

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA
ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK
KABLOSUZ KONUMLANDIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Zeynel Abidin KUŞ**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Muzaffer KANAAN**

**Aralık 2012
KAYSERİ**

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Zeynel Abidin KUŞ



“Mobil Robotların Bina içi Koşullarda Ulaşma Zamanı Kullanılarak Kablosuz Konumlandırılması” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

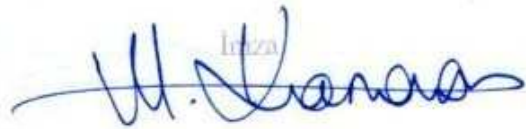
Tezi Hazırlayan

Zeynel Abidin KUŞ



Danışman

Yrd.Doç.Dr.Muzaffer KANAAN



Mekatronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof.Dr.Şahin YILDIRIM



Yrd. Doç. Dr. Muzaffer KANAAN danışmanlığında **Zeynel Abidin KUŞ** tarafından hazırlanan “**Mobil Robotların Bina içi Koşullarda Ulaşma Zamanı Kullanılarak Kablosuz Konumlandırılması**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Mekatronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

21.12.2012

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Üye : Doç.Dr. İbrahim DEVELİ

Üye : Yrd.Doç.Dr.Muzaffer KANAAN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 02/01/2013 tarih ve 2013/01-05 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Öncelikle eğitim-öğretim hayatımda bu noktaya gelmeme izin veren Rabbime hamd ediyorum. Gereken sağlığı, akli, çalışma isteği ve gücünü, bunların yanında daha sayamayacağım sayısız nimeti lütfetmemiş olsaydı bu çalışmayı sonlandırmam mümkün olmazdı.

İkinci olarak tez çalışmam boyunca desteği ve rehberliği için hocam Yrd. Doç. Dr. Muzaffer KANAAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Değerli hocam; farklı bakış açılarıyla akademik yönden beni aydınlatmış, yakın ilgi ve alakasıyla daima yanımda olduğunu hissettirmiştir. Sonucu ve süreci birlikte önemseyen çalışma disiplini ve motive eden danışman kimliği ile hocam benim için danışmanlıktan çok daha fazlasını yapmıştır. Kendime model olarak aldığım birçok prensibi, tez çalışmam boyunca daha emin adımlarla hedefe ilerlememi ciddi anlamda kolaylaştırmıştır.

Üçüncü olarak kıymetli kardeşim Muhammed Zahid KARAKUŞAK'a maddi ve manevi desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Kendisi çalışmalarım boyunca benim için bir diğer önemli güç kaynağı olmuştur.

Son olarak tez çalışmalarım boyunca her anlamda yanımda olan değerli aileme gösterdikleri sabırdan dolayı en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Zeynel Abidin KUŞ

Kayseri, Aralık 2012

MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ KONUMLANDIRILMASI

Zeynel Abidin KUŞ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2012

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Muzaffer KANAAN

KISA ÖZET

Son yıllarda mobil robotlara yönelik bina içi uygulamaların sayısı hızlı bir artış göstermiştir. Temizlik, rehabilitasyon, çok amaçlı taşıma ve güvenlik hizmetleri bu uygulamalara örnek olarak gösterilebilir. Bir mobil robot için konum farkındalığı önemli bir bilgidir. Bina içi ortamlarda kablosuz tekniklerle konumlandırmayı konu alan çalışmaların varlığı bilinmektedir. Ancak bu çalışmaların çoğu kanalın statik durumunu dikkate almaktadır. Bir mobil robotun konumlandırılması için ise kanalın dinamik olarak değiştiği kabul edilmelidir.

Bu çalışmada; ulaşma zamanını kullanan bina içi kablosuz konumlandırma sistemleri için kullanılan LS (*Least Squares*) ve RWGH (*Residual Weighting*) algoritmalarının dinamik kanal şartlarındaki performansları belirlenen dört farklı senaryo için analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın amaçlarından birisi de bu iki algoritmanın konumlandırma hassasiyetlerinde iyileşme sağlamaktır. Bu amaçla yeni bir hata kestirim algoritması ortaya konulmuştur. Belirlenen senaryolarda LS ve RWGH algoritmalarının performansları hata kestirim algoritmasıyla birlikte tekrar analiz edilmiştir.

Çalışmada performans metriği olarak Ortalama karesel hataların kare kökü (*Root Mean Square Error*; RMSE) seçilmiştir. RMSE değerlerindeki azalmalara bağlı olarak özellikle RWGH algoritması için kayda değer bir iyileşmenin sağlandığı sayısal ve görsel sonuçlardan yola çıkarak söylenebilir.

Anahtar kelimeler: Bina içi kablosuz konumlandırma, ulaşma zamanı, dinamik kanal şartları.

WIRELESS INDOOR LOCALIZATION OF MOBILE ROBOTS USING TIME OF ARRIVAL

Zeynel Abidin KUŞ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, December 2012

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Muzaffer KANAAN

ABSTRACT

In recent years there has been a considerable increase in the number of applications for mobile robots in indoor areas such as cleaning, rehabilitation, multipurpose deliveries security applications and so on. Location awareness is important for mobile robot operation. It is known that there are many studies in the literature related to indoor wireless localization. However in these studies the behavior of the channel is generally accepted to be static. On the other hand for a mobile robot the channel will have a dynamic behavior due to robot motion.

In this study; the performance of two algorithms, LS (*Least Squares*) and RWGH (*Residual Weighting*), under the dynamic channel conditions are analyzed under dynamic channel condition. This analysis is carried out under 4 system scenarios.

Another objective of this study is to achieve an improvement on the localization accuracy for the LS and RWGH algorithms. For this purpose a novel error prediction algorithm is proposed. The performance of LS and RWGH together with error prediction are analyzed. It is shown that the proposed algorithm provides performance gains, particularly for RWGH.

Keywords: Indoor wireless localization, Time of Arrival, dynamic channel.

İÇİNDEKİLER

MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ KONUMLANDIRILMASI

	<u>Sayfa</u>
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI.....	iii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iv
ÖNSÖZ	v
KISA ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMA VE SİMGELER.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
 GİRİŞ	 1

1. BÖLÜM

BİNA İÇİ KABLOSUZ KANAL KOŞULLARI

1.1. Kablosuz Kanalin Bina içi Konumlandırmaya Etkisi	6
1.2. Ulaşma Zamanı Yöntemi.....	6
1.3. Ulaşma Zamanı Yöntemini Etkileyen Kanal Unsurları	7
1.3.1. Çoklu Yol Etkisi	7
1.3.2. Gölgeleme Etkisi.....	9
1.4. Ulaşma Zamanı Yönteminde Direkt Yolun Davranışı	11
1.4.1. Direkt Yolun Algılanması (DDP) Durumu	11
1.4.2 Direkt Yolun Algılanamaması (UDP) Durumu.....	12
1.5. Kanal Modelleri.....	14
1.5.1. Statik Kanal Modelleri	15

1.5.2. Dinamik Kanal Modelleri.....	17
-------------------------------------	----

2. BÖLÜM

ALGORİTMALAR VE PERFORMANS ANALİZİ

2.1. Konum Tespit Algoritmaları.....	21
2.2. Geometrik Yöntemler	22
2.2.1. En Küçük Kareler (LS) Tekniği	24
2.2.2. Ağırlıklı En Küçük Kareler (RWGH) Tekniği.....	27
2.3. Bina içi Konum Tespiti İçin Seçilen Senaryolar.....	29
2.3.1. Gölgeleme etkisinin modellenmesi.....	31
2.3.2. Başlangıç durumlarının ve diğer durumların belirlenmesi	32
2.4. Performans Karşılaştırması	33
2.5. Performans Sonuçları	34

3. BÖLÜM

HATA KESTİRİM METODU İLE PERFORMANS İYİLEŞTİRMESİ

3.1. Performans İyileştirme Yöntemi	42
3.1.1. Hata kestirim Algoritması.....	44
3.2. Performans İyileştirme Sonuçları.....	44
3.2.1. Senaryo 1A ve 1B	45
3.2.2. Senaryo 2A ve 2B	47
3.2.3. Hata kestirim algoritmasının istatistiksel analizi.....	52

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma	56
4.2. Sonuç ve Öneriler	57

KAYNAKLAR	59
-----------------	----

EK-1: UDP Durumlarındaki Olasılık Dağılım Fonksiyonları	63
---	----

ÖZGEÇMİŞ.....	65
---------------	----

KISALTMA VE SİMGELER

<i>Kısaltma</i>	İngilizce Karşılığı	Türkçe Karşılığı
<i>AOA</i>	Angle of Arrival	Ulaşma Açısı
<i>CN-TOAG</i>	Closest-Neighbor with TOA Grid Algorithm	
<i>DDP</i>	Detected Direct Path	Algılanan Direkt Yol
<i>DME</i>	Distance Measurement Error	Mesafe Ölçüm Hatası
<i>FDP</i>	First Detected Peak	İlk Algılanan Tepe
<i>GEV</i>	Generalized Extreme Value	Genelleştirilmiş Uç Değer
<i>GPS</i>	Global Positioning System	Küresel Konumlandırma Sistemi
<i>LOS</i>	Line of Sight	Görüş Hattı
<i>LS</i>	Least Square Algorithm	En Küçük Kareler Algoritması
<i>NC</i>	No Coverage	Kapsama Alanı Dışı
<i>NLOS</i>	Non-Line of Sight	Görüş Hattının Olmaması
<i>NUDP</i>	Natural Undetected Direct Path	Doğal UDP
<i>RADAR</i>	Radio Detecting and Ranging	Radyo alg. ve mesafe ölçümü
<i>RP</i>	Reference Point	Referans Noktası
<i>RSS</i>	Received Signal Strength	Ulaşma Genliği
<i>RWGH</i>	Residual Weighting Algorithm	Kalan Ağırlık en küçük kareler tek.
<i>SUDP</i>	Shadowed Undetected Direct path	Gölgelemiş UDP
<i>TDoA</i>	Time Difference of Arrival	Ulaşma Zamanı Farkı
<i>TOA</i>	Time of Arrival	Ulaşma Zamanı
<i>UDP</i>	Undetected Direct Path	Algılanamayan Direkt Yol
<i>WLAN</i>	Wireless Local Area Network	Kablosuz Yerel Alan Ağı
<i>WLS</i>	Weighted Least Squares	Ağırlıklı en küçük kareler tekniği
<i>WPAN</i>	Wireless Personal Area Network	Kablosuz Kişisel Alan Ağı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. DDP ve NUDP durumları için normal dağılım parametreleri.....	18
Tablo 1.2. SUDP durumu için GEV dağılım parametreleri	18
Tablo 2.1. Belirlenen dört farklı senaryoya ait detaylar..	29
Tablo 2.2. Mesafeye ve gölgeleme etkisine bağlı olarak kanal durumları.....	32
Tablo 2.3. Kanal durumları arasındaki geçişi belirleyen kesim noktaları.....	33
Tablo 2.4. Senaryo 1A ve 1B için algoritmalara ait performans sonuçları	35
Tablo 2.5. Senaryo 2A ve 2B için algoritmalara ait performans sonuçları	35
Tablo 2.6. Tüm senaryolarda RWGH ve LS performans karşılaştırması.....	35
Tablo 3.1. Farklı kanal durumları için ortalama değerleri	44
Tablo 3.2. Senaryo 1A için algoritmalara ait performans sonuçları.....	45
Tablo 3.3. Senaryo 1A için hata kestirimi sonrasında iyileşme oranları	45
Tablo 3.4. Senaryo 1A için HK durumunda RWGH ve LS karşılaştırması	46
Tablo 3.5. Senaryo 1B için algoritmalara ait performans sonuçları.....	46
Tablo 3.6. Senaryo 1B için hata kestirimi sonrasında iyileşme oranları	47
Tablo 3.7. Senaryo 1B için HK durumunda RWGH ve LS karşılaştırması	47
Tablo 3.8. Senaryo 2A için algoritmalara ait performans sonuçları.....	48
Tablo 3.9. Senaryo 2A için hata kestirimi sonrasında iyileşme oranları	48
Tablo 3.10. Senaryo 2A için HK durumunda RWGH ve LS karşılaştırması	49
Tablo 3.11. Senaryo 2B için algoritmalara ait performans sonuçları.....	49
Tablo 3.12. Senaryo 2B için hata kestirimi sonrasında iyileşme oranları	49
Tablo 3.13. Senaryo 2B için HK durumunda RWGH ve LS karşılaştırması	50
Tablo 3.14. Tüm senaryolar için hataya ve düzeltilen hataya ait parametreler.....	52

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1. Bina içi kablosuz konumlandırma sistemlerine ait fonksiyonel yapı.....	3
Şekil 1.1. Bina içi Radyo sinyalleri yayılımı: çoklu yol etkisi.....	7
Şekil 1.2. Direkt yol gösterimi	8
Şekil 1.3. Çoklu yol kanal etkilerinin şematik gösterimi	9
Şekil 1.4. (a) LOS durumu (b) NLOS durumu	10
Şekil 1.5. DDP durumları için örnek kanal profili	11
Şekil 1.6. UDP durumları için örnek kanal profili	13
Şekil 1.7. Bina içi konumlandırmada ölçüm hatasının dinamik davranışını temsil eden Markov modeli	19
Şekil 2.1. Üçgenleme yöntemi (a) ideal durum, (b) gerçek durumu.....	23
Şekil 2.2. RP sayısının 3'ten 4'e çıkmasıyla belirsizlik alanının küçülmesi.....	24
Şekil 2.3. Senaryo 1A senaryo 1B için kapalı alan özellikleri	30
Şekil 2.4. Senaryo 2A senaryo 2B için kapalı alan özellikleri	30
Şekil 2.5. Kapalı alanda mobil robotun izlediği yörünge.....	31
Şekil 2.6. LS için yörünge takibi.....	36
Şekil 2.7. RWGH için yörünge takibi	37
Şekil 2.8. RP 1 için yörünge boyunca kanal durumları.....	37
Şekil 2.9. RP 2 için yörünge boyunca kanal durumları.....	38
Şekil 2.10. RP 3 için yörünge boyunca kanal durumları.....	38
Şekil 2.11. RP 4 için yörünge boyunca kanal durumları.....	39
Şekil 2.12. RP 5 için yörünge boyunca kanal durumları.....	39
Şekil 3.1. Hata kestiriminde yapılan işlemler için blok diyagramı	43
Şekil 3.2. Senaryo 1A – Ara kestirimler için ortalama kalanlar	51
Şekil 3.3. Senaryo 2A – Ara kestirimler için ortalama kalanlar	51
Şekil 3.4. Hata kestirimi olmadan LS	54
Şekil 3.5. Hata Kestirim Algoritması ile LS	54
Şekil 3.6. Hata kestirimi olmadan RWGH	55
Şekil 3.7. Hata kestirim algoritması ile RWGH.....	55

GİRİŞ

Günümüzde mobil robotlar ve uygulama alanları çok hızlı bir gelişim göstermektedir. Özellikle bina içi ortamlarda mobil robotların çok farklı amaçlarla kullanımı söz konusudur. Mobil robotların kullanım alanı olarak; temizlik hizmetlerini [1,2], sağlık hizmetlerini [3], rehabilitasyon çalışmalarını [4,5] konu alan çalışmaların varlığı bilinmektedir. Bunun gibi daha birçok farklı alanda mobil robotların kullanılmasını konu alan çalışmalar mevcuttur.

Bir mobil robotun, üstlendiği görevi yerine getirirken sürekli olarak çevreyle etkileşim halinde olması, çevreden aldığı bilgiler ışığında akıllı bir tepki vermesi beklenir. Bu etkileşimin önemli bileşenlerinden biri de konum farkındalığıdır (*location awareness*). Konum bilgisi robotun çevreden toplayacağı önemli bilgilerdendir. Bu durum özellikle otonom mobil robotlar için böyledir [6]. Konum bilgisinin bilinmesi bina içi birçok uygulamanın önünü açmaktadır. Bina içi güvenlik amaçlı görüntüleme ve izleme [7], acil arama kurtarma [8], müze içinde tur rehberliği [9] gibi uygulamalarda mobil robotun bina içindeki konumunu bilmesi bir zorunluluktur.

Mobil robotların konumlandırılması ve takibi ile ilgili olarak literatürde birçok çalışma mevcuttur. Konumlandırma amacıyla yaptıkları çalışmalarında Grudic ve Lawrence görüntü işleme tekniklerinden faydalandıkları parametrik olmayan (*nonparametric*) bir öğrenme algoritması tanımlamışlardır [10]. Söz konusu algoritma robotun mevcut pozisyonu ile robot üzerine monte edilmiş bir kameradan alınan görüntüler arasında gürbüz (*robust*) bir haritalamanın yapılması için kullanılmıştır.

Optik akış algılayıcılarının (*optical flow sensors*) mobil robotların konumlandırılmasında kullanılan hızlı yanıt veren basit araçlar olduğu bilinmektedir. Bunun yanında bu yöntem çok da hassas ve güvenilir olmayan ölçümler rapor edebilmektedir. Bunun sebeplerinden birisi sensörün sadece x ve y doğrultularındaki yer değiştirmeleri algılayabilmesi, açısal yer değişimlerini ise ihmal etmesidir [11]. Lee ve Song optik akış algılayıcılarından yararlandıkları çalışmalarında konumlandırma

amacıyla bir ve iki optik akış sensörünün kullanıldığı iki farklı metot ortaya atmıştır [11]. İlk metotta tek bir sensör kullanılmış ve gerekli ölçümlerin yapılabilmesi için kinematik denklemlerden yardım alınmıştır. İkinci metotta ise iki adet sensör kullanılmış ve kinematik denklemlere gerek kalmamıştır.

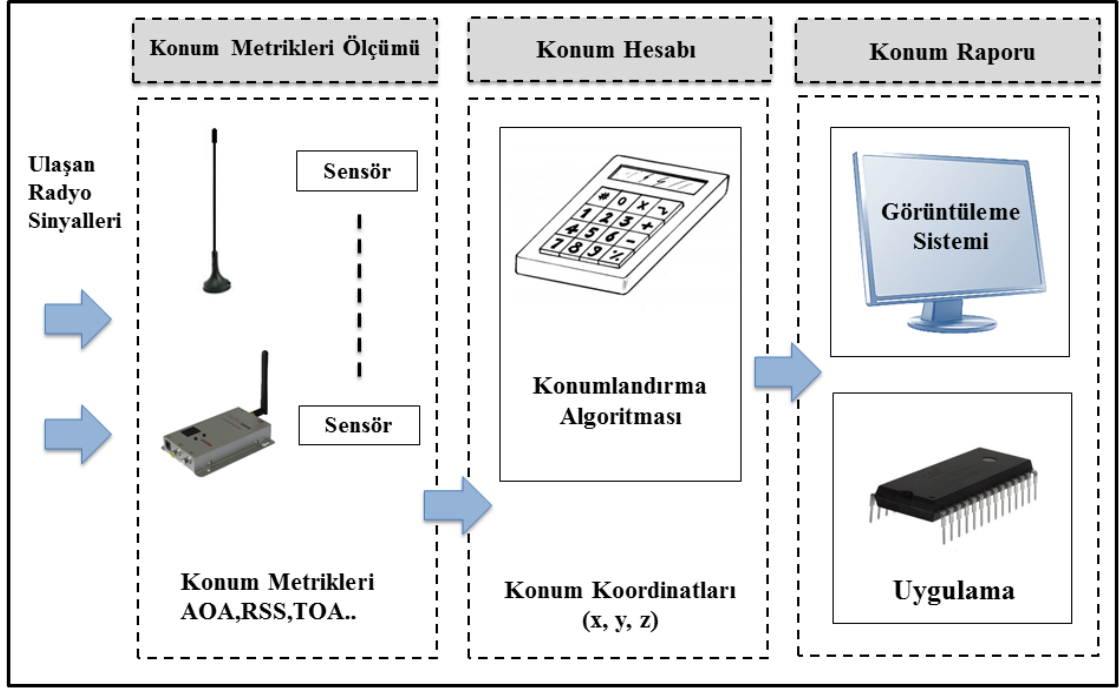
Yine Hatipoğlu konumlandırma amacıyla genişletilmiş Kalman süzgeci modelini kullanmış [12], Roumeliotis ve Bekey ise Bayes kestirimini ve Kalman süzgeci yöntemlerini bu amaçla birlikte ele almışlardır. Bu araştırmacıların, çalışmalarında robotun farklı alanlardaki konum değişiminin izini sürmek için basit bir Kalman filtresi kullanılmıştır. Robot çevredeki yer izlerini (*landmark*) tarayabilmek için gerekli sensörlerle donatılmıştır. Sensörlerden gelen sinyaller kullanılan algoritmalar yardımıyla işlenmiş ve haritadaki potansiyel olarak ilgili olan konumlara ulaşılmıştır. Çalışmada sürekli rapor edilen Kalman konum değişim hesapları (ölçümleri) ile birbirinden bağımsız yer izi konumu (*landmark pose*) ölçümlerinin birleştirilmesi Bayes hipotez testi yardımıyla yapılmıştır [13].

Konumlandırma amacıyla Ultrasonik sensörlerden yardım alan sistemler de vardır. Bu alandaki çalışmaların birinde ultrasonik konumlandırma sistemi; belirlenen koordinatlara yerleştirilmiş RF kontrollü 2 ultrasonik vericiden ve otonom bir mobil robot üzerine yerleştirilen 3 adet ultrasonik alıcıdan oluşmaktadır [14]. İlgili çalışmada iki boyutlu bir düzlemde hareket eden bir otonom mobil robotun ultrasonik tekniklerle statik ve dinamik konum ve oryantasyon kestiriminde; bulanık uyarlanır genişletilmiş bilgi filtresi (*Fuzzy adaptive extended information filtering; FAEIF*) yöntemi kullanılmıştır.

Konumlandırma maksadıyla kullanılabilecek başka metotlar da vardır. Bunlardan birisi de kablosuz şebeke sinyalleri kullanılarak konum tespitidir. Tez çalışmasında bu teknikler ve bu tekniklerin performansları incelenmiştir.

Kablosuz sinyaller vasıtasıyla konumlandırma bina dışı ortamlarda yapılacağı zaman Küresel Konumlandırma Sisteminin (*Global Positioning System; GPS*) kullanılması mümkündür. Diğer yandan GPS'in bina içi ortamlarda kullanılabilmesi için diğer sensörlerden ve ağ yardımcılarından yardım alınmalıdır [15]. Tek başına dikkate alındığında ise bina içi ortamlar için GPS teknolojisi yetersizdir. Bunun temel nedenlerinden birisi radyo sinyallerinin bina duvarlarını ve döşemelerini geçerken ciddi ölçüde zayıflamasıdır (*attenuation*). Sinyal zayıflama probleminin çözümünde yineleyici (*repeater*) uygulamaları kullanılabilse de bu genelde pahalı bir çözümdür.

Diğer yandan bina içi kablosuz sinyallerin yayılım (*propagation*) karakteristikleri bina dışına göre ciddi farklılıklar gösterir [16]. Dolayısıyla bina içi ortamlarda konumlandırma amacıyla farklı yaklaşımların ortaya konulması gerekmektedir.



