T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAYA NAVİGASYONUNDA ADIM UZUNLUĞU KESTİRİMİ VE YÖNTEMLERİN ANALİZİ

Nimet KARAGÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Uzaktan Algılama ve CBS Programı

Danışman
Prof. Dr. Fatih GÜLGEN

Şubat, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAYA NAVİGASYONUNDA ADIM UZUNLUĞU KESTİRİMİ VE YÖNTEMLERİN ANALİZİ

Nimet KARAGÖZ tarafından hazırlanan tez çalışması 16.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Uzaktan Algılama ve CBS Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fatih GÜLGEN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fatih GÜLGEN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ali Melih BAŞARANER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Necla ULUĞTEKİN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Fatih GÜLGEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Yaya Navigasyonunda Adım Uzunluğu Kestirimi ve Yöntemlerin Analizi 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.

Nimet KARAGÖZ

İmza

Aileme
ve
En İyi Arkadaşıma

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimi tamamlamamda yardımcı olan aşağıdaki kişilere teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle Türkiye'de tez danışmanım olmayı kabul eden Prof. Dr. Fatih Gülgen'e ve Almanya'da tez danışmanım olmayı kabul eden Prof. Dr. Jörg Blankenbach'a ve tüm sorularıma sabırla cevap veren ve bana yardımcı olan Jan Grottke'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Maddi manevi her zaman yanımda olan aileme ve sonsuz enerjisiyle beni motive eden Dr. Kerem Peker'e yürekten teşekkür ederim.

Son olarak, kadınlar için devrim yapan ve kadınları iş hayatına atmaya teşvik eden ulu önder Mustafa Kemal Atatürk'e teşekkür etmek istiyorum.

Nimet KARAGÖZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ viii

TABLO LİSTESİ ix

ÖZET x

ABSTRACT xii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti . . . 2
1.2 Tezin Amacı . . . 5
1.3 Hipotez . . . 5
1.4 Tezin Yapısı . . . 5

2 İÇ MEKÂN KONUMLAMA TEMELLERİ 6

2.1 Koordinat Sistemleri ve Konum Gösterimi . . . 6
2.1.1 Kuzey Yönü . . . 6
2.1.2 Koordinat Sistemleri - Koordinat Çerçeveleri . . . 7
2.1.3 Koordinat Dönüşümleri . . . 10
2.2 Teknolojiler, Teknikler ve Temel Prensipleri . . . 15
2.2.1 Konumlama Teknikleri . . . 16
2.2.2 İç Mekân Konumlama Teknolojileri . . . 17
2.3 MEMS Tabanlı Yaya Navigasyonu . . . 19
2.3.1 Dönüklük Belirleme . . . 19
2.3.2 Adım Belirleme . . . 21
2.3.3 Adım Uzunluğu Kestirimi . . . 23
2.3.4 Azimut, Hız ve Konum Belirleme . . . 24

3 ADIM UZUNLUĞU KESTİRİMİ UYGULAMASI 25

3.1 Adım Uzunluğu Kestirim Yöntemleri . . . 25
3.2 Çalışmada Kullanılan Veri Seti . . . 30
3.3 Ham Verilerin Uygulamada Kullanılması için Ön Hazırlığı . . . 30

3.4 Yazılım 32
3.5 Uygulama 32

4 BULGULAR **35**

5 SONUÇ VE ÖNERİLER **47**

KAYNAKÇA **49**

A MATLAB PROGRAMI **56**

B KULLANILAN VERİ SETİ **57**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **58**

KISALTMA LİSTESİ

BLE	Bluetooth Low Energy
CIO	Conventional International Orijin
CNN	Convolutional Neural Network
DCM	Direction Cosines Matrix
DR	Dead Reckoning
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
KF	Kalman Filter
LSTM-DAE	Long Short-Term Memory and Denoising Autoencoders
MEMS	Micro Electro Mechanical System
PDR	Pedestrian Dead Reckoning
PNS	Pedestrian Navigation System
RFID	Radio-frequency Identification
RNNs	Recurrent Neural Networks
SLE	Step Length Estimation
UWB	Ultra-wideband
Wi-Fi	Wireless fidelity
ZUPTs	Zero Velocity Updates

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Dünya manyetik alanının şematik gösterimi 7
Şekil 2.2 Yerel navigasyon çerçevesi gösterimi 9
Şekil 2.3 Akıllı telefon gövde çerçevesi gösterimi 10
Şekil 2.4 Dönüklüklerin değişme özelliğinin olmamasının gösterimi 11
Şekil 2.5 *n* ve *b* koordinat sistemleri 12
Şekil 2.6 Dördeyin gösterimi 14
Şekil 2.7 Dead Reckoning ilkesi 17
Şekil 2.8 MEMS tabanlı iç mekân navigasyonunun aşamaları 20
Şekil 2.9 Pik noktası belirleme işlemi 22
Şekil 2.10 Bir tam adım uzunluğunun tarifi 23
Şekil 3.1 Bir veri setindeki ilk on adım için ivmeölçer verileri 31
Şekil 3.2 Yazılımın akış diyagramı 33
Şekil 3.3 Uygulama üst menüsü 34
Şekil 3.4 Uygulama arayüzü 34
Şekil 4.1 Adım uzunluğu karesel ortalama hatasının kutu diyagram gösterimi 44
Şekil 4.2 Adım uzunluğu göreli hatasının kutu diyagram gösterimi 44
Şekil 4.3 Yürüme mesafesi göreli hatasının kutu diyagram gösterimi 45

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Atalet algılayıcıları ile adım uzunluğu kestirimi çalışmaları 4
Tablo 3.1 Adım uzunluğu kestirim yöntemleri 26
Tablo 4.1 Seçilen adım uzunluğu kestirim modellerine göre kestirilen adım uzunluğu medyan değerlerinin karşılaştırılması 38
Tablo 4.2 RMSE'nin seçilen adım uzunluğu kestirim modellerine göre karşılaştırılması 39
Tablo 4.3 Seçilen adım uzunluğu kestirim modelleri için adım uzunluğu yüzde bağıl hatasının karşılaştırılması 40
Tablo 4.4 Gerçek toplam yürüme mesafesi ile seçilen adım uzunluğu kesitirim yöntemlerinden hesaplanan toplam yürüme mesafesinin karşılaştırması 41
Tablo 4.5 Toplam yürüme mesafesinin mutlak hata karşılaştırması 42
Tablo 4.6 Seçilen adım uzunluğu kestirim modelleri için toplam yürüme mesafesi bağıl hatası karşılaştırması 43

ÖZET

Yaya Navigasyonunda Adım Uzunluğu Kestirimi ve Yöntemlerin Analizi

Nimet KARAGÖZ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Fatih GÜLGEN

Geçtiğimiz on yılda, akıllı telefonlardan elde edilen konum bilgisinin yayalar tarafından, iç ve dış mekânda kullanımı bir hayli artmıştır. Dış mekânda küresel navigasyon uydu sistemi (Global Navigation Satellite System - GNSS), kullanıcıların sorunlarına büyük ölçüde yeterli çözüm sunarken iç mekânda sinyal kısıtlılıklarından dolayı düşük doğrulukta sonuç elde edilir. Oysa, yayalar artık günlerinin büyük çoğunluğunu hastaneler, üniversite binaları, plazalar, alışveriş merkezleri gibi karmaşık ve büyük binaların içinde geçirmektedirler. Bu mekânlar yayalara, ekranlar, broşürler vb. navigasyonu kolaylaştırıcı imkânlar sağlasalar da bu yeterli düzeyde değildir. Bu nedenle, araştırmacılar, iç mekânda yayalara konum bilgisi sağlamak için farklı teknolojileri kullanma yoluna gitmiştir.

Son yıllarda yaya navigasyonu ile ilgili çalışmalar büyük ölçüde, yayaların her zaman yanlarında bulundurdukları akıllı telefonların kullanılması yönünde gelişmiştir. Yüksek konum doğruluğu sağlamak için akıllı telefonlar Wi-Fi, fingerprint, BLE (Bluetooth Low Energy), Wireless, RFID (radio-frequency identification), UWB (ultra-wideband), Bluetooth, GPS-IMU (global positioning system-inertial measurement unit) gibi destek ünitelerini kapsayacak şekilde tasarlanmaktadır. Ancak bu ek donanımlar, ek donanımlardan kaynaklanan hesap karmaşıklığı ve yüksek maliyet gibi kısıtlılıkları beraberinde getirir.

