

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOMANYETİK ALAN TABANLI DÜŞÜK KARMAŞIKLIK
ODAKLI KAPALI ALANDA KONUM BELİRLEME
YÖNTEMİ

Tevfik KADIOĞLU

DOKTORA TEZİ
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Danışman
Prof.Dr. Burcu ERKMEN

Şubat, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOMANYETİK ALAN TABANLI DÜŞÜK KARMAŞIKLIK ODAKLI
KAPALI ALANDA KONUM BELİRLEME YÖNTEMİ

Tevfik KADIOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 22.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Burcu ERKMEN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Burcu ERKMEN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Revna Acar VURAL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Şebnem BAYDERE, Üye
Yeditepe Üniversitesi

Doç.Dr. Sadiye Nergis Tural POLAT , Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi İpek ŞEN, Üye
İstanbul Bilgi Üniversitesi

Danışmanım Prof.Dr. Burcu ERKMEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Jeomanyetik Alan Tabanlı Düşük Karmaşıklık Odaklı Kapalı Alanda Konum Belirleme Yöntemi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Tevfik KADIOĞLU

İmza

Eşim Emel ve oğlum Tuna'ya

...



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı bildiğim, danışman hoca statüsünü hakkıyla yerine getiren Prof.Dr. Burcu ERKMEN'e teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum. Ayrıca kıymetli zamanını ayırıp üniversite hayatımın bu son döneminde bana kattıkları her bilgi için Prof.Dr. Şebnem BAYDERE'ye ve Doç.Dr. Revna Acar VURAL'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Teşekkürlerin az kalacağı diğer üniversite hocalarımdan da bana bu uzun doktora serüvenimde kazandırdıkları her şey için ve beni şimdi ve gelecekte gururla paylaşacağım bilgilerle donattıkları için hepsine teker teker teşekkürlerimi sunuyorum ve son olarak çalışmamda desteğini ve bana olan güvenini benden esirgemeyen eşim Emel KADIOĞLU ve beni bu günlere sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirerek getiren ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen bu hayattaki en büyük şansım olan aileme sonsuz teşekkürler.

Tevfik KADIOĞLU

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	6
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Özgün Katkı	9
2 JEOMANYETİK ALANIN VE ÖZELLİKLERİ	11
2.1 Jeomanyetik Alan	11
2.2 Jeomanyetik Alanın Konum Belirlemedeki Avantajları	15
2.3 Jeomanyetik Alanın Ölçümlerinin Konum Belirlemedeki Zorlukları . . .	16
2.4 Manyetik Sensörler İçin Ölçüm Modeli	18
2.5 Yaygın Kullanılan Koordinat Sistemleri	20
2.6 Manyetik Sensör Ölçüm Hataları	23
3 JEOMANYETİK ALAN İLE KONUM BELİRLEME	26
3.1 Jeomanyetik Sinyal Tabanlı Takip Yöntemleri	26
3.2 Literatürdeki Çalışmaların Özeti	27
4 BASISMAP KAPALI ALAN TAKİP YÖNTEMİ	40
4.1 Önerilen Yöntem	40
4.2 Adım Eylemi ve Adım Uzunluğu Algılama	41
4.3 Dönüş Algılama	43
4.4 Kör Takip Yöntemi	45

4.5	Manyetik Alan Harita Veri Tabanı	47
4.6	Matrix Profile ile Jeomanyetik İz Eşleme	51
4.7	Bayes Filtreleme Yöntemi	57
4.8	Kalman Filtreleme Yöntemi	59
4.9	Kalman Filtresi İçin Sistem Modelinin Oluşturulması	63
5	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	64
5.1	Veri Toplama	64
5.2	DTW ve MP Zaman Karmaşıklığı Karşılaştırması	64
5.3	Test Ortamları	66
5.3.1	Ofis Alanı	68
5.3.2	Alışveriş Merkezi	69
5.4	Değerlendirme ve Sonuçlar	71
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	73
	KAYNAKÇA	75
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	81

SİMGE LİSTESİ

ϕ	Enlem açısı
λ	Boylam açısı
μ_0	Manyetik geçirgenlik sabiti
T	Tesla
G	Gauss
F	Manyetik Alan

KISALTMA LİSTESİ

ALS	Ambient Light Sensor
APF	Augmented Particle Filtering
AI	Artificial Intelligence
AVM	Alışveriş Merkezi
BLE	Bluetooth Low Energy
BG	Binary Grid
CDF	Cumulative Distribution Function
CNN	Convolutional Neural Network
CSI	Channel State Information
DL	Deep Learning
DR	Dead-reckoning
DTW	Dynamic Time Warping
ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed Coordinate System
ENU	East/North/Up Coordinate System
EKF	Extended Kalman Filter
FFT	Fast Fourier Transform
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HMM	Hidden Markov Model
ID	Identity
IMU	Inertial Measurement Unit
KNN	K-Nearest Neighbors Algorithm
LBS	Location Based Services

LSB	Least Significant Bit
LSTM	Long-Short Term Memory
MAP	Maximum a Posteriori
MASS	Mueen's ultra-fast Algorithm for Similarity Search
MCL	Monte Carlo Localization
MEMS	Micro-electromechanical Systems
ML	Machine Learning
MLP	Multi Layer Perceptron
MP	Matrix Profile
MFS	Magnetic Field Strength
NN	Nearest Neighbor
PDA	Probabilistic Data Association
PDR	Pedestrian Dead Reckoning
PF	Particle Filtering
RBF	Recursive Bayesian Filter
RSS	Received Signal Strength
TSDB	Time Series DataBase
UKF	Unscented Kalman Filter
YSA	Yapay Sinir Ağı
UWGM	Undirected Weighted Graph Model
Wi-Fi	Wireless Fidelity 802.11
WLAN	Wireless Local Area Network
WGS-84	World Geodetic System 1984
WKNN	Weighted K-Nearest Neighbors Algorithm
WMM	World Magnetic Model

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Akıllı telefon ile konum belirleme için ana bileşenler	4
Şekil 1.2	Parmak izi tabanlı konum belirleme için ana bileşenler	5
Şekil 1.3	Ferromanyetik malzeme ve manyetik alana etkisi)	7
Şekil 2.1	2020 WMM Jeomanyetik alanın bölgesel yoğunluk haritası [nT] [24]	13
Şekil 2.2	Dünya'nın çevresindeki jeomanyetik alan (- -) [25]	13
Şekil 2.3	Jeomanyetik alan bileşenleri	15
Şekil 2.4	Aynı yol üzerinde farklı zamanda toplanan manyetik veriler [6] . .	17
Şekil 2.5	Sert ve Yumuşak Demir Bozunumları [33]	19
Şekil 2.6	Jeodezik, ECEF, NEU koordinat sistemleri [34]	21
Şekil 2.7	Mobil cihaz koordinat sistemi [36]	24
Şekil 3.1	MeshMap'de tanımlanan örnek harita görseli [47]	27
Şekil 3.2	Farklı hızdaki kullanıcılardan toplanan manyetik sensör verisi [47]	28
Şekil 3.3	CSMS test ortamı görseli [48]	29
Şekil 3.4	S.Guo [49] çalışmasına dair test ortamı görseli	30
Şekil 3.5	Farklı sensörlerin güç tüketimine etkisi [52]	33
Şekil 3.6	Izgara tabanlı harita ve manyetik alan dağılımı görseli [54]	33
Şekil 4.1	Sistem blok diyagramı	41
Şekil 4.2	Adım ve baş açısı algılama	42
Şekil 4.3	Adım algılayıcı adaptif eşik değişimi	43
Şekil 4.4	Baş açısı ve dönüş noktası algılama çıktısı	45
Şekil 4.5	a) Kör takip sistemi b)Yaya baş açısı	46
Şekil 4.6	İç mekan haritası oluşturma adımları	48
Şekil 4.7	Harita veri yapısı	49
Şekil 4.8	Çizge üzerinde dönüşler ve koridor ayrımı	50
Şekil 4.9	Sıfır dolgulama ile FFT ve evrişim işlemi[74]	52
Şekil 4.10	Matrix-profile benzerlik sorgulaması	54
Şekil 4.11	Eşleşme hassasiyeti ve hat uzunluğu ilişkisi [55]	55
Şekil 4.12	Değişken uzunluklu benzerlik arama belleği	56
Şekil 4.13	Bellek boyutu ve bellek içindeki verinin değişkesi	56
Şekil 4.14	Yinelemeli bayes filtresi öngörüsü	57
Şekil 4.15	Birden çok minimum noktalı benzerlik araması	59

Şekil 4.16	PDR ve önerilen yöntemin karşılaştırılması	63
Şekil 5.1	DTW ve MP işlem zamanı oranı	66
Şekil 5.2	Ofis binasında hareket edilen koridor ve dönüş noktaları	67
Şekil 5.3	AVM binasında hareket edilen koridor ve dönüş noktaları	67
Şekil 5.4	Ofis binasında hareket edilen harita çizgesi	68
Şekil 5.5	Ofis binasında kör takip sistemi ve önerilen yöntemin takip performansı(I)	68
Şekil 5.6	Ofis binasında kör takip sistemi ve önerilen yöntemin takip performansı(II)	69
Şekil 5.7	Ofis binasında kör takip sistemi ve önerilen yöntemin takip performansı(III)	69
Şekil 5.8	AVM Binasında hareket edilen harita çizgesi	70
Şekil 5.9	AVM binasında kör takip sistemi ve önerilen yöntemin takip performansı	70
Şekil 5.10	Ofis binası için birikimli dağılım fonksiyonu (CDF)	72
Şekil 5.11	AVM binası için birikimli dağılım fonksiyonu (CDF)	72

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Uygulamalara göre konum belirleme gereksinimleri [7]	2
Tablo 1.2	Konum belirleme için yaygın kullanılan işaretler [5]	8
Tablo 2.1	Mobil cihazlarda kullanılan farklı üreticilere ait sensörler [30] . . .	18
Tablo 3.1	Jeomanyetik veri kullanarak konum belirleme yapan çalışmalar . .	37
Tablo 4.1	Unscented Kalman Filtresi (UKF) denklemleri.	62
Tablo 5.1	DTW ve MP benzerlik hesaplama süreleri	65

Jeomanyetik Alan Tabanlı Düşük Karmaşıklık Odaklı Kapalı Alanda Konum Belirleme Yöntemi

Tevfik KADIOĞLU

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof.Dr. Burcu ERKMEN

Jeomanyetizma, tüm dünyada var olan oldukça kararlı bir doğal sinyaldir. Cep telefonlarının yaygın kullanımı ile beraber Konum Tabanlı Servisler (LBS: Location-Based Services) ve bina içi yönlendirme uygulamalarının kullanımına olan ilgi göz önüne alındığında, iç mekan konum belirleme çalışmaları son zamanlarda hız kazanmış ve jeomanyetizmanın her yerde mevcut olma özelliği, jeomanyetik konum belirlemeyi umut verici bir teknoloji haline getirmiştir. Literatürde konum belirleme çevrimiçi ve çevrimdışı metodoloji ile yapılmaktadır. Kişi takibi için manyetik sensörler ve IMU'ların kullanılmasının yanı sıra; binadaki yürüyüş yollarının ve koridorların manyetik parmak izleri, çizge tabanlı arama yöntemi ile güncellenmektedir. Manyetik değişikliklerin normalden fazla olduğu alanlarda varyansa dayalı dinamik arabelleğe alma işlemi kullanılarak performanstan ödün vermeden toplanan verilerin verimli bir şekilde işlenmesinde avantaj sağladığı bu çalışma ile ispatlanmıştır. Ayrıca manyetik veri dizisi ile konum belirleme için ilk kez matrix profile tabanlı yol eşleştirme yöntemi kullanılmıştır. Bir ofis ve alışveriş merkezinde yapılan deneyler, önerilen sistemin 2.5 metre hata ile konum belirleme yapabildiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Jeomanyetik Konumlandırma, Kapalı Alan Konum Belirleme, Yaya Takibi, Sekans Eşleme, Benzerlik Araması, Matrix Profile

A Geomagnetic Field Based Low Complexity Oriented Indoor Positioning Method

Tevfik KADIOĞLU

Department of Electronic and Communication Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Burcu ERKMEN

Geomagnetism is a fairly stable natural signal that exists all over the world. Considering the widespread use of mobile phones and interests in using applications such as Location-Based Services (LBS) and indoor navigation, indoor geolocation studies have gained momentum recently and this ubiquitous feature of geomagnetism make geomagnetic localization an promising technology. In the literature, geolocation is done with online and offline methodology. In addition to using magnetic sensors and IMUs for person tracking; The magnetic fingerprints of the walkways and corridors in the building are updated with the graph-based search method. It has been proven by this study that areas where magnetic changes are more than normal provide an advantage in efficient processing of collected data without sacrificing performance using variance-based dynamic buffering. In addition, matrix profile-based path matching method was used for the first time for magnetic sequence-based positioning. Experiments with data collected from an office floor and a shopping mall reveal that the proposed system can determine position with an error of up to 2.5 meters.

Keywords: Geomagnetic Positioning, Indoor Localization, Pedestrian Tracking, Sequence Matching, Similarity Search, Matrix Profile

1 GİRİŞ

Son yıllarda akıllı telefonların ve mobil cihazların sayısı hızla artmış ve konum tabanlı sosyal ağlar, yönlendirme ve reklamcılık gibi çeşitli konum tabanlı uygulamalar ortaya çıkmıştır. Bu konum tabanlı uygulamaların çalışabilmesi için kapalı veya açık alanlara yönelik haritalandırma ve konum belirleme önem arz etmektedir. Açık alanlarda haritalandırma ve konum belirleme için yaygın olarak GNSS sistemleri kullanılmasına rağmen kapalı alanlarda oturmuş bir yöntem bulunmamaktadır. İç mekan alanlarının kapsamı kat planları veya mekana özgü sebeplerden dolayı yetersiz kalmakta ve iç mekan konum tabanlı uygulamaların yayılmasını zorlaştırmaktadır. Bir iç mekan haritası oluşturmak için genellikle izlenen yol pahalı ve zaman alıcıdır. Ayrıca, iç mekan kat planlarının zamanla değişmesi, iç mekan haritalarının makul bir zaman dilimi içinde güncellenmesi bir zorluk teşkil etmektedir.

GNSS gibi coğrafi konum belirleme sistemleri; iç mekanlarda sinyal zayıflaması, yansımalar gibi çeşitli fiziksel bariyerlerden dolayı sinyalleri yakalayamamakta ve kapalı alanda konum belirleme gereksinimlerinin karşılaması mümkün olmamaktadır. Örneğin GPS sistemi birden çok uydudan aldığı verileri değerlendirerek konum hassasiyetini artırmaktadır. Kapalı alanlarda duvarlar, çatı veya diğer engeller radyo frekanslarını bloklamakta ve istenilen hassasiyete ulaşılmasını engellemektedir. Kapalı alan içerisinde bir pencereye yaklaşıldığında GPS sinyalini yakalamak mümkündür. Ancak her koşulda bu şartı sağlamak mümkün olmamaktadır. Kapalı alanda konum belirlemek için birçok alternatif teknoloji bulunmaktadır. WiFi [1], Bluetooth [2], ultrasonik veya ses [3], görünür ışık [4] ve manyetik alan [5] gibi ayırt edici sinyaller kullanılarak konum elde edilebilmektedir.

Kapalı alanlarda konum belirlemenin yaygınlaşmasında giyilebilir akıllı cihazlar, tabletler, mobil telefonlar gibi cihazların artan kullanımı etkili olmuştur. Kapalı alanlarda konum belirlemeye olan ilginin artması zamanımızın %80-%90 gibi bir oranını kapalı alanlarda geçirmemiz, telefon görüşmelerimizin yaklaşık %70'ini kapalı alanlarda gerçekleştirmemiz ve yine veri kullanımımızın %80 gibi bir kısmının kapalı alanlarda olmasının etkisi büyüktür [6]. Konum tabanlı servisler (LBS - Location

Based Services), kullanıcı yönlendirme, konuma bağlı sosyal ağlar, envanter takibi gibi uygulamalar ile birlikte geniş kullanıcı kitlesi tarafından kullanılmaktadır. Tablo 1.1'de çeşitli uygulamalar ve bu uygulamalara dair sistem gereksinimleri verilmiştir. Yapılan araştırmalara göre Dünya üzerindeki akıllı telefon kullanıcılarının %74'ü konum tabanlı servisleri kullanmaktadır [7].

Tablo 1.1 Uygulamalara göre konum belirleme gereksinimleri [7]

Yönlendirme ve Takip	<ul style="list-style-type: none"> • Kapalı ve açık alanlarda kullanılabilme • Gerçek zamana yakın tepki • Bir kaç metre hassasiyet • Güvenilirlik ve sürdürülebilir servis • Düşük/orta güç tüketimi • Güçlü kişisel verilerin gizliliği
Pazarlama	<ul style="list-style-type: none"> • Orta veya az servis kalitesi • Bir kaç dakika içinde servis verebilme • 100m'ler bazında konum hassasiyeti • Orta güvenilirlik ve devamlılık • Çok düşük güç tüketimi • Ücretsiz veya çok ucuz servis • Orta/Güçlü kişisel verilerin gizliliği
Eğlence	<ul style="list-style-type: none"> • Orta/güçlü servis kalitesi (kapalı ve açık alanlarda) • Bir kaç saniye veya gerçek zamana yakın tepki • 10m'ler mertebesinde konum hassasiyeti • Yüksek sürdürülebilir güvenilirlik ve servis • Düşük güç tüketimi • Kabul edilebilir servis ücreti • Orta derece kişisel verilerin gizliliği
Bilgi Servisleri	<ul style="list-style-type: none"> • Orta servis kalitesi • Bir kaç saniye veya gerçek zamana yakın tepki • Bir kaç m'den 100m'lere kadar konum hassasiyeti • Yüksek güvenilirlik ve devamlılık • Düşük güç tüketimi • Kabul edilebilir servis ücreti • Orta derece kişisel verilerin gizliliği
Koruma ve Güvenlik	<ul style="list-style-type: none"> • Çok yüksek servis kalitesi (kapalı ve açık alanlarda) • Bir kaç saniye veya gerçek zamana yakın tepki • 10m'ler mertebesinde konum hassasiyeti • Çok yüksek güvenilirlik ve devamlılık • Düşük güç tüketimi • Kabul edilebilir servis ücreti • Orta derece kişisel verilerin gizliliği

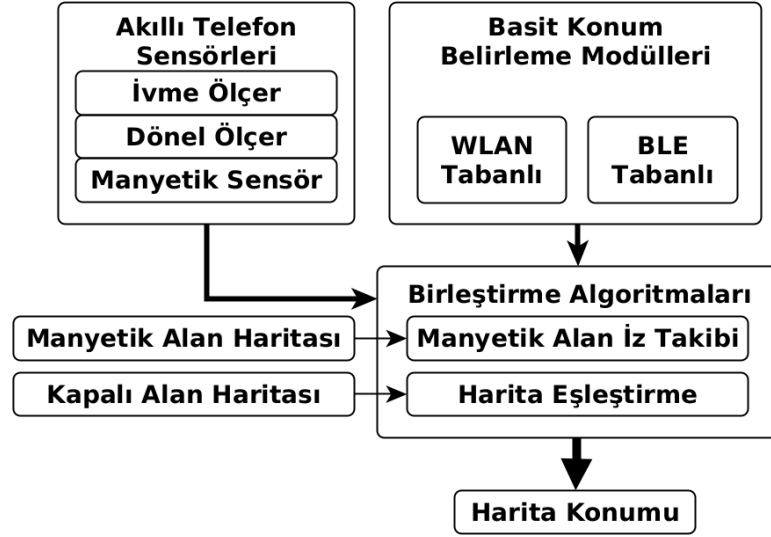
Konum servisleri temelde konuma has özellikleri değerlendirerek konumu ayırtmaktadır. Bunun için sinyal yayan bir alt yapı ve/veya kör takip (dead-reckoning) yöntemleri kullanılmaktadır. Dünyanın manyetik alanının (Jeomanyetik alanın) her yerde bulunması ve konuma özgü bozunumları kullanarak

alt yapı gerektirmeyen sistemler kurmak mümkündür. Mobil teknolojilerin ve uygulamaların gelişmesiyle birlikte manyetik sensörlere dayalı kapalı alan konumlandırma işlemi altyapı gerektirmediği için popülerlik kazanmıştır. Aslında, doğada manyetik alanın özelliklerini kullanan coğrafi konum belirleme sisteminin var olduğuna dair kanıtlar bulunmaktadır. Sürüngenler, posta güvercinleri, balıklar ve ıstakozlar gibi bir dizi hayvan, manyetik alan sinyallerini kullanarak konumunu belirleme yeteneğine sahiptir. [8]'de ıstakozların bulunduğu alana dik olarak yerleştirilmiş bir manyetik bobin sistemi kullanılarak test edilmiş ve dönen ıstakozların manyetik pusula duyusuna sahip oldukları kanıtlanmıştır. [9]'da güvercinlerin manyetik ve koku alma sistemleri arasındaki ilişki üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Güvercinlerin koku alma sistemlerinin bozulmasının magnetoreseptörleri etkilediği ve aynı zamanda manyetik duyuyu bozabileceği gözlemlenmiştir. Test sonuçları, dikenli ıstakozların navigasyonunun manyetik bir harita algısına dayandığını göstermiştir. Bu bize bazı hayvanların yerel jeomanyetik alan değişikliklerini kullanarak veya manyetik verileri izleyerek konum bilgisi elde edebildiğini göstermektedir.

İç mekan veya kapalı alan konumlandırma uygulamalarında jeomanyetik alanın kullanımı gelişmekte olan bir teknolojidir ve bu konuda birçok yeni çalışma bulunmaktadır. Çelik takviyeli beton, metal kapı çerçeveleri, kolonlar, mobilyalar, elektronik ekipmanlar, aletler gibi birçok faktör manyetik alanda düzensizliklere veya çeşitli bozunumlara neden olmaktadır. Bu düzensizlikler bir manyetik algılayıcı kullanılarak yönelim veya baş açıcısı çıkartmada zorluklar oluşturmalarına karşın bu oluşan düzensizlikler bir harita verisi ile ilişkilendirildiğinde ilgilenilen alan içerisinde konum belirlemek mümkün olmaktadır.

Şekil 1.1'de yaygın rastlanan akıllı telefon konum belirleme sisteminin bileşenleri görülmektedir. Kullanılan ana veriler MEMS teknolojisine sahip sensör verileri, WLAN ve Bluetooth RF istasyon verileri, manyetik alan verisi ve verileri değerlendirmek üzere önceden oluşturulmuş bir haritadan oluşur. Harita konum belirlemek amacıyla toplanan verilerin eşleştirilmesi için önemli bir bileşendir.

Literatürde karşılaşılan uygulamalarda genellikle farklı verilerin değerlendirilmesi sonucunda konum belirleme hedeflenmiştir [10]. Örneğin MEMS sensörler kullanılarak kör takip (DR - Dead-reckoning) yapılabilir. Bu tip sistemlerde veri toplanıp işlenmeye başlandığı an referans alınarak konum belirleme yapmak mümkündür. Ancak bir kapalı alan içerisindeki konumu belirlemek için başlangıç noktasının öngörülmesi gerekmektedir. Kör takip sistemlerinde başlangıç noktasının harita ile eşleştirilmesinde konumuna özgü özelliklerin kullanılması gerekmektedir. Bu başlangıç konumu için BLE işaret üretici, WLAN istasyon bilgileri veya



Şekil 1.1 Akıllı telefon ile konum belirleme için ana bileşenler

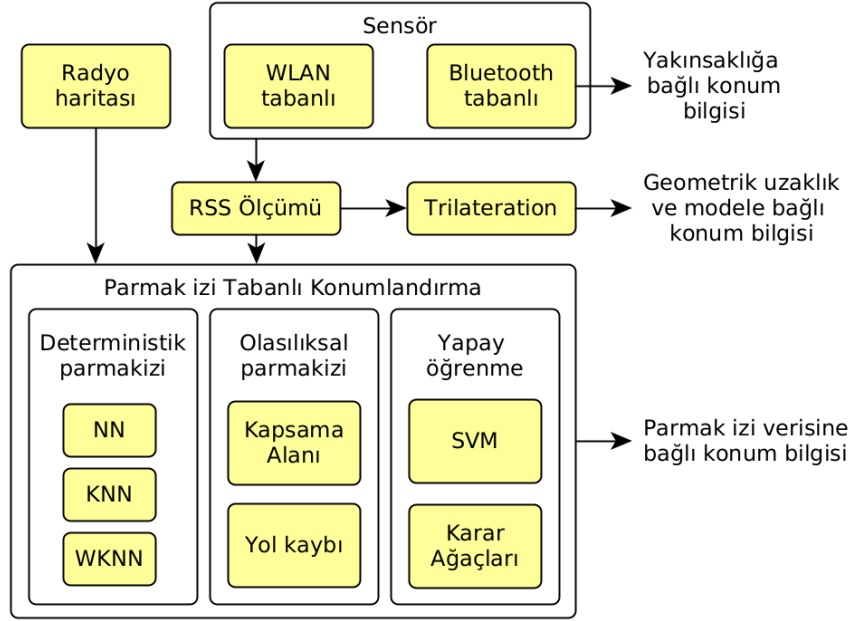
kapalı alan içindeki manyetik izler kullanılabilir. PDR/DR bu sebeple tek başına kullanılamamaktadır. Yine yapılan çalışmalar incelendiğinde en çok kullanılan yöntem WLAN ile veri birleştirme yapılmasıdır. WLAN yaygın kullanılan bir ağ mimarisidir ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte kablosuz ağ ortamı birçok kapalı alan içerisinde yer almaktadır. Bu özelliği WLAN'ün kapalı alan konum belirleme uygulamalarında kullanımını popüler hale getirmiştir.

WLAN ve BLE verisi kullanılarak konum bilgisi elde edilebilir. Bu konum bilgisi elde edilmeden önce oluşturulmuş bir radyo haritası ve bu harita ile ölçülen sinyalin eşleştirilmesine dayalı konum belirleme yapılır. Literatüde geometrik yöntemler, parmak izi tabanlı sistemler ve olasılıksal yöntemler kullanılarak WLAN konum belirlemeye ilişkin çalışmalar bulunmaktadır [11]. Yaygın kullanılan yöntemler içerisinde deterministik komşuluk ilişkisini (NN, KNN, WKNN) arayan algoritmalara sıklıkla rastlanmaktadır. Parmak izi kullanmaksızın radyo güç ölçümüne bağlı üçgenleme (trilateration) gibi geometrik yöntemler [12] de diğer bir deterministik çözüm yöntemleridir.

Yapay öğrenme ile çözüm üretilmiş çalışmalarda genellikle pattern tanıma ve sınıflandırmaya yönelik yapılar tercih edilmiştir [13]. Bu yapılar içerisinde histogram bilgisi ile sınıflandırma yapan ve çekirdek (kernel) yöntemleri de tercih edilebilmektedir [13]. Bunun yanında derin öğrenme veya çeşitli olasılıksal yöntemler de kullanılmaktadır [10].

Konum belirleme ihtiyacına göre kablosuz sinyaller kullanılarak bir alanın içerisinde veya yakınında olduğunun algılandığı sistemler yakınında olma durumuna göre konum bilgisi paylaşırken, konumu bilinen kablosuz ağların verileri toplanarak

üçgenleme yardımıyla daha hassas konum bilgisi elde edilebilir. Kablosuz haberleşme alt yapısı kullanan konum belirleme sistemlerine dair farklı yöntemler Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2 Parmak izi tabanlı konum belirleme için ana bileşenler

Yakınlığa bağlı konum belirleme yapan sistemlerde, sinyal yayan ve toplayan bir sistem gerekmektedir. Sinyal yayan sistemin RF gücü belirlenen bir eşik üzerinde olması değerlendirilerek istasyona yakın bir bölgede olduğu algılanarak konum belirleme işlemi yapılır. Bu tip bir yapıya örnek olarak Apple firması tarafından geliştirilen iBeacon [14] adı verilen bluetooth tabanlı sistemdir. iBeacon 0m-0.5m arasını çok yakın (immediate), 0.5m-3m arasını yakın (near), 3m-70m arasını uzak (far) ve 70m'den 200m'ye kadar olan bir mesafeyi de bilinmeyen (unknown) olarak raporlamaktadır. Çeşitli servisler mobil cihazın ilgilenilen noktaya olan yakınlığına göre işletilmesine olanak sağlamaktadır.

Radyo sinyal analizi yapılarak konum belirleme yapan sistemler işaretin gücü, alınan işaretin yönü veya gecikmesine bağlı değişimleri takip ederek konum belirleme işlemi gerçekleştirebilmektedir [15]. Literatürde yer alan bu tip çözümlerde bir parmak izi haritası yerine mevki bilinen radyo istasyonları kullanılarak konum belirleme işlemi yapılır.

Parmak izi haritaları önceden toplanabileceği gibi sistem işletilirken de toplanabilir. Bu tip çalışmalar literatürde kitle tabanlı veri toplama sistemi olarak anılmaktadır. Harita verisi oluştururken önemli olan konuma dair ayırt edici işaretin toplanmasıdır. Konum belirleme çalışmaları, harita ile ayırt edici işaretin eşleştirilmesi prensibine dayanmaktadır.

Konuma dair bilgileri içeren harita esasında bir ayırt edici işaretin konum ile ilişkisini saklayan bir veri tabanıdır. Kaydedilmiş işaretin sorgulanması işlemi ile konum belirleme yapılır. Sorgulama işlemi kullanıcının alan içerisinde gezinmesi sırasında, gerçek zamanlı olarak toplanan işaret ile harita veri tabanının karşılaştırılması diğer bir değişle benzerlik araması yapılması ile olur. Bu karşılaştırma işlemi harita veri tabanı oluşturma biçimine bağlıdır. Konum belirleme işlemi sırasında yapılan karşılaştırma işlemi bir çok konum belirleme sisteminde işlem yükünün en fazla olduğu kısımdır.

Güç tüketimi göz önüne alındığında WiFi, Bluetooth gibi sistemler RF alıcıyı aktif etmesi ve arka planda durmadan radyo sinyali taraması gerektiği için manyetik sensör verisine göre daha fazla güç tüketmektedir [5]. Ayrıca hali hazırda var olan jeomanyetik alana karşın WiFi ve Bluetooth ek alt yapı gerektirebilmektedir. Bu alt yapı yönlü antenler barındıran istasyonlar, değişen ağ topolojileri ve ISM bandı kullanımından (2.4GHz, 5.8GHz bandları) dolayı zaman içinde değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple güç tüketimi, alt yapı maliyeti ve zamanla değişmeyen manyetik etkilerin konum verisi olarak kullanılmasına olan ilgiyi artırmıştır.

Bu tezde; Bölüm 2'de jeomanyetik alan ve özelliklerine değinilmiş, Bölüm 3'de literatürde yer alan jeomanyetik işaret kullanarak konum belirleme sistemleri paylaşılmıştır. Bölüm 4 ve Bölüm 5'de sırasıyla geliştirilen sistem için izlenen yöntemler ve veri toplanarak işlenmesine yönelik deneysel çalışmalar verilmiştir. Bölüm 6 yapılan çalışma ve önerilen yöntemle dair sonuçları içermektedir.

1.1 Literatür Özeti

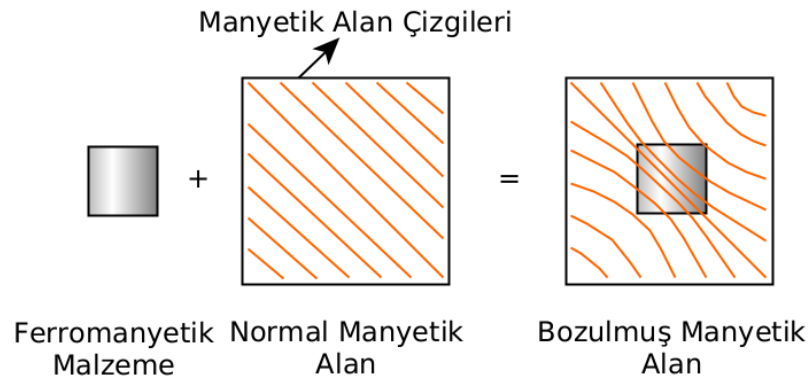
Manyetik alanın konum belirleme için kullanımına dair literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu konuda yapılan öncül çalışmalarda robotlar için uygulanabilir bir konum belirleme yöntemi öneren [16] nolu çalışmada yer almaktadır. Çalışmada paylaşılan yöntemle göre sadece manyetik sensör kullanılarak kapalı alan içerisinde konum belirleme amaçlamışlardır. 2009 yılında yapılan bu çalışma ile jeomanyetik alan kullanılarak kapalı alan içerisinde konum belirleme fikri ortaya çıkmasına karşın jeomanyetik alanın konum belirleme ve yönlendirme sistemlerinde kullanımı çok eskilere dayanmaktadır [17].