Şekil G.1. Bina içi kablosuz konumlandırma sistemlerine ait fonksiyonel yapı [17]

Mobil robotların kablosuz konumlandırılmasında kullanılacak sistem temelde üç bileşenden oluşmaktadır (bkz. Şekil 1.1). Birinci aşamada radyo sinyallerinin konum tespitine yönelik bazı özellikleri sensörler tarafından ölçülür. Radyo alıcı ve vericilerinden meydana gelen sensörlerin bazılarının konumlarının belirli bir koordinat sistemine göre önceden bilinmesi gerekmektedir. Konumları belirli bu birimler ise referans noktaları (*reference points; RP*) olarak adlandırılır [18]. Ölçülen sinyal özellikleri ise konum metrikleri (*location metrics*) olarak adlandırılır [19]. Kablosuz konumlandırma tekniklerinde kullanılan temel konum metrikleri alınan sinyalin ulaşma açısı (*angle of arrival; AOA*)[19,20], ulaşma genliği (*received signal strength; RSS*)[20,21] ve ulaşma zamanıdır (*time of arrival; TOA*)[18,19,20]. Bu tez çalışması ulaşma zamanı yöntemini konu almaktadır.

İkinci aşamada sensörler yardımıyla elde edilen veriler konumlandırma algoritmasına gönderilmektedir. Sensör ölçümlerini alan algoritma x,y,z gibi konum koordinatları cinsinden konum hesabını yapmaktadır. Konum tespit algoritmasının

hassas sonuçlar verebilmesi öncelikle kanalın davranışının matematiksel olarak doğru ortaya konulmasına bağlıdır. Kablosuz konumlandırma sistemlerinde konum tespitinin yapılabilmesi için verici tarafından gönderilen radyo sinyallerinin alıcıya ulaşması gerekmektedir. Radyo sinyallerinin bu ikisi arasında taşındığı ortama kanal (*channel*) ismi verilmektedir. Bunun yanında algoritmanın işlem yükünün hafif olması konum tespitinin yeterli hızla yapılması açısından önemlidir. Bu durum özellikle bünyesinde kısıtlı bir güç kaynağı taşıyan mobil robotlarda önem kazanacaktır.

Son aşamada ise konumlandırma algoritması tarafından hesaplanan konum koordinatları sistemin çıkışındaki görüntüleme biriminden okunmaktadır veya bir başka uygulama tarafından kullanılmaktadır. Mesela çok sayıda mobil robotun bir takım oluşturacak şekilde görevi üstlendiği durumlarda robotların ortak hareket edebilmesi için birbirlerinin konumlarını bilmeleri gerekecektir. Bu amaçla robot konum bilgisini gerektiğinde bir diğer takım arkadaşı ile paylaşabilmektedir. Mobil robotik uygulamalarda bilinmeyen bir çevrenin keşfedilmesi temel bir ilgi alanıdır. Bu alandaki bir çalışmada çok sayıda mobil robot yangın söndürme amacıyla kullanılmaktadır [22]. Bu durumda robotların birbirleriyle koordinasyon halinde bulunmaları gerekir. Bunun için de birbirlerinin konumlarını bilmeleri gerekir. Ancak bu şekilde eş zamanlı olarak farklı alanların gözlemlemesi ve yangın kaynaklarının tanımlanması mümkün olacaktır.

Kablosuz konumlandırmada karşılaşılan bir takım engeller vardır. Bu engellerin başında bina içi kablosuz sinyallerin yayılım karakteristikleri gelir. İkinci önemli unsur kullanılan konumlandırma algoritmasıdır. Algoritmanın etkili bir şekilde çalışabilmesi için kanalın davranışı dikkate alması gerekir. Kanal davranışı ise statik ve dinamik olarak iki başlık altında ele alınabilir.

Bina içerisindeki statik (hareketli olmayan) bir kullanıcının konumlandırılması söz konusu olduğunda kablosuz kanal yapısının da statik bir davranış sergileyeceği açıktır. Diğer yandan mobil robotların konumlandırılmasında kanal koşulları mobil robotun hareketiyle dinamik bir şekilde değişecektir. Bu durumda performans analizi açısından kanalın dinamik davranışını dikkate almak gerekmektedir. Bu çalışmanın ilgili alana temel katkıları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

1. Son zamanlarda hareket eden bir kullanıcı için kanal koşullarının dinamik olarak değiştiğini kabul eden çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların birinde bu değişimin modellenmesinde Markov zinciri (*Markov chain*) yönteminden faydalanılmıştır [23]. Bu tez çalışmasında bu modelden yola çıkarak en küçük kareler (*least squares; LS*) ve

ağırlıklı en küçük kareler (*weighted least squares*; *WLS*) algoritmalarının performansları kanalın dinamik yapısı dikkate alınarak analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

2. Çalışmada seçilen bu iki konumlandırma algoritmasının dinamik kanal koşullarındaki performanslarının iyileştirilmesi ile ilgili olarak konumlandırma algoritması tarafından kullanılan mesafe ölçümlerinin kalitesinin artırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda bir hata kestirim algoritması ortaya konulmuş ve bunun ışığında konumlandırma algoritmalarının performanslarındaki iyileşme gözlemlenmiştir. Tezin sonraki bölümleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Birinci bölümde; bina içi ortamlarda kablosuz kanal koşullarına ait temel özellikler anlatılmaktadır. Bunun yanında bina içi kablosuz konumlandırma tekniklerinde bilinen önemli hata kaynaklarından çoklu yol etkisi (*multipath fading*) ve direkt yolun algılanamaması (*Undetected Direct Path*; *UDP*) problemlerine değinilmiştir. Yine kanalın statik ve dinamik yapısına ait özelliklere bu bölümde yer verilmiştir. Kanalın dinamik yapısının önemsendiği durum için ortaya konulan Markov Modeli yaklaşımı da bu bölümde irdelenmiştir.

İkinci bölümde; öncelikle yaygın olarak kullanılan temel konum tespiti algoritmalarından genel olarak bahsedilmektedir. Daha sonra da LS ve WLS algoritmalarının matematiksel tanımlamaları kısaca anlatılmıştır. Yine bu algoritmaların seçilen kapalı alan senaryoları için dinamik kanal şartlarındaki performansları bu bölümde incelenmektedir.

Üçüncü bölümde; seçilen algoritmaların performanslarının iyileştirilmesi amacıyla ortaya konulan hata kestirim algoritmasının etkileri gözlemlenmiştir. Netice olarak kanalın dinamik durumu için LS ve WLS algoritmalarının performanslarında kaydedilen iyileşme incelenmiştir.

Dördüncü ve son bölüm iki kısımdan oluşmaktadır. Bu bölümün ilk kısmında tez çalışmasında yapılanlar özetlenmiş, ikinci kısmında ise ilgili alanda gelecekte yapılabilecek çalışmalara yer verilmiştir.

1. BÖLÜM

BİNA İÇİ KABLOSUZ KANAL KOŞULLARI

Bina içi kanal koşulları bina dışı koşullardan farklıdır ve kendine has özellikleri vardır. Bina içi kablosuz konum tespitinin hassas bir şekilde yapılabilmesi için kanalın radyo sinyalleri üzerindeki etkilerinin matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu şekilde var olan bozucu etkenleri dikkate alan algoritmalar geliştirilebilecek ve konum tespiti söz konusu kanal şartlarında istenen neticeleri verecektir.

1.1. Kablosuz Kanalin Bina içi Konumlandırmaya Etkisi

Birçok bina içi ortam, radyo dalgalarının kablosuz yayılımını ciddi derecede etkileyen ve hassas konum tespitini zorlaştıran unsurlar taşır. Bina içi radyo yayılımını temsil eden kanal yapısının temel karakteristik özellikleri olarak; güçlü çoklu yol sönüm etkisi (*multipath fading*) ve gölgeleme etkisi (*shadow fading*) öne sürülebilir [23]. Kanal sönümü (*channel fading*) ve yol kaybı (*path loss*) unsurları da bina içinde yapılan mesafe ve konumlandırma ölçüm kalitesini ve hassasiyetini düşüren diğer hata kaynaklarındandır. Son olarak girişim (*interference*) ve gürültü (*noise*) gibi hata kaynakları da mevcuttur [19]. Bu çalışmada ulaşma zamanı yöntemi kullanılacağı için; daha çok bu yöntemi etkileyen hata kaynakları ve bunlara karşı geliştirilen çözüm yöntemleri üzerinde durulacaktır.

1.2. Ulaşma Zamanı Yöntemi

Vericiden yola çıkan radyo sinyalleri alıcıya belli bir gecikme ile ulaşır. Ulaşma zamanı yöntemini kullanan konum tespit yöntemlerinde radyo sinyallerinin kat ettiği mesafe hesaplanırken bu gecikme değeri esas alınmaktadır. Aşağıdaki denklem bunu ifade etmektedir.

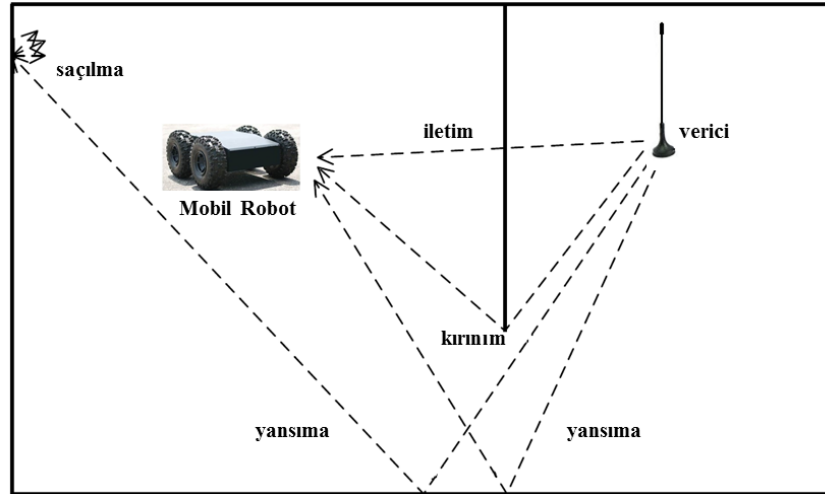
$$d = c \times \tau \quad (1.1)$$

Denklemden d radyo sinyalinin kat ettiği mesafeyi (m), c ; boş uzaydaki ışık hızını (3×10^8 m/s) ve τ değeri sinyalin uçuş süresini (s) yani gecikmeyi ifade eder. c değerinin bir sabit olarak seçildiği dikkate alındığında mesafe hesabında gecikme değerinin önemi ortaya çıkacaktır. Ulaşma zamanı yönteminde gecikme değerinin hassas bir şekilde ölçülebilmesi için verici ile alıcı arasında zaman senkronizasyonu gerekmektedir. Bunun gerekmediği bir yöntem de mevcuttur. Ulaşma zamanı farkı (*time difference of arrival: TDoA*) yönteminde; konum tespit sisteminde kullanılan farklı referans noktalarına ait gecikme değerlerinin arasındaki fark dikkate alınır [19]. Radyo sinyallerinin alıcıya ulaşma zamanı hesaplamalarda kullanılmadığı için bu yöntemde verici ile alıcı arasında senkronizasyon şartı aranmamaktadır. Bu tez çalışmasında ulaşma zamanı yöntemi üzerinde durulmaktadır. Ulaşma zamanı yönteminde karşılaşılan önemli iki hata kaynağından biri çoklu yol etkisi, diğeri gölgeleme etkisidir.

1.3. Ulaşma Zamanı Yöntemini Etkileyen Kanal Unsurları

1.3.1 Çoklu Yol Etkisi

Çoklu yol etkisi radyo sinyallerinin vericiden alıcıya giderken birden fazla yolu izlemesini ifade eder (bkz. Şekil 1.1)[24]. Radyo sinyalleri; iletim (*transmission*), yansıma (*reflection*), saçılma (*scattering*) ve kırınım (*diffraction*) gibi etkiler altında alıcıya ulaşmaktadır. Bu durum kablosuz sinyallerin bina içi ortamlarda yayılmasının doğal bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır.



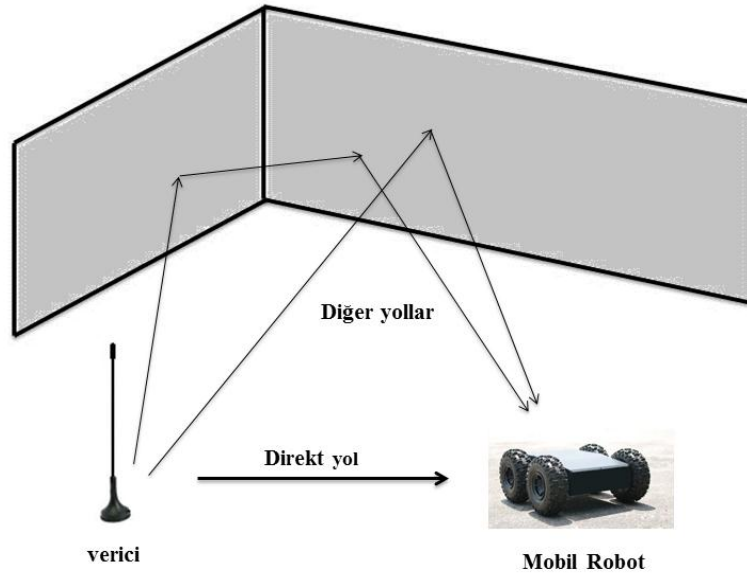
Şekil 1.1. Bina içi Radyo sinyalleri yayılımı: çoklu yol etkisi [24]

Netice itibari ile vericiden çıkan radyo sinyallerinin alıcıya çok çeşitli yollarla ulaştıkları açıktır. Diğer yandan ulaşma zamanı yöntemi kullanılacağı zaman bu yollardan sadece bir tanesi; direkt yol (*direct path*) dikkate alınır. Çünkü uzaklık hesabında direkt yol önemlidir. Direkt yol; verici ve alıcıyı birbirine bağlayan düz bir çizgi olarak düşünülebilir (bkz. Şekil 1.2). Geometrik olarak direkt yol verici ve alıcı arasındaki en kısa yolu, bir diğer ifade ile gerçek mesafeyi tanımlamaktadır.

Alternatif yolları kullanan radyo sinyallerinin direkt yola göre daha uzun bir yol kat ettikleri açıktır. Bu durumun doğal bir sonucu olarak radyo sinyalleri daha fazla gecikme ile alıcıya ulaşır. Çoklu yol etkisi matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [17].

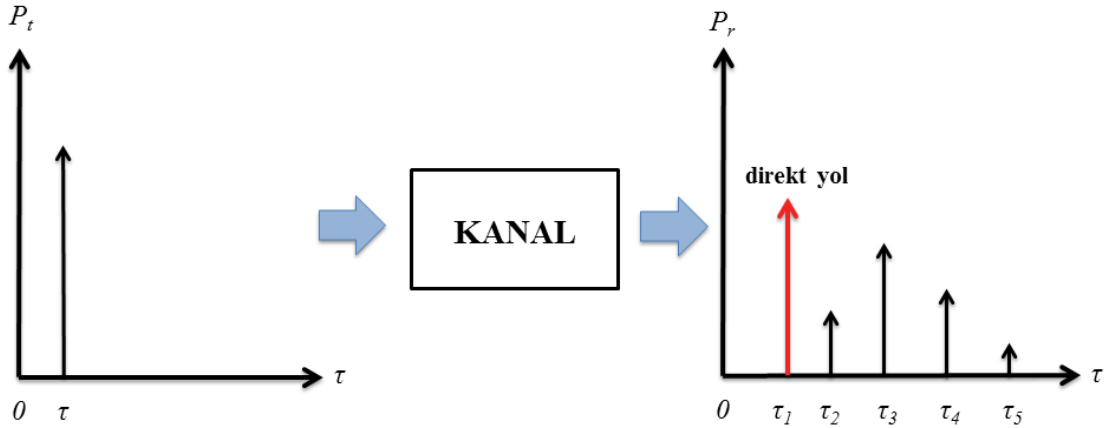
$$h(\tau) = \sum_{i=1}^{L_p} \alpha_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (1.2)$$

Denklemden $h(\tau)$; verici ile alıcı arasındaki mesafe d olmak üzere kanalın dürtü cevabını, L_p ; çoklu yol bileşen sayısını, $\alpha_i = |\alpha_i| e^{j\phi_i}$ konuma özgü rastsal kompleks genlik değerini, τ_i ; i 'inci bileşenin gecikme değerini ifade etmektedir.



Şekil 1.2. Direkt yol gösterimi

Denklemin 1.2'ye göre; iletilen bir $\delta(\tau)$ dürtüsü (sinyali) bina içi kablosuz kanalın karakteristik bir özelliği olan çoklu yol etkisinden dolayı alıcıya belli gecikmelerle ulaşan farklı büyüklük (*magnitude*) ve fazda (*phase*) çok sayıda sinyalin toplamı olarak alıcıya ulaşır (bkz. Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Çoklu yol kanal etkilerinin şematik gösterimi [25]

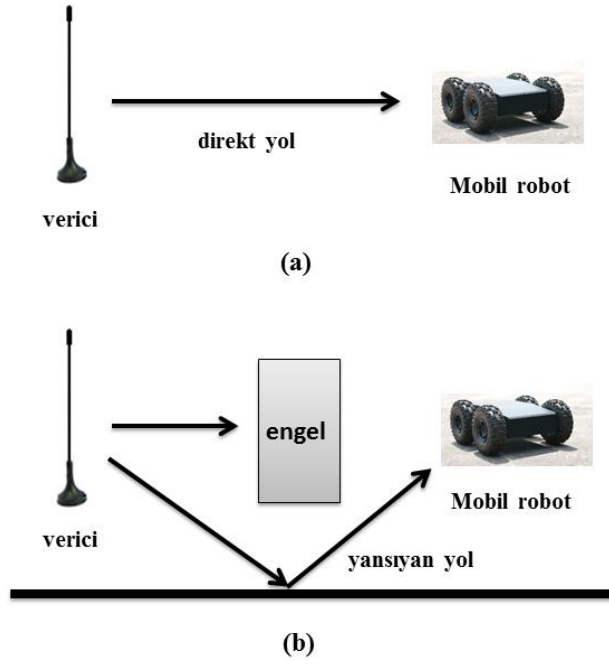
Şekil 1.3’de yer alan dikey çizgiler farklı yolları göstermektedir. Bunların ilki ve en güçlü yol olan direkt yolu ifade etmektedir. Bir dizi yansıma ve iletimle alıcıya ulaşan diğer yollar ise direkt yoldan sonra belirli gecikme ve daha düşük güç değerleriyle alıcıya ulaşır.

Bu durumu daha iyi açıklamak için şöyle bir örnek verilebilir. Bir kişinin boş ve geniş bir hangarda bağırıldığını hayal edin. İnsan kulağı çıkan sese ait belirli sayıda ayırt edilebilecek güçteki yansımaları işitecektir. Yankılanma olarak da adlandırılan bu durum tamamen çoklu yol etkisinden kaynaklanmaktadır [25].

Konumlandırma sisteminin kullandığı iletim bant genişliğinin uygun ölçüde artırılması, TOA yönteminde çoklu yol etkilerinin meydana getirdiği hatayı önemli şekilde azaltmaktadır [17]. Bu olgunun altında bant genişliğinin artmasıyla kanal profilini oluşturan yolların daha belirgin hale gelmesi ve daha yüksek bir hassasiyetle çözümlenebilmeleri yatmaktadır. Diğer yandan artan bant genişliği sayesinde kanal profili kanal cevabına yaklaşmaktadır [26].

1.3.2. Gölgeleme Etkisi

Bina içi kablosuz kanal şartlarının taşıdığı bir diğer zorlaştırıcı unsur ise alıcı ile verici arasında direkt görüş hattının (*line of sight; LOS*) genellikle olmayışıdır (bkz. Şekil 1.4). Bu durum direkt görüş hattının olmaması (*non line of sight; NLOS*) şeklinde adlandırılır.



Şekil 1.4. (a) LOS durumu (b) NLOS durumu [27]

NLOS durumlarında vericiden yola çıkan radyo sinyalleri alıcıya varmadan bir engelle karşılaşacak ve bloke olacaktır. Bu engel herhangi bir yapı malzemesi olabileceği gibi, asansör gibi büyükçe bir metalik nesne veya bir fabrika ortamında makineler de olabilir. Netice itibarıyla blokaja uğrayan radyo sinyalinin gücünde ciddi bir düşüş meydana gelecektir. Bu durum Gölgeleme (*shadowing*) olarak adlandırılır.

Vericiden yola çıkan radyo sinyalleri alıcıya ulaşmaya kadar belirli bir zayıflamaya uğrarlar. Bu zayıflama verici ile alıcı arasındaki mesafeye bağlı olduğu kadar gölgeleme etkisine de önemli ölçüde bağlıdır. Sinyalin verici çıkışındaki gücü P_t ile alıcıya ulaşma gücü P_r arasındaki bağıntı bina içi ortamlar için aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$10\log_{10} P_r = 10\log_{10} P_t - 10\alpha \log_{10} d + X \quad (1.3)$$

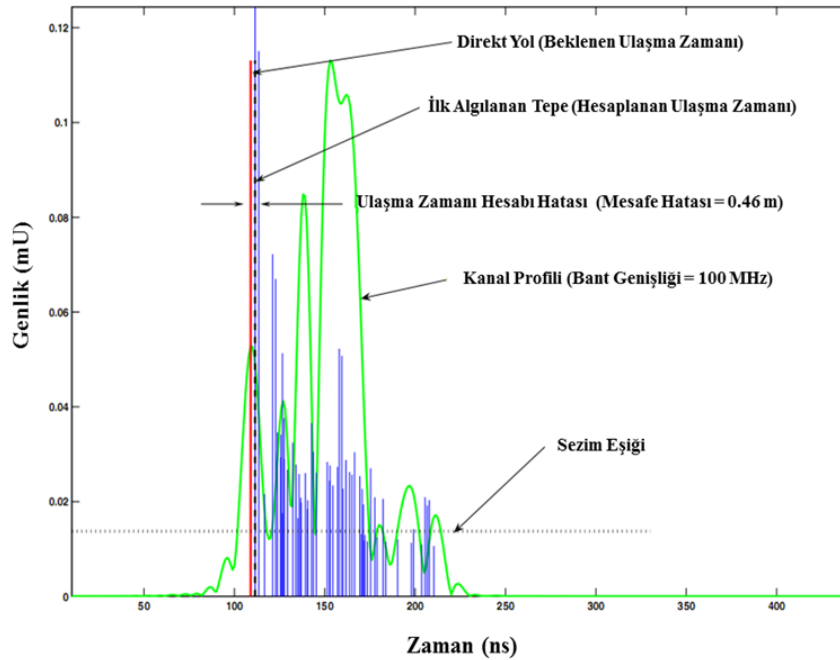
Denklemden α : mesafe-güç gradyanını ve X : gölgeleme sönümlemesini ifade etmektedir. Mesafe güç gradyanı (α) ; radyo sinyallerinin kanal üzerinde ilerlerken güçlerinde meydana gelen azalmayı kat ettikleri mesafe ile ilişkilendiren bir skalerdir. α değeri farklı bina içi ortamlarda 3.2 – 5.6 arasında değişen farklı değerler almaktadır [27]. Denklem 1.5'te gölgeleme etkisi X değişkeni ile ifade edilmektedir ve log-normal dağılım gösteren rastsal bir değişkendir. Bu değişken için standart sapma değeri farklı bina içi senaryolarda 1.7 ile 7.7 dB arasında değişebilmektedir [27].

