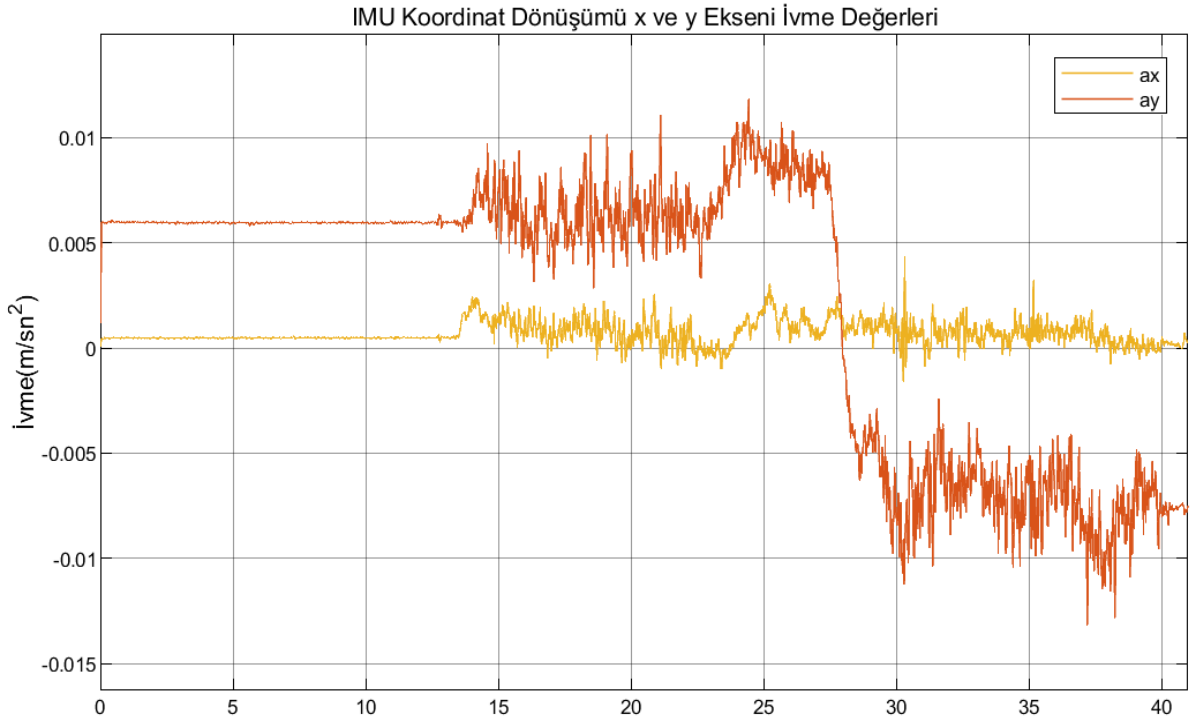
$$[C] = [C]_z(\psi)[C]_y(\theta) [C]_x(\varphi) \quad (3.22)$$

$$[C]_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$[C]_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$[C]_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

USFMAX modülünden elde edilen ivmeölçer ve jiroskop verilerinin koordinat dönüşümü adımlarında işlendikten sonra navigasyon koordinat sistemindeki sırasıyla x ve y eksenlerindeki ivme değerleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Burada ax, x eksenindeki ivme değerini ve ay, y eksenindeki ivme değerini ifade etmektedir. Sensör füzyon algoritmasına koordinat dönüşümü yapıldıktan sonra elde edilen ax ve ay değerleri verilmiştir.



Şekil 3.8 IMU Koordinat Dönüşümü Sonrasında x ve y Eksenindeki İvme Değerleri

3.2.2 Genişletilmiş Kalman Filtresi

Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) kullanılarak, konum tahmini için IMU verileri tahmin denklemlerinde ve UWB verileri güncelleme denklemlerinde kullanılmıştır. Tahmin denklemleri, durum değişkenleri ve kontrol matrisi temelinde formüle edilirken, güncelleme denklemleri gözlem matrisini içermektedir [27], [40], [44].

Tahmin adımında, sistem modeli ve kontrol matrisi kullanılarak durum değişkenlerinin zamanla nasıl değiştiği tahmin edilir [40], [45] Burada IMU verileri, sistem modeline entegre edilerek, hız, ivme ve açısal hız gibi bilgiler tahmin işlemini destekler.

Güncelleme adımında ise, ölçüm matrisi olan UWB verileri ile tahmin edilen durumlar karşılaştırılır ve sistemin güncellenmiş durumu elde edilir.

Sistem modeli Denklem 3.26' da verilmiştir. Burada x_k ve y_k , sırasıyla x ve y eksenindeki konumu ifade etmektedir. V_k^x ve V_k^y sırasıyla x ve y eksenindeki hızı ifade etmektedir.

$$x_k = [x_k \ y_k \ V_k^x \ V_k^y] \quad (3.26)$$

$k+1$ zamanındaki sistem durumu Denklem 3.27’de gösterilmiştir. Burada A durum geçiş matrisini ifade etmektedir. B giriş matrisidir. w_k , süreç gürültüsü vektörünü ifade etmektedir. u_k , navigasyon koordinatında x ve y eksenlerindeki ivmeyi temsil eden vektördür. Q, durum kovaryans matrisidir ve süreç gürültüsüne ilişkin bilgi içermektedir.

$$x_{k+1}=Ax_k+Bu_k+ w_k \quad (3.27)$$

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B=\begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$u= a^n, w_k \sim N(0, Q) \quad (3.29)$$

UWB sensörlerinden elde edilen ölçümler gözlem matrisini oluşturmaktadır. Denklem 3.30 z_k ölçüm vektörünü ifade etmektedir. d_k , UWB tarafından ölçülen mesafeyi ifade etmektedir. i referans noktasını(anchor) ifade etmektedir. Denklem 3.31’ de güncelleme denklemleri gösterilmiştir. Burada v_k , ölçüm gürültüsünü ifade eden bir vektördür. R, gözlem gürültüsü kovaryans matrisidir ve ölçüm gürültüsüne ilişkin bilgi içermektedir.

$$z_k= [d_k^1.....d_k^i]^T \quad (3.30)$$

$$z_k=H_kx_k+ v_k \quad (3.31)$$

$$v_k \sim N(0,R) \quad (3.32)$$

$$h_k=\begin{bmatrix} \sqrt{(x_k-A_{x,1})^2+(y_k-A_{y,1})^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(x_k-A_{x,i})^2+(y_k-A_{y,i})^2} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

h_k , gözlem matrisini ifade etmektedir. $A_{x,i}$ ve $A_{y,i}$ navigasyon koordinatındaki UWB Anchor cihazlarının x ve y eksenindeki koordinatlarını ifade etmektedir. H_k , h_k matrisinin x ve y değişkenleri ile kısmi türevi alınarak elde edilen Jacobian matrisidir.

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{(x_{k-A_{x,1}})}{\sqrt{(x_{k-A_{x,1}})^2 + (y_{k-A_{y,1}})^2}} & \frac{(y_{k-A_{y,1}})}{\sqrt{(x_{k-A_{x,1}})^2 + (y_{k-A_{y,1}})^2}} \\ \frac{(x_{k-A_{i,1}})}{\sqrt{(x_{k-A_{i,1}})^2 + (y_{k-A_{i,1}})^2}} & \frac{(y_{k-A_{i,1}})}{\sqrt{(x_{k-A_{i,1}})^2 + (y_{k-A_{i,1}})^2}} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Denklem 3.35 ve 3.36 sistemde kullanılan sırasıyla süreç gürültüsünü ve ölçüm gürültüsünü ifade eden Q ve R matrislerinin değerlerini göstermektedir.

$$Q = \begin{bmatrix} 0.00001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.03 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

3.2.3 Kokusuz Kalman Filtre

Kokusuz kalman filtresi (UKF), rastgele değişkenin istatistiklerini tahmin etmek için bir yaklaşım olan, kokusuz dönüşümü temel alır[37], [46] UKF' de noktalar rastgele değişkenlerin gerçek kovaryans ve ortalamasını yakalamak için kullanılır. EKF' den farklı olarak Jacobian matrisinin hesaplanması gerekli değildir. UKF, bir Gauss dağılımının doğrusal olmayan bir fonksiyondan geçtiğinde nasıl değişeceğini tahmin etmek için sigma noktalarını kullanır[37], [46]–[48] Sigma noktalarının kümesi örneklem ortalamaları $\hat{x}_k$ ve örneklem kovaryansları P_{xk} olacak şekilde seçilir. Lineer olmayan fonksiyon seçilen her bir noktaya uygulanır.

- **Sistem başlangıç denklemleri:** UKF, başlangıçta durum vektörü ve durum kovaryans matrisi tanımlar [10], [37], [46] Denklem 3.37' de x , durum vektörünü ve P kovaryans matrisini ifade etmektedir.

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = E[x_0] \\ P_0 = E[(x - \hat{x}_0)(x - \hat{x}_0)^T] \end{cases} \quad (3.37)$$

- **Sigma Noktaları:** Durum vektörü ve kovaryans matrisi kullanılarak sigma noktaları belirlenir. Denklem 3.38' de n , durum vektörünün boyutunu ifade eder

ve λ , ölçekleme parametresini ifade eder. $(\sqrt{(n+\lambda)P_{xk}})_i$ ise P matrisinin i. sütununun karekökünü temsil eder.

$$\begin{cases} x_k^0 = \hat{x}_k \\ x_k^i = \hat{x}_k + (\sqrt{(n+\lambda)P_{xk}})_i, i=1,2,\dots,n \\ x_k^{i+n} = \hat{x}_k - (\sqrt{(n+\lambda)P_{xk}})_i, i=1,2,\dots,2n \end{cases} \quad (3.38)$$

- **Sigma Noktalarının Ağırlıkları:** Sigma noktalarının ağırlıkları, belirli bir Gauss dağılımından türetilen sigma noktalarının, doğrusal olmayan bir dönüşümü sonrası elde edilen değerlerin ortalamasını ve kovaryansını tahmin etmek için ne kadar katkı sağladığını belirler [7], [10]

Denklem 3.40'da W_0^m , ilk sigma noktası(merkez) için hesaplanan ortalama ağırlığı ifade eder. W_i^m , diğer sigma noktaları için hesaplanan ortalama ağırlığı ifade eder. W_0^c , ilk sigma noktası için hesaplanan kovaryans ağırlığını ifade eder. W_i^c , diğer sigma noktaları için hesaplanan kovaryans ağırlıklarını ifade eder. n , durum vektörünün boyutunu temsil eder. λ , ölçekleme parametresidir[7], [37], [46].

α , dağılımın genişliğini kontrol eder. Bu değer genellikle $1e-3$ gibi küçük bir değer alır. β , ikinci moment hakkında önceden bilgi verir. Gauss dağılımı için $\beta = 2$ ideal bir değerdir. κ , genellikle 0 veya $3-n$ gibi değerler alır ve ölçeklemeye ek bir düzenleme sağlar. κ değeri, sigma noktalarının seçimine ve ağırlıklarına dolaylı bir etki sağlar[7], [10].

$$\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n \quad (3.39)$$

$$\begin{cases} W_0^m = \frac{\lambda}{(n+\lambda)} \\ W_0^c = \frac{\lambda}{(n+\lambda)} + 1 - \alpha^2 + \beta \\ W_i^m = W_i^c = \frac{\lambda}{2(n+\lambda)}, i=1,\dots,2n \end{cases} \quad (3.40)$$

- **Zaman Güncelleme:** İvmeölçer ve jiroskop verileri kullanılarak sigma noktaları sistem modeli ile ilerletilir. x_i , i. sigma noktasını ifade eder.

$$(x_i)_{k+1} = A(x_i)_k + Bu_k + (w_i)_k \quad (3.41)$$

Denklem 3.42 sigma noktalarının ağırlıklı ortalamasını alarak tahmin edilen durumları hesaplar. Denklem 3.43 tahmin edilen durum çevresindeki belirsizliği temsil eden kovaryans matrisini hesaplar.

$$x'_{k+1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m (x_i)_{k+1} \quad (3.42)$$

$$P'_{k+1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c ((x_i)_{k+1} - x'_{k+1}) ((x_i)_{k+1} - x'_{k+1})^T \quad (3.43)$$

- **Ölçüm Güncelleme:** UWB verileri ile ölçüm modeli kullanılarak sigma noktaları güncellenir. Denklem 3.44 ölçüm modelini ifade eder.

$$z_i = h((x_i)_{k+1}) \quad (3.44)$$

Denklem 3.45 sigma noktalarının ağırlıklı ortalamasını alarak tahmin edilen ölçüm ortalamasını hesaplar. Denklem 3.46 tahmin edilen durum çevresindeki belirsizliği temsil eden ölçüm kovaryans matrisini hesaplar. R, ölçüm gürültüsünün kovaryansını temsil etmektedir.

$$z'_{k+1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m (z_i)_{k+1} \quad (3.45)$$

$$S'_{k+1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c ((z_i)_{k+1} - z'_{k+1}) ((z_i)_{k+1} - z'_{k+1})^T + R \quad (3.46)$$

3.3 Taguchi Yöntemi ve Deney Tasarımı

Deney Tasarımı (DoE), verilerin etkili bir şekilde elde edilmesi amacıyla deney setlerinin planlama stratejisi olarak tanımlanır [49], [50]. DoE, bir sürecin performansını iyileştirmek amacıyla süreci etkileyen parametreler üzerinde değişiklikler yaparak, süreç çıktısının değişikliklerini gözlemleyip yorumlamak için istatistiksel bir araçtır[51] DoE, daha az kaynak (deney, zaman, malzeme vb.) kullanarak önemli miktarda veri elde etme avantajına sahiptir.

DoE için birçok deney tasarımı tekniği mevcuttur ve bunlar arasında şunlar yer alır:

- Rastgele Tam Blok Deneysel Tasarımı (Randomized Complete Block Design)
- Latin Kare (Latin Square)
- Tam Faktöriyel Tasarım (Full Factorial)

- Kısmi Faktöriyel Tasarım (Fractional Factorial)
- Merkezi Bileşik Tasarım (Central Composite)
- Box-Behnken Tasarımı
- Plackett-Burman Tasarımı
- Taguchi
- Rastgele (Random)
- Halton, Faure ve Sobol Dizileri
- Latin Hipercube (Latin Hypercube)
- Optimal Tasarım (Optimal Design)
- Yanıt Yüzeyi Tasarımı (Response Surface Design)

Bu çalışmada, deney tasarımları Taguchi yöntemiyle ortogonal matris kullanılarak ve Box-Behnken tasarımıyla analiz edilmiştir.

