

Kapalı Alanlarda Hassas UWB Tabanlı Konumlandırma için Uyarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi

Abdulhamit SEVGİ^{1*}, Hasan Erdiñç KOÇER²

¹OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

²Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 08/02/2025
Revision: 08/05/2025
Accepted: 20/05/2025

Keywords

UWB
AEKF
Indoor Positioning
IMU
Global Positioning.

Makale Bilgisi

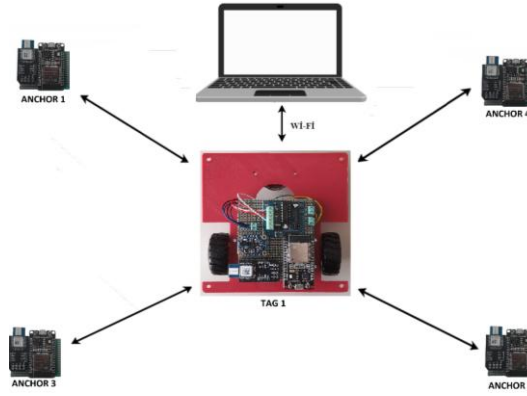
Araştırma makalesi
Başvuru: 08/02/2025
Düzeltilme: 08/05/2025
Kabul: 20/05/2025

Anahtar Kelimeler

UWB
AEKF
Kapalı Alan
Konumlandırma
IMU
Küresel Konumlandırma.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma, kapalı alanlarda UWB tabanlı konumlandırmada AEKF algoritması ile ölçüm gürültüsünü azaltarak doğruluğu artırmayı amaçlamaktadır. Sistem kurulumu, veri toplama, trilaterasyon, AEKF uygulaması ve performans değerlendirme adımlarından oluşur. Şekil A süreçleri görsel olarak özetlemektedir. This study aims to improve indoor UWB-based positioning accuracy by reducing measurement noise via the AEKF algorithm. The process includes system setup, data collection, trilateration, AEKF application, and performance evaluation. Figure A visually summarizes the sequential stages of the proposed approach.



Şekil A: Sistem Blok Diyagramı /Figure A: System Block Diagram

Önemli noktalar (Highlights)

- UWB tabanlı konumlandırmada ölçüm doğruluğunu artırmak için AEKF algoritması geliştirilmiştir. An AEKF algorithm was developed to improve measurement accuracy in UWB-based localization.
- AEKF, ölçüm gürültüsü ve çevresel belirsizlikleri dinamik şekilde modelleyerek adaptif filtreleme sağlamaktadır. AEKF provides adaptive filtering by dynamically modeling measurement noise and environmental uncertainties.
- Trilaterasyon yöntemi ile AEKF birlikte kullanılarak konum tahmin performansı iyileştirilmiştir. Localization performance is enhanced by combining trilateration with AEKF.
- Sistem, mobil robot üzerinde gerçek zamanlı koşullarda test edilmiştir. The system was tested in real-time conditions on a mobile robot.

Amaç (Aim): Bu çalışma, UWB tabanlı sistemlerde Uyarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi algoritması ile iç mekân konumlandırma doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır. This study aims to enhance indoor positioning accuracy in UWB-based systems using an Adaptive Extended Kalman Filter algorithm.

Özgünlük (Originality): Çalışmanın özgünlüğü, iç mekân senaryolarında Kalman yapısında gürültü kovaryanslarının dinamik olarak uyarlanması dayanmaktadır. The originality lies in the dynamic adaptation of noise covariances within the Kalman framework under real-world indoor scenarios.

Bulgular (Results): Deneyisel sonuçlar, AEKF'nin EKF ve filtresiz yöntemlere kıyasla konumlandırma hatalarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Experimental results show that AEKF significantly reduces localization errors compared to EKF and unfiltered methods.

Sonuç (Conclusion): AEKF, karmaşık iç mekân ortamlarında hassas konumlandırma için güçlü ve uyarlanabilir bir çözüm olduğunu kanıtlamıştır. AEKF has proven to be a robust and adaptable solution for accurate indoor positioning in complex environments.



Kapalı Alanlarda Hassas UWB Tabanlı Konumlandırma için Uyarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi

Abdulhamit SEVGİ^{1*} , Hasan Erdiç KOÇER²

¹OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

²Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/02/2025
Düzeltilme: 08/05/2025
Kabul: 20/05/2025

Anahtar Kelimeler

UWB
AEKF
Kapalı Alan
Konumlandırma
IMU
Küresel Konumlandırma.

Öz

Kapalı mekanlarda Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) gibi teknolojilerin yetersizliği, robotik sistemlerin konum belirleme süreçlerinde alternatif yöntemlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu alanda, Ultra Geniş Bant (UWB), Wi-Fi Tabanlı Konumlandırma Sistemleri, Bluetooth Düşük Enerji (BLE) işaretçileri, Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID), ultrasonik konumlandırma ve görsel tabanlı konumlandırma gibi teknolojiler kullanılmaktadır. UWB teknolojisi konumlandırma için yaygın olarak kullanılmasına rağmen, çok yönlü yayılım, görüş hattı engelleri (NLOS), elektromanyetik girişim ve sensör gürültüsü gibi etkenler nedeniyle konum doğruluğunda dalgalanmalar ve sapmalar meydana gelmektedir. Bu çalışmada, bu sorunları gidermek amacıyla Uyarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi (AEKF) tabanlı bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem, UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinde karmaşık sistem gürültüsü ve eksik ölçüm bilgileri durumunda veri bütünlüğünü koruyarak sistemden toplanan UWB ve Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU) verilerine AEKF uygulayarak konumlandırma performansını artırmaktadır. Sistemin deneysel çalışmaları bir mobil robot aracılığıyla AEKF, Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ve filtresiz UWB ölçümleri olarak yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, AEKF'nin daha yüksek konumlandırma doğruluğu sağladığını ve gerçek zamanlı çalışabilirlik sunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, AEKF'nin etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Adaptive Extended Kalman Filter for Precise UWB-Based Localization in Indoor Areas

Article Info

Research article
Received: 08/02/2025
Revision: 08/05/2025
Accepted: 20/05/2025

Keywords

UWB
AEKF
Indoor Positioning
IMU
Global Positioning.

Abstract

The inadequacy of technologies such as Global Positioning System (GPS) in indoor spaces necessitates the development of alternative methods in the location determination processes of robotic systems. In this field, technologies such as Ultra Wide Band (UWB), Wi-Fi Based Positioning Systems, Bluetooth Low Energy (BLE) beacons, Radio Frequency Identification (RFID), ultrasonic positioning and visual-based positioning are used. Although UWB technology is widely used for positioning, fluctuations and deviations in location accuracy occur due to factors such as multipath propagation, line of sight obstacles (NLOS), electromagnetic interference and sensor noise. In this study, an Adaptive Extended Kalman Filter (AEKF) based method is proposed to eliminate these problems. The proposed method increases the positioning performance by applying AEKF to UWB and Inertial Measurement Unit (IMU) data collected from the system while preserving data integrity in case of complex system noise and incomplete measurement information in UWB-based positioning systems. Experimental studies of the system were conducted and compared as AEKF, Extended Kalman Filter (EKF) and filterless UWB measurements via a mobile robot. Experimental results show that AEKF provides higher positioning accuracy and offers real-time operability. These findings reveal that AEKF offers an effective solution.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İç mekân konumlandırma teknolojileri, son yıllarda artan endüstriyel ve ticari uygulamalar doğrultusunda büyük bir önem kazanmıştır. Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS), açık hava

ortamlarında yüksek doğrulukla konum belirleme imkânı sağlarken, kapalı alanlarda GNSS sinyallerinin zayıflaması veya tamamen kaybolması nedeniyle iç mekân konumlandırma sistemleri geliştirilmiştir [1]. Alışveriş merkezleri, havaalanları, depolar, fabrikalar, sağlık tesisleri ve