Ayrıca akıllı telefon ile yapılan çalışmalar sadece yaya navigasyonu ile sınırlı değildir. Akıllı telefonlar yaya hareketlerinin izlenmesi, koşucuların antrenmanlarında adım sayma gibi çeşitli amaçlar için de kullanılmaktadır. Bu nedenle, ek sistemleri aradan

çıkarmak ve sadece akıllı telefon kullanarak yayaların isteklerine çözüm sunmak bilim insanları arasında giderek yaygınlaşan bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Çoğu araştırmacı, akıllı telefonlardaki Mikro-elektromekanik algılayıcılarından elde edilen verileri, çeşitli algoritmalarla birlikte kullanarak, en iyi sonucu elde etmeye çalışır. Ancak bu zorluğun üstesinden gelmede yeni katılanlar için, paylaşılan yeterli miktarda test verisi bulunmamaktadır. Çünkü genellikle veriler çalışmanın amacı göz önünde bulundurularak toplanır. Bu veriler diğer çalışmalarda kullanılmaya pek uygun olmaz. Bu çalışmada ise, Qu Wang vd.(2019)'nin çalışmalarında kullandıkları ve paylaştıkları veri setleri kullanılmıştır.

Bu çalışma, ivmeölçer ve manyetometre algılayıcıları kullanılarak seyahat halindeki yayalardan toplanmış veri setleri ile yaya adım uzunluğu kestirim yöntemlerini karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Adım uzunluğu hesaplamaları için bu çalışma kapsamında açık kaynaklı bir masaüstü uygulama geliştirilmiştir. Bu uygulama 10 farklı adım uzunluğu kestirim yönteminden elde edilen sonuçlar için doğruluk analizleri yapmaktadır. Bu yöntemler Ladetto (2000), Weinberg (2002), Kim vd. (2004), Scarlett(2007), Alvarez vd. (2008), Bylemans vd. (2009), Mikov vd. (2013), Guo vd. (2016), Tian vd. (2015) ve Zeng vd. (2018)'nin yöntemleridir. Test edilen yöntemler arasından Weinberg (2002)'nin adım uzunluğu kestirimi %4.83 göreli adım uzunluğu hatası ile diğerlerine göre en iyi yöntem olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İç mekân yaya navigasyonu, mikro-elektromekanik sistem, atalet algılayıcıları, adım uzunluğu kestirimi, pedestrian dead reckoning

ABSTRACT

Stride Length Estimation and Analysis of Methods in Pedestrian Navigation

Nimet KARAGÖZ

Department of Geomatic Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Fatih GÜLGEN

In the past decade, the usage of location information obtained from smartphones by pedestrians in both indoors and outdoors has increased considerably. While global navigation satellite system (GNSS) offers a substantially satisfactory solution to users in tracking outdoors, its use indoors gives inaccurate results due to the limitations of signal receiving. However, pedestrians spend most of their time in complicated and broad buildings such as hospitals, university buildings, trade centers, and shopping malls. Since some instruments such as digital screens and brochures used to facilitate pedestrians' navigation in these places are usually inadequate, many researchers propose to employ different technologies to provide the location information in the interior.

One of the most impressive instruments for the researchers is the smartphone devices that offer innovative solutions to indoor navigation problems in recent years. They contain many technologies such as Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), radio-frequency identification (RFID), ultra-wideband (UWB), Bluetooth, global positioning system-inertial measurement unit (GPS-IMU) that have additional properties to ensure high location accuracy.

However, these properties can lead to some limitations, such as calculation complexity, high implementation, and infrastructure cost. Smartphone technologies have become an increasingly popular research subject, because they cannot only be limited to pedestrian navigation but also used for various purposes, such as monitoring pedestrian movements and counting steps in runners' workouts.

Most researchers combine data from micro-electromechanical sensors on smartphones with various algorithms to achieve the best results. However, there is not enough shared test data for newcomers to this challenge because data is generally collected by the researchers considering their purposes. This data is not suitable for use in other studies. In this study, the dataset published in a study called “Stride Length Estimation Based on Long Short-Term Memory and Denoising Autoencoders (LSTM-DAE)” written and shared by Qu Wang et al. (date: Feb. 2019) is used.

The primary purpose of this study is to apply the methods used in different studies and to estimate the step length of the pedestrian using the datasets proposed by Qu Wang et al. Besides, another purpose is carrying out accuracy analysis to pedestrian step lengths obtained by using different methods. As a result, Weinberg et al’s method was found to be the best with 4.83% stride length relative error.

Keywords: Indoor pedestrian navigation, micro electro mechanical system, inertial sensors, stride length estimation, pedestrian dead reckoning

1
GİRİŞ

Bir konuma ya da bir adrese hızlı ve güvenli şekilde ulaşılmasını sağlayan, yönlendirmeler yaparak yol kılavuzu görevini yerine getiren sisteme navigasyon denir [1]. Konum belirlemek için kullanılan yöntem teknik, bu tekniğin uygulamalarda tatbik edilmesi ise teknoloji olarak adlandırılır [2]. Teknolojik gelişmelerden önce navigasyon, kırsal bölgelerde nehir, sırt, tepe gibi yeryüzü şekilleri, yerleşim yerlerinde ise büyük yapılar referans gösterilerek yapılırdı. Dünyaya göre konumu sabit olan çok uzaklardaki yıldızlar gözlemlenerek de navigasyon yapılmaktaydı. Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS: Global Navigation Satellite System) teknolojisindeki gelişmeler sonrasında yerleşim bölgelerinde ve çevresinde yol ağlarını kullanarak GNSS tabanlı navigasyon kullanımı hızla yaygınlaşmıştır [3]. Ancak taşınabilir GNSS teknolojisinin doğruluğu ilk çıktığı zamanlarda navigasyon için gerekenden daha düşüktü. Sonrasında dış mekânda doğruluğu yaklaşık 10 m'yi bulan GNSS dünya çapında kabul görmüş bir teknoloji haline gelmiştir. [4]. Kullanıcıyı ulaşmak istediği konuma bu mertebede yaklaştırabilen navigasyon sistemleri kişinin dış mekânda çevresini algılamasını yeterince kolaylaştırır. Konum doğruluğundaki bu artışa karşın GNSS sinyalleri, ağaçlık alanlarda, yeraltında, kanyonlarda ya da çok sıkışık binalar arasında kısıtlıdır [5–8]. Bu kısıtlar, doğruluğun yaklaşık 1 m olması beklenen iç mekânda GNSS ile navigasyonu imkânsız hale getirmektedir. Diğer taraftan insanlar artık günlerinin büyük kısmını GNSS kullanımının kısıtlı olduğu, gökdelenler, büyük iş merkezleri, hastaneler, üniversiteler, kongre merkezleri gibi karmaşık ve gelişmiş iç tasarıma sahip mühendislik yapılarında geçirmektedir [9]. Yan yana birçok kapının olduğu iç mekânlarda, GNSS tarafından sağlanan metre mertebesindeki doğruluk çevreyi tanımak için yetersizdir. İç mekân uygulamaları için GNSS benzeri genel bir teknoloji arayışı günümüzde sürmektedir. Ayrıca iç mekânlardaki koordinat sistemlerinin evrensel olarak standartlaştırılamamış olması tek bir teknoloji ve tekniğin kabul görmesinin önündeki en büyük engeldir. Böylesi karmaşık yapılarda navigasyon problemlerinin üstesinden gelme arzusu atalet navigasyon sistemi (INS: Inertial Navigation System) olarak adlandırılan algılayıcı teknolojisinin navigasyon çalışmalarında kullanılmasını sağlamıştır [10]. INS tabanlı