1.4. Ulaşma Zamanı Yönteminde Direkt Yolun Davranışı

Ulaşma zamanı yönteminde dikkate alınan temel parametre direkt yolun davranışdır. Buna bağlı olarak kanalın iki farklı davranışından söz edilebilir. Bunlar direkt yolun algılanması (*detected direct path*; DDP) ve algılanamaması (*undetected direct path*; UDP) durumlarıdır. Birinci durumda mesafe ölçüm hatası nispeten düşük seviyelerde olacaktır. İkinci durumda ise beklenmeyen büyüklükte mesafe ölçüm hatalarıyla karşılaşılabilir [23].

1.4.1. Direkt Yolun Algılanması (DDP) Durumu

Vericiden çıktıktan sonra çoklu yol etkileriyle farklı yollarla gelen her bir radyo sinyalinin alıcıya ne kadarlık bir gecikmeyle ulaştıklarını gösteren grafik kanal profili (*channel profile*) olarak adlandırılmaktadır [23]. Radyo sinyallerinin alıcı tarafından algılanabilmesi için güçlerinin alıcının sezim eşiğinin (*receiver sensitivity*) üzerinde olması gerekir. Sezim eşiği, alıcının algılayabileceği en düşük sinyal seviyesi olarak ifade edilebilir (bkz. Şekil 1.5).



Şekil 1.5. DDP durumları için örnek kanal profili [23]

Şekilde yer alan ilk algılanan tepe değeri (*first detected peak*; FDP) ulaşma zamanı yönteminde dikkate alınan temel parametredir. Filtre edilmiş kanala bir tepe algılama (*peak detection*) algoritmasının uygulanmasıyla FDP ve buna ait ulaşma

zamanı bulunabilir [28]. Normal şartlar altında ilk algılanan tepe değeri direkt yolu izleyerek gelen sinyale aittir. Bu değer kullanılmasıyla verici ile alıcı arasındaki direkt mesafe (d_{DP}) aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Denklemde τ_{DP} değeri direkt yolu izleyen sinyalin maruz kaldığı gecikme değerini (s) ifade eder.

$$d_{DP} = \tau_{DP} \times c \quad (1.4)$$

Çoklu yol etkilerinden dolayı direkt yoldan farklı bir yolu izleyerek alıcıya ulaşan radyo sinyali ilk tepe değeri olarak algılanabilir. Bu durumda d_{FDP} mesafesi (m) aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır;

$$d_{FDP} = \tau_{FDP} \times c \quad (1.5)$$

Denklemde τ_{FDP} ilk algılanan tepe değerine ait gecikmeyi ifade etmektedir. Direkt yoldan gelen sinyal çoklu yol etkisinden dolayı zaman skalasında sola veya sağa kayma gösterebilir. Bu ise mesafenin eksik ya da fazla ölçülmesine neden olacaktır. Netice olarak gerçek mesafe ile ölçülen mesafe arasındaki fark mesafe ölçüm hatası (*distance measurement error; DME*) olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu değer aşağıdaki denklemde ε_d ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_d = d_{FDP} - d_{DP} \quad (1.6)$$

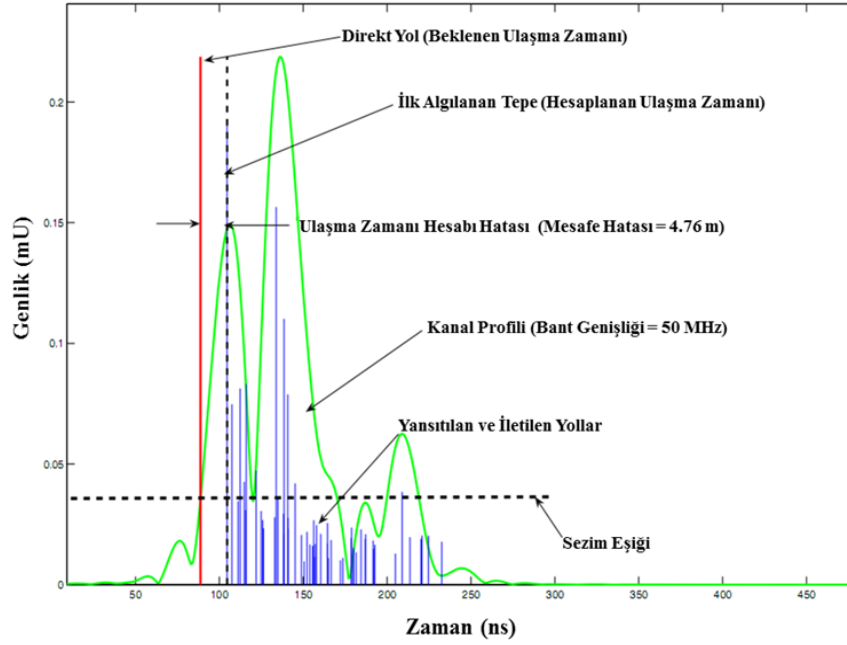
Direkt yolu takip eden sinyalin gücü alıcının sezim eşiğinin üzerinde olduğunda konumlandırma sistemi tarafından FDP olarak algılanır. Netice olarak beklenen ulaşma zamanı değeri ile ölçülen değer arasında nispeten düşük bir hata değeri meydana gelir (bkz. Şekil 1.5). Sözü edilen bu durum direkt yolun algılanması (*detected direct path; DDP*) şeklinde ifade edilir.

DDP durumlarında temel hata kaynağı çoklu yol etkisidir. Konumlandırma sisteminin kullandığı bant genişliğinin artırılması ile çoklu yol bileşenleri daha kolay çözümlenebilmektedir [23]. Bu sayede mesafe ölçümü çok daha hassas bir şekilde yapılabilir.

1.4.2. Direkt Yolun Algılanamaması (UDP) Durumu

Görüş hattının olmadığı UDP durumlarında; direkt yolu takip eden sinyalin gücü alıcının sezim eşiği altında kalmaktadır. Böyle bir durumda gücü alıcının sezim eşiği üzerinde olan bir başka yoldan gelen sinyal FDP olarak algılanır. Bu sinyal daha uzun bir yoldan geldiği için daha fazla gecikir. Netice olarak beklenen ulaşma zamanı

değeri ile ölçülen değer arasında istenmeyen büyük farklar oluşur [23]. Şekil 1.6 ve denklem 1.4'den anlaşılacağı gibi bu fark mesafe ölçüm hatasına neden olur.



Şekil 1.6. UDP durumları için örnek kanal profili [23]

UDP durumlarında DDP durumlarına nispeten çok daha büyük mesafe ölçüm hatalarıyla karşılaşmaktadır. Şekil 1.5'te DDP durumunda mesafe ölçüm hatası cm'ler ile ifade edilirken (0.46 m) Şekil 1.6'da UDP durumlarında 4.76 m gibi oldukça büyük bir değer almaktadır.

UDP durumunun iki şekilde meydana geldiği söylenebilir. İlkinde direkt yolu izleyerek gelen sinyal, yolda asansör gibi büyükçe bir nesneyle veya metalik bir cisimle karşılaşır. Bu şekilde bloke olan sinyal gücünü ciddi şekilde kaybedebilmektedir. Bu durum literatürde gölgeleme etkisinden dolayı algılanamayan direkt yol (*shadowed undetected direct path; SUDP*) durumu olarak bilinir [23]. İkinci çeşit UDP durumu ise görüş hattının olmadığı ortamlarda (bkz. Şekil 1.4.) ve daha çok kapsama alanının sınırlarında meydana gelmektedir. Bu durumun oluşmasının temel nedeni ise verici ile alıcı arasındaki mesafenin çok büyük olmasıdır. Bu mesafeyi kat ederken direkt yol sinyal gücü yine zayıflayacak ve bazı durumlarda alıcının sezim eşiği altında kalacaktır. Söz konusu durum; kullanılan sistem elemanlarından ve ortamdan bağımsız olarak doğal bir şekilde meydana gelmektedir ve literatürde doğal olarak algılanamayan direkt yol durumu (*natural undetected direct path; NUDP*) olarak adlandırılmaktadır [23].

Her iki durumda da direkt yol FDP olarak algılanamamakta ve bunun yerine farklı bir yol yanlışlıkla direkt yol olarak algılanmaktadır. NUDP ile karşılaştırıldığında SUDP durumlarında konum hesabında daha büyük hataların meydana geldiği görülmektedir [23].

Çoklu yol etkilerinin aksine sistem bant genişliğinin artırılması UDP kaynaklı hataların çözülmesinde etkili olmamaktadır [20]. Bunun yerine UDP durumlarının ayırt edilmesine ve kanal üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik teorik çalışmalar yapılmaktadır [29].

1.5. Kanal Modelleri

Radyo sinyalleri vericiden alıcıya doğru giderken bir radyo kanalı üzerinden geçerler. Kanal; radyo vericisi ile alıcısı arasındaki ortam olarak düşünülebilir. Konumlandırma problemi açısından kanalın iki temel özelliğinden bahsedilebilir; yol kaybı ve gecikme (*delay*). Bunların yanında gürültü de kimi çalışmalarda dikkate alınmıştır. Kanal modeli ise temelde radyo sinyalinin kanaldan nasıl etkilendiğini matematiksel bir şekilde tanımlar [25].

Literatürde farklı amaçlar için geliştirilen birçok farklı kanal modeline rastlamak mümkündür. Konumu tespit edilecek olan robotun durağan halde ya da hareket halinde olma durumuna bağlı olarak kanalın davranışı değişebilir. İlkinde kanalın statik bir davranış sergilediği söylenebilir. İkincisinde ise robotun hareketinden dolayı kanalın davranışı dinamik bir yapı sergiler. Konumlandırma sisteminin kullandığı bant genişliğinin uygun ölçüde artırılarak çoklu yol etkilerinin ortadan kaldırılabileceği daha önce ifade edilmişti. Pahlavan ve arkadaşları sistemin kullandığı farklı bant genişliklerinin konumlandırma hassasiyetine etkisini konu alan bir çalışma yapmışlardır [17]. Çoklu yol kanal istatistiklerinin kullanıldığı bir diğer çalışmada UWB kullanan sistemler için NLOS durumlarının tanımlanması konu alınmıştır [30]. Çalışmada konumlandırma ağırlıklı en küçük kareler yöntemi yardımıyla yapılmaktadır. İlgili çalışmanın diğer NLOS tanımlama tekniklerinden farkı mesafe ölçümlerine ait bir ulaşma zaman geçmişine ihtiyaç duymamasıdır. Yöntemin NLOS durumlarının tanımlanması ihtiyacı duyduğu şey çoklu yol etkilerine maruz kalan kanala ait genlik ve gecikme istatistikleridir. Diğer yandan çalışma mobil istasyonun bina içerisinde sürekli hareket etmediği kabulüyle yola çıkmaktadır. Bu yaklaşımıyla çalışmada ortaya konulan çözüm daha çok bina içi kablosuz kişisel alan ağlar (*wireless personel area*

network;WPAN) için uygun olmaktadır. Yine Pahlavan ve arkadaşları kanalın statik yapısını dikkate alan bir diğer çalışmalarında; alıcı tasarımının ve binanın dış duvarlarının konumlandırma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [31].

Bina içi kablosuz kanalın yapısı son derece karmaşıktır ve rastgele bir şekilde değişebilir. Dolayısıyla kanalın yapısını tarif etmek için istatistiksel yaklaşımların kullanılması daha uygun olmaktadır. Bu noktada kanalın yapısına göre statik veya dinamik bir kanal modeli ortaya konulmalıdır.

1.5.1. Statik Kanal Modelleri

Hareket halinde olmayan bir kullanıcı için bina içi kablosuz kanalın da statik bir yapıda olması beklenebilir. Bu durumda mevcut fiziksel şartların matematiksel olarak modellenmesiyle yine o şartlara özgü statik bir kanal modeli geliştirilebilir. Literatürde oldukça fazla statik kanal modeli tanımlanmıştır. Bu çalışmaların birinde çoklu yol etkilerine maruz kalan statik bir kanalda direkt yolu izleyen sinyalin hesaplanan ulaşma zamanı dikkate alınmıştır. Söz konusu durumda meydana gelen mesafe ölçüm hatası için bir matematiksel bir model ortaya konulmuştur [32]. Aşağıda mesafe ölçüm hatası ifade eden temel eşitliğe yer verilmiştir.

$$\varepsilon_w(d) = \hat{d}_w - d \quad (1.7)$$

Denklemde W indisi sistem bant genişliğini ifade etmektedir. Bu temel eşitliği açıklarken çoklu yol etkilerinin neden olabileceği nispeten küçük hatalar ile UDP durumlarının neden olabileceği büyük hataları da dikkate almak gerekmektedir. İlgili çalışmada bu durum aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_w(d) = \varepsilon_{M,W}(d) + \xi_w(d)\varepsilon_{U,W}(d) \quad (1.8)$$

Denklemde $\varepsilon_{M,W}(d)$ çoklu yol etkilerinden kaynaklanan hatayı, $\varepsilon_{U,W}(d)$ ise UDP durumlarındaki hatayı temsil etmektedir. UDP durumlarının modellenmesinde rastsal değişken $\xi_w(d)$ kullanılmıştır. Bu değer UDP durumları varken “1”, yokken “0” değerini almaktadır. Çalışmada çoklu yol etkileri normalleştirilmiş mesafe ölçüm hatası (*normalized distance error*) γ_w yardımıyla aşağıdaki şekilde modellenmiştir.

$$\varepsilon_{M,W}(d) = \gamma_w \log(1+d) \quad (1.9)$$

Çalışmada UDP durumlarının modellenmesinde iki parametre dikkate alınmıştır. Bunlardan bir tanesi $\xi_w(d)$ ve diğeri $\varepsilon_{U,W}(d)$ dir. Rastsal bir değişken olan

$\xi_w(d)$ denklem 1.10'da gösterilen olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip ikili bir rastsal değişkendir.

$$f_{\xi_w}(x) = (1 - P_{U,W}(d))\delta(x) + P_{U,W}(d)\delta(x-1) \quad (1.10)$$

Denklemden mesafeye bağlı bir değişken olarak tanımlanan $P_{U,W}(d)$ yakın mesafeler için $P_{closeU,W}$ ve uzak mesafeler için $P_{farU,W}$ şeklinde adlandırılmış ve sınır değeri olarak 10 m seçilmiştir.

$$P_{U,W}(d) = \begin{cases} P_{closeU,W} & , d \leq 10m \\ P_{farU,W} & , d > 10m \end{cases} \quad (1.11)$$

Netice olarak mesafe ölçüm hatasını ifade eden genel model ise aşağıdaki şekilde ortaya konulmuştur.

$$\hat{d} = d + \gamma_w \log(1+d) + \xi_w(d)\varepsilon_{U,W} \quad (1.12)$$

Kanalın statik davranışını dikkate alan bir diğer çalışmada ortaya konulan istatistiksel modelde yol kazancı, ulaşma zamanı, ulaşma açısı ve çoklu yol bileşen sayısı gibi önemli parametreler birlikte dikkate alınmıştır [33]. Çalışmada ışın izleme (*ray tracing*) yönteminden yararlanılmıştır. Radyo dalgalarının boşlukta ışın şeklinde ilerlediklerini dikkate alan ışın izleme yöntemi, vericiden çıkan ışınların fiziksel davranışlarını modellemek üzere kurulmuştur [34].

Çalışmada kapsamlı bir ışın izleme (*ray tracing*) veri tabanından yola çıkılmış ve ilk ulaşan yola bağlı olarak çoklu yol bileşenlerinin ulaşma zamanları log-normal bir dağılım yardımıyla modellenmiştir. Ulaşma açısı; verici ile alıcıyı birbirine bağlayan hatta bağlı olarak 3 tepeli doppler benzeri (*3-peak doppler-like*) bir olasılık yoğunluk fonksiyonu yardımıyla modellenmiştir. Yol kazançlarının modellenmesinde yansıma ve iletim gibi istatistiksel nesne etkileşimlerinden yararlanılmıştır. Son olarak çoklu yol bileşen sayısının modellenmesinde mesafeye bağlı üstel bir fonksiyon kullanılmıştır.

Literatürde daha birçok statik kanal modelinin varlığı bilinmektedir. Ancak bu statik modellerin hiç biri bina içi bir ortam için mobil robotun hareketini yansıtmamaktadır. Bir mobil robotun bina içindeki hareketini dikkate alan kablosuz kanal şartları ancak dinamik bir model ile gerçeğe yakın olarak tanımlanabilir. Bir sonraki bölümde dinamik kanal modelleri üzerinde durulmaktadır.

1.5.2. Dinamik Kanal Modelleri

Bir mobil robot bina içinde hareket halinde iken kanalın yapısı da dinamik olarak değişecektir. DDP durumlarında mesafe ölçüm hatası çok az iken NUDP ve SUDP durumlarında beklenmeyen büyük hatalarla karşılaşmaktadır. Konum tespit sisteminde kullanılan her bir vericinin belirli bir kapsama alanı vardır. Mobil robot hareket halinde iken referans noktalarının kapsama alanları dışına çıkabilir ve mobil robotun konum tespit sistemindeki bütün referans noktaları ile bağlantısı kesilebilir. Bu durum kapsama alanı dışı (*no coverage; NC*) şekline adlandırılır. Bu durumlarda mobil robot hiçbir referans noktasıyla iletişim kuramadığı için mesafe ölçümü yapılamamaktadır. Hiçbir mesafe ölçümünün yapılamadığı bu durumlarda bir konum tespiti de yapılamayacaktır. Bu sebeple kanalın dinamik olarak modellenenilmesi için NC durumları da dikkate alınmalıdır [23].

Bina içinde ulaşma zamanı yöntemiyle konumlandırma sistemleri hakkında son yıllarda yapılan çalışmalarda kanalın dinamik yapısı da dikkate alınmaya başlanmıştır. Bu çalışmaların birinde Heidari ulaşım zamanı yöntemini kullanan konumlandırma sistemlerinin performansını kanalın dinamik yapısını da göz önüne alarak artırmayı amaçlamıştır [23]. Heidari çalışmasının ilk kısmında mesafe ölçüm hatasının dinamik davranışını yine direkt yolun dinamik davranışından yola çıkarak modellemeye çalışmıştır.

Heidari çalışmasında konumlandırma sisteminde kullanılan vericileri sabit tutarak hareket halindeki alıcı için farklı durumları dikkate almıştır. Heidari dört farklı kanal davranışı tanımlamıştır. Bunlar DDP, NUDP, SUDP ve NC'dir. Robot bina içerisinde hareket ettikçe kanal şartları da bu dört durum arasında değişir. Söz konusu bu dört durum için mesafe ölçüm hatası farklılıklar göstermektedir. Aşağıda mesafe ölçüm hatasının her bir durum için istatistiksel davranışını ifade eden olasılık dağılım fonksiyonları ve sayısal değerlere yer verilmiştir.

DDP durumunda dikkate alınan tek hata kaynağı çoklu yol etkisidir. Bu durumda hata normal (Gaussian) dağılıma sahip rastsal bir değişken olarak tanımlanabilir (bkz. Ek-1).

$$f(\varepsilon_{DDP}) = N(\mu_{DDP}, \sigma_{DDP}) \quad (1.13)$$

NUDP durumunda dikkate alınan tek hata kaynağı çoklu yol etkisi değildir. Bu durumda hatanın yine normal dağılıma sahip rastsal bir değişken olduğu söylenebilir

(bkz. Denklem 1.14). Ancak burada verici ile alıcı arasındaki uzun mesafeden dolayı radyo sinyallerindeki zayıflama da dikkate alınmaktadır.

$$f(\varepsilon_{NUDP}) = N(\mu_{NUDP}, \sigma_{NUDP}) \quad (1.14)$$

Birinci ve ikinci durumlar benzer şekilde modellense de Tablo 1.1’den normal dağılıma ait parametrelerdeki ciddi değişiklik açıkça görülebilir. DDP durumundan NUDP durumuna geçince standart sapma (σ) değeri yaklaşık iki katına çıkarken ortalama (μ) değeri yaklaşık sekiz kat artmaktadır.

Tablo 1.1. DDP ve NUDP durumları için normal dağılım parametreleri [23].

Kanal durumu	μ	σ
DDP	0.0135	0.0105
NUDP	0.1063	0.0239

SUDP durumu için Mesafe ölçüm hatası değişkeni ilgili çalışmada genelleştirilmiş uç dağılımı (*generalized extreme value; GEV*) yardımıyla modellenmiştir (bkz. Ek-1).

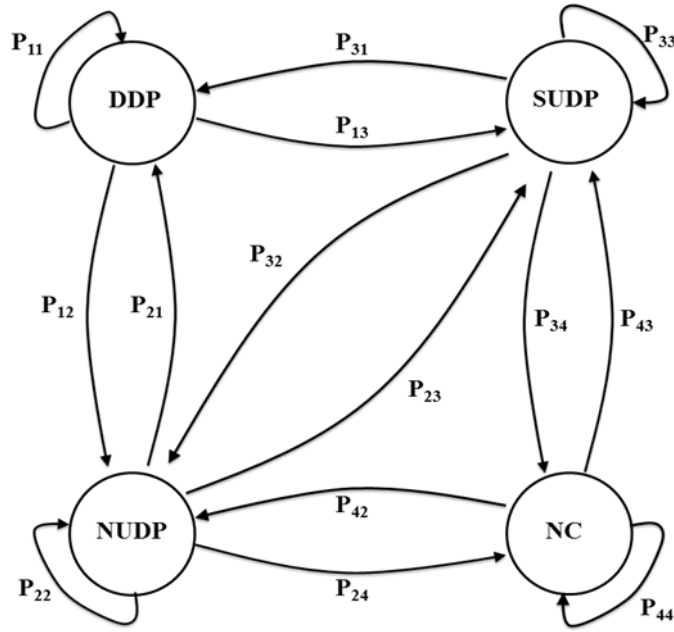
$$f(\varepsilon_{SUDP}) = GEV(\mu_{SUDP}, \sigma_{SUDP}, \kappa_{SUDP}) \quad (1.15)$$

Denklem 1.15’de ifade edilen GEV dağılıma ait parametreler aşağıda Tablo 1.2’de verilmiştir. Mobil robotun hareketiyle kanalın yapısı yukarıda ifade edilen dört durum arasında dinamik bir şekilde ve olasılıksal olarak değişecektir (bkz. Şekil 1.7).

Tablo 1.2. SUDP durumu için GEV dağılım parametreleri [23].