akıllı binalar gibi kapalı alanlarda, hassas konumlandırma ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için çeşitli teknolojik yaklaşımlar benimsenmiştir. Bu yöntemler arasında kızılötesi (IR) sensörler, optik tabanlı sinyal iletimi kullanarak konum belirleme sağlayan bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [2]. Kızılötesi sinyallerin engellerden geçememesi nedeniyle görüş hattı (LOS) gereksinimi vardır, bu da kullanım alanlarını sınırlayabilmektedir [3]. Ultrasonik sensörler, ses dalgaları kullanarak mesafe ölçümü yapabilen bir başka yöntemdir. Ancak, ses dalgalarının hava koşullarından ve çevresel gürültülerden etkilenmesi nedeniyle doğruluk seviyeleri değişkenlik gösterebilmektedir [4-6]. Radyo frekansı tabanlı yöntemler arasında RFID sistemleri, aktif ve pasif etiketler aracılığıyla nesnelerin ve bireylerin konumlarını belirlemek için kullanılmaktadır. RFID sistemleri, düşük maliyetli ve enerji verimli olmalarına rağmen, sınırlı menzil ve çok yollu yayılım etkileri nedeniyle konumlandırma hassasiyeti bakımından kısıtlamalara sahiptir [7-9]. BLE teknolojisi, düşük güç tüketimi ile kısa mesafelerde veri iletimi sağlayan bir kablosuz haberleşme yöntemidir. BLE tabanlı işaretçiler, sinyal gücü baz alınarak mesafe tahmini yapabilmekte ve iç mekanlarda konumlandırma sağlayabilmektedir [10,11]. Ancak, radyo sinyallerinin çevresel faktörlerden etkilenmesi nedeniyle, doğruluk zaman zaman değişebilmektedir. Wi-Fi tabanlı konumlandırma sistemleri, erişim noktalarına dayalı olarak konum belirlemektedir. Wi-Fi sinyallerinin güçlü ve yaygın olması avantaj sağlarken, ağ trafiği, elektromanyetik girişimler ve çok yollu yayılım etkileri nedeniyle konum doğruluğu değişkenlik gösterebilmektedir [12-14]. ZigBee tabanlı konumlandırma, düşük güç tüketimiyle sensör ağları oluşturarak nesnelerin yerlerini belirlemeyi amaçlayan bir yöntemdir [15]. Ancak, ZigBee sinyallerinin sınırlı menzili ve ağ altyapısının karmaşıklığı, geniş ölçekli iç mekân konumlandırma sistemlerinde kullanımını zorlaştırmaktadır.

Bu geleneksel yöntemler, çevresel etmenlerden kaynaklanan parazitler, çok yollu yayılım etkileri ve sinyal kayıpları nedeniyle yeterli hassasiyeti sağlayamamaktadır. Bu nedenle, UWB teknolojisi, düşük güç tüketimi, yüksek doğruluk, güçlü penetrasyon kabiliyeti ve düşük maliyetli donanım gereksinimleri sayesinde iç mekân konumlandırma sistemlerinde (IPS), öne çıkan bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. UWB teknolojisi, kısa süreli ve geniş bantlı radyo dalgaları kullanarak yüksek hızda veri iletimi ve düşük güç tüketimi ile iç mekanlarda etkin konumlandırma sağlamaktadır. Özellikle Wi-

Fi ve Bluetooth teknolojileri ile karşılaştırıldığında, UWB sinyalleri çevresel engelleri daha iyi aşabilmekte ve düşük sinyal girişimi ile yüksek doğrulukta mesafe ölçümü yapabilmektedir. Bu avantajları sayesinde, UWB teknolojisi sadece iç mekân konumlandırma alanında değil, aynı zamanda kablosuz algılayıcı ağları ve nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır [16-20].

UWB tabanlı IPS, temel olarak iki ana ölçüm yöntemi kullanılmaktadır. Bunlardan biri, İki Yönlü Mesafe Ölçümü (TWR) yöntemidir. TWR yöntemi, bir sabit referans noktası (çapa) ile hareketli bir cihaz (etiket) arasındaki sinyalin iletim süresini hesaplayarak mesafeyi belirler. TWR, çift yönlü sinyal alışverişi gerektirdiğinden, her bir cihaz için ek iletişim yükü oluşturmaktadır. Diğer yöntem ise Varış Zaman Farkı (TDOA) yöntemidir. TDOA yöntemi, birden fazla UWB anteninden gelen sinyallerin varış zaman farklarını hesaplayarak konum belirlemektedir. TDOA'nın en büyük avantajı, TWR yöntemine kıyasla daha az iletişim yüküne sahip olması ve çok sayıda cihazın aynı anda konumlandırılabilmesine olanak tanımasıdır [16-23]. Bu ölçüm yöntemleri, temel olarak etiket ile çapa arasındaki mesafenin belirlenmesine dayanır. Mesafe hesaplamalarının ardından, laterasyon veya trilaterasyon yöntemleri kullanılarak nesnenin konumu tahmin edilir. İç mekân konumlandırma sistemlerinde mesafe ölçümü için dört temel yöntem bulunmaktadır: Varış Zamanı (TOA), TDOA, Alınan Sinyal Gücü (RSS) ve Varış Açısı (AOA). Her bir yöntem, ölçüm prensipleri ve performans kriterleri açısından farklı avantajlar ve dezavantajlara sahiptir [16-18].

Bir IPS, daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlamak amacıyla tek bir yöntem kullanabileceği gibi hibrit bir yaklaşım da benimseyebilir. TOA ve TDOA yöntemleri, sinyalin iletilmesi ve alınması arasındaki zaman farkına dayalı olarak mesafeyi belirlediğinden, UWB teknolojisinin sunduğu yüksek zaman çözünürlüğü avantajından faydalanarak hassas konum tahmini yapılmasını sağlar. Bu nedenle, TOA ve TDOA, genellikle mesafe tahmini için en sık kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Ancak, UWB konumlandırma sistemlerinde doğruluğu etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. NLOS koşulları, sinyalin doğrudan hareketli cihaza ulaşmasını engelleyerek ölçüm hatalarına neden olmaktadır. Ayrıca, çok yollu yayılım etkisi, sinyalin farklı yüzeylerden yansyıp birden fazla rotadan ulaşmasına sebep olarak hatalı mesafe ölçümlerine yol açmaktadır. Bu tür hata kaynakları, iç mekân konumlandırma sistemlerinin güvenilirliğini ve

doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinde karşılaşılan temel hata türleri arasında sistematik hatalar (bias), aykırı değerler (outliers) ve zamanlama hataları bulunmaktadır. Sistematik hatalar, UWB antenlerinin yönelimi, elektromanyetik özellikleri ve cihazların fiziksel yapısı nedeniyle ölçümlerde meydana gelen sapmalardır. Aykırı değerler ise çevresel etmenler ve radyo frekansı girişimleri nedeniyle hatalı ölçümlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Zamanlama hataları ise UWB sinyallerinin gönderilme ve alınma zamanlarındaki küçük belirsizlikler nedeniyle mesafe ölçümlerinin doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir [16-23]. Bu hataların giderilmesi için farklı istatistiksel ve makine öğrenimi tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Sinir ağları kullanılarak sistematik hatalar modellenilebilir ve düzeltilerek daha yüksek doğruluk elde edilebilir [24-25]. Bunun yanı sıra, Kalman Filtresi (KF) ve M-estimation gibi teknikler, aykırı değerleri filtreleyerek konumlandırma doğruluğunu artırmaktadır. Özellikle KF, zaman serisi verilerini kullanarak gürültüyü ve ölçüm hatalarını azaltmada etkili bir yöntemdir. KF, her güncellemede önceki tahmini ve mevcut ölçüm verilerini kullanarak en olası konum bilgisini hesaplamaktadır. Bunun yanında, M-

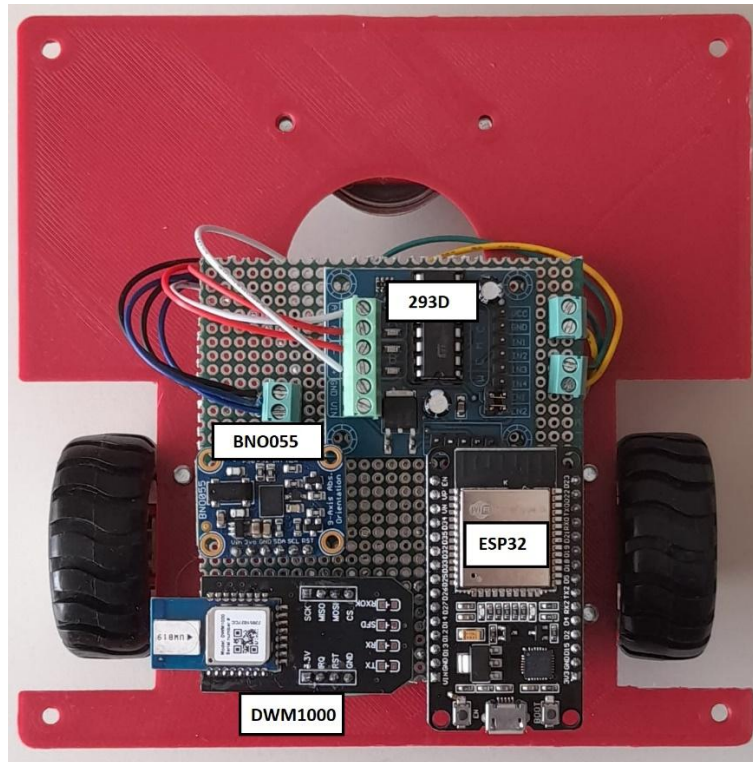
estimation yöntemi, aykırı ölçümleri tespit edip etkilerini en aza indirerek konumlandırma doğruluğunu artırmaktadır [16,18,23,26,27].