navigasyon, temelde ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre olarak bilinen üç farklı atalet ölçü birimi (IMU: Inertial Measurement Unit) algılayıcısından gelen ölçülere bağlıdır [11]. Teknoloji firmaları son yıllarda IMU algılayıcılarının yüksek doğrulukta kayıt yapabildiği sistemler geliştirmektedir. Ancak bu sistemlerin yaya navigasyonuna uyarlanması çok da mümkün değildir [9, 12]. Diğer taraftan günümüzde insanlar artık akıllı telefonlarını yanlarından ayırmamaktadır. Akıllı telefonlar, alışveriş ve bankacılık işlemleri yapma, doktor randevusu oluşturma gibi işlemlerde hayatı kolaylaştırıcı rol üstlenmiştir. Günlük hayatta insanların sıkça ihtiyaç duydukları navigasyon da günümüzde akıllı telefonlar kullanılarak yapılır hale gelmiştir. Bu teknolojiyi üreten firmalar IMU algılayıcılarının boyutlarını küçültmüş ve onları akıllı telefonlara monte edilebilen küçük bir parça haline getirmiştir [13, 14]. Artık tüm akıllı telefonlarda mevcut olan, ivmeölçer, jiroskop ve manyetometreden oluşan modern IMU olarak bilinmekte olan bu elemente mikro elektromekanik sistem (MEMS: Micro electromechanic system) adı verilmektedir [10]. MEMS teknolojisine sahip akıllı telefon kullanan bir yaya başka bir cihaza ihtiyaç duymadan iç mekânda navigasyon yapabilir. Akıllı telefonlarda algılayıcılardan gelen ölçülerin bir arayüz yardımıyla kullanılması oldukça kolaydır. Konum doğruluğunun GNSS ile birlikte daha iyi hesaplanmasını sağlayan bu atalet algılayıcıları hem iç hem de dış mekân navigasyonunda kullanılabilir [8, 15].

İç mekânda MEMS teknolojisi ile gerçekleştirilen navigasyonun doğruluğu yayanın kat ettiği toplam mesafenin doğru olarak tespit edilmesine bağlıdır. Bu mesafe, yayanın attığı her bir adımın ve adım uzunluğunun yüksek doğrulukta hesaplanması ile bulunur. Bu tez çalışması, atalet algılayıcılarından elde edilen veriler üzerinden adım uzunluğunun hesaplanmasına odaklanmıştır. Geliştirilen teknikler ve yöntemler araştırılarak literatürde en çok kullanılan 10 yöntem irdelenmiş, açık kaynaklı test verileri kullanılarak yapılan karşılaştırmaların sonuçları ayrıntılı olarak ortaya konulmuştur.

1.1 Literatür Özeti

Son yıllarda navigasyon teknolojileri dış mekânlardan daha çok iç mekânlarda vakit geçiren yayaların sorunlarına odaklanmıştır [1]. Günümüzün ilgi odağı konularından biri olan iç mekân yaya navigasyonu; karmaşık ve büyük binalar içerisinde bir yerden başka bir yere gitmek isteyen yayalar için yol bulma bilimi olarak tarif edilebilir. Navigasyon uygulamalarının arayüzü anlaşılır ve kullanımı kolay olmalıdır [16]. Aksi takdirde navigasyon teknolojileri hakkında uzman bilgisine sahip olmayan son kullanıcıların navigasyon kullanımı zorlaşır. Bu kapsamda sanal gerçeklik ya da artırılmış gerçeklik içeren navigasyon sistemleri, kullanıcılara görsel ve işitsel olarak

kolaylık sağlamayı hedefler [17, 18]. Navigasyonda konum doğruluğunun arttırılması için genişletilmiş Kalman Filtresi (KF: Kalman Filter), küresel konumlama sistemi (GPS: Global Positioning System) ya da GPS-IMU gibi ek sistemler veya yöntemler kullanılır [13, 19–24]. Bu kapsamda Jahn (2010) ve Manos (2019), sadece basit bir akıllı telefon uygulaması üzerinden yayanın diğer cihazlara ihtiyaç duymayacağı navigasyon sistemlerine odaklanmıştır [25, 26]. Yayanın telefonu sabit tutması yaya için bir kısıtlılık oluşturduğundan akıllı telefonun hareketten etkilenmesinin azaltılması üzerine odaklanmış çalışmalar da mevcuttur [8, 27–29].

Yaya adım uzunluğunun belirlenmesi, yaya navigasyonunun yanında sporcu hareketlerinin tespiti [15], yaya davranışı ve yürüme parametrelerinin kestirimi [30, 31], insan sağlık durumu tahminleri [32, 33], enerji harcama miktarının belirlenmesi [12, 34], askeriye [35], antropoloji [36] gibi farklı çalışma alanları için de önemlidir. Shin vd. (2007), yalnızca MEMS'e dayanan yaya navigasyonu ve sağlık izleme için kullanılabilecek bir uygulama geliştirmiştir [3]. Adım uzunluğunu tespit edebilmek için ivme değerlerini ve yürüme frekansını içeren lineer bir formül geliştirmiştir. Fisher vd. (2012), iç mekân navigasyonu için ivmeölçer ve jiroskoptan oluşan iki IMU algılayıcısının konum doğruluğu üzerindeki etkilerini araştırmıştır [37]. Bichler vd. (2012) dış mekânda koşucuların adım uzunluğunu atalet algılayıcısı, IMU ve GPS ile kontrollü olarak belirlemiştir. Ek olarak üç adet kamera ile koşuyu izlemiştir [15]. Martinelli vd. (2017), yayaların farklı hareketlerine göre ağırlıklandırmalı bir adım uzunluğu kestirim yöntemi geliştirmiştir. En yüksek olasılığa dayanan adım uzunluğu kestirim yöntemini iç mekânda test etmiştir [11]. Jirawimut vd. (2003), Kim vd. (2004), Cho ve Park (2006), Roy vd. (2014), Deng vd. (2015), Nguyen vd. (2016), Tsang vd. (2018) yaptıkları farklı çalışmalarda gidilen mesafeyi belirlemek için adım uzunluğu ve adım sayısı verilerini kullanmıştır [7, 13, 19, 29, 38–40]. Kang vd. (2018) ortalama hız ve bölütlenmiş IMU sinyallerini kullanmıştır [8]. Geliştirilen yöntem, dış mekânda elde edilen GPS verileri ile desteklenmiştir. Evrişimli ve tekrarlı sinir ağı modellerini (CNN-RNNs: convolutional and repetitive neural networks) kullanan bu yöntem dış mekânda eğitilen sistem ile iç mekânda katedilen mesafeyi kestirmektedir. Real Ehrlich vd. (2018), MEMS'e dayalı iç mekân yaya navigasyonu uygulaması tasarlamıştır [41]. Diğer çalışmalardan farklı olarak ivmeölçer ve jiroskoptan elde edilen verilerin yanında manyetometre ve barometre verilerini de kullanmıştır. Tasarladıkları sistemi iyileştirmek için BLE (Bluetooth Low Energy) Beacons ve WLAN-fingerprint teknolojilerinden de faydalanmıştır. İç mekân ve dış mekân navigasyonunu bir arada ele alan Wang vd. (2019), Long Short-Term Memory ve Denoising Autoencoders (LSTM-DAE) tekniğini kullanarak adım uzunluğunu otomatik olarak belirlemiştir [12]. MEMS'ten ve IMU'dan gelen verileri kullanarak tasarladıkları adım uzunluğu yöntemi ile Ladetto (2000) [42],

Weinberg (2002) [43], Kim vd. (2004) [7] ve Scarlett (2007) [44]'in adım uzunluğu belirleme yöntemlerini karşılaştırmıştır.

Bahsedilen bu çalışmalarda algılayıcı verilerinin yanında yapay zekâ teknikleri, veriyi iyileştirmeye yönelik filtreler, yayaya ait kilo, yaş gibi özel parametreler kullanılmıştır. Bu sayede adım uzunluğu ve toplam gidilen mesafe daha hassas olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Diğer taraftan, farklı uygulama alanlarında sadece akıllı telefonlara bütünleşmiş MEMS teknolojisi kullanılarak adım uzunluğu kestirimi çalışmaları hâlâ popülerliğini korumaktadır. Bu tez çalışmasında 10 farklı araştırmacının atalet algılayıcı tabanlı adım uzunluğu kestirim yöntemleri karşılaştırılmıştır (Tablo 1.1).