Jeomanyetik alan, kapalı alanlarda çeşitli bozunumlara uğrar ve manyetik alan takip edildiğinde bu düzensizlikler gözlenebilir. Kapalı alanda yer alan kapı, pencere, sütunlar, kolonlar, mobilyalar ve elektrikle çalışan cihazlar gibi yapısal bileşenlerin manyetik alanı üzerinde bozucu etkisini incelenmiştir [18]. Bu bozucu etkiler konuma özgü olarak değişmekle birlikte, kapalı alan içerisindeki konumla ilişkilendirilebilecek

farklılıkları içermektedir. Manyetik alandaki bu bozunumları inceleyerek, bu işaretin zaman içerisindeki değişimini gözlemlemiş ve jeomanyetik alanın kapalı alanda konum belirlemek için kullanılabilir bir işaret olduğu sonucu paylaşılmıştır.

Li [18] yaptığı çalışmada manyetik alanın kararlı bir sinyal olduğu ve farklı konumlar için ayırt edici bir işaret olarak kullanılabilirliğine dair sonuçlar elde etmiştir. Elde ettiği sonuçlara göre jeomanyetik alan bileşenleri ölçümünde, işaretin genliği değişiyor olsa da işaret bir katar olarak ele alındığında katarın şeklinin benzerlik gösterdiğine dair bulgularını paylaşmıştır. Bu özellikleri ile kapalı alan içerisinde bozunuma uğrayan jeomanyetik alan konum belirleme sistemlerinde kullanılabilir bir işaret olarak ele alınabilmektedir.

SmartScanner [19] olarak adlandırılan çalışmada jeomanyetik alanın bozunumlarını duvarların içerisindeki değişkenlikleri gözlemek, bina duvarlarının içindeki demir veya boru gibi gömülü objeleri algılamak için geliştirilmiş bir uygulama önerilmiştir. Uygulama temelinde jeomanyetik alanın malzemenin ferromanyetik özelliğinden kaynaklı bozunumlar olduğu görülmüş ve bu bozunumların manyetik sensör ile algılanabilir olması özelliğini kullanmaktadır. Ferromanyetik malzemenin manyetik alan çizgilerine etkisi temsili olarak Şekil 1.3'de verilmiştir. Çalışmada duvarın üzerinde gezdirilen bir akıllı telefon ile duvar içerisindeki değişimlerin raporlanması amaçlanmıştır. Bunun için duvar üzerindeki hareketi algılamak amacıyla ivme sensörü, dönel ölçer ve hareket edilen noktadaki değişimleri algılamak için de manyetik sensör kullanılmıştır.



Şekil 1.3 Ferromanyetik malzeme ve manyetik alana etkisi)

Bir diğer çalışmada da binanın manyetik alan etkileri üzerinde durulmuş. Zemine yakın noktadan alınan ölçümler ile manyetik alanın kapalı alan içerisindeki değişimleri paylaşılmıştır. Yapılan deneylerde zeminden veri okumak için enkoderli bir düzenek ile jeomanyetik alan ölçümlenerek konuma göre ayrıştırılabilir olduğu sonucuna varılmıştır [20].

Tablo 1.2’de kapalı alanda konum belirlemek için yaygın kullanılan sinyaller, konum belirleme güven aralığı, alt yapı ihtiyacı ve güç tüketimine dair bilgiler paylaşılmıştır. Kullanılan sinyale göre alt yapı gerektirmeden hassasiyeti birçok konum belirleme uygulaması için yeterli olan ve güç tüketimi düşük olan jeomanyetik işaret konum belirleme uygulamalarında sağladığı bu avantajlarından dolayı dikkat çekmektedir.

Tablo 1.2 Konum belirleme için yaygın kullanılan işaretler [5]

Sinyal	Hassasiyet	Alt Yapı	Kapsama	Güç Tüketimi
Wi-Fi	5-10m	WLAN	Orta	Yüksek
Bluetooth	3-10m	iBeacon	Küçük	Orta
GSM	5-50m	Mobil Şebeke	Büyük	Yüksek
Kamera	2-5m	Gerektirmez	Küçük	Yüksek
FM (Radio)	2-10m	FM Receiver	Büyük	Orta
Akustik	<1m	Gerektirmez	Küçük	Yüksek
İvme, Dönüş	5-20m	Gerektirmez	Büyük	Orta
Jeomanyetik	1-5m	Gerektirmez	Orta	Düşük

Bir kapalı alan navigasyon sistemi için en çok ziyaret edilen yerlerin koridorlar olduğu düşünüldüğünde verilecek hizmete göre farklı çözünürlükte konum belirleme teknikleri kullanılabilir. Geniş alanlar içerisinde anlamlı olacak bir navigasyon sisteminde (örneğin havaalanı, otopark, tren istasyonu, büyük bir hastane, AVM, kampüs veya büyük binalar) koridorlar üzerinde konum belirlemek yeterli olacaktır. Bu sebeple literatürdeki farklı ölçekteki birçok yayında en genel olarak koridor üzerinde konum belirleme üzerine problemlere yoğunlaşmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Açık alanlar için yaygın kullanılan uydu destekli sistemler (GNSS - Global Navigation Satellite System) bulunmasına karşın, kapalı alanlarda yaygınlaşan birçok teknoloji mevcuttur ancak bu teknolojiler henüz gelişme safhasındadır. Jeomanyetik işaret kullanılarak kapalı alanlarda konum belirleme henüz sınırlı sayıda ve çözüm aşamasında çalışmaların yürütüldüğü bir alandır.

Diğer sistemlerde incelendiğinde kapalı alanlar için bir alt yapı gerektirmeyen jeomanyetik işaretin öne çıktığı görülmektedir. Güç tüketimi göz önüne alındığında WiFi, BLE gibi sistemler RF alıcısı aktif etmesi ve arka planda durmadan tarama yapması gerektiği için manyetik sensör verisine göre daha fazla güç tüketmektedir. Ayrıca hali hazırda var olan manyetik veriye karşın WiFi ve BLE ek alt yapı gerektirebilmektedir. Bunun yanında bu alt yapı yönlü antenler barındıran istasyonlar, değişen ağ topolojileri ve ISM bandı kullanımından (2.4GHz, 5GHz bandları) dolayı zaman içinde değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple güç tüketimi, maliyet ve

zamanla değişmeyen özellikleri jeomanyetik alan bozunumlarının konum verisi olarak kullanılmasına olan ilgiliyi artırmıştır.

Ancak jeomanyetik bozunumların haritalandırılması ve buna bağlı konum belirleme sistemlerinin uygulamaya özel zorlukları bulunmaktadır. Bunlar;

- Manyetik verinin WiFi veya BLE’de olduğu gibi bir kimlik bilgisine sahip olmaması,
- Dünya’nın manyetik alanına bağlı olduğu için RF tabanlı çözümlerden farklı ele alınmasının gerekliliği vardır,
- Ham manyetik sensör verisi 3 boyutlu olarak ifade edilmekte ve bunun anlamlı olabilmesi için özellik çıkartımı ve sinyalleri birbirinden ayırştırmak, ardışıl işaretlerin değerlendirilmesi ve haritalandırma büyük önem taşımaktadır,
- Cihazdan cihaza fark eden değişimlerde kullanıcının cihazına ait farklılıkların giderilmesi veya bu farklılıklardan etkilenmeyecek bir sistem geliştirmenin zorluğu bulunmadır.

Bu tip zorluklar, çözümleri gereken problemleri de beraberinde getirmektedir. Yapılan çalışmalar kapsamında bu problemlere çözümler aranmakta ve manyetik alan verisi kullanılarak konum belirlemek için en uygun çözümlerin üretilmesi amaçlanmaktadır.

Jeomanyetik işaret kullanarak konum ayırt edilebilirliği ve konum belirleme yöntemleri incelenerek, sunulan komple bir çözüm önerisi bu tez çalışmasında tartışılmaktadır. Bu yöntem sayesinde RF tabanlı çözümlere göre avantaj sağlayacak alt yapı gerektirmeyen ve güç tüketimi daha düşük bir sistem önerilmektedir.

1.3 Özgün Katkı

Tez kapsamında jeomanyetik işaret kullanarak konum belirleme için literatürde yer almayan bir çözüm üretilmiştir. Ayrıca bu çözüm alt yapı gerektirmemesi açısından literatürdeki kapalı alan konum belirleme sistemlerine nazaran öne çıkmaktadır.

Jeomanyetik işaret kullanarak konum belirleme yapan sistemler incelendiğinde temelde 3 aşamalı olarak konum belirlemesi yapılabilmektedir. Bu adımlar;

- Kullanıcının bulunduğu konuma dair ayırt edici parametrelerin elde edilmesi,

- Aramanın yapılacağı konum ile ayırt edici izin bilgilerinin bulunduğu bir parmak izi haritası (veri tabanı) oluşturulması,
- Haritada kaydedilen izler ile kullanıcının şu anki konumunun değerlendirilmek üzere karşılaştırılması (benzerlik sorgulaması)

şeklindedir.

Tez çalışmasında bu adımlara sadık kalınarak izlerin toplanması, harita oluşturulması ve değerlendirmesi safhalarında çözüm yöntemleri sunulmaktadır. Bu doğrultuda sunulan çalışma konum belirlemeye dair tüm adımları gerçekleştirerek literatüre katkı sağlamaktadır.



Jeomanyetik alan Dünya'nın her yerinde mevcut olan bir işarettir. Bu sayede bir alt yapı gerektirmeden manyetik alan değişimlerinin değerlendirilmesi ile konum belirleme işlemi yapılması mümkündür. Konuma dair bilgilerin bir harita veri tabanında tutulması bu değişikliğin takibi ve değerlendirilmesi için gerekli önemli bileşenlerdendir. Bu bölümde jeomanyetik alan, özellikleri, ölçüm ve temsil yöntemlerine değinilmiştir.

2.1 Jeomanyetik Alan

Manyetik alan terimi B manyetik alanı veya H manyetik alanı olarak anılır. Bu iki alan ifade birbirinden ayrı şeyleri ifade etse de birbirleriyle doğrudan ilişkilidir. Eşitlik (2.1)'de verilen ifade boşluk ortamında bu ilişkiyi tanımlamaktadır.

$$B = \mu_0 H \quad (2.1)$$

Burada μ_0 manyetik geçirgenlik sabiti ($4\pi \times 10^{-7} \text{Vs/Am}$), B akı yoğunluğu ve H manyetik alandır. Eşitlik (2.1)'deki ortamda bir manyetik malzeme bulunursa eşitlik (2.2)'deki gibi ifade edilir. Verilen denklemde M magnetizmalanma alanıdır.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.2)$$

Bu ifade ayrıca (2.3)'deki gibi ifade edilebilir. (2.3)'de μ_r bağıl manyetik geçirgenlik faktörüdür.

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.3)$$

Elektrik yüklü parçacıkların hareketi sonucu oluşan manyetik alan genellikle B

manyetik alanıdır ve daha yaygın kullanıma sahiptir. Manyetik alan birimi Tesla (T) veya Gauss (G) ($1 T = 10000 G$)'dur.

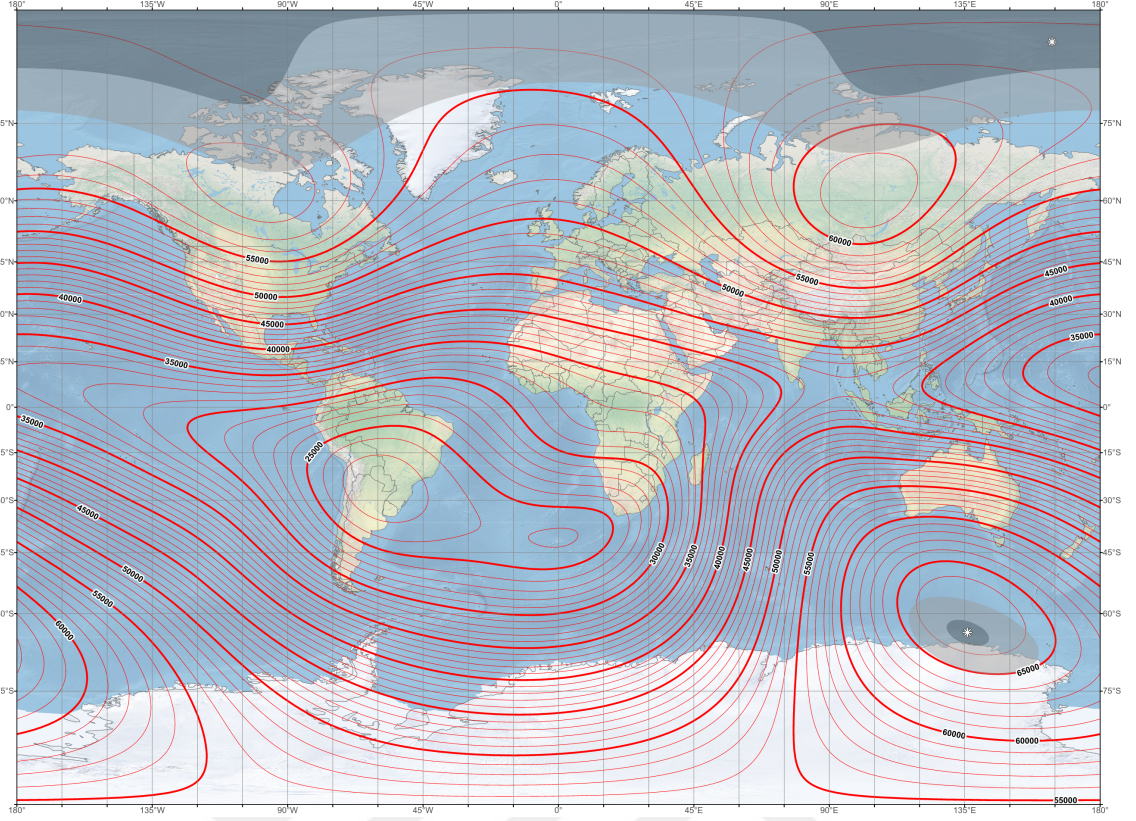
Manyetik alan "gaussmetre" veya "magnetometre" adı verilen cihazlar ile ölçülür. Gaussmetreler genellikle 1 mili tesla (mT) gibi yüksek manyetik alanı ölçerken magnetometreler 1 mT altındaki manyetik alan şiddetini ölçebilmektedir. Telefonlarda ölçüm için magnetometre bulunur ve Dünya'nın manyetik alan şiddetini ölçmek üzere konumlandırılmış 1 mT altındaki genellikle μT mertebelerine kadar ölçüm yapabilirler. Magnetometreler de toplam manyetik alanı skaler olarak ölçen ve 3 eksendeki manyetik alan şiddetini vektörel ölçen olmak üzere ikiye ayrılırlar [21]. Vektörel ölçüm yapan magnetometreler x , y ve z bileşenlerini barındıran manyetik alanı ölçerler. Magnetometrelerin performansları ve kabiliyetlerine göre örnekleme oranı, çözünürlük, sıcaklık kararlılığı, gürültü, kuantalama hatası ve toleransı gibi birçok parametre ile değerlendirilir.

Dünya'nın gözlenen manyetik alanı jeomanyetik alan olarak anılmaktadır. Dünya'nın iç katmanlarında oluşan bu manyetik alan magnetosfer adı verilen bir katmanı oluşturur ve bu katman güneşten yüksek enerjili parçacıkların gezegenimize çarpmasını engelleyerek bir manyetik koruma kalkanı olarak etki etmektedir. Gözlemlenebilir bir olgu olarak "kutup ışıkları" olarak adlandırılan doğa olayı bu manyetik koruma kalkanının işlevi sonucunda oluşmaktadır. Manyetik alan iyonosferdeki elektrik akımları ve magnetosferdeki hareket halindeki erimiş demir çekirdeğindeki elektrik akımlarından oluşmaktadır. Elektrik akımının hareketi çekirdeğin ısısı ve Dünya'nın hareketi ile bağıntılı olarak değişmekte ve bunun sonucunda da manyetik alan oluşmaktadır [22].

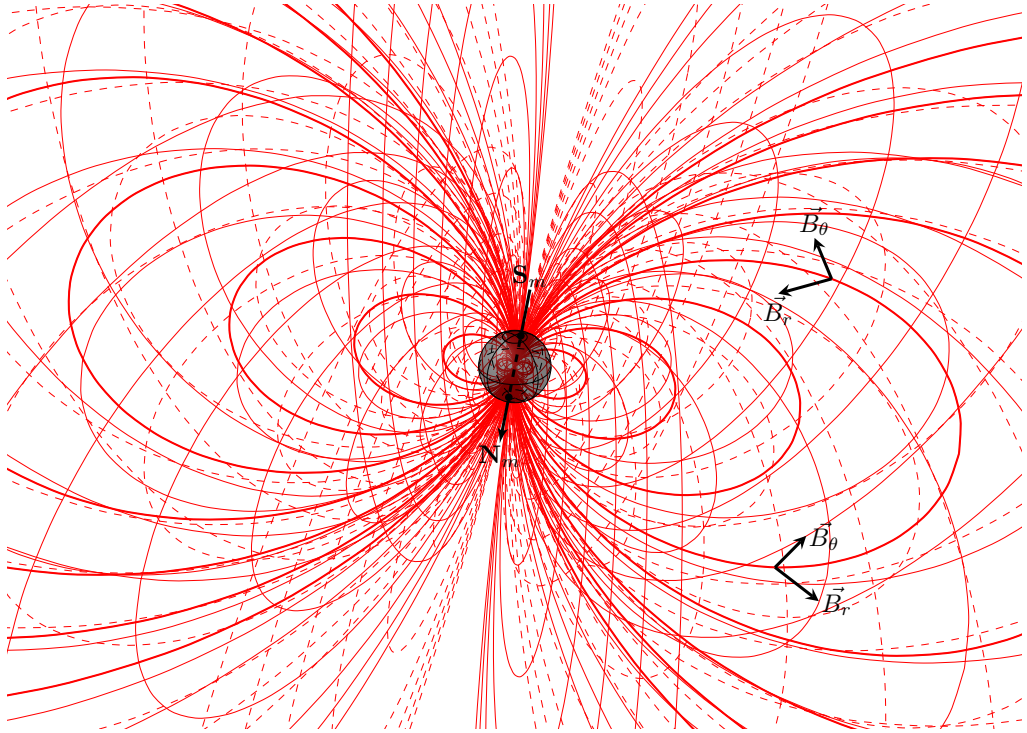
Dünya'nın yüzeyindeki manyetik alan $25\mu T$ ile $65\mu T$ arasında olup Şekil 2.1'de görüldüğü gibi bölgelere göre değişiklik göstermektedir [23]. Türkiye'nin içinde bulunduğu bölgede manyetik alanın değişimi $40 - 55\mu T$ arasındadır.

Manyetik çekirdek Dünya'nın merkezinde deniz seviyesinin yaklaşık olarak 2900km altında yer almaktadır. Bu çekirdek iç ve dış katman olarak iki parçaya bölünür. Dış tabaka erimiş halde bulunan nikel ve demirden oluşan bir katmandır. Bu iletken metal, "geodynamo" adı verilen bir süreçle Dünya'nın manyetik alanın oluşmasını sağlar. Manyetik alan Dünya'nın çekirdeğinden kabuğuna doğru uzaya yayılım gösterir. Şekil 2.2'de manyetik kuzey Dünya'nın güney kutbunda, manyetik güney de Dünya'nın kuzey kutbunda bulunmaktadır. Manyetik kutup Dünya'nın dönüş eksenine göre 11.3 derece eğimi bulunmaktadır.

Eski zamanlarda Çin ve Yunan akademisyenler manyetik malzemelerin varlığını incelemişlerdir. İlk manyetik pusulanın Çinliler tarafından keşfedilmesi 2000 yıl



Şekil 2.1 2020 WMM Jeomanyetik alanın bölgesel yoğunluk haritası [nT] [24]



Şekil 2.2 Dünya'nın çevresindeki jeomanyetik alan (- -) [25]

önceye dayanmaktadır [17]. Buna karşın matematiksel olarak jeomanyetik alanın sunulması 200 yıl öncesinde Gauss tarafından gerçekleştirilmiştir [26].

Jeomanyetizma çok eski zamanlardan beri varlığı bilinmekte ve özellikle denizciler tarafından navigasyon sistemlerinde kullanılmaktadır. Dünya'nın manyetik alanı uzun yıllar boyunca gözlenmiştir ve hep daha doğru haritalar oluşturulmak amacıyla veri toplanmıştır. Toplanan veriler de incelendiğinde Dünya'nın manyetik alanının yıl başına yaklaşık olarak 45km kaydığı yapılan araştırmalarda paylaşılmıştır [27].

Jeomanyetik alan konusunda yapılan araştırmalarda manyetik kutupların zaman içerisinde kaydığı ve hatta uzun yıllar içerisinde yer değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Dünya'nın tarihi boyunca birçok kez manyetik kutup yer değiştirmesi olduğuna dair kanıtlar bulunmaktadır. Bu bulgular magma tabası kayan ana karanın manyetik değişimleri üzerinde aynı bir manyetik kaset gibi kaydetmesi sonucunda elde edilmiştir. En son yer değiştirmenin 780 bin yıl önce olduğu kabul edilmektedir. Kutupların yer değiştirmesi aniden ve çok hızlı gerçekleşen bir süreç değildir [27].

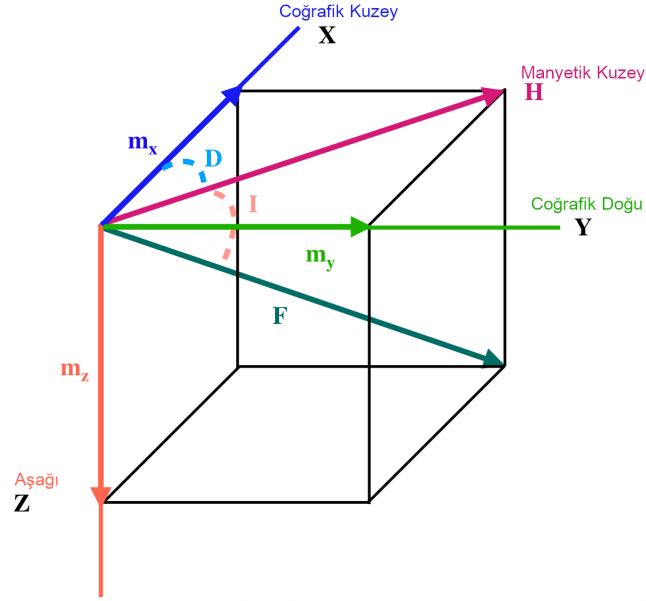
Manyetik alan değişimini modelleyen çeşitli çalışmalar literatürde yer almaktadır. Model olarak kabul görmüş en yaygın modellerden bir tanesi WMM (World Magnetic Model) olarak adlandırılan modeldir. Her 5 yılda bir çıkartılarak tutarlılığı incelenmekte ve güncellemeler yapılmaktadır [28]. Birçok mobil uygulama ve cihaz üreticisi bu modeli baz alarak jeomanyetik alana dayanan uygulamaları geliştirmektedir.

Manyetik alan 3 boyutlu bir vektördür ve birbirine dik olan 3 bileşen ile temsil edilir. Bu bileşenler X , Y ve Z bileşenleridir ve manyetik alan $\mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z)$ şeklinde bir vektör olarak ifade edilir. Şekil 2.3 manyetik alan vektörü (\mathbf{m}) ve yatay bileşeni (\mathbf{H}) gösterilmiştir. Aynı şekilde I (inclination) manyetik yatım açısı; bileşke jeomanyetik yoğunluk ve yatay düzlem arasındaki açı olarak gösterilmiştir.

Şekil 2.3 incelenecek olduğunda aşağıdaki ifadeleri çıkartmak mümkündür. Manyetik alan (F), yatay bileşen (H), sapma açısı (D) ve manyetik yatım açısı (I) sırasıyla (2.4), (2.5), (2.6) ve (2.7)'de verilmiştir. Şekil 2.3'de (CK) coğrafik kuzeyi, (M)'da manyetik kuzeyi temsilen gösterilmiş vektörlerdir.

$$F = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} \quad (2.4)$$

$$H = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \quad (2.5)$$



Şekil 2.3 Jeomanyetik alan bileşenleri

$$I = \arctan \frac{m_z}{H} \quad (2.6)$$

$$D = \arctan \frac{m_y}{m_x} \quad (2.7)$$

2.2 Jeomanyetik Alanın Konum Belirlemedeki Avantajları

WiFi, bluetooth, ses ve ses üstü sistemler ve görünür ışık kullanarak konum belirleme yapan sistemlere göre manyetik tabanlı sistemlerin birtakım avantajları bulunmaktadır. Bunlar;

- **Geçici kararlılık:** Manyetik alan ölçümünün geçici kararlılığı, önemli bir özelliktir. Literatürdeki çalışmalarda [18] ve [29]'deki bu konuya değinilmiştir. Kullanılan işaretin konuma dair bir bilgi vermesi ve bunun zamanla değişimi, sistemin kararlı çalışması için önemli bir unsurdur. Yapılan çalışmalarda manyetik alan ölçümlerinin kararlı olduğu ve farklı zamanlarda alınan ölçümlerin tutarlılıkları paylaşılmıştır. Manyetik alandaki değişimlerin sebepleri incelendiğinde Dünya'nın manyetik alanındaki değişimler ve ilgilenilen alandaki yerleşim değişikliklerinin etkisi olduğu paylaşılmıştır. Bu değişimlerin zamanla yavaş bir şekilde olduğu ve manyetik verinin kullanımının kararlı çıktılar üretebileceği gösterilmiştir. Şekil 2.4'te literatürde yer alan [6] nolu çalışmada ofis ortamı için toplanan verilerin farklı zamanlarda alınan ölçümlerle benzer

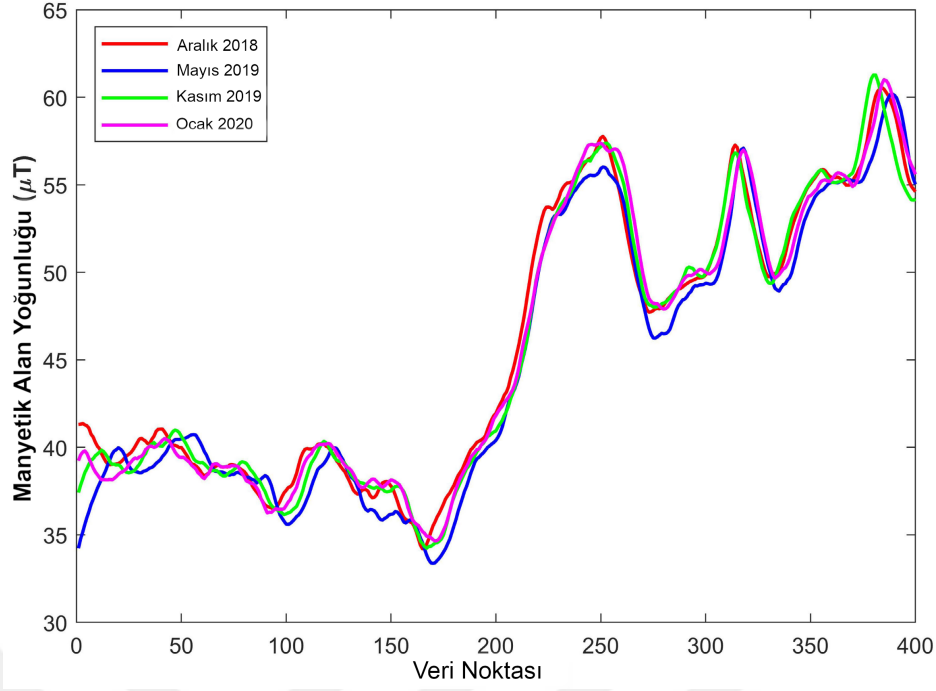
özellikler gösterdiği gözlemlenmektedir.

- **Ferromanyetik malzemelerin manyetik alanda oluşturduğu ayırt edilebilir bozucu etki:** Manyetik alanın ferromanyetik malzemelerin etkisi ile normal dağılımı bozular. Binalarda kullanılan çelik demir gibi malzemeler manyetik alanın sapmasına ve bulunduğu ortam içerisinde yoğunluğunun değişmesine sebep olur. Binalarda yapılan manyetik alan ölçümlerde bu bozunumlar gözlenmiştir [29]. Bu değişimler manyetik pusula da algılanabilir bir büyüklükte ve bulunduğu ortam içerisinde ayırt edilebilir bir özellik olarak değerlendirilebilmektedir. [18]'de manyetik alan bilgisi toplanarak değerlendirilmiş ve kapalı alanda yer alan sütun, kapı, asansör, yürüyen merdiven gibi bileşenlerin ayırt edilebilir olduğunu göstermiştir. Kapalı alana özgü bu taşınmaz bileşenler, bulunduğu ortama has bir iz bırakarak konum belirleme uygulamaları için ayırt edici bir özellik sağlamaktadır.
- **Hareket eden nesnelere karşı dayanıklılık:** Ferromanyetik özelliği bulunmayan nesnelere kapalı alandaki hareketleri manyetik alanı değiştirmez. Manyetik alan ferromanyetik malzemelerin etkisi altında değişim göstermektedir. Dolayısıyla hareket halindeki bir yayanın hareketi kapalı alan içerisinde ayırt edilebilir bir özelliktir. Aktif sinyal yayarak RF gücüne dayalı değişimi değerlendiren RF (WiFi, Bluetooth, UWB gibi) diğer teknolojilerle kıyaslandığında kapalı ortam içerisinde yer alan eşya ve duvarların zayıflamaları ön görülemez olabilmektedir. RF sinyaller yayılımı sırasında yansımalar, saçılmalar veya zayıflamalara maruz kalabilmektedir.

2.3 Jeomanyetik Alanın Ölçümlerinin Konum Belirlemedeki Zorlukları

Manyetik alana bağlı konum belirleme sistemlerinde aşağıda açıklanan zorluklar bulunmaktadır. Genel olarak konuma dair bilgilerin ayırt edici olmaması, telefonun yerleşiminden kaynaklı verilerin farklılık göstermesi, telefonda telefona değişen ölçüm hataları olarak değerlendirilebilir [30].

- **Manyetik işaretteki küçük değişimler:** Manyetik alan yoğunluğu Dünya'nın yüzeyinde $25\mu T$ ile $65\mu T$ arasında değişmektedir [23]. Kapalı bir alan içerisinde manyetik alan, ferromanyetik malzemelerden etkilenerek değişim gösterir ama bu değişim ortama bağlı olarak oldukça düşük kalabilir. Örneğin ahşap bir ev düşünüldüğüne betonarme veya çelik bir yapıya göre daha az manyetik bozunuma sebep olabilir. Ayrıca;



Şekil 2.4 Aynı yol üzerinde farklı zamanda toplanan manyetik veriler [6]

- Çerçeve (Frame) dönüşümleri:** Jeomanyetik alan Dünya'ya göre bir navigasyon çerçevesi tanımlar. Ancak kapalı alan için hareket yönüne bağlı ve/veya bulunduğu binaya bağlı bir çerçeve tanımlamak gerekmektedir. Harita referansı ile kullanıcı elindeki mobil cihazın aynı çerçeve üzerinde incelenmesi gerekmektedir. Jeomanyetik alanın vektör uzayı $\mathbf{m}^n \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ ve mobil cihazın vektör tanımı da $\mathbf{m}^b \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ olmak üzere mobil cihazın baş açısı ve hareket doğrultusu rastgele olabilmektedir. Bu sebeple, aynı noktada farklı yönlerde veri toplayarak bir harita veri tabanı oluşturmak gerekmektedir. Bu veri tabanı oluşturulurken; m^b mobil cihaz vektörünün m^n navigasyon çerçevesine dönüşümü sağlanmalıdır. Çerçeve dönüşümü sağlamak için ivme sensörü, dönel ölçer gibi diğer sensörlerden de yararlanarak hesaplamalar gereklidir. Yeni sensörlerin kullanımı bu hassas dönüşüm sırasında hataların artmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple bu dönüşümü kolaylaştırmak için manyetik alanın yatay ve dikey bileşenleri veya bileşke vektör değerlendirilerek haritalar oluşturulmaktadır.
- Sadece manyetik alan yoğunluğu kullanımı:** Mobil cihazın yönelim doğrultusu farklı olduğunda $\mathbb{R}^{3 \times 1}$ 3 boyutlu manyetik alan vektörün kullanımı için mobil cihazın jeomanyetik alan çerçevesine dönüşümünün tutarlı olmaması bir zorluk oluşturmaktadır. Yönelim bilgisi kullanılarak çerçeve dönüşümü yapılır ve yönelim bilgisi için manyetik alan bileşke vektörünün doğru hesaplanması gerekmektedir. Kapalı alan içerisinde manyetik alan bulunduğu ortama bağlı olarak değişir ve bu sebeple yönelim hesaplamak mümkün

Tablo 2.1 Mobil cihazlarda kullanılan farklı üreticilere ait sensörler [30]

Mobil Cihaz	Manyetik Sensör	Hassasiyet
Xiaomi Mi A1	AKM AK09918	$0.25\mu T/\text{LSB}$
LG Nexus 5X	Bosch BMM150	$0.3\mu T/\text{LSB}$
Samsung Galaxy S8	AK09916C	$0.15\mu T/\text{LSB}$
Oneplus 3	MEMSIC MMC3416PJ	$0.05 - 0.2\mu T/\text{LSB}$
Google Pixel 3	LIS2MDL	$0.0015\mu T/\text{LSB}$
iPhone7	Alps HSCDTD088A	$0.15\mu T/\text{LSB}$

olmayabilir. Sadece manyetik alan kullanarak yönelim bilgisine ihtiyaç duymadan veri işlenecek olduğunda $|\mathbf{m}^b|$ manyetik alan büyüklüğü skaler olarak ele alınmalıdır. Bunun yanında bölgeden bölgeye ayırt ediciliğin farklılaşabileceği dikgen bileşenlerin bilgileri kaybedilmiş olunur. Bu durum konum belirleme hassasiyeti üzerine olumsuz bir etki göstermektedir.