Bu çalışmada, TWR tabanlı UWB konumlandırma sistemlerinin doğruluğunu artırmaya yönelik yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yaklaşımda, geliştirilen AEKF karmaşık sistem gürültüsü ve eksik ölçüm bilgileri durumunda veri bütünlüğünü koruyarak filtreleme performansını artırmaktadır. Önerilen yöntem, hesaplama kaynakları kısıtlı olan küçük ölçekli mobil robotlarda gerçek zamanlı olarak test edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Sistem Bileşenleri (System Components)

Bu çalışmanın hareketli ve sabit deneyleri için geliştirilen robotun üç tekerleği vardır, arkadaki iki tekerlek aktif tahrik tekerlekleri ve öndeki döner tekerlek ise yardımcı tekerlektir. Robot 140X140 En X Boy olacak şekilde tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Şekil 1’de üretilen mobil robot görülmektedir.



Şekil 1. Üretilen Mobil Robot (The Manufactured Mobile Robot.)

Sistem içerisinde robotun hareketi ve sensörlerle iletişimin gerçekleştirilmesi için ESP32 wroom denetleyici kartı kullanılmaktadır. Bu cihazlar,

düşük güçlü kablosuz ağlarda çalışmaya izin veren Wi-Fi ve BLE iletişim protokolünü kullanır. Robot üzerinde 1 adet DWM1000 UWB modülü, 1 adet

BNO055 IMU, 1 adet 293D motor sürücü ve 2 adet N20 enkoderli motor kullanılmıştır. Sabit çapalar ise 1 adet ESP32 ve DWM1000 UWB modülünden oluşmaktadır. Robot üzerindeki ESP32 topladığı verileri Wi-Fi yoluyla anlık olarak filtrelemenin yapıldığı bilgisayara göndermektedir.

2.2. Uçuş Süresine Dayalı Mesafe Ölçüm

Yöntemi (Distance Measurement Method Based on Flight Time)

Kablosuz konumlandırma sistemlerinde, nesnelerin veya cihazların birbiriyle olan mesafesini belirlemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de Uçuş Süresi (ToF) dayalı ölçüm tekniğidir. ToF bir sinyalin kaynaktan hedefe ulaştığı sürenin ölçülmesi prensibine dayanır. Bazı kaynaklarda bunlar, ToF Tabanlı Konumlandırma Teknikleri veya Zamana Dayalı Konumlandırma Yöntemleri (Time-Based Positioning Methods) olarak da geçebilir. ToF tabanlı konumlandırma yöntemleri Tek Yönlü Mesafe Ölçümü (OWR), TWR olarak sınıflandırılabilir [16].

OWR yöntemi, iki düğüm çapa ve etiket arasında tek yönlü bir sinyal iletimi gerçekleştirerek mesafe ölçümü yapar. Bu yöntem, sinyalin iletim süresi ile mesafeyi belirler ve aşağıdaki adımları takip eder: Çapa, bir zaman damgası içeren sinyali etiket cihazına gönderir. Etiket, sinyali aldıktan sonra sinyalin varış zamanını kaydeder. Mesafe, sinyalin yayılma süresi (T_f) ile ışık hızının çarpılmasıyla hesaplanır:

$$d = c \cdot T_f \quad (1)$$

Burada:

d : İki cihaz arasındaki mesafe (metre cinsinden),

c : Işık hızı (yaklaşık 3.0×10^8 m/s),

T_f : Sinyalin uçuş süreci (saniye cinsinden).

OWR yöntemi, düşük iletişim yükü ve hızlı ölçüm yapabilme avantajlarına sahip olup, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda tercih edilebilmektedir. Ancak, bu yöntemin hassas ölçümler yapabilmesi için çapa ve etiket arasında yüksek doğrulukta saat senkronizasyonu gerekmektedir. Küçük zaman farkları dahi büyük mesafe hatalarına neden olabileceğinden, frekans sapmaları ölçüm doğruluğunu düşürebilmektedir. Ayrıca, iç mekân gibi çok yollu yayılımın söz konusu olduğu ortamlarda sinyal yansımaları nedeniyle ölçüm doğruluğu olumsuz etkilenebilmektedir [16]. TWR, OWR yönteminden farklı olarak iki cihaz arasında çift yönlü sinyal değişimi gerçekleştirerek mesafe hesaplamaya dayanmaktadır. TWR yönteminde, çapa cihazı içerisinde zaman damgası bulunan bir

sinyal gönderir ve etiket, bu sinyali aldıktan sonra belirli bir bekleme süresinin ardından çapaya bir yanıt gönderir. Çapa, sinyalin gidiş-geliş süresini ölçerek mesafe hesaplamasını gerçekleştirir. Tek yönlü sinyal yayılım süresi:

$$T_f = \frac{2T_{\text{round}} - T_{\text{reply}}}{2} \quad (2)$$

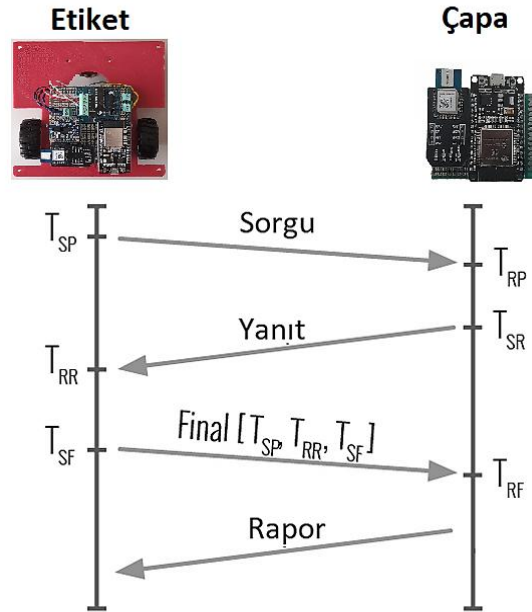
Burada:

T_{round} : Çapanın sinyali gönderme ve tekrar alma arasındaki toplam süre,

T_{reply} : Etiketın yanıt vermek için geçirdiği süre,

T_f : Sinyalin tek yönlü uçuş süreci.

Mesafe hesaplaması denklem 1'deki gibi yapılır. TWR yöntemi, saat senkronizasyonu gerektirmemesi açısından OWR yöntemine göre önemli bir avantaja sahiptir ve gidiş-dönüş sinyal süresi kullanılarak ölçüm doğruluğu artırılmaktadır. Şekil 2'de TWR mesafe ölçüm şeması verilmektedir.



Şekil 2. TWR Mesafe Ölçüm Şeması (TWR Distance Measurement Diagram)

Mesafe ölçümü, üç mesajın değişimiyle gerçekleştirilir. Etiket, bilinen bir Çapa'ya Poll mesajı göndererek süreci başlatır. Çapa, mesajın alım zamanını kaydeder ve belirlenen zamanda Yanıt mesajı ile geri döner. Etiket, Yanıt mesajını aldığı anda ilgili zaman damgasını kaydederek Son mesajı oluşturur ve Çapa'ya iletir. Çapa, Son mesajın alım zamanına ve içerdiği zaman bilgilerine dayanarak ToF hesaplar ve mesafeyi belirler. İsteğe bağlı olarak, bu mesafe bilgisi bir Rapor mesajı ile

etikete veya diğer UWB cihazlarına gönderilebilir. Bununla birlikte, çift yönlü mesaj alışverişi gerektirdiğinden, ağ üzerindeki bant genişliği tüketimini artırmakta ve özellikle yoğun iletişim gerektiren uygulamalarda ek yük oluşturmaktadır. Ayrıca, iletişim sürecinde oluşabilecek saat kaymaları ve frekans sapmaları ölçüm doğruluğunu etkileyebilmektedir [16,20].