Taguchi Yöntemi, deney tasarımı ve optimizasyon alanında geniş kabul gören ve etkili bir yaklaşımdır [52]–[56] Bu yöntem, ürün ve süreç kalitesini artırmayı ve maliyetleri ile kaynakları en aza indirmeyi hedefler [54]. Özellikle, etkili parametrelerin minimum deney sayısı ile incelenmesini sağlayan özel bir ortogonal dizi tasarımı kullanması, istatistiksel deney tasarım yöntemleri arasında tercih edilmesini sağlar [53], [57]–[59].

Taguchi yöntemi, sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı olmak üzere üç ana bileşenden oluşur [53], [55]. Sistem tasarımı, istenen performansı elde etmek için kontrol edilebilir faktörlerin optimal düzeylerini belirlemeyi içerir [53], [60], [61]. Parametre tasarımı, ürünü veya süreci gürültüye karşı sağlam hale getirmek için kontrol edilemeyen faktörlerin düzeylerini optimize etmeye odaklanır [56], [62]–[64]. Tolerans tasarımı ise, kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen faktörlerin ürün veya süreç üzerindeki etkilerini en aza indirmeyi amaçlar [53][65], [66]

Taguchi yönteminin temel avantajlarından biri, sağlam tasarım aracılığıyla değişkenliği azaltması ve ürün özelliklerini iyileştirmesidir [56]. Sağlam tasarım, ürün özelliklerinin hedef değeri etrafındaki değişkenliği azaltmayı amaçlayan istatistiksel deneysel tasarımın sistematik bir uygulamasıdır. Bu özellik, ürünün üretilebilirliği ve ömrü açısından büyük öneme sahiptir [53], [56], [60], [63], [67].

DoE uygulanacak sistem parametreleri şu şekildedir:

- UWB Anchor Sayısı,
- UWB Periyot,
- IMU Periyot

Bu parametreler için Tablo 3.1’de gösterildiği gibi üç seviye belirlenmiştir ve her seviye için üç değer belirlenmiştir. Bu durumda $3^3 = 27$ farklı deney yapmak gerekecektir. Taguchi’nin ortogonal dizi seçim matrisinden uygun DoE matrisi seçildiğinde, DoE tablo tasarım kısıtlamalarını araştırarak uygun olmayan test deneylerini ortadan kaldıracağından buradaki deney sayısı azalacaktır [52], [56], [63]

Tablo 3.1 Sistem Parametreleri ve Düzeyleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
UWB Anchor Sayısı	4	5	6
UWB Periyot (Hz)	2	5	10
IMU Periyot (Hz)	25	50	100

Tablo 3.2’de gösterildiği gibi Taguchi’nin ortogonal dizi seçim matrisi gösterilmiştir. Burada DoE uygulamak için L9 deney dizini, üç parametre ve üç seviye için uygundur.

Tablo 3.2 Ortogonal Deney Matrisi

		Parametre Sayısı		
		2	3	4
Parametre	2	L4	L4	L8
Seviyelerinin	3	L9	L9	L9
Sayısı				

L9 deney dizinine göre düzenlenmiş olan deney tasarımı Tablo 3.3’ te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Deney Tasarımı

Deney Numarası	UWB Anchor Sayısı	UWB Periyot (Hz)	IMU Periyot (Hz)
1	4	2	25
2	4	5	50
3	4	10	100
4	5	2	50
5	5	5	100
6	5	10	25
7	6	2	100
8	6	5	25
9	6	10	50

3.4 Box-Behnken Tasarım

Box-Behnken tasarımı, 1960 yılında George Box ve Donald Behnken tarafından geliştirilen bir deneysel tasarım yöntemidir. Box Behnken tasarımı yaygın olarak optimizasyon amaçları için kullanılmaktadır [68], [69].

Box- Behnken tasarımları olarak isimlendirilen simetrik üç düzeyli bu tasarımlar, her biri kontrollü değişkenlerin yalnızca bir alt seti kullanılarak yapılandırılan iki düzeyli faktöriyel tasarımların kombinasyonundan oluşur [70]–[72] Bu tasarım, sistemin bağımsız değişkenleri veya faktörleri ve bu faktörlerin belirli seviyelerini içeren bir deneysel plan oluşturarak deneyler yapmayı amaçlar [69], [70]. Bu metodun amacı, istenen yanıtı veya sonucu en uygun faktör kombinasyonunu belirleyerek elde etmektir [69] Tasarım matrisi, faktörlerin gereksiz kombinasyonlarının önüne geçmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, faktörlerin ve yanıtın ilişkisinin daha iyi anlaşılmasını ve önemli parametreler ile etkileşimlerin belirlenmesini sağlar [68], [71], [73]

Box- Behnken tasarım oluşturulurken, bağımsız değişkenlerin belirlenen bir noktası merkez seçilir. Bu merkez nokta tasarım 0 noktası ile temsil edilir. Bu değerden eşit uzaklıkta bulunan noktalar ise +1 ve -1 ile ifade edilir.

Box-Behnken tasarımına göre, belirlenen şartlarda deney yapılarak elde edilen cevaplar en küçük kareler yöntemi ile polinoma uygulanır. Buradaki amaç, optimuma en yakın noktayı belirlemektir [74], [75]. Cevabın değişkenlerine bağlı fonksiyonu için ikinci dereceden bir polinom türetilir [71]–[75].

Bu çalışmada, deney tasarımı için Box-Behnken yöntemine uygun olarak L9 deney dizini Tablo 3.4'te gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Deney tasarımında kullanılan faktörler, sistemi etkileyen bağımsız değişkenlerdir ve her bir faktör belirli seviyelerde değerlendirilmek üzere seçilmiştir. Her bir deney, faktörlerin belirli seviyelerinde uygulanarak sistemin tepkisinin ölçülmesini sağlar. Elde edilen sonuçlar, istatistiksel analizlerle değerlendirilerek optimum faktör kombinasyonu ve istenen tepki elde edilmeye çalışılır.

Tablo 3.4 Box Behnken Tasarıma Göre DoE

Deney Numarası	UWB Anchor Sayısı	UWB Periyot (Hz)	IMU Periyot(Hz)
1	-1	-1	-1
2	-1	0	0
3	-1	1	1
4	0	-1	0
5	0	0	1
6	0	1	-1
7	1	-1	1
8	1	0	-1
9	1	1	0

3.5 Sistem Donanımı ve Test

Sistemde UWB Anchor ve UWB Tag cihazları için Qorvo'nun DWM1001 geliştirme kartı kullanılmıştır. Anchor donanımlarının verilerine TCP/IP protokolü üzerinden erişebilmek için ethernet modülü olarak Lantronix Xport Edge kullanılmıştır. İvmeölçer ve jiroskop verileri için USFSMAX Modül kullanılmıştır.

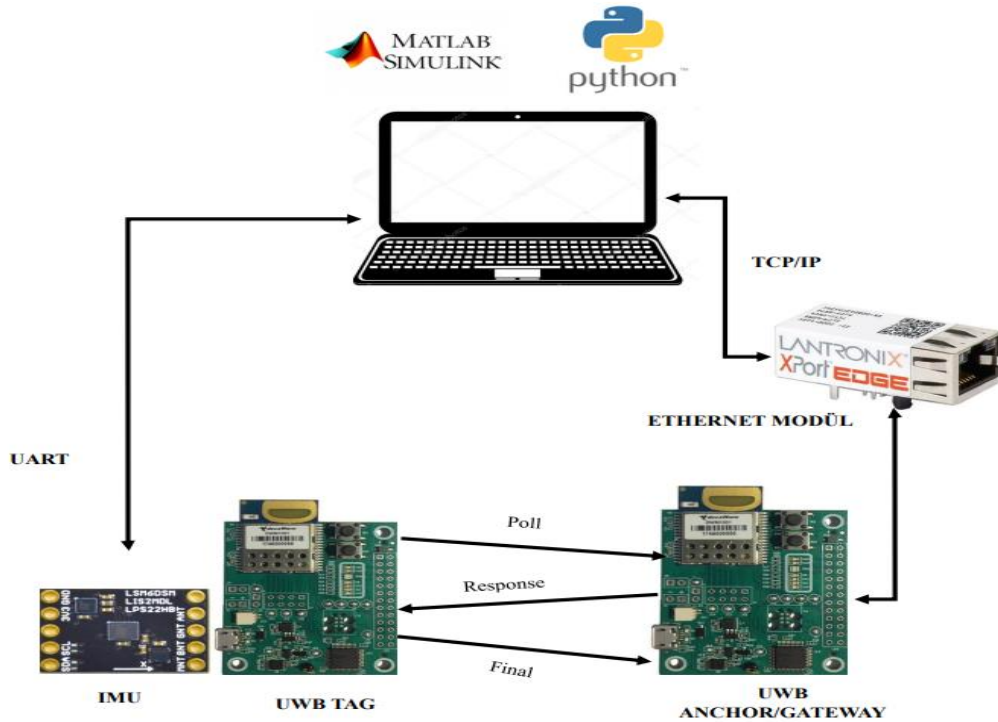
Qorvo tarafından geliştirilen DWM1001 geliştirme kartı, DW1000 alıcı-verici ve NRF52832 Arm Cortex M4F MCU'yu içerir. Bu kart, Gerçek Zamanlı Konumlandırma Sistemi (RTLS) için Tag veya Anchor olarak kullanılabilir. Ayrıca, bir ethernet modülü entegrasyonu yapıldığında Gateway olarak da kullanılabilir.

DW1000 alıcı-verici, UWB tabanlı konum belirleme imkânı sunar ve düşük güç tüketimi ile yüksek doğruluk sağlar. Bu özellik, RTLS sistemlerinde nesnelerin gerçek zamanlı olarak hassas bir şekilde konumlarını belirlemeyi sağlar.

NRF52832, Nordic Semiconductor tarafından geliştirilen bir ARM Cortex-M4F tabanlı mikrodenetleyici birimdir. Yüksek performanslı işlemci gücü ve düşük güç tüketimi ile kablosuz iletişim ve akıllı cihazlar için ideal bir seçenektir.

USFSMAX Modül, yüksek kalitede ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre sensörlerini içerir. Hızlı örnekleme hızına sahip olması, hızlı hareketleri ve titreşimleri hassas bir şekilde ölçmeyi sağlar. Hem analog hem de dijital çıkışlara sahip olduğu için farklı donanımlara kolaylıkla entegre edilebilir. Ayrıca, düşük güç tüketimine sahiptir.

Lantronix Xport Edge, güçlü işlemci ve geniş bellek kapasitesi sayesinde veri işleme, analiz ve güvenli iletişim sağlar. Seri haberleşme protokolleri (RS232/435) ve ethernet bağlantısı gibi endüstriyel protokolleri destekler. Modül, IoT protokolleri (MQTT, HTTP/HTTPS) ve Wi-Fi, Bluetooth gibi kablosuz bağlantıları da destekler. Yerel olarak veri depolama yeteneği sunar, böylece internet bağlantısı kesildiğinde bile verilerin kaydedilmesini sağlar.

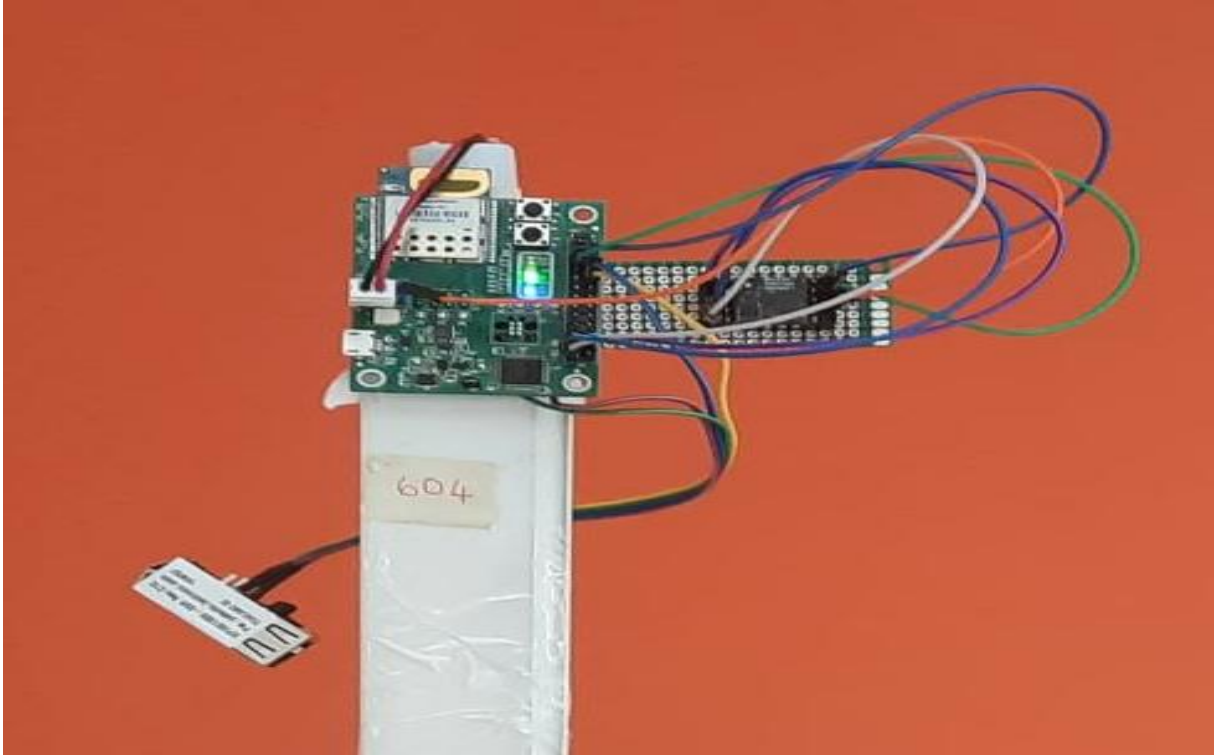


Şekil 3.9 Sistem Donanımı

Bu çalışmada, UWB Anchor donanımlarına Lantronix Xport Edge modülü entegre edilerek aynı zamanda bir Gateway olarak kullanılmıştır. Şekil 3.9’da gösterilen yapıda, UWB Anchor ve UWB Tag cihazları arasında iletişim sağlanarak elde edilen mesafe verileri TCP/IP protokolü üzerinden bir uzak sunucuya gönderilir. Bu sayede, UWB teknolojisi kullanılarak cihazların konumları uzaktan takip edilebilir hale getirilmiştir.

UWB Tag cihazı üzerine entegre edilen USFSMAX modülü, bilgisayara UART arayüzü üzerinden bağlanmış ve ivmeölçer verileri bu bağlantı aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Ayrıca, referans UWB Anchor cihazına entegre edilen USFSMAX modülünden ilk açılışta okunan Euler açısı seti kaydedilmiştir. Referans Anchor cihazının yeri değişmediği için, bu Euler açısı setinin sürekli olarak alınmasına gerek duyulmamıştır.