Tablo 1.1 Atalet algılayıcıları ile adım uzunluğu kestirimi çalışmaları

Model Referansları	Modellerin Kullanıldığı Diğer Referanslar
Weinberg [43]	[26, 39, 45–48]
Ladetto [42]	[3, 11, 49]
Kim vd. [7]	[26, 45, 47, 48]
Scarlett [44]	[47, 50]
Alvarez vd. [51]	-
Bylemans vd. [52]	-
Mikov vd. [53]	-
Guo vd. [54]	-
Tian vd. [48]	-
Zeng vd. [55]	-

Test edilen yöntemlerin her biri ve kullanılan veri seti bu tez çalışmasının üçüncü bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Adım uzunluğu hesaplama yöntemlerinin kullanıldığı çalışma sahalarının hedefleri ve son kullanıcılarının farklı olması test işlemlerinde kullanılan veri setlerinin değişkenlik göstermesine neden olur. Adım uzunluğu hesaplayan araştırmacılar genellikle kendi veri setlerini üretir ve bu verileri diğer kullanıcılara açmaz. Üretilen ve paylaşılan veri setlerinin genelde tek bir amaca yönelik olması test işlemlerinde anlamlı istatistiksel sonuçlar çıkarmayı ve dolayısıyla adım uzunluğu hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılmasını zorlaştırır. Ancak iki farklı yöntemin birbirlerine göre üstünlüklerini ya da eksikliklerini ortaya koyan karşılaştırma çalışmaları da mevcuttur [46, 47, 56]. Fakat çok sayıda farklı yöntemi karşılaştıran kapsamlı çalışmalar hâlâ eksiktir. Literatürde karşılaşılan az sayıda geniş kapsamlı çalışma ise iç mekân navigasyonu ile ilgilenen araştırmacıların erişimine kapalıdır [26, 45]. Vezovcnik vd. (2018) tarafından yapılan çalışma ise geniş kapsamlı olmasına karşın yayaların belirli hızlarda yürüdüğü daha kolay açıklanabilen verileri içermektedir [57]. Buna karşın yayaların sabit hız ile yürümesi, günlük yaşantıda

insan yürüme davranışına uygun değildir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için bu tez çalışmasında test işlemleri Wang vd. (2019) tarafından sunulan açık kaynaklı ve kapsamlı veri seti üzerinden gerçekleştirilmiştir [12].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, seyahat halindeki yayaların ivmeölçer ve manyetometre algılayıcıları ile toplanmış açık veri setleri üzerinden yaya adım uzunluğu kestirim yöntemlerini karşılaştırmak ve en iyi sonuç veren yöntemi belirlemektir.

1.3 Hipotez

1. MEMS teknolojisinden elde edilen veriler yalnız başına iç mekân navigasyon uygulamalarında kullanılabilir.

2. Verinin karakterine uygun adım uzunluğu kestirimi yöntemi seçilebildiği takdirde akıllı telefonlar ile ek donanımlara gerek kalmadan tatmin edici sonuçlar elde edilebilir.

1.4 Tezin Yapısı

Çalışmanın ikinci bölümünde iç mekân konumlama sistemi hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan veri seti ile ilgili bilgiler sunulmuştur ve veri ön hazırlık işlemlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca adım uzunluğu kestirimi için kullanılan 10 farklı yöntemin ayrıntıları verilmiştir. Dördüncü bölümde adım uzunluğu kestirim yöntemlerinin analiz sonuçları verilmiştir. Beşinci ve son bölümde ise sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek vizyonu hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

2
İÇ MEKÂN KONUMLAMA TEMELLERİ

Mobil cihazlarla yaya navigasyonunu anlamak için konum, kuzey doğrultusu, koordinat sistemleri ve koordinat dönüşümleri gibi bazı temel kavramları anlamak gerekir. Yaya navigasyonu için gerekli teknikler ve teknolojiler bu kavramlar üzerinden şekillenir. Yaya navigasyonunda uygulanan işlemlerin sonuçlarını yorumlamak için kullanılan teknik ve teknolojilerin temel çalışma prensipleri kavranmalıdır. Bu tez çalışmasının ikinci bölümü mobil cihazların atalet algılayıcıları ile elde edilen verilerin navigasyon amaçlı kullanımına odaklanmıştır.

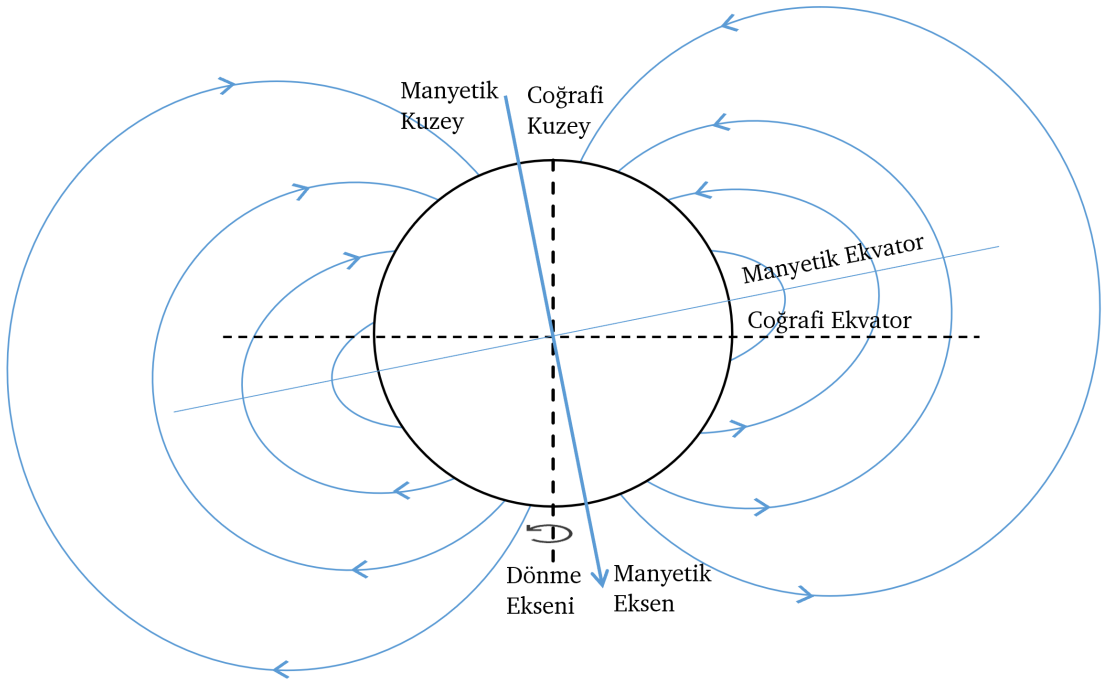
2.1 Koordinat Sistemleri ve Konum Gösterimi

Yerküre üzerindeki veya yakınındaki noktaların konumlarının tanımlanması, navigasyon işleminde başlangıç ve varış noktasının belirlenmesi ve uygun rotanın hesaplanması gibi işlemler bir referans çerçevesi ve bir koordinat sistemine dayalı olarak gerçekleştirilir [58]. Koordinat sistemleri oluşturulma amacına bağlı olarak çeşitlilik gösterir. Örneğin yeryüzündeki bir konumu tanımlamak için jeodezik koordinat sistemi kullanılırken harita tasarımları, kullanılan izdüşüm yöntemine bağlı farklı koordinat sistemleri üzerinden gerçekleştirilir. Koordinat sistemleri genel olarak başlangıç noktalarına, kabul ettikleri kuzey yönüne ve dönüklüklerine göre sınıflandırılır. Navigasyon sistemleri için geliştirilen koordinat sistemleri ile diğer koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametrelerinin doğru belirlenmesi navigasyonun doğruluğunu etkiler [59].

2.1.1 Kuzey Yönü

Koordinat sistemleri için yön kuzey referans alınarak belirlenir ve her koordinat sistemi için farklı bir kuzey tanımlanır [60]. Bunlar; jeodezik (coğrafi, gerçek) kuzey, astronomik kuzey, grid kuzeyi ve manyetik kuzeydir. Belirli bir noktanın bu kuzeylerden biriyle saat yönünde yaptığı açı azimut açısıdır. Bir nokta için jeodezik azimut ve astronomik azimut arasındaki fark birkaç derece saniyesi seviyesindedir.

Jeodezik kuzey ve manyetik kuzey arasındaki fark ise birkaç derece seviyesine çıkar. Manyetik kuzey hem Kuzey hem de Güney Yarımküre'de manyetik yönlerin temelidir. Yeryüzündeki konuma göre manyetik kuzey ve gerçek kuzey arasındaki açı manyetik sapma nedeniyle değişir (Şekil 2.1) [61, 62].