2.3. Trilaterasyon Yöntemi (Trilateration Method)

Her bir çapa nokta, sabit konum bilgisine sahip olmakla birlikte etiket ile olan mesafe ölçümleri d_i ile temsil edilir. Her bir çapa için etiketin konumuyla olan ilişki, Öklidyen uzaklık kavramına dayalı olarak şu küre (2B uygulamada daire) denklemi ile ifade edilir:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 \quad (3)$$

Burada $(x_i - y_i)$ çapanın bilinen koordinatları, d_i ise ölçülen mesafedir. Çapa 0 referans alınarak diğer çapalarla karşılaştırma yapıldığında, iki denklemin farkı alınır; bu, kare terimlerin birbirini götürmesiyle lineer bir denklem sistemine dönüşür. Özellikle, çapa 0 ve i 'nci çapa için fark alınması sonucunda elde edilen denklem,

$$(x_i - x_0)x + (y_i - y_0)y = \frac{1}{2} [d_0^2 - d_i^2 + (x_i^2 - x_0^2) + (y_i^2 - y_0^2)] \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklem, her bir $i (i = 1, \dots, N - 1)$ için geçerli olup, elde edilen $N - 1$ denklem, matris gösterimi kullanılarak

$$Ap = b \quad (5)$$

haline getirilir. Burada, etiketin konum vektörü $p = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ iken, A matrisi, her satırda $[x_i - x_0 \ y_i - y_0]$ bileşenlerini içerir b vektörü ise,

$$b_i = \frac{1}{2} [d_0^2 - d_i^2 + (x_i^2 - x_0^2) + (y_i^2 - y_0^2)] \quad (6)$$

İfadesiyle tanımlanır. En küçük kareler yaklaşımına göre, sistemin çözümü

$$p = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (7)$$

olarak elde edilir. Bu formül, çapaların düzenine bağlı olarak sabit olan $A^T A$ matrisinin tersinin yalnızca bir kez hesaplanması avantajını da sunar.

Sonuç olarak, trilaterasyon yöntemi, ölçüm verileri ve çapa koordinatları arasındaki ilişkiyi lineerleştirerek etiketin konumunun en küçük kareler yöntemi ile belirlenmesine olanak tanır [17,18].

2.4. AEKF

Geleneksel Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF), doğrusal olmayan sistemlerin durum tahmini için kullanılan yaygın bir yaklaşımdır. Ancak, sabit sistem gürültüsü (Q) ve ölçüm gürültüsü (R) varsayımları, çevresel değişkenlikler ve sensör hataları nedeniyle filtrenin performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle AEKF, gürültü kovaryans matrislerini (Q ve R) zamanla dinamik olarak güncelleyerek filtreleme performansını iyileştirir. EKF, doğrusal olmayan sistemlerde durum tahminleri için öngörü ve güncelleme adımlarını gerçekleştirirken, süreç gürültüsü Q ve ölçüm gürültüsü R kovaryans matrislerini sabit kabul eder. Ancak, gerçek uygulamalarda sensör belirsizlikleri, çevresel değişkenlikler ve model hataları nedeniyle bu matrislerin uyarlanması gerekebilir. Bu amaçla AEKF, Q ve R'yi zaman içinde dinamik olarak güncelleyerek filtre performansını iyileştirir.

Sistem modelinde, durum vektörü x_k örneğin $x_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \dot{x}_k \\ \dot{y}_k \end{bmatrix}$ olarak tanımlanabilir. Durum geçişi, IMU'dan elde edilen ivme ölçümleri $u_k = \begin{bmatrix} a_{x,k} \\ a_{y,k} \end{bmatrix}$ kullanılarak,

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (8)$$

şeklinde modellenir, Burada $f(\cdot)$ fonksiyonu, klasik hareket denklemleri kullanılarak; örneğin

$$f(x_k, u_k) = \begin{bmatrix} x_k + \dot{x}_k \Delta t + \frac{1}{2} a_{x,k} \Delta t^2 \\ y_k + \dot{y}_k \Delta t + \frac{1}{2} a_{y,k} \Delta t^2 \\ \dot{x}_k + a_{x,k} \Delta t \\ \dot{y}_k + a_{y,k} \Delta t \end{bmatrix} \quad (9)$$

ifadesi ile tanımlanır. Ölçüm modeli ise, UWB tabanlı mesafe ölçümleri ile çapaların bilinen konumları arasındaki öklidyen uzaklıklar şeklinde,

$$z_{i,k} = h_i(x_k) + v_{i,k} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} + v_{i,k} \quad (10)$$

olarak ifade edilir. EKF algoritmasında, öncelikle öngörü adımında durum tahmini

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) \quad (11)$$

ve hata kovaryansı

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (12)$$

hesaplanır. Ölçüm güncelleme adımında ise, önlem (innovation)

$$\tilde{y}_k = z_k - h(\hat{x}_{k|k-1}) \quad (13)$$

ölçüm önlem kovaryansı

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (14)$$

Kalman kazancı

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (15)$$

durum güncellemesi

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \quad (16)$$

ve hata kovaryans güncellemesi

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (17)$$

hesaplanır. AEKF, bu temel EKF adımlarına ek olarak, gürültü kovaryans matrislerini adaptif olarak günceller. Ölçüm gürültüsü kovaryansı, önlem vektörünün gözlemlenen kovaryansı ile modelden beklenen kovaryans arasındaki fark kullanılarak,

$$R_k = \alpha_R R_{k-1} + (1 - \alpha_R) [\tilde{y}_k \tilde{y}_k^T - H_k P_{k|k-1} H_k^T] \quad (18)$$

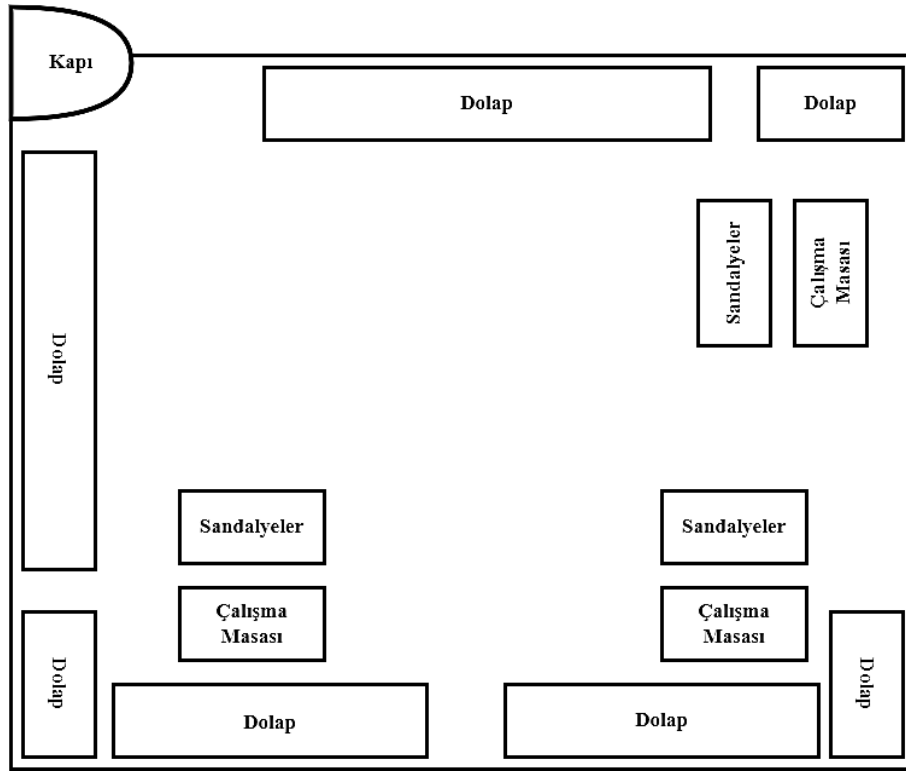
şeklinde uyarlanır. Benzer şekilde, süreç gürültüsü kovaryansı, Kalman kazancı ile elde edilen hata üzerinden

$$Q_k = \alpha_Q Q_{k-1} + (1 - \alpha_Q) [K_k \tilde{y}_k \tilde{y}_k^T K_k^T] \quad (19)$$

formülüyle güncellenir. Burada α_R ve α_Q uyarlamanın yumuşatılması için kullanılan katsayılarıdır. Böylece AEKF, gelen ölçüm verilerine ve sistemdeki model belirsizliklerine karşı daha esnek bir yapı sunarak, etiket konumunun daha doğru ve stabil tahmin edilmesini sağlar. Sonuç olarak hem trilaterasyon yöntemi hem de AEKF algoritması, UWB tabanlı konum belirlemede birbirini tamamlayan yaklaşımlar olarak kullanılmaktadır. Trilaterasyon, çapaların sabit konum bilgileri ve mesafe ölçümleri kullanılarak etiket konumunu doğrudan en küçük kareler yöntemiyle hesap ederken, AEKF ise dinamik sistem modelini ve ölçüm gürültülerini dikkate alarak, öngörü ve güncelleme adımlarıyla birlikte adaptif gürültü kovaryans uyarlamaları yapar. Bu iki yöntem, birlikte kullanıldığında özellikle hareketli etiket senaryolarında sistemin hem doğruluğunu hem de stabilitesini artırmaktadır [28-29].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