- **Farklı model mobil cihaz kullanımı:** Farklı model cihazlarda da aynı sonucu veren bir konum belirleme sistemi tasarımı önemlidir. Cihazdan cihaza değişen durumların etkilerin göz ardı edilmemesi de bu sebeple önem arz etmektedir. Mobil cihazlarda farklı üreticilere ait manyetik sensörlerin kullanılması sonucunda ölçüm hassasiyeti ve ölçüm gürültüsü açısından farklılıklar oluşmaktadır. Örnek olması açısından mobil cihazlara ait farklı sensörlerin hassasiyet bilgileri Tablo 2.1’de verilmiştir. Konum belirleme için geliştirilen yöntemlerde manyetik alanın farklı noktalarındaki değişimlerini gözlemleyerek veri katarı üzerinde benzerlik değerlendirmesi yapan algoritmalarda bu durumun üstesinden gelmek mümkündür. Ölçümün tek bir noktadan alınması yerine yol boyunca birden çok ölçüm alarak bir yol boyunca değişimin değerlendirilmesi konum belirleme açısından da daha tutarlı sonuçlar vermektedir [29] ve [31].

2.4 Manyetik Sensörler İçin Ölçüm Modeli

Manyetik sensörler manyetik alan yoğunluğunu X , Y ve Z eksenlerine göre ölçümünü yapmaktadır. Jeomanyetik vektör uzayı $\mathbf{m}^n \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ ile temsil edilmektedir. Navigasyon çerçevesi Dünya’nın yer çekimi ve yerel manyetik alana hizalanmıştır. $\mathbf{m}^b \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ vektörü sensör ölçüm çerçevesini temsil etmektedir. $\mathbf{R}^{bn} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ rotasyon matrisi navigasyon çerçevesinden ölçüm yani mobil cihaz çerçevesine dönüşümü temsil etmektedir. Eşitlik (2.8)’de verildiği gibi ölçümün navigasyon çerçevesine dönüşümünü sağlamaktadır.

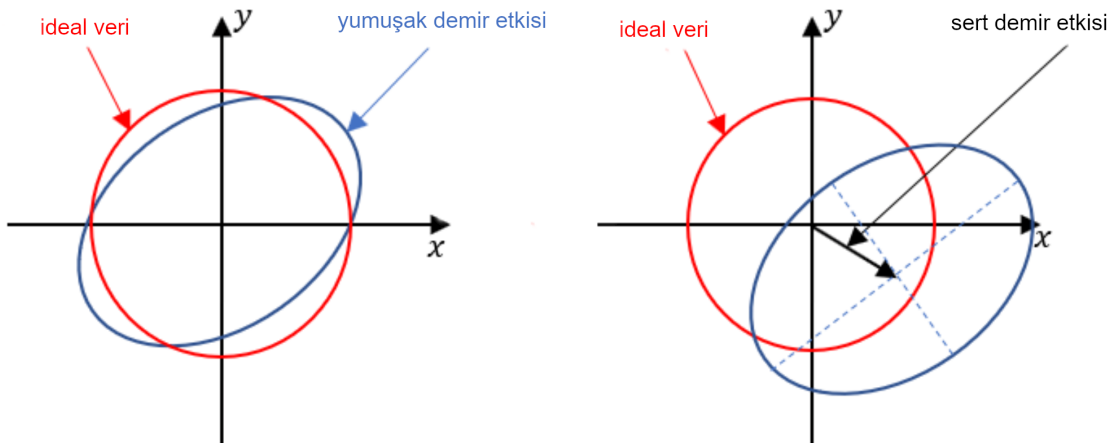
$$\mathbf{m}^b = \mathbf{R}^{bn} \mathbf{m}^n \quad (2.8)$$

Dünya'nın manyetik alanının bozunuma uğramadığı bölgelerde WMM (World Magnetic Model) kullanılarak manyetik kuzeyin bulunması mümkündür. Manyetik kuzey Şekil 2.3'de verildiği gibi yatay bileşen hesaplanarak bulunur. Açık alanlarda jeomanyetik alan bozunumu çok az veya yok denecek kadar az olabilmekte ve WMM gibi geliştirilmiş modeller ile manyetik kuzey tutarlı bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Kapalı alanın manyetik alan üzerindeki bozucu etkisinin olması, kapalı alandaki yapıların manyetik alan üzerinde bozunumlara sebep olduğu durumlarda bu yatay bileşen manyetik kuzey olarak herhangi bir noktayı işaret edebilir. 3-boyutlu manyetik alan ölçümü alındığında bu ölçüm manyetik akı yoğunluğu yarıçap olmak üzere o noktayı çevreleyen bir küre olarak temsil edilir. Gürültü kaynakları manyetik etkileşim ve bozucu manyetik alan bu ölçümü etkileyen faktörlerdir. Manyetik alanın bozucu etkileri çevresinde bulunan nikel demir gibi malzemelerin oluşturduğu bozucu etki yumuşak demir (soft iron) ve ölçüm merkezinin kayması durumunda oluşan etkiye de sert demir (hard iron) etkisi olarak anılır ve sırasıyla $\mathbf{A}_{si} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ve $\mathbf{b}_{hi} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ şeklinde ifade edilmektedir [32]. Şekil 2.5'de bu bozunumları temsil eden bir görsel verilmiştir.

Sert ve yumuşak demir etkileri dikkate alınarak (2.9) denklemiyle manyetik ölçüm modeli temsil edilebilmektedir.

$$\mathbf{m}^b = \mathbf{A}_{si} \mathbf{R}^{bn} \mathbf{m}^n + \mathbf{b}_{hi} \quad (2.9)$$



Şekil 2.5 Sert ve Yumuşak Demir Bozunumları [33]

Sert ve yumuşak demir hatalarının kalibrasyonu için ayrıntılı bir prosedür ve analiz [32] çalışmasında paylaşılmıştır. Önerilen yöntemde dönel tabla üzerine

yerleştirilen bir magnetometre sabit bir manyetik alan altında sanal bir küre yüzeyini tarayacak şekilde veriler toplanır ve bu veriler kullanılarak bir ağırlıklandırma matrisi oluşturulur.

Manyetik sensörde ölçüm hataları ölçekleme faktörü \mathbf{S} , aksenal uyumsuzluk \mathbf{M} ve sensör dengelemesi \mathbf{b}_{so} ile temsil edilmektedir ve her bir sensör için ayrı parametreler ele alınır.

- $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ her bir eksenin referans değeri ölçekleme oranını temsil etmektedir.

$$\mathbf{S} = \text{diag}([s_x \ s_y \ s_z]) \quad (2.10)$$

Eşitlik (2.10)'da s_x , s_y ve s_z değerleri x , y ve z eksenlerine ait ölçekleme oranlarıdır.

- $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ aksenal uyumsuzlukları temsil eder ve (2.11)'deki gibi temsil edilir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{xx} & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & m_{yy} & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & m_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

- Eşitlik (2.12)'de verilen $\mathbf{b}_{so} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ vektörü her bir eksen için kayma düzeltmesini ifade etmektedir.

$$\mathbf{b}_{so} = [b_{so_x} \ b_{so_y} \ b_{so_z}]^T \quad (2.12)$$

- (2.9) ifadesindeki manyetik ölçüm modeli kullanılarak kalibrasyon parametreleri \mathbf{S} , \mathbf{M} ve \mathbf{b}_{so} eklendiğinde eşitlik (2.13) elde edilir.

$$\mathbf{m}^b = \mathbf{S} \times \mathbf{M} \times (\mathbf{A}_{si} \mathbf{R}^{bn} \mathbf{m}^n + \mathbf{b}_{hi}) + \mathbf{b}_{so} + \varepsilon \quad (2.13)$$

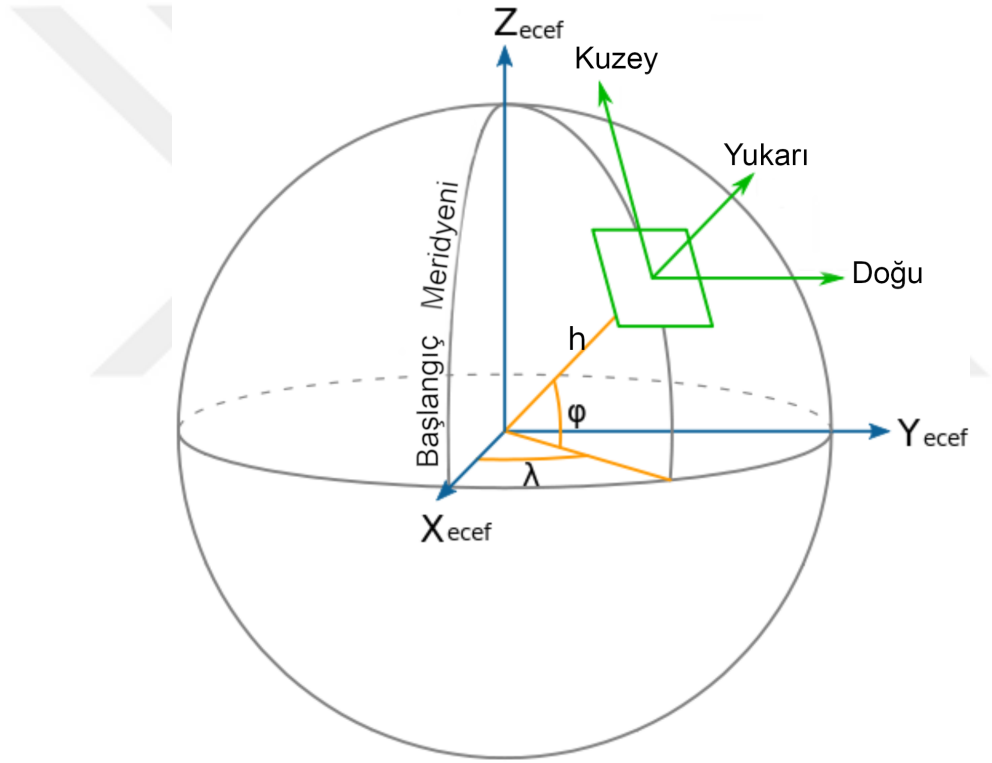
2.5 Yaygın Kullanılan Koordinat Sistemleri

Kapalı alan navigasyon sistemlerinde yaygın kullanılan koordinat sistemlerini aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz

- Dünya merkezli sabit koordinat sistemi (ECEF - Earth-centered earth-fixed)
- Jeodezik koordinat sistemi

- Yerel Doğu-Kuzey-Yukarı (ENU - East North Up) koordinat sistemi
- Mobil cihaz koordinat sistemi

Dünya merkezli sabit koordinat sistemi Dünya'nın merkezini orijin kabul eden kartezyen koordinat sistemidir. Şekil 2.6'de Jeodezik, ECEF, NEU koordinat sistemlerine ait tanıtıcı bir görsel verilmiştir. Görsel incelendiğinde ECEF için Z eksenini kuzey kutbunu, X eksenini ekvator ile başlangıç meridyeninin kesişim noktasını baz almaktadır. Y eksenini X ve Z eksenlerine dik olacak şekilde tanımlanmıştır. Sonuç olarak bu eksenler Dünya ile birlikte dönmektedir bu sebeple Dünya merkezli sabit koordinat sistemi (ECEF) olarak adlandırılmaktadır. Dünya üzerindeki bir nokta denklem (2.14)'de verilen şekilde temsil edilmektedir.



Şekil 2.6 Jeodezik, ECEF, NEU koordinat sistemleri [34]

$$\mathbf{P}_{ecef} = [X_{ecef}, Y_{ecef}, Z_{ecef}]^T \quad (2.14)$$

Jeodezik koordinat sistemi, GNSS tabanlı navigasyon sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Dünya'nın merkezini baz alan bu sistemde bir nokta enlem (ϕ), boylam (λ) ve yükseklik (h) olarak ifade edilmektedir. Enlem; ekvator düzlemi ile istenilen noktadan geçen elipsoidal normali arasındaki açıyı (-90° ile 90° arasında) ifade etmektedir. Boylam; başlangıç meridyeni ölçüm noktası arasındaki açıyı (-180°

ile 180° arasında) tanımlamak için kullanılır. Yükselti ise Dünya'nın merkezine olan uzaklığı baz alan bir büyüklüktür.

Dünya Jeodezik Sistemi WGS-84 (World Geodetic System 1984) [35] Dünya'nın yüzeyini basık bir elipsoidal olarak ele alır ve ekvatorial çapını a olarak tanımlar. Elipsoidal bir elipsin kısa eksenini üzerinde dönüşümüyle elde edilen 3 boyutlu bir yüzey tanımıdır. elipsoidalın şekli ekvatorial çapı a , kutup çapı b , düzleştirme faktörü f ve ilk dış merkezliliği (eccentricity) karesi e ile tanımlanır.

WGS-84'e göre bu parametreler sırasıyla aşağıda (2.15), (2.16), (2.17) ve (2.18) ifadeleri ile verilmiştir.

- Ekvatorial çapı

$$a = 6378137m \quad (2.15)$$

- Düzleştirme faktörü

$$f = 1/298.257223563 \quad (2.16)$$

- Kutup çapı

$$b = a \times (1 - f) = 6356752.3142m \quad (2.17)$$

- İlk dış merkezliliği

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 6.69437999014 \times 10^{-3} \quad (2.18)$$

Jeodezik koordinat sistemine göre bir noktanın pozisyonu eşitlik (2.19)'daki gibi verilmektedir. Burada ϕ jeodezik enlem, λ jeodezik boylam ve h 'da yüksekliği ifade etmektedir.

$$\mathbf{P}_{geo} = [\phi, \lambda, h]^T \quad (2.19)$$

Jeodezik koordinat sisteminden Dünya merkezli sabit koordinat sistemine dönüşüm için eşitlik (2.20)'de verilen ifade kullanılır.

$$\mathbf{P}_{ecf} = \begin{pmatrix} X_{ecf} \\ Y_{ecf} \\ Z_{ecf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N(\phi) + h) \cos \phi \cdot \cos \lambda \\ (N(\phi) + h) \cos \phi \cdot \sin \lambda \\ \left(\frac{b^2}{a^2} N(\phi) + h \right) \sin \phi \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Burada $N(\phi)$ dikey eğrilik çapı olarak tanımlanır ve denklem (2.21)'de verilmiştir.

$$N(\phi) = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (2.21)$$

a ve b sırasıyla ekvatorial ve kutup çapıdır. e , eşitlik (2.18)'de verilen ilk dış merkezliliğidir. (2.21)'de verilen $N(\phi)$ elipsoidal normalinin Z eksenine olan uzaklığıdır.

Doğu-kuzey-yukarı (ENU - East North Up) koordinat sistemi Dünya yüzeyine sabit olarak tanımlanmış bir koordinat sistemidir. WGS-84 [35] elipsoidal modeli baz alınarak oluşturulmuştur. Şekil 2.6'da verildiği gibi X eksenine Dünya'nın dönüş yönüne göre batıyı, Y eksenine Dünya'nın kuzey kutbunu, Z eksenine ise Dünya yüzeyinden dışarı doğru referans alınan eksenleri tanımlamaktadır. ECEF sisteminde ENU sistemine dönüşüm için (2.22) verilen ifade kullanılır.

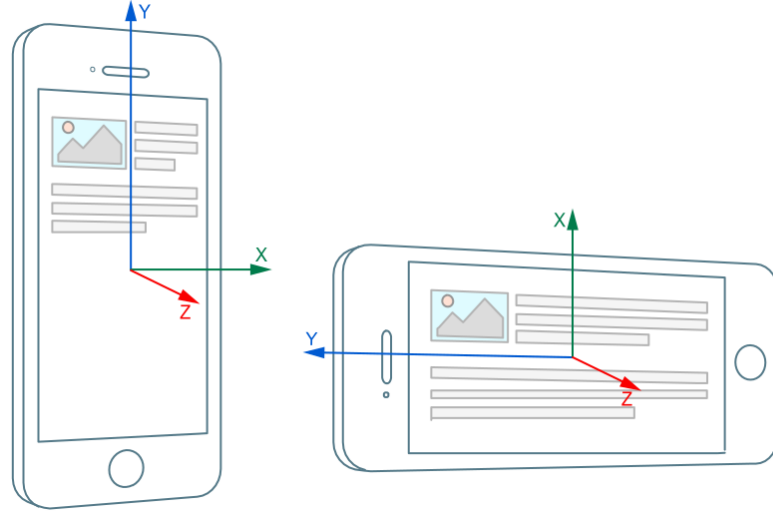
$$\mathbf{P}_{ENU} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ \cos \phi \cos \lambda & \cos \phi \sin \lambda & \sin \phi \end{bmatrix} \times \mathbf{P}_{ecef} \quad (2.22)$$

Mobil cihaz koordinat sistemi Şekil 2.7'de verildiği gibi cihazın dikey veya yatay kullanımında aynıdır ve mobil cihaza karşıdan bakarken X eksenine sağ taraftaki uzun kenarı, Y eksenine üst taraftaki kısa kenarı ve Z eksenine de cihaz ekranından yukarıya doğru referans alınarak tanımlanmıştır. Bu eksenler çevresindeki dönüşler sırasıyla yatış (roll), tırmanma (pitch) ve sapma (yaw) olarak tanımlanır ve bu dönüşlere bağlı olarak referans koordinat sistemi oluşturulur. Konum belirleme uygulamaları için telefonun ölçüm aldığı koordinat sisteminin Dünya'nın koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir.

2.6 Manyetik Sensör Ölçüm Hataları

Dünya'nın manyetik alanının açık alanlarda hızlı bir şekilde değişmediği bilinen bir durum olmasına karşın jeomanyetik alan ölçümünde kullanılan magnetometrelerin Bölüm 2.4'de verildiği üzere sert ve yumuşak demir kalibrasyonu, kayma hatası, eksen uyumsuzlukları gibi birtakım ölçme hataları bulunmaktadır ve bu ölçüm hataları sensörden sensöre de değişen etkiler oluşturmaktadır. Manyetik sensör modeli dikkate alındığında ferromanyetik malzemelerin sensöre çok yakın yerleştirilmesi veya genellikle magnetoresistif yapılar kullanılarak geliştirilen manyetik sensörlerin sıcaklıktan etkilenmesine bağlı olarak ölçüm hataları görülebilmektedir.

Çevresel koşullardan etkilenme: Üreticiler ferromanyetik malzeme bozunumu



Şekil 2.7 Mobil cihaz koordinat sistemi [36]

dışındaki hatalar için mobil cihazlarda önlemler alarak sağlanan yazılım (Android [37] veya IOS [38]) ile birlikte çeşitli ölçüm hatalarını gidermektedirler. Ancak bu ölçüm hataları magnetometrenin sıcaklık veya kayma hataları için üretici tarafından sağlanan çözümler iken mobil cihaz çevresindeki ölçüm sırasındaki ferromanyetik etkilere çözüm olamamaktadır.

Ölçüm alanındaki diğer nesnelere etkilenme: Literatürde yer alan çalışmalarda telefonun yakın alanı içerisinde çeşitli eşyaların etkileri incelenmiş ve yapılan çeşitli testlerle sonuçları paylaşılmıştır. 2019 yılında yayınlanan [39] nolu çalışmada kapalı alan içerisinde yer alabilecek çeşitli eşyaların mobil cihaz üzerindeki etkileri mesafeye göre incelenmiş ve değişimler manyetik alan ölçümündeki değişimler % olarak paylaşılmıştır. Çalışmaya göre 1m uzağına yerleştirilen telefona 3cm, 5cm ve 10cm yakınına yaklaştırılan anahtar, çalışan bir dizüstü bilgisayar, çalışan bir mikrodalga fırın yaklaştırılarak değişimler gözlenmiştir. En düşük değişim % 0.7 ile anahtarda olurken en yüksek değişim %5.2 ile mikrodalga fırında gözlenmiştir [39]. Buna karşın ferromanyetik olmayan nesnelere yapılan testlerde değişimin olmadığı bilinmekle birlikte insanın magnetometre üzerine etkisi bir test düzeneği ile denenmiş ve bir etkisinin olmadığı raporlanmıştır.

Diğer bir önemli unsurda ölçüm alınan magnetometreler arasındaki farklılıklardır. Birçok mobil cihaz üreticisi farklı marka ve model sensörleri kullanmaktadır ve bu sensörler arasında hassasiyet ve ölçümler arasında farklılıklar gözlemlenebilmektedir. Literatürde farklı mobil cihazlarla yapılan testlerde ölçümler arasında farklılıklar gözlemlenmekle birlikte işaretin zarfının benzer olduğu görülmektedir [15]. Cihazlar farklılıklarından kaynaklanan bu tutarsızlıkları azaltmak için literatürde izlenen yol mobil cihazın kalibre edilmesi [40], birden çok noktada ölçüm almak [41] veya birden

çok cihaz ile manyetik veri tabanını oluşturmak [42] gibi çözümler bulunmaktadır.

Ölçülen manyetik alanın çevresel koşullar, bulunduğu ortamdaki nesnelere ve üreticiden üreticiye değişen tepkilerinin dışında eğer bir yaya takip sistemi için kullanılacaksa ölçüm alınacağı yüksekliğin de önemli etkisi olduğuna dair literatürde çalışmalar mevcuttur [41], [43]. DAME [44] olarak isimlendirilen çalışmada manyetik sensör verisinin yüksekliğe veya farklı mobil cihazlara göre değişimi incelenerek çözüm önerisi olarak verinin filtrelenmesine yönelik yöntemler incelenmiştir. Verinin filtrelenmesi ile elde edilen manyetik parmak izinin geliştirilmiş bir harita için uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Wavelet filtreleme, Savitzky–Golay filtresi, kayan pencereli filtreleme, Butterworth filtreleme gibi farklı filtreler ile elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

Bir diğer yöntem de jeomanyetik işaretin öznitelik vektörleri haline getirilerek geliştirilmesi bu konuda çözüm olabilmektedir. Literatürde AMID [45] jeomanyetik işaretin değişim eğilimlerine bakarak (artan, azalan, iç bükey veya dış bükey) konum izleri olarak ele almaktadır. Benzer şekilde bir diğer uygulama mPILOT [46] BG (Binary Grid) gibi bir yöntem kullanarak yine jeomanyetik işaretin değişimlerine bağlı olarak öznitelik ve konum izi çıkartmaktadır. Sekans/katar şeklinde konum belirleme yapan sistemlerde manyetik sensörün ölçüm hassasiyetine bağlı hataların etkisi azalmaktadır.

Jeomanyetik alan sinyali kullanarak konum belirleme yapan çalışmalar incelendiğinde birçok farklı yöntem kullanıldığı görülmektedir. Bu bölümde jeomanyetik alan özelliklerini kullanarak konum belirleme yapan sistemlere literatürden örnekler, kullandıkları yöntemler ve başarımlarına dair sonuçlar paylaşılmıştır.

3.1 Jeomanyetik Sinyal Tabanlı Takip Yöntemleri

Jeomanyetik alan verisine dayalı konum belirleme sistemlerinde konuma dair manyetik alan izlerinin ayırt edici özelliğinden yararlanılır. Bu konuda yapılan çalışmaların tamamında bir konuma dair bilgiler daha önceden veya sistem işletilirken toplanır ve daha sonra bu veriler değerlendirilerek konum belirleme işlemi yapılır. Temelde yapılan çalışmaları harita veri tipi ve bu verinin sorgulanması yöntemlerine göre sınıflandırmak mümkündür.

Bölüm 2’de değinildiği üzere; Dünya’nın manyetik alanı $25\mu T$ ile $65\mu T$ arasında değişmektedir. Jeomanyetik alanın konuma göre değişimi bilindiğine göre bir katar olarak ele alındığında bu ardışıl veriler değerlendirilerek konum belirleme yapılabilmektedir. Verilerin hareket halindeki bir kişiden toplanması gerekmektedir. Hareket halindeki bir kişiden toplanan veri ardışıl olarak o yol boyunca ayrıştırılabilir bir değişimi gösterebilir. Hareket halinde olmayan bir kişinin verisi incelendiğinde bu sabit değerlerin ilgilendirilen alan içerisinde birden çok noktada olabileceği görülmektedir.

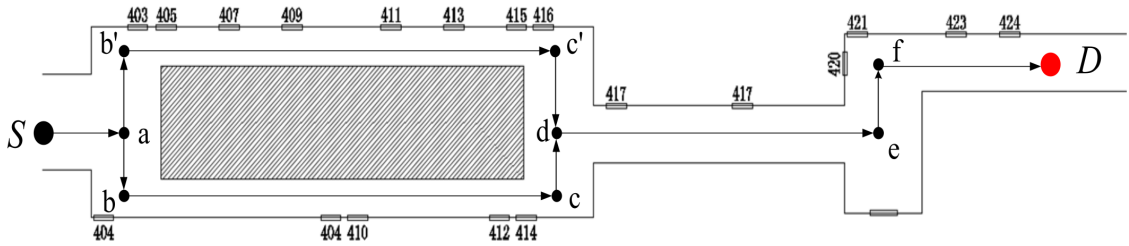
Harita yapısı ilgilendirilen alanın özelliklerini taşımakla birlikte belli kabuller baz alınarak tanımlanmaktadır. Harita kapalı alanın içerisinde dolanım sağlanan yerlere dair verileri içerir. Harita için literatürdeki kaynaklarda farklı kabuller mevcuttur. Bu sebeple hareket halindeki kişi için bir yol yoğunlukla bir koridor veya odanın içerisinde herhangi bir nokta gibi farklı çözünürlükte haritalar oluşturmak mümkündür. Harita oluşturma pratikte zaman alıcı ve maliyetli bir işittir. Harita tanımına bağlı olarak kapalı alanı temsilen örneğin bir ev için oluşturulmuş ise hangi odada olduğu veya odanın neresinde olduğu haritanın manyetik izleri nasıl

temsil edildiğine bağlıdır. Bu durumda çözünürlüğe bağlı bir algoritma kullanımı gerekmektedir.

Haritalar kapalı alanın 2 boyutlu iz düşümü olabileceği gibi 3 boyutlu haritalar da tanımlamak mümkündür. Örneğin bir drone'nun serbest dolaşımı için harita tanımlamak gerekiyorsa bu harita 3 boyutlu olmalıdır ancak birçok kapalı alan konum belirleme uygulamasındaki amaç kullanıcının 2 boyutlu uzayda bulunduğu noktanın belirlemesidir. Bu sebeple literatürdeki birçok çalışmada yaygın olarak 2 boyutlu haritalar tanımlanmıştır.

3.2 Literatürdeki Çalışmaların Özeti

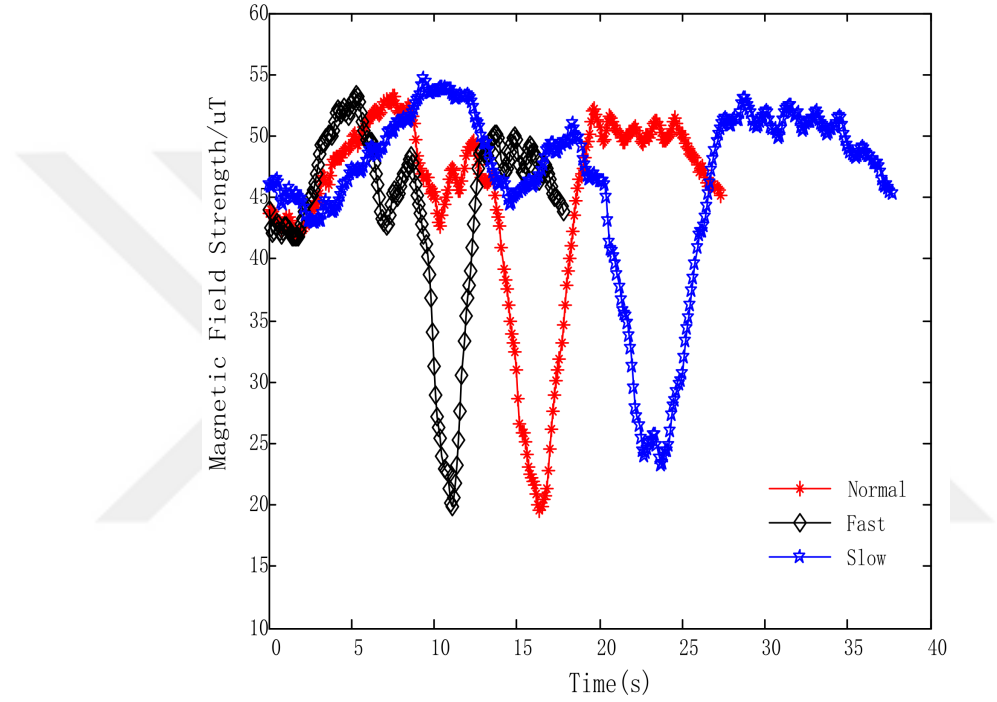
MeshMap [47] olarak adlandırılan çalışmada harita oluşturmak için kitle tabanlı bir çözüm önerilmiştir. Önerilen yöntemle kullanıcılardan toplanan veriler ile zenginleştirilen manyetik harita veri tabanı yine kullanıcılara sunulmakta bu şekilde manyetik alanın düşük orandaki değişimleri veya harita oluşturulurken meydana gelebilecek problemlerin azaltılması hedeflenmiştir. Harita oluşturulurken küçük parçalara bölebilmek ve arama uzayını azaltmak amacıyla çizge tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerde de yayanın koridorlar içerisindeki hareketi dikkate alınmış ve dönüş noktaları koridorun başlangıç ve bitiş noktası olarak ele alınmıştır. Dönüş noktalarını bulabilmek için dönel ölçerin 2sn'lik periyod içerisinde açı değişimi incelenmiştir. Eğer açı değişimi 30 derece üzerinde olursa bu bir dönüş olarak kabul edilerek; koridor başlangıç ve bitiş noktaları olarak ele alınmaktadır. Şekil 3.1'de MeshMap de tanımlanan örnek bir harita görseli paylaşılmıştır. DTW tabanlı esnek arama algoritması ile çözüm önerisi sunulan çalışmada esnek arama yönteminin verimliliğini artırmak için çizgeye dayalı bir harita veri tabanı tanımlanmıştır. MeshMap'de konum belirleme ve kullanıcıyı yönlendirmek için geliştirilmiş bir mobil uygulama da mevcuttur. çizge üzerinde temsil edilen manyetik alan veri tabanı sayesinde koridor değişimlerinde arama uzayı küçültülerek önerilen yöntemin geniş alanlarda da uygulanabilir olması sağlanmıştır.



Şekil 3.1 MeshMap'de tanımlanan örnek harita görseli [47]

MeshMap [47] isimli çalışmada farklı hızlarda ilerleyen kullanıcıların verilerini

karşılaştırdığında yavaş, orta ve hızlı ilerleyen kullanıcılar için Şekil 3.2’de verildiği gibi toplanan verinin katar uzunlukları farklı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu verilerin harita ile karşılaştırılabilir olması birbirine hizalanması gerekmektedir. Çoğunlukla bu hizalama işini literatürde birçok çalışma DTW’in esnek arama özelliğinden yararlanarak çözmeyi önermiştir. Bu hizalanma için ne kadar farklı ise katar boyutları o kadar fazla döngü ile bu eşleme yapılır ve bu da işlem yükünü ve konum belirleme cevabını geciktirmektedir. MeshMap hizalama işlemi için 1 Hz, 5 Hz ve 10 Hz örnekleme periyodlarında veriler toplanarak veya örnek azaltımı ile hizalanması hedeflenmiştir.