Şekil 2.1 Dünya manyetik alanının şematik gösterimi [62]

2.1.2 Koordinat Sistemleri - Koordinat Çerçeveleri

Bir navigasyon nesnesi, GNSS anteni, INS algılayıcısı gibi bir navigasyon ekipmanının parçası; hava taşıtı, gemi, araba, tren, uydu gibi araçlar; bir insan, hayvan ya da mobil bilgi işlem cihazı olabilir. Navigasyon bu nesnenin konumunun, dönüklüğünün ve hareketinin tarif edilmesine dayanır [63]. Nesnenin konumunu ve doğrusal hareketini tanımlamak için onun üzerinde özel bir noktasal tanımlayıcı seçilmelidir. Bu nokta nesnenin orijinini ifade eder. Orijin, nesnenin ağırlık merkezi, geometrik merkezi veya nesne üzerinde keyfi olarak seçilmiş uygun bir nokta olabilir. Örneğin, atalet algılayıcılarının kullanıldığı bir yaya navigasyonunda yayanın taşıdığı algılayıcıların eksenlerinin kesiştiği nokta uygun bir başlangıç noktasıdır.

Bir nesnenin dönüklüğünü ve açısal hareketini tarif etmek için üç eksen belirlenmelidir. Bu eksenler eş düzlemli olmamalı ve birbirlerine dik olmalıdır. Uygun eksen seçimi, nesnenin hareket yönünü ve hareketsiz kaldığı andaki düşey yönünü içermelidir. Bir nesnenin konumu, dönüklüğü ve hareketi tek başına anlamlı bir bilgi ifade etmez. Nesnenin göreli olarak tanımlanabileceği bir referans gereklidir.

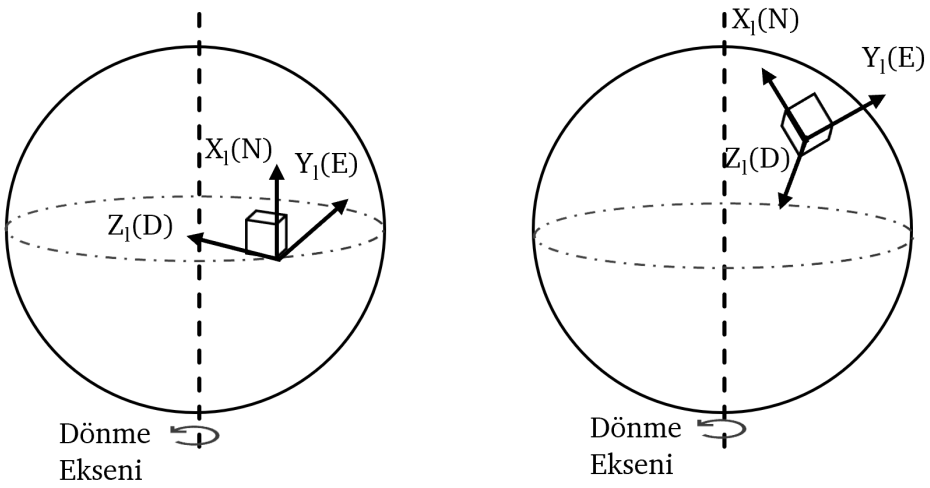
Referans, konum, dönüklük ve hareketin yanında bir başlangıç noktası ve bir dizi eksen ile tanımlanır. Uygun başlangıç noktası, Dünya'nın merkezi, Güneş Sistemi'nin merkezi veya uygun bir yer işaretleyicisi olarak seçilebilir. Uygun eksenler; kuzey, doğu ve düşey yönler, Dünya'nın dönme ekseni ve ekvator düzlemindeki vektörler, yerel bir karayolu ağının kavuşumunu başlangıç kabul ederek yol boyunca uzanan vektörler, bir binanın duvarları ya da iki yer işaretleyicisini birleştiren bir doğrultu olabilir. Bir nesnenin veya bir referansın orijini ve eksenleri toplu olarak bir koordinat çerçevesi (CF: Coordinate Frame) tanımlar. Eksenler birbirlerine göre dik olduğunda koordinat çerçevesi de dik olur. Sistem altı serbestlik derecesine sahiptir. Bunlar orijinin konumu ve eksenlerin dönüklüğüdür. Konum ve dönüklük tanımlamaları başka bir çerçevede ifade edilir. İki çerçeveli bir problemde hangi çerçevenin referans hangisinin nesne çerçevesi olarak tanımlanacağı problemin çözümüne bağlı olarak değişir. Bu ilişki görelilik ilkesi olarak bilinir. Örneğin, bir arabanın yola göre konumunun tarifi, arabaya göre bir yolu tarif etmekle aynı bilgiyi aktarır. Dolayısıyla herhangi bir navigasyon problemi en az iki koordinat çerçevesini içermelidir. Bunlar; (1) konumu ve / veya yönelimi istenen gövdeyi tanımlayan nesne çerçevesi, (2) nesnenin konumunun ve / veya yönünün istendiği göreceli olarak Dünya gibi bilinen bir gövdeyi tanımlayan referans çerçevesidir. Bununla birlikte, birçok navigasyon problemi, birden fazla referans çerçevesini veya birden fazla nesne çerçevesini içerir. Örneğin atalet algılayıcıları, hareketi eylemsizlik alanına göre ölçer, oysa navigasyon sisteminin kullanıcısı Dünya'ya göre konumunu bilmek ister. Dünya'nın dönüşünü göz ardı ederek Dünya'ya göre hareketi modellemek hataya neden olur. Doğru navigasyon için farklı koordinat çerçeveleri arasındaki ilişki uygun bir şekilde modellenmelidir. Herhangi iki koordinat çerçevesi duruş olarak bilinen göreceli bir dönüklüğe sahip olabilir. Bir çerçevenin diğerlerine göre duruşu kendine özgü sayılar dizisi içerir. Bu sayı dizileri karşılıklı olarak dik üç eksenden oluşan herhangi bir set boyunca bileşenlere ayrılabilen vektörleri içerir. Pratik anlamda, bir arabanın yerel grid sistemine göre konumu, araba gövdesi çerçevesinin eksenleri baz alınarak yol grid çerçevesi veya kuzey, doğu, aşağı eksenlerine göre çözülebilir. Çözümün gerçekleştirildiği çerçevenin orijinini tanımlamak gerekli değildir.

Bir koordinat çerçevesinin tanımı, koordinat sistemi olarak bilinen bir dizi kuralı ve koordinat sistemi kullanılarak bu çerçeveye göre bilinen nesnelerin tanımlanmasını sağlayan bir ölçümler setini içermektedir. Bir koordinat çerçevesi, ölçümler kullanılarak bu ölçümlere karşılık gelen koordinat sisteminin matematiksel canlandırması olarak düşünülebilir. Aynı koordinat sisteminin farklı tasavvurları birbirinden farklıdır. Tarihsel olarak ülkeler kendi anlayışlarına göre farklı koordinat çerçeveleri üretmiştir. Bununla birlikte ülkeler Uluslararası Dünya Dönüklük ve Referans Sistemleri Servisi (IERS: International Earth Rotation and Referans Systems

Service) tarafından yönetilen referans çerçevelerini benimsemiştir. Navigasyonda kullanılan ana koordinat sistemleri atalet, Dünya Merkezli Dünya Sabit (ECEF: Earth Centered Earth Fixed), yerel navigasyon ve gövde çerçeveleridir. Bunlardan yerel navigasyon ve gövde çerçeveleri aşağıda açıklanmaktadır.