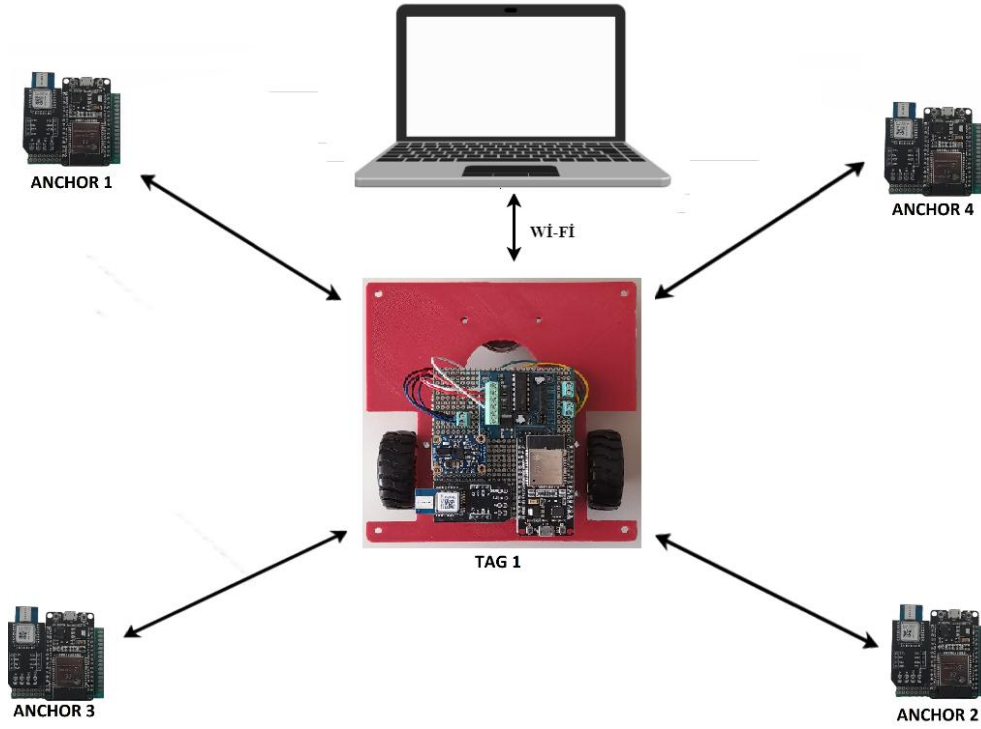
Bu çalışmada, Şekil 3'te verilen çok sayıda eşya bulunan bir ofis ortamında, UWB tabanlı konum belirleme sisteminin performansı sabit noktalar ve hareketli robot olmak üzere iki farklı senaryo ile deneysel olarak incelenmiştir. Ofis ortamı duvarlarla çevrili ve mobilyalarla döşenmiş kapalı bir alanıdır. Ortam, klasik iç mekân özelliklerini taşıyan bir ofis olup; masa, sandalye, dolap, bilgisayar gibi elektromanyetik olarak yansıtıcı ve sinyal yolunu etkileyici birçok unsur barındırmaktadır. Alanın fiziksel sınırları beton duvarlarla çevrilidir ve tavan mevcuttur. Çapalar, bu duvarlarla çevrili alanın köşe noktalarına sabitlenmiştir. Bu deney senaryoları hem filtresiz hem de AEKF filtresi uygulanarak tekrarlanmıştır. Ofis ortamının karmaşıklığı ve multipath (çok yollu yayılım) etkilerinin gözlemlenebileceği gerçek koşullar göz önünde bulundurularak, deneylerde ofisin köşe noktalarına sırasıyla A₁ (0, 0), A₂ (480, 640), A₃ (0, 640) ve A₄ (480, 0) koordinatlarına yerleştirilen dört sabit çapa kullanılmıştır.



Şekil 3. Ofis Ortamı Krokisi (Office Environment Layout)

Mobil robota monte edilen etiket, UWB modülleri aracılığıyla mesafe ölçümleri ve entegre IMU sensöründen alınan hareket verilerini ESP32 mikrodenetleyicisi üzerinde işleyip, Wi-Fi bağlantısı üzerinden merkezi bir bilgisayara ileterek, trilaterasyon ve AEKF algoritmalarının uygulanmasına olanak sağlamıştır. Ölçümler sırasında, UWB modülü tarafından gerçekleştirilen mesafe ölçümleri ve etiket üzerinde yer alan IMU verileri kaydedilmiş; böylece sinyal uçuş süresi, ölçüm gürültüleri ve çevresel faktörlerin sistem performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sabit noktalar senaryosunda robot belirlenen 15 farklı sabit noktaya bırakılmış ve sistemin statik koşullar altındaki doğruluğu ve kararlılığı değerlendirilmiştir. Ayrıca, ölçüm gürültülerini azaltmak ve konum tahmin doğruluğunu artırmak amacıyla AEKF yöntemi uygulanmıştır.

Doğrusal hareketli robot senaryosunda, mobil robota monte edilen etiket, başlangıç ve varış noktaları arasında doğrusal bir yol izleyerek hareket etmiştir. Bu senaryoda, sistemin sabit yön ve hız altında konum tahmin performansı değerlendirilmiştir. Böylece hem statik hem de dinamik durumlarda, sistemin konum belirlemedeki doğruluğu karşılaştırılmıştır. Sistemin blok diyagramı, UWB modülleri, IMU sensörleri, ESP32 mikrodenetleyicisi ve Wi-Fi haberleşme altyapısı arasındaki veri akışını ayrıntılı biçimde ortaya koyarak, sistem bileşenleri arasındaki etkileşimi ve gerçek zamanlı konum filtrelemesi sürecini gözler önüne sermiştir. Sistemin temel blok diyagramı Şekil 4'te verilmektedir.



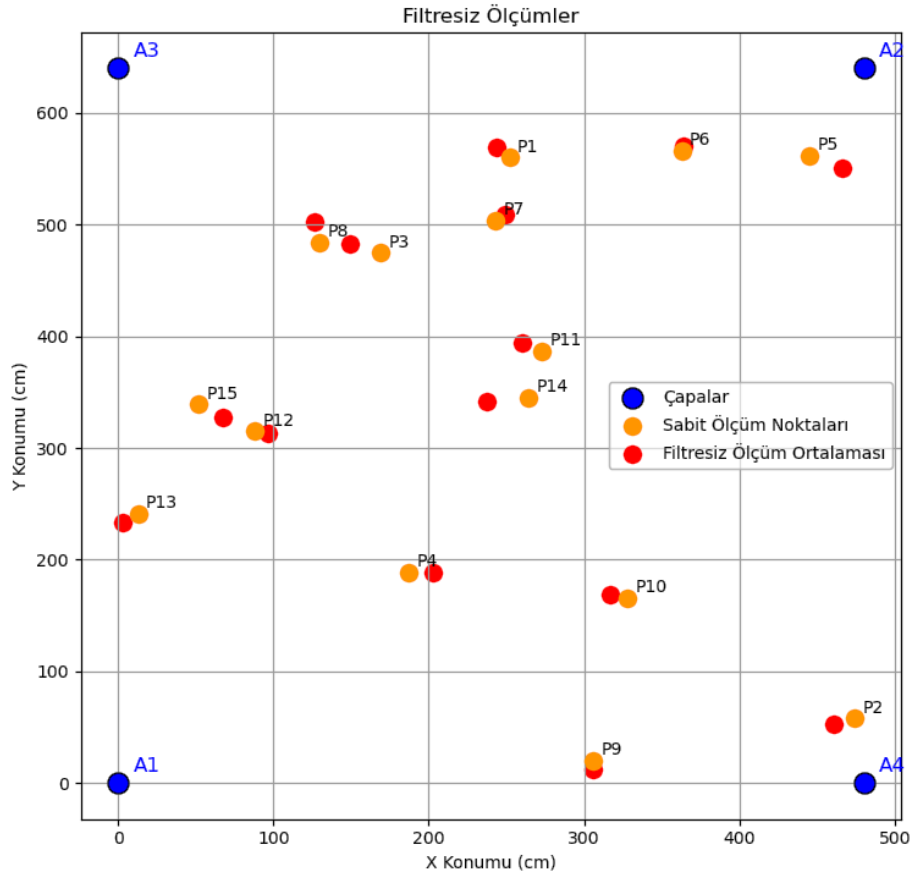
Şekil 4. Sistemin Blok Diyagramı (System Block Diagram)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