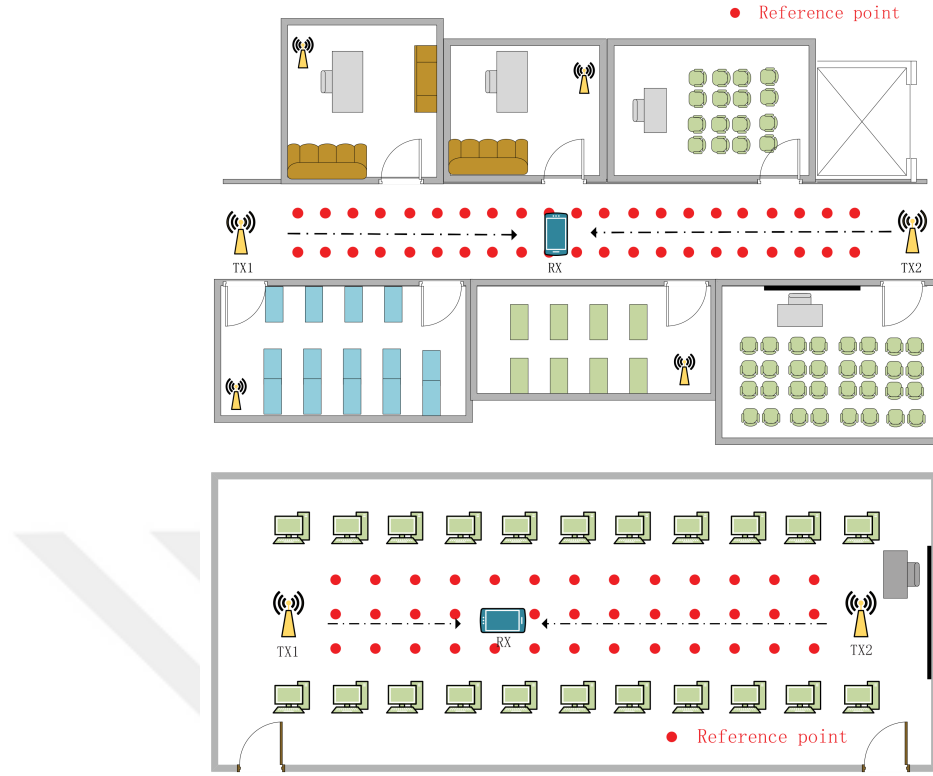


Şekil 3.2 Farklı hızdaki kullanıcılardan toplanan manyetik sensör verisi [47]

MeshMap isimli çalışma DTW kullanmakta ve işlem yükünü hafifletmek için bu algoritmayı kısa sürelerdeki verilerin analizi (2sn’lik pencereler), daha düşük örnekleme hızlı ve farklı hızdaki yayaların verilerinin hizalanması için yayanın hızına bağlı değişen örnekleme frekansı kullanarak çözüme ulaşmayı hedeflemiştir.

CSI(Channel State Information) ve MFS (Magnetic Field Strength) terimlerinin kısaltmaları kullanılarak isimlendirilen CSMS [48] çalışması, jeomanyetik alan şiddeti ve WiFi sinyallerini kullanarak kapalı alana dair parmak izlerini takip ederek konum belirleme işlemini yapmaktadır. Harita oluşturma ayrı bir faz olarak yapılmış ve WiFi ile jeomanyetik işaret verileri toplanarak jeomanyetik alan ve WiFi için parmak izi haritası oluşturulmuştur. Harita veri tabanı WiFi sinyallerinin yanında, jeomanyetik alanın bileşke vektörü baz alınarak toplanmış ve bir yol hattı boyunca ilerleyen yayanın verisi baz alınmıştır. Çalışma ayrıntısında yayanın yürüme hızına bağlı bir değişim

dikkate alınmadan harita verisi toplanmıştır.



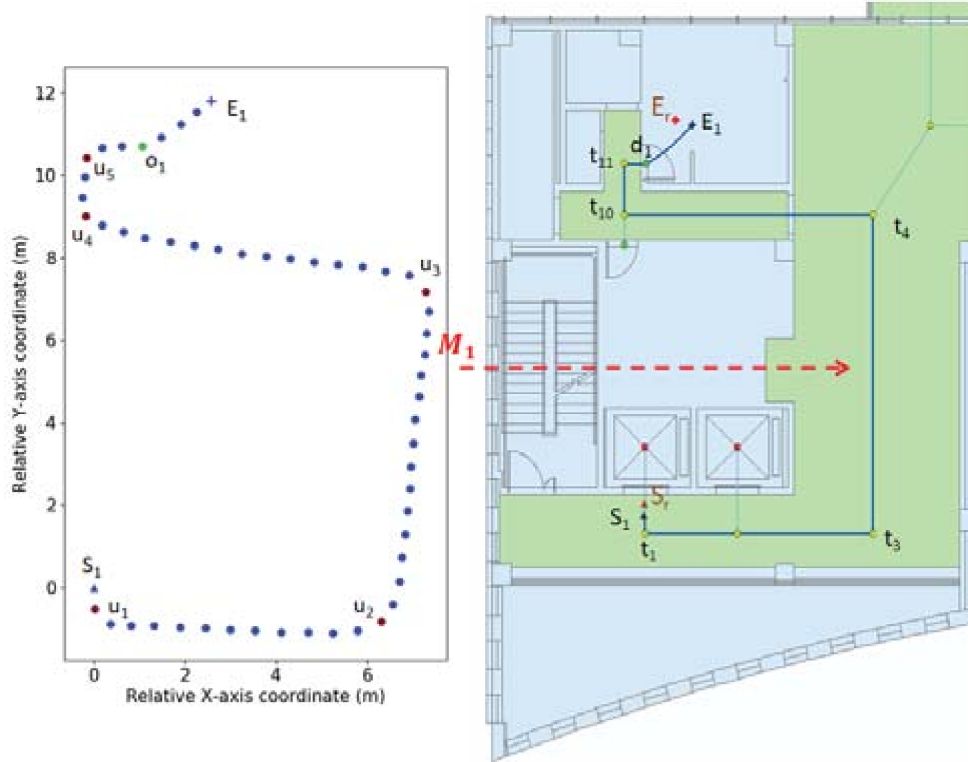
Şekil 3.3 CSMS test ortamı görseli [48]

CSMS isimli çalışmada Şekil 3.3'de verilen referans noktalar arasındaki mesafe 1.2m olacak şekilde WiFi sinyali toplanmıştır. Manyetik alan veri tabanı ise bir yol boyunca yayanın sabit hızlı hareketi ile toplanan jeomanyetik verilerden oluşmaktadır. Çalışmada L-DTW (Local Dynamic Time Wrapping) adı verilen bir algoritma ve M-KNN (Multi Model KNN) algoritması önerilmiştir. L-DTW ile jeomanyetik alana dair izler ve M-KNN ile WiFi sinyaline bağlı izler takip edilerek harita eşleştirme yapılmaktadır. L-DTW ile tüm alan içerisinde benzerlik araması yapmak yerine WiFi ile elde edilen daha dar bir alan için manyetik iz eşleşmesi yapılarak işlem yükünü hafifletmiştir.

Jeomanyetik işaret dizisi üzerinde benzerlik araması yapıldığı için yayanın hareketliliği test edilmiştir. WiFi ile konum belirleme yapılırken jeomanyetik izler yardımcı olarak kullanılmaktadır. CSMS [48]'de rapor edilen konum belirleme hatası 2m'nin altındadır.

S.Guo [49] çizge bazlı manyetik veri tabanı haritası ile konum belirleme için çalışmalarını paylaşmıştır. Belirtilen çalışmada katların değişimini anlamak için ivme sensörü, koridor ve dönüşleri algılamak için de dönel ölçer kullanılması önerilmiştir. Kapalı alana dair büyük harita küçük parçalara ayrılmış ve manyetik veri tabanı üzerindeki arama uzayı azaltılarak algoritma performansı artırılmıştır.

S.Guo [49] çalışmasında jeomanyetik alan işaretleri ve hareket sensörlerini kullanmıştır. Harita veri tabanı eğitim fazında toplanan veriler ile oluşturulmaktadır. Adım uzunluğu toplanan veri ile çıkartılıp PDR bazlı bir veri birleştirme algoritmasında kullanılmıştır. Bu algoritma ile veriler yol boyunca 50Hz'de örneklenecek harita oluşturulmuştur. Tek bina ve tek bir mekide bu ölçümler alınmaktadır. Harita üzerinde benzerlik araması için yaygın olarak kullanılan DTW yöntemi tercih edilmiştir. Veri toplanan alan ve test sonucu elde edilen konum bilgileri Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 S.Guo [49] çalışmasına dair test ortamı görseli

[49] nolu çalışmadaki en büyük değer önerisi haritayı hareket verilerini değerlendirerek parçalara bölmesi ve bu parçaları çizge üzerinde temsil etmesi olarak sunulmuştur. Raporlanan konum hassasiyeti 1m'nin altındadır. Harita eşleme yöntemine dair manyetik verinin uzunluğu ile doğru noktayı bulma başarımının ilişkili olduğuna değinilmiş ama bu konuda bir yöntem önerilmemiştir.

Magicol [50] adı verilen çalışmada, bir yeraltı otoparkında, ofis katında ve süpermarkette yerel nesnelere manyetik sinyal değişimleri incelenmiştir. Çalışmada her adımda ardışık manyetik sinyalleri toplanarak ve bu sinyal vektörlerini tahmin sürecinde kullanarak manyetik alanın düşük seviyede algılanabilirliğinin üstesinden gelmek için deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Magicol isimli çalışma, manyetik alanın yanında WiFi altyapısını kullanarak iç mekan ortamları için tek

başına jeomanyetik işaret kullanımına göre daha iyi konumlandırma doğruluğu elde edilmiştir. Magicol'de, APF, DTW tekniği ve isteğe bağlı WiFi Radyo Haritaları kullanılarak jeomanyetik alandaki bozulmaların ve değişikliklerin göreceli büyüklüğünü ölçen bir iç mekan konumlandırma ve izleme sistemi geliştirilmiştir. Tanıtılan sistem manyetik alan değişimlerini adım bazında vektörler üzerinde inceleyerek konum belirleme yapmaktadır ancak bu vektörlerin haritayla benzerliği için DTW kullanılmaktadır. Magicol'da literatürde yer alan birçok diğer yöntem gibi dönüş algılama yaparak koridorları birbirinden ayırmayı ve arama uzayını daraltarak güç tüketimini azaltma yöntemi hedeflemiştir. Dönüşleri algılamak için eşik tabanlı kayan pencereli bir filtre kullanılmıştır. Kullanılan filtre için pencere boyutu deneysel olarak 7 adım olarak belirlenmiş ve kullanıcının 7 adım attığı süre içerisindeki toplam açı değişiminin 30 derece üzerinde olması bir dönüş olarak işletilmektedir. Harita dönüş eylemi ile tanımlanan yürüyüş hatları ile oluşturulur. Toplanan manyetik sensör verisi adım uzunluğuna bağlı bir normalizasyon ile ara değerlendirme yapılır ve bu şekilde hat boyunca manyetik parmak izi çıkartılmış olur. Bu işlem için konum belirleme yapılacak olan bölgenin ölçeklendirilmiş bir kat planına ihtiyaç duyulmaktadır.

GIPSy [51] ismi verilen çalışmada ivme sensörü, dönel ölçer ve manyetik sensör kullanılarak kapalı alanda konum belirleme çözümü önerilmiştir. Önerilen yöntem, özellik çıkartımı için jeomanyetik alan şiddeti ile birlikte vektörel olarak değerlendirdiği Z eksenini ve XY düzlemindeki bileşke manyetik alanı kullanmaktadır. Jeomanyetik alanın bileşenlerini çıkartmak için ivme sensörü ve dönel ölçer ile birlikte mobil cihaz çerçevesinden Dünya'nın navigasyon çerçevesine dönüşüm sağlanmaktadır. Bu dönüşüm kapalı alandaki manyetik sensör bozunumlarından dolayı tutarlı olmayacağı için Dünya'nın yer çekimi ekseninde olan manyetik sensörün Z bileşeni ivme sensörü kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada Z eksenini için bileşke manyetik alana göre daha fazla ayırt edicilik özelliği bulunduğu değinilmiştir ancak benzer bir durum sensörün ölçüm alınan yüksekliği incelendiğinde bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmıştır. Verinin toplanan yükseklik veya farklı mobil cihazlardan toplanan veriler incelendiğinde bir dengeleme etkisi olduğu görülmektedir [44]. Bu kayma etkisini azaltmak için min-max normalizasyonu yapılmıştır. Manyetik sensör verisini bir dizi olarak kullanmak yerine küçük parçalar halinde DTW yardımıyla uzamsal olarak eşleştirdiği öznitelik vektörünü viterbi kod çözücü algoritması ile birlikte değerlendirmektedir. Her bir durum değişimini HMM (Hidden-Markov Model) ile takip ederek konum öngörüsünde bulunmaktadır. Harita oluşturma fazında ise ilgilenilen konuma dair kat planına ihtiyaç duyulmaktadır.

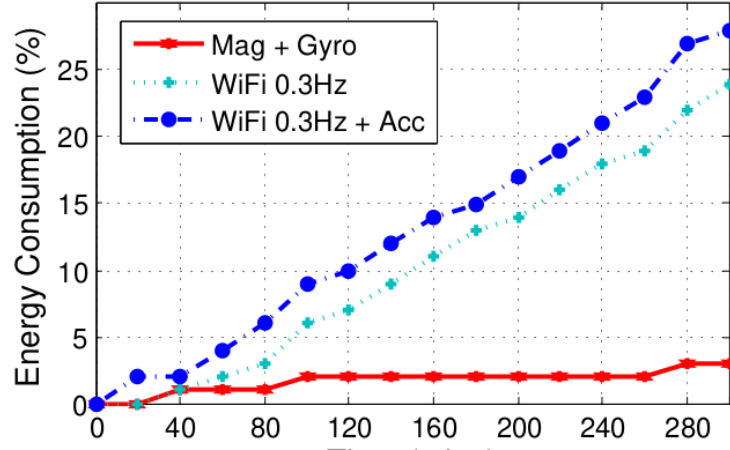
Manyetik harita veri tabanı oluşturularak konum belirleme yapan çalışmaların yanı sıra, lider-takipçi yöntemine odaklanan bazı çalışmalar da bulunmaktadır. FOLLOW

ME [29] isimli çalışmada, yol eşleme için lider-takipçi yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde göre lider olarak adlandırılan kişiden toplanan verilerle takipçi verisi karşılaştırılarak kapalı alan içerisinde yönlendirme yapılır. Önerilen yöntem daha çok kapalı alan içerisinde bir noktadan diğer noktaya yönlendirme gerektiren uygulamalar için önerilmektedir. Çalışmada bir konsept olarak sunulmuş ve harita verisinin daha verimli işlenmesi için gerekli olan çalışmalara değinilmiştir. Lider ile toplanan verinin olası tüm yürüyüş yolları için uygulanması geniş alanlarda mümkün olmamaktadır. Manyetik veri, adım algılama verisine göre hizalanmakta ve dönüş algılama verisine göre de sekanslar oluşturulmaktadır. Önerilen yöntem benzerlik araması için Lider tarafından toplanmış veriler ile takipçinin verilerinin benzerlik aramasını DTW kullanarak yapmaktadır ve bunun için DTW'in uzaklık metriğini kullanılır bu metriğe göre de takipçinin yönlendirildiği hattan sapma olup olmadığı değerlendirilir. Aynı zamanda DTW'in verimliliğine de değinilerek tüm hattın benzerliğini hesaplamak yerine bir pencere içerisinde (verilen örnekte 5 adım) yer alan verilerin benzerliği sorgulanmakta ve verimliliği artırma önerilmektedir. FOLLOW ME [29]'de de değinildiği üzere DTW 2 boyutlu bir çarpıtma matrisi kullanmaktadır. Bu da işlem yükünü kuadratik olarak artırmaktadır.

GROPING [52] isimli çalışmaya göre amaç, kullanıcılardan veri toplayarak manyetik bir harita veri tabanı oluşturmasını sağlamaktır. Sistem, WiFi istasyonları ve jeomanyetik alanın bozulmalarını değerlendirmektedir. Geliştirilen uygulama sayesinde manyetik alan verisi, WiFi ve PDR kullanılarak mobil cihazın kendi haritasını oluşturması ve bu harita üzerinden navigasyon yapması sağlanmıştır. Belirtilen çalışmada ayrıca WiFi ve manyetik sensörü güç tüketimi açısından karşılaştırma ve düşük güçlü uygulamalar için manyetik sensör önerilmiştir. GROPING'de DTW kullanılarak benzerlik araması yapılırken MCL (Monte Carlo Localization) ile de konum bilgisi elde edilmektedir. GROPING manyetik sensör kullanarak kitle tabanlı harita oluşturma önerisi ile bu konuda öncü olan çalışmalardandır.

Şekil 3.5'de GROPING çalışmasında yer alan WiFi ve manyetik sensörün güç tüketimi kıyaslaması verilmiştir.

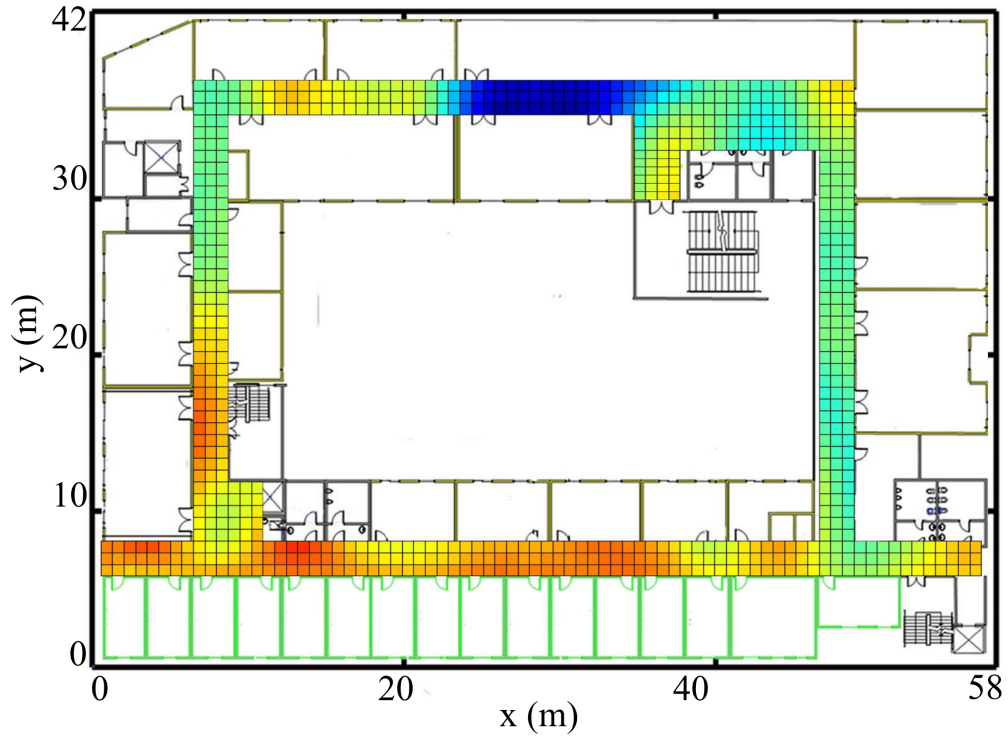
LocateMe [53] olarak adlandırılan çalışma jeomanyetik değişimleri kullanarak konum belirleme fikrinin öncülerindedir. Çalışmada kapalı alana özgü birtakım nesnelere parmak izleri kullanılarak konum belirleme işlemi yapılmaktadır. Sunulan çalışmada kapı, sütun ve asansör gibi sabit nesnelere manyetik izleri analiz edilerek DTW algoritması yardımıyla sınıflandırma işlemi yapılmaktadır. Ayrıca bir hat boyunca toplanan manyetik parmak izleri parçalara ayrılarak ve yayadan toplanan verilerle karşılaştırılarak da konum bilgisi elde edilmektedir. Paylaşılan bilgilere göre konum belirleme hassasiyeti 5.5m'nin altındadır. DTW'in yükünü azaltmak için manyetik



Şekil 3.5 Farklı sensörlerin güç tüketimine etkisi [52]

harita parçalarına bölünmüş ve parçalar kullanıcı verileri ile karşılaştırılmıştır.

BasMag[54] olarak isimlendirilen çalışmada; 2-boyutlu ızgara harita oluşturularak bu harita üzerinde yaya hareket modeline bağlı HMM (Hidden Markov Model) kullanan bir çözüm önerisi sunulmuştur. Harita oluşturmak için 2-boyutlu bir manyetik alan veri tabanı tanımlanmıştır. Harita ızgara boyutu 1m x 1m olacak şekilde toplanan verilerle 0.1m x 0.1m olacak şekilde ara değerlendirme yapılarak ızgara çözünürlüğü artırılmıştır. BasMag çalışmasında oluşturulan haritaya dair görsel Şekil 3.6'de verilmiştir.



Şekil 3.6 Iızgara tabanlı harita ve manyetik alan dağılımı görseli [54]

BasMag çalışmasında yaya hareket modeli için gerekli veriler ivme ölçer ve manyetik sensör kullanarak oluşturulmaktadır. 100Hz'de toplanan ivme ölçer verileri ile tepe ivmelenmesi ve zaman değerlendirilerek bir pencere içerisinde oluşan değişimler adım veya değil olarak değerlendirmektedir. Adım uzunluğu algılamak için en düşük ve en yüksek ivmelenmeye bağlı toplanan veri ile oluşturulan bir çizge üzerinden öngörülerde bulunulmuştur. Bu çizge oluştururken 5 farklı adım uzunluğu (0.47m, 0.52m, 0.60m, 0.69m, 0.75m) ve 8 farklı yürüme hızı için toplanan veriler kullanılmıştır. Hareket yönünün kestirimi için manyetik sensör verileri kullanılarak manyetik güneğe göre hareket yönünün açısı baş açısı olarak değerlendirilmiştir.

LiMag [55] ismi verilen çalışmada kör yaya takip (PDR - Pedestrian Dead-Reckoning) hareket modeli kullanılarak jeomanyetik veri ve ışık verisi beraber değerlendirip konum belirleme işlemi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada yönsüz ağırlıklı çizge modeline ve kat planı kısıtlamalarına göre yeniden örneklenen verilerden parçacık filtresine yardımıyla konum bilgisi elde edilmiştir. Parçacık filtresi yayanın hareket modeline dayanan bir takip filtresi olarak çalışırken. DTW yardımıyla toplanan ışık ve manyetik sensör verileri önceden oluşturulan bir harita ile karşılaştırılmıştır. DTW'in harita eşleme başarımını artırmak için 15 adım uzunluğundaki veriler ile harita verisi kıyaslanmaktadır. Çizge olarak oluşturulmuş harita üzerinde benzerlikler DTW yardımıyla bulunmakta ve parçacık filtresi ile takibi sağlanmaktadır. LiMag ışık yoğunluğu ve manyetik sensör verilerini birleştirerek kullanan öncü çalışmalardandır. Ancak ışık yoğunluğu ölçümünün getirdiği birtakım problemler bulunmaktadır. Ortamın ışıklılığı zamana göre değişkenlik gösterebilmekte ve buna bağlı durumlar için ek önlemlerin uygulanması gerekmektedir.

Magil-MagFi [56] isimli çalışmada kullanıcıdan alınan sinyaller Smith-Waterman [57] algoritması kullanılarak benzerlik taraması yapılır ve sonucuna göre daha önceden kaydedilen haritadaki en uygun nokta konum bilgisi olarak oluşturulur. Magil (sadece manyetik sensör verisi kullanan) ve MagFi (hem manyetik sensör hem de Wi-Fi izlerini kullanan) yöntemler benzerlik araması için DTW yerine Smith-Waterman algoritması kullanımı ile daha iyi sonuçlar aldığı belirtilmiştir. Katar tabanlı veriler üzerinde benzerlik araması yapan bu çalışmada harita önceden toplanan veriler ile oluşturulur. GIPSy [51] olarak isimlendirilen çalışmada da benzer şekilde jeomanyetik işaretin yer çekimi vektörüne göre dikey ve yatay bileşenleri olan Z ve XY 'den yararlanılmaktadır.

MaLoc [58] isimli çalışmada, kullanıcı konumunu ölçmek için Ataletsel Navigasyon Sistemi (INS - Inertial Navigation System) ile birlikte bir parçacık filtresi kullanılmıştır. Çalışmada en iyi manyetik alan eşleşmesine sahip aday konumlar seçilir, ardından parçacık filtresi yanlış konumların ağırlıklarını azaltır ve yerleştirme gerçekleştirilmektedir. Artırılmış Parçacık Filtreleri kullanarak, yerleştirme

doğruluğunu artırılır. Jeomanyetik işaretin yer çekimi vektörüne göre dikey ve yatay bileşenleri Z ve XY 'den yararlanılmaktadır. Parçacık filtresinin işlem yükü yüksek olduğu için önce düşük çözünürlüklü bir konum bilgisi elde edene kadar parçacık sayısı tutulmuştur. Harita oluşturmak için veri toplanan koridor 0.6m aralıklı hatlar olarak tanımlanarak 0.1m aralıklarla veriler toplanmıştır. Çalışmada raporlanan konum belirleme hatası 2m'nin altındadır ve farklı kullanıcıların adım uzunluğuna bağlı olarak artabilmektedir.

mPILOT [46] isimli çalışmada dönel ölçer, ivme ölçer ve manyetik sensörler kullanılarak veriler toplanmaktadır. Hareketli yayayı tespit için bir YSA (Yapay Sinir Ağı) kullanılmış ve yayanın hareketli olduğu durumda veri toplayarak konum belirleme işlemini yapılmıştır. Manyetik alan şiddetinde oluşan anormalliklerinden yer işaretleri çıkarılmaktadır. Adım uzunluğu tahmini için statik bir model kullanılmıştır. Bu statik model birçok çalışmada yer alan Weinberg Model [59]'dir. Manyetik harita veritabanı yer işaretleri kullanarak tanımlanmış ve bu harita ile eşleştirme yapılarak konum bilgisi elde edilmektedir. Konum doğruluğu ile işlem maliyeti arasında bir denge bulunmaktadır.

mPILOT isimli çalışmada işlem maliyetini veya karmaşıklığını artırmak daha doğru bir konum verisi vermekle birlikte pratikte uygulanabilirliğini azalttığı vurgulanmıştır. Çalışmada bu probleme çözüm olarak işlem yükünü azaltan BG (Binary Grid) algoritması önerilmiştir. Harita önceden toplanan veriler ile oluşturulmakta ve harita oluşturmak için BG (Binary Grid) algoritmasını kullanılmaktadır. Bu algoritma yardımıyla harita 0 ve 1 ikili sayılarıyla temsil edilmiştir. Bu temsil ile konuma dair yer işaretleri elde edilmiş olunur ve bu yer işaretleri kullanılarak harita eşleştirme işlemi yapılmıştır. Toplanan veriler 1 sn'lik parçalar halinde harita üzerinde arama yapılmıştır. Bu aramada BG olarak oluşturulmuş haritada öklit uzaklığı dikkate alınmıştır. Olası konumlar manyetik harita ile belirlenirken yaya hareket modeli ile desteklenir ve PDR ile göreceli konum elde edilmiştir. Referansa sahip olmayan göreceli konum bilgisi manyetik harita eşleştirme ile mutlak konum bilgisi elde edilmiştir. Çalışmada ortalama hatanın 3 m'nin altında olduğu belirtilmiştir.

Literatürde makine öğrenmesi, derin öğrenme veya yapay zeka tabanlı algoritmalar konum belirlemeye yönelik çalışmalar da yer almaktadır. Çalışmalar incelendiğinde eğitim fazı ve sonrasında test fazı olmak üzere iki ayrı fazda ilerlediği görülmektedir. Ancak derin öğrenme uygulamaları veriye çok bağımlıdır ve fazlaca veri toplamayı gerektirmektedir. Örneğin [60] nolu çalışmada Wi-Fi, IMU, BLE, akıllı telefon kamerası verileri ile CNN modeli kullanılarak kapalı alanda olduğunu algılanmakta ve kaba bir pozisyon tahmininde bulunmaktadır. Sonrasında bu bilgi kullanılarak harita arama uzayı küçültülmüş konum belirleme işlemi WiFi ve IMU verileri

kullanılarak hesaplanmıştır.

AMID [45] çalışmasında, kullanıcı konumunu belirlemek için yer işaretleri ve jeomanyetik sinyaldeki eğilimleri kullanılmıştır. AMID jeomanyetik sinyali analiz ederek sürekli artan, sürekli azalan, dışbükey, içbükey gibi özellikleri çıkartmış ve derin sinir ağlarından Evrişimsel Sinir Ağı (CNN - Convolutional Neural Network) ile sınıflandırarak konum bilgisi elde edilmiştir.

DeepML [61] ve AMID [45] çalışmalarında, konum belirleme için Yapay Sinir Ağları kullanılmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmalar YSA modellerini eğitmek için aynı bölgede birden fazla veri toplanmasına ihtiyaç duymuştur. Bir çok özellik ilgilenilen mekana özgü değerlendirilmesi gerekmektedir. Genelleştirilmiş bir çözüm sunulabilmesi için konum belirleme yapılmak istenilen bölgede birden fazla veri toplanılarak ağı eğitilmesi pratik bir kurulum senaryosu için zorluklar oluşturmaktadır.

Tablo 3.1'de bu bölümde incelenen jeomanyetik veri kullanılarak konum belirleme yapan literatürdeki çalışmalar özet bir tablo olarak verilmiştir. Çalışmaların önerilen yöntem ile harita tipleri, benzerlik araması için kullanılan yöntemler ve konum belirleme tutarlılıkları dikkate alınarak oluşturulmuştur.

Jeomanyetik alan konum belirleme için kullanılacak olduğunda konuma dair ayırt edici izlerin değerlendirilmesi veya toplanması açısından farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Literatürde yer [45] ve [62] nolu çalışmalarda olduğu gibi yer izlerini kullanarak belli bölgedeki değişimleri değerlendirirken (örneğin sadece sütunların olduğu yerler, kapılar veya geçitler gibi), birtakım çalışmalar belli aralıklarla toplanan verileri değerlendirmekte [54] (ızgara harita türü) veya bir yol boyunca toplanan sürekli verileri [52] (hat tabanlı harita) değerlendirerek de konum bilgisi elde etmek hedeflenmektedir. Bu doğrultuda veri yapısına göre haritaları ızgara tipi, yer izleri haritası ve hat verisi haritası olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 3.3'de WiFi sinyalleri için ızgara tipi harita için örnek ölçüm noktaları verilmiştir. Şekil 3.4'de ise veriler hatların üzerinde veriler toplanarak harita veri tabanı oluşturulmuştur.

Bunun yanında haritada kullanılan verinin tipi de harita veri yapısı kadar önemlidir ve literatürde farklı yaklaşımlara rastlamak mümkündür. Literatürde yer alan çalışmalarda hat bazlı haritalar için genellikle jeomanyetik alan bileşke büyüklüğü kullanılmaktadır. Bu skaler değer kullanıcının hareketi sırasında veri katarı olarak toplanır ve hat bilgisi ile eşleştirilir.

Kapalı alan içerisinde manyetik alanda meydana gelen bozunumlar baş açısını sağlıklı bir şekilde çıkartmayı zorlaştırmaktadır. IMU kullanılarak geliştirilen sistemlerde

Tablo 3.1 Jeomanyetik veri kullanarak konum belirleme yapan çalışmalar

Çalışma	Veri	Harita Tipi	Yöntemler	Güven Aralığı
FOLLOWME[29]	acc, mag, gyro, GPS, barometer	Hat verisi, Lider-takipçi	DTW, Adım Algılama, Dönüş Algılama	<2m
AMID[45]	acc, mag	İz algılama, Hat verisi	CNN	1.7m
mPILOT[46]	acc, mag, gyro	İz algılama, Hat örnekleri	ANN, BG, Adım uzunluğu	<3m
MeshMap[47]	acc, mag, gyro, barometer	Hat verisi, Kitle Kaynaklı	DTW Çizge Tabanlı	<10m
CSMS[48]	mag, wifi	Hat verisi, Izgara (wifi)	L-DTW M-KNN	<2m
S.Guo <i>et al.</i> [49]	acc, mag, gyro,	Hat verisi	DTW, KNN	<1m
Magicol[50]	acc, mag, gyro, opt. wifi	Hat verisi	DTW, APF	<4m
GIPSy[51]	acc, mag	Hat verisi	DTW, HMM Viterbi	<10m
GROPING[52]	acc, mag, gyro, opt. wifi	Hat verisi Kitle kaynaklı	DTW, MCL	<5m
LocateMe[53]	mag	İz algılama, Hat örnekleri	DTW	<5.5m
BasMag [54]	acc, mag	Izgara veri tipi	HMM	<2m
LiMag[55]	acc, mag, gyro, als	Hat verisi	DTW, PF, UWGM	<3.5m
Magil[56]	mag, opt wifi	Hat verisi	Smith-Waterman, graph arama	<3m
MaLoc[58]	acc, mag, gyro	Izgara veri tipi	APF, Adım uzunluğu, Baş açısı	<2m
DeepML[61]	mag, als	Izgara veri tipi	LSTM	4m
Önerilen yöntem (BASISMAP)	acc, mag, gyro	Hat verisi	MPdist/MASS, PDAF, UKF	2.5m

yönelim bilgisi manyetik sensör kullanılarak çıkartılır. Manyetik sensör olmaksızın döner ölçer ile elde edilen yönelim bilgisi kayma hatasına açık ve başlangıç referansı belirsizdir. Bu sebeple jeomanyetik alan bileşenleri kullanılmak istendiğinde yer çekimi vektörüne dik bileşenler yani XY düzlemi toplam bileşke vektörü ve Z eksenine ait manyetik alanın da kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [51], [56], [58]. Bu sayede jeomanyetik alan yer izi olarak kullanıldığında ayrıştırılabilirliği artmakla birlikte benzerlik araması için gerekli olan işlem yükü de doğrusal olarak artmaktadır.