Kanal durumu	μ	σ	κ
SUDP	2.5218	1.2844	0.4198

Heidari çalışmasında; direkt yolun dinamik davranışının istatistiksel olarak modellenmesinde Markov Zinciri (*Markov chain*) yöntemini uygun bir araç olarak görmüştür. Bu yöntemin stokastik prosesler için kullanıldığı bilinmektedir. Bu yöntem kullanılacağı durumda dinamik kanal şartlarında karşılaşılan her bir durum Markov zincirinde dikkate alınmalıdır. Buna göre söz konusu stokastik proses için durum uzayı $Z = \{ \text{DDP, NUDP, SUDP, NC} \}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 1.7. Bina içi konumlandırmada mesafe ölçüm hatasının dinamik davranışını temsil eden Markov modeli [23]

Markov modeline göre gelecek durumların geçmiş durumlardan bağımsız olduğu dikkate alınmaktadır. Bunun yanında; mevcut durumun açıklaması, sürecin gelecekteki evrimini etkileyebilecek tüm bilgiyi kapsamaktadır. Bu durum klasik Markov modeli yaklaşımında aşağıda denklemle ifade edilmektedir.

$$\Pr(X_{n+1} = x | X_n = x_n, \dots, X_1 = x_1) = \Pr(X_{n+1} = x | X_n = x_n) \quad (1.16)$$

Denklemde X_n mevcut durumu, X_{n+1} bir sonraki durumu ifade etmektedir. Markov özelliğine göre n anında sistemin durumu x_n ise $n+1$ anında sistemin durumunun x olma ihtimali sadece bir önceki andaki (n anındaki) duruma bağlıdır. Sistemin Markov modeline göre gelecek durumlara olasılıksal bir süreçle ulaşılabacaktır. Herhangi bir anda sistem belirli bir olasılık dağılımına bağlı olarak kendi durumundan başka bir duruma geçebilir yahut aynı durumda kalabilir (bkz. Şekil 1.7). Alıcının durumundaki değişiklikler durum geçişi (*state transition*) olarak bilinir ve çeşitli durum değişiklikleri ile ilişkili olasılıklar da geçiş olasılıkları (*transition probability*) olarak adlandırılır. (P_{ij} , $i,j=1,\dots,4$) olmak üzere durumlar arasındaki değerler P_{ij} , aynı durumda kalma veya bir durumdan diğerine geçiş olasılığını ifade eder. Tüm bu özellikler dikkate alındığında Markov yönteminin dinamik kanal yapısının modellenmesi için oldukça uygun olduğu görülmektedir. Heidari çalışmasında oluşturduğu Markov modeline ait parametreleri matematiksel olarak ortaya koymuş ve daha sonra bu sonuçları gerçek bina ortamlarda

yaptığı ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Durumlar arası tipik geçiş olasılıklarından oluşan $\mathbf{P}$ matrisi aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9744 & 0.0095 & 0.0159 & 0 \\ 0.0112 & 0.9642 & 0.0153 & 0.0091 \\ 0.0248 & 0.0203 & 0.9403 & 0.0145 \\ 0 & 0.0066 & 0.0079 & 0.9853 \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Heidari'nin dikkate aldığı model çoklu yol etkileri, gölgeleme etkileri gibi kanal şartlarını da kapsadığı için gerçeğe oldukça yakındır. Tezin geri kalan bölümlerinde seçilen algoritmaların performanslarının analiz ve karşılaştırılmasında yukarıda anlatılan model dikkate alınmıştır.

2. BÖLÜM

ALGORİTMALAR VE PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde bina içi kablosuz konumlandırmada kullanılan iki algoritmanın kanalın dinamik yapısı dikkate alınarak belirli şartlar altındaki performansları gözlemlenmiştir. Gözlemler seçilen bina içi senaryonun simülasyon ortamına aktarılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Seçilen algoritmaların dinamik kanal koşullarında performans analizi aynı performans ölçütü kullanılarak yapılmıştır.

2.1. Konum Tespit Algoritmaları

Konumlandırma amacıyla tasarlanan algoritmalar iki başlık altında incelenebilir: model tanıma (*pattern recognition*) esasına dayanan yöntemler ve geometrik yöntemler. Bina içi ortamlarda kablosuz konum tespiti yapılacağı zaman seçilecek algoritmanın çeşidi yine bina içi ortamın kendisine ve konum tespitinden beklenen hassasiyete bağlıdır.

Kablosuz konumlandırma sistemlerinde model tanıma esasına dayanan algoritmalar daha çok RSS yöntemi için tasarlanmıştır ve TOA için çok fazla kullanılmamıştır. Bununla beraber TOA bazlı model tanıma algoritmalarının bir örneği de vardır. Kanaan ve Pahlavan yaptıkları çalışma sonrasında CN-TOAG (*Closest-Neighbor with TOA Grid Algorithm*) algoritmasını literatüre kazandırmışlardır [35]. Çalışmada geliştirilen algoritmanın performansı geometrik yöntemler arasında olan LS ve RWGH algoritmalarının performanslarıyla karşılaştırılmaktadır.

Model tanıma algoritmalarına örnek olarak gösterilebilecek bir diğer çalışmada bina içi konumlandırma ve izleme RF sinyalleri yardımıyla yapılmaktadır [36]. Çalışmada RADAR (*RADio Detecting And Ranging*) olarak adlandırılan sistem; deneysel olarak elde edilen sinyal gücü ölçümlerini ve basit ancak etkili bir sinyal yayılım modelini temel almaktadır. Deneysel yöntem konumlandırma hassasiyeti

yönünden daha üstün olsa da sinyal yayılım modelinin pratikte uygulanması daha kolaydır. Çalışmada kullanıcıya ait konumlandırma ve izleme yüksek bir hassasiyette yapılabilmektedir.

RADAR sisteminin çözünürlüğü tipik ölçülerdeki bir ofis odası için yaklaşık 2-3 metre arasındadır. Çalışmada elde edilen sonuçlar sonrasında ortaya atılan fikir çoğu ofis ortamında mevcut olan RF (*radio frequency*) temelli kablosuz yerel alan ağlarına (*Wireless Local Area Network*; WLAN) yeni bir işlev kazandırılabilir. Örneğin en yakındaki yazıcıdan çıktı almak, bina içinde yön bulmak gibi çeşitli konuma duyarlı (*location-aware*) hizmetlerin verilmesiyle RF temelli kablosuz yerel alan ağ yeni bir değer kazanacaktır [36].

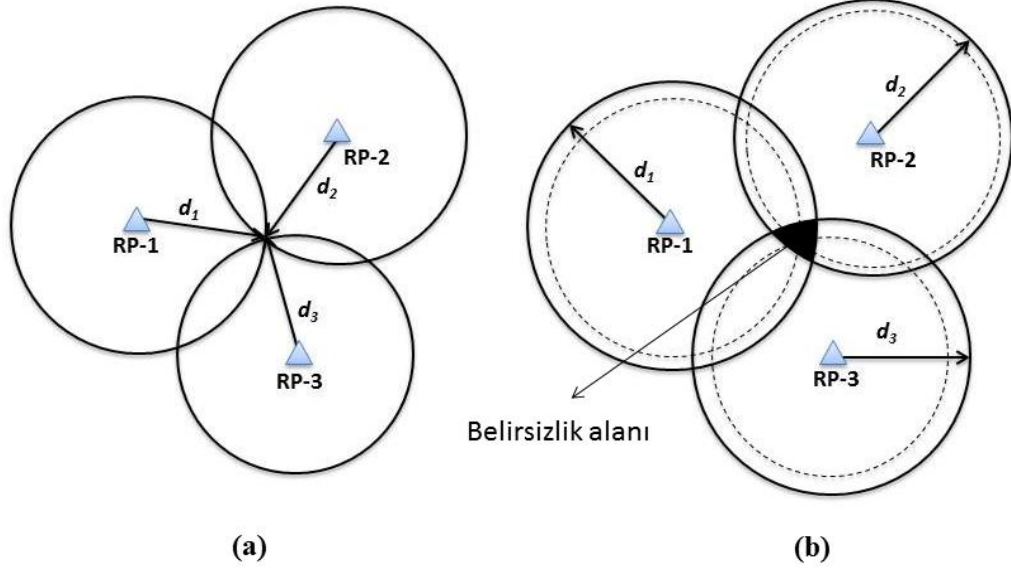
Kablosuz yerel alan ağlarını (*Wireless Local Area Networks*; WLANs) konu alan bir diğer çalışma; bina içinde konuma bağlı uygulamalar için konum hesabının yapılmasıyla ilgilenmektedir [37]. Kaynak tarama ve kontrol (*resource tracking and management*), gezi rehberliği (*travel guide*) gibi konum bağlı bazı uygulamalar için konum hesabı yeterli hassasiyette yapılmalıdır. Model tanıma algoritmalarından yola çıkan çalışmanın birinci kısmında; bina içinde çok sayıda noktada sinyal gücü değeri konum imzası (*fingerprinting*) veri tabanını oluşturmak üzere ölçülmektedir. İkinci kısımda ise konum tanımlama modülü yardımıyla konumlandırma hesabında kullanılan mesafeler ölçülmektedir. Çalışmanın bir diğer ilgi alanları da konum imzası veri tabanının nasıl daha kolay oluşturulabileceği ve konum hesabı hassasiyetinin nasıl artırılabilir. Çalışmada bu amaçlarla konum imzası karakteristiklerini etkileyen faktörler ele alınmıştır.

Geometrik yöntemle dayanan algoritmalar ise; RP'lerin gerçek konumları ile alıcı (konum bilgisine ulaşılmaya çalışılan kişi veya cisim) arasındaki geometrik ilişkiden yola çıkar [16,19]. Bu tez çalışmasında geometrik yöntemler ile ilgilenilmiştir. Sonraki bölümde geometrik yöntemler bu amaçla daha detaylı olarak ele alınmıştır.

2.2. Geometrik Yöntemler

Geometrik yöntemler ile konum hesabı yapılacağı zaman sinyalin ulaşma zamanı değeri en az üç farklı referans noktası tarafından ölçülür. Referans noktaları tarafından ölçülen değerler birleştirilir ve konum bilgisi kullanılan algoritma yardımıyla hesaplanır (bkz. Şekil 2.1) [19]. Bu durumda ancak 2 boyutlu konum hesabı yapılabilir. Konum bilgisini 3 boyutlu olarak elde etmek içinse sistemde en az dört referans noktası

kullanmak gerekecektir [27]. Geometrik yöntemler arasında üçgenleme (*triangulation* veya *trilateration*) yöntemi en temel yaklaşımlardandır.



Şekil 2.1. Üçgenleme yöntemi (a) ideal durum, (b) gerçek durumu

Yukarıdaki şekilde RP-1,2,3: referans noktalarını, $d_{1,2,3}$: ölçülen mesafeleri ifade etmektedir [16]. Aynı düzlemdeki 3 daire geometrik olarak 1 noktada kesişecektir. Şekil 2.1. (a)'da ifade edilen ideal durumda çoklu yol etkisinin olmadığı varsayılmaktadır. Bu durumda mobil robotun konumu hakkında net bir bilgiye ulaşmak mümkündür. Şekil 2.1. (b)'de ise çoklu yol etkilerinin varlığı dikkate alınmaktadır. Bu şekildeki kesikli çizgiler verici ile alıcı arasındaki gerçek mesafeleri ifade etmektedir. Kesintisiz çizgilerle gösterilen ölçülen mesafelerin ise gerçek değerlerden yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi çoklu yol etkilerinden dolayı radyo sinyallerinin daha fazla gecikmesidir. Gecikme değerinin olduğundan yüksek olması ölçülen mesafe değerini de artıracaktır (bkz. Denklem 1.1). Neticede mobil robotun bir noktada değil ancak bir alan içerisinde olabileceği söylenebilmektedir. Bu belirsizlik alanı Şekil 2.1. (b)'de gösterilmiştir.

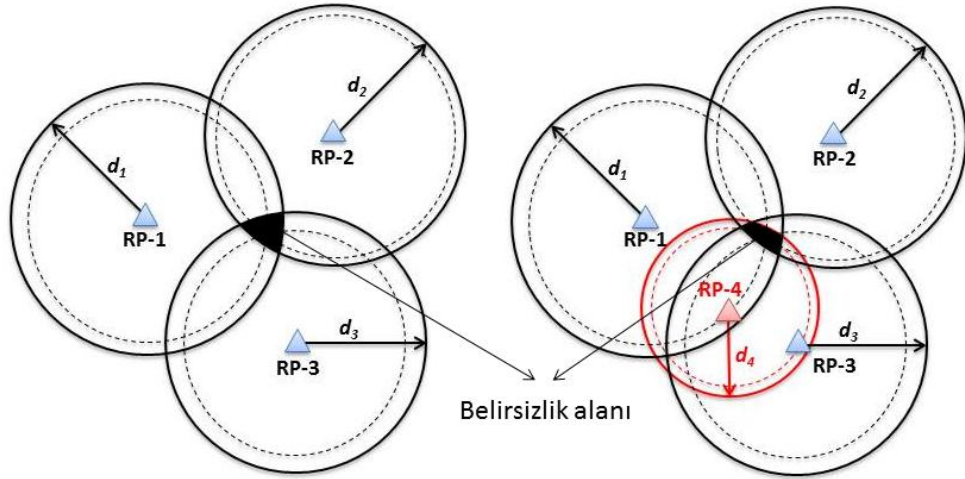
Şekil 2.1'deki senaryoda; x_m ve y_m mobil robotun konum koordinatlarını, (d_1 , d_2 , d_3) değerleri mobil robot ile referans noktaları (RP-1, RP-2, RP-3) arasındaki ölçülen mesafeleri temsil etmektedir. RP konum koordinatları sırasıyla (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) olarak ele alındığında aşağıdaki verilen denklem kümesinin birlikte çözülmesiyle mobil robotun konum koordinatları elde edilebilir.

$$d_1^2 = (x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2 \quad (2.1)$$

$$d_2^2 = (x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2 \quad (2.2)$$

$$d_3^2 = (x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2 \quad (2.3)$$

Yukarıda verilen nonlinear denklem sisteminin çözülmesiyle mobil robotun konum bilgisine ulaşılabilir. Bu amaçla üçgenleme yöntemi kullanılabilir. Diğer yandan bu yöntem ile üçten fazla referans noktasına ait hesaplamalar bir araya getirilememektedir [19]. Hâlbuki sistemde gürültü ve çoklu yol etkilerinin bulunduğu durumlarda üçten fazla referans noktasının hesaba katılması istenecektir. Bunun sebebi ölçüm sayısının artmasıyla belirsizlik alanının küçülmesidir. Aşağıda; Şekil 2.2 ile verilen senaryodaki belirsizlik alanının sisteme eklenen bir referans noktasıyla nasıl azaldığı gösterilmektedir.



Şekil 2.2. RP sayısının 3'ten 4'e çıkmasıyla belirsizlik alanının küçülmesi

Denklem 2.1-2.3 ile verilen nonlinear denklem sisteminin çözümünde En küçük kareler yöntemi kullanılabilir [19]. Devam eden alt bölümlerde En Küçük Kareler Tekniği (*least square*; *LS*) ve Ağırlıklı En Küçük Kareler Tekniği (*weighted least square*; *WLS*) hakkında kısa bilgi verilmiş ve seçilen senaryo için bu algoritmalara ait performans analizi sonuçları paylaşılmıştır.

2.2.1. En Küçük Kareler (LS) Tekniği

En küçük kareler tekniğinin temelinde genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilen hedef fonksiyonunun değerini minimize etmek yatmaktadır [38]. Bu yapıldığında mobil robotun konumunu ifade eden (x, y) gibi bir kestirim elde edilir.

$$f(\mathbf{x}) = f(x, y) = \sum_{i=1}^N (\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \hat{d}_i)^2 \quad (2.4)$$

Denklemde N ; referans noktası sayısını ifade etmektedir. Karekök içindeki ifade kartezyen koordinat sisteminde yer alan ve mobil robotun 2 boyutlu uzayda gerçek konumunu ifade eden bir (x, y) noktası ile (x_i, y_i) de yer alan bir referans noktası arasındaki gerçek mesafeyi ifade eder. $\hat{d}_i$; i 'nci referans noktası tarafından ölçülen mesafedir. Parantez içindeki fark ise genellikle kestirim kalanı (*residual*) olarak adlandırılmaktadır. $(x, y) = (\hat{x}, \hat{y})$ olduğu durumda residual değeri 0'a eşit olacaktır. Bu durumda $f(\mathbf{x}) = 0$ olacaktır. Ancak pratikte iki nedenden dolayı bu mümkün olmamaktadır. Birinci neden verici ile alıcı arasındaki zaman eşleme (*synchronization*) gibi sistematik hata kaynaklarıdır [16]. İkinci neden ise bir önceki bölümde anlatılan kanala bağlı etkilerdir (LOS ve NLOS durumları gibi). İlk neden göz ardı edildiği ve temel hata kaynağının kanal şartları olduğu kabul edildiğinde bu kabulü dikkate alan bir LS algoritması hedef fonksiyonun minimize edilmesinde kullanılabilir. Bu çalışmada Davidon tarafından geliştirilmiş bir LS algoritması kullanılmıştır [39].

Davidon algoritması Newton-Raphson yöntemini temel almakla birlikte genel olarak quasi-Newton yöntemlerine bir örnek teşkil eder. Yöntem aşağıdaki denklem ile ifade edildiği üzere Denklem 2.4 ile verilen hedef fonksiyonunu minimize eden noktaları iteratif bir yaklaşımla arar. Söz konusu bu noktalar genellikle bir $\mathbf{x}$ vektörü ile ifade edilir. $\mathbf{x}$ vektörünün her bir iterasyonda nasıl değiştiği aşağıdaki formülle ifade edilmiştir.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{g}(\mathbf{x}_k) \quad (2.5)$$

Denklemde $\mathbf{H}_k$, $f(\mathbf{x})$ fonksiyonuna ait Hessian matrisinin tersine bir yaklaşımı ifade eder. Hessian matrisinin çok değişkenli bir fonksiyonun ikinci dereceden kısmi türevlerinin oluşturduğu bir matris olduğu bilinmektedir. Buna göre $f(\mathbf{x})$ fonksiyonuna ait Hessian matrisi $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ olarak adlandırılırsa $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ 'e ait elemanlar aşağıdaki denklem yardımıyla tanımlanabilir.

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = G_{jk}(x_1, x_2, \dots, x_N) \equiv \frac{\partial^2 f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)}{\partial \mathbf{x}_j \partial \mathbf{x}_k} \quad (2.6)$$

Denklem 2.5'te $f(\mathbf{x})$ 'in gradyanını ifade eden $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ ise aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \nabla f(\mathbf{x}) \quad (2.7)$$

İkinci kısmi türevlerin oluşturduğu $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ matrisinin hem simetrik hem de pozitif-tanımlı (*positive-definite*) olduğu görülmektedir. Buna rağmen Newton-Raphson yönteminde genellikle istendiği gibi Hessian matrisinin ve bu matrisin tersinin her bir iterasyonda hesaplanması oldukça yüksek bir hesap yüküne neden olabilir. Bundan dolayı Davidon algoritması gerçek Hessian matrisine yaklaşık bir çözüm ortaya koymaya çalışır. Bu yaklaşık çözüm matrisi $\mathbf{H}_k$ ile gösterilir. Elbette bu yaklaşımda $\mathbf{H}_k$ ’nın hem simetrik hem de pozitif-tanımlı kaldığından emin olunmalıdır. Bu düzeni sağlamak üzere $\mathbf{H}_k$ her bir iterasyonda aşağıdaki denkleme uygun şekilde güncellenir.

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \frac{\lambda_k - 1}{\rho_k} \mathbf{r}_k \mathbf{r}_k^T \quad (2.8)$$

Denklemde $\mathbf{r}_k$ şu şekilde tanımlanır.

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{g}(\mathbf{x}_{k+1}) \quad (2.9)$$

Yine aynı denklemdeki ρ_k aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\rho_k = (\mathbf{g}(\mathbf{x}_{k+1}))^T \mathbf{H}_k (\mathbf{g}(\mathbf{x}_{k+1})) = \mathbf{r}_k^T \mathbf{g}(\mathbf{x}_{k+1}) \quad (2.10)$$

Denklem 2.10’nun ikinci dereceden bir denklem olduğu kolayca anlaşılabilir. Bundan dolayı $\mathbf{H}_k$ pozitif-tanımlı olduğu sürece ρ_k sıfırdan büyük bir değer alacaktır ve sadece $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ ’in sıfır olduğu durumda sıfır değerini alacaktır. Bundan dolayı denklem 2.10 algoritmanın sonlanması için genelde bir kriter olarak kullanılır. ρ_k ’nin pratikte hiçbir zaman sıfır değerini almayacağı açıktır. Diğer yandan ε gibi oldukça küçük bir tolerans değeri seçilebilir ve $\rho_k \leq \varepsilon$ durumunun sağlandığı iterasyonda işlemlere son verilebilir.

Tüm bu kabullerden sonra geriye λ_k ’nın doğru seçilmesi kalır ki bu da oldukça karışık bir işlemdir. Denklem 2.8’den anlaşılacağı üzere bu değişken, birbirini izleyen iterasyonlar boyunca $\mathbf{H}_k$ matrisinin pozitif tanımlı kaldığından emin olmak açısından önem taşır. Denklem 2.8’den yola çıkarak;

$$\lambda_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_k + 1} \quad (2.11)$$

olduğu söylenebilir. Bu denklemdeki γ_k değişkeni ise aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\gamma_k \equiv -\frac{\mathbf{r}_k^T \mathbf{g}(\mathbf{x}_k)}{\rho_k} \quad (2.12)$$

λ_k değerinin denklem 2.11 ve denklem 2.12’den yola çıkarak seçilmesi $\mathbf{H}_k$ ’nın bir iterasyondan bir diğerine geçerken pozitif tanımlı kalmasını genellikle garanti eder. Bu

durumun istisnası $\gamma_k = -1$ olmasıdır. Böyle bir ihtimalden dolayı Davidon algoritması γ_k değerinden yola çıkarak λ_k değerinin seçilmesinde çok daha farklı bir yöntem kullanır. Aşağıda gösterilen bu yöntemde öncelikle biri α diğeri β olma üzere iki sabit tanımlanır. Bu iki sabitin değerleri daha sonra da belirlenebilir. Bu kabuller altında Davidon algoritması aşağıdaki dönüşümü kullanır.

$$\Lambda(\gamma) = \begin{cases} \alpha & -\frac{\beta}{\beta+1} < \gamma < \frac{\alpha}{1-\alpha} \\ \beta & -\frac{\beta}{\beta-1} < \gamma < \frac{\beta}{\beta+1} \\ \frac{\gamma}{\gamma+1} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (2.13)$$

Tez çalışmasında en küçük kareler tekniğini kullanan ve yukarıda tanımlanan Davidon algoritmasının simülasyon ortamındaki performansı incelenmiştir. İlgili performans sonuçları bir sonraki kısımda ele alınan ağırlıklı en küçük kareler tekniğine bir örnek teşkil eden residual weighting (RWGH) algoritmasına ait performans sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2.2.2. Ağırlıklı En Küçük Kareler (RWGH) Tekniği

NLOS durumlarının bina içi konumlandırma sistemlerinde yapılan mesafe ölçümlerini olumsuz olarak etkilediği bilinmektedir. Bir çeşit ağırlıklı en küçük kareler tekniği olan Residual weighting (RWGH) algoritması NLOS durumlarının olumsuz etkilerini azaltmayı amaçlar [40,41].

RWGH algoritmasının temel yaklaşımı şu şekilde özetlenebilir. NLOS durumlarının hemen hemen her defasında pozitif mesafe ölçüm hatalarına neden olduğu bilinmektedir [26]. Bu durum ise konum hesabı işlemleri yapılırken LOS durumlarına nispetle daha yüksek kalanların (*residual*) meydana gelmesine neden olur (bkz. Denklem 2.4.). Bu yaklaşımla gerekli minimum referans noktasından (2 boyutlu bir konum tespiti için 3 RP) daha fazla referans noktasına sahip bir konumlandırma sisteminde mesafe ölçümleri farklı 3'erli ve daha büyük gruplar oluşturacak şekilde birleştirilebilir ve oluşan bu alt grupların her birinden birer LS konum kestirimi elde edilebilir. Oluşturulan bu ara kestirimlerin bazıları diğerlerinden daha az kalana (*residual*) sahip olacaktır. Daha az kalan demek bir diğer anlamda daha kaliteli bir kestirim demektir. Her bir ara kestirimin kendisine ait kalanın tersiyle

ağırlıklandırılması sonucunda son konum hesabı bu ara kestirimlerin doğrusal bir kombinasyonu olarak elde edilebilir. Bu yöntem sayesinde daha az kalana sahip ara kestirimler kesin konum hesabında daha fazla etkiye sahip olacaktır. Bu ise daha doğru bir kestirim ortaya koyacaktır. Daha doğru kestirimlerin işleme konulması ile de daha doğru bir konum tespiti yapılabilir. Netice olarak bu yaklaşım sayesinde konum tespit hesabının performansı önemli ölçüde artırılabilir.