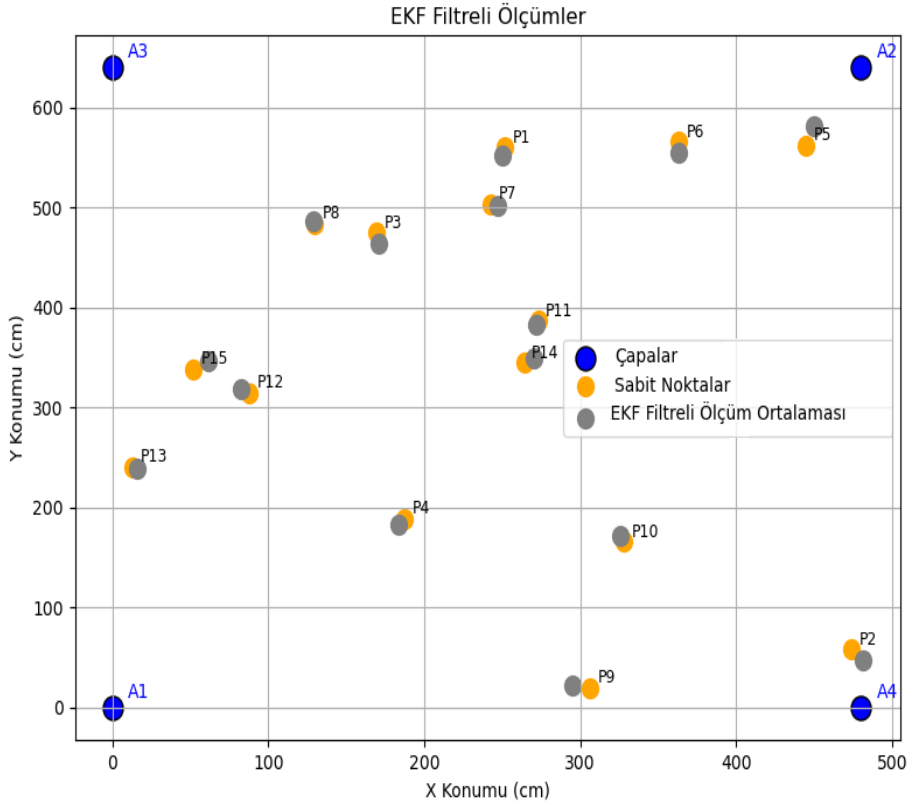
Deneyisel çalışmalar, sistemin gerçek dünya koşullarında performansını kapsamlı olarak değerlendirmek amacıyla, çok sayıda eşya bulunan ofis ortamında gerçekleştirilen sabit noktalar ve hareketli robot deney senaryoları çerçevesinde yürütülmüştür. Deneylerde, ofisin köşe noktalarına yerleştirilen dört sabit çapa $A_1 (0, 0)$, $A_2 (480, 640)$, $A_3 (0, 640)$ ve $A_4 (480, 0)$ referans olarak kullanılmış; mobil robota monte edilen etiket ise, UWB modülleri aracılığıyla alınan mesafe ölçümleri ile entegre IMU verilerini ESP32 mikrodenetleyicisi üzerinden Wi-Fi bağlantısı ile merkezi bilgisayara ileterek, konum belirleme algoritmalarının (trilaterasyon ve AEKF) uygulanmasına olanak sağlamıştır. Elde edilen veriler, sistemin hem statik hem de dinamik koşullar altında yüksek doğruluk ve stabiliteyle çalıştığını ortaya koymaktadır.

Sabit noktalar üzerinde yapılan ölçümler sonucunda, UWB modüllerinden alınan mesafe

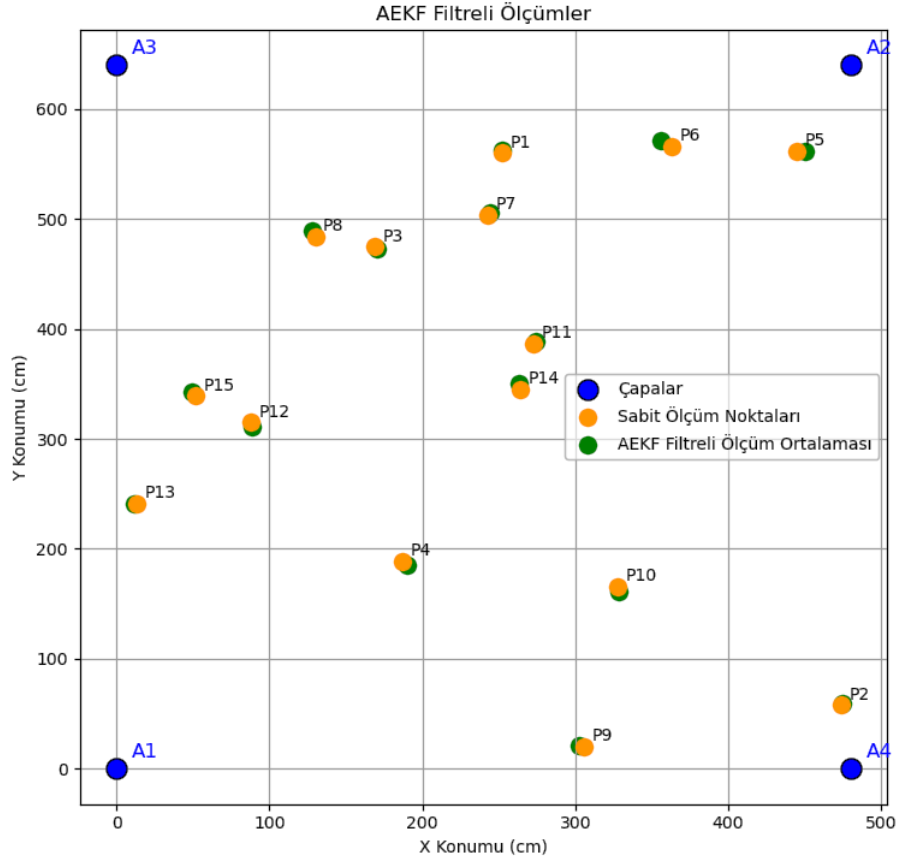
verileri kullanılarak hesaplanan konum tahminlerinde, klasik trilaterasyon yöntemine kıyasla AEKF algoritmasının adaptif güncelleme mekanizması sayesinde ölçüm hatalarının belirgin şekilde minimize edildiği gözlemlenmiştir. Statik koşullarda, hareket kaynaklı ek gürültüler ortadan kalktığı için daha tutarlı ölçümler elde edilmiştir. Ancak, sabit noktalarda multipath etkileri ve sinyal yansımalarından kaynaklanan hataların daha belirgin hale gelebildiği tespit edilmiştir. Bu durum, sistemin çevresel belirsizliklere rağmen sabit noktalarda yüksek konum doğruluğu sağlayabildiğini, ancak sinyal yansımalarına karşı uygun filtreleme ve hata düzeltme yöntemlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de; sabit noktalarda yapılan filtresiz, EKF filtreli ve AEKF filtreli ölçümlerin 50 adet ölçüm ortalamasına göre konumlandırma hataları görsel olarak verilmektedir. Şekil 6'da EKF'li sabit nokta ölçüm ortalamaları, Şekil 7'de AEKF'li sabit nokta ölçüm ortalaması verilmektedir



Şekil 5. Filtresiz Sabit Noktalar Deney Sonuçları (Fixed-Point Experimental Results without Filtering)



Şekil 6. EKF'li Sabit Noktalar Deney Sonuçları (Fixed-Point Experimental Results with EKF)