2.1.2.1 Yerel Seviye Koordinat Çerçevesi

Yerel seviye koordinat çerçevesi farklı kaynaklarda farklı isimlendirilmektedir. Bunlar; yerel ya da yersel koordinat sistemi [61], yerel seviye çerçeve [59, 64, 65], yerel jeodezik çerçeve [66], coğrafi çerçeve [67], toposentrik çerçeve [63], navigasyon çerçevesi [58], yerel teğet düzlem koordinat sistemidir [63, 65]. Yerel koordinat çerçevesi dünyanın yüzeyine bağlıdır ve başlangıç noktası dünya yüzeyindeki herhangi bir noktadır (Şekil 2.2). Sistem Kartezyen (X_l - North, Y_l - East, Z_l - Down) ya da



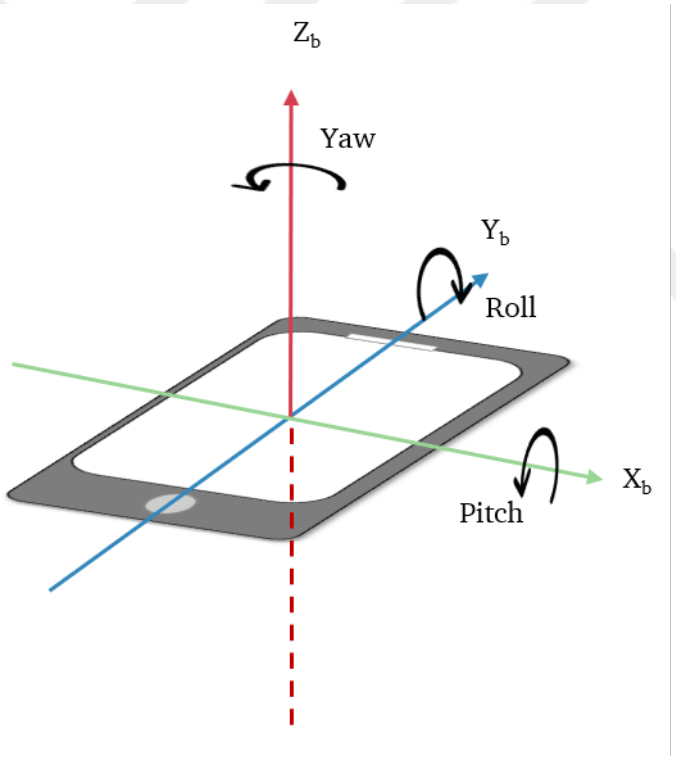
Şekil 2.2 Yerel navigasyon çerçevesi gösterimi [63]

kutupsal (uzunluk, açı) koordinatlarla tanımlanır. Aşağı (D), ortalama deniz seviyesi yerçekimi eşpotansiyel yüzeyi olan jeoite yaklaşık olarak benzeyen referans elipsoidin normali şeklinde tanımlanır [67]. Kuzey (N) Dünya'nın dönme eksenine doğru olan yöndür. Doğu (E), sağ el kuralına göre D ve N eksenlerine dik yöndeki eksendir. Sağ el kuralına göre X, Y, Z eksenleri her zaman sağ elin baş, işaret ve orta parmakları birbirlerine dikey şekilde uzatıldığında baş parmak X, işaret parmağı Y ve orta parmak Z yönünü gösterecek şekilde tanımlanır. Navigasyon alanında Kuzey-Doğu-Aşağı (NED) ve Doğu-Kuzey-Yukarı (U) (ENU) sıralaması kullanımları yaygındır. NED uçuş kontrolünde, ENU hem kara araçlarında hem de yaya navigasyonunda tercih edilir

[61]. Bunun dışında X = N, Y = Batı (W), Z = U ve X = Güney (S), Y = W, Z = D kullanımları da mevcuttur ve bu sıralamaların hepsi sağ el kuralına uygundur.

2.1.2.2 Gövde Koordinat Çerçevesi

Gövde çerçevesi nesneye veya algılayıcıya bağlıdır ve üç ortogonal kartezyen koordinat ekseniyle (X_b, Y_b, Z_b) ya da bu eksenler etrafındaki dönüklükler (Roll, Pitch, Yaw) ile ifade edilir [61]. Gövde çerçevesinin başlangıç noktası genellikle nesnenin ağırlık merkezi ile çakışır. Eksenlerin düzeni mevcut ölçüm sistemine göre farklılık gösterir. Örneğin bir uçak için uçuş yönü X_b, bu eksen etrafındaki dönüklük yuvarlanma, dikey eksen Z_b, bu eksen etrafındaki dönüklük sapma ve ortogonal seti tamamlayan eksen ise Y_b ve bu eksen etrafındaki dönüklük yükselme açısı olarak tanımlanır. Akıllı telefonlarda ise bu durum telefonun boyuna paralel eksen Y_b, enine paralel eksen X_b ve düşey eksen Z_b olacak şekilde belirtilir (Şekil 2.3) [63].

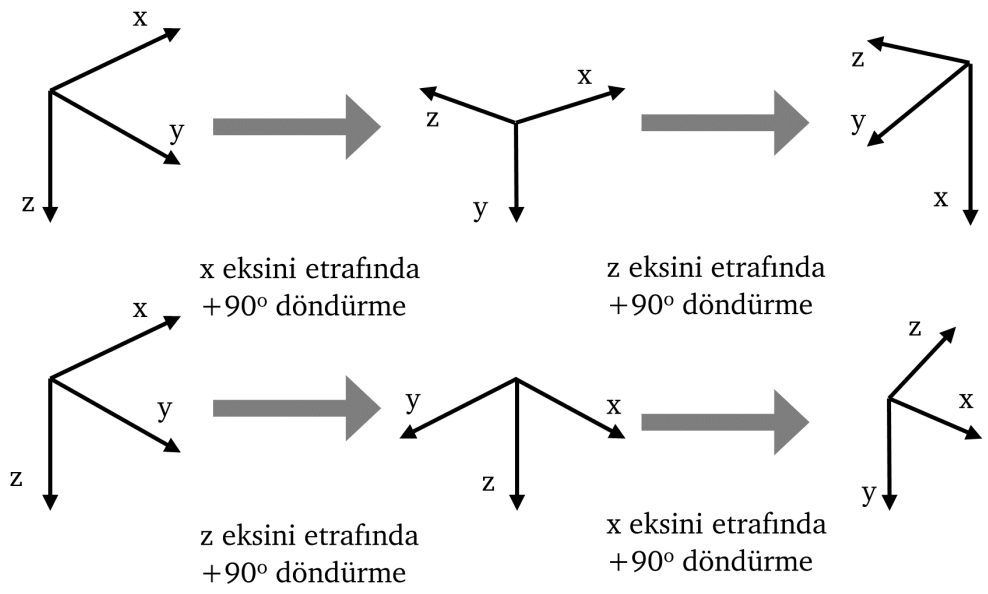


Şekil 2.3 Akıllı telefon gövde çerçevesi gösterimi [61]

2.1.3 Koordinat Dönüşümleri

Bir çerçeveden diğerine koordinat dönüşümünü tanımlamak için birkaç farklı yol vardır [58]. Bunun birinci sebebi göreceli dönüklüktür (relative orientation). Başlangıç noktası aynı olan iki koordinat çerçevesi arasındaki dönüklük, çerçevedeki tüm noktalara uygulanan koordinat farkları vektörüyle açıklanır. Navigasyon için kullanılan referans çerçeveleri ortogonaldir. Bu nedenle üç açı, göreli dönüklükleri

tanımlamak için yeterlidir. Dönüşüm doğrusaldır ve doğrultu kosinüs matrisi (DCM: Direction Cosines Matrix), dönüklük açıları (rotation angles) ve dördeyler (quaternions) ile elde edilebilir. Birbirini izleyen dönüklük veya eksen dönüşümlerini birleştirirken, bunları temsil etmek için kullanılan yöntemlerden bağımsız olarak, bunların doğru sırada uygulanması esastır [63]. Bunun nedeni dönüşlerin veya dönüşümlerinin sırasının nihai sonucu belirlemesidir. Matematiksel ifade ile dönüşümlerde değişme özelliği yoktur. Örneğin x ekseni etrafında yapılan +90° dönüklük ve ardından z ekseni etrafında yapılan +90° dönüklük ile önce z ekseni etrafında yapılan +90° dönüklük ve ardından x ekseni etrafında yapılan +90° dönüklük sonucu elde edilen yönelim birbirinden farklıdır (Şekil 2.4).