Şekil 3.10’da referans Anchor cihazı ve bu donanıma entegre edilen USFSMAX modül ile Lantronix Xport Edge cihazı görülmektedir.



Şekil 3.10 Sistemde USFMAX Modülü Entegre Edilmiş Referans UWB Anchor Donanımı

Taguchi'nin deney tasarımı kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, NLOS koşullar altında bir ofis ortamında 9 deney seti oluşturulmuştur.

Deneylerde, UWB Anchor donanımlarının ofis içerisindeki konumlarına dikkat edilmiştir. Tripodlar kullanılarak UWB Anchor donanımları ofisin başında, sonunda ve ortasında olacak şekilde köşelere yerleştirilmiştir. Deneyler sırasıyla dört, beş ve altı UWB Anchor kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Dört UWB Anchor ile yapılan testlerde, anchor donanımları ofisin başı ve sonu olacak şekilde köşelere yerleştirilmiştir. Bu şekilde, ofisin tamamını kapsayacak şekilde anchor donanımlarının konumlandırılması sağlanmıştır. Beş UWB Anchor ile kurulan sistemde ise beşinci UWB Anchor donanımı ofisin ortasında bulunan kolonun arkasına yerleştirilmiştir. Altı UWB Anchor ile yapılan deneylerde altıncı UWB Anchor donanımı, kolon hizasında daha açık olan bir alana yerleştirilmiştir.



Şekil 3.11 Test Düzeneği

Sistemdeki UWB Anchor donanımlarının Lantronix Xport Edge Ethernet modülüyle entegrasyonu sağlanarak, her donanım bir gateway işlevi görmeye başlamıştır. Bu entegrasyon sayesinde, UWB Anchor donanımları TCP/IP protokolü üzerinden bir

sunucuya mesafe ölçümlerini iletebilmektedir. Başlangıçta planlanan yöntem, her donanıma entegre edilen Ethernet modülleri aracılığıyla mesafe ölçümlerinin sunucuda kaydedilmesi idi. Ancak, test ortamında yaşanan ethernet switch yetersizliği, alternatif bir yöntemin kullanılmasını gerektirmiştir.

Alternatif bir yöntem olarak, UWB Anchor ve Tag cihazları arasında ölçülen mesafe değerleri, her Anchor donanımının ROM'una yazılmıştır. Daha sonra, her Anchor donanımının ROM'u okunarak ölçülen mesafe verileri alınmıştır. Bu şekilde, mesafe verileri donanımın belleğinde saklanmıştır ve işlenmeye hazır hale getirilmiştir.

UWB Tag üzerinde bulunan USFSMAX Modülü ile ölçülen ivme ve jiroskop verileri bilgisayar bağlantısı sağlanarak seri port aracılığıyla kaydedilmiştir.

Şekil 3.12'de gösterildiği gibi UWB Tag donanımı tekerlekli bir masa üzerine yerleştirilmiştir ve bilgisayar ile seri port bağlantısı sağlanmıştır. Test rotası boyunca ivmeölçer, jiroskop verileri bu şekilde kaydedilmiştir.



Şekil 3.12 Test Ortamındaki NLOS Şart

Bu çalışmada, deney tasarımı yöntemiyle gerçekleştirilen 9 deney setinin UWB mesafe ölçüm verileri Anchor donanımlarının ROM'larına kaydedilen veriler, Python uygulamasında yazılan bir script yardımıyla MATLAB/Simulink ortamına aktarılacak formata dönüştürülmüştür. Ayrıca seri haberleşme aracılığıyla kaydedilen IMU verileri de MATLAB/Simulink ortamına aktarılmıştır.

MATLAB/Simulink ortamında öncelikle yalnızca UWB ölçümleri kullanılarak en küçük kareler metodu ile konumlandırma yapılmak üzere matematiksel modelleme yapılmıştır. Daha sonra MATLAB/Simulink ortamında bulunan Genişletilmiş Kalman Filtre ve Koksuz Kalman Filtre araçları kullanılarak sensör füzyon uygulaması yapılmıştır. EKF ve UKF bloklarını besleyecek ivmeölçer verileri MATLAB/Simulink ortamında filtre tasarım aracılığıyla tasarlanan alçak geçiren filtrede işlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

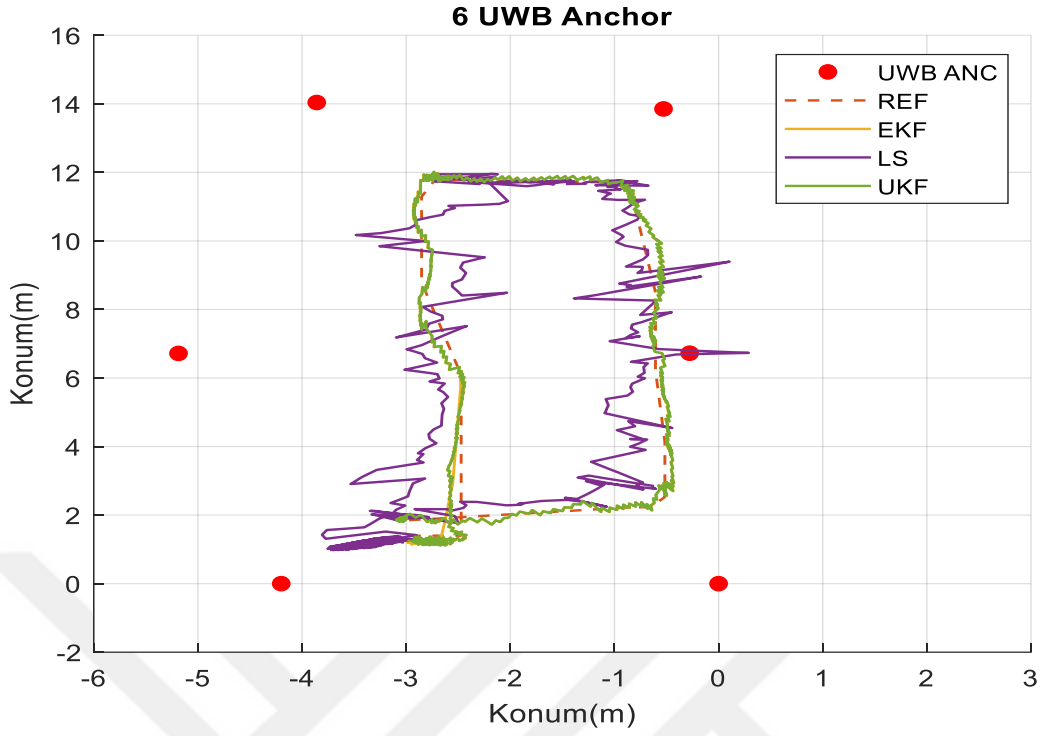
Bu çalışmada sistem değerlendirmesi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada NLOS koşullarda 6 adet UWB Anchor, 10 Hz UWB periyodu ve 100 Hz IMU periyodu kullanılarak yapılan en küçük kareler (LS) yöntemiyle konum tahmini sonuçları, referans konum değerleriyle Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, sensör füzyon uygulamasının sistem performansını iyileştirme potansiyelini belirlemeyi hedeflemiştir.

Tablo 4.1 MAPE Açısından Konum Tahmin Değerlendirmesi

Sistem Konfigürasyonu	LS		EKF		UKF	
	MAPEX %	MAPEY %	MAPEY %	MAPEY %	MAPEX %	MAPEY %
6 UWB Anchor 10 Hz UWB 100 Hz IMU	31,2805	8,2592	5,7197	7,4174	5,7019	6,5874

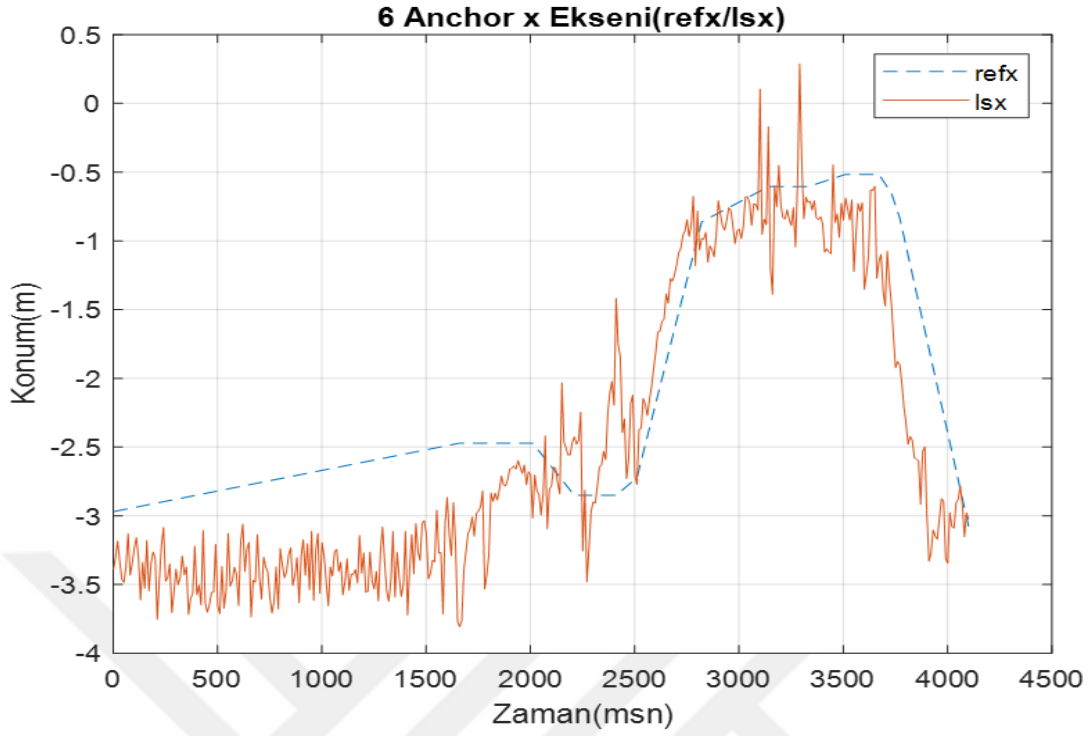
Tablo 4.1’de gösterildiği gibi MAPE değerleri açısından bir değerlendirme yapıldığında en yüksek hata oranının görüldüğü x ekseninde sensör füzyon uygulamasının sistemi yaklaşık olarak %25 iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.1’de altı UWB Anchor kullanılarak gerçekleştirilen test sonuçları gösterilmiştir. Grafikteki “UWB ANC”, UWB Anchor’larının yerleştirildiği konumu ifade etmektedir. “REF”, referans konumu ifade etmektedir. “EKF”, genişletilmiş kalman filtresi kullanılarak yapılan konum tahmin sonuçlarını göstermektedir. “LS”, en küçük kareler yöntemiyle yapılan konum tahmin sonuçlarını temsil etmektedir. UKF, kokusuz kalman filtresi kullanılarak yapılan konum tahmin sonuçlarını ifade etmektedir.



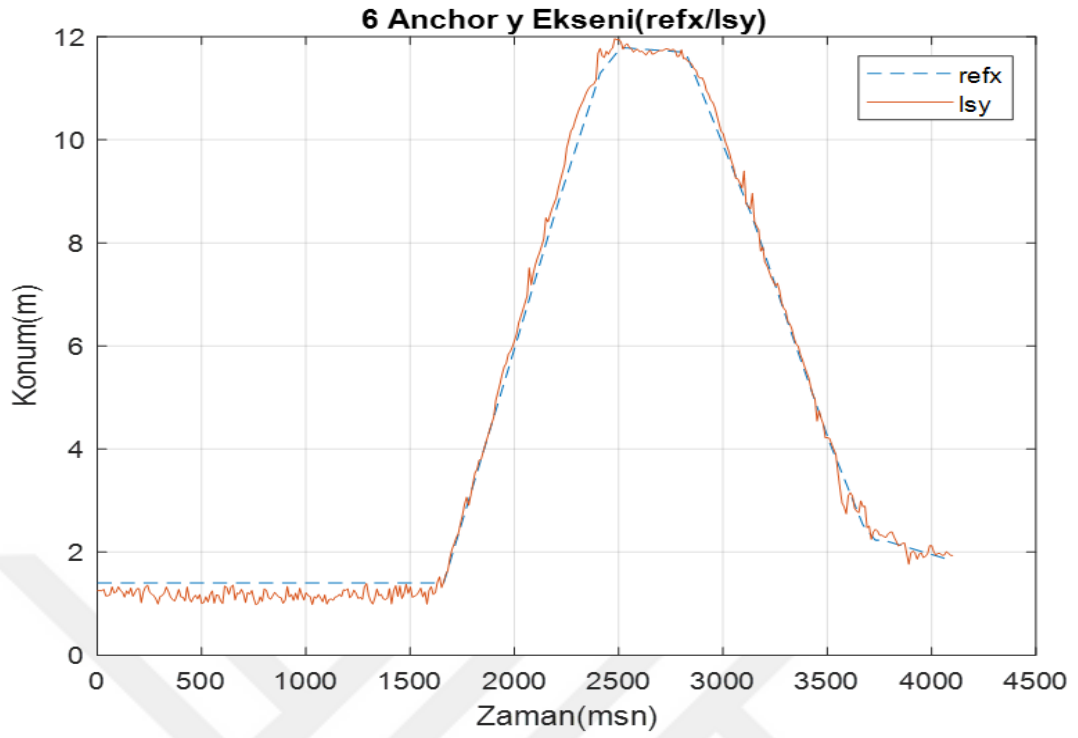
Şekil 4.1 6 UWB Anchor ile Konum Tahmin Sonuçlarını Kıyaslamaları

Şekil 4.2- 4.7 arasında altı adet UWB Anchor kullanılarak gerçekleştirilen testlerin x ve y eksenindeki sonuçları gösterilmiştir. Grafiklerde “refx”, x eksenindeki referans konumunu temsil etmektedir, “refy” ise y eksenindeki referans konumunu göstermektedir. “ekfx” ve “ekfy” sırasıyla x ve y eksenlerindeki genişletilmiş kalman filtre ile yapılan konum tahminlerini ifade etmektedir. Benzer şekilde, “ukfx” ve “ukfy”, x ve y eksenlerindeki kokusuz kalman filtre ile yapılan konum tahminlerini temsil etmektedir. “lsy” ve “lsx” ise x ve y eksenlerindeki en küçük kareler yöntemi ile yapılan konum tahminlerini ifade etmektedir.