Konumlandırma sistemindeki referans noktalarınca rapor edilen mesafe sayısı M olduğunda ($M > 3$) RWGH algoritması N farklı mesafe ölçüm kombinasyonunu işleme koyar.

$$N = \sum_{i=3}^M \binom{M}{i} \quad (2.14)$$

Denklemden M nin k 'lı kombinasyonlarının sayısı $\{S_k \mid k = 1, 2, \dots, N\}$ kümesiyle ifade edilir. Örneğin konumlandırma sisteminde 4 RP varken 3 RP'li üç farklı grup ve tüm RP'lerin bulunduğu dördüncü bir grup oluşur. Konumlandırma sistemindeki RP sayısı 5 olduğunda ise toplamdaki grup sayısı 10'a çıkacaktır. Bu 5 in 3'lü kombinasyonları şeklinde ifade edilebilir. Neticede bu kombinasyonların her birinden bir ara konum hesabı elde edilir. Tüm kombinasyonlar için S_k kümeleri eşit sayıda elemana sahip değildir. Bundan dolayı ara hesaplar gruba ait ölçüm sayısından etkilenebilir. Bu bağımlılığı ortadan kaldırmak için her bir ara hesap için normalize edilmiş bir kalan hesaplanmalıdır. Bu durumda $\mathbf{x}'_k$ aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilebilir.

$$\tilde{R}_{es}(\mathbf{x}'_k, S_k) = \frac{R_{es}(\mathbf{x}'_k, S_k)}{S_k \text{ 'nin boyutu}} \quad (2.15)$$

Yukarıdaki açıklamaların ışığında son konum hesabı $\mathbf{x}'$ aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$\mathbf{x}' = \frac{\sum_{k=1}^N \mathbf{x}'_k (\tilde{R}_{es}(\mathbf{x}'_k, S_k))^{-1}}{\sum_{k=1}^N (\tilde{R}_{es}(\mathbf{x}'_k, S_k))^{-1}} \quad (2.16)$$

Bir sonraki bölümde yukarıda açıklanan LS ve RWGH algoritmalarının performanslarının analiz edildiği kapalı alan senaryosuna ait detaylara yer verilmiştir. İlgili kapalı alan senaryosuna ait özellikler MATLAB programı yardımıyla simülasyon ortamına aktarılmış ve her iki algoritma için elde edilen performans sonuçları karşılaştırılmıştır.

2.3. Bina içi konum tespiti için seçilen senaryolar

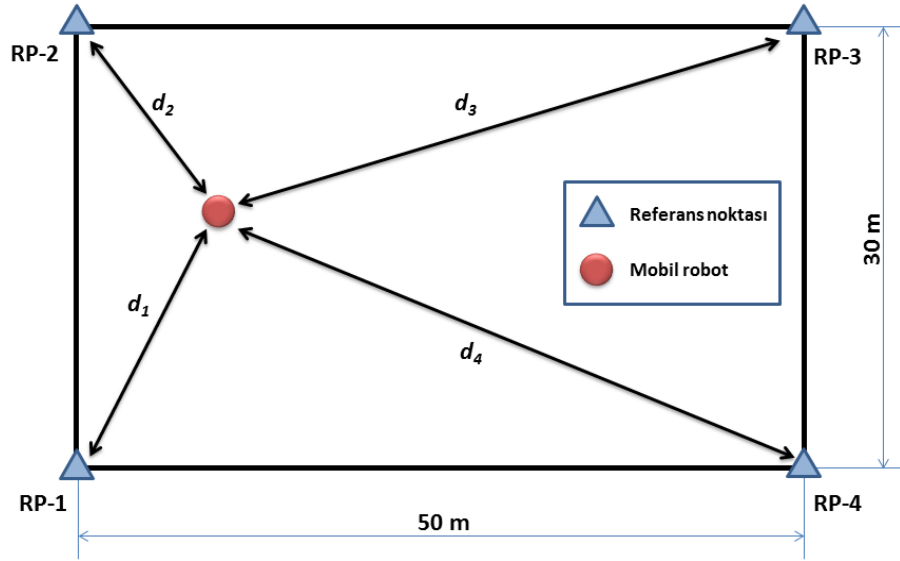
Matematiksel modelin alındığı çalışma ile uyum sağlaması yönünden kapalı alan 30x50 m ölçülerinde ve dikdörtgen formunda seçilmiştir [23]. Seçilen bu kapalı alanda LS ve RWGH algoritmalarının performanslarının gözlemlenmesi için senaryo 1A, 1B, 2A ve 2B olmak üzere toplamda dört farklı senaryo belirlenmiştir. Bu senaryolara ait detaylar aşağıda verilmiştir.

Tablo 2.1. Belirlenen dört farklı senaryoya ait detaylar

Senaryo Adı	RP Sayısı	$P(\lambda = 1)$
Senaryo 1A	4	% 9
Senaryo 1B	4	% 61
Senaryo 2A	5	% 9
Senaryo 2B	5	% 61

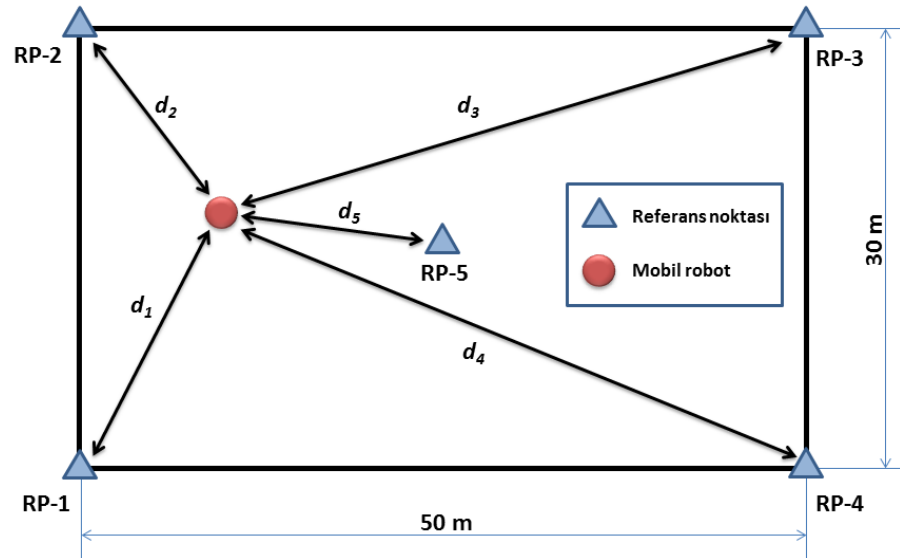
Yukarıdaki senaryolarda gölgeleme etkisinin tüm RP'ler için birbirinden bağımsız olarak belirli bir ihtimalle gerçekleştiği kabul edilmiştir. Gölgeleme etkisi ikili bir değişken olan λ ile tanımlanmıştır. Buna göre $\lambda=1$ için gölgeleme etkisi vardır ve $\lambda=0$ için yoktur. Bu durumda P olasılıkla $\lambda=1$ ve $1-P$ olasılıkla $\lambda=0$ olacaktır. Tablolardaki $P(\lambda=1)$ ifadesi ilgili senaryo için gölgeleme etkisi ile karşılaşma ihtimalini ifade etmektedir.

Senaryo 1A ve senaryo 1B de referans noktalarının dikdörtgen formundaki kapalı alanın her bir köşe noktasında yer aldığı kabul edilmiştir (bkz. Şekil 2.3). Matematiksel modelin alındığı çalışmada üç adet RP'nin olduğu görülmektedir. Ancak bu çalışmada RP'lerin kapalı alandaki yerleşimi ve birbirine olan uzaklığı dikkate alınarak senaryo 1A ve 1B için RP sayısı 4 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.3. Senaryo 1A senaryo 1B için ait kapalı alan özellikleri

Özellikle RWGH algoritmasının çalışma prensibi dikkate alınarak referans noktası sayısı bir artırılmış ve senaryo 2A ve senaryo 2B için kapalı alanın tam orta noktasına beşinci bir referans noktası daha yerleştirilmiştir. Bu senaryolar için kapalı alan özellikleri Şekil 2.4’de verilmektedir.



Şekil 2.4. Senaryo 2A senaryo 2B için ait kapalı alan özellikleri

Simülasyon ortamında analizlerin yapılabilmesi için mobil robotun hareket ettiği sabit bir yörünge belirlenmiş ve mobil robotun aynı yörüngeyi deneme sayısınca izlediği varsayılmıştır (bkz. Şekil 2.5).

belirlenmiştir. Söz konusu dört farklı senaryo için simülasyonlar işletilmiş ve ilgili sonuçlar Bölüm 2.5’te paylaşılmıştır.

2.3.2. Başlangıç durumlarının ve diğer durumların belirlenmesi

Seçilen modelde tanımlanan dört kanal durumu arasındaki geçişlerin istatistiksel olarak meydana geldiği bilinmektedir. Diğer yandan yörünge başlangıcındaki kanal durumlarının belirlenmesi için ayrıca bir yöntem kullanmak gerekecektir. Bu amaçla ulaşan sinyal gücü dikkate alınabileceği gibi verici ile alıcı arasındaki mesafeden de yola çıkılabilir. Bu çalışmada mesafe temelli bir yaklaşım benimsenmiştir. Buna göre mobil robot ile her bir referans noktası arasındaki mesafeden yola çıkarak başlangıç kanal durumları belirlenmiş ve belirlenen yörünge ger kalanında geçiş olasılıkları matrisinden (**P**) yararlanılmıştır.

Başlangıç kanal durumlarını belirlerken gölgeleme etkisini de dikkate alan model Tablo 2.2. ile özetlenmiştir. Modelde mobil robotun her bir konumu için gölgeleme etkisinin (λ) var olup olmadığının bilindiği kabul edilmektedir. Gölgeleme etkisinin varlığı $\lambda = 1$ ve yokluğu $\lambda = 0$ şeklinde ifade edilmektedir.

Tablo 2.2. Mesafeye ve gölgeleme etkisine bağlı olarak kanal durumları

Mesafe	Gölgeleme Etkisi	Kanal durumu
$d < d_1$	yok	DDP
$d_1 < d < d_2$	yok	NUDP
$d < d_3$	var	SUDP
$d > d_2$	yok	NC
$d > d_3$	var	NC

Yukarıda verilen tabloda d ; RP’ler ile mobil robot arasındaki ölçülen mesafeyi, d_1 , d_2 ve d_3 kesim noktalarını ifade etmektedir. Farklı durumlar arasındaki geçişin mesafeye bağlı olarak modellenmesine izin veren kesim noktalarına ait sayısal değerler aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 2.3. Kanal durumları arasındaki geçişi belirleyen kesim noktaları

Mesafe	Değer (m)	Kesim Noktası
d_1	36	DDP den NUDP geçiş
d_2	70	NUDP den NC ye geçiş
d_3	60	SUDP den NC ye geçiş

Tablo 2.3’de yer alan kesim noktası değerleri matematiksel modelin alındığı çalışmadaki değerlerden daha büyük seçilmiştir. Bunun sebebi bu çalışmada simülasyonlarda kapalı alana yerleştirilen RP’lerin modelin alındığı çalışmadakilere göre birbirinden daha uzak olmasıdır. Özellikle 4 RP’li senaryolar için odanın iki zıt köşesine yerleştirilen RP’ler arasındaki mesafe 60 m’ye kadar ulaşmaktadır. Değerler büyütülmeden alındığında çok fazla NC durumu ile karşılaşıldığı için simülasyonların devam etmesi mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı modelin alındığı çalışmadaki değerlerin tutarlı bir şekilde büyütülmesi için tüm değerlerin iki katı alınmıştır.

Simülasyonlarda dikkate alınan kapalı alan seçilen dinamik modelin oluşturulduğu kapalı alanı temsil etmektedir [23]. Gerçek bir kapalı alanın seçilmesi analiz sonuçlarının daha anlamlı olması açısından önem taşımaktadır.

Yukarıda bazı teknik detayları verilen senaryolarda, RWGH ve LS algoritmalarının performanslarının analiz edilmesi ve karşılaştırılması için öncelikle uygun bir performans metriği seçilmelidir. Bir sonraki bölümde bu konu ele alınmaktadır.

2.4. Performans Karşılaştırması

Seçilen iki algoritmanın tutarlı bir şekilde karşılaştırılması için aynı performans metriği kullanılmalıdır. Yine belirlenen senaryoların her biri için yeterli ve eşit miktarda deneme yapılmalıdır. Her bir deneme seçilen senaryo için mobil robotun belirlenen yörüngeyi bir defa tamamlaması anlamına gelmektedir. Bu çalışmada deneme sayısı simülasyon sonuçlarının kararlı hale geldiklerinden emin olana kadar artırılmış ve yeterince yüksek bir değer olarak belirlenmiştir.

Performans metriği olarak ortalama hatanın karesinin karekökü (*Root Mean Square Error*; *RMSE*) literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Aşağıdaki denklemde konum hesabı ile gerçek konumun arasındaki farkı dikkate alan bir hata modeli üzerinden bir performans metriği oluşturulmuştur.

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{E\{(|\mathbf{x}' - \mathbf{x}|)^2\}} \quad (2.17)$$

Mobil robotun hareketi için belirlenen yörünge üzerinde 105 adet nokta belirlenmiş ve konum hesapları üzerinden performans analizleri bu noktalar yardımıyla yapılmıştır. Buna göre her bir nokta için bir hata değeri elde edilmiş ve toplamda 105 hata değeri üzerinden tek bir yörünge için denklem 2.17 ile verilen RMSE değeri hesaplanmıştır. Bu şekilde belirlenen deneme sayısı kadar RMSE değeri hesaplanmıştır. Daha sonra bu RMSE değerleri toplanmış ve elde edilen toplam deneme sayısına bölünmüştür. Son olarak performans karşılaştırmaları yapılırken performans metriği olarak RMSE değerlerinin aritmetik ortalaması (*Average Root Mean Square Error*; *ARMSE*) seçilmiştir.

$$ARMSE = \frac{\sum_{i=1}^N RMSE_i}{N} \quad (2.18)$$

Denklemde N deneme sayısını ifade etmektedir. Bu çalışma için bu değer 10.000 olarak seçilmiştir. Bir sonraki bölümde LS ve RWGH algoritmalarının belirlenen senaryolardaki konumlandırma performans sonuçları tablolar ile verilmiştir. Yine sadece tek bir yörüngeye ait (denemeye) olmak üzere algoritma performansları grafikler yardımıyla gösterilmiştir.

2.5. Performans Sonuçları

Belirlenen dört farklı kapalı alan senaryosu için simülasyonlar sonrasında elde edilen sonuçlar seçilen performans metriği ARMSE yardımıyla aşağıdaki tablolarda karşılaştırılmaktadır. Daha sonrada bu dört senaryo için LS ve RWGH algoritmalarının performansları kendi aralarında karşılaştırılmaktadır. 4 RP içeren ve gölgeleme etkisinin meydana gelme ihtimalinin % 9 olduğu Senaryo 1A ve 1B için elde edilen sonuçlar Tablo 2.4'de yer almaktadır.

Tablo 2.4. Senaryo 1A ve 1B için algoritmalara ait performans sonuçları

Algoritma	ARMSE (m)	
	Senaryo 1A	Senaryo 1B
LS	10.81	11.58
RWGH	5.07	6.05

5 RP içeren ve gölgeleme etkisinin meydana gelme ihtimalinin % 61 olduğu Senaryo 2A ve 2B için elde edilen sonuçlar ise Tablo 2.5’de yer almaktadır.

Tablo 2.5. Senaryo 2A ve 2B için algoritmalara ait performans sonuçları

Algoritma	ARMSE (m)	
	Senaryo 2A	Senaryo 2B
LS	10.89	11.61
RWGH	5.35	5.95

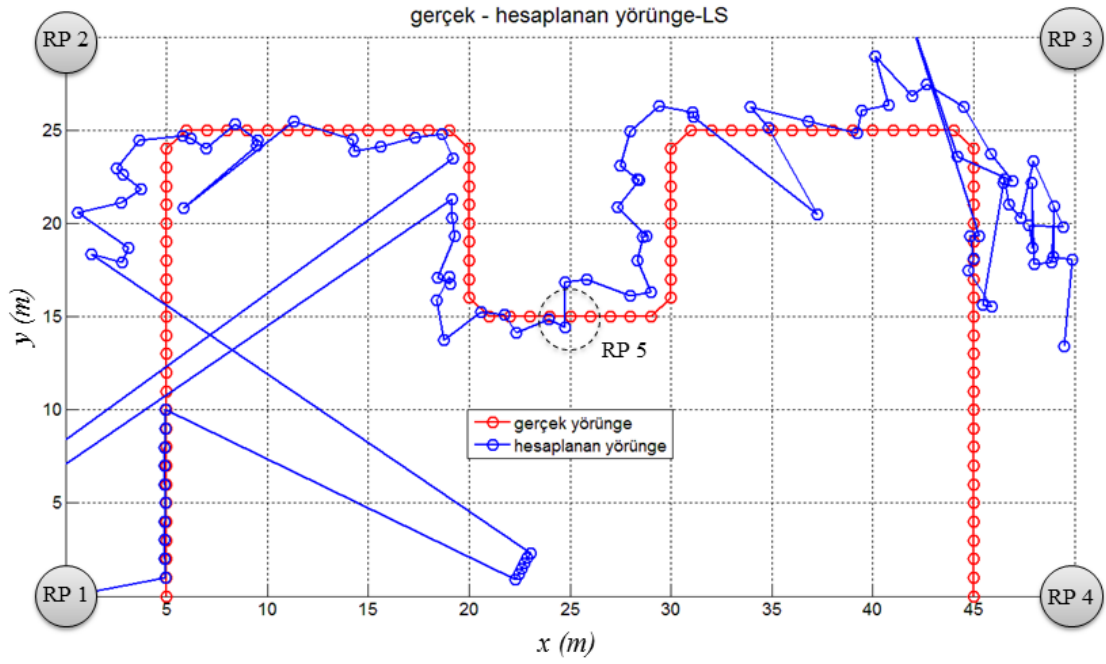
Aşağıda verilen Tablo 2.6 ise yukarıda tanımlanan dört farklı senaryo için LS ve RWGH algoritmaları karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2.6. Tüm senaryolarda RWGH ve LS performans karşılaştırması

Senaryo	Performans artışı
Senaryo 1A	% 53,10
Senaryo 1B	% 47,75
Senaryo 2A	% 50,87
Senaryo 2B	% 48,75

İlgili sonuçlara bakıldığında hemen her senaryoda RWGH algoritmasının kullanılmasıyla LS algoritmasına göre ARMSE değerlerinde yaklaşık % 50 oranında bir azalma görülmektedir. Bu da yaklaşık % 50 oranında bir performans artışı olarak değerlendirilebilir.

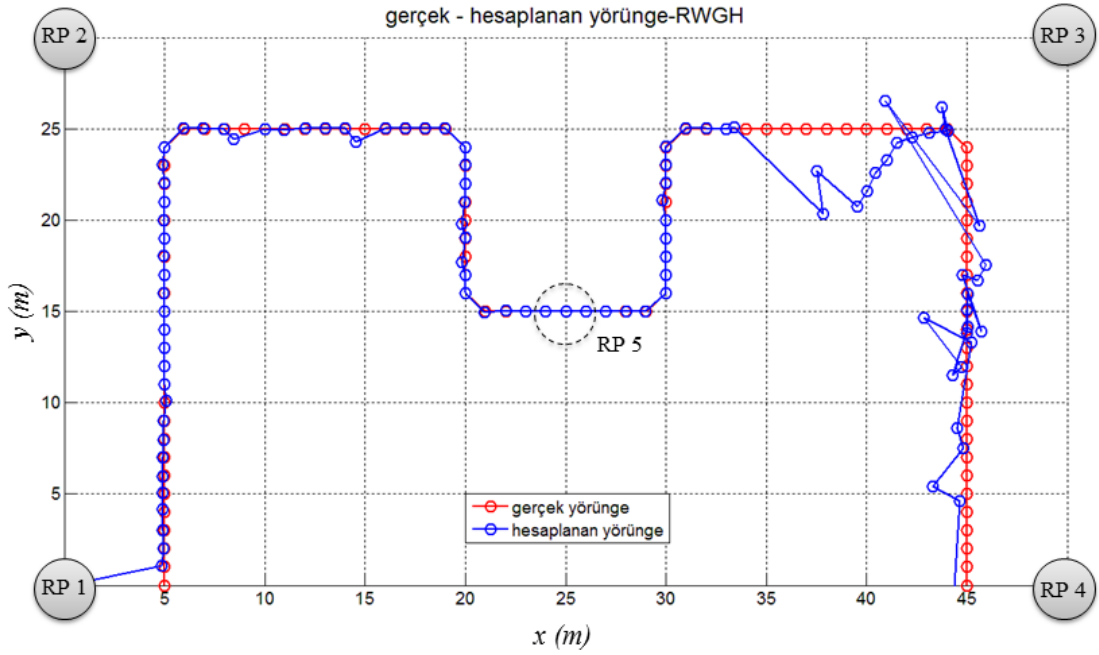
Yukarıda LS ve RWGH algoritmalarının performansları ARMSE değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. RWGH algoritmasının değişen kapalı alan senaryolarına rağmen daha hassas bir konumlandırmaya izin verdiği açıkça görülmektedir. Bunun yanında algoritma performansları arasındaki bu belirgin farkın temellinde yatan unsurların irdelenmesi gerekmektedir. Aşağıda verilen grafikler bu amaçla kullanılabilir.



Şekil 2.6. LS için yörünge takibi

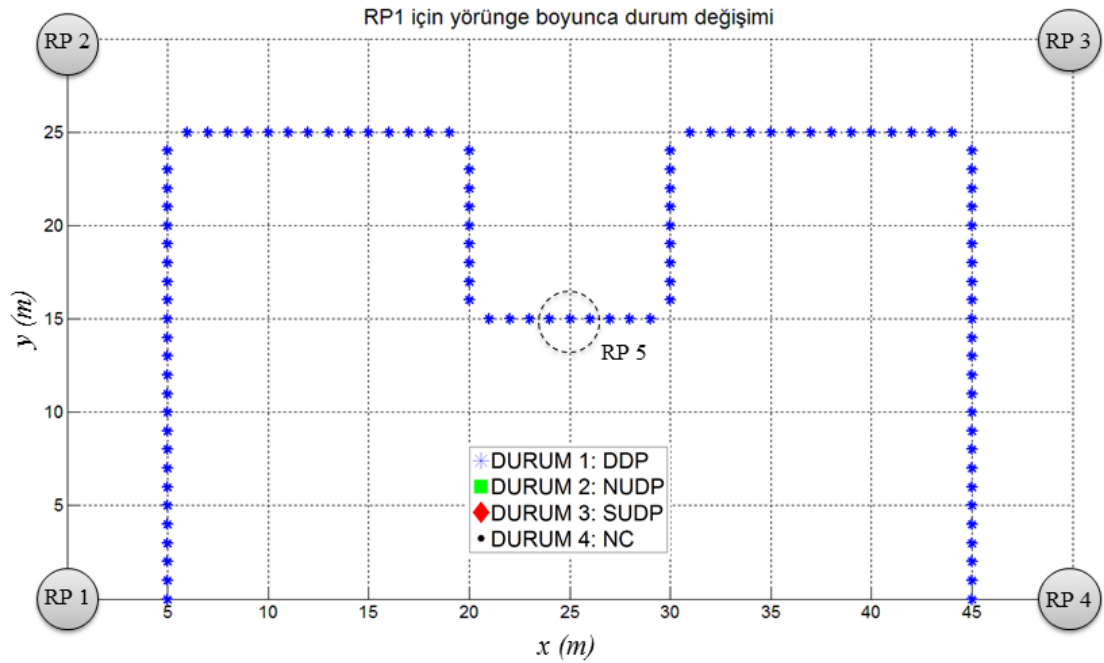
Şekil 2.6'da Senaryo 2A için belirlenen yörünge boyunca mobil robotun LS algoritması yardımıyla yapılan konum tespitine ait sonuçlar yer almaktadır. Çok az sayıda nokta dışında hesaplanan yörünge ile gerçek yörünge ile örtüşmediği açıktır. Karşılaştırmanın kolay yapılabilmesi için RWGH algoritmasına ait sonuçlar bu şeklin hemen sonrasında verilmiştir. Bu bölümde verilen grafiklerin tamamı Senaryo 2A'da tek bir yörünge takibi için geçerlidir.