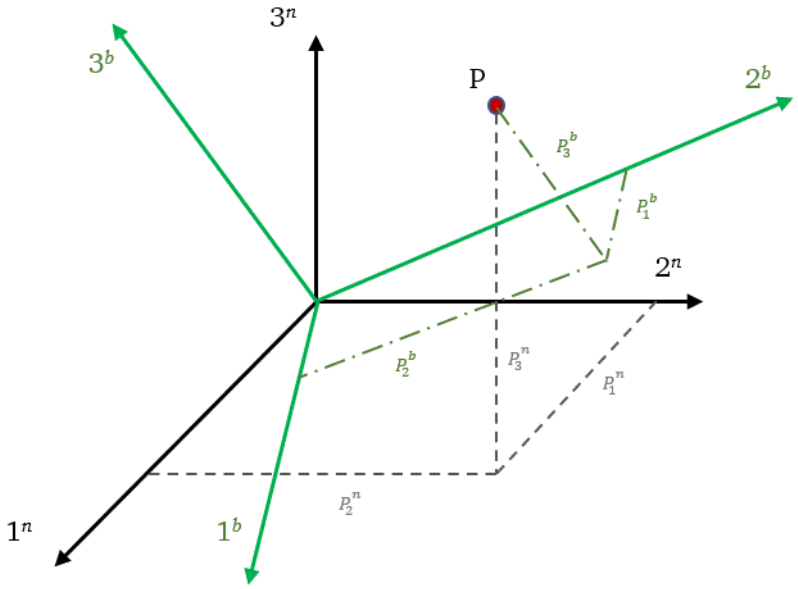
Şekil 2.4 Dönüklüklerin değişme özelliğinin olmamasının gösterimi [63]

2.1.3.1 Doğrultu Kosinüs Matrisi

Eş merkezli ve göreli yönelimleri rastgele olan navigasyon (*n*) ve gövde (*b*) çerçeveleri düşünüldüğünde (Şekil 2.5) bir P noktasının konumu *n* sisteminde $\mathbf{P_n}$ ve *b* sisteminde $\mathbf{P_b}$ vektörüyle Eşitlik 2.1'deki şekilde ifade edilebilir [58, 63].

$$\boldsymbol{P_n} = \begin{bmatrix} P_1^n \\ P_2^n \\ P_3^n \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{P_b} = \begin{bmatrix} P_1^b \\ P_2^b \\ P_3^b \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

Noktanın her iki çerçevedeki koordinatları, vektörlerin çerçevelerin ilgili eksenleri üzerindeki dik izdüşümleridir ve vektörlerin analitik gösterimleri Eşitlik 2.2 ve 2.3'teki



Şekil 2.5 n ve b koordinat sistemleri [58]

gibidir.

$$\boldsymbol{P_n} = P_1^n \boldsymbol{e_1^n} + P_2^n \boldsymbol{e_2^n} + P_3^n \boldsymbol{e_3^n} \tag{2.2}$$

$$\boldsymbol{P_b} = P_1^b \boldsymbol{e_1^b} + P_2^b \boldsymbol{e_2^b} + P_3^b \boldsymbol{e_3^b} \tag{2.3}$$

$j = 1,2,3$ olmak üzere $P_j^n = \boldsymbol{e}_j^n \cdot \boldsymbol{P}_n$ skaler çarpımı, n koordinat sistemindeki bir P noktasının koordinatlarını ve e_j^n üç eksene ait birim vektörleri temsil etmektedir. P noktasının b koordinat sistemindeki koordinatları ve birim vektörleri de benzer şekilde ifade edilmektedir. b çerçevesindeki birim vektörler $\boldsymbol{e}_k^b$ ile ifade edildiğinde vektörlerin birbirleriyle skaler çarpımları çerçeveler arasındaki ilişkiyi ifade eden katsayılar dizinini verir (Eşitlik 2.4, 2.5). Bu katsayılar n sistemindeki $j.$ ve b sistemindeki $k.$ eksenler arasındaki açıların kosinüslerini verir. Bundan dolayı R_b^n dönüşüm matrisi genellikle DCM olarak bilinir. Ayrıca R_b^n matrisinin $k.$ sütunu n çerçevesinde $\boldsymbol{e}_k^b$ birim vektörünü ve yine R_b^n matrisinin $j.$ satırı b çerçevesinde $\boldsymbol{e}_j^n$ birim vektörünü temsil eder.

$$R_{j,k} = \boldsymbol{e_j^n} \cdot \boldsymbol{e_k^b} \tag{2.4}$$

$$R_b^n = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_1^n \cdot \boldsymbol{e}_1^b & \boldsymbol{e}_1^n \cdot \boldsymbol{e}_2^b & \boldsymbol{e}_1^n \cdot \boldsymbol{e}_3^b \\ \boldsymbol{e}_2^n \cdot \boldsymbol{e}_1^b & \boldsymbol{e}_2^n \cdot \boldsymbol{e}_2^b & \boldsymbol{e}_2^n \cdot \boldsymbol{e}_3^b \\ \boldsymbol{e}_3^n \cdot \boldsymbol{e}_1^b & \boldsymbol{e}_3^n \cdot \boldsymbol{e}_2^b & \boldsymbol{e}_3^n \cdot \boldsymbol{e}_3^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & R_{1,3} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & R_{2,3} \\ R_{3,1} & R_{3,2} & R_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_{n_1,b_1} & c\theta_{n_1,b_2} & c\theta_{n_1,b_3} \\ c\theta_{n_2,b_1} & c\theta_{n_2,b_2} & c\theta_{n_2,b_3} \\ c\theta_{n_3,b_1} & c\theta_{n_3,b_2} & c\theta_{n_3,b_3} \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

2.1.3.2 Euler Açıları

DCM'ye alternatif olarak *b* ve *n* çerçevelerinin birbirlerine göre bağıl yöneltmeleri bir dizi dönüklük ile ifade edilebilir ve belirli eksenler etrafında bu dönüklüklerin ardışık olarak uygulanmasıyla bulunabilir [58]. Her bir eksen için dönüklük matrisleri aşağıdaki gibi hesaplanır (Eşitlik 2.6):

$$R_1(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\Theta & sin\Theta \\ 0 & -sin\Theta & cos\Theta \end{bmatrix}; \quad R_2(\Phi) = \begin{bmatrix} cos\Phi & 0 & -sin\Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\Phi & 0 & cos\Phi \end{bmatrix}; \quad R_3(\Psi) = \begin{bmatrix} cos\Psi & sin\Psi & 0 \\ -sin\Psi & cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.6}$$

$R_1(\Theta)$, $R_2(\Phi)$ ve $R_3(\Psi)$ matrisleri sırasıyla 1, 2 ve 3 numaralı eksenler etrafında sağ el kuralına göre saat yönünün tersinde pozitif Θ (pitch), Φ (roll) ve Ψ (yaw) açılarıyla yapılmış dönüklükleri temsil etmektedir. Bu dönüklükler Euler açıları olarak bilinir. Her matris özelleşmiş bir DCM'dir ve ortogonaldir: $R_i^{-1}(\theta) = R_i^T(\theta)$ ve tersi $R_i^{-1}(\theta) = R_i(\text{-}\theta)$ şeklindedir. *b* koordinat sisteminden *n* koordinat sistemine geçmek için önce 3. eksen etrafında Ψ, sonra 1. eksen etrafında Θ son olarak da 2. eksen etrafında Φ kadar dönüklük gerçekleştirilmelidir (Eşitlik 2.7). Dönüşün gerçekleştiği eksenlerin seçimleri tamamen eldeki probleme bağlıdır. Uygulanan dönüklüklerin sırası sonuç matrisi değiştirmektedir. Bu tekillik özelliği olarak adlandırılır. Ancak farklı kombinasyonlar aynı sonucu verebilir.

$$R_b^n = R_\Psi^z * R_\Theta^x * R_\Phi^y \tag{2.7}$$

$$R_b^n = \begin{bmatrix} s\Psi s\Theta s\Phi + c\Psi c\Phi & s\Psi c\Theta & s\Psi s\Theta c\Phi - c\Psi s\Phi \\ c\Psi s\Theta s\Phi - s\Psi c\Phi & c\Psi c\Theta & c\Psi s\Theta c\Phi + s\Psi s\Phi \\ c\Theta s\Phi & -s\Theta & c\Theta c\Phi \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Euler açıları ve DCM arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde bulunur (Eşitlik 2.9).