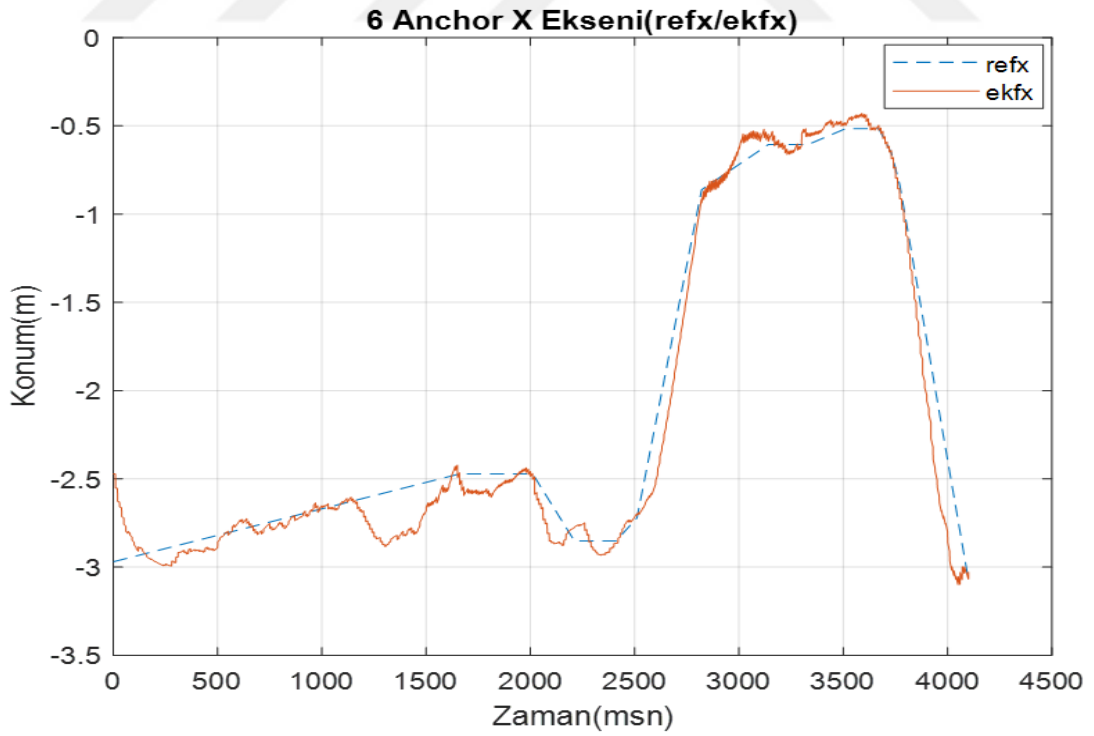


Şekil 4.2 6 UWB Anchor x Eksen Referans Konum ve En Küçük Kareler Yöntemi Kıyaslama

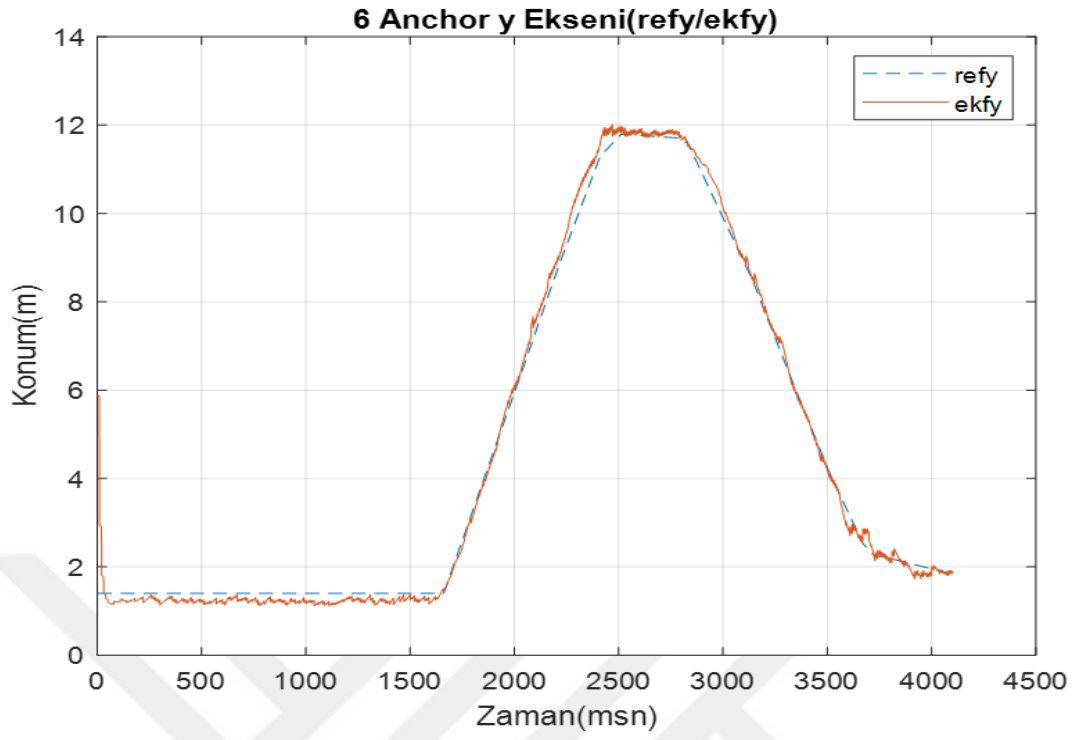
Grafikte görüldüğü gibi en küçük kareler yöntemi ile yapılan konum tahmin sonucu ile referans konum kıyaslandığında, en küçük kareler yöntemi ile yapılan konum tahmin sonucunda ciddi oranda sapmalar tespit edilmiştir. Konum tahmininin yaklaşık olarak referans konumu iyi bir şekilde takip edemediği görülmüştür ve konum noktasal olarak değerlendirildiğinde referans konumdan 150 cm'ye varan sapmalar olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'te EKF konum tahmin sonuçları ile referans konum kıyaslandığında, konum tahmininin ciddi oranda iyileştiği gösterilmiştir. EKF konum tahmin sonucunun x ekseninde referans konumu büyük oranda başarılı bir şekilde takip edebildiği, bazı noktalarda sapmalar olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.6'da UKF konum tahmin sonuçları ile referans konum kıyaslandığında, EKF konum tahmin sonuçlarına göre ciddi bir iyileşme gözlemlenmemiştir. Ancak bazı noktalarda konum tahmin sonucunda EKF'ye göre daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır.



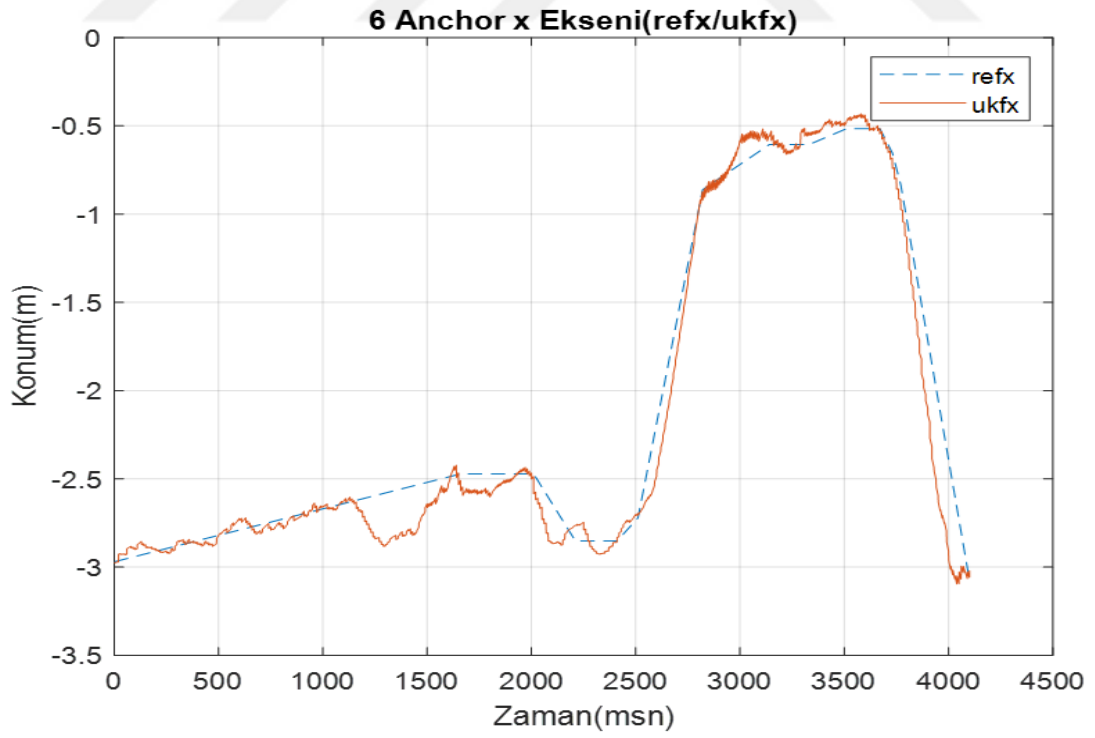
Şekil 4.3 6 UWB Anchor y Ekseni Referans Konum ve En Küçük Kareler Yöntemi Kıyaslama



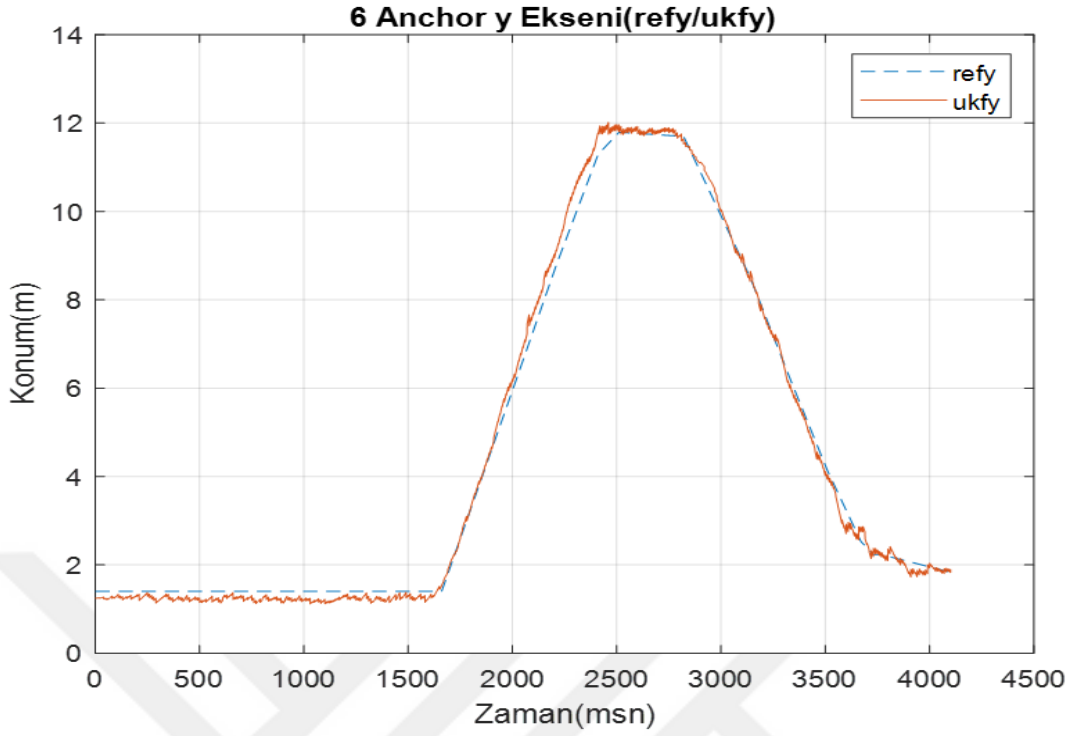
Şekil 4.4 6 UWB Anchor x Ekseni Referans Konum ve Genişletilmiş Kalman Filtre Kıyaslama



Şekil 4.5 6 UWB Anchor y Ekseni Referans Konum ve Genişletilmiş Kalman Filtre Kıyaslama



Şekil 4.6 6 UWB Anchor x Ekseni Referans Konum ve Kokusuz Kalman Filtre Kıyaslama



Şekil 4.7 6 UWB Anchor y Eksenini Referans Konum ve Kokusuz Kalman Filtre Kıyaslama

Gerçekleştirilen test sonuçları değerlendirildiğinde, altı UWB Anchor kullanarak yapılan konum tahmininde belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. En küçük kareler yöntemi ile gerçekleştirilen konum tahmininde x ekseninde referans konumun takip edilemediği gözlenmiştir. Bu durum, x eksenindeki hata oranının MAPE açısından %31,2805 olarak hesaplanmasına neden olmuştur. Ancak, y eksenindeki konum tahmini, MAPE açısından %8,2592 hata oranı ile daha başarılı bir sonuç vermiştir.

Grafiklerde görüldüğü gibi, genişletilmiş kalman filtresi ve kokusuz kalman filtresi gibi konum tahmin algoritmalarının kullanılması x eksenindeki konum tahmin sonuçlarını belirgin bir şekilde iyileştirmiştir. Ayrıca, bu algoritmaların y eksenindeki hata oranını da belli bir ölçüde azalttığı gözlenmiştir.

Bu sonuçlar, konum tahmininde kullanılan tahmin algoritmalarının başarılı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, NLOS koşullar altında gerçekleştirilecek deney tasarımı ve uygulanması için güvenilir bir temel oluşturulmuştur.