Aynı senaryo için yörünge boyunca RWGH algoritması yardımıyla yapılan konum tespitine ait sonuçlar yukarıda Şekil 2.7'de verilmektedir. Hataların daha lokalize olarak meydana geldiği ve neredeyse yörünge boyunca tutarlı bir konum tespitinin yapıldığı dikkat çekmektedir.



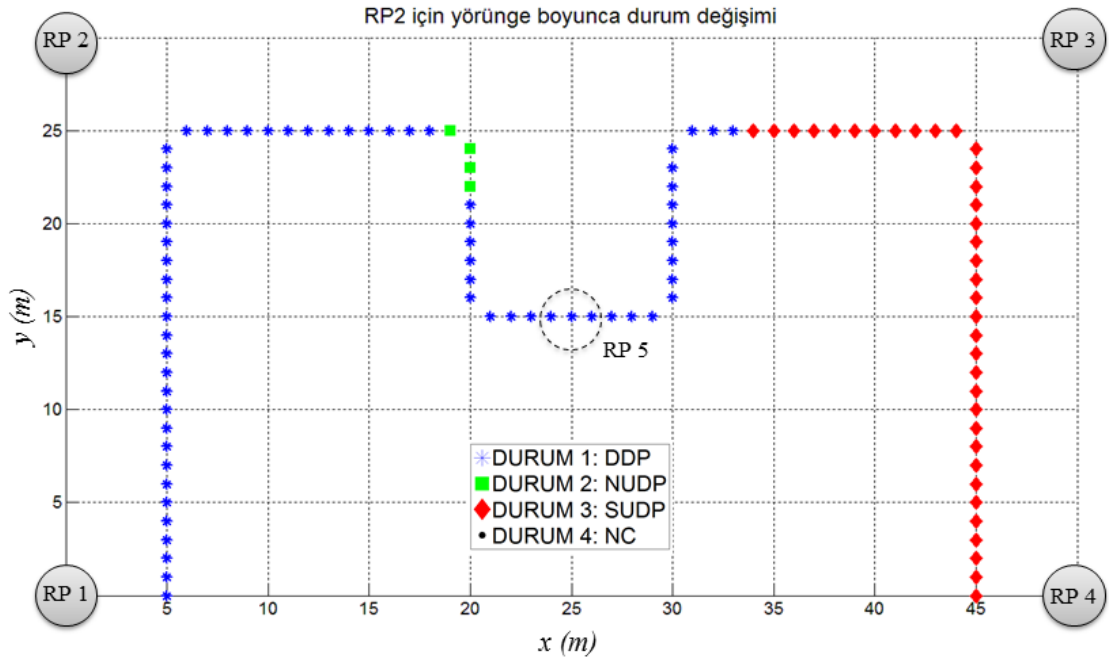
Şekil 2.7. RWGH için yörünge takibi

Yörünge boyunca her bir RP'ye ait durumlar birlikte incelendiğinde RWGH algoritmasının UDP durumlarından çok daha az etkilendiği görülecektir.



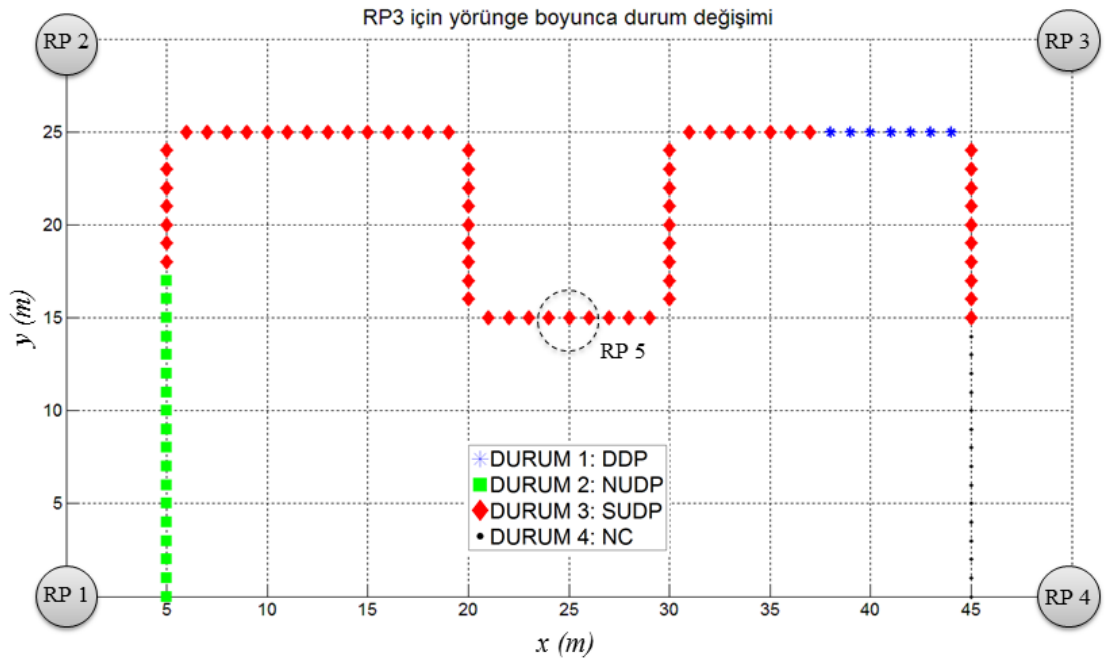
Şekil 2.8. RP 1 için yörünge boyunca kanal durumları

RP 1 için kanal durumunun yörünge boyunca tamamında DDP olması her iki algoritma için olumlu bir durumdur.



Şekil 2.9. RP 2 için yörünge boyunca kanal durumları

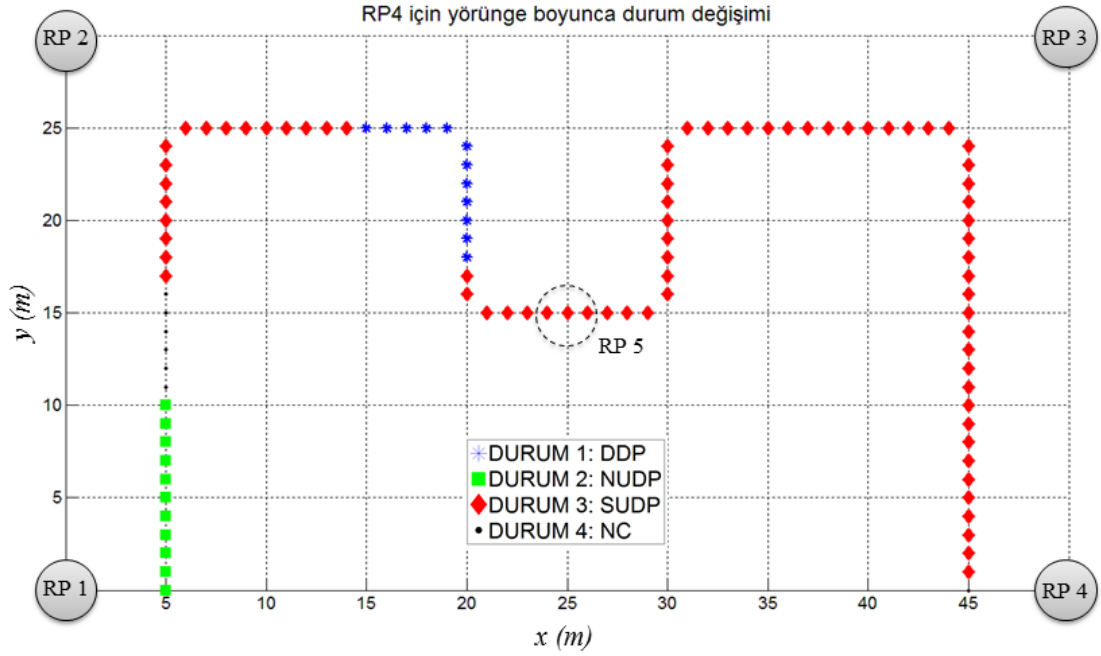
Yukarıda RP 2 için kanal durumunun yörünge boyunca ilk üçte ikilik bölümünde genel olarak DDP, geriye kalan üçte birlik bölümünde SUDP olduğu görülmektedir.



Şekil 2.10. RP 3 için yörünge boyunca kanal durumları

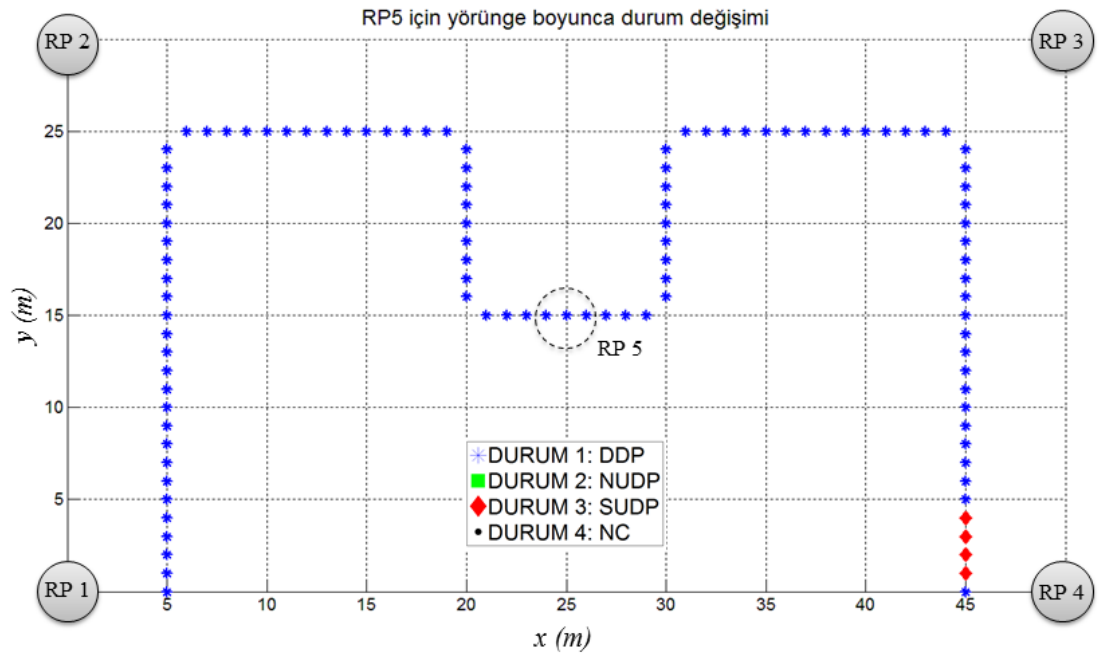
RP 3 için yörünge boyunca yaklaşık ilk 20 adımında kanal NUDP durumundadır. Geri kalan yaklaşık 70 adımın büyük bir kısmında kanal SUDP durumundadır. Yaklaşık

son 15 adımda ise mobil robot RP 3'ün kapsama alanı dışına çıkmaktadır. Elbette RP 3 için bu durumlarda herhangi bir mesafe ölçümü mümkün olmayacaktır.



Şekil 2.11. RP 4 için yörünge boyunca kanal durumları

RP 4 için de yörünge boyunca büyük bir kısmı boyunca kanalın SUDP durumunda olması özellikle LS algoritması için bir dezavantajdır.



Şekil 2.12. RP 5 için yörünge boyunca kanal durumları

Son olarak kapalı alanın tam orta noktasında bulunan RP 5 için yörünge boyunca karşılaşılan durumlar Şekil 2.12’de verilmektedir. RP 5 için de kanal durumu yörünge boyunca DDP olmuştur. Her bir RP için yörünge boyunca karşılaşılan kanal durumları dikkatle incelendiğinde; kanalın genel olarak mevcut durumunda kalma eğiliminde olduğu fark edilecektir. Bunun sebebi kanal şartlarının dinamik olarak değişiminin **P** matrisine bağlı olarak meydana geldiğinin kabul edilmesidir. Ulaşım kolaylığı açısından bu matris aşağıda tekrar verilmiştir. **P** matrisinin diyagonalini oluşturan elemanların değerlerinin hemen hepsi 0.95’in üstündedir. Bu da kanalın yaklaşık % 95 ihtimalle aynı durumda kalacağı anlamına gelmektedir.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9744 & 0.0095 & 0.0159 & 0 \\ 0.0112 & 0.9642 & 0.0153 & 0.0091 \\ 0.0248 & 0.0203 & 0.9403 & 0.0145 \\ 0 & 0.0066 & 0.0079 & 0.9853 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Yukarıdaki grafiklerinden anlaşılacağı gibi UDP durumlarından özellikle SUDP durumlarından RWGH algoritması daha az etkilenmektedir. Bu sayede seçilen kapalı alan senaryosunda daha hassas bir konumlandırmanın yapılabildiği açıktır. Tüm RP’lerin yörünge boyunca karşılaştıkları kanal durumları birlikte ele alındığında, kanal şartlarının LS ve RWGH algoritmaları üzerindeki etkilerini yorumlamak daha kolay olacaktır. Örneğin LS algoritması yardımıyla yapılan konum hesaplamalarının yörünge boyunca ilk 10 adımında gerçek konumlar ile örtüştüğü görülmektedir. Bu durumun altında RP 1, RP 2 ve RP 5 için kanal durumunun DDP olması yatmaktadır. Onuncu adımdan sonra mobil robot RP 4’ün kapsama alanından çıkmıştır. Diğer yandan geriye kalan dört RP’nin arasında RP 3’ün NUDP durumunda olması da LS algoritmasının konumlandırma performansını etkilemektedir.

RWGH algoritması yardımıyla yapılan konum hesaplarının bu kadar başarılı olmasının altında algoritmanın teorik yapısı yatmaktadır. DDP durumlarında yapılan ölçümlerin konum hesabına etkisi UDP durumlarında yapılan ölçümlerden daha yüksektir. Yörünge boyunca 10 ile 15’inci adımlar arasında RP 4’ün kapsama alanı dışına çıkıldığı görülmektedir. Bu durumda geriye kalan dört RP’nin bir tanesi de NUDP durumundadır. Bu noktada RWGH geri kalan 3 RP tarafından yapılan mesafe ölçümlerine öncelik vermekte ve bu olumsuz durumdan etkilenmemektedir.

Diğer yandan konumlandırma sistemindeki Referans noktası sayısının 4'ten 5'e çıkmasıyla RWGH algoritmasının belirgin bir şekilde öne geçtiği Tablo 2.4. ve Tablo 2.5'de verilen sonuçlarda görülmektedir. Sonuçlar dikkatle incelendiğinde özellikle gölgeleme etkisiyle karşılaşılma ihtimalinin yüksek olduğu kapalı alanlarda RWGH algoritmasının çok daha yüksek bir hassasiyetle konumlandırmaya izin verdiği görülebilir. Bir sonraki bölümde ortaya konulan farklı bir yaklaşımla bu iki algoritmanın performanslarında meydana gelen değişimler ele alınmaktadır.

3. BÖLÜM

HATA KESTİRİM METODU İLE PERFORMANS İYİLEŞTİRMESİ

Ulaşma zamanı yöntemini kullanan bina içi kablosuz konumlandırma sistemlerinde dinamik kanal şartları dikkate alındığında UDP durumlarının ön plana çıktığı ve özellikle SUDP durumlarında istenmeyen büyüklükte mesafe ölçüm hatalarıyla karşılaşıldığı bilinmektedir [23]. Bundan dolayı UDP durumlarındaki hataların bir şekilde kestirilmesi ve azaltılması konumlandırma performansını artıracaktır. Özetle ilk olarak kanalın UDP durumlarında olup olmadığı saptanmalı, sonra da bu durumlarda meydana gelen hata miktarı kestirilmelidir.

3.1. Performans İyileştirme Yöntemi

Hipotez testleri kullanıldığında; yapılan ölçümlere bakılarak istatistiksel olarak kanalın hangi durumda olduğu kestirilebilir [42]. Literatürde bazı çalışmalarda bu yöntemden faydalanılmıştır. Bu çalışmaların birinde kanal şartlarının DDP ve UDP durumları arasında değiştiği öngörülmüştür [30]. İlgili çalışmada kanalın hangi durumda olduğu hipotez testleri yardımıyla kestirilmektedir.

Kanalın durumu bir şekilde kestirildikten sonra temelde iki strateji söz konusudur. Bunlardan birincisi UDP durumlarından etkilenmiş mesafe ölçümlerini konumlandırma hesabında dikkate almamaktır. İzlenebilecek ikinci strateji ise bu ölçümlerdeki hataları yaklaşık olarak hesaplamaktır. Bu sayede ölçümlerdeki hatayı en aza indirmek, bir diğer ifadeyle hatalı ölçümleri onarmak mümkün olabilir. Bina içi ortamlarda çok sayıda RP ile aynı anda iletişim kurmanın genellikle mümkün olmadığı bilinmektedir. Bu yüzden ikinci stratejinin kullanılması daha uygundur. Bu yöntemle mobil robotun özellikle az sayıda RP ile iletişim kurduğu durumlarda konumlandırma hassasiyeti artırılabilir. Bunun sebebi eldeki az sayıda ölçümün optimum olarak kullanılmasıdır.

Kanalın UDP durumları için tanımlanan hataların dağılım fonksiyonu bilinmektedir (bkz. Denklem 1.14, 1.15). Aynı kanal şartlarında, aynı RP'den yeterli miktarda ölçüm alındığında, bu ölçümlerdeki hata miktarları ortalama (*mean*) değerine yaklaşır. Bu çalışmada bu yaklaşımdan yola çıkarak ölçüm hatalarının birinci momentleri yani ortalama (*mean*) değerleri kullanılmaktadır. Ölçülen mesafenin değeri aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir;

$$\hat{d} = d + \varepsilon \quad (3.1)$$

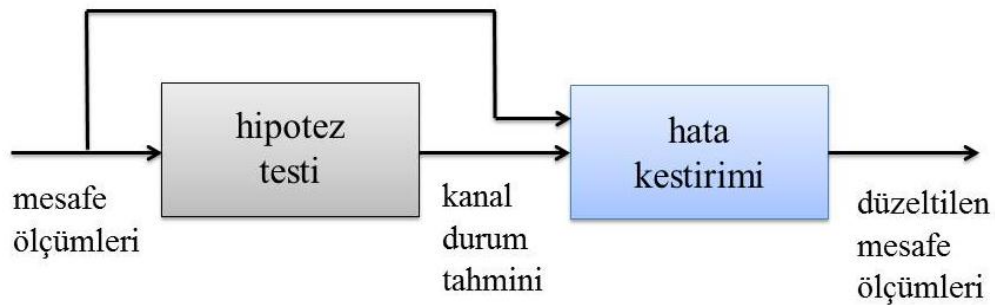
Denklemde $\hat{d}$ ölçülen mesafeyi, d gerçek mesafeyi ve ε hata miktarını ifade etmektedir. Bu hatanın birinci momentini ise aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$\hat{\varepsilon} = E\{\varepsilon\} \quad (3.2)$$

UDP durumlarının çoğunlukla pozitif mesafe ölçüm hatalarına yol açtığı bilinmektedir. Bu durumlarda ölçülen mesafe değeri gerçek mesafe değerinden hemen her zaman daha yüksek olacaktır. Bu yaklaşımla aşağıdaki denklemde ölçülen mesafelerden hatanın birinci momentinin çıkartılması ile hata miktarı azaltılmış mesafe ölçümü (d') elde edilmektedir.

$$d' = \hat{d} - \hat{\varepsilon} \quad (3.3)$$

Son olarak tüm RP'ler için düzeltilmiş mesafe ölçümleri LS ve RWGH algoritmalarına gönderilmektedir. Yapılan işlemler aşağıdaki blok diyagramında özetlenmiştir.



Şekil 3.1. Hata kestiriminde yapılan işlemler için blok diyagramı

Yukarıdaki şekilde ifade edildiği gibi RP'ler tarafından rapor edilen hatalı mesafe ölçümleri birinci aşamada hipotez testlerine tabi tutulmaktadır. Her bir RP için kanal durumu bu aşamada kestirildikten sonra bu sonuçlar hata kestirim algoritmasına gönderilmektedir. İkinci aşamada başlangıçtaki hatalı mesafe ölçümlerinden haberdar

olan hata kestirim algoritması, her bir ölçüm için kestirilen kanal durumundan yola çıkar. Algoritma her bir ölçüm için yaklaşık bir hata kestiriminde bulunur ve bulduğu sonucu hatalı mesafe ölçümlerini onarmakta kullanır (bkz. Denklem 3.2 ve 3.3). Son olarak düzeltilmiş mesafe ölçümleri bu algoritmadan alınarak ilgili konumlandırma algoritmasına (LS veya RWGH) gönderilir.

Çalışmanın sonraki bölümünde bir hata kestirim algoritması ortaya konulmaktadır. Daha sonraki bölümde ise bu algoritmanın LS ve RWGH algoritmalarının performansları üzerindeki etkisi ele alınmaktadır.

3.1.1. Hata Kestirim Algoritması

Bu bölümün konusunu oluşturan hata kestirim algoritmasında mobil robotun mevcut durumunun bilindiği kabul edilmiş ve bu duruma ait hata değerinin birinci momenti (*ortalama değeri*) dikkate alınmıştır. Aşağıdaki tabloda karşılaşılan 3 farklı kanal durumuna ait ortalama değerler verilmektedir. Kanalin dördüncü durumu (NC) için bir mesafe hesabı yapılamadığından bu durumda bir iyileştirmeye gidilememektedir.

Tablo 3.1. Farklı kanal durumları için ortalama değerleri

Kanal durumu	$E\{\epsilon\}$
DDP	0.0135
NUDP	0.1063
SUDP	3.9280

Mevcut durumun kullanılmasıyla yapılan hata kestirimlerinde; kanalın durumuna ait hatanın ortalama değeri ilgili mesafe ölçümünden çıkarılmaktadır. Hata kestirim algoritmasının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde grafikler ve sayısal sonuçlar yardımıyla paylaşılmıştır.

3.2. Performans İyileştirme Sonuçları

Kapalı ortam için belirlenen dört senaryoya ait iyileştirme sonuçları, hata kestiriminin yapılmadığı durumdaki sonuçlar ile birlikte aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Gölgeleme etkisi ihtimalinin daha yüksek olduğu B senaryolarında RWGH

algoritmasının daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. Tablolarda HKO; hata kestirimi olmadan, HK; hata kestirimini kullanarak anlamına gelmektedir.