Yine jeomanyetik alanın başka bir işarete dönüştürülmesi ile de harita oluşturmayı öneren çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Bu tip çalışmalarda aynı zamanda manyetik ölçüm sisteminin hatalarını da azaltma yönünde olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Genellikle jeomanyetik alanın öznitelik olarak ele alındığı bu çalışmalar makine öğrenmesi algoritmaları ile kullanımı [45] tercih edilse de BG (Binary Grid) yönteminde olduğu gibi benzerlik araması algoritmaları ile kullanıldığı da literatürde görülmektedir [46].

Jeomanyetik alandan yararlanarak konum belirleme yapan yöntemlerde manyetik alan verisinden farklı verilerin kullanımı oldukça yaygındır. Tek başına manyetik sensör kullanan uygulamalar, hareket sensörleri ile desteklenen çalışmalar veya hareket sensörleri, manyetik sensör ve ilave olarak WiFi kullanan çalışmalara rastlanmaktadır [48], [50], [52], [56]. Kapalı alan yer izlerini çıkartmak için barometre ve ışık sensörünün de destekleyici olarak yer aldığı çalışmalar bulunmaktadır [55], [61]. Sensör ile toplanan veri miktarı arttıkça işlenmesi gereken verinin ve buna bağlı işlem yükünün artması beklenen bir sonuçtur. Gerek yeni verileri toplamak için kullanılacak sensörler gerekse bu verileri işlemek için gerekli işlem yükünün artması güç tüketimini artırmaktadır. Şekil 3.5'de GROPING [52] adlı çalışmada elde edilen sonuçlarda sadece WiFi ve WiFi ile birlikte ivme sensörünün kullanımı veya tek başına manyetik sensör ve döner ölçerin kullanımına bağlı güç tüketimi paylaşılmıştır. Bunun yanında konuma dair ayrıştırıcılığı artırmakta ve hassasiyete olumlu etki etmektedir [52].

Jeomanyetik alanın doğrudan bir manyetik işaret olarak kullanılmasının yanında, yapay manyetik alan kullanarak konum belirleme yapan çalışmalar bulunmaktadır. Oluşturulan yapay manyetik alan ve bu manyetik alanın türüne göre farklı çözümler [63]'de tanıtılmıştır. Kullanılan manyetik alanın düşük frekanslı olması yüksek frekanslı olması, bilinen noktada yapay manyetik bozunumlar oluşturulması durumu gözetilerek farklı sistem mimarileri önerilmiş ve alt yapısına göre farklılık gösteren çözümlere dair bilgiler paylaşılmıştır.

Harita veri tabanı ile toplanan verinin karşılaştırılması ve yayanın kapalı alan

içerisindeki konumunun belirlenmesi için katar bazlı benzerlik arama yöntemleri kullanılmaktadır. Çok yaygın olarak DTW algoritmasına dayanan esnek arama yöntemleri tercih edilmektedir.

Tablo 3.1’de verilen yöntemlerde incelendiğinde jeomanyetik izlerin farklılığına dayalı konum belirleme çalışmalarında genellikle bir veri katarı ele alınarak harita ile benzerlik araması veya harita eşleme işlemi yapılmaktadır. Bu sebeple manyetik harita veritabanı ve toplanan sinyalin benzerlik değerlendirmesi, sistem başarımını doğrudan etkileyen bir etkidir. Genellikle benzerlik araması toplanan verinin uzamsal değişimi bilinmediğinden veya takip edilmediğinden esnek bir arama yöntemi tercih edilmiştir. Bu sebeple benzerlik araması için yaygın kullanılan DTW ve türevi sinyal eşleme yöntemleri kullanılmıştır.

Şekil 3.2’de görüleceği üzere kullanıcının hızına bağlı olarak veri katarı zaman ekseninde daralmakta veya genişlemektedir. Farklı hızlarda toplanan verilerin veya farklı hızlarda hareket eden bir yayanın verisinin hizalanması harita üzerinde doğru noktanın belirlenmesi için gereklidir. Jeomanyetik işaretin kapalı alandaki bozunumlarının belirsiz olması verinin yüksek rastgeleliğe sahip olması hizalama yapılmadan veri eşleme yapıldığında hataya açık bir durumdur. Bu sebeple esnek arama yöntemleri kullanan çalışmalarda hem performansının artırılması hem de olası hatalı durumların azaltılması için bir pencere tanımlanır. DTW algoritması esnek bir arama yöntemi olarak performansının artırılması için çoğunlukla bir daraltma/genişletme penceresi tanımlanarak kullanılmaktadır [64]. DTW algoritmasında bu eşleme penceresi boyutu arttıkça arama uzayı artmaktadır.

DTW’in sağladığı avantajının yanında esnek arama yöntemi kullanmayan birçok çalışmada uzamsal olarak harita ile eşlenme ayrı işlem adımı olarak gerçekleştirilir. Örneğin BasMag[54] olarak isimlendirilen çalışmada yürüme hızına bağlı olarak örnekleme oranı değiştirilerek uzamsal normalizasyon önerilmektedir.

Tez çalışması kapsamında önerilen yöntemde esnek aramaya ihtiyaç duymayan bir yöntem önerilmiştir. Harita eşleme için uzamsal normalizasyon hem harita oluşturulurken hem de harita ile eşleme işlemi yapılırken yayanın adım uzunluğu dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu sayede DTW’in sağladığı esnek benzerlik arama özelliğini karşılayacak normalizasyon adımı kullanılarak işlem yükü azaltılmıştır. Ayrıca literatürde yer alan çalışmalarda işlem yükünü düşürmek için hat parçaları kullanılarak karşılaştırılacak verinin sınırlandırılması amaçlanmıştır. Bu sınırlama işlemi yerine manyetik sinyal bozunumları değerlendirilerek, işaretin değişimine bağlı bir değişken uzunluklu karşılaştırma belleği tez çalışmasında önerilmiştir.

Manyetik katar bazlı konum belirleme probleminde Matrix Profile [65] olarak adlandırılan benzerlik arama yöntemi ilk kez bu çalışmada uygulanmıştır. Matrix Profile (MP) büyük zaman serilerinin incelenmesi, anormal durumların veya benzer desenlerin algılanabilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Zaman serilerinin incelenmesinde bir diğer popüler yöntem DTW (Dynamic Time Warping)'dir. MP yöntemi DTW'e göre genel hesaplama maliyetini, önemli ölçüde düşürmektedir. Bu sayede genel olarak sistemin güç tüketimine dair verimliliği artmakta ve kısıtlı donanımlar üzerinde çeşitli problemlerin çözülmesine olanak sağlamaktadır. Bu sebeple, sonuca daha hızlı ulaşılması gerçekleşmekte ve merkezi olarak koşan bir yazılımın daha fazla kullanıcının yararlanması sağlanabilmektedir.

Özetle, çalışmanın özgün ve öne çıkan yönleri aşağıda verilmiştir.

- MP tabanlı yol eşleştirme yöntemi, manyetik izlere bağlı konum belirleme probleminde ilk kez kullanılmıştır.
- Benzerlik aramasını iyileştirmek için adım uzunluğuna bağlı olarak uzamsal normalizasyon yapılmaktadır.
- Manyetik izlerin normalden daha fazla değiştiği durumlarda performanstan ödün vermeden işlem yükünü azaltmak için zaman serisi değişkesine bağlı değişken uzunluklu bellek yönetimi kullanan bir benzerlik arama yöntemi önerilmiştir.

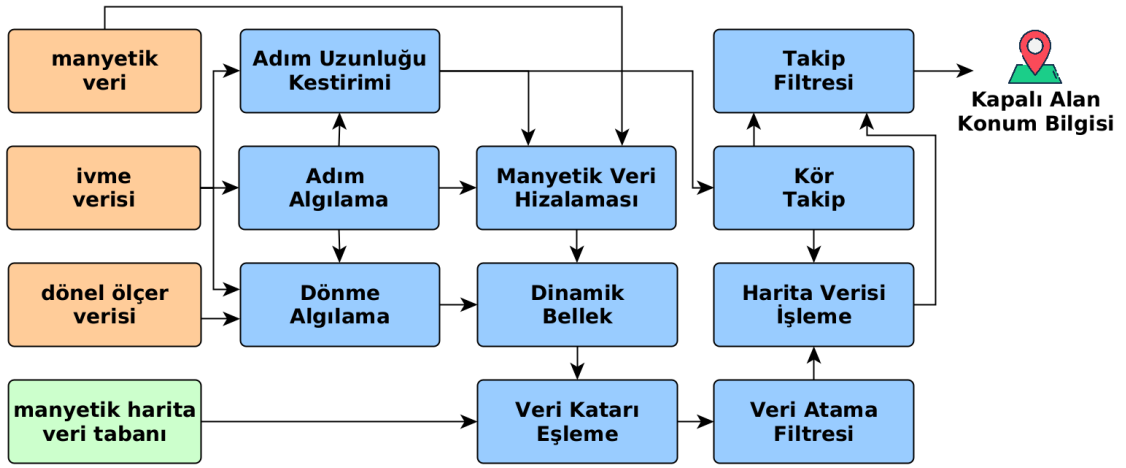
4.1 Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemde, uzamsal olarak normalize edilmiş manyetik izler harita verisi ile karşılaştırılırken Matrix Profile'in sunduğu vektör uzaklığı baz alınmıştır. Bu vektör uzaklık bilgisi istatistiksel bir filtre ile desteklenerek yayanın anlık

konumu belirlenmesi sağlanmıştır. İstatistiksel filtre olarak yinelemeli bayes filtresi kullanılmıştır.

Manyetik veri katarları, zamana bağlı ardışık veriler olarak tanımlanır. Bir koridor veya yoldan tek yönde yürüyen bir yaya için sıralı veri varsayımı yapılmıştır. Manyetik sensör verileri sıralı toplanarak bu veri katarı oluşturulmaktadır. Sıralı olarak örneklenen manyetik veriler, yol hattı boyunca manyetik izlerden oluşur. Tüm örnekler yol hattındaki konumla hizalanır. Adım uzunluğu öngörüsü ve mesafe normalizasyonu, manyetik verileri hizalamak için kullanılır.

Önerilen yöntemin blok diyagram gösterimi Şekil 4.1'da verilmiştir. Uygulanan yöntemlerin açıklaması ilgili alt bölümlerde verilmiştir.



Şekil 4.1 Sistem blok diyagramı

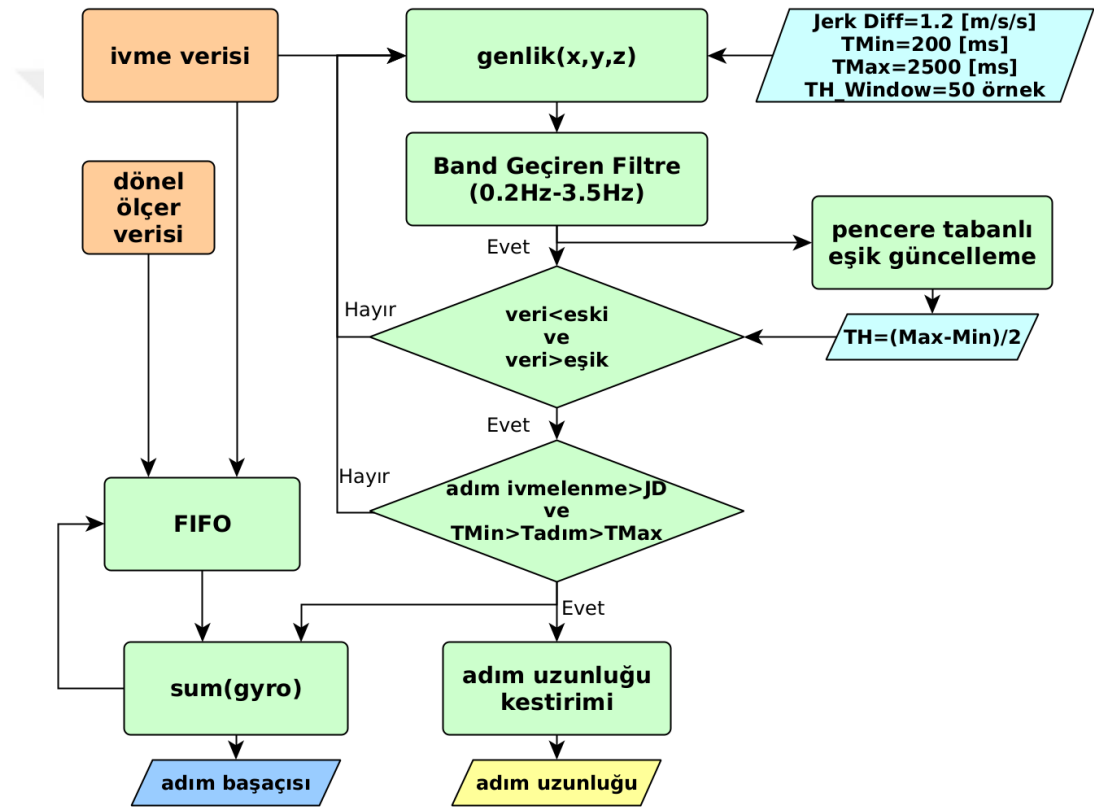
4.2 Adım Eylemi ve Adım Uzunluğu Algılama

Harita oluştururken veya oluşturulmuş bir harita üzerinde işlemler yaparken takip edilen kişinin o anki hareketini algılamak için adım eylemi ve adım uzunluğu algılanır. Kişinin hareketliliğini ve adım uzunluğunu algılamak için ivme ölçer kullanılmıştır. Kişinin hareketli olduğu, adım attığı veya attığı her adımın uzunluğunun doğru bir şekilde kestirilmesi, oluşturulacak haritanın kullanımını ve sistemin performansını doğrudan etkilemektedir.

Yayanın hareket halinde olduğunun algılanması, harita üzerinde arama yapılması açısından önemlidir. Kişi hareket etmiyorsa manyetik bir veri dizisi toplamak anlamsız olacaktır. Kişinin hareketli olup olmadığı, ivme sensörü kullanılmak suretiyle adım eylemi değerlendirilerek algılanır. Kullanıcının hareketli olması ve adım uzunluğu durumu manyetik sensör verilerini konumla ilişkilendirmek için kullanılır. Dönel ölçer

yardımı ile ilerlediği yol boyunca her bir adım için toplanan manyetik veriler daha önceden oluşturulan harita verisi ile karşılaştırılır.

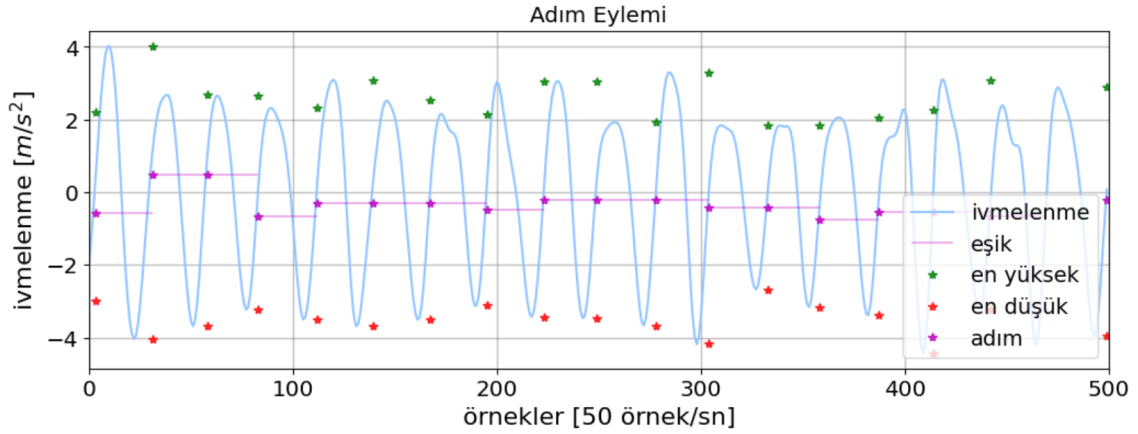
Literatürde ivme sensörü kullanılarak kayan pencere ile uyarlanabilir eşik tabanlı adım algılamanın gerçekleştirildiği birçok çalışma bulunmaktadır [66]. Adım algılamak için kayan bir pencere içerisinde ivme sensörü verileri incelenerek adaptif olarak belirlenen eşik değeri karşılaştırılır. Eşik değeri ivme değişimlerinin en yüksek ve en düşük olduğu noktaların ortalaması olarak belirlenmektedir [67]. Bu karşılaştırma sonucunda adım atılırken oluşan ivmenin geçiş noktaları her bir adımın başlangıç ve bitiş noktası olarak belirlenir. Bu yöntemle dair akış Şekil 4.2’de verilmiştir. Adım işareti ve eşik değeri için en düşük ve en yüksek noktalar Şekil4.3’da gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Adım ve baş açısı algılama

Adım algılama yapıldığında bir adım içerisindeki minimum ve maksimum ivme değişimine göre adım uzunluğu hesaplamak mümkün olabilmektedir. Literatürde [68] ve [69]’de yazarların araştırmalarında adım uzunluğu algılamak için birçok yöntem incelenmiştir. Yöntemlerin çoğunda adım uzunluğunun bir adım içerisindeki minimum ve maksimum ivme değişimine bağlı olarak hesaplandığı görülmektedir.

Adım uzunluğu kişinin yaşı, cinsiyeti, boyu ile ilişkili olarak değişmekle birlikte literatürde yer alan bazı çalışmalarda bu değişkenlere duyarlılığı daha az olan yöntemler geliştirilmiştir. Adım algılamak için Weinsberg yönteminde [59] tek



Şekil 4.3 Adım algılayıcı adaptif eşik değişimi

parametre kullanılması ve kullanılan parametrenin değişen şartlarda etkisinin daha az olması sebebiyle tercih edilmiştir. Weinsberg [59]'deki yöntemi kullanan literatüdeki başka bir çalışmada [70] mobil cihazın farklı bölgelerde (cep, bel, göğüs, el) taşınması durumu farklı cinsiyet ve farklı yaş gruplarına ait yapılan denemelerde toplam hatanın %5'in altında kaldığını göstermiştir.

Adım uzunluğunu algılamak için (4.1) ifadesi kullanılır. ΔT_{step} adım atma süresi ve acc_{max} , acc_{min} da adım atma periyodu boyunca en düşük ve en yüksek ivmelenme değerleridir. Harita oluşturulurken K katsayısı seçimi kritiktir ve bu değer veri toplayan kişiye özgü olarak seçilmesi gerekmektedir. Bu değer seçimi için uzunluğu belli bir yol boyunca atılan toplam adım ortalama değeri kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Adım uzunluğunu belirlemek için yaptığımız testlerde K katsayısı 0.8 olarak seçilmiştir.

$$step\ length = K \times \Delta T_{step} \times \sqrt[4]{acc_{max} - acc_{min}} \quad (4.1)$$

4.3 Dönüş Algılama

Harita oluşturulurken veya harita üzerinde arama yapılırken dönüş noktaları önemli rol oynamaktadır. Dönüş noktaları ile kullanıcının yürüdüğü yolun başlangıç ve bitiş noktaları tanımlanır. Bu başlangıç ve bitiş noktaları sayesinde birbiri ile bağlantılı yollar bir çizge ile temsil edilir. Bu sayede harita küçük parçalara ayrılarak bu küçük parçalar üzerinde eşleme yapılır. Bu durum daha küçük bir veri kümesi üzerinde arama işlemi gerçekleştirilmesine ve dolayısıyla işlem yükünün azaltılmasına imkan sağlar. Haritanın daha küçük parçalara ayrılması ve bu doğrultuda parçalara dair verilerin toplanması için dönüş noktaları yer izi olarak kullanılmaktadır.

Dönüş algılama koridorların tanımlanmasında ve koridor üzerinde kişinin takibi yapılırken koridordan ayrılmasının algılanmasında kullanılmaktadır. Klasik kör takip sistemlerinde baş açısı hesaplanması hareket sensörlerine bağlı hataların zamanla birikmesine ve bu hataların üstel olarak artmasına sebep olmaktadır. Bu durumda baş açısı öngörüsü doğru yapılamamaktadır.

Yer çekimi vektörü baz alındığında yer çekimi doğrultusunda dönüşler yayanın yürüdüğü düz yoldan sapmaları hesaplamak için kullanılmıştır. Yer çekimi vektörü yerin merkezini gösteren ivmelenme eksenindedir. Yer çekimi yönünü çıkartmak için bir kaç adımı kapsayan bir pencere kullanılmıştır. Bu pencere içerisinde ivme sensörünün bileşenleri (4.2)'deki gibi ivme sensörü verileri toplanarak hesaplanır. Burada ivme sensörü pencere boyutu n 'in dönel ölçer pencere boyutu m 'den büyük olması gerekmektedir ($n > m$). Ortalama ivme sensörü bileşenleri a_x, a_y, a_z ile dönel ölçer (4.3)'de verilen şekilde normalize edilir.

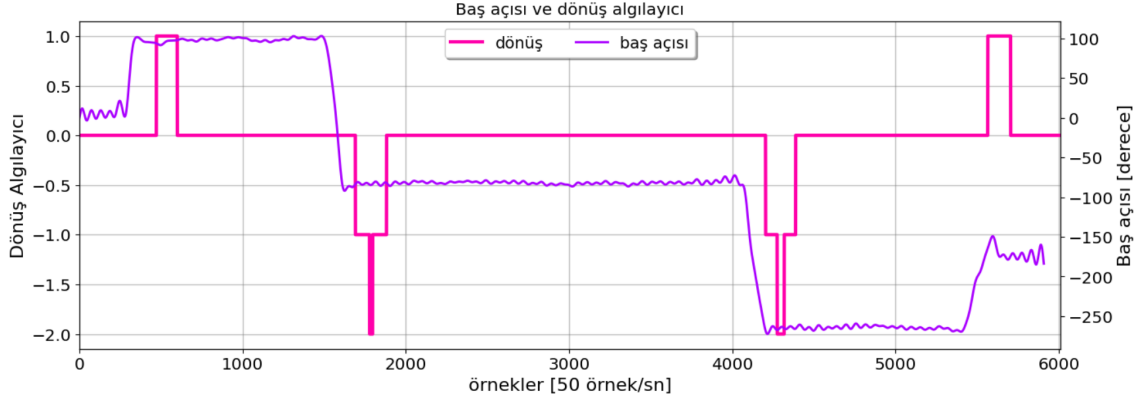
$$\bar{a}_x = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_x^k, \bar{a}_y = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_y^k, \bar{a}_z = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_z^k \quad (4.2)$$

Dönel ölçer m boyutlu ortalama penceresi dönüş hareketini kapsayacak büyüklükte seçilmesi yeterlidir. Benzer bir yöntemi kullanan çalışmada [71] bir kaç adım uzunluğunu kapsayacak bir n değerinin seçiminin yeterli olduğu belirtilmiştir. Benzer bir yöntem de Magicol [50] adlı çalışma değinilmiş ve Magicol'da dönel ölçer için pencere büyüklüğü 7 adım olarak seçilmiştir. Belirlenen süre içerisindeki toplam açısal yer değiştirme bir dönüş olup olmadığını değerlendirmek için kullanılır. Tez çalışmasında önerilen yöntemde 4 adım boyunca veriler değerlendirilerek dönüş algılama yapılmaktadır. Dönüş algılama için 30 derece eşik olarak değerlendirilerek bu değer üzerindeki açısal yer değiştirmeler dönüş noktası olarak ele alınır.

İvme bileşenlerinin ortalaması ile elde edilen $(\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z)$ vektörü Dünya'nın navigasyon referansı için rotasyon vektörü olarak kullanılmaktadır. Dönel ölçer bileşenleri $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 'nin yayanın navigasyon referansındaki etkileri (4.3)'de verildiği şekilde oluşturulur. (4.4)'deki denklem kullanılarak sağa veya sola dönüşü algılamak için $\Delta\theta$ değeri hesaplanır.

$$\omega_{v_x}^k = \frac{\omega_x^k \cdot \bar{a}_x}{|a|}, \omega_{v_y}^k = \frac{\omega_y^k \cdot \bar{a}_y}{|a|}, \omega_{v_z}^k = \frac{\omega_z^k \cdot \bar{a}_z}{|a|} \quad (4.3)$$

$$\Delta\theta = \sum_{k=1}^m |\omega_v^k| \Delta t \quad (4.4)$$

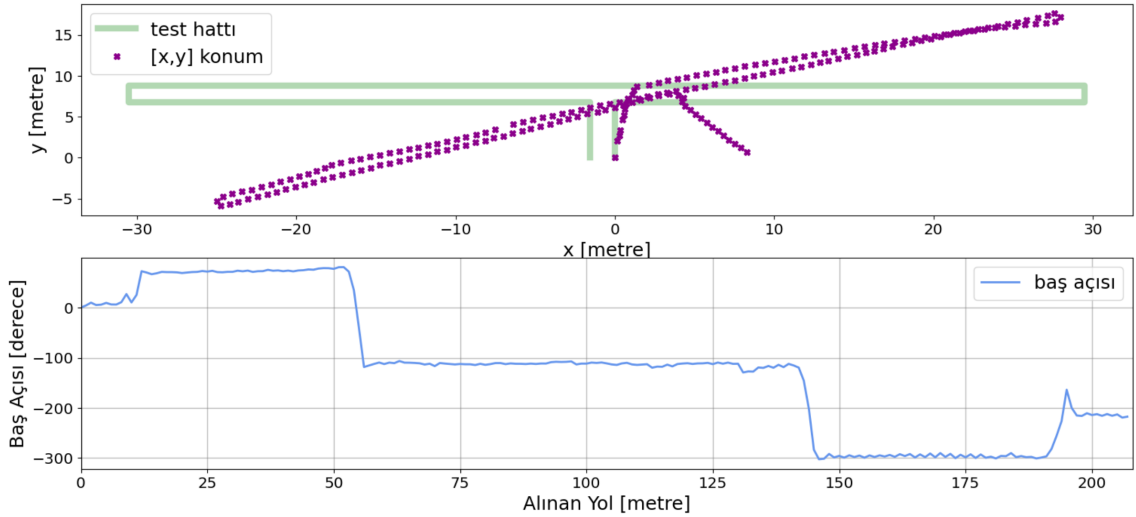


Şekil 4.4 Baş açısı ve dönüş noktası algılama çıktısı

Şekil 4.4 incelendiğinde adım eylemi ve adım üzerindeki dönel ölçet verileri ile elde edilen baş açısı ve dönüş algılayıcının çıktısı görülmektedir. Bir yol boyunca hareket eden ve çeşitli dönüşler yapan yayanın 90° veya 180° derece dönüşlerinin algılanabildiği görülmektedir. Bu şekilde sadece dönüşlerin harita üzerine işlenerek kaydedilmesi ile harita üzerindeki koridorların başlangıç ve bitiş noktaları tanımlanır. Her bir koridora ait veriler dönüşler arasındaki adım ve manyetik sensör verilerinden elde edilir. Birçok iç mekan için $\pm 90^\circ$ veya $\pm 180^\circ$ dönüşleri algılamak yeterlidir. Ayrıca farklı eşik seviyeleri ile de algılama yapmak mümkündür. Dönüş algılanmadığı durum için katın tamamı tek bir yol olarak haritaya işlenmesi mümkündür. Dönüş noktaları arasındaki benzerliği aramak ve bunları bir çizge (graph) ile ilişkilendirmek yayanın konumunu belirlemek için arama uzayını küçültmekte ve işlem yükünü azaltmaktadır.

4.4 Kör Takip Yöntemi

Literatürde kör takip (dead-reckoning) olarak adlandırılan yöntemlerde, hareket sensörleri kullanılarak kullanıcının katettiği yol ve yönelimi algoritmalar yardımıyla öngörülmekte ve bu doğrultuda konum bilgisi elde edilmektedir. Ancak bu konumun öngörülebilmesi için başlangıç noktasının doğru verilmesi gerekmektedir. Kör takip sistemleri başlangıç noktasını referans olarak o noktaya dair değişim öngörüsünde bulunabilmektedir. x , y koordinat düzleminde kişiyi takip edebilmek için adım uzunluğu ve adım boyunca yaptığı dönüş algılanır ve buna bağlı olarak koordinat bilgisi hareketin başlangıç noktasına göre elde edilir. Koordinat bilgilerine ek olarak, adım sırasında manyetik sensör verileri de toplanır ve ardından harita üzerine işlenir. Şekil 4.5'de, bir yayanın ofis alanında (0,0) başlangıç noktasından başlayıp, koridorlarda hareketinden sonra tekrar aynı noktaya geri döndüğünde elde edilen kör takip sistemi sonuçları verilmiştir. Şekil 4.5(a) yayanın iki boyutlu düzlemdeki hareketini, Şekil 4.5(b) ise yayanın bu hareketi sırasındaki baş açısının değişimini göstermektedir.



Şekil 4.5 a) Kör takip sistemi b)Yaya baş açısı

Harita başlangıç koşulları dikkate alınarak oluşturulduğundan, θ 'ın yön açısı ve $x - y$ düzleminde alınan yol için başlangıç durumunda (0, 0) olarak sistem ilklendirilmiştir. Eşitlik (4.5) içindeki konum güncelleme ve eşitlik (4.6) içindeki yön güncelleme denklemleri verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) \\ \sin(\theta_k) \end{bmatrix} \cdot l_{step} \quad (4.5)$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta\theta \quad (4.6)$$

Kör takip sistemlerinde her bir konum hesabı bir önceki konuma göre olan fark eklenerek elde edilir. Bu yolla elde edilen veriler için zamanla hata birikir ve bu durum uzun bir yol veya dönüşlerin fazla olduğu durumlarda konum verisinde tutarsız sonuçlar alınmasına sebep olur. Örneğin Şekil 4.5(a) incelendiğinde başlangıç durumundaki baş açısı hatasının sistemde elde edilen tüm verileri etkilediği görülmektedir.

Eşitlik (4.5)'te verilen yaya hareket modelinde; Eşitlik (4.1)'de verilen yöntem ile adım uzunluğu algılanarak işletilir. θ_k baş açısı, adım başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki toplam açısal değişimi ifade etmektedir ve dönüş algılama algoritmasında olduğu gibi yer çekimi vektörüne dik bileşen üzerindeki değişim (4.4) denklemindeki gibi hesaplanır.

Bu bölümde tanıtılan kör takip sistemi harita oluşturulması aşamasında manyetik sensör verisi ile konumu eşleştirmek için işletilir. Oluşturulmuş harita üzerinde

Bölüm 4.9’da verilen yaya hareket modeli kullanılarak konum bilgisi elde edilmektedir.

4.5 Manyetik Alan Harita Veri Tabanı

Jeomanyetik alan verisi ile konum belirlenmek istendiğinde, konuma dair ayırt edici izlerin değerlendirilmesi veya toplanması açısından farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Literatürde yer alan birtakım çalışmalar yer izlerini kullanarak belli bölgedeki değişimleri hesaba katarken [45] (örneğin sadece sütunların olduğu yerler, kapılar veya geçitler gibi), birtakım çalışmalar belli aralıklarla toplanan verileri değerlendirmektedir [54] (ızgara veri türü yaklaşımı ile) ayrıca bir hat boyunca toplanan sürekli verileri [52] (hat tabanlı harita) değerlendirerek de konum belirleme yapmayı hedefleyen çalışmalar mevcuttur. Bu anlamda veri yapısına göre haritaları aşağıdaki şekilde sınıflandırmak mümkündür.