İkinci aşamada, NLOS koşullarda gerçekleştirilen deneylerde, elde edilen veriler sistem hata oranını iyileştirmek için kullanılan EKF ve UKF algoritmaları ile sensör füzyon

uygulanmış ve ayrıca optimal parametre konfigürasyonlarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Sensör füzyon algoritması dikkate alındığında, anlık konum ve referans konum verileriyle elde edilen veriler MAPE sonuçları açısından karşılaştırılmıştır. Tablo 4.2’de MAPE sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.2 MAPE Sonuçları

Deney No	EKF		UKF	
	MAPEX%	MAPEY%	MAPEX%	MAPEY%
1	23,0797	5,7058	21,7199	3,5488
2	24,0823	4,6873	23,4181	3,4743
3	16,0828	4,6573	15,9104	3,9217
4	19,0585	7,2480	17,2864	3,9950
5	12,9946	6,4179	11,8463	4,7551
6	10,6293	4,9280	10,5755	4,9437
7	27,5114	11,6782	25,6806	7,1005
8	31,0688	6,1595	29,1874	5,9583
9	28,8524	7,0631	27,3297	17,0983

Box-Behnken tasarım yöntemiyle gerçekleştirilen optimal parametre konfigürasyon sonuçları Tablo 4.3’te gösterilmiştir. Tablo 4.3 değerlendirilirken, yüksek hata oranına sahip x eksenini üzerinden değerlendirilme yapılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda, sistem parametrelerinin 5 UWB Anchor, 10 Hz UWB periyodu ve 100 Hz IMU periyodu yapılandırmasının optimal sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

Tablo 4.3 Box Behnken Tasarım

Sistem Konfigürasyon	EKF		UKF	
	MAPEX %	MAPEY %	MAPEX %	MAPEY %
Anchor Sayısı	4,83448	4	4,85765	4,57386
UWB (Hz)	10	6,30748	10	5,14267
IMU (Hz)	100	99,9995	100	25
MAPE	8,50264	4,15705	8,08533	2,21299

Ayrıca Box-Behnken tasarım sistem için doğrusal olmayan etkileri test edebilmeyi sağlamaktadır. Denklem 4.1- 4.4 doğrusal olmayan modelin denklemlerini ifade etmektedir. Burada “EKFX”, genişletilmiş kalman filtresi x eksenindeki konum tahminini ifade etmektedir. “EKFY”, genişletilmiş kalman filtresi y eksenindeki konum tahminini ifade etmektedir. “UKFX”, kokusuz kalman filtresi x eksenindeki konum tahminini ifade etmektedir. “UKFY”, kokusuz kalman filtresi y eksenindeki konum tahminini ifade etmektedir. β , katsayıyı ifade etmektedir.

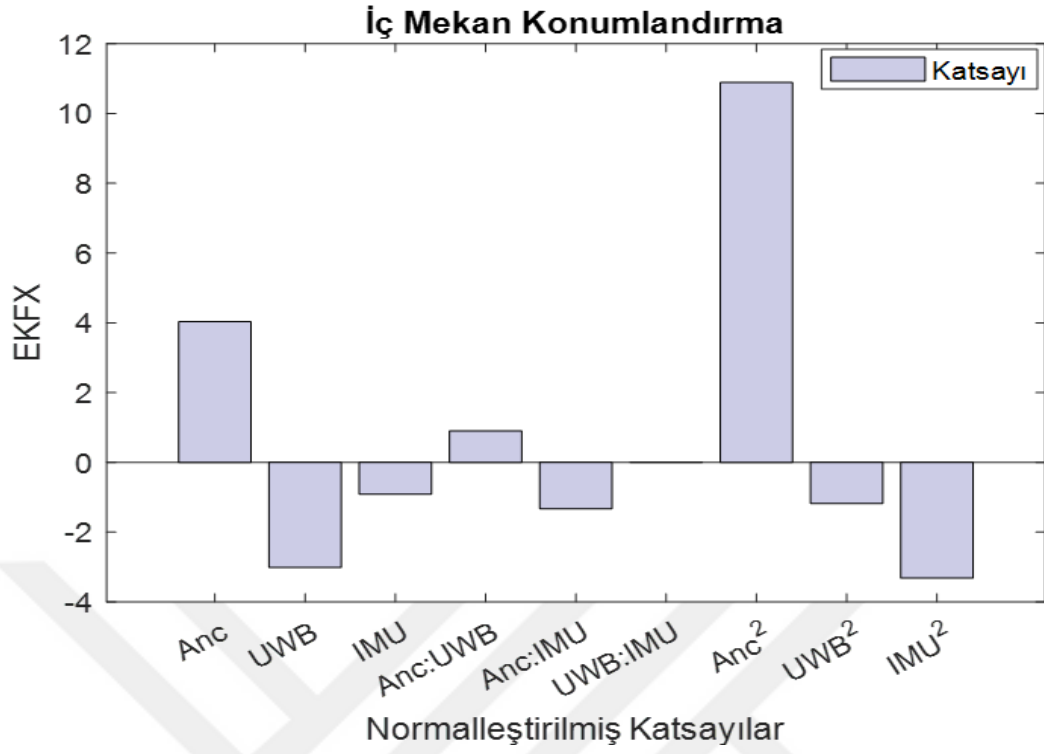
$$EKFX = \beta_{0k} + ANC * \beta_{1k} + UWB * \beta_{2k} + IMU * \beta_{3k} + ANC * UWB * \beta_{4k} + ANC * IMU * \beta_{5k} + ANC^2 * \beta_{6k} + UWB^2 * \beta_{7k} + IMU^2 * \beta_{8k} + \varepsilon_{0k} \quad (4.1)$$

$$EKFY = \beta_{0k} + ANC * \beta_{1k} + UWB * \beta_{2k} + IMU * \beta_{3k} + ANC * UWB * \beta_{3k} + ANC * IMU * \beta_{5k} + ANC^2 * \beta_{6k} + UWB^2 * \beta_{7k} + IMU^2 * \beta_{8k} + \varepsilon_{0k} \quad (4.2)$$

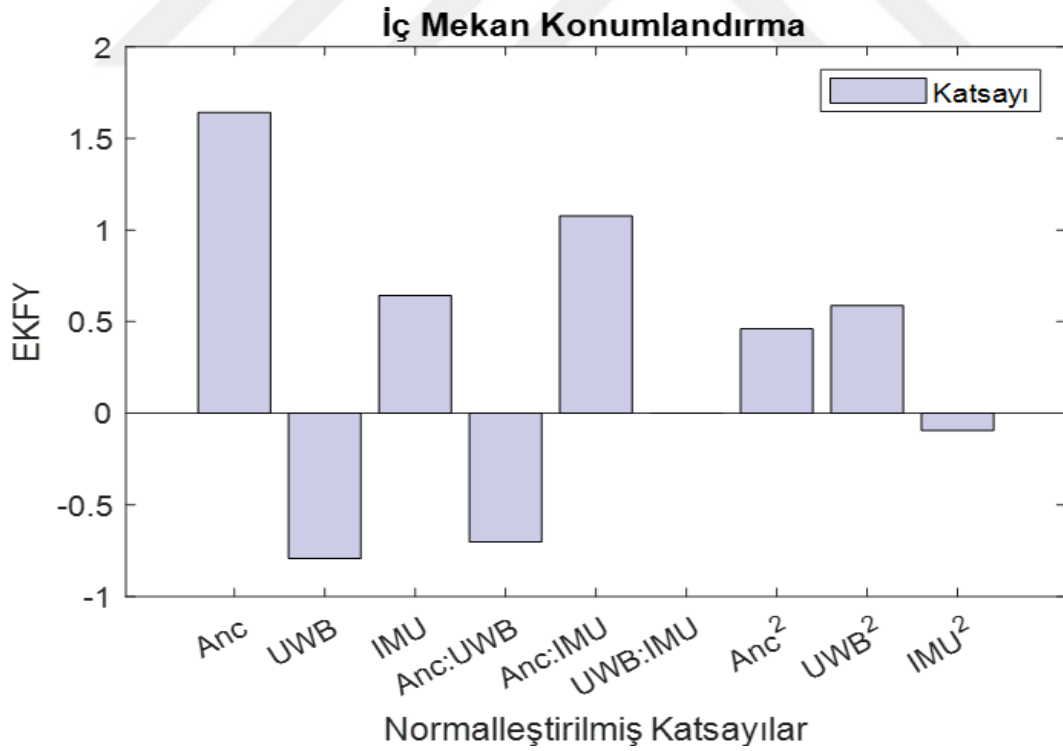
$$UKFX = \beta_{0k} + ANC * \beta_{1k} - UWB * \beta_{2k} - IMU * \beta_{3k} + ANC * UWB * \beta_{4k} - ANC * IMU * \beta_{5k} + ANC^2 * \beta_{6k} - UWB^2 * \beta_{7k} - IMU^2 * \beta_{8k} + \varepsilon_{0k} \quad (4.3)$$

$$UKFY = \beta_{0k} + ANC * \beta_{1k} - UWB * \beta_{2k} - IMU * \beta_{3k} + ANC * UWB * \beta_{4k} - ANC * IMU * \beta_{5k} + ANC^2 * \beta_{6k} + UWB^2 * \beta_{7k} - IMU^2 * \beta_{8k} + \varepsilon_{0k} \quad (4.4)$$

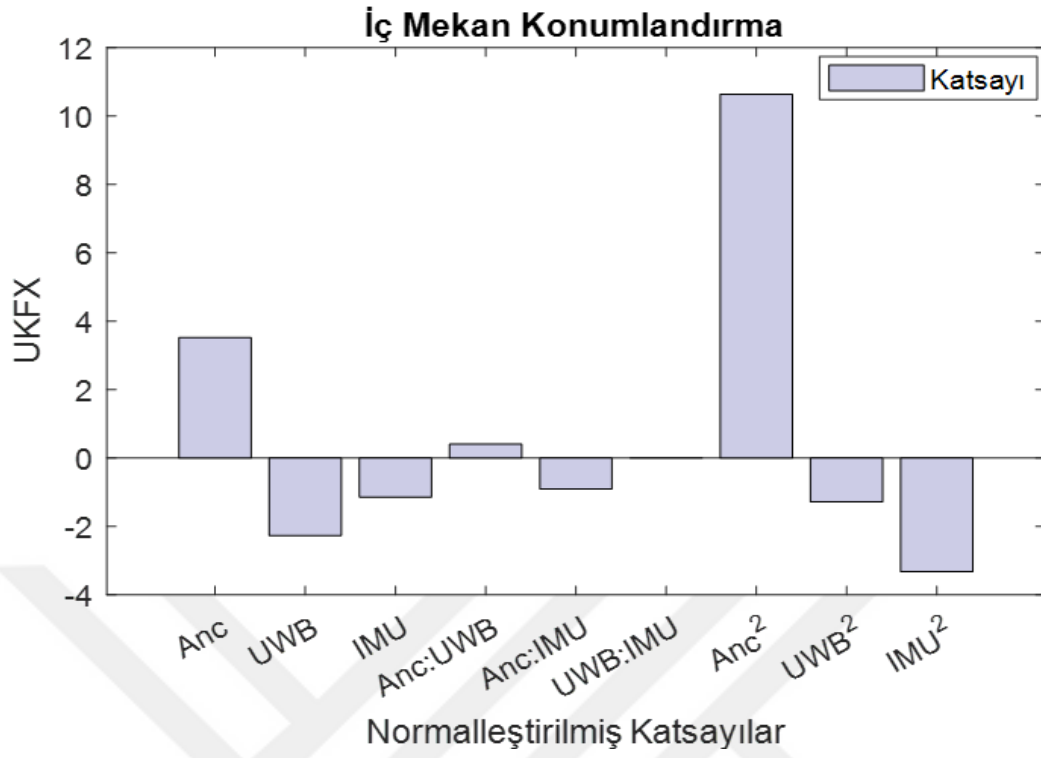
Doğrusal olmayan modelin denklemlerinde yer alan katsayıların tahmini ile ilgili bir çalışma yapılarak bu katsayı değerleri çubuk grafiği ile ifade edilmiştir. Grafikler incelendiğinde genellikle anchor sayısının daha hassas bir konum için baskın parametre olduğu görülmektedir.



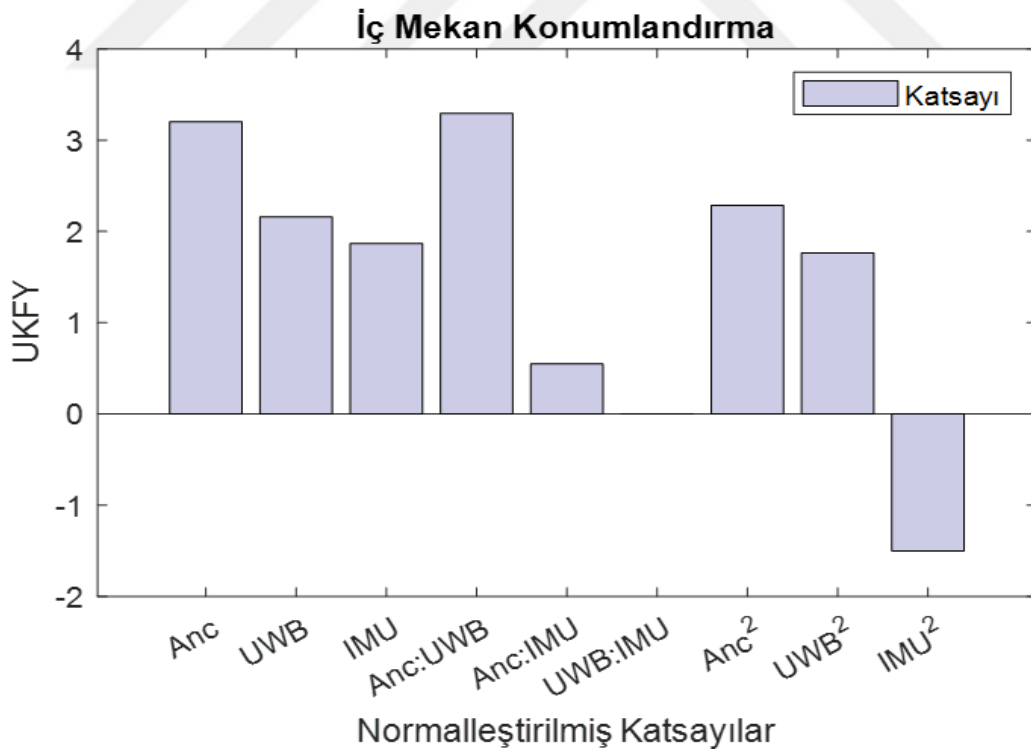
Şekil 4.8 x Eksenindeki Genişletilmiş Kalman Filtre ile Normalleştirilmiş Katsayıların İlişkisi



Şekil 4.9 y Eksenindeki Genişletilmiş Kalman Filtre ile Normalleştirilmiş Katsayıların İlişkisi