3.2.1. Senaryo 1A ve 1B

Gölgeleme etkisi ile karşılaşma ihtimalinin % 9 olduğu senaryo 1A için hata kestirim algoritmasının her iki algoritma için daha hassas bir konumlandırmaya izin verdiği aşağıdaki tabloda yer alan ARMSE değerlerinden anlaşılmaktadır.

Tablo 3.2. Senaryo 1A için algoritmalara ait performans sonuçları

Senaryo 1A		
Algoritma	ARMSE (m)	
	HKO	HK
LS	10.81	10.23
RWGH	5.07	4.19

Hata kestirim algoritması kullanıldığında LS ve RWGH algoritmalarının ARMSE değerlerinde meydana gelen azalma; belirli bir iyileşmeyi de beraberinde getirir. Her iki algoritma için gözlemlenen bu iyileşme miktarları aşağıda Tablo 3.3’de verilmektedir.

Tablo 3.3. Senaryo 1A için hata kestirimi sonrasında iyileşme oranları

Senaryo 1A	
Algoritma	HK
LS	% 5,36
RWGH	% 17,35

Yukarıdaki tabloda verilen yüzde iyileşme oranları ele alındığında; RWGH algoritmasının HK algoritmasından LS algoritmasına göre daha yüksek bir oranda etkilendiği görülmektedir. Bir önceki bölümde Tablo 2.6’da verilen sonuçlar ile HK algoritmasının kullanılmadığı durumda; RWGH algoritmasının LS algoritmasına göre % 53,1 daha hassas konumlandırmaya izin verdiği ifade edilmiştir. Aşağıda yer alan

Tablo 3.4’ de ise aynı karşılaştırma HK algoritmasının kullanıldığı durum için yapılmaktadır. İlgili sonuçlar elde edilirken yukarıda Tablo 3.2’de yer alan ARMSE değerleri temel alınmıştır.

Tablo 3.4. Senaryo 1A için HK durumunda RWGH ve LS karşılaştırması

Senaryo 1A	LS’e göre performans artışı
HKO	% 53,1
HK	% 59,04

Yukarıdaki sonuçları pratik olarak yorumlamak gerekirse; hata kestirimi algoritmasının kullanılmasıyla hem LS hem de RWGH algoritmalarının konumlandırma performanslarının iyileştiği ifade edilebilir. Hata kestirim algoritmasının özellikle RWGH algoritmasının konumlandırma performansı üzerindeki olumlu etkileri sayısal değerler ışığında açıkça görülmektedir. Bu sayede HK algoritması kullanıldığı durumda RWGH algoritmasının LS’e göre % 59,13 daha hassas bir konumlandırmaya izin verdiği Tablo 3.4’de yer almaktadır. Gölgeleme etkisi ile karşılaşma ihtimalinin % 61 olduğu senaryo 1B için; hata kestirim algoritması ile birlikte kullanıldıklarında LS ve RWGH algoritmalarına ait ARMSE değerleri Tablo 3.5’de HKO durumları ile birlikte verilmektedir.

Tablo 3.5. Senaryo 1B için algoritmalara ait performans sonuçları

Senaryo 1B		
Algoritma	ARMSE (m)	
	HKO	HK
LS	11.58	11.00
RWGH	6.05	5.06

HK algoritmasının senaryo 1B için de her iki algoritmanın konumlandırma performansı üzerinde olumlu etkileri ARMSE değerlerinden anlaşılmaktadır. HK algoritması kullanıldığı durumun kullanılmadığı duruma göre her bir algoritmanın performansında meydana getirdiği yüzde iyileşmeler senaryo 1 B için aşağıda Tablo 3.6’da verilmektedir.

Tablo 3.6. Senaryo 1B için hata kestirimi sonrasında iyileşme oranları

Senaryo 1B	
Algoritma	HK
LS	% 5,09
RWGH	% 17,19

Senaryo 2B için HK algoritması ile kullanıldıklarında RWGH ve LS'in konumlandırma hassasiyetlerinin karşılaştırılması aşağıda Tablo 3.7'de yapılmaktadır. İlgili yüzdelerinin hesabı Tablo 3.5'deki ARMSE değerleri kullanılarak yapılmıştır. RWGH algoritmasının LS'e göre üstünlüğünün HK durumunda artması HK durumlarından daha fazla etkilendiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 3.7. Senaryo 1B için HK durumunda RWGH ve LS karşılaştırması

Senaryo 1B	LS'e göre performans artışı
HKO	% 47,75
HK	% 54,45

Yukarıdaki sonuçlar eşliğinde senaryo 1A ve senaryo 1B arasındaki farkları pratik olarak yorumlamak faydalı olacaktır. Senaryo 1B için HK algoritması kullanıldığında LS ve RWGH algoritmalarının HKO durumlarına göre konumlandırma performanslarındaki yüzde iyileştirme oranlarını; Senaryo 1A'ya göre az da olsa artış göstermektedir. Bu durum gölgeleme etkisinin meydana gelme ihtimalinin çok daha yüksek olduğu bir senaryoda dahi hata kestirim algoritmasının başarılı bir şekilde çalıştığının bir ispatı olarak değerlendirilebilir.

3.2.2. Senaryo 2A ve 2B

Konumlandırma sistemindeki RP sayısının bir artırılarak 5'e çıkartılması sonucunda algoritma performanslarının nasıl etkilendiği aşağıda senaryo 2A ve 2B için verilen tablolarda belirtilmektedir. Gölgeleme etkisi ile karşılaşma ihtimalinin % 9 olduğu senaryo 2A için; HK algoritması ile birlikte kullanıldıklarında LS ve RWGH

algoritmalarına ait ARMSE değerleri aşağıda Tablo 3.8’de HKO durumları ile birlikte verilmektedir.

Tablo 3.8. Senaryo 2A için algoritmalara ait performans sonuçları

Senaryo 2A		
Algoritma	ARMSE (m)	
	HKO	HK
LS	10.89	10.42
RWGH	5.35	4.78

Senaryo 2A için de Tablo 3.8’de verilen ARMSE sonuçları incelendiğinde HK algoritmasının her iki algoritma için belirli ölçüde iyileştirme sağladığı görülebilir. Diğer yandan bu senaryoda da RWGH algoritması için iyileşme oranı daha yüksektir. HK algoritması kullanıldığı durumun, kullanılmadığı duruma göre her bir algoritmanın performansında meydana getirdiği yüzde iyileşmeler senaryo 2A için aşağıda Tablo 3.9’da verilmektedir.

Tablo 3.9. Senaryo 2A için hata kestirimi sonrasında iyileşme oranları

Senaryo 2A	
Algoritma	HK
LS	% 4,31
RWGH	% 10,65

Burada dikkati çeken nokta; HK algoritmasının her iki algoritma üzerindeki iyileşme oranlarının senaryo 1 A’ya göre daha düşük olmasıdır. Beklenen durum RP sayısının 5’e çıkmasıyla özellikle RWGH algoritmasının 4 RP’li duruma göre daha iyi sonuçlar vermesidir. Bu durum tüm senaryolar için elde edilen sonuçlar birlikte ele alınarak bölüm sonunda yorumlanmaya çalışılmaktadır.

Aşağıda Tablo 3.10’da HK algoritmasının kullanıldığı durum ile kullanılmadığı durumda RWGH algoritmasının LS algoritmasına göre ne kadar daha

hassas konumlandırmaya izin verdiği yüzdelik değerler ile ifade edilmiştir. Bu değerlerin hesaplanmasında Tablo 3.8’de verilen ARMSE değerleri temel alınmıştır.

Tablo 3.10. Senaryo 2A için HK durumunda RWGH ve LS karşılaştırması

Senaryo 2A	LS’e göre performans artışı
HKO	% 50,87
HK	% 54,12

Çalışmada dikkate alınan son senaryo; konumlandırma sisteminde 5 RP’nin bulunduğu ve gölgeleme etkisinin gerçekleşme ihtimalinin % 61 olduğu senaryo 2B’dir. Bu senaryoya ait sonuçlar aşağıda Tablo 3.11’de yer almaktadır.

Tablo 3.11. Senaryo 2B için algoritmalara ait performans sonuçları

Senaryo 2B		
Algoritma	ARMSE (m)	
	HKO	HK
LS	11.61	11.09
RWGH	5.95	5.18

Tablo 3.11 incelendiğinde; önceki üç senaryoda olduğu gibi HK algoritmasının kullanılmasıyla ARMSE değerlerinde bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Bir diğer değişle her iki algoritmanın konumlandırma performansı HK algoritmasının kullanıldığı tüm senaryolarda artmaktadır. Aşağıda bu senaryo için elde edilen iyileşme oranları verilmektedir.

Tablo 3.12. Senaryo 2B için hata kestirimi sonrasında iyileşme oranları

Senaryo 2B	
Algoritma	HK
LS	% 4,47
RWGH	% 12,94

İyileşme oranları incelendiğinde HK algoritmasının bu senaryo de için daha iyi sonuçlar sağladığı görülebilir. Son olarak senaryo 2B için HK algoritmasının kullanıldığı durum ile kullanılmadığı durumda RWGH algoritmasının LS algoritmasına göre ne kadar daha hassas konumlandırmaya izin verdiği Aşağıda Tablo 3.10’da yüzdelik değerler ile ifade edilmiştir. Bu değerlerin hesaplanmasında Tablo 3.11’de verilen ARMSE değerleri temel alınmıştır.

Tablo 3.13. Senaryo 2B için HK durumunda RWGH ve LS karşılaştırması

Senaryo 2B	LS’e göre performans artışı
HKO	% 48,75
HK	% 53,29

Yukarıda senaryo 1A ve 2A için Tablo 3.3 ve Tablo 3.9’da verilen sonuçlar kendi aralarında, senaryo 1B ve 2B için Tablo 3.6 ve Tablo 3.12’de verilen sonuçlar da kendi aralarında karşılaştırıldığında RP sayısı artışına rağmen RWGH algoritmasının daha iyi sonuçlar vermediği görülür. RWGH algoritmasının teorik esasları dikkate alındığında bu açıklanması gereken bir durumdur. Bir sonraki paragrafta bu konu ele alınmaktadır.

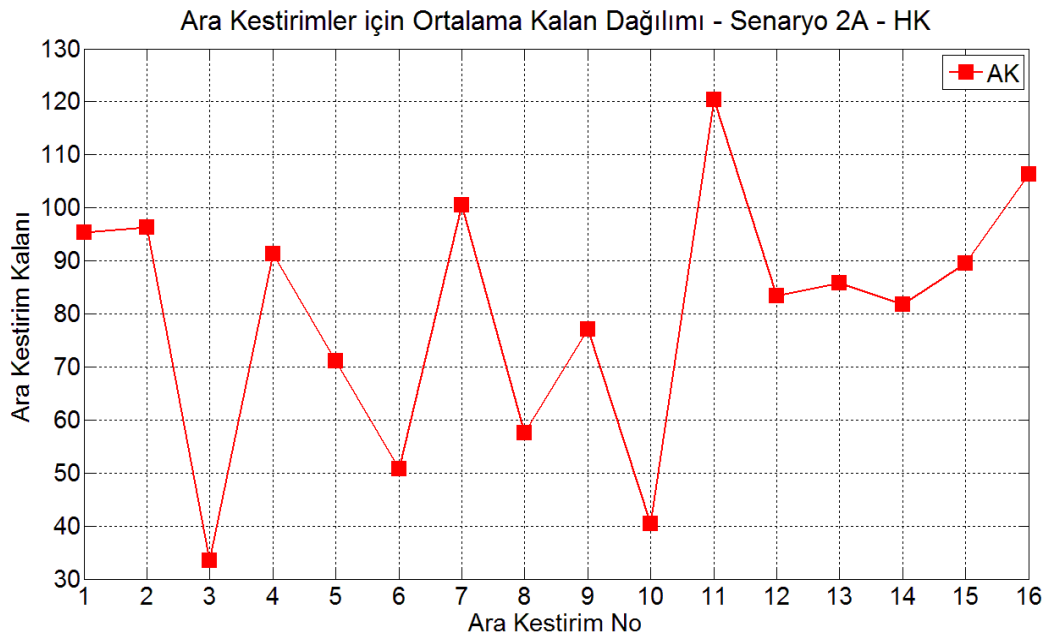
Aşağıda senaryo 1A ve 2A için ara kestirimlere ait ortalama kalan dağılımları grafikler ile verilmiştir. Grafikler çizdirilmeden önce; yörünge tamamlanmış yani 105 adım boyunca karşılaşılan ara kestirim kalan değerleri kendi aralarında toplanmıştır. Son olarak değişen kanal şartlarının etkisini en aza indirmek için her bir denemede (yörünge takibi) elde edilen toplamaların aritmetik ortalaması alınmaktadır. Senaryo 1A için RWGH algoritmasının kullandığı ortalama ara kestirim kalanları dağılımı Şekil 3.2’de yer almaktadır. Senaryo 2A için RWGH algoritmasının kullandığı ortalama ara kestirim kalanları dağılımı ise Şekil 3.3’de yer almaktadır. Grafikler incelenirken ara kestirim kalanlarının bir şekilde ara kestirimlerin kalitesini ifade ettiği unutulmamalıdır (bkz. Denklem 2.4). Buna göre düşük kalanlı ara kestirimlerin kalitesi yüksek kalanlı olanlardan daha iyidir.

Aşağıda Şekil 3.2 ’de farklı ara kestirimler için kalan değerlerinin birbirine çok uzak olmadığı görülmektedir. Ara kestirimler için kalanlar 90-120 arasında dağılım göstermektedir. Burada birbirine yakın kalitede dört adet ara kestirimin ve bunlardan nispeten daha düşük kalitede bir ara kestirimim olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2. Senaryo 1A – Ara kestirimler için ortalama kalanlar

Senaryo 2A için verilen Şekil 3.3'te ise ara kestirim kalanları 30-120 arasında dağılım göstermektedir. 3, 6, 8 ve 10 no'lu dört ara kestirimin kalanları geri kalan ara kestirimlerin kalanlarından oldukça düşüktür. Bu da işleme konulacak kaliteli dört ara kestirim anlamına gelmektedir. Ancak kestirim kalanı (*residual*) daha yüksek olan, bir diğer deyişle düşük kalitedeki on iki adet ara kestirim de işleme konulmaktadır.



Şekil 3.3. Senaryo 2A – Ara kestirimler için ortalama kalanlar

RWGH algoritması ara kestirimleri kalanlarının tersiyle ağırlıklandırmaktadır. Bu sayede düşük kaliteli ara kestirimlerin konum hesabındaki etkisi düşmektedir. Diğer yandan Şekil 3.3 ile verilen senaryoda çok sayıda düşük kalitede kestirim işleme konulmaktadır. Bu durumda düşük kaliteli ara kestirimlerin konum hesabındaki olumsuz etkisi yine artmaktadır. Bu da senaryo 2A için RWGH algoritmasının beklenen iyileşmeyi tam olarak sağlayamamasını açıklamaktadır. Bu durumu daha iyi açıklamak üzere bir sonraki bölümde hata kestirim algoritmasının istatistiksel analizine yer verilmiştir.

3.2.3. Hata kestirim algoritmasının istatistiksel analizi

Simülasyonlarda hata (ε) değeri ölçülen mesafe ile gerçek mesafe arasındaki farkı ifade etmekteydi;

$$\varepsilon = \hat{d} - d \quad (3.4)$$

Hata kestirimi sonrası düzeltilmiş mesafe ölçümleri de d' olarak adlandırılmıştı (bkz. Denklem 3.3). Bu durumda hata kestirimi sonrası hata miktarları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\varepsilon' = d' - d \quad (3.5)$$

Aşağıda tüm senaryolar için orijinal hataların ve hata kestirimi sonrasındaki hataların standart sapma ve ortalama (*mean*) değerleri aynı tabloda verilmektedir. Bu değerler bütün senaryolardaki simülasyon sonuçlarının analizi vasıtası ile elde edilmiştir.

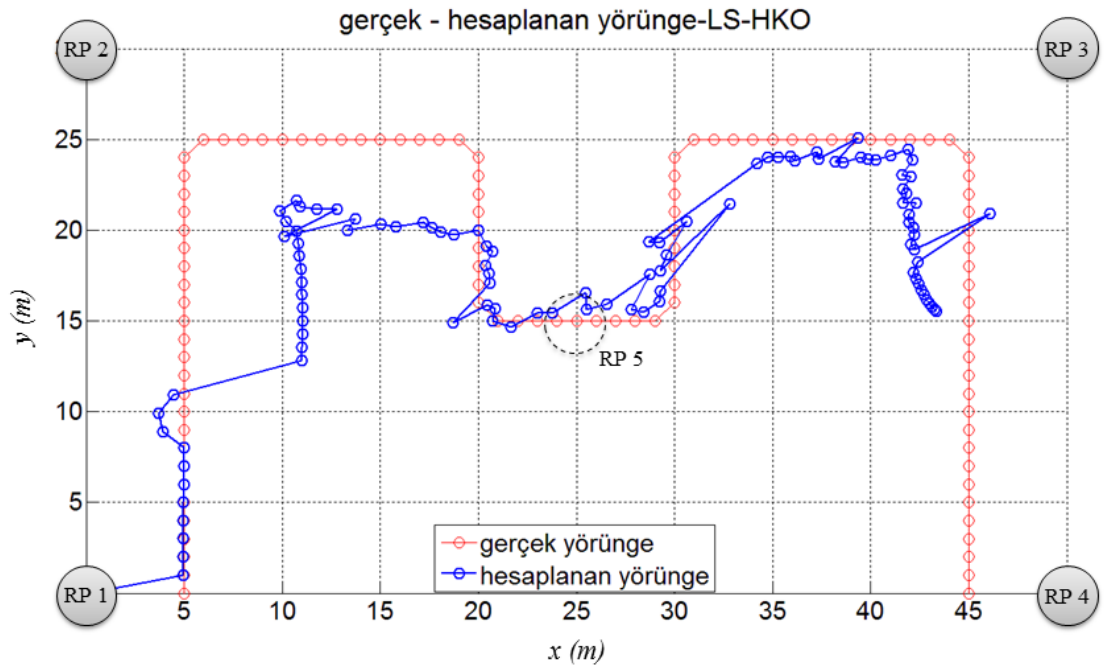
Tablo 3.14. Tüm senaryolar için hataya ve düzeltilen hataya ait parametreler

Senaryo	ε		ε'	
	Ortalama (m)	Std. sapma (m)	Ortalama (m)	Std. sapma (m)
Senaryo 1A	0,96	2,96	-0,22	2,55
Senaryo 1B	1,27	3,41	-0,29	3,00
Senaryo 2A	0,94	2,92	-0,21	2,51
Senaryo 2B	1,26	3,54	-0,28	3,14

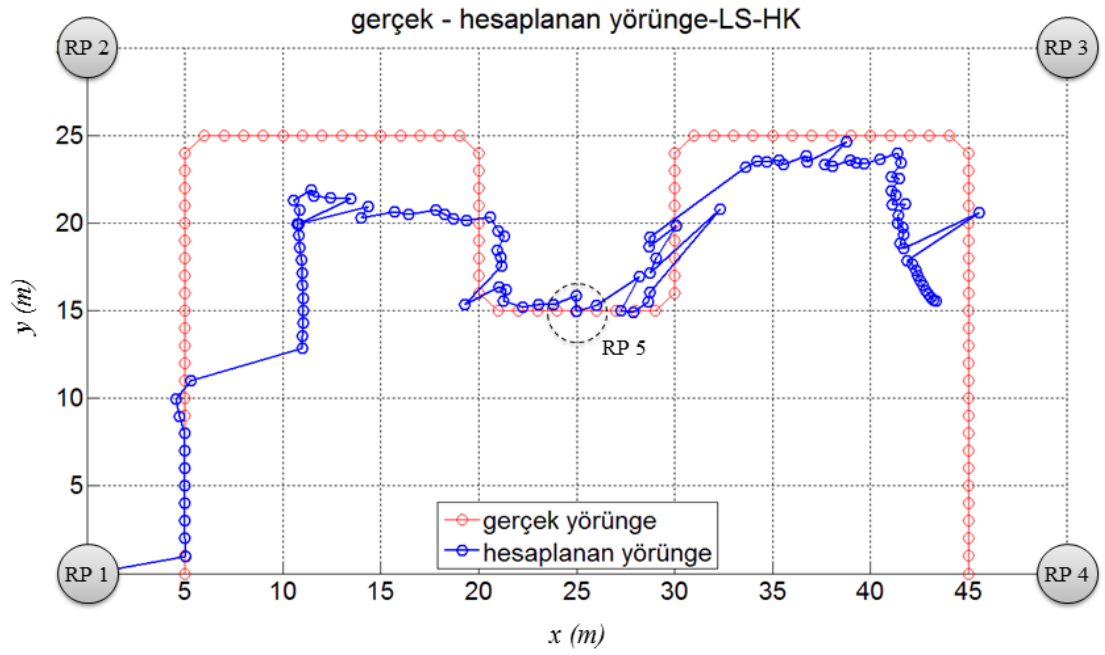
Tablo 3.14 incelendiğinde senaryo 2A için hata kestirimi sonrasındaki hataların (ε') ortalama değeri ve standart sapmalarının, orijinal hataların (ε) ortalama değeri ve standart sapmalarından daha küçük olduğu görülür. Bu durum incelenen bütün simülasyon senaryoları için geçerlidir ve önerilen hata kestirim algoritmasının mesafe ölçümlerindeki hataları gerçekten belirli bir ölçüde azalttığının somut bir delilidir.

Bu bölümde belirlenen dört farklı senaryo için LS ve RWGH algoritmalarının konumlandırma performanslarının nasıl iyileştirilebilecekleri üzerinde durulmuştur. Elde edilen tüm sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde HK algoritmasının hemen her senaryo için HKO durumlardan daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.

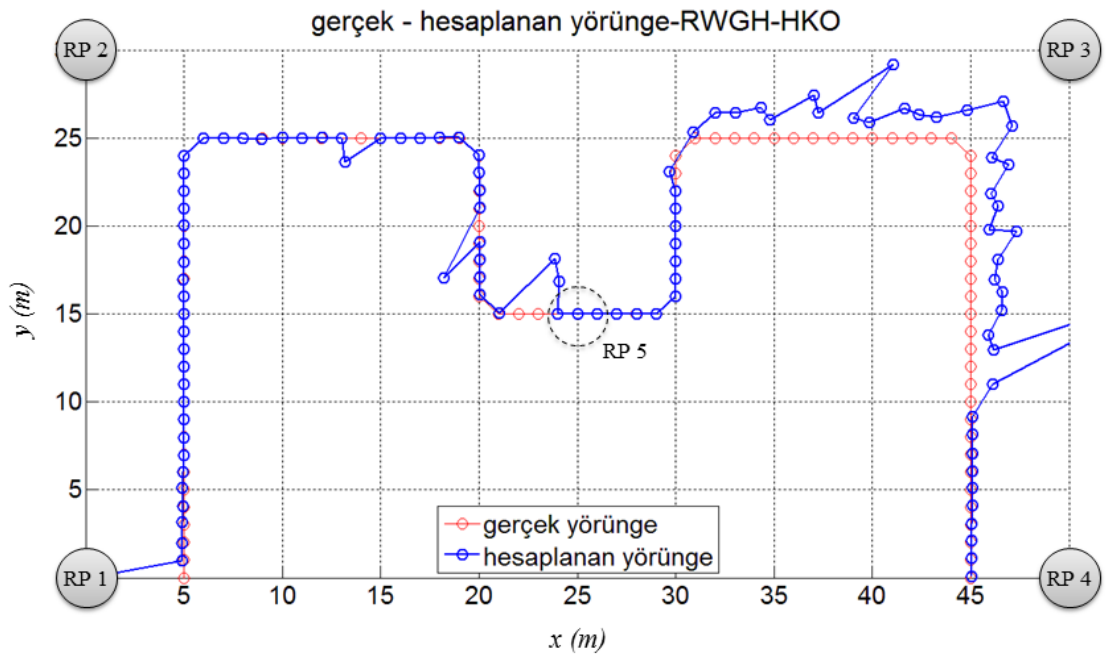
Aşağıda senaryo 2A için HK algoritmasının LS ve RWGH algoritmaları üzerindeki etkileri tek bir denemede yörünge takibi açısından grafikler yardımıyla ele alınmıştır. Eşit şartlarda bir karşılaştırma yapılabilmesi için tüm kanal şartları aynı seçilmiştir. Grafikler birlikte rahat incelemeleri için bölüm sonunda yer almaktadır.