- Yer izi haritası
- Izgara tipi harita
- Hat tabanlı harita

Haritaların oluşturulduğu veri yapısına göre değerlendirilecek olduğunda;

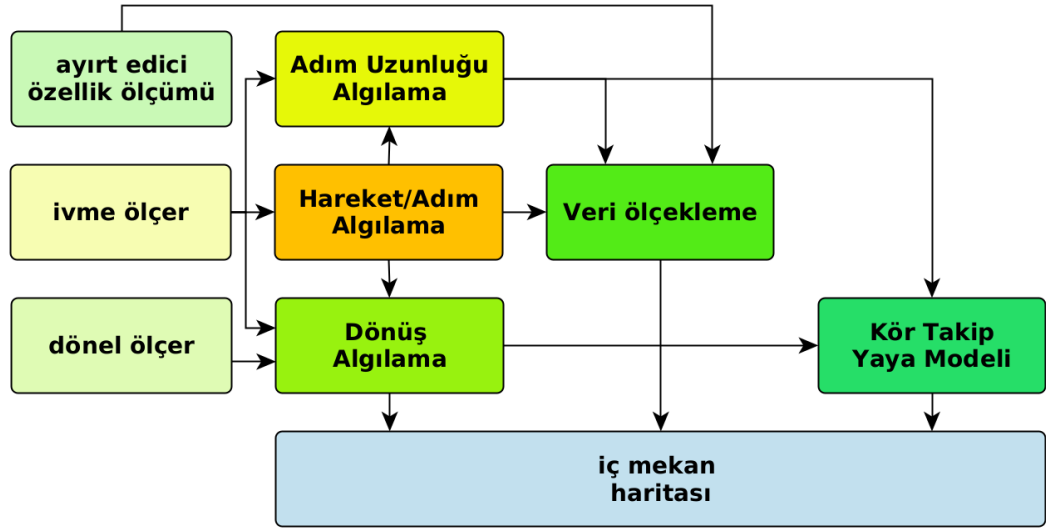
Yer izi haritalarının genellikle çözünürlüğü düşük kaldığından daha az hafızaya ihtiyaç duymaktadır. Konum ile ilişkilendirilmiş yer izleri yakalanana kadar konum bilgisi elde etmek mümkün değildir. Bunun yanında genellikle değişimleri sınıflandırmak için çeşitli makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmaktadır.

Izgara tipi haritalarda konum ile ilişkilendirilmiş noktalardaki manyetik değişimler toplanır. Genellikle de bu noktalardaki bileşke jeomanyetik alan skaler olarak değerlendirilir. Belirlenen noktalarda ölçümler alınarak harita veri tabanı oluşturulur. Bu tip haritalarda veri toplamak ve oluşturmak için referans noktalarına ihtiyaç vardır ve bu harita verisi oluşturmak için büyük zorluk oluşturmaktadır. Veri değerlendirilmesi sırasında ızgara tipi haritalar ara değerlendirme ile çözünürlüğü artırılabilir. Yine hat tabanlı haritalarda olduğu gibi katar verisi halinde benzerlik araması yapılabilir veya makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak komşuluk ilişkisine dayalı konum bilgisi çıkartılabilmektedir.

Tez çalışmasında da konu alınan hat tabanlı haritalandırma veri toplama açısından büyük kolaylık sağlar. Toplanan veriler hat boyunca jeomanyetik alanın değişimini içermektedir. Ancak bu haritayı oluştururken birtakım referans noktalarına ihtiyaç

duyulmaktadır. Bölüm 3'deki literatür çalışmasında verildiği üzere birçok çalışmada hattın başlangıç ve bitiş noktalarını tanımlamak için dönüş noktaları makul bir çözüm olarak ele alınmıştır. Koridor başlangıç ve bitiş noktaları arasında genellikle sabit hızla veri toplamak mümkündür.

Konum belirleme uygulamaları için önerdiğimiz yöntem toplanacak sinyalin değerlendirilmesi fazında işlem yükünü azaltma yönünde avantaj sağlamaktadır. DTW ve benzeri esnek arama yöntemleri ayırt edici izlerin farklı örnekleme oranlarında alınabileceği koşulu sağlamaktadır. Harita oluşturulurken belirlenen ölçek ile konum belirleme sırasındaki ölçeklendirme aynı olması durumunda; sistemin işlem yükü azalmaktadır. Adım uzunluğuna bağlı veri ölçeklendirme ile konum belirleme algoritması işlem yükünü azaltmaktadır. Toplanan verinin değişken bir uzunlukta saklanması karşılaştırılacak veri ile benzerlik araması sırasında işlem yükünü artırmaktadır.

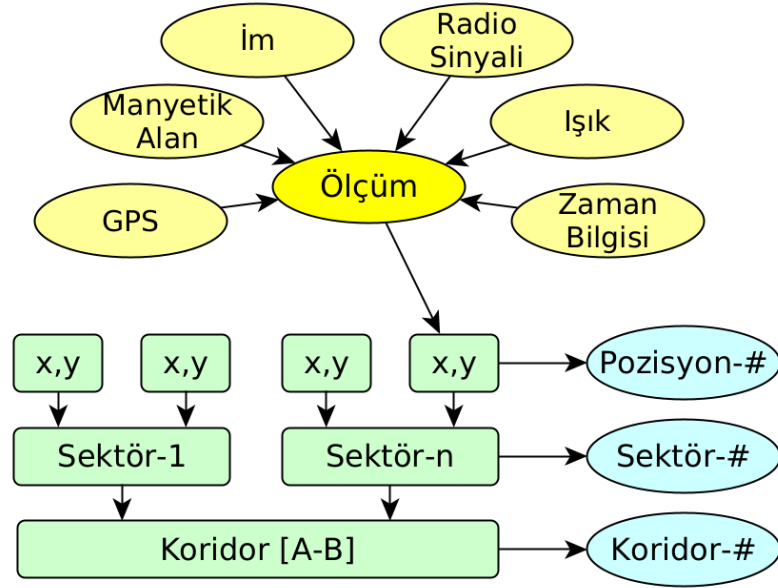


Şekil 4.6 İç mekan haritası oluşturma adımları

Şekil 4.6'da manyetik parmak izleri için harita oluşturma adımları verilmiştir. Harita verisi konum ile iç mekana dair ayırt edici özellik uzamsal olarak ölçeklendirilerek kaydedilir. Tez çalışmasında ayırt edici özellik olarak manyetik sensör verisi kullanılmaktadır. Manyetik sensör verisi konum bilgisi ile eşleştirilmiş şekilde harita veri tabanı oluşturulur.

İç mekan konum belirleme için kullanılacak bir harita, önceden tanımlanmış öğelerin küçük parçalarını gerektirir. Bu öğeler sektörler, koridorlar ve katlar gibi küçükten büyüğe alanların tanımlanması ile oluşturulabilir. Harita veri tabanı oluşturulurken belli kabullerde bulunmak gerekmektedir. Tanımlanmış olduğumuz harita için en küçük birim sektördür. Sektörler düz bir yürüme hattı üzerinde yaklaşık 10 adım uzunluğunda parçalar olarak tanımlanmıştır. Sektörler birleşerek koridorları

oluşturur. Koridorlar dönüş noktaları ile algılanan düz bir hattı tanımlar. Şekil 4.7'de haritanın bileşenlerini içeren bir görsel paylaşılmıştır [72].



Şekil 4.7 Harita veri yapısı

Dönüş noktaları belirleyici bir iz olarak ele alındığında, koridorun başlangıcını veya sonunu tanımlamak için kullanılabilir. Eğer harita verisi çıkartılacak iç mekan döngü şeklinde ise tüm kat tek bir hat olarak değerlendirilebilir. Konum bilgisi ile birlikte o konuma ait ayırt edici iç mekan özelliğine sahip ısı, ışık, manyetik alan, radyo sinyal yoğunluğu gibi verilerin toplanması ve konum verisi ile ilişkili bir şekilde kaydedilmesi gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında sadece jeomanyetik alan bileşke büyüklüğü ayırt edici iz olarak kullanılmıştır.

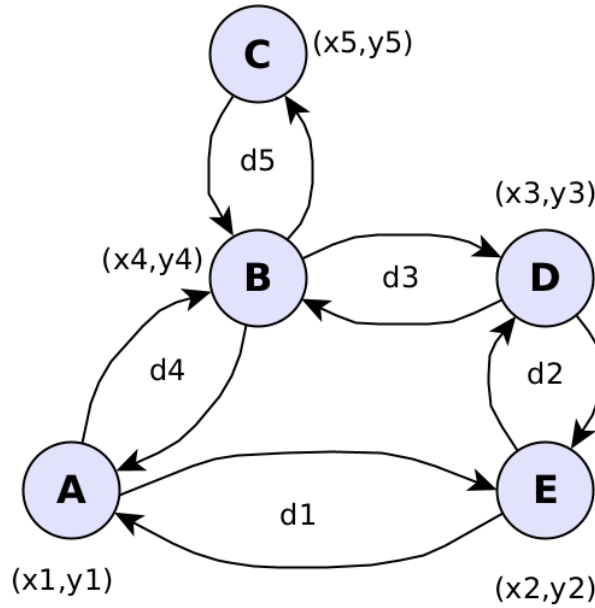
Harita veri tabanı örneklenen işaretler ile ilişkilendirileceğinden bir ölçeğe ihtiyacı vardır. Harita konum bilgisini içermektedir ve bu ölçeğe göre veri toplanmalıdır. Tez çalışmasında ölçek olarak metre başına 100 örnek (1 örnek/cm) olarak seçilmiştir. Toplanacak konuma dair ayırt edici bilginin örnekleme frekansına göre bu değer değiştirilir veya alınan örnekler ara değerlendirme ile çoğaltılması mümkündür.

Birçok iç mekan ayırt edici özelliği anlık değişimlerden veya sensörlerden gelen gürültülerden etkilenmektedir. Harita veri tabanı oluşturulurken bu durum dikkate alınarak veri dizisi üzerinde filtreleme yapılması ve verinin temizlenmesi önem arz etmektedir. Burada konum bilgisi ile eşleştirilen verinin ilgili pozisyon temsiliinde kayma olmaması için işaretin fazına etki etmeyen, gecikmeye sebep olmayan bir filtre seçilmesi gerekmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda Savitzky-Golay Filtresi [73] bu özelliği sağladığı görülmektedir. Savitzky-Golay filtresi ardışık alt bileşenlerin komşu noktalarına düşük dereceli polinomlar ile birlikte doğrusal olarak en düşük

karesel farklar yöntemini uygulayan evrişim temelli bir filtredir.

Literatürde yer alan [44] çalışmada Savitzky-Golay Filtresi filtrenin harita verisi oluşturulurken ki başarımı kayan pencereci ortalama filtre, butterworth, wavelet tabanlı gürültü azaltım filtresi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre butterworth filtresi oturma zamanı ve gecikme isterleri uygulama özelinde yeterli olduğu için başarılı olmasına karşın, Savitzky-Golay filtresinin oturma zamanı ve gecikmesi düşük bir filtre olarak ayırt ediciliği artırdığı gözlemlenebilir. Önerdiğimiz uygulamada toplanacak verinin birden çok bileşeni olabileceği için Savitzky-Golay filtresi kullanılması tercih edilmiştir. Harita ölçeğine uygun olması adına adım uzunluğu ile ilişkilendirilmiş bir pencere boyutu tanımlanmış ve polinom derecesi 3 olarak seçilmiştir.

Harita veri tabanının verimli kullanımı için harita bir çizge (graph) veri yapısı olarak ele alınmıştır. Koridorlar çizge üzerinde kenarlar olarak ifade edilir. Dönüş noktaları da çizgenin düğüm noktaları olarak ele alınır. Koridorlar komşuluk ilişkisine dayalı bir çizge üzerinde yansıtıldığından, harita üzerinde bir arama yapılması gerektiğinde tüm verileri taramak yerine komşuluk ilişkisi gözetilerek arama yapmak, koridorlar arası geçiş sırasında sistemin işlem yükünü azaltır. Çizge üzerinde koridorların temsiline yönelik bir görsel Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Çizge üzerinde dönüşler ve koridor ayrımı

Verilen şekilde dönüş noktaları (A,B,C,D,E) koridorun başlangıç ve bitiş noktalarını tanımlar. Bu noktalar çizge üzerine düğüm noktaları olarak tanımlanır. Koridorların başlangıç noktaları verilen çizgede (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , (x_5, y_5) noktaları ile saklanmaktadır. d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5 ile verilen çizgenin bağlantı veya

köşe noktaları da manyetik verisi toplanan koridorları temsil etmektedir. Hat boyunca manyetik verinin değişimi konumla ilişkili olarak kayıt altındadır. Bir koridordaki yönelimine göre iki farklı kayıt tutmak gerekmektedir. Örneğin A-B koridorunu temsilen d_4 veri dizisi aynı zamanda B-A arasındaki hareketi de temsil etmektedir.

Her koridor ardışıl olarak yer alan sektörlerden oluşur. Bu sektörlerdeki benzerlik olasılıksal veri ilişkilendirme (Probabilistic Data Association - PDA) filtresi ile takip edilmektedir. Manyetik verilerin benzersiz doğası, öngörülemez veri çeşitliliğine de neden olur. PDA, farklı bölgelerde benzer etkiye sahip noktaları ayırt etmek için çözüm olarak sisteme eklenmiştir. Benzerlik araması sonucunda benzer manyetik izlere sahip farklı noktalar olabilir ancak sektörler bölünmüş bir harita üzerinde sektörler arası geçişin olasılıksal değerlendirilmesi hata olasılığını azaltır. Olasılıksal veri ilişkilendirme filtresi yayanın hareketini dikkate alarak bir sektörden diğer sektöre geçişini normal dağılmış bir olasılık yoğunluk fonksiyonu ile denetlemektedir.

Sistemin başlangıç koşullarında yardımcı GPS, iBeacon, RF-ID gibi veriler kullanıcının kat tespiti veya ilk konumunun tutarlı tayini için destekleyici olarak kullanılabilir. Eğer ki yardımcı bir veri ile sistem ilklendirilemez ise tüm koridor ve koridorlara bağlı sektörler içerisinde arama yapılarak en yakın olan sektör başlangıç noktası olarak seçilerek arama sürdürülür. Benzerlik aramaları kat içindeki tüm noktalarda yapılır ve veri ilişkilendirme filtresi yardımıyla önce ilgili koridora daha sonra ilgili sektöre indirgenir. Bir takip filtresi olan konumlandırılan UKF (Uncented Kalman Filter) kullanılarak sektörde izlenen yol için son alınan veriye bağlı konum öngörüsü yapılır.

4.6 Matrix Profile ile Jeomanyetik İz Eşleme

MASS algoritması temelde benzerlik metriği oluşturmak için öklit uzaklığını kullanmaktadır. Oluşturulan metrik normalize bir şekilde 0 ve 1 arasında değerler vermektedir. Benzerlik fazla ise ölçülen uzaklık azalmakta ve 0'a yakınlığı artmakta, fazla ise azalmaktadır.

Karşılaştırma işlemi için evrişim (self-correlation) yöntemini kullanmaktadır. Evrişim matematiksel olarak çok fazla işlem yükü gerektirmektedir. İki işaretin evrişimi için birbiri üzerinde kayan pencere olarak çarpma ve toplama işlemi gerekir. Ama evrişim teoremine göre frekans uzayında nokta çarpımı, zaman uzayında evrişimine karşılık gelir. Bu özellik sayesinde hızlı bir şekilde benzerlik ilişkisi çıkartmak mümkün olabilmektedir. MASS algoritması bu yöntemi FFT (Fast Fourier Transform) yöntemi kullanarak ve işareti normalize ederek benzerlik ilişkisini çıkartmaktadır.

$x = x_1 \dots x_n$ ve $y = y_1 \dots y_n$ şeklinde verilen iki vektör için

$$\widehat{x}_1 = \frac{x_i - \mu_x}{\sigma_x}, \widehat{y}_1 = \frac{y_i - \mu_y}{\sigma_y} \quad (4.7)$$

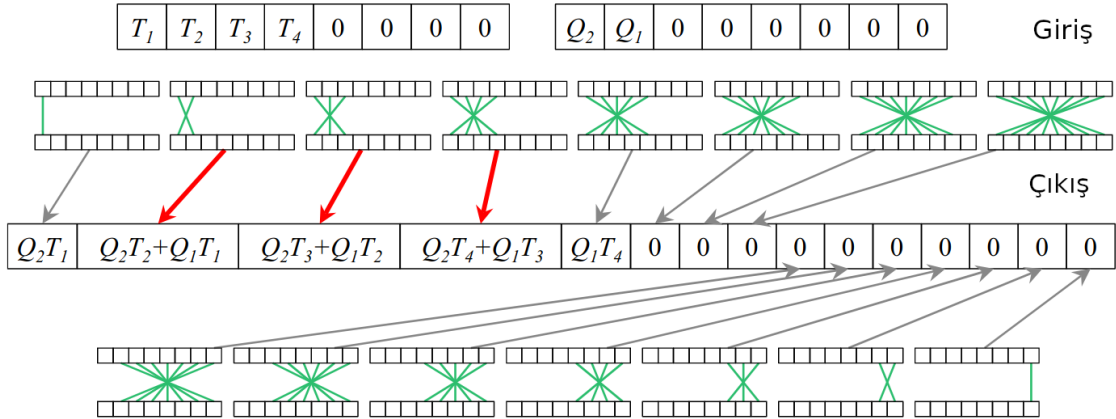
şeklinde z-normalize edildiğini düşündüğümüzde (istatistiksel normalizasyon) Euclidean distance (l2-norm)'a göre eşitlik (4.8)'de verilmiştir.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\widehat{x}_i - \widehat{y}_i)^2} \quad (4.8)$$

z-normalizasyonu ile öklit uzaklığı eşitlik (4.9)'da verilmiştir.

$$D[i] = \sqrt{2m \left(1 - \frac{QT[i] - m\mu_Q M_T[i]}{m\sigma_Q \sum_T[i]} \right)} \quad (4.9)$$

Bu işlemi hızlandırmak için Şekil 4.9'da verildiği gibi sıfır ile doldurulmuş halde FFT dönüşümü alınarak mümkündür. Bu yöntemin diğer bir avantajı da işaretin tersten uygulandığında dahi benzerliğe ilişkin bilgi vermektedir. Bu özelliği algoritma tasarımında FFT veya evrişim kullanıldığı için mümkün olmaktadır. Aynı zamanda bizim senaryomuz bir hat üzerinde tersten ilerleyen birisini de anlamak için faydalı olmaktadır.



Şekil 4.9 Sıfır dolgulama ile FFT ve evrişim işlemi[74]

Jeomanyetik parmak izi her yerde bulunur ve iç ortamdaki herhangi bir yer için öngörülemez bir bozunuma uğrayabilir. Yaya hareket ederken, her bir adım eylemi ile manyetik veriler toplanır ve toplanan verilerle bir veri tabanındaki benzerliği çıkarmak için iyi bilinen bir yöntem olan öklid mesafesi kullanılır. Matrix-Profile[65] ismiyle tanıtılan algoritma, manyetik dizi tabanlı konum belirleme işleminde kullanılır. Matrix-profile mesafesine göre; iki zaman serisi, eşleşen alt dizilerin sırasına

bakılmaksızın, birçok benzer alt diziyi paylaşıyorsa benzerdir.

Matrix-profile ile tanımlanan uzaklık metriği sayesinde z-normalize öklid uzaklığı ve en yakın komşu (mesafe indeksi) elde edilir. Manyetik veri tabanı ile yaya manyetik verisi arasındaki benzerlik taraması ile manyetik veri tabanında en yakın uzaklıklı yol kesitleri bulunur. Bu vektör uzaklığı, verilen manyetik dizi için benzerlik puanı olarak kullanılır.

Hem Matrix-Profile hem de popüler DTW, bir dizinin diğerini içerdiği varsayımına dayalı olarak iki sinyalin vektör mesafesini ölçmeye izin verir. Ancak Matrix Profile algoritması, DTW'ye göre aşağıdaki avantajlara sahiptir.

1- Matrix-Profile DTW'den çok daha hızlıdır ve $O(n^2)$ [75] ile karşılaştırıldığında $O(n \log n)$ zaman karmaşıklığına sahiptir.

2- DTW parametre olarak bir çarpıtma penceresi gerektirir ancak Matrix-Profile ihtiyaç duymaz. Bu çarpıtma parametresi, özelliği bilinmeyen sinyaller için de kritiktir ve farklı kullanım durumları için değerlendirilmelidir. Jeomanyetik alanın kapalı alandaki bozunumun tahmin edilmesi çok zor olmakla birlikte geniş bir çarpıtma penceresi ile kullanımı mümkündür. Teze konu olan uygulamada DTW kullanırken daha büyük bir çarpıtma penceresi, farklı konum noktalarının yanlış sınıflandırılmasına neden olabilir. Bu etkiler [75]'de incelenmiştir.

Tez kapsamında kullanılan yöntem için aşağıda bazı kabuller paylaşılmıştır.

Tanım 1: Sıralı bir manyetik veri \mathcal{M} , uT biriminde verilen gerçek değerli sayıların bir dizisidir. $m_i : \mathcal{M}_i = m_1, m_2, \dots, m_n$ burada n , M 'ın uzunluğudur.

Bir yaya konumu belirlerken toplanan manyetik hat verisi ile yerel eşleme yapılmaktadır.

Tanım 2: \mathcal{M} öğesinin $\mathcal{S}_{i,j}$ alt dizisi, \mathcal{M} uzunluğundaki değerlerin sürekli bir alt kümesidir i konumundan başlayarak $i - j + 1$ 'e kadar olan verileri içermektedir ve $\mathcal{S}_{i,j} = m_1, m_2, \dots, m_{i+j-1}$ şeklinde ifade edilir, burada $i \in [1, i - j + 1]$ aralığındadır.

Manyetik veri tabanında verilen herhangi bir diziyi araştırabilir ve normalize edilmiş mesafe değeri olarak konum bilgisi veren benzerlik sonucunu elde edebiliriz.

Bu çalışmada, harita eşleştirme için çizge bazlı bir veri tabanında önceden depolanmış sinyaller kullanılmıştır. Literatürde manyetik sinyalin M_z , M_{xy} , M_{xyz} bileşenini kullanmak için çözümler vardır, ancak M_{xyz} bileşeni yönelimden bağımsız olarak elde edilebilmesi ve tek boyutlu katarın işlenmesi daha az işlem yükü getireceği için tercih

edilmiştir.

Koridor boyunca hareket halindeki yayanın ve koridorun manyetik parmak izi ile benzerlik arayışı Şekil 4.10'de verilmiştir. Kırmızı ile verilen vektör yaya hareketi sırasında toplanan verileri, yeşil grafik harita bilgilerini, mavi vektör ise matrix-profile algoritması ile elde edilen benzerlik bilgilerini göstermektedir. Karşılaştırma sonucunda en yakın uzaklık benzerliğin en yüksek olduğu yeri göstermektedir. En yüksek benzerlik noktası ve arabellek verilerinin uzunluğu ile ilişkili olarak, yayanın mevcut konumu hesaplanır.



Şekil 4.10 Matrix-profile benzerlik sorgulaması

Sistemin verimliliğini dikkate almadığımızda toplanan verilerin tamamının benzerlik araması için kullanılması ihtiyaç duyulmayan işlem yapılmasına sebep olarak güç tüketimini ve tepki süresini artırmaktadır. Bu durum birçok haritanın veri tabanında olması veya uzun koridorlar içerisinde benzerlik taraması yapılması durumunda öngörülemeyen gecikmelere sebep olarak uygulanabilirliğini riske atmaktadır. Bu probleme bir çözüm bulmak ve konum belirleme hassasiyetinden ödün vermeden ön görülebilir bir sistem oluşturmak için değişken uzunluklu bir bellek ile arama yöntemi önerilmiştir.

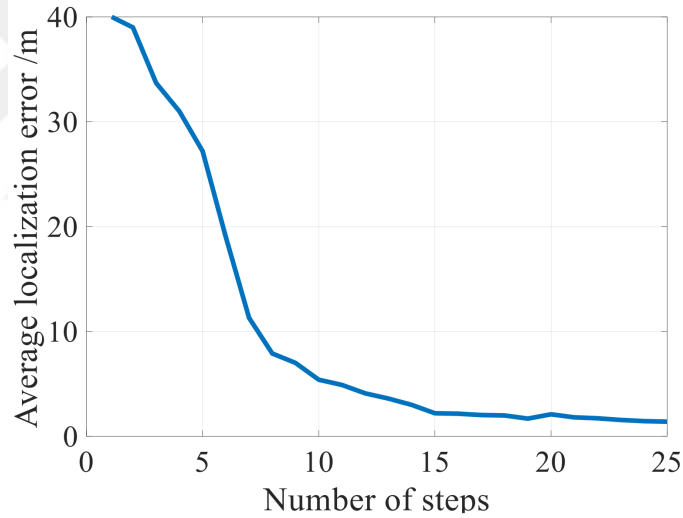
Bu yöntemle göre bellek boyunu 3 parametre belirler bunlar;

- **Bellek değişkesi:** Bellek içerisindeki verilerin değişkesi dikkate alınır. Bu sayede manyetik izlerdeki değişim artınca ayırt edilebilirlik artmaktadır. Eğer ki değişke düşük ise bellek boyutunu artırmak sistem başarımını artırmaktadır. Daha yüksek değişkeye sahip vektör içeriği, daha fazla manyetik çeşitlilik ve ayırt edilebilir bir özellik içeriği sağlar.
- **Bellek minimum uzunluğu:** Bellek için minimum uzunluk yine adım cinsinden ele alınmıştır. Birçok koridor için 15 adım kısa bir mesafedir ve toplanan veriler üzerinde yapılan simülasyonlarda 15 adım mesafesinde toplanan verilerin

yeterli bir ayrıştırılabilir işaret oluşturduğu görülmüştür. Bellek boyutu 15 adımdan kısa olmaması sağlanmakta ve değişkesinin düşük olması durumunda biriktirdiği verinin artmasına izin verilmiştir.

Benzer bir sonuca literatürde değinilmekle birlikte bir öneri getirilmemiştir. Örneğin LiMag [55] olarak isimlendirilen çalışmada konum hassasiyetinin adım sayısına göre değişimi verilmiş ve 15 adım uzunluğundaki verinin DTW algoritması ile hata değişim grafiği Şekil 4.11'de paylaşılmıştır.

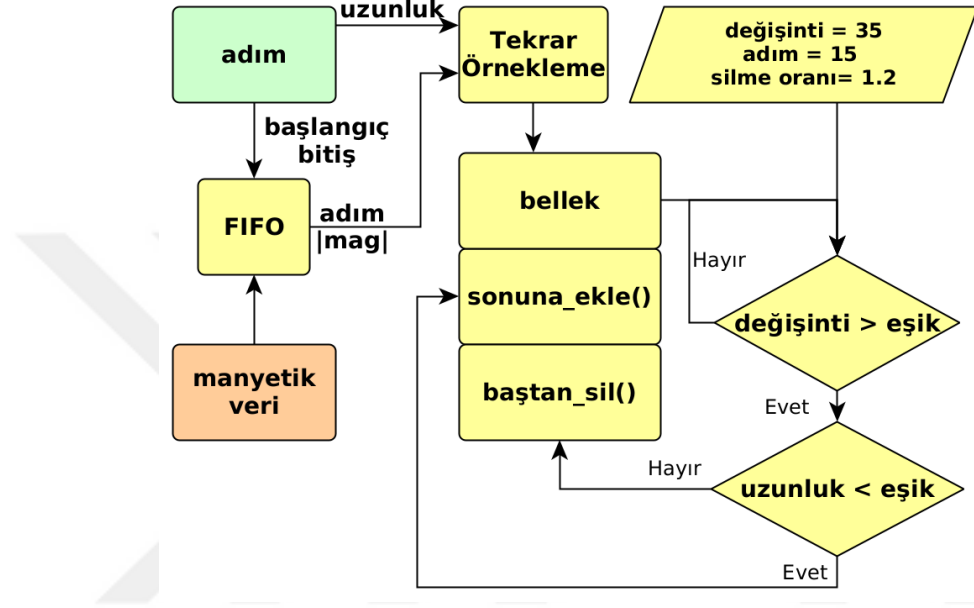
- **Bellek silme katsayısı:** Dinamik bellek yeni gelen veriyi her zaman eklemesi gerekmektedir. Çünkü kullanıcı yer değiştirmektedir. Yeni konumun bulunabilmesi için eklenen veri kadar da unutulması gerekmektedir. Ama bellek boyutu değişken olduğu için eğer tüm şartları sağlıyorsa belirli bir hızda bellekten silinmesi sağlanmalıdır. Bu değer 1'den büyük olması minimum boyutu sağlaması için önemlidir. Birçok testte bellekten silme oranını 1 : 1.2 olarak seçilmiş ve işletilmiştir [76].



Şekil 4.11 Eşleşme hassasiyeti ve hat uzunluğu ilişkisi [55]

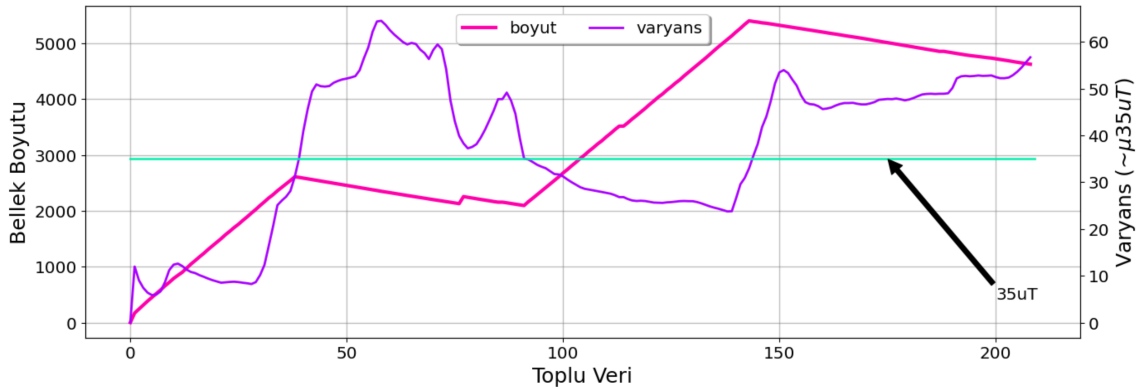
Benzerlik hesabı için iki verinin aynı uzunlukta ve uzamsal olarak normalize edilmiş olması gerekir. Değişken uzunluktaki veriler üzerinde çalışmak için elastik arama yöntemleri tercih edilir. Önerilen yöntemimiz, adım uzunluğuna göre uzaysal normalizasyonu kullanır. Uzamsal normalizasyon kullanılarak, işlem yükü azaltılır ve karmaşıklık $O(n^2)$ 'den $O(n \log n)$ kadar azaltılır [75]. Harita verileri oluşturulurken değişken uzunluklu bellekte toplanan verilerin uzamsal normalizasyonu ile bu sorunu ortadan kaldırır. Tez çalışmasında 1 örnek/cm ölçeği seçilmiştir. Uzunluğa göre normalize edilmiş manyetik vektörlerin birleştirilmesiyle oluşturulan harita benzerlik araması için kullanılır.

Dinamik uzunluklu bellek çalışma prensibine dair akış diyagramı Şekil 4.12'de verilmiştir. Toplanan verilerin değişkesinin düşük olduğu yollarda ($< 35\mu T$), en fazla veri uzunluğuna ulaşılan kadar (> 15 adım) veri boyutu artar. Değişke istenilen seviyelere ulaştığında 1,2 oranında hafızadaki eski veriler silinmeye başlanılır. Bu silme işlemi oransal olarak eklenen verinin tanımlanan katı kadar (1,2 katı) yığın kuyruğundan atılır. Örneğin 50 sensör örneği eklenirken 60 sensör örneği silinmesi sağlanır.



Şekil 4.12 Değişken uzunluklu benzerlik arama belleği

Şekil 4.13 bu ilişkiyi görselleştirmektedir. Kullanıcıdan toplanan verinin değişkesi incelenir ve eğer ayırt edicilik fazla ise bellek uzunluğu kısaltılır. Bellek yönetimi için değişkesinin eşik değeri $35\mu T$ olarak alınmıştır. Bu değer Dünya'nın ortalama manyetik alanı $25\mu T$ ile $65\mu T$ arasında değiştiği düşünüldüğünde ortalamaya yakın bir değerdir.



Şekil 4.13 Bellek boyutu ve bellek içindeki verinin değişkesi

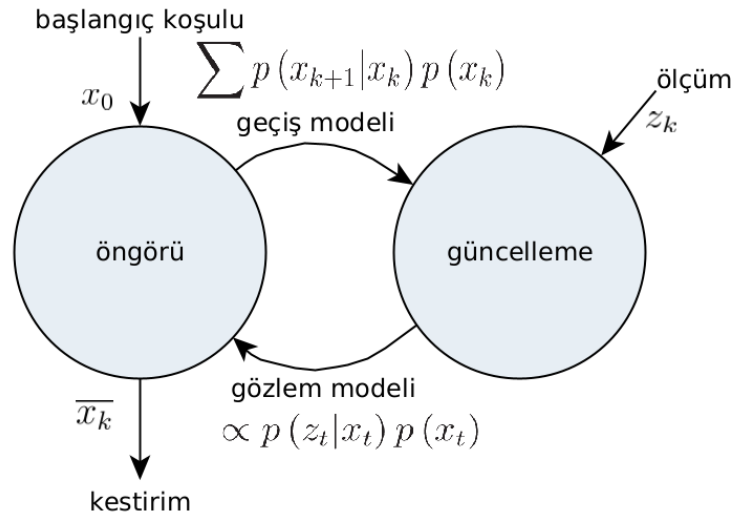
Bu sayede benzerlik aramasında kullanılacak verinin boyutu küçülür ve güç verimliliği

artar. Kişi takibinde öncelikle tüm koridorlarda harita ile eşleştirilmesi için benzerlik araması yapılır ve uzaklık vektörü çıkartılır. Daha sonra bu koridor içerisindeki en uygun sektör PDA (Probabilistic Data Association) kullanılarak doğrulanır ve kullanıcı, UKF yardımı ile takip edilir.