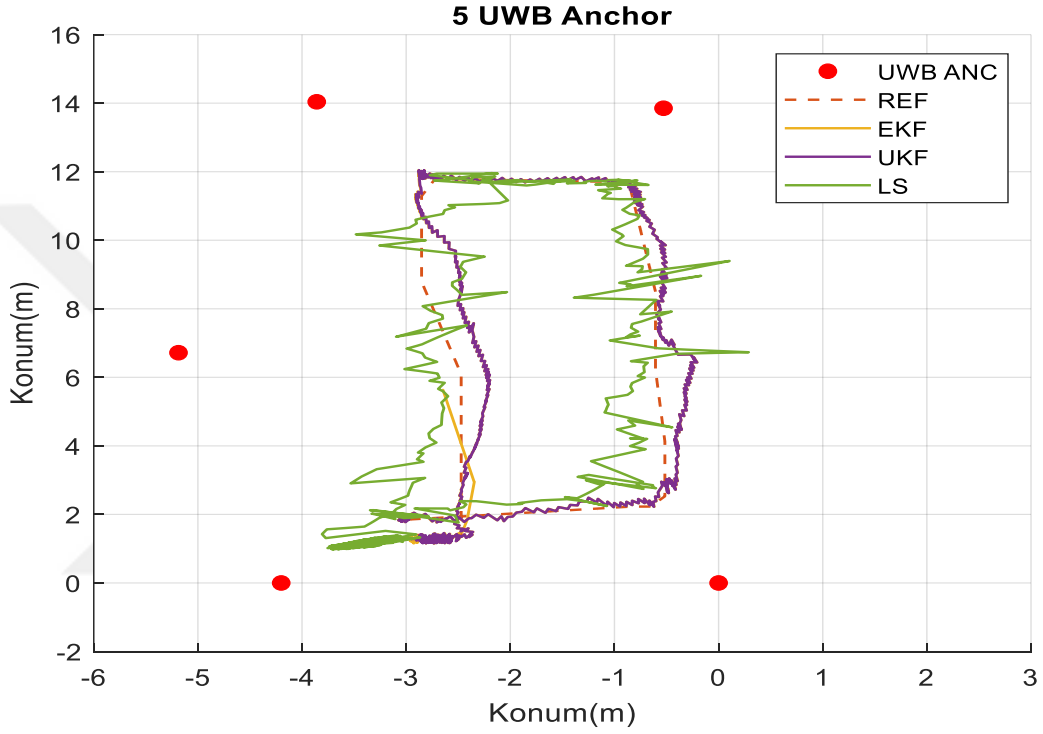


Şekil 4.10 x Eksenindeki Kokusuz Kalman Filtre ile Normalleştirilmiş Katsayıların İlişkisi

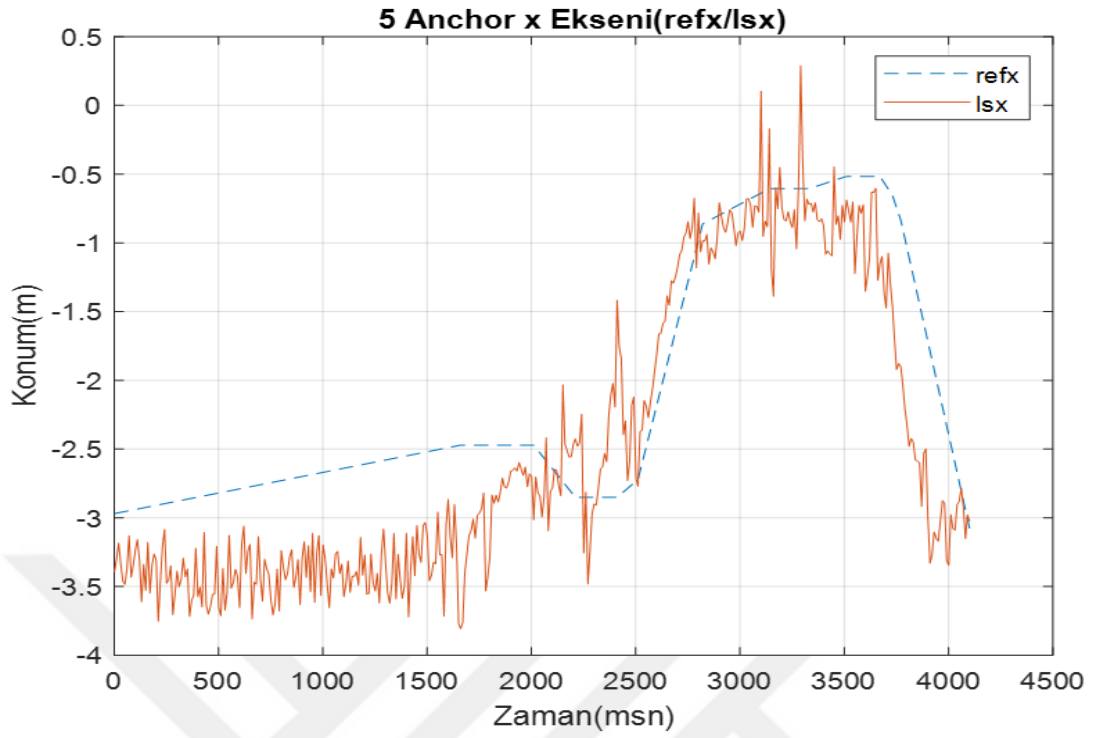


Şekil 4.11 y Eksenindeki Kokusuz Kalman Filtre ile Normalleştirilmiş Katsayıların İlişkisi

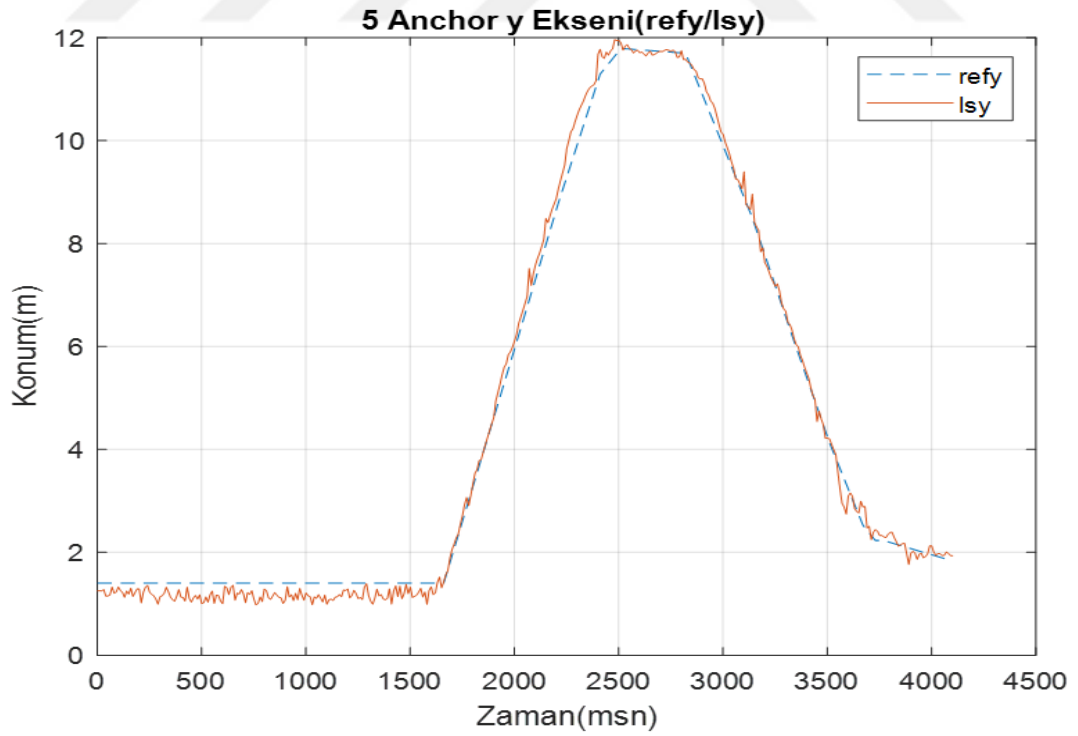
Optimal parametre değerleri belirlendikten sonra sistem, bu değerler ile yeniden kurulmuştur. Elde edilen sonuçlar, EKF ve UKF filtrelerinin BBD tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırma, filtrelerin performansını ve doğruluğunu belirlemek amacıyla yapılmıştır. Test sonuçları grafikler ile ifade edilmiştir. Box- Behnken tasarım sonuçları ile geręek sistem sonuçlarının tutarlı olduğu saptanmıştır.



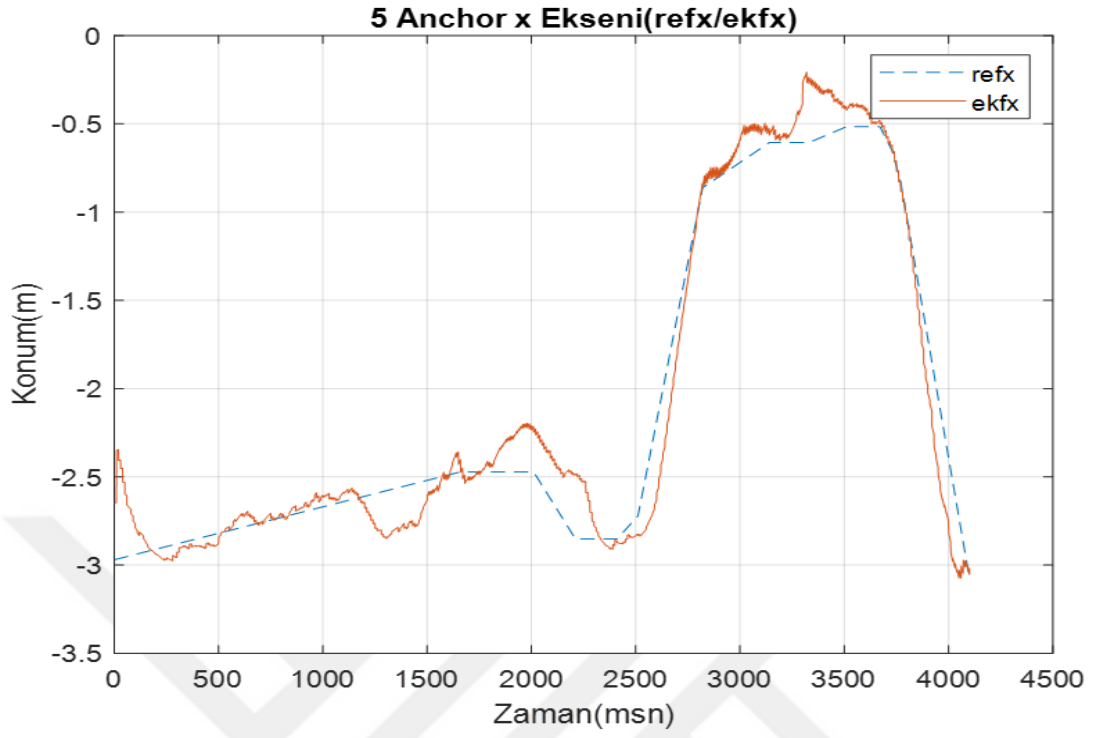
Şekil 4.12 5 UWB Anchor ile Konum Tahmin Sonuçlarını Kıyaslama



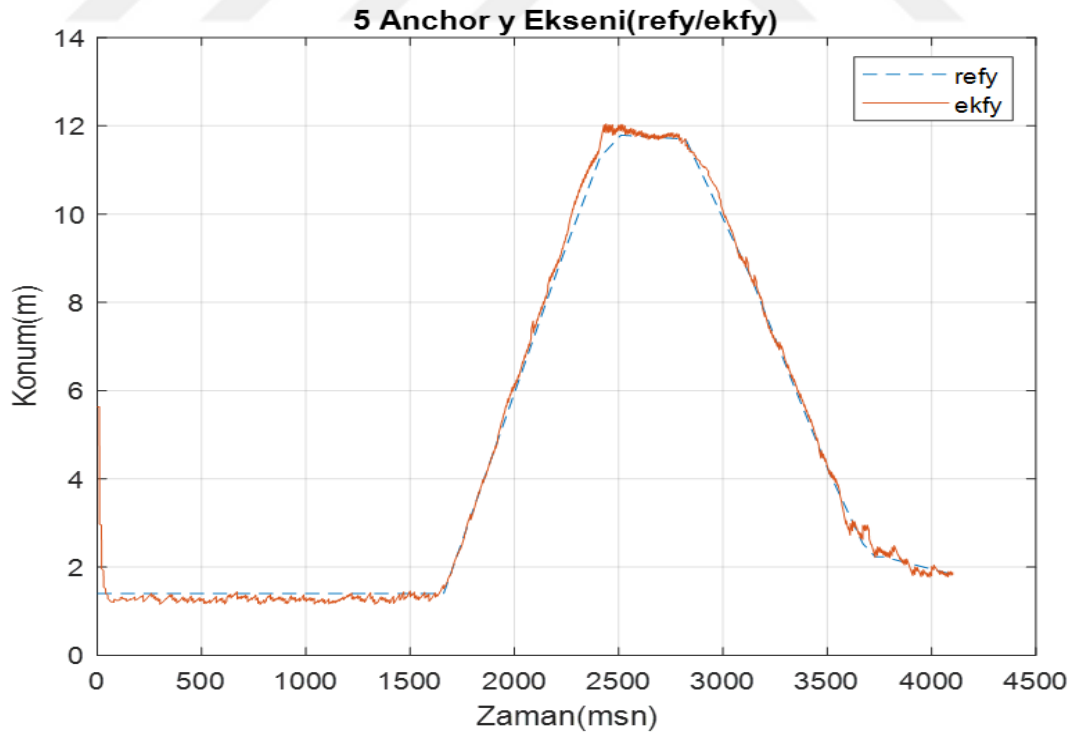
Şekil 4.13 5 UWB Anchor x Eksenı Referans Konum ve En Küçük Kareler Yöntemi Kıyaslama



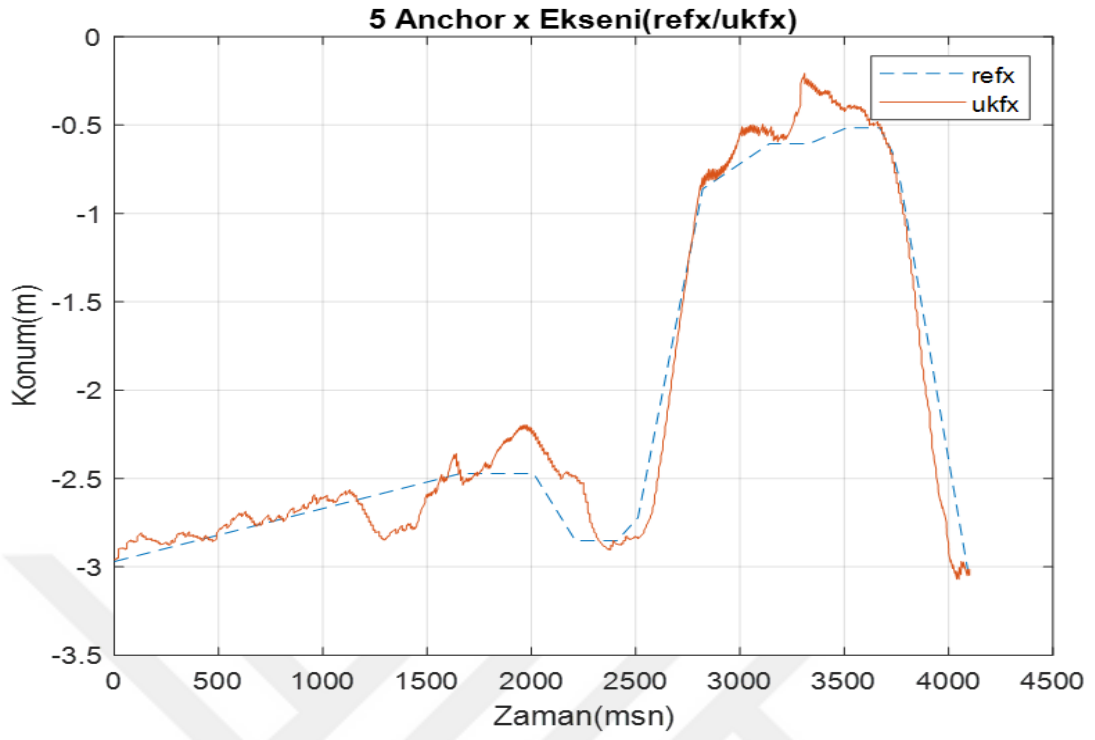
Şekil 4.14 5 UWB Anchor y Eksenı Referans Konum ve En Küçük Kareler Yöntemi Kıyaslama