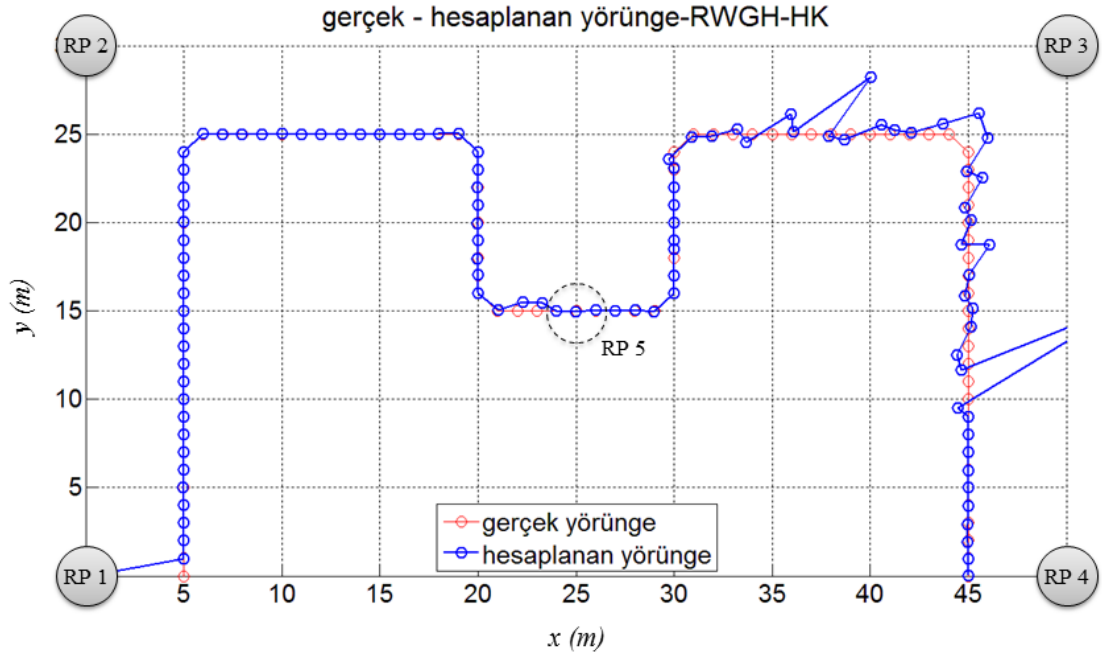
Şekil 3.4. Hata kestirimi olmadan LS



Şekil 3.5. Hata kestirimi algoritması ile LS.



Şekil 3.6. Hata kestirimi olmadan RWGH.



Şekil 3.7. Hata kestirimi algoritması ile RWGH

Bu bölümde yer alan sayısal ve görsel sonuçlar birlikte ele alındığında ortaya konulan hata kestirim algoritmasının LS ve RWGH algoritmalarının performans artışıdaki katkısı açıkça görülmektedir. Bir sonraki bölümde bu tez çalışmasında yapılanlar kısaca özetlenecek ve konuyla ilgili gelecek çalışmalara ışık tutabilecek konulara değinilecektir.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma

Bu çalışmanın giriş bölümünde; mobil robotların günümüzdeki kullanım alanlarından kısaca bahsedildikten sonra mobil robotların bina içi ortamlarda konumlandırılmasında kullanılan yöntemler ele alınmıştır. Bu yöntemlerden bir tanesinin kablosuz teknikler olduğu bilinmektedir. Bu çalışmanın temel konusunu kablosuz yöntemlerin kapalı alanlarda kanalın dinamik yapısını dikkate alarak kullanılması oluşturmaktadır.

Birinci bölümde; bina içi kablosuz kanal koşullarının özellikle ulaşma zamanı yöntemi üzerindeki olumsuz etkilerinden ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik uygulamalardan bahsedilmiştir. Ulaşma zamanı yönteminde temel bir ölçüt olan direkt yolun davranışı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan farklı kanal durumları bu bölümde ele alınmıştır. Yine statik ve dinamik olmak üzere başlıca ikiye ayrılabilen kanal modelleri ve çalışmada dikkate alınan matematiksel modelin esasları bu bölümün içeriğini oluşturur.

İkinci bölümde; farklı konum tespit algoritmalarından kısaca bahsedilmiştir ve LS ve RWGH algoritmalarının teorik esasları ele alınmıştır. Dinamik olarak değişen kablosuz kanal koşullarının modellenmesine ait detaylar yine bu bölümde yer almaktadır. Belirlenen kapalı alan senaryolarına ait teknik detaylar ve algoritmaların karşılaştırılmasında kullanılacak performans metriği ile ilgili bilgiler bu bölümde verilmiştir. Son olarak performans sonuçları tablolar ve grafikler yardımıyla bu bölüm sonunda verilmektedir. İlgili sonuçlar incelendiğinde belirlenen tüm kapalı alan senaryolarında RWGH algoritmasının LS algoritmasına göre çok daha iyi bir konumlandırmaya izin verdiği görülmektedir. Farklı senaryolarda hesaplanan ARMSE değeri LS için yaklaşık 10-12 m aralığında değişirken, RWGH algoritması için 5-6 m

aralığında değişmektedir. RWGH algoritmasının hemen her senaryoda % 50 civarında daha hassas bir konumlandırmaya izin verdiği görülmektedir. Bu bölümün sonunda yer alan grafikler incelendiğinde ise RWGH algoritmasının kanalın UDP durumlarından LS algoritmasına göre çok daha az etkilendiği açıkça görülmektedir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde bir hata kestirim algoritması ortaya konulmaktadır. Buradaki amaç LS ve RWGH algoritmalarının dinamik kanal şartlarındaki konumlandırma performanslarını artırmaktır. Bölümde önce hata kestirim algoritmasının teorik altyapısına yer verilmiş daha sonra da belirlenen senaryolarda bu algoritmanın LS ve RWGH algoritmaları üzerindeki etkileri elde edilen sonuçlar yardımıyla gözlemlenmiştir. Farklı senaryolarda hesaplanan ARMSE değeri LS için yaklaşık 10-12 m aralığında değişirken, RWGH algoritması için 4-6 m aralığında değişmektedir.

4.2. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada tanımlanan hata kestirim algoritmasının kullanılmasıyla her iki algoritmanın konumlandırma hassasiyetinde iyileşmelerin meydana geldiği görülmektedir. Özellikle RWGH algoritmasının hata kestirim algoritmasıyla birlikte kullanıldığında LS algoritmasına göre % 60'lara varan ölçüde daha hassas konumlandırma yapabilmektedir (bkz. Tablo 3.4). Üçüncü bölüm içinde tanımlanan HKO ve HK durumlarında; LS ve RWGH için yörünge takibini gösteren grafikler bu bölümün sonunda yer almaktadır. Grafikler dikkatle incelendiğinde; aynı senaryoda, tamamen aynı kanal şartlarında bu iki durum arasındaki farklar görülecektir. Bu iki durum için elde edilen sayısal ve görsel sonuçlar birlikte ele alınarak yorumlanmıştır.

Tablolarda verilen ARMSE değerlerindeki azalma temel alındığında; LS algoritmasının konumlandırma performansında % 4,31- 5,36 aralığında değişen iyileştirmelerin olduğu görülebilir. Yine farklı senaryolar için ARMSE değerlerine bağlı iyileşme oranları RWGH algoritması için % 10,65 – 17,35 aralığında değişmektedir. Bu çalışma aşağıdaki gibi geliştirilebilir;

1. Çalışmada yörünge başlangıcındaki kanal durumlarının belirlenmesinde mesafe temelli bir yaklaşım kullanılmıştır. Simülasyonlar yapılırken mobil robot ile referans noktaları arasındaki gerçek mesafelerin bilindiği kabul edilmiştir. Ancak pratikte verici ile alıcı arasındaki gerçek mesafelerin bilinmesi mümkün

olmamaktadır. Bu noktada gerçeğe daha yakın bir senaryo için sinyalin ulaşma gücünün de dikkate alınması uygun olacaktır.

2. Çalışmada kanal durumlarının dinamik olarak değiştiği kabul edilmektedir. Buna bağlı olarak dinamik kanalın modellenmesinde Markov Zinciri yönteminden ve geçiş olasılıkları matrisinden yararlanılmaktadır. Bu matrise ait sayısal değerler de matematiksel modelin alındığı çalışmada mesafe temelli bir yaklaşımla elde edilmiştir. Simülasyonlarda yörünge boyunca durumlar arası geçişlerin bu matris ile modellenmesi sonrasında bazı tutarsız durumlar gözlenmiştir. Örneğin bazı referans noktaları için kanal yörünge boyunca DDP durumunda kalmaktadır (bkz. Şekil 2.8 ve 2.12). Yine bazı referans noktaları için; mobil robot ilgili referans noktasına çok yaklaşırsa dahi kanal UDP durumlarında olabilmektedir (bkz Şekil 2.10 ve 2.11). Bu durumlar kullanılan **P** matrisinden kaynaklanmaktadır. Bu matrisin elemanlarına ait değerler incelendiğinde kanalın mevcut yapısını yaklaşık %95 ihtimalle koruma eğiliminde olduğu görülür. Bu tutarsızlıkların giderilebilmesi için kanalın bilhassa direkt yoldan gelen sinyalin ulaşma gücünün dikkate alındığı durum için bu matris tekrar tanımlanmalıdır.
3. Algoritmaların performansını iyileştirebilmek maksadı ile farklı bazı yaklaşımlar ele alınabilir. Bilhassa RWGH algoritmasının performansını daha da iyileştirmek maksadı ile elde edilen bütün ara kestirimleri kullanmak yerine, sadece en iyi birkaç ara kestirimi kullanmak bu tezde ele alınan dinamik kanal modellerinde daha iyi sonuçlar verebilir.
4. Hipotez testleri kullanılarak %100 doğrulukla kanal durumu tahmin edilemeyebilir. Kanal durumunun yanlış tahmin edilmesi Hata kestirim algoritmasının performansını olumsuz etkileyecektir. Örneğin kanalın DDP durumunda olduğu bir anda, hipotez testi sonrasında kanalın UDP durumunda olduğu kestirilebilir. Bu durumda Hata kestirim algoritması mesafe ölçümlerinin gerçekten çok daha fazla hata içerdiğini kabul edecektir. Yine tam tersi bir durumda hata gerçekte olduğundan daha küçük kestirilecektir. Neticede her iki durumda hatanın yanlış kestirimi söz konusu olacaktır. Bundan dolayı hipotez testlerinin de ancak belirli bir doğrulukla çalıştıklarının dikkate alındığı bir yaklaşım ortaya konulabilir.

KAYNAKLAR

1. Forlizzi, J.. DiSalvo, C.. 2006. Service robots in the domestic environment: a study of the roomba vacuum in the home. *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*. Pages 258 – 265.
2. Palacín, J.. Salse, J.A.. Valgañón, I.. Clua, X.. 2004. Building a mobile robot for a floor cleaning operation in domestic environments. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, 53 (5): 1418-1424.
3. Rossetti, M.D.. Kumar, A.. Felder, R.A., 2000. Mobile Robot Simulation Of Clinical Laboratory Deliveries. *Simulation Conference Proceedings, 1998. Winter. 2: 1415-1422*.
4. Emken, J.L.. Wynne, J.H.. Harkema, S.J.. Reinkensmeyer, D.J., 2006. A robotic device for manipulating human stepping. **IEEE Transactions on Robotics**, 22 (1): 185-189.
5. Pignolo, L., 2009. Robotics in neuro-rehabilitation. **J Rehabil Med**, 41 (12): 955–960.
6. Orebäck, A., 2004. A Component Framework For Autonomous Mobile Robots. KTH Royal Institute of Technology, Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden, 130 s.
7. Ulrich, I.. Nourbakhsh, I., 2000. Appearance-based place recognition for topological localization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2000, San Francisco, CA, 2: 1023-1029*.
8. Ko, A., Lau, H.Y. K., 2009. Robot assisted emergency search and rescue system with a wireless sensor network. **International Journal of Advanced Science and Technology**, 3 : 69-78.
9. Thrun, S.. Schulte, J.. Rosenberg, C., 2000. Interaction with mobile robots in public places. **IEEE Intelligent Systems**. 7-11,
10. Grudic, G.Z.. Lawrence, P.D., 1998. A nonparametric learning approach to vision based mobile robot localization. *IEEE/RSJ International Conference on 13-17 Oct 1998, 2: 724 – 729*.

11. Lee, S.. Song, J.-B., 2004. Mobile robot localization using optical flow sensors. **International Journal of Control, Automation and Systems**, 2 (4): 485-493.
12. Hatipoğlu, K.H., 2007. Genişletilmiş Kalman Süzgeci ile Gezgin Robot Konumunun Belirlenmesi. Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
13. Roumeliotis, S.I.. Bekey, G.A., 2000. Bayesian estimation and kalman filtering: a unified framework for mobile robot localization. *Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2985-2992.
14. Lin, H-H.. Tsai, C-C.. Hsu, J-C.. 2008. “Ultrasonic Localization and Pose Tracking of an Autonomous Mobile Robot via Fuzzy Adaptive Extended Information Filtering”, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 57(9): 2024-2034.
15. Kaplan, E. D.. Hegarty, C. J., 2006. Understanding GPS Principles and Applications Second Edition, ARTECH HOUSE, INC, Norwood, 703 s.
16. Kanaan, M., 2008. Node Density and Quality of Estimation for Infrastructure-based Indoor Geolocation Using ToA, WPI, Department of ECE, Ph.D. Dissertation, 145 s.
17. Pahlavan, K.. Li, X.. Mäkelä, J.-P., 2002. Indoor geolocation science and technology, **IEEE Communications Magazine**, 40 (2): 112-118.
18. Kanaan, M.. Heidari, M.. Akgül, F. O.. Pahlavan, K., 2006. Technical aspects of localization in indoor wireless networks, **Bechtel Telecommunications Technical Journal**, 5 (1): 47-58.
19. Sayed, A. H.. Tarighat, A.. Khajehnouri, N., 2005. “Network-based wireless location” [Challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information], **IEEE Signal Processing Magazine**, 22 (4): 24-40.
20. Nerguizian, C.. Despins, C.. Affès, S., 2001. A Framework for Indoor Geolocation Using and Intelligent System. *3rd IEEE Workshop on WLANs, 2001*.
21. Hatami, A., 2006. Application of Channel Modeling for Indoor Localization Using TOA and RSS. WPI, Department of ECE, Ph.D. Dissertation, 125 s.
22. Marjovi, A. Nunes, J. G.. Marques, L., Almeida A. 2009. “Multi-Robot Exploration and Fire Searching”, *The 2009 IEEE/RSJ International*

Conference on Intelligent Robots and Systems October 11-15, 2009 St. Louis, USA. pages 1929-1934.

23. Heidari, M., 2008. Identification and Modeling of the Dynamic Behavior of The Direct Path Component in ToA-Based Indoor Localization Systems. WPI, Department of ECE, Ph.D. Dissertation, 159 s.
24. Metreaud, L.T., 2006. An RF-Isolated Real-Time Multipath Testbed for Performance Analysis of WLANS. WPI, Department of ECE, Master of Science, 123 s.
25. Jakobsen, M.L., 2009. Modeling and Estimation of Wireless Multipath Channels “An Application within Pilot-assisted Channel Estimation for Downlink OFDM”. Aalborg University, Department of Mathematical Sciences, MSc Thesis, 121 s.
26. Alavi, B., 2006. Distance Measurement Error Modeling for Time-of-Arrival Based Indoor Geolocation. WPI, Department of ECE, Ph.D. Dissertation, 171 s.
27. Alsindi N., 2008. “Indoor Cooperative Localization for Ultra Wideband Wireless Sensor Networks”, WPI, Department of ECE, Ph.D. Dissertation, 149 s.
28. Akgül, F.O., 2010. Modeling the Behavior of Multipath Components pertinent to Indoor Geolocation. WPI, Department of ECE, Ph.D. Dissertation, 201 s.
29. Heidari, M.. Alsindi, N.. Pahlavan, K., 2009. UDP identification and error mitigation in Toa-based indoor localization systems using neural network architecture. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, **8(7)**:3597-3607.
30. Güvenç, İ.. Chong C.C.. Watanabe F.. Inamura, H.. 2008. NLOS Identification and Weighted Least-Squares Localization for UWB Systems Using Multipath Channel Statistics. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing Volume 2008:271984**, 14 s.
31. Pahlavan, K.. Krishnamurthy, P.. Beneat, J., 1998. Wideband Radio Propagation Modeling for Indoor Geolocation Applications. **IEEE Communications Magazine**, **36(4)**: 60-65.
32. Alavi, B.. Pahlavan, K., 2006. Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements. **IEEE Communications Letters**, **10(4)**.

33. Akgül, F.O., Pahlavan, K., 2009. A New Ray Optical Statistical Model for Multipath Characteristics Pertinent to Indoor Geolocation. *Wireless communications and networking conference. WCNC 2009* pages 1149-1154.
34. Pahlavan, K., Levesque, A.H., 2005. *Wireless Information Networks*. Wiley-Interscience, Canada, 722 s.
35. Kanaan, M., Pahlavan, K., 2004. Algorithm For TOA-Based Indoor Geolocation. **IEE Electronics Letters**, **40**(22).
36. Bahl, P., Padmanabdan, V.N., 2000. RADAR: AN in-building Rf-based user location and tracking system. *IEEE INFOCOM 2000*. 775-784.
37. Jan, R.H., Lee, Y.R., 2003. An Indoor Geolocation System for Wireless LANs. *International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'03)*, pages 26-34.
38. Kanaan, M., Pahlavan, K., 2004. A comparison of wireless geolocation algorithms in the indoor environment. *Wireless communications and networking conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE*, vol. 1 pages 177-182.
39. Davidon, W.C., 1968. Variance algorithm for minimization, **Computer Journal**, **10**: 406-410.
40. P-C. Chen, "Mobile position location estimation in cellular systems", PhD Thesis, WINLAB, Electrical and Computer Engineering Dept., Rutgers University, 1999.
41. P-C. Chen, "A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation", *Wireless Communications and Networking Conference, 1999. WCNC. 1999 IEEE*, vol. 1 pages 316-320.
42. Van Trees, H.L., 2001. *Detection, Estimation and Modulation Theory, Part I, Detection, Estimation and Linear Modulation Theory*, John Wiley & Sons, Inc, 686 s.
43. Garcia, A.L., 1994. *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 599 s.

Ek – 1 : UDP DURUMLARINDAKİ OLASILIK DAĞILIM FONKSİYONLARI

DDP ve NUDP durumu için:

Normal (Gaussian) Dağılım [43]		
Notasyon	Notation	$N(\mu, \sigma)$
Parametreler	Parameters	$\mu \in R$ - ortalama (mean) $\sigma^2 > 0$ - varyans (variance)
Tanım kümesi	Support	$x \in R$
OYF (olasılık yoğunluk fonksiyonu)	PDF (probability density function)	$f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
YDF (yığılmalı dağılım fonksiyonu)	CDF (cumulative distribution function)	$\frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right]$
Ortalama	Mean	μ
Varyans	variance	σ^2

SUDP durumu için:

Genelleştirilmiş Uç Değer (<i>Generalized Extreme Value; GEV</i>) Dağılımı [23]		
Notasyon	Notation	$GEV(\mu, \sigma, \kappa)$
Parametreler	Parameters	$\mu \in R$ – konum (<i>location</i>) $\sigma > 0$ – ölçek (<i>scale</i>) $\kappa \in R$ – şekil (<i>shape</i>)
Tanım kümesi	Support	<i>eğer</i> $\kappa > 0$ ise $x \in [\mu - \sigma / \kappa, +\infty)$ <i>eğer</i> $\kappa = 0$ ise $x \in (-\infty, +\infty)$ <i>eğer</i> $\kappa < 0$ ise $x \in (-\infty, \mu - \sigma / \kappa]$
OYF (olasılık yoğunluk fonksiyonu)	PDF (probability density function)	$t(x) = \begin{cases} \textit{eğer } \kappa \neq 0 \textit{ ise } (1 + (\frac{x - \mu}{\sigma})^{-1/\kappa}) & \textit{iken} \\ \textit{eğer } \kappa = 0 \textit{ ise } e^{-(x - \mu)/\sigma} \end{cases}$ $f(x \mu, \sigma, \kappa) = \frac{1}{\sigma} t(x)^{\kappa+1} e^{-t(x)}$
YDF (yığılmalı dağılım fonksiyonu)	CDF (cumulative distribution function)	$e^{-t(x)}, x \in \text{tanım kümesi olmak üzere}$
Ortalama	Mean	γ Euler sabiti olmak üzere; <i>eğer</i> $\kappa \neq 0, \kappa < 1$ ise $\mu + \sigma^{\frac{\Gamma(1-\kappa)-1}{\kappa}}$ <i>eğer</i> $\kappa = 0$ ise $\mu + \sigma\gamma$ <i>eğer</i> $\kappa \geq 1$ ise ∞
Varyans	variance	$g_k = \Gamma(1 - k\kappa)$ olmak üzere; <i>eğer</i> $\kappa \neq 0, \kappa < \frac{1}{2}$ ise $\sigma^2 (g_2 - g_1^2) / \kappa^2$ <i>eğer</i> $\kappa = 0$ ise $\sigma^2 \frac{\pi^2}{6}$ <i>eğer</i> $\kappa \geq \frac{1}{2}$ ise ∞

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL

Adı soyadı : Zeynel Abidin KUŞ
Doğum Tarihi : 09.08.1982
Doğum Yeri : Kayseri
Uyruğu : T.C.
Medeni hali : Bekar
E-mail : z_kus@windowslive.com

EĞİTİM

Lisans

İşletme (Açık Öğretim), İşletme Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, ESKİŞEHİR, 2010.
Makine Mühendisliği, Müh.Mim.Fak., S. DEMİREL Üniversitesi, ISPARTA, 2008.

YABANCI DİL

İngilizce 82.500 (ÜDS / 18 Mart 2012 / Fen Bilimleri)

İLGİ ALANLARI

Robotik Sistemler, Elektronik Sistemler, Otomatik Kontrol, Endüstriyel Kontrol Sistemleri. Bina içi kablosuz konumlandırma sistemleri.