4.7 Bayes Filtreleme Yöntemi

Bölüm 4.5’de manyetik veri tabanının koridorlar ve bu koridorları oluşturan sektörlerle tanımlanmakta olduğuna değinilmişti. Bu sektör sayesinde kullanıcının konumunu ön görmek için ızgara tabanlı [77] bir takip filtresi önerilmiştir. Kullanıcıdan toplanan veri ile harita eşleme yapıldığında benzerliği yüksek olan noktalar içerisinde takibi sağlamak için Bayes filtreleme yöntemini kullanılmaktadır. Bayes Filtreleme olasılıksal yenilemeli bir filtredir.

Sistem durumu ve geçiş akışı için bir grafik model Şekil.4.14’da verilmiştir. Başlangıç koşulu x_0 olan ve her bir ölçüm (z_k) alındığında buna bağlı gözlem modelini (observation model) kullanarak durum değişkeni x_k 'yi güncellemektedir. Bu güncelleme sonrasında yeni durum değişkeni, durum geçiş modeli (transition model) ile güncellenmektedir. Örneğin bir benzerlik araması sonucunda her bir sektörün birbirinden bağımsız olarak eşleştirme uzaklığı hesaplanır ve bu uzaklık ile doğru orantılı olarak olasılık dağılım fonksiyonu elde edilir. Bu olasılık yoğunluk fonksiyonu şu anki seçilen sektör ve sektörden başka bir sektöre geçme olasılığı ile çarpılarak (durum geçiş modeli)’da ölçüm sonucundaki en uygun sektör seçilmiş olur.



Şekil 4.14 Yinelemeli bayes filtresi öngörüsü

Bayes filtresinde durumu her k adımı için bir rastgele değişken (x_k) ile temsil edilir. Bayes filtresinin arkasındaki fikir, sensör ölçümlerinden gelen bilgilere göre sistem

yeni durumunu öngörmektedir. Bu durum değişkeni eşitlik (4.10) içinde verildiği gibi temsil edilmektedir. Bayes filtresi aslında Markovian [78] olarak anılan bir süreçtir ve mevcut durum önceki sonuçlara bağlıdır.

$$x_k = p(x_k | x_0, \dots, x_{k-1}) = p(x_k | x_{k-1}) \quad (4.10)$$

Yeni bir ölçüm z_k sistem çıkışından koşullu olarak bağımsız olduğu varsayımı ile eşitlik (4.11)'deki gibi tanımlanır.

$$z_k = p(z_k | x_0, \dots, x_k) = p(z_k | x_k) \quad (4.11)$$

Eşitlik (4.12)'de çarpanlarına ayrıştırılmış birleşik olasılık dağılım fonksiyonu verilmiştir.

$$p(x_0, \dots, x_k, z_1, \dots, z_k) = p(x_0) \prod_{i=1}^k p(z_i | x_i) p(x_i | x_{i-1}) \quad (4.12)$$

Önceki konum ve ölçümlere dayalı olarak yaya mevcut konum öngörüsü eşitlik (4.13)'de verilmiştir.

$$p(x_k | z_{1:k-1}) = \int p(x_k | x_{k-1}) p(x_{k-1} | z_{1:k-1}) dx_{k-1} \quad (4.13)$$

Her bir ölçüm alındığında sistem durum değişkeni öngörüsü eşitlik (4.14)'de verilmiştir.

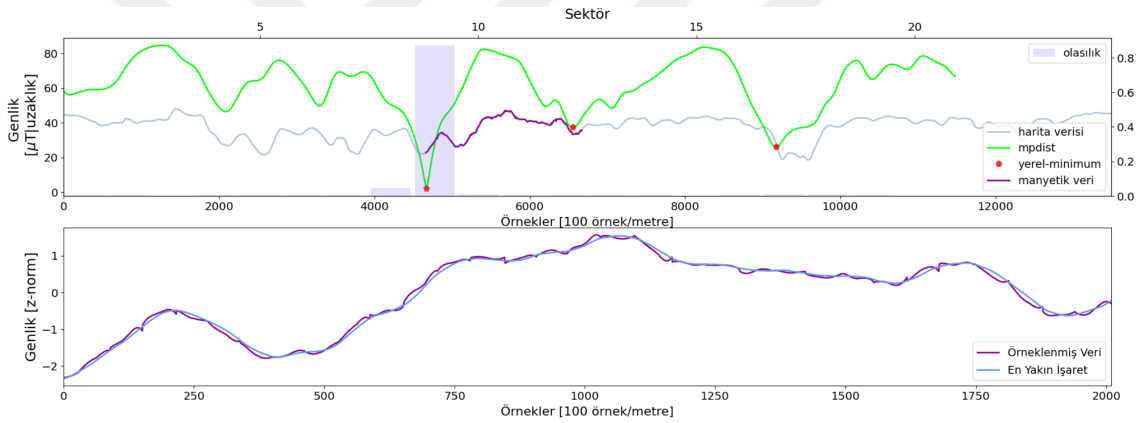
$$\underbrace{p(x_k | z_{1:k})}_{\text{öngörü}} = (1/c) \underbrace{p(z_k | x_k)}_{\text{ölçüm}} \int \underbrace{p(x_k | x_{k-1})}_{\text{durum geçişi}} \underbrace{p(x_{k-1} | z_{1:k-1})}_{\text{bilinen durum}} dx_{k-1} \quad (4.14)$$

(4.15)'de verilen Bayes Teoremi'ne göre, güncel sistem çıkışı önceki değerler ve öngörü ile orantılı ($posterior \propto likelihood \times prior$) varsayımını yapılarak belirlenebilir. Arama yapılan koridor içerisinde sektörlere dair olasılıksal dağılımı içerisinde en uygun olanı en yüksek olasılığa sahip olmalıdır. Yayaların konumunu belirlemek için en yüksek olasılıklı sektör filtre öngörüsü sonucunda elde edilir. Bunun için eşitlik (4.16)'dan yararlanılır ve MAP (Maximum a Posteriori) değeri hesaplanır.

$$p(x|z) = \frac{p(z|x)p(x)}{p(z)} = \frac{p(z|x)p(x)}{\int_x p(z|x)p(x)} \quad (4.15)$$

$$\hat{x}_k^{MAP} \equiv \underset{x_k}{\operatorname{argmax}} [p(x_k|z_k)] \quad (4.16)$$

Tez çalışmasında bayes filtresini kullanmak için ızgara tabanlı yaklaşım kullanılmıştır. Yaya konumu öngörüsü için, ızgara tabanlı filtreler ortamı küçük alanlara sektörlere bölünmesi sonucunda oluşturulur [77]. Haritadaki sektörler koridorun uzunluğuna göre bölünmüştür. Tez çalışmasında harita üzerindeki sektör uzunluğu 10 adım uzunluğunda toplanan veriler ile oluşturulmaktadır. Şekil 4.15'da görüldüğü gibi, benzerlik karşılaştırılarak çok sayıda olası eşleşme elde edilmiştir. Olasılıksal Veri İlişkilendirme Filtresi, elde edilen bu konumlardan hangisinin en uygun olduğunu seçmek için istatistiksel olarak yayanın konumunu değerlendirmektedir.



Şekil 4.15 Birden çok minimum noktalı benzerlik araması

4.8 Kalman Filtreleme Yöntemi

Genişletilmiş Kalman Filtresinde (EKF) olduğu gibi, UKF'deki durum uzayını temsil etmek için bir dönüşüm kullanılır. EKF'de durum uzayı modeli Taylor Serisi ile tek bir noktada doğrusallaştırılırken, UKF'de durum uzayı birden çok nokta ile temsil edilmektedir. Bu noktalar, doğrusal olmayan bir durum geçiş işlevi [79] için hesaplanır ve dönüştürülür.

Rastgele bir değişkenin $\mathcal{Y} = f(x)$ olarak tanımlanan doğrusal olmayan bir fonksiyon aracılığıyla yayıldığı varsayılır.

$2L + 1$ sigma vektörleri (X_i), ortalama \bar{x} ve ortak değişke P_x ile $f(x)$ fonksiyonunun çıktısını hesaplamak için tanımlanır.

[80]'ye göre, sigma noktaları (4.18) ve (4.19) yardımıyla hesaplanır, burada \bar{x} 'in ortalaması (4.17)) \mathcal{X}_i ortalamasına eşittir.

$$\mathcal{X}_i = \bar{x} \quad (4.17)$$

$$\mathcal{X}_i = \bar{x} + \left(\sqrt{(L + \lambda) P_x} \right)_i, i = 1, \dots, L \quad (4.18)$$

$$\mathcal{X}_i = \bar{x} - \left(\sqrt{(L + \lambda) P_x} \right)_{i-L}, i = L + 1, \dots, 2L \quad (4.19)$$

Bu fonksiyonlar bundan sonra $\mathcal{X} = \text{sigma}(\bar{x}, P_x)$ olarak ifade edilecektir.

Ağırlıklar $W_0 + \sum_{i=1}^{2L} W_i = 1$ olarak değerlendirilebilir. Sigma noktası ağırlıklarını hesaplamak için (4.20) (4.21) ve (4.22) kullanılır. Önerilen yöntemde, [80] referansında verilen Merwe Ölçeği Sigma noktasını kullanılır.

$$W_0^m = \lambda / (L + \lambda) \quad (4.20)$$

$$W_0^c = \lambda / (L + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \quad (4.21)$$

$$W_i^m = W_i^c = 1 / \{L + \lambda\}, i = 1, \dots, 2L \quad (4.22)$$

Bu fonksiyon artık ağırlıkları hesaplamak için kullanılan $W^c, W^m = \text{weight}(L, \text{parameters})$ olarak tanımlıdır, burada boyut için L tanımlıdır ve parametreler ağırlıkları hesaplamak için gerekli değişkenler olan α, β ve κ 'dir. Tez çalışmasında parametreleri $\alpha = 0.1, \beta = 2$ ve $\kappa = 0$ olarak seçilmiştir.

W_i katsayılarıyla ağırlıklandırılmış sigma noktaları kullanılarak, ilgilenilen fonksiyonun ortalaması ve ortak değişkesi sırasıyla (4.24) ve (4.25) ile hesaplanır.

$$\mathcal{Y}_i = f(\mathcal{X}_i), i = 0, \dots, 2L \quad (4.23)$$

Bu şekilde, (4.24) içindeki fonksiyonun ortalama değeri elde edilir, diğer bir deyişle posterior ve (4.25) ile posterior ortak değişkesi elde edilir.

$$\bar{x} \cong \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \mathcal{Y}_i \quad (4.24)$$

$$P_x \cong \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \{\mathcal{Y}_i - \bar{x}\} \{\mathcal{Y}_i - \bar{x}\}^T + \mathcal{Q} \quad (4.25)$$

Uncented dönüşüm fonksiyonunu $\bar{x}, P_x = transform(\mathcal{Y}, W^m, W^c, \mathcal{Q})$ olarak tanımlanır. Öngörü adımı, bu işlevden geçirilen önceki, ağırlıklar ve \mathcal{Q} işlem gürültü ortak değişkesi ile gerçekleştirilir.

Kalman filtresi güncellemesi, (4.26)'da verildiği gibi ölçüm anında yapılır. Burada $h(.)$ ölçüm fonksiyonudur, \mathcal{R} ölçüm gürültüsüdür ve \mathcal{Z} ölçümdür;

$$\mathcal{Z} = h(\mathcal{Y}) \quad (4.26)$$

Eşitlik (4.26) ile ölçüm değerlerini hesaplamak için, tanımlanmış sigma noktaları kullanılarak doğrusal olmayan bir dönüşüm yapılır, böylece ortalama ve ortak değişke değerleri eşitlik (4.29) ile verilmiştir.

$$\mu_z \cong \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \mathcal{Z}_i \quad (4.27)$$

$$P_z \cong \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \{\mathcal{Z}_i - \mu_z\} \{\mathcal{Z}_i - \mu_z\}^T + \mathcal{R} \quad (4.28)$$

$$\mu_z, P_z = transform(\mathcal{Z}, W^m, W^c, \mathcal{R}) \quad (4.29)$$

Kalman kazancı çapraz ortak değişke alınarak hesaplanır. Ölçüm ve durum ortak değişkesi kullanılarak çapraz ortak değişke hesaplaması eşitlik (4.30) içinde verilmiştir.

$$P_{xz} \cong \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \{\mathcal{Y}_i - \bar{x}\} \{\mathcal{Z}_i - \mu_z\}^T \quad (4.30)$$

Kalman kazancı (4.31)'deki gibi hesaplanır.

$$K = P_{xz}P_z^{-1} \quad (4.31)$$

Durum öngörüsü (4.32) içinde verilir ve yeni durum ortak değişke hesaplamasında (4.33) kullanılır.

$$x = \bar{x} + K.y \quad (4.32)$$

$$P = P_x - KP_zK^T \quad (4.33)$$

y , hesaplanan sistem çıkışı ile artık olarak adlandırılan ortalama sistem çıkışı arasındaki uzaklık farkını ifade etmektedir ($y = z_i - \mu_z$).

UKF'nin ilklendirilmesi, öngörü ve ölçüm sonucunda güncellenmesine ilişkin adımlar Tablo 4.1'de verilmiştir. UKF'nin ilklendirilmesi sonrasında sırasıyla öngörü ve güncelleme adımları işletilir. İlklendirme için sistem çıkışı beklenen değer olarak güncellenir. Öngörü fazında sigma noktaları kullanılarak en olası sistem çıkışı bulunur. Güncelleme için ölçüm modeli kullanılarak ölçümlendirilen sinyale göre Kalman kazancı güncellenir.

Tablo 4.1 Unscented Kalman Filtresi (UKF) denklemleri.

Durum	Eşitlik
İlklendirme	$\bar{x}_0 = E[x_0]$ $P_0 = E[(x_0 - \bar{x}_0)(x_0 - \bar{x}_0)^T]$ $\mathcal{R} = \text{VAR}[\bar{x}_0]$ $W^c, W^m = \text{weight}(L, \text{parameters})$ $\mathcal{X} = \text{sigma}(\bar{x}, P_x)$
Öngörü	$\mathcal{Y} = f(x)$ $\bar{x} \cong \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \mathcal{Y}_i$ $P_x \cong \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \{\mathcal{Y}_i - \bar{x}\} \{\mathcal{Y}_i - \bar{x}\}^T + \mathcal{Q}$
Güncelleme	$\mathcal{Z} = h(\mathcal{Y})$ $\mu_z \cong \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \mathcal{Z}_i$ $P_z \cong \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \{\mathcal{Z}_i - \mu_z\} \{\mathcal{Z}_i - \mu_z\}^T + \mathcal{R}$ $y = z_i - \mu_z$ $K = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \{\mathcal{Y}_i - \bar{x}\} \{\mathcal{Z}_i - \mu_z\}^T P_z^{-1}$ $P = P_x - KP_zK^T$

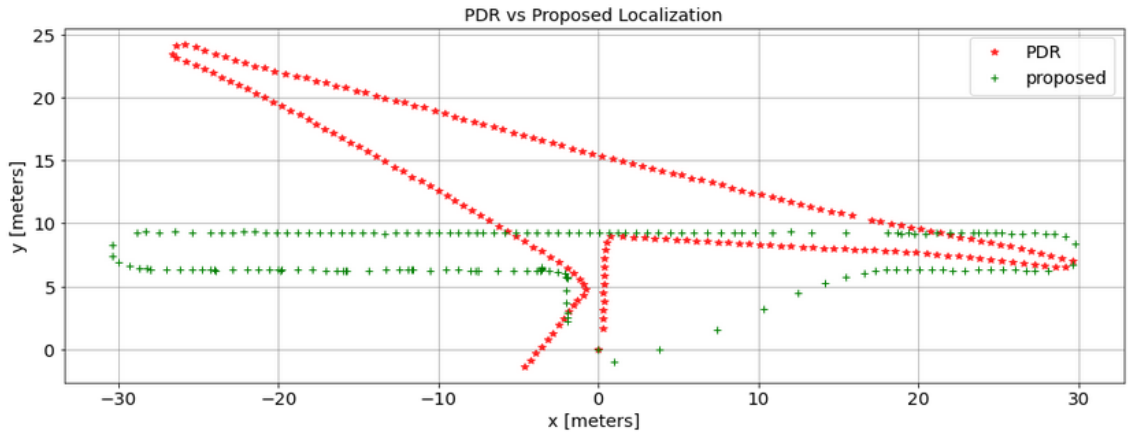
4.9 Kalman Filtresi İçin Sistem Modelinin Oluşturulması

Tez çalışmasında kullanıcı hareketlerine bağlı olarak konum belirlemek için sistem modeli olarak eşitlik (4.34)'de verilen modeli kullanılmıştır. Bu model ile son bilinen konuma bağlı güncel konum bilgisi elde edilirken adım uzunluğu harita eşleme ile normalize edilmektedir.

$$\underbrace{x_{t+1}}_{x_{prediction}} = \underbrace{\begin{bmatrix} l \times \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l \times \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_F \times \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ y \\ l \\ \theta \end{bmatrix}}_{x_t} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_B \times \underbrace{\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ l_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}}_{u_t} \quad (4.34)$$

$$\underbrace{z_t}_{z_{measurement}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_H \times \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ y \\ l \\ \theta \end{bmatrix}}_{x_t} \quad (4.35)$$

Şekil 4.16 incelendiğinde sadece PDR kullanılarak yaya yolunun önemli ölçüde saptığı görülmektedir. Önerilen yöntemde ise hareket halindeki yayanın konumunun bir süre sonra PDR sistemine göre daha düşük bir hata ile belirlenebildiği görülmektedir.



Şekil 4.16 PDR ve önerilen yöntemin karşılaştırılması

5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde Tez çalışması kapsamında tasarlanan sistemin test edilmesi ve değerlendirilmesine yönelik çalışmalar paylaşılmıştır. Alt başlıklarda veri toplama, test ortamlarının tanıtılması ve elde edilen bulgular verilmiştir. Tezde önerilen yöntemin farklı koşullarda doğrulanması için veri kümeleri oluşturulmuş ve oluşturulan veri kümeleri ile elde edilen çıktılar ilgili başlıklarda paylaşılmıştır.

5.1 Veri Toplama

Önerilen yöntem kapalı alan içerisinde kullanıcının bir noktadan başka bir noktaya yönlendirilmesi için bir çözüm önerisi olarak sunulmuştur. Konum belirlemeye ihtiyaç duyulan senaryoda telefonun elde taşındığı varsayımı ile elde ekrana bakarak toplanan veriler ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Önce veriler kaydedilerek bilgisayara aktarılmış ve sonrasında bu veriler toplu veri dosyası olarak parçalara bölünerek işlenmiştir.

Android tabanlı bir akıllı telefon ile kullanıcıdan veri toplamak için senslogs¹ Android uygulaması kullanılmıştır. Önerilen yöntemde kullanılan ivme sensörü, dönel ölçer ve manyetik sensör verileri csv dosyası formatında zaman bilgisi ile birlikte kaydedilmektedir. Veri toplama işlemi sırasında 50Hz örnekleme oranı kullanılmıştır. Toplu veri boyutu için 128 noktalı veri kullanılmıştır. Bu sayede 50Hz olan örnekleme oranı ile yaklaşık 2.5sn'lik toplu veri paketleri işlenmiştir.

5.2 DTW ve MP Zaman Karmaşıklığı Karşılaştırması

Bölüm 3'de verilen literatür araştırmasında sıklıkla esnek arama yöntemlerinin kullanıldığı paylaşılmıştır. Literatürde kullanılan esnek arama yöntemleri kullanıcının hareket halinde olduğunu, yavaş veya hızlı olarak sabit bir yönde ilerlediğini ve bu

¹senslog'lar (2021). Sensör Kaydedici Uygulaması [çevrimiçi]. Web sitesi <https://github.com/tyrex-team/senslogs> [01-2023'de erişildi].

kabuller ışığında elde edilen verinin daha önce oluşturulmuş harita içerisinde yer aldığı varsayımına dayanmaktadır. Eğer kullanıcı hareket halinde değilse elde edilen veri sabit veya az değişiyor olduğu için işaretin uzamsal normalizasyonu ile benzerlik yapmak mümkün olmamaktadır.

Önerdiğimiz yöntemde bu problemleri aşmak ve farklı hızlarda hareket eden kullanıcıların verilerini işleyebilmek için uzamsal normalizasyon yapılmıştır. Uzamsal normalizasyon sonrasında MP yöntemi ile benzerlik bilgisi elde edilmektedir. Bölüm 4’de verilen ve literatürde yer alan zaman karmaşıklığı (DTW için $O(n^2)$ iken MP için $O(n \log n)$ [75]) benzetim koşullarında karşılaştırılmıştır.

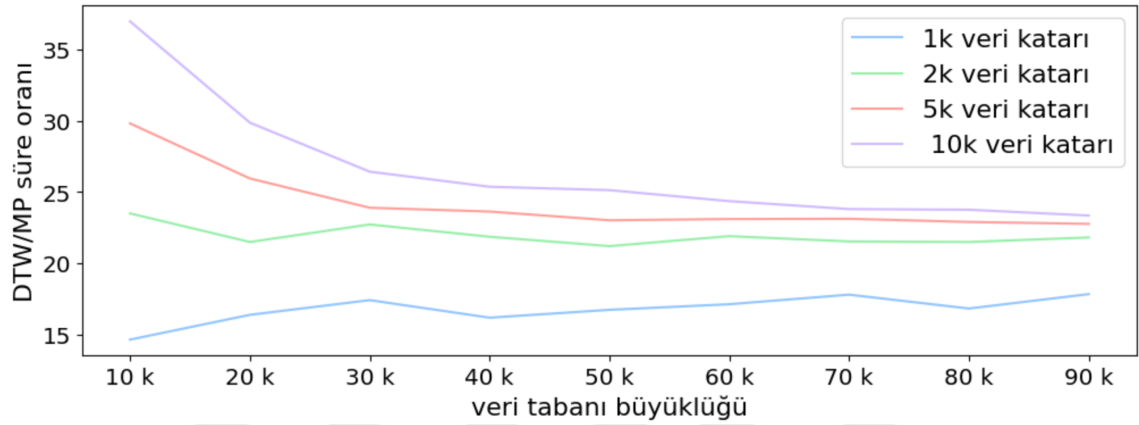
Benzerim zaman karmaşıklığı değerlendirmesi için yapıldığında aynı ortamda benzerlik araması süreleri baz alınarak yapılmıştır. Benzerim python programlama dili kullanılarak yapılmıştır. MP için *stumpy* DTW için de *dtadistance* kütüphaneleri kullanılmıştır. Her iki kütüphane için optimize edilmiş kodların kullanımına dikkat edilmiştir. Benzetimler 64 GB RAM, i7-11800H işlemciye sahip dizüstü bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.1 DTW ve MP benzerlik hesaplama süreleri

Sorgu Boyutu 1000 örnek	20k	40k	60k	80k	100k
DTW	82ms	162ms	240ms	320ms	357ms
MP	5ms	10ms	14ms	19ms	20ms
Sorgu Boyutu 2000 örnek	20k	40k	60k	80k	100k
DTW	172ms	328ms	482ms	645ms	720ms
MP	8ms	15ms	22ms	30ms	33ms
Sorgu Boyutu 5000 örnek	20k	40k	60k	80k	100k
DTW	493ms	898ms	1294ms	1672ms	1867ms
MP	19ms	38ms	56ms	73ms	82ms
Sorgu Boyutu 10000 örnek	20k	40k	60k	80k	100k
DTW	1015ms	1725ms	2436ms	3160ms	3503ms
MP	34ms	68ms	100ms	133ms	150ms

Veriler rastgele örnekler olarak ele alınıp oluşturulmuştur. Jeomanyetik alanın belirsiz olması ve harita veri tabanı içerisinde ilgili yer izinin bulunmaması en kötü senaryo olarak düşünülmüş ve bu doğrultuda benzetim verileri oluşturulmuştur. Veri tabanı ve arama belleği büyüklükleri test yapılan ortamlara benzer olarak seçilmiştir. Veri tabanı büyüklüğü olarak 20k, 40k, 60k, 80k ve 100k örnek, arama katarı olarak 1k, 2k, 5k ve 10k uzunluğunda veriler denenmiş ve sonuçları Tablo 5.1’de paylaşılmıştır.

Şekil 5.1’de DTW ve MP yöntemleri kullanılarak elde edilen işlem süreleri oranı verilmiştir. Tablo 5.1 ve Şekil 5.1 incelendiğinde MP algoritmasının daha hızlı cevap verdiği ve daha az işlem ile benzerlik araması yapabildiği görülmektedir. Arama verisi boyutu küçüldükçe daha az işlem yapıldığı için DTW’in performansının arttığı görülmektedir. Bu sebeple Bölüm 3 incelendiğinde bir çok çalışmada, kullanıcıdan toplanan veri küçük parçalara bölerek benzerlik araması yapılmıştır. Aynı zamanda tez çalışmasında önerilen değişken uzunluklu karşılaştırma belleği MP yöntemi ile kullanıldığında da sorgulanacak verinin boyutunu azaltarak sistemin performansını artırabileceği sonucuna ulaşılr.



Şekil 5.1 DTW ve MP işlem zamanı oranı

Literatürde yaygın kullanılan DTW algoritmasına oranla daha az işlem ile sonuca ulaşarak daha hızlı tepki vermektedir. Bu da pratik bir uygulama olarak aynı işlem yükü ile daha fazla kullanıcıya hizmet verecek bir sistemin tasarımına imkan sağlamaktadır.

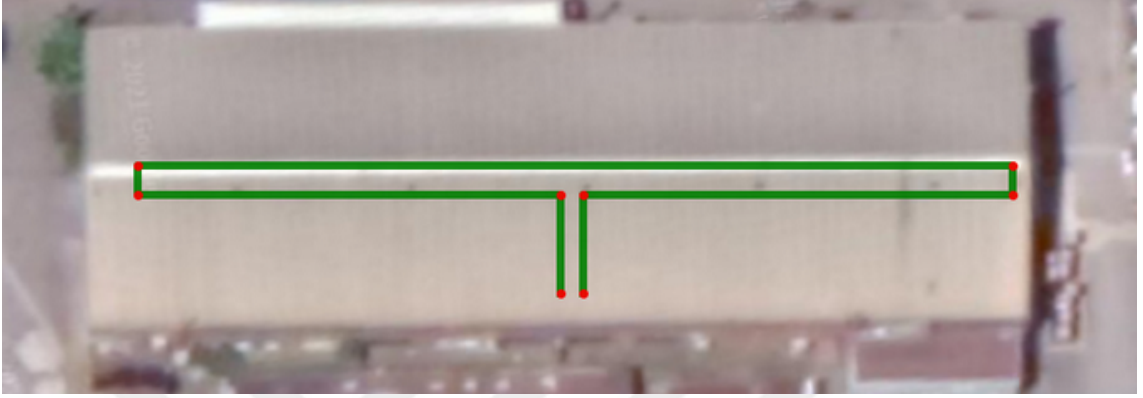
5.3 Test Ortamları

Deneyler, ofis binası ve alışveriş merkezi içerisinde toplanan veriler ile iki farklı bölde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.2’de verilen yer planı ofis binası ve Şekil 5.3’deki yer planı ise bir alışveriş merkezine aittir. Verilen yer planlarında yeşil çizgi ile gösterilen yayanın hareketi ile birlikte verinin toplandığı koridorları göstermektedir. Kırmızı noktalar da koridorun başlangıç ve bitiş noktalarını temsilen işaretlenmiştir.

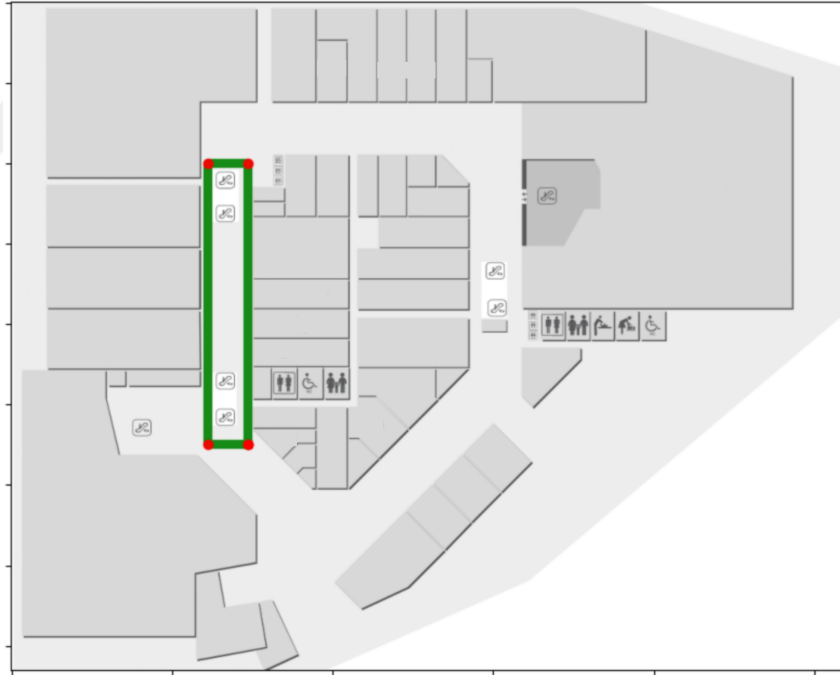
Ofis binası toplam 132m uzunluğunda ve alışveriş merkezine göre daha dar bir koridora sahip iken alışveriş merkezi 178m uzunluğuna sahip bir hat ve geniş koridorlardan oluşmaktadır.

Ofis binasında oluşturulan veri seti Kasım 2020 ile Mayıs 2021 tarihleri arasında 3 farklı zamanda toplanmıştır. Alışveriş merkezinde ise veriler Temmuz 2022

tarhinde toplanmıştır. Toplanan veriler yayanın değişken hızda hareket edebileceği dūřünülerek hızlı, normal ve yavaş olarak rastgele ve karışık bir şekilde toplanmıştır. Kullanıcı yōnlendirmesi sırasında mobil cihazın elde ve ekrana bakarak taşınacağı varsayımı yapılmıştır. Veri toplama sırasında iki farklı mobil telefon ũreticisine ait telefonlar (Samsung A51 ve Asus Zenphone 5) kullanılmıştır. Mobil cihaza dair farklılıklar tez çalışması kapsamında incelenmemiştir.



řekil 5.2 Ofis binasında hareket edilen koridor ve dōnūř noktaları

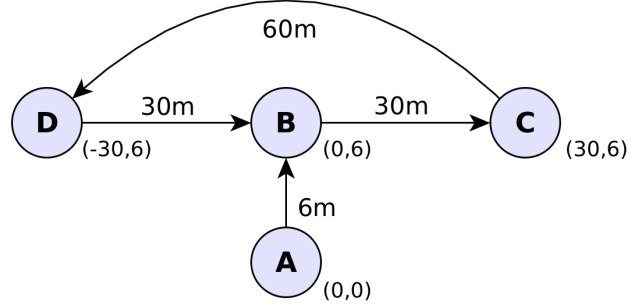


řekil 5.3 AVM binasında hareket edilen koridor ve dōnūř noktaları

Önerilen sistem bileşenlerinin gerçek zamanlı veri işleme yeteneği vardır, ancak veriler çevrimdışı olarak toplanmış ve işlenmiştir. Veriler 128 örnek içeren parçalara ayrılarak bu veri yığınları sisteme uygulanmış, çıktılar toplanarak, sonuçlar görselleştirilmiştir.