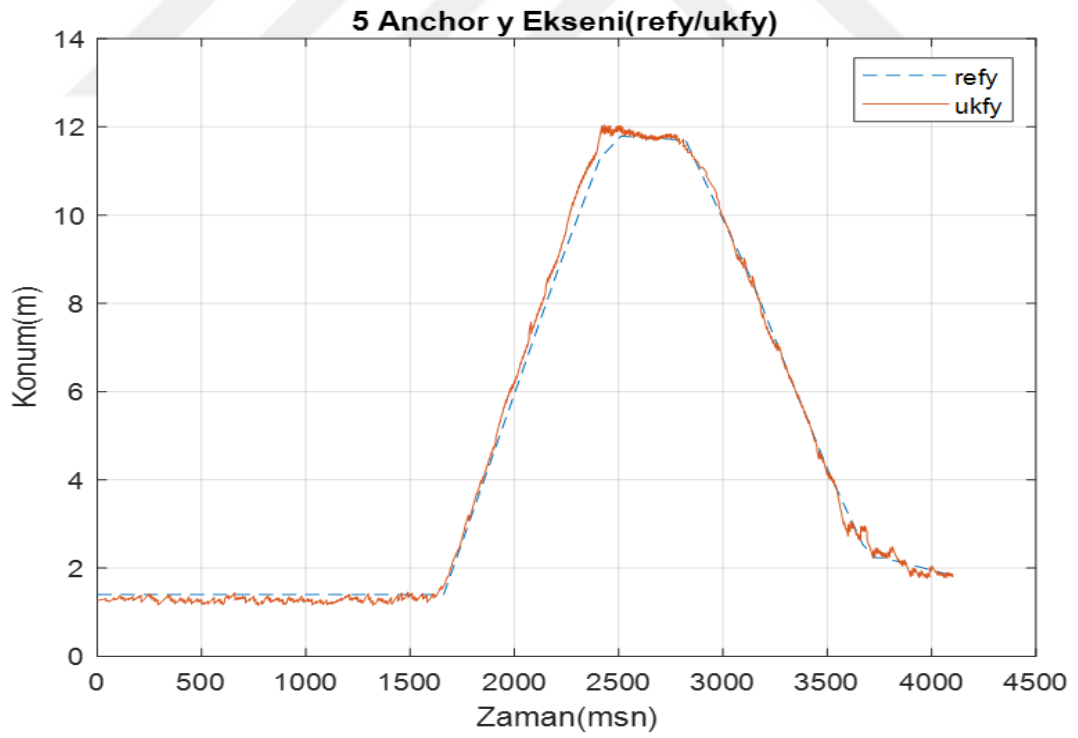
Şekil 4.15 6 UWB Anchor x Eksen Referans Konum ve Genişletilmiş Kalman Filtre Kıyaslama



Şekil 4.16 6 UWB Anchor y Eksen Referans Konum ve Genişletilmiş Kalman Filtre Kıyaslama



Şekil 4.17 6 UWB Anchor x Eksenı Referans Konum ve Koksuz Kalman Filtre Kıyaslama



Şekil 4.18 6 UWB Anchor y Eksenı Referans Konum ve Koksuz Kalman Filtre Kıyaslama

5. SONUÇ

Bu çalışma, iç mekan konumlandırma sistemleri için UWB-IMU sensörlerini kullanarak Deney Tasarımı (DoE) ve sensör füzyon tekniklerinin uygulanmasını incelemiştir. İç mekan konumlandırmada UWB'nin kullanılması, NLOS ve çoklu yol etkileri gibi çevresel zorluklar nedeniyle ölçüm hatalarına yol açar, bu da konum tahmini hata oranını artırır. Sensör füzyonunun bu hataları azaltması beklenir. Bu çalışma, mevcut literatürden farklı olarak, IMU periyodu, UWB periyodu ve UWB Anchor sayısı gibi parametrelerin etkisini araştırarak yeni bir yaklaşım sunmuştur. Deneysel bulgulara dayanarak, optimal parametre yapılandırmaları belirlenmiş ve etkinliklerini değerlendirmek için doğrusal regresyon analizi yapılmıştır.

UWB Tag ve Anchor cihazları arasında TWR iletişim yöntemine dayalı mesafe ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu ölçümler, en küçük kareler yöntemiyle konumlandırma için kullanılmıştır. IMU sensöründen elde edilen jiroskop ve ivmeölçer verileri, navigasyon çerçevesindeki hareketi temsil etmek için ZYX Euler açı seti kullanılarak koordinat dönüşümüne tabi tutulmuştur. Koordinat dönüşümünden sonra elde edilen gürültülü verileri iyileştirmek için, verilere EKF ve UKF'ye beslenmeden önce bir alçak geçiren filtre uygulanmıştır. EKF ve UKF uygulamalarında IMU verileri tahmin denklemlerinde kullanılırken, UWB ölçümleri güncelleme denklemlerinde kullanılmıştır. NLOS ortamında DoE'den elde edilen verilerle EKF ve UKF beslenmiştir. Tahmin edilen pozisyon ve referans pozisyon verileri karşılaştırılarak MAPE sonuçları elde edilmiştir.

Optimal parametre yapılandırma değeri, BBD yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, 5 UWB Anchor, 100 Hz IMU periyodu ve 10 Hz UWB periyodu kullanılarak yapılan sistem pozisyon testleri, EKF uygulamasında %8,7658 MAPEX değeri ve BBD ile %8,50264 MAPEX değeri ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu hesaplama BBD yöntemiyle yapılan hesaplamayla gerçek test sonuçları arasında uyumluluk göstermiştir. MAPEX değeri, NLOS ortamında kabul edilebilir düzeydedir. Ancak hata oranının Anchor sayısı üzerindeki etkisini gözlemlemek için altı UWB Anchor ile pozisyon testleri gerçekleştirilmiştir. Altı UWB Anchor kullanılarak yapılan testlerde EKF uygulamasında %5 MAPEX değeri elde edilmiştir. Aynı testler, yalnızca UWB sensörleri kullanılarak tekrarlanıp ve UWB kullanılarak yapılan pozisyonlama işleminde MAPEX değeri %31,2805 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, sensör füzyon

algoritmasının NLOS ortamında konum tahmininde hata oranını düzelttiğini göstermiştir.

Çalışmanın ileri aşamalarında, deney tasarımının, UWB sistem performansı üzerinde derinlemesine bir etki analizi gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bu aşamada, geniş bir parametre yelpazesi kullanılarak, deney tasarımları yenilenecek ve optimizasyon süreçleri bir kez daha ele alınacaktır.

UWB veri gücü, sinyalin alıcı tarafından ne kadar başarıyla algılandığı konusunda kritik bir rol oynamaktadır. Bu parametrede dengenin sağlanması, enerji tüketimi ile sinyal gücü arasında bir pazarlık yaratır: düşük güç, enerji tüketimini azaltırken sinyal kaybı riskini artırır, tersi ise yüksek güç durumunda geçerlidir. Bu nedenle, optimal bir enerji-verimlilik denge noktasının belirlenmesi, UWB sistemlerin sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmezdir.

Bant genişliği ise hem veri iletim hızını hem de çözünürlüğü direkt olarak etkilemektedir. Geniş bir bant kullanımı, daha yüksek veri iletim oranlarına olanak tanır; ancak bu durum, potansiyel olarak artan parazit seviyelerini de beraberinde getirir. Dolayısıyla, ideal bir bant genişliği seçimi, parazitlere karşı koruma ve veri iletim hızı arasında bir denge kurmayı gerektirir.

Frekans aralığı da çevresel etkilere karşı duyarlılık açısından önemli bir parametredir. Diferansiyel frekans aralıklarının incelenmesi, kullanım senaryolarına göre optimal frekans seçimini mümkün kılacaktır.

UWB verici/alıcı anten kazancı da sinyalin odaklanma seviyesini ve erişim menzilini etkiler. Bu, UWB sinyallerinin hangi mesafelere etkili bir şekilde iletebileceği konusunda bir kriter oluşturur, dolayısıyla optimal anten kazancının belirlenmesi, sistem performansını maksimize etmek için stratejik bir öneme sahiptir.

Sonuç olarak, bu parametrelerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, UWB sistem performansını etkileyen birçok değişkenin optimal kombinasyonunu belirleyecektir. Bu nedenle, bu değişkenlerin optimal kombinasyonunu belirlemek için DoE yeniden yapılandırılarak kapsamlı bir optimizasyon çalışmasına zemin hazırlanabilir.

Bir sonraki çalışma için önerilen DoE parametreleri ve seviyeleri şu şekildedir:

- UWB Veri Gücü: Düşük, Orta, Yüksek
- UWB Bant Genişliği: Dar, Orta, Geniş
- Frekans Aralığı: 3.1-4.8 Ghz, 4.8-6.0 GHz, 6.0-8.5 GHz
- UWB Verici/Alıcı Anten Kazancı: Düşük, Orta, Yüksek
- IMU Periyot: Düşük, Orta, Yüksek
- UWB Periyot: Düşük, Orta, Yüksek
- Ortam Türü: Doğrudan Görüşü (LOS), NLOS, Karma

Bu parametrelerin her biri için $3^7 = 2187$ olası kombinasyon bulunmaktadır. Bununla birlikte, bu tezde uygulandığı gibi Taguchi'nin ortogonal matrisi metodolojisi kullanılarak, deney sayısı azaltılabilir ve daha verimli bir deney tasarımı elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] L. Yao, Y. W. A. Wu, L. Yao, and Z. Z. Liao, "An integrated IMU and UWB sensor based indoor positioning system," *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN 2017*, vol. 2017-January, pp. 1–8, Nov. 2017, doi: 10.1109/IPIN.2017.8115911.
- [2] A. Quyum, "Guidelines for Indoor Positioning," Master's Thesis, Luleå University of Technology, 2013.
- [3] R. Mautz, "Indoor positioning technologies," Habilitation Thesis, ETH Zurich Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2012. doi: 10.3929/ETHZ-A-007313554.
- [4] Y. Zhong, T. Liu, B. Li, L. Yang, and L. Lou, "Integration of UWB and IMU for precise and continuous indoor positioning," *Proceedings of 5th IEEE Conference on Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services, UPINLBS 2018*, Dec. 2018, doi: 10.1109/UPINLBS.2018.8559718.
- [5] S. Jang, B. An, S. Yoon, and K. Lim, "Research on the Indoor Environment Positioning Algorithm Using Sensor Fusion," *2023 International Conference on Electronics, Information, and Communication, ICEIC 2023*, pp. 1–4, 2023, doi: 10.1109/ICEIC57457.2023.10049976.
- [6] Z. Zuo, K. Li, P. Yang, and S. Zheng, "Indoor UAV Integrated Navigation Technology Based on UWB and IMU," *Proceedings - 2022 Chinese Automation Congress, CAC 2022*, vol. 2022-January, pp. 6594–6599, 2022, doi: 10.1109/CAC57257.2022.10055191.
- [7] W. Guosheng, Q. Shuqi, L. Qiang, W. Heng, L. Huican, and L. Bing, "UWB and IMU System Fusion for Indoor Navigation," *Chinese Control Conference, CCC*, vol. 2018-July, pp. 4946–4950, Oct. 2018, doi: 10.23919/CHICC.2018.8483323.
- [8] Ian. Oppermann, Matti. Hämäläinen, and Jari. Iinatti, *UWB theory and applications*. WILEY, 2005. Accessed: Sep. 09, 2023
- [9] P. Dabove, V. Di Pietra, M. Piras, A. A. Jabbar, and S. A. Kazim, "Indoor positioning using Ultra-wide band (UWB) technologies: Positioning accuracies and sensors' performances," *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, PLANS 2018 - Proceedings*, pp. 175–184, Jun. 2018, doi: 10.1109/PLANS.2018.8373379.
- [10] B. V. Krishnaveni, K. S. Reddy, and P. R. Reddy, "Indoor Tracking by Adding IMU and UWB Using Unscented Kalman Filter," *Wirel Pers Commun*, vol. 123, no. 4, pp. 3575–3596, Apr. 2022, doi: 10.1007/S11277-021-09304-3.
- [11] H. Xing, Z. Chen, H. Yang, C. Wang, Z. Lin, and M. Guo, "Self-Alignment MEMS IMU Method Based on the Rotation Modulation Technique on a Swing Base," *Sensors 2018, Vol. 18, Page 1178*, vol. 18, no. 4, p. 1178, Apr. 2018, doi: 10.3390/S18041178.
- [12] von Junchuan Zhou, "Low-cost MEMS-INS/GPS Integration using Nonlinear Filtering Approaches," Doktor der Ingenieurwissenschaften , Universität Siegen Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät , 2013.
- [13] O. J. Woodman, "An introduction to inertial navigation," *University of Cambridge*, 2007,
- [14] M. S. Grewal, L. R. Weill, and A. P. Andrews, *Global Positioning Systems, Inertial*