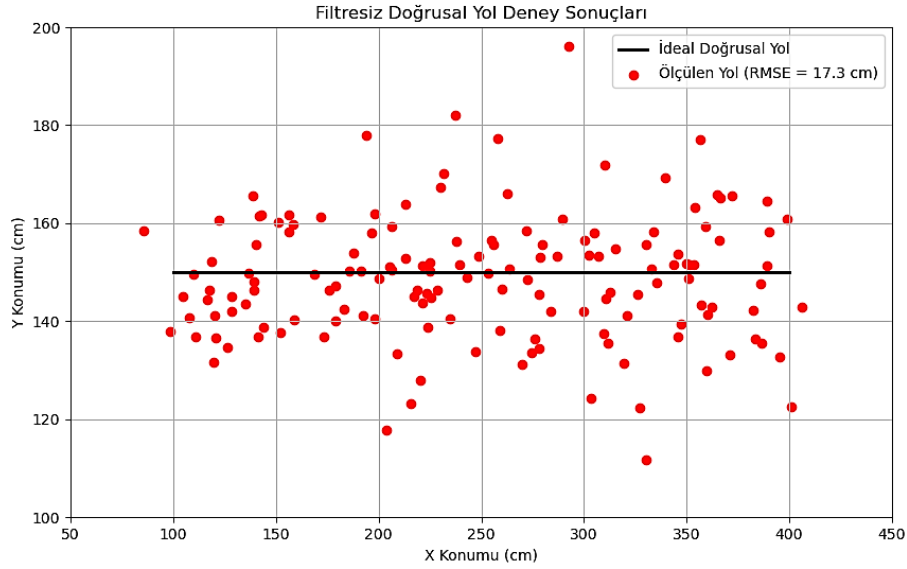
Şekil 7. AEKF’li Sabit Noktalar Deney Sonuçları (Fixed-Point Experimental Results with AEKF)

Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 karşılaştırıldığında AEKF’nin filtresiz ve EKF filtreli UWB ölçümlerine göre başarımlı şekilde net bir şekilde görülmektedir. Tablo 1’de yapılan sabit nokta deneyindeki 15 noktadan alınan 50 ölçüm verisinin ortalama hataları verilmektedir. Doğrusal hareket

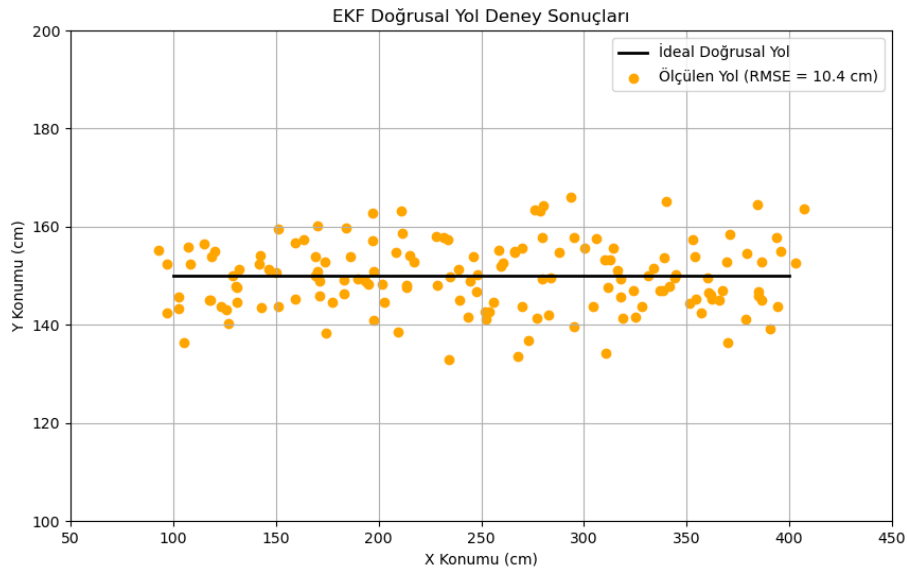
senaryosunda filtresiz UWB ölçüm grafiği ve sonuçları Şekil 8’de verilmektedir. Doğrusal hareket senaryosunda EKF filtreli UWB ölçüm grafiği ve sonuçları Şekil 9’da verilmektedir.

Tablo 1. Ortalama Hata Deney Sonuçları (cm) (Experimental Results of Mean Localization Error (cm))

Nokta No	Filtresiz	EKF Filtreli	AEKF Filtreli
P1	11,64	8,04	0,46
P2	17,37	11,87	0,74
P3	19,10	7,55	4,78
P4	16,87	7,33	3,20
P5	28,10	10,18	2,35
P6	3,87	5,71	4,69
P7	11,70	4,79	3,16
P8	17,91	3,29	1,13
P9	6,88	5,49	2,82
P10	11,93	6,21	4,27
P11	14,93	4,13	1,73
P12	7,59	7,09	3,68
P13	13,35	3,96	1,46
P14	28,62	8,03	2,43
P15	21,16	7,61	0,89
Ortalama Hata	15,40	6,75	2,52



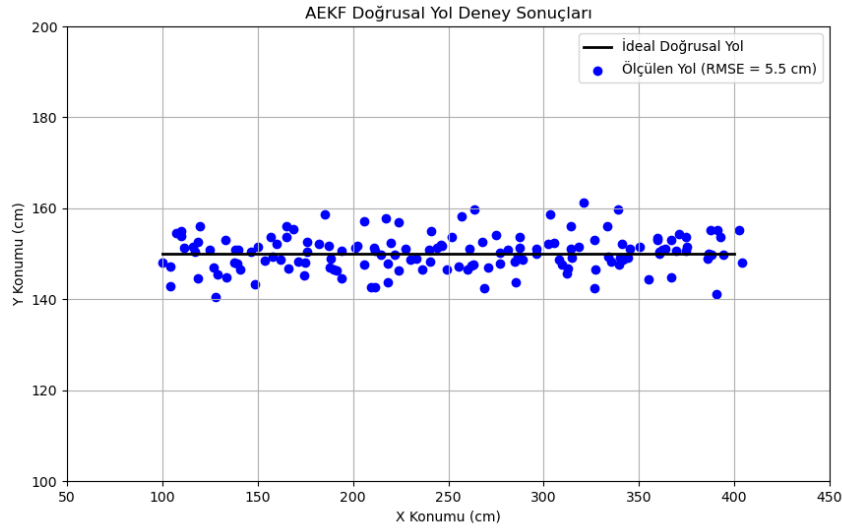
Şekil 8. Filtresiz Doğrusal Yol Deney Sonuçları (Experimental Results of Linear Path without Filtering)



Şekil 9. EKF'li Doğrusal Yol Deney Sonuçları (Experimental Results of Linear Path Using the EKF)

Özellikle, doğrusal hareket senaryosunda etiketin sabit yön ve hız altında gerçekleştirdiği hareketler sonucunda, UWB modüllerinden alınan mesafe ölçümleri ile hesaplanan konum verilerinde, klasik trilaterasyon yöntemine ve EKF filtresi sonuçlarına kıyasla AEKF algoritmasının adaptif güncelleme

mekanizması sayesinde ölçüm hatalarının belirgin şekilde minimize edildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemin sinyal yansımaları ve multipath etkileri gibi çevresel belirsizliklere rağmen, konum tahmininde yüksek performans sergilediğini göstermektedir (Şekil 10).



Şekil 10. AEKF’li Doğrusal Yol Deney Sonuçları. (Experimental Results of Linear Path Using the AEKF)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapalı ve karmaşık iç mekân koşullarında kullanılan UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinde AEKF kullanımını ele alarak, sistemin konumlama doğruluğunu artırmaya yönelik bir yaklaşım ortaya koymuştur. Gerçek ofis ortamında gerçekleştirilen deneyler hem statik hem de dinamik hareket senaryolarında sistemin yüksek düzeyde doğruluk ve kararlılık sağladığını göstermiştir. Özellikle çok yollu yayılım, görüş hattı dışı durumlar ve ortam gürültüsü gibi zorluklar altında, AEKF algoritması ölçüm gürültüsünü dinamik olarak modellemesiyle sistemin çevresel değişkenlere uyum sağlayabildiği görülmüştür. Aynı deney düzenğinde çalışmaya EKF’de entegre edilmiş ve her iki yaklaşım karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, AEKF’nin, özellikle ölçüm belirsizliğinin zamana bağlı değiştiği koşullarda EKF’ye kıyasla konum hatasının daha düşük olduğunu göstermiş ve daha hızlı yakınsadığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte deneysel çalışmalar, uyarlamalı filtre yapısının sağladığı avantajların, başlangıç parametrelerinin uygun şekilde seçilmesine bağlı olduğu ortaya koymuştur. Filtrenin başlatıldığı ilk adımlarda kullanılan durum vektörü, hata kovaryans matrisi (P_0) ve süreç/ölçüm gürültüsü kovaryansları (Q , R) algoritmanın yakınsama davranışını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Uygun başlangıç koşulları altında AEKF hızlı ve kararlı şekilde yakınsarken, aşırı küçük veya büyük başlangıç kovaryansları, filtrede geç yakınsama, osilasyon ya da lokal minimumlara sapma gibi istenmeyen sonuçlara yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, AEKF’nin esnekliğinin yanında hassasiyetini de vurgulamakta ve filtre tasarımında başlangıç koşullarına yönelik dikkatli

parametre seçiminin önemini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, deneysel bulgular; AEKF algoritmasının, UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinin doğruluğunu artırmak için etkili bir araç olduğunu ve özellikle gerçekçi, gürültülü ve değişken iç mekân koşullarında klasik filtresiz UWB ve EKF yöntemlerine kıyasla daha istikrarlı sonuçlar verdiği görülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma ilk yazarın doktora tezinin sonuçlarını içermektedir.