5.3.1 Ofis Alanı

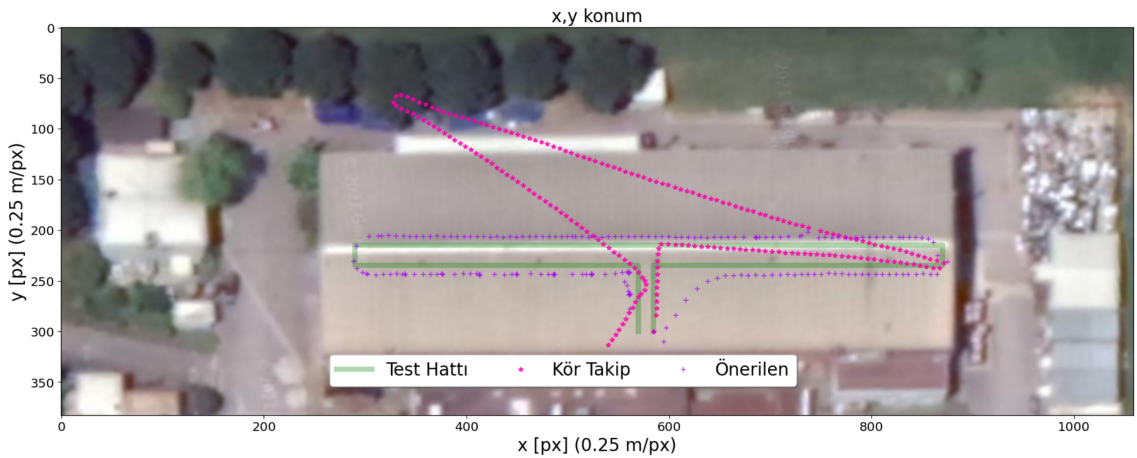
Şekil 5.4'de verilen çizgede yer alan yürüme hattı A-B-C-D-B-A yolunu takip ederek yayanın hareketi sonucunda toplanan verileri ve hat uzunluklarını temsil etmektedir.



Şekil 5.4 Ofis binasında hareket edilen harita çizgesi

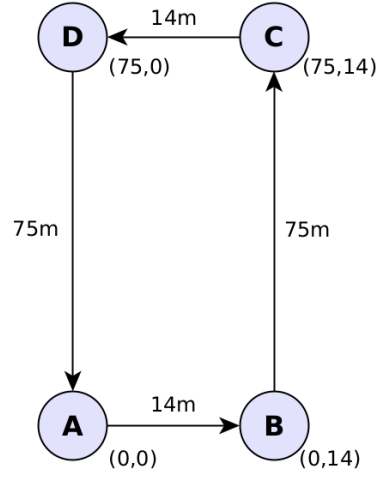
Aynı koridor üzerinden dört farklı geçiş için toplanan veriler ile veri seti oluşturulmuştur. Toplanan verilerden bir tanesi harita veritabanı oluşturmak için kullanılmış ve diğer üç veri kümesi de konum belirleme performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Kör takip sistemi ve önerilen algoritmanın çıktıları Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmiştir. Mor belirteçler önerilen algoritma çıktısına yönelik rotayı göstermektedir ve pembe belirteçler ise yalnızca kör takip sisteminin çıktısını göstermektedir.

Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 incelendiğinde kör takip sisteminin her bir denemede farklı bir şekilde sapma oluştuğu görülmektedir. En iyi performansı Şekil 5.7'de verdiği görülmektedir. Dönüşlerin olmadığı yerlerde her üç denemede PDR sisteminin tutarlı çıkış verebileceği görülmektedir. Ancak koridor başlangıç veya bitiş noktalarında olan sapmalar doğru konum belirlemeyi engellemektedir ve biriken, zamanla artan hataya sebep olmaktadır.

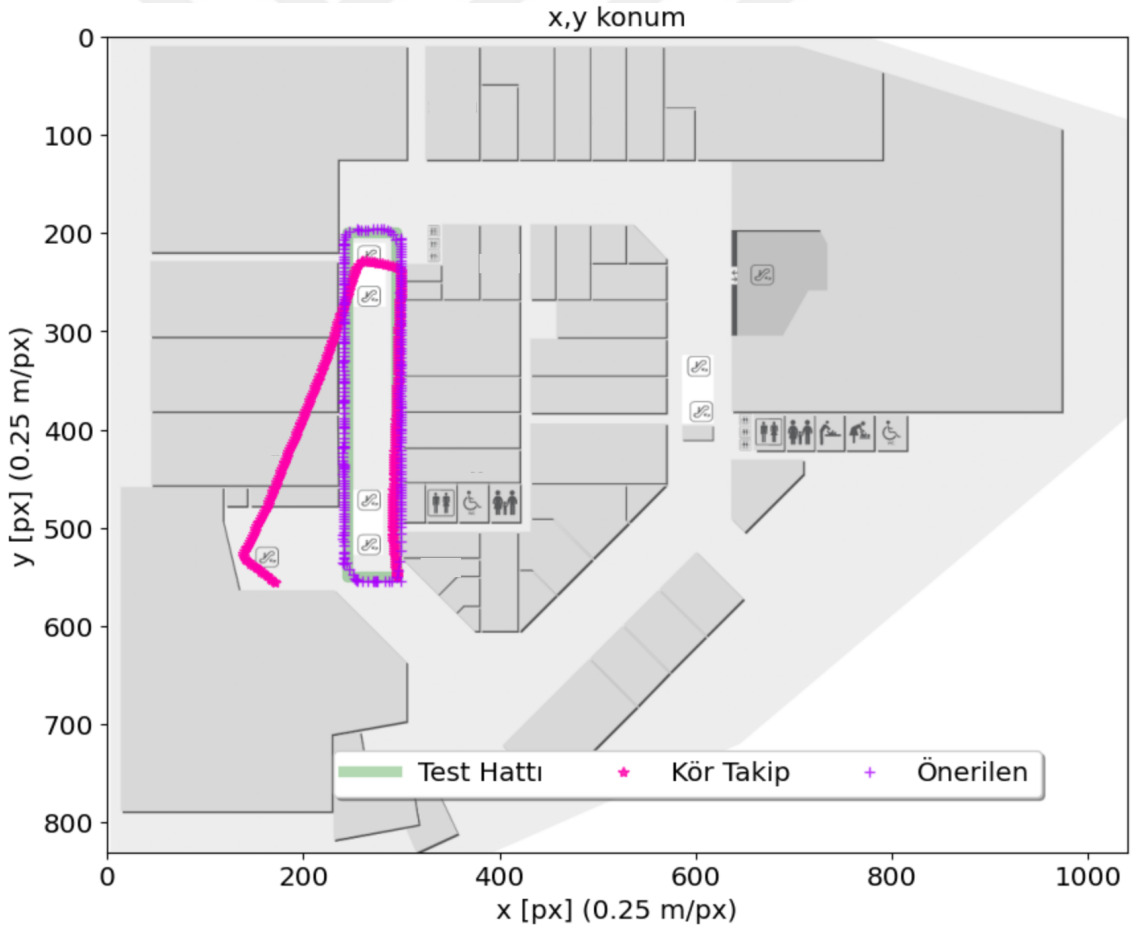


Şekil 5.5 Ofis binasında kör takip sistemi ve önerilen yöntemin takip performansı(I)

verilerden bir tanesi harita veri tabanı oluşturmak için kullanılmış diğer veri ile önerilen yöntem ve kör takip sistemi işletilerek sonuçlar paylaşılmıştır.



Şekil 5.8 AVM Binasında hareket edilen harita çizgesi



Şekil 5.9 AVM binasında kör takip sistemi ve önerilen yöntemin takip performansı

Şekil 5.9 alışveriş merkezinde test hattı boyunca önerilen yöntem ve kör takip sisteminin çıktılarını göstermektedir. Şekil 5.9 incelendiğinde ofis senaryosuna benzer

şekilde kör takip sistemi özellikle dönüş noktalarında sapmalar olduğu görülmektedir. Kör takip sistemi ile zamanla artan bir hata oluşur iken önerilen yöntem ile tutarlı konum bilgisi elde edilmiştir.

5.4 Değerlendirme ve Sonuçlar

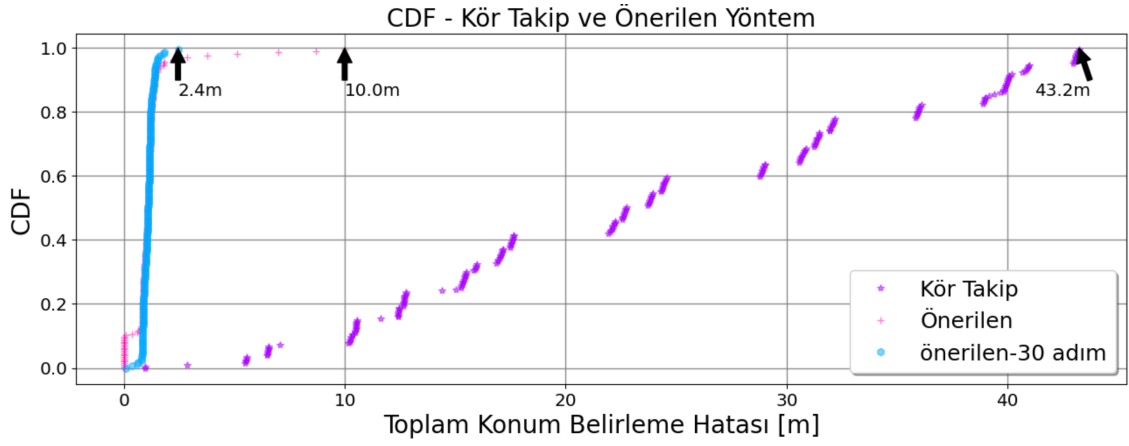
Önerilen yöntemin performansını analiz etmek için kör takip sistemi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 incelendiğinde, kör takip sisteminin dönüşlerde yanlış algılamaya açık olması ve dönüşlerde kaymalar olması, kör takip sistemlerinin yer işareti kullanılmadan kullanılmasının mümkün olmadığını göstermektedir. Önerdiğimiz yöntemle birlikte; hareket halindeki bir yayanın konumu, başlatma aşamasından sonra kör takip sistemine kıyasla çok düşük bir hata ile belirlenebilmektedir.

Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ofis binasına ait çıktılar ve Şekil 5.9 alışveriş merkezine ait çıktılar incelendiğinde kör takip sisteminin başarıyla çalışması için sensörlerin çok iyi kalibre edilmiş olması, örnekleme hızının oldukça yüksek olması (200Hz) ve bunun için ideal ivme sensörü ve dönel ölçer kullanılması gerektiği sonucunu çıkarabiliriz. Bu pratikte mümkün değildir. Hareket yönü açısının doğru hesaplanması hatayı büyük ölçüde azaltacaktır. Ancak bina içindeki manyetik alanın iç mekan bozulmaları nedeniyle tutarlı bir yön açısı sadece manyetik sensör kullanılarak mümkün değildir.

Yaya hareket modelinden elde edilen konum bilgisi ile tahmini sektör bilgisi UKF kullanılarak birleştirilmiştir. Bu yöntem, biriken hataları ortadan kaldırır ve konum belirleme yapılacak bölgenin herhangi bir noktasında hareket etmeye başlayan yayanın konumunun belirlenmesini sağlar. Manyetik dizi kullanılarak elde edilen konum bilgisi dönüş noktaları ile desteklenmiştir. Manyetik dizi parçalara bölünür ve bilinen son konum bilgisi arama alanını azaltmak için kullanılır, böylece işlem yükü azaltılır. Baş açısı algılama yerine binaya özgü kat planının kullanılması, yayanın yön değiştirmesinin veya koridordan çıkışının algılanması daha tutarlı bir sonuç sağlamıştır.

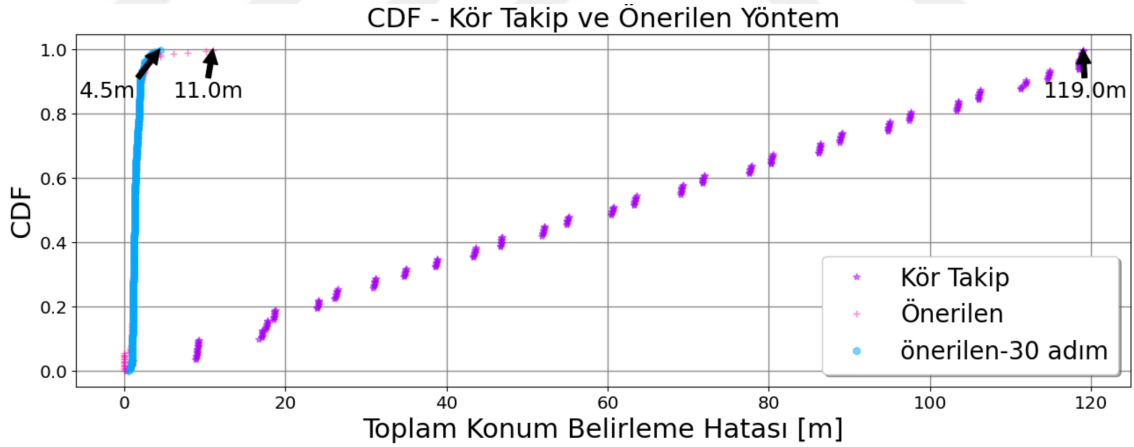
Şekil 5.10 ofis binası için, Şekil 5.11 ise alışveriş merkezi için birikimli dağılım fonksiyonu verilmiştir. Birikimli dağılım fonksiyonu konum belirleme işlemi sırasında hatanın dağılımını vermektedir. Hem ofis binası hem de alışveriş merkezi için başlangıçta hata farkla iken zamanla biriken bir hata bulunmamaktadır. Önerilen yöntemin ilk doğru konumu bulabilmesi için kullanıcının veri karşılaştırma belleğinde manyetik izleri toplaması gerekmektedir. Bu durum kullanıcının kapalı alan içerisinde bir koridor boyunca hareket etmesini gerektirir.

Şekil 5.10 incelendiğinde önerilen yöntemin 30 adım sonrasında 2.4m hata



Şekil 5.10 Ofis binası için birikimli dağılım fonksiyonu (CDF)

yaptığı ve hat boyunca en fazla hatasının 10m olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 5.11’de verilen alışveriş merkezine ait birikimli dağılım fonksiyonu incelendiğinde 30 adım sonrasında yaklaşık 4.5m’ye kadar hata yaparken en fazla 11m’ye kadar hata yaptığı görülmektedir. Önerilen yönteme kıyasla kör takip sisteminde başaşağı yanlış hesaplamaktan kaynaklı sapma oluşmakta ve bu durum birikimli hata dağılım fonksiyonunda gözlemlenebilmektedir. Kör takip sistemi ofis ortamı için 43m’ye kadar alışveriş merkezi için ise 119m’ye varan hatalı çıktılar verebilmektedir.



Şekil 5.11 AVM binası için birikimli dağılım fonksiyonu (CDF)

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kapalı alanın jeomanyetik özelliklerinin analizi ile geniş ölçekli kapalı alanlarda kullanılmak üzere yeni bir jeomanyetik kapalı alan konum belirleme sistemi önerilmiştir. İlk olarak kullanıcının hareketleri analiz edilerek koridorlar (dolaşım bölgeleri) çıkartılmış ve kapalı alanın manyetik özellikleri göz önünde bulundurularak hat bazlı harita oluşturulmuş daha sonra bu harita üzerinde benzerlik araması için MP/MASS algoritması ile benzerliği yüksek noktalar tespit edilmiştir. Kullanıcının hareket modeline bağlı olarak sektörlere bölünmüş harita parçaları içerisindeki bu benzerlik değerlendirilerek en olası konum bilgisi elde edilmiştir. Elde edilen bu konum bilgisi ile yaya hareket modeline dayanan bir takip filtresi ile tutarlılık sağlanmıştır.

Benzerlik arama yöntemi olarak literatürde birçok çalışmada DTW gibi esnek arama yöntemleri kullanılmasına rağmen adım uzunluğuna bağlı manyetik veri, harita ile eş ölçekli hale getirilerek benzerlik araması yapılmış ve sistemin işlem yükü azaltılmıştır. Sabit uzunluklu verilerin kullanılması döngüsel olarak verilerin tekrar örneklenerek benzerlik karşılaştırması sırasında ortaya çıkan işlem yükünü azaltmaktadır. Sistemin işlem yükünü azaltmak için bir diğer yöntem olarak da değişken uzunluklu bellek yapısı önerilmiştir. Bellek boyutu toplanan verinin varyansına göre bir silme faktörü tanımlanarak yönetilmiş böylelikle karşılaştırma katarı boyutu azaltılmıştır.

Python programlama dili kullanılarak tasarlanan jeomanyetik sinyal tabanlı kapalı alan konum belirleme sisteminde pratikte uygulanabilir olması için veriler 1-2sn'lik parçalar halinde geliştirilen yazılıma uygulanmış ve çıktıları tez çalışmasında paylaşılmıştır. Geliştirilen yöntem gerçek zamanlı kullanıma uygun olarak kurgulanmış ve sonuçları bu tez çalışması kapsamında paylaşılmıştır. Alışveriş merkezi, ofis gibi farklı ortamlarda ve farklı zamanlarda toplanan veriler ile sistem test edilmiştir. Önerilen yöntemin literatürle karşılaştırıldığında kabul edilebilir ortalama hataya sahip olduğu ve büyük kapalı alanlarda 2-3m hassasiyet ile konum belirleme ihtiyaçlarına cevap verebileceği görülmektedir. Hastane, alışveriş merkezi, geniş ofisler, havaalanı gibi kullanıcının pozisyon bilgisinin önemli olduğu geniş

alanlarda çalışabilmesi düşük işlem ihtiyacı, alt yapı gerektirmeden veri toplanarak kullanılabilirliği gibi özellikler göz önünde bulundurulduğunda sahada uygulanabilir bir sistem olduğu kanaatine varılmıştır.

Kapalı alan içerisinde jeomanyetik alan büyüklüğü kullanılarak yaya takibi için önerilen yöntem farklı senaryolar için gelecek çalışmalara yönelik genişletilebilir. Yaya takibi dışında kapalı alanda hareket eden nesnelere, evcil hayvanlar gibi farklı hareket modellerine sahip senaryolar için çalışmalar kurgulanabilir. Yaya hareket modeli yerine takip edilmek istenilen canlı veya nesneye yönelik hareket modeli üzerine çalışarak jeomanyetik alan ile konum belirlemeye yönelik uygulamalar geliştirilebilir.



-
- [1] S. He, S.-H. G. Chan, “Wi-fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 466–490, 2015.
- [2] X. Zhao, Z. Xiao, A. Markham, N. Trigoni, Y. Ren, “Does btle measure up against wifi? a comparison of indoor location performance,” in *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference*, VDE, 2014, pp. 1–6.
- [3] W. Huang *et al.*, “Shake and walk: Acoustic direction finding and fine-grained indoor localization using smartphones,” in *IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications*, IEEE, 2014, pp. 370–378.
- [4] Y.-S. Kuo, P. Pannuto, K.-J. Hsiao, P. Dutta, “Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light,” in *Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2014, pp. 447–458.
- [5] S. He, K. G. Shin, “Geomagnetism for smartphone-based indoor localization: Challenges, advances, and comparisons,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 50, no. 6, pp. 1–37, 2017.
- [6] I. Ashraf, Y. B. Zikria, S. Hur, Y. Park, “A comprehensive analysis of magnetic field based indoor positioning with smartphones: Opportunities, challenges and practical limitations,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 228 548–228 571, 2020.
- [7] A. Basiri *et al.*, “Indoor location based services challenges, requirements and usability of current solutions,” *Computer Science Review*, vol. 24, pp. 1–12, 2017.
- [8] L. C. Boles, K. J. Lohmann, “True navigation and magnetic maps in spiny lobsters,” *Nature*, vol. 421, no. 6918, pp. 60–63, 2003.
- [9] C. V. Mora, M. Davison, J. M. Wild, M. M. Walker, “Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon,” *Nature*, vol. 432, no. 7016, pp. 508–511, 2004.
- [10] P. Davidson, R. Piché, “A survey of selected indoor positioning methods for smartphones,” *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 1347–1370, 2016.
- [11] F. Seco, A. R. Jiménez, C. Prieto, J. Roa, K. Koutsou, “A survey of mathematical methods for indoor localization,” in *2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, IEEE, 2009, pp. 9–14.
- [12] T. Kadioğlu, H. Dinçer, M. Kuzlu, “Localization at wireless sensor networks,” in *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*, IEEE, 2010, pp. 408–413.

- [13] T. Roos, P. Myllymäki, H. Tirri, P. Misikangas, J. Sievänen, “A probabilistic approach to wlan user location estimation,” *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 9, pp. 155–164, 2002.
- [14] Apple Inc. “iBeacon.” (2023), [Online]. Available: <https://developer.apple.com/ibeacon/> (visited on 01/22/2023).
- [15] I. Ashraf, S. Hur, Y. Park, “Smartphone sensor based indoor positioning: Current status, opportunities, and future challenges,” *Electronics*, vol. 9, no. 6, p. 891, 2020.
- [16] J. Haverinen, A. Kemppainen, “A global self-localization technique utilizing local anomalies of the ambient magnetic field,” in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2009, pp. 3142–3147.
- [17] Wikipedia the free encyclopedia. “History of the compass.” (2022), [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_compass (visited on 11/22/2022).
- [18] B. Li, T. Gallagher, A. G. Dempster, C. Rizos, “How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning?” In *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, IEEE, 2012, pp. 1–9.
- [19] Y. Zou, G. Wang, K. Wu, L. M. Ni, “Smartscanner: Know more in walls with your smartphone!” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 15, no. 11, pp. 2865–2877, 2015.
- [20] M. Angermann, M. Frassl, M. Doniec, B. J. Julian, P. Robertson, “Characterization of the indoor magnetic field for applications in localization and mapping,” in *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, IEEE, 2012, pp. 1–9.
- [21] J. Lenz, S. Edelstein, “Magnetic sensors and their applications,” *IEEE Sensors journal*, vol. 6, no. 3, pp. 631–649, 2006.
- [22] R. Lanza, A. Meloni, *The Earth’s Magnetic Field*. Springer, 2006.
- [23] C. C. Finlay *et al.*, “International geomagnetic reference field: The eleventh generation,” *Geophysical Journal International*, vol. 183, no. 3, pp. 1216–1230, 2010.
- [24] National Oceanic and Atmospheric Administration. “US/UK World Magnetic Model-Epoch 2020.0 Main Field Total Intensity.” (2020), [Online]. Available: https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2020/WMM2020_F_BoZ_MILL.pdf (visited on 11/22/2022).
- [25] Field Cyril Langlois. “Dipolar magnetic field.” (2022), [Online]. Available: <https://texample.net/tikz/examples/dipolar-magnetic-field/> (visited on 11/22/2022).
- [26] M. McElhinny, P. L. McFadden, *The magnetic field of the earth: paleomagnetism, the core, and the deep mantle*. Academic Press, 1998, vol. 63.
- [27] National Center of Environmental Interformation. “Tracking Changes in Earth’s Magnetic Poles.” (2022), [Online]. Available: <https://www.ncei.noaa.gov/news/tracking-changes-earth-magnetic-poles> (visited on 11/22/2022).

- [28] National Centers of Environmental Interformation. “The World Magnetic Model.” (2022), [Online]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml> (visited on 11/22/2022).
- [29] Y. Shu, K. G. Shin, T. He, J. Chen, “Last-mile navigation using smartphones,” in *Proceedings of the 21st annual international conference on mobile computing and networking*, 2015, pp. 512–524.
- [30] G. Ouyang, K. Abed-Meraim, “A survey of magnetic-field-based indoor localization,” *Electronics*, vol. 11, no. 6, p. 864, 2022.
- [31] S. Rallapalli, W. Dong, L. Qiu, Y. Zhang, “Waveloc: Wavelet signatures for ubiquitous localization,” in *2016 IEEE 13th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, IEEE, 2016, pp. 219–227.
- [32] J. M. Merayo, P. Brauer, F. Primdahl, J. R. Petersen, O. V. Nielsen, “Scalar calibration of vector magnetometers,” *Measurement science and technology*, vol. 11, no. 2, p. 120, 2000.
- [33] The MathWorks, Inc. “Magnetometer calibration coefficients.” (2022), [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/nav/ref/magcal.html> (visited on 11/22/2022).
- [34] DIRSIGTM - Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation. “Coordinate Systems.” (2022), [Online]. Available: <http://dirsig.cis.rit.edu/docs/new/coordinates.html> (visited on 11/22/2022).
- [35] DEPARTMENT OF DEFENSE NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY (NGA. “WORLD GEODETIC SYSTEM 1984.” (2014), [Online]. Available: <https://earth-info.nga.mil/php/download.php?file=coord-wgs84#.pdf> (visited on 11/22/2022).
- [36] The World Wide Web Consortium (W3C). “Accelerometer W3C Candidate Recommendation Draft, 18 October 2022.” (2022), [Online]. Available: <https://www.w3.org/TR/accelerometer/#reference-frame> (visited on 11/22/2022).
- [37] Android for Developers. “Position sensors - Use the uncalibrated magnetometer.” (2023), [Online]. Available: https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_position#sensors-pos-magunc (visited on 01/05/2023).
- [38] IOS for Developers. “Core Motion - magneticField.” (2023), [Online]. Available: <https://developer.apple.com/documentation/coremotion/cmdevicemotion/1616140-magneticfield> (visited on 01/05/2023).
- [39] S.-C. Yeh, W.-H. Hsu, W.-Y. Lin, Y.-F. Wu, “Study on an indoor positioning system using earth’s magnetic field,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 3, pp. 865–872, 2019.
- [40] M. Kok, T. B. Schön, “Magnetometer calibration using inertial sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 14, pp. 5679–5689, 2016.
- [41] H. Xie, T. Gu, X. Tao, H. Ye, J. Lu, “A reliability-augmented particle filter for magnetic fingerprinting based indoor localization on smartphone,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 15, no. 8, pp. 1877–1892, 2015.

- [42] I. Ashraf, S. Hur, Y. Park, “Enhancing performance of magnetic field based indoor localization using magnetic patterns from multiple smartphones,” *Sensors*, vol. 20, no. 9, p. 2704, 2020.
- [43] D. Hanley, A. S. D. De Oliveira, X. Zhang, D. H. Kim, Y. Wei, T. Bretl, “The impact of height on indoor positioning with magnetic fields,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–19, 2021.
- [44] W. Shao *et al.*, “Location fingerprint extraction for magnetic field magnitude based indoor positioning,” *Journal of Sensors*, vol. 2016, 2016.
- [45] N. Lee, S. Ahn, D. Han, “Amid: Accurate magnetic indoor localization using deep learning,” *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1598, 2018.
- [46] I. Ashraf, S. Hur, Y. Park, “M-pilot-magnetic field strength based pedestrian indoor localization,” *Sensors*, vol. 18, no. 7, p. 2283, 2018.
- [47] L. Chen, J. Wu, C. Yang, “Meshmap: A magnetic field-based indoor navigation system with crowdsourcing support,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 39 959–39 970, 2020.
- [48] P. Li, X. Yang, Y. Yin, S. Gao, Q. Niu, “Smartphone-based indoor localization with integrated fingerprint signal,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 33 178–33 187, 2020.
- [49] S. Guo, G. Niu, Z. Wang, M.-O. Pun, “Magnetic field strength sequence-based indoor localization using multi-level link-node models,” in *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [50] Y. Shu, C. Bo, G. Shen, C. Zhao, L. Li, F. Zhao, “Magicol: Indoor localization using pervasive magnetic field and opportunistic wifi sensing,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 7, pp. 1443–1457, 2015.
- [51] S. Shahidi, S. Valaee, “Gipsy: Geomagnetic indoor positioning system for smartphones,” in *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, IEEE, 2015, pp. 1–7.
- [52] C. Zhang, K. P. Subbu, J. Luo, J. Wu, “Groping: Geomagnetism and crowdsensing powered indoor navigation,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, no. 2, pp. 387–400, 2014.
- [53] K. P. Subbu, B. Gozick, R. Dantu, “Locateme: Magnetic-fields-based indoor localization using smartphones,” *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, vol. 4, no. 4, pp. 1–27, 2013.
- [54] Y. Ma, Z. Dou, Q. Jiang, Z. Hou, “Basmag: An optimized hmm-based localization system using backward sequences matching algorithm exploiting geomagnetic information,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 20, pp. 7472–7482, 2016.
- [55] Q. Wang, H. Luo, A. Men, F. Zhao, Y. Huang, “An infrastructure-free indoor localization algorithm for smartphones,” *Sensors*, vol. 18, no. 10, p. 3317, 2018.
- [56] H. Wu, Z. Mo, J. Tan, S. He, S.-H. G. Chan, “Efficient indoor localization based on geomagnetism,” *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 15, no. 4, pp. 1–25, 2019.
- [57] T. F. Smith, M. S. Waterman, “Identification of common molecular subsequences,” *Journal of molecular biology*, vol. 147, no. 1, pp. 195–197, 1981.

- [58] H. Xie, T. Gu, X. Tao, H. Ye, J. Lv, “Maloc: A practical magnetic fingerprinting approach to indoor localization using smartphones,” in *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 2014, pp. 243–253.
- [59] H. Weinberg, “Using the adxl202 in pedometer and personal navigation applications,” *Analog Devices AN-602 application note*, vol. 2, no. 2, pp. 1–6, 2002.
- [60] M. Liu *et al.*, “Scene recognition for indoor localization using a multi-sensor fusion approach,” *Sensors*, vol. 17, no. 12, p. 2847, 2017.
- [61] X. Wang, Z. Yu, S. Mao, “Deepml: Deep lstm for indoor localization with smartphone magnetic and light sensors,” in *2018 IEEE international conference on communications (ICC)*, IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [62] B. Gozick, K. P. Subbu, R. Dantu, T. Maeshiro, “Magnetic maps for indoor navigation,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 12, pp. 3883–3891, 2011.
- [63] V. Pasku *et al.*, “Magnetic field-based positioning systems,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 2003–2017, 2017.
- [64] S. Salvador, P. Chan, “Toward accurate dynamic time warping in linear time and space,” *Intelligent Data Analysis*, vol. 11, no. 5, pp. 561–580, 2007.
- [65] C.-C. M. Yeh *et al.*, “Matrix profile i: All pairs similarity joins for time series: A unifying view that includes motifs, discords and shapelets,” in *2016 IEEE 16th international conference on data mining (ICDM)*, Ieee, 2016, pp. 1317–1322.
- [66] H.-h. Lee, S. Choi, M.-j. Lee, “Step detection robust against the dynamics of smartphones,” *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 27 230–27 250, 2015.
- [67] N. Zhao, “Full-featured pedometer design realized with 3-axis digital accelerometer,” *Analog Dialogue*, vol. 44, no. 06, pp. 1–5, 2010.
- [68] M. Vežočník, M. B. Juric, “Average step length estimation models’ evaluation using inertial sensors: A review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 396–403, 2018.
- [69] Y. Wu, H.-B. Zhu, Q.-X. Du, S.-M. Tang, “A survey of the research status of pedestrian dead reckoning systems based on inertial sensors,” *International Journal of Automation and Computing*, vol. 16, no. 1, pp. 65–83, 2019.
- [70] A. Mikov, A. Moschevikin, A. Fedorov, A. Sikora, “A localization system using inertial measurement units from wireless commercial hand-held devices,” in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, IEEE, 2013, pp. 1–7.
- [71] H. Luo, F. Zhao, M. Jiang, H. Ma, Y. Zhang, “Constructing an indoor floor plan using crowdsourcing based on magnetic fingerprinting,” *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2678, 2017.
- [72] T. Kadioğlu, B. Erkmén, “A simple mapping method for positioning systems,” in *2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, IEEE, 2022, pp. 1–4.
- [73] W. H. Press, S. A. Teukolsky, “Savitzky-golay smoothing filters,” *Computers in Physics*, vol. 4, no. 6, pp. 669–672, 1990.

- [74] C.-C. M. Yeh *et al.*, “Time series joins, motifs, discords and shapelets: A unifying view that exploits the matrix profile,” *Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 32, no. 1, pp. 83–123, 2018.
- [75] C. A. Ratanamahatana, E. Keogh, “Everything you know about dynamic time warping is wrong,” in *Third workshop on mining temporal and sequential data*, Citeseer, vol. 32, 2004.
- [76] T. KADIOĞLU, B. ERKMEN, “Basimap: Sequence-based similarity search for geomagnetic positioning,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 31, no. 1, pp. 146–162, 2023.
- [77] D. Fox, J. Hightower, H. Kauz, L. Liao, D. Patterson, “Bayesian techniques for location estimation,” in *Proceedings of the 2003 workshop on location-aware computing*, Citeseer, 2003, pp. 16–18.
- [78] R. Bellman, “A markovian decision process,” *Journal of mathematics and mechanics*, pp. 679–684, 1957.
- [79] S. J. Julier, J. K. Uhlmann, “New extension of the kalman filter to nonlinear systems,” in *Signal processing, sensor fusion, and target recognition VI*, International Society for Optics and Photonics, vol. 3068, 1997, pp. 182–193.
- [80] E. A. Wan, R. Van Der Merwe, “The unscented kalman filter for nonlinear estimation,” in *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No. 00EX373)*, Ieee, 2000, pp. 153–158.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. T. Kadioğlu, B. Erkmen, "BASISMAP: Sequence-based similarity search for geomagnetic positioning," Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, vol. 31, no. 1, pp. 146–162, 2023
doi:10.55730/1300-0632.3976

Konferans Bildirisi

1. T. Kadioğlu, B. Erkmen, "A Simple Mapping Method for Positioning Systems", In 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), IEEE, 2022, pp. 1-4