- Navigation, and Integration*. Wiley, 2000. doi: 10.1002/0471200719.
- [15] W. M. F. Al-Masri, M. F. Abdel-Hafez, and M. A. Jaradat, "Inertial Navigation System of Pipeline Inspection Gauge," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 28, no. 2, pp. 609–616, Mar. 2020, doi: 10.1109/TCST.2018.2879628.
 - [16] S. Savazzi, F. Che, Q. Z. Ahmed, P. I. Lazaridis, P. Sureephong, and T. Alade, "Indoor Positioning System (IPS) Using Ultra-Wide Bandwidth (UWB)—For Industrial Internet of Things (IIoT)," *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 5710, vol. 23, no. 12, p. 5710, Jun. 2023, doi: 10.3390/S23125710.
 - [17] K. Al Nuaimi and H. Kamel, "A survey of indoor positioning systems and algorithms," *2011 International Conference on Innovations in Information Technology, IIT 2011*, pp. 185–190, 2011, doi: 10.1109/INNOVATIONS.2011.5893813.
 - [18] J. Sangthong, P. Dokpikul, and S. Promwong, "Indoor Positioning Based on IEEE 802.15.4a Standard Using Trilateration Technique and UWB Signal," *Proceedings in progress in electromagnetics research symposium*, 2012.
 - [19] A. Alarifi *et al.*, "Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances," *Sensors* 2016, Vol. 16, Page 707, vol. 16, no. 5, p. 707, May 2016, doi: 10.3390/S16050707.
 - [20] Y. Li and K. Yan, "Indoor Localization Based on Radio and Sensor Measurements," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 22, pp. 25090–25097, Nov. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3049154.
 - [21] A. Yassin *et al.*, "Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 1327–1346, Apr. 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2632427.
 - [22] Z. Qin *et al.*, "Compensating the NLoS Occlusion Errors of UWB for Pedestrian Localization With MIMU," *IEEE Sens J*, vol. 23, no. 11, pp. 12146–12158, Jun. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3266433.
 - [23] X. Yang, J. Wang, D. Song, B. Feng, and H. Ye, "A Novel NLOS Error Compensation Method Based IMU for UWB Indoor Positioning System," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 9, pp. 11203–11212, May 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3061468.
 - [24] Y. Deng, H. Ai, Z. Deng, W. Gao, and J. Shang, "An Overview of Indoor Positioning and Mapping Technology Standards," *Standards* 2022, Vol. 2, Pages 157-183, vol. 2, no. 2, pp. 157–183, May 2022, doi: 10.3390/STANDARDS2020012.
 - [25] A. Alarifi *et al.*, "Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, p. 707, May 2016, doi: 10.3390/S16050707.
 - [26] D. Feng *et al.*, "An Adaptive IMU/UWB Fusion Method for NLOS Indoor Positioning and Navigation," *IEEE Internet Things J*, vol. 10, no. 13, pp. 11414–11428, Jul. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3245144.
 - [27] F. Liu, X. Li, J. Wang, and J. Zhang, "An adaptive UWB/MEMS-IMU complementary kalman filter for indoor location in NLOS environment," *Remote Sens (Basel)*, vol. 11, no. 22, p. 2628, Nov. 2019, doi: 10.3390/RS11222628.
 - [28] S. Akleylek, E. Kiliç, B. Söylemez, T. E. Aruk, and A. Ç. Yildirim, "Kapalı Mekan Konumlandırma Üzerine Bir Çalışma," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*,

- vol. 8, no. 5, pp. 90–105, 2020, doi: 10.21923/jesd.831775.
- [29] J. Yan, C. C. J. M. Tiberius, G. J. M. Janssen, P. J. G. Teunissen, and G. Bellusci, “Review of range-based positioning algorithms,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 28, no. 8 PART 2, pp. 2–27, 2013, doi: 10.1109/MAES.2013.6575420.
 - [30] A. A. Başak, “İzgara Tabanlı Parmak İzi Algoritmalarıyla Kapalı Alan Konumlandırma Optimizasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.
 - [31] A. Nouredin, T. B. Karamat, and J. Georgy, *Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-30466-8/COVER.
 - [32] Yücel M, “Mems Duyargalı Eylemsizliğe Dayalı Seyrüsefer Dizgesi Geliştirilmesi,” İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009
 - [33] A.-N. Ahmed, K. Jumaah, and W. Hashim, “Enhanced Least Square Method for Indoor Positioning System Using UWB Technology,” *Webology*, vol. 19, no. 1, 2022, doi: 10.14704/WEB/V19I1/WEB19251.
 - [34] A. N. A. K. Jumaah, W. Hashim, and A. K. Alami, “An effective indoor positioning system by modified linearized least square approach using UWB technology,” *Applied Geomatics*, 2023, doi: 10.1007/S12518-023-00494-Y.
 - [35] C. L. Sang, M. Adams, T. Hörmann, M. Hesse, M. Porrmann, and U. Rückert, “An Analytical Study of Time of Flight Error Estimation in Two-Way Ranging Methods,” *IPIN 2018 - 9th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp. 1–8, Nov. 2018, doi: 10.1109/IPIN.2018.8533697.
 - [36] R. S. Kulikov, “Integrated UWB/IMU system for high rate indoor navigation with cm-level accuracy,” *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 - Proceedings*, vol. 2018-March, pp. 1–4, Apr. 2018, doi: 10.1109/MWENT.2018.8337235.
 - [37] J. Fu, Y. Fu, and D. Xu, “Application of an Adaptive UKF in UWB Indoor Positioning,” *Proceedings - 2019 Chinese Automation Congress, CAC 2019*, pp. 544–549, Nov. 2019, doi: 10.1109/CAC48633.2019.8996692.
 - [38] H. Sadruddin, A. Mahmoud, and M. Atia, “An Indoor Navigation System using Stereo Vision, IMU and UWB Sensor Fusion,” *Proceedings of IEEE Sensors*, vol. 2019-October, pp. 1–4, Oct. 2019, doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956942.
 - [39] K. Küçük, “Geniş bant konum belirleme sistemi performans analizi ve iyileştirilmesi,” *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 21, 2016, doi: 10.16984/saufenbilder.64863.
 - [40] H. Xu, Y. Li, and Y. Lu, “Research on Indoor AGV Fusion Localization Based on Adaptive Weight EKF Using Multi-sensor,” *JPhCS*, vol. 2428, no. 1, p. 012028, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2428/1/012028.
 - [41] T. Brovko, A. Chugunov, A. Malyshev, I. Korogodin, N. Petukhov, and O. Glukhov, “Complex Kalman Filter Algorithm for Smartphone-based Indoor UWB/INS Navigation Systems,” *Proceedings - 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021*, pp. 280–284, May 2021, doi: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455064.
 - [42] R. F. Gundy, “Low-Pass Filters, Martingales, and Multiresolution Analyses,” *Appl Comput Harmon Anal*, vol. 9, pp. 1898–1901, 2000, doi: 10.1006/acha.2000.0320.
 - [43] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, J. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, “A design of the low-

- pass filter using the novel microstrip defected ground structure,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 49, no. 1, pp. 86–93, 2001, doi: 10.1109/22.899965.
- [44] D. Feng, C. Wang, C. He, Y. Zhuang, and X. G. Xia, “Kalman-Filter-Based Integration of IMU and UWB for High-Accuracy Indoor Positioning and Navigation,” *IEEE Internet Things J*, vol. 7, no. 4, pp. 3133–3146, Apr. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2965115.
 - [45] Y. Zhong, T. Liu, B. Li, L. Yang, and L. Lou, “Integration of UWB and IMU for precise and continuous indoor positioning,” *Proceedings of 5th IEEE Conference on Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services, UPINLBS 2018*, Dec. 2018, doi: 10.1109/UPINLBS.2018.8559718.
 - [46] M. Zhao, T. Zhang, and D. Wang, “A high precision indoor positioning method based on UKF,” *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 42, no. 4, pp. 3639–3652, 2021, doi: 10.3233/JIFS-211810.
 - [47] M. Choi, M. Seo, H. S. Kim, and T. Seo, “UKF-Based Sensor Fusion Method for Position Estimation of a 2-DOF Rope Driven Robot,” *IEEE*, vol. 9, pp. 12301–12308, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3051404.
 - [48] J. Tian, L. Cong, and H. Qin, “A PDR Heading Estimation Method Based on Motion Mode Recognition Using Adaptive UKF,” *2022 IEEE 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2022, doi: 10.1109/IPIN54987.2022.9918133.
 - [49] Ö. Demir, B. Aksu, and Y. Özsoy, “The Use and Selection of Design of Experiments (DoE) in the Development of Drug Product Formulation,” *Marmara Pharm J*, vol. 21, no. 2, pp. 216–227, Apr. 2017, doi: 10.12991/MARUPJ.277719.
 - [50] T. X. Nguyen, H. L. T. Pham, T. T. Ngo, and P. X. Ong, “Preparation of oral curcumin delivery from 3D-nano-cellulose networks material produced by *Acetobacter Xylinum* using optimization technique,” *International Journal of Applied Pharmaceutics*, vol. 12, no. 2, pp. 47–52, Mar. 2020, doi: 10.22159/IJAP.2020V12I2.36627.
 - [51] Demir L, “İstatistiksel Deney Tasarımı Yöntemi Ve Bir Tekstil İşletmesinde Uygulanması,” Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2004.
 - [52] R. Davis, P. John, R. Davis, and P. John, “Application of Taguchi-Based Design of Experiments for Industrial Chemical Processes,” *Statistical Approaches With Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes*, Mar. 2018, doi: 10.5772/INTECHOPEN.69501.
 - [53] M. Nandhini, B. Suchithra, R. Saravanathamizhan, and D. G. Prakash, “Optimization of parameters for dye removal by electrooxidation using Taguchi Design,” *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 227–234, Dec. 2014, doi: 10.5599/JESE.2014.0056.
 - [54] Hernadewita, I. Rochmad, Hendra, Hermiyetti, and E. N. S. Yuliani, “An analysis of implementation of Taguchi method to improve production of pulp on hydropulper milling,” *International Journal of Production Management and Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 125–132, Jul. 2019, doi: 10.4995/IJPME.2019.10163.
 - [55] N. H. Abou-Taleb, D. R. El-Wasseef, D. T. El-Sherbiny, and S. M. El-Ashry, “Optimizing the spectrofluorimetric determination of cefdinir through a Taguchi experimental design approach,” *Luminescence*, vol. 31, no. 3, pp. 856–864, May 2016, doi: 10.1002/BIO.3042.

- [56] C. Hamzaçebi and C. Hamzaçebi, "Taguchi Method as a Robust Design Tool," *Quality Control - Intelligent Manufacturing, Robust Design and Charts*, Dec. 2020, doi: 10.5772/INTECHOPEN.94908.
- [57] Z. K. Kocabicak and U. Demir, "Design and optimization of an electromechanical actuator for the latch of a foldable vehicle seat," *Materials Testing*, vol. 62, no. 7, pp. 749–755, Nov. 2020, doi: 10.1515/MT-2020-620715.
- [58] R. V. A. De Lira and A. L. P. S. Campos, "Parameters optimization for rectangular and circular microstrip antennas using the Taguchi Method," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2017*, vol. 2017-January, pp. 1–5, Nov. 2017, doi: 10.1109/IMOC.2017.8121036.
- [59] A. Freddi and M. Salmon, "Introduction to the Taguchi method," *Springer Tracts in Mechanical Engineering*, pp. 159–180, 2019, doi: 10.1007/978-3-319-95342-7_7/COVER.
- [60] R. L. Plackett and J. P. Burman, "The Design Of Optimum Multifactorial Experiments," *Biometrika*, vol. 33, no. 4, pp. 305–325, 1946, doi: 10.1093/BIOMET/33.4.305.
- [61] S. A. Fraley *et al.*, "14.1: Design of Experiments via Taguchi Methods-Orthogonal Arrays".
- [62] I. E. Ben-Gal and S. Dror, "Taguchi Method for Off-Line Quality Control," *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, pp. 1–7, May 2016, doi: 10.1002/9781118445112.STAT03122.PUB2.
- [63] U. Demir, M. C. Aküner, U. Demir, and M. C. Aküner, "Using Taguchi method defining critical rotor pole data of LSPMSM considering the power factor and efficiency," *Tehnički vjesnik*, vol. 24, no. 2, pp. 347–353, Apr. 2017, doi: 10.17559/TV-20140714225453.
- [64] U. Demir, "IM to IPM design transformation using neural network and DoE approach considering the efficiency and range extension of an electric vehicle," *Electrical Engineering*, vol. 104, no. 2, pp. 1141–1152, Apr. 2022, doi: 10.1007/S00202-021-01378-3.
- [65] U. Demir and M. Caner Aküner, "Elektrikli bir araç için tekerlek içi asenkron motorun tasarım ve optimizasyonu," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 33, no. 4, pp. 1517–1530, Dec. 2018, doi: 10.17341/GAZIMMFD.416448.
- [66] U. Demir and Z. K. Kocabıçak, "Performance assessments of the material for the traction motor cores of an electric racing kart," *Materialpruefung/Materials Testing*, vol. 63, no. 6, pp. 519–528, Jun. 2021, doi: 10.1515/MT-2020-0085/MACHINEREADABLECITATION/RIS.
- [67] U. Demir, "Improvement of the power to weight ratio for an induction traction motor using design of experiment on neural network," *Electrical Engineering*, vol. 103, no. 5, pp. 2267–2284, Oct. 2021, doi: 10.1007/S00202-020-01204-2.
- [68] M. Gumustas, M. G. Caglayan, F. Onur, and S. A. Ozkan, "Simultaneous determination and validation of emtricitabine, rilpivirine and tenofovir from biological samples using LC and CE methods," *Biomedical Chromatography*, vol. 32, no. 4, p. e4158, Apr. 2018, doi: 10.1002/BMC.4158.
- [69] G. E. P. Box and D. W. Behnken, "Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables," *Technometrics*, vol. 2, no. 4, pp. 455–475, 1960, doi: 10.1080/00401706.1960.10489912.
- [70] D. Murat, "Kalite karakteristiğinin modellenmesinde tepki yüzeyi metodolojisi:

- Bir uygulama denemesi,” Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa, 2013.
- [71] X.-L. Yu and Y. He, “Application of Box-Behnken designs in parameters optimization of differential pulse anodic stripping voltammetry for lead(II) determination in two electrolytes,” *Sci Rep*, vol. 7, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-03030-2.
- [72] M. Bhavesh Patel, F. Shaikh, V. B. Patel, and N. Surti, “Application of Experiential Design for Framing Gastroretentive Microsponges of Glipizide: Screening of Critical Variables by Plackett-Burman Design and Optimization by Box-Behnken Design,” *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, vol. 55, pp. 966–978, 2021, doi: 10.5530/ijper.55.4.197.
- [73] S. Maleki Dizaj, F. Lotfipour, M. Barzegar-Jalali, M. H. Zarrintan, and K. Adibkia, “Application of Box–Behnken design to prepare gentamicin-loaded calcium carbonate nanoparticles,” *Artif Cells Nanomed Biotechnol*, vol. 44, no. 6, pp. 1475–1481, Aug. 2016, doi: 10.3109/21691401.2015.1042108.
- [74] S. Yıldız, “Hidrotermal yöntem kullanılarak sentezlenen nanoparçacıklar ile sulardan ağır metal gideriminin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [75] Havva. Türkyılmaz, “Kurşun iyonlarının kesikli adsorpsiyon prosesi ile gideriminin cevap yüzey yöntemiyle optimizasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2011