This study includes the results of the first author's PhD dissertation.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır.

The authors have contributed equally to the work.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sesyuk, S., Ioannou, S., & Raspopoulos, M. (2022). A survey of 3D indoor localization systems and technologies. *Sensors*, 22, 9380. <https://doi.org/10.3390/s22239380>
- [2] Arai, T., Yoshizawa, T., Aoki, T., Zempo, K., & Okada, Y. (2019). Evaluation of indoor positioning system based on attachable infrared beacons in metal shelf environment. *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2019.8662007>
- [3] Yue, L., Lei, H., & Qunli, X. (2021). Line-of-sight rates extraction of roll-pitch seeker under anti-infrared decoy state. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 32(1), 178–196. <https://doi.org/10.23919/JSEE.2021.000016>
- [4] Wang, J., Sun, S., Ning, Y., Zhang, M., & Pang, W. (2021). Ultrasonic TDoA indoor localization based on piezoelectric micromachined ultrasonic transducers. *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/IUS52206.2021.9593813>
- [5] Wang, J., Sun, S., Ning, Y., Zhang, M., & Pang, W. (2022). An ultra-low power, small size and high precision indoor localization system based on MEMS ultrasonic transducer chips. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 69(4), 1469–1477. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2022.3148314>
- [6] Chen, X., & Gao, Z. (2017). Indoor ultrasonic positioning system of mobile robot based on TDOA ranging and improved trilateral algorithm. *2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*, 923–927. <https://doi.org/10.1109/ICIVC.2017.7984689>
- [7] Sasikala, M., Athena, J., & Rini, A. S. (2021). Received signal strength based indoor positioning with RFID. *2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 260–263. <https://doi.org/10.1109/RFID-TA53372.2021.9617439>
- [8] Vena, A., Illanes, I., Alidieres, L., Sorli, B., & Perea, F. (2021). RFID based indoor localization system to analyze visitor behavior in a museum. *2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 183–186. <https://doi.org/10.1109/RFID-TA53372.2021.9617265>
- [9] López, Y., de Cos Gómez, M. E., & Las-Heras Andrés, F. (2017). A received signal strength RFID-based indoor location system. *Sensors and Actuators A: Physical*, 255, 118–133.
- [10] Milano, F., D’Errico, R., Monti, A., & Di Benedetto, M. G. (2024). BLE-based indoor localization: Analysis of some solutions for performance improvement. *Sensors*, 24(2).
- [11] Sophia, S., Shankar, B. M., Akshya, K., Arunachalam, A. C., Avanthika, V. T. Y., & Deepak, S. (2021). Bluetooth low energy based indoor positioning system using ESP32. *2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 1698–1702. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA51532.2021.9544975>
- [12] Yu, Y., Zhang, Y., Chen, L., & Chen, R. (2023). Intelligent fusion structure for Wi-Fi/BLE/QR/MEMS sensor-based indoor localization. *Remote Sensing*, 15(5), 1202.
- [13] Zhang, X., Sun, W., Zheng, J., Lin, A., Liu, J., & Ge, S. S. (2024). Wi-Fi-based indoor localization with interval random analysis and improved particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 23(10), 9120–9134. <https://doi.org/10.1109/TMC.2024.3359669>
- [14] Caso, G., De Nardis, L., Lemic, F., Handziski, V., Wolisz, A., & De Benedetto, M. G. (2020). ViFi: Virtual fingerprinting WiFi-based indoor positioning via multi-wall multi-floor propagation model. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 19(6), 1478–1491. <https://doi.org/10.1109/TMC.2019.2908865>
- [15] Fahama, H. S., Ansari-Asl, K., Kaviani, Y. S., & Soorki, M. N. (2023). An experimental comparison of RSSI-based indoor localization techniques using ZigBee technology. *IEEE Access*, 11, 87985–87996. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3305396>
- [16] Minh, T. L., & Xuan, D. T. (2021). Applying Kalman filter to UWB positioning

- with DS-TWR method in LOS/NLOS scenarios. *2021 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, 95–99.
<https://doi.org/10.1109/ISEE51682.2021.9418707>
- [17] Leng, J., Ma, G., Zhu, J., & Ma, H. (2021). Improved TDOA two-stage UWB localization algorithm for indoor mobile robot. *2021 IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE)*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/RASSE53195.2021.9686768>
- [18] Wang, Q., Li, Z., Zhang, H., Yang, Y., & Meng, X. (2023). An indoor UWB NLOS correction positioning method based on anchor LOS/NLOS map. *IEEE Sensors Journal*, 23(24), 30739–30750.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3328715>
- [19] Lin, K.-H., Chen, H.-M., Li, G.-J., & Huang, S.-S. (2020). Analysis and reduction of the localization error of the UWB indoor positioning system. *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan)*, 1–2.
<https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan49838.2020.9258017>
- [20] Santoro, L., Nardello, M., Brunelli, D., & Fontanelli, D. (2023). UWB-based indoor positioning system with infinite scalability. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72, Article 1005711.
<https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3282299>
- [21] Van Herbruggen, B., Fontaine, J., & De Poorter, E. (2021). Anchor pair selection for error correction in time difference of arrival (TDOA) ultra wideband (UWB) positioning systems. *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 1–8.
- [22] Elsanhoury, M., Abotaleb, M., Elnainay, M., Badawy, M., & Hamouda, W. (2022). Precision positioning for smart logistics using ultra-wideband technology-based indoor navigation: A review. *IEEE Access*, 10, 44413–44445.
- [23] Jun, C., & Shibiao, H. (2018). Comparison and analysis of the error of multiple transceiver mode of TOA based on Kalman filter in IR-UWB system. *2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI)*, 71–75.
<https://doi.org/10.1109/IICSPI.2018.8690338>
- [24] Nguyen, D. T. A., Kim, K. S., Jeong, H. J., & Kim, H. (2020). Convolutional neural network-based UWB system localization. *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 488–490.
<https://doi.org/10.1109/ICTC49870.2020.9289326>
- [25] Eang, C., & Lee, S. (2024). An integration of deep neural network-based extended Kalman filter (DNN-EKF) method in ultra-wideband (UWB) localization for distance loss optimization. *Sensors*, 24(23), 7643.
<https://doi.org/10.3390/s24237643>
- [26] Zhang, C., Bao, X., Wei, Q., Ma, Q., Yang, Y., & Wang, Q. (2016). A Kalman filter for UWB positioning in LOS/NLOS scenarios. *2016 Fourth International Conference on Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location Based Services (UPINLBS)*, 73–78.
<https://doi.org/10.1109/UPINLBS.2016.7809953>
- [27] Zhong, S., Zhang, K., Zhu, G., & Liu, S. (2018). UWB-inertial fusion location algorithm based on Kalman filtering. *2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, 574–578.
<https://doi.org/10.1109/ICARCV.2018.8581294>
- [28] Trifunović, M., Papp, I., & Bašičević, I. (2024). Use of extended Kalman filter in an UWB based indoor positioning system. *2024 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)*, 204–208.
<https://doi.org/10.1109/ZINC61849.2024.10579430>
- [29] Zhang, F., Yang, L., Liu, Y., Ding, Y., Yang, S.-H., & Li, H. (2022). Design and implementation of real-time localization system (RTLS) based on UWB and TDoA algorithm. *Sensors*, 22(12), 4353.
<https://doi.org/10.3390/s22124353>