$$\Theta = tan^{-1}\left(\frac{R^n_{b3,2}}{R^n_{b3,3}}\right)$$

$$\Phi = -sin^{-1}(R^n_{b3,1}) \tag{2.9}$$

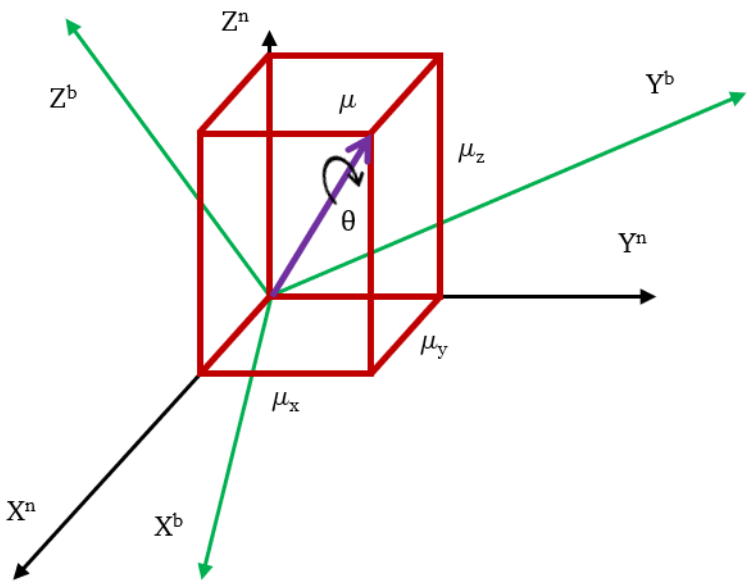
$$\Psi = tan^{-1}\left(\frac{R^n_{b1,2}}{R^n_{b2,2}}\right)$$

2.1.3.3 Dördey (Quaternion)

Bir dördey i, j ve k birim vektörleriyle birlikte gerçek kısmı q_w ve üç sanal bölümü q_x, q_y ve q_z olan, üç boyutlu uzayda vektör dönüklüklerinin temsili için kullanılan dört parametreli bir karmaşık sayıdır [61, 68]:

$$q = q_w + iq_x + jq_y + kq_z \tag{2.10}$$

Burada q_w dönüklüğün bir fonksiyonudur ve diğer üç bileşen eksen dönüklükleri ve onların büyüklüklerini ifade eder. Dördey, referans çerçevesinde tanımlanan, bir dönme ekseni olarak düşünülebilecek μ yönelim vektörü etrafındaki θ açısı kadar tek bir dönüşle bir koordinat sisteminden diğerine dönüşüm sağlar [61] (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Dördeyin gösterimi [61]

μ ekseni etrafındaki θ dönüklüğünün dördey ile ifadesi Eşitlik 2.11'deki gibidir.

$$q = \begin{bmatrix} q_w \\ q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos(\frac{\mu}{2}) \\ \mu_x/||\mu|| \cdot sin(\frac{\theta}{2}) \\ \mu_y/||\mu|| \cdot sin(\frac{\theta}{2}) \\ \mu_z/||\mu|| \cdot sin(\frac{\theta}{2}) \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

Dördey ile Euler açıları arasındaki ilişki Eşitlik 2.12'de verilmiştir.

$$\Theta = tan^{-1}\left(\frac{2(q_x q_y - q_w q_z)}{q_w^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2}\right)$$

$$\Phi = -sin^{-1}(-2(q_y q_z + q_w q_x)) \tag{2.12}$$

$$\Psi = tan^{-1}\left(\frac{2(q_x q_z - q_w q_y)}{q_w^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2}\right)$$

Yalnızca dört bileşenle koordinat dönüşüm matrisini ifade etmek hesaplama açısından daha verimlidir. Euler açılarının tekillik özelliğinin yarattığı sorunlar dördeyde yoktur. Ayrıca Euler Açıları yönteminin sahip olduğu "Gimbal Lock" adı verilen jiroskobun üç eksendeki dönüklüklerden ikisinin birbiriyle çakışması sonucu normalde altı olması gereken serbestlik derecesinin bir serbestlik derecesi düşmesine neden olan etki dördeyde yoktur [10]. Ancak dördeylerin kullanımı sezgisel değildir bu da navigasyon denklemlerini takip etmeyi zorlaştırır [61, 63].

2.2 Teknolojiler, Teknikler ve Temel Prensipleri

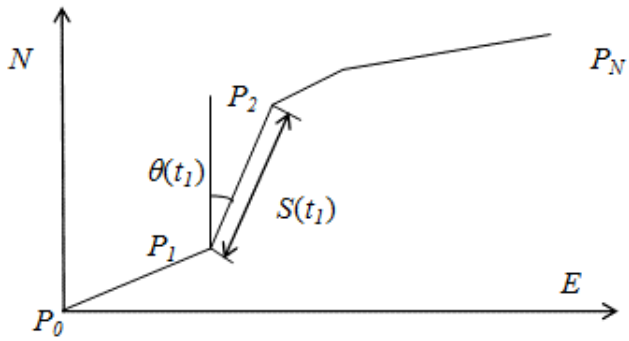
İnsanlar iç mekânda bir konumdan başka bir konuma en hızlı şekilde erişebilmek ve aradıkları noktaları bulmak (havaalanı kapıları, tuvaletler gibi) için navigasyon uygulamasına ihtiyaç duyar. İhtiyaçlara çözüm aranırken büyük binalarda birden fazla katın varlığı, kullanılan her navigasyon yönteminin doğruluğunun bilinememesi gibi zorluklar hâlâ sürmektedir. İhtiyaçları karşılayabilecek bir iç mekân konumlama teknolojisi ve seçilen teknolojiye göre bir tekniğin uygulanması oldukça önemlidir. Pahlavan ve Krishnamurthy (2011), Wang vd. (2019), Samama (2019) ve Real Ehrlich (2019) çalışmalarında teknik ve teknolojileri farklı şekillerde sınıflandırmıştır [2, 12, 61, 69]. Bu tekniklerden en çok tercih edilen yayılım tekniği, parmak izi ve DR'dır. Bu çalışmanın da konusu olan IMU teknolojisi ile birlikte bu teknikler aşağıda anlatılmaktadır.

2.2.1 Konumlama Teknikleri

Yayılım tekniği, çeşitli frekanslarda sinyal yayan vericilerin, yaydıkları sinyallerin gücüne bağlı olarak çalışan bir yapıya sahiptir [69]. Bu teknikte kullanılan sinyaller, bina içindeki diğer pek çok vericiden gelen sinyaller ile karışabilir. Ayrıca kullanılan sinyallerin etkisi binada pek çok etmen tarafından emilerek azalır [70]. Bu sorunlar, iç mekân navigasyonunda yayanın konumunun yanlış ya da düşük doğrulukta hesaplanmasına neden olur [71]. Konumun hatalı tespit edilmesi navigasyon rotasının yanlış hesaplanmasını beraberinde getirir. Yayılım tekniği ile konum belirlemede sinyal verici ve sinyal alıcı arasındaki mesafenin ve bunların birbirlerine göre konumlarının çok iyi belirlenmesi gereklidir. Genellikle bu tekniğin doğruluğu, ilave teknikler ve teknolojiler kullanılarak artırılmaya çalışılmaktadır [72–74].

Parmak izi tekniği, başta Wi-Fi (Wireless fidelity) olmak üzere pek çok farklı sinyal ile birlikte kullanarak navigasyonu hedefleyen bir tekniktir. İçinde bulunulan mekândaki farklı sinyalleri kullandığı için ek bir sisteme ihtiyaç duymadan çalışır. Parmak izi tekniği iki aşamada çalışır [75, 76]. Birinci aşamada navigasyonun yapıldığı ilgili ortamdaki tüm sinyaller ve bunların gücü (RSS: Received Signal Streigth) gibi veriler bir veri tabanında toplanır. Konumları bilinen sinyal bilgileri parmak izi olarak isimlendirilirken sinyallerin toplandığı veri tabanı "radiomap" olarak adlandırılır. İkinci aşamada ise toplanan veriler, seçilen bir algoritma tarafından birbirleri ile eşleştirilir veya karşılaştırılır [77]. Parmak izi, kullanılacağı ortamın büyüklüğüne, toplanan sinyallerin özelliklerine, çıktılarına, sinyallerin toplandığı veri tabanının türüne ve konum kestirim algoritmasına göre sınıflandırılabilir [78]. Her bir sınıf, tekniğin doğruluğunu farklı oranda etkiler. Değişik kaynaklardan toplanan sinyallerin birbirleri ile uyumsuzluğu, sinyal iletiminde meydana gelen kopukluklar, iç mekânda vericilerin yanlış konumlandırılması parmak izi tekniğinin bilinen kısıtlarıdır [79].

DR tekniği, kullanıcının hareketine göre bilinen bir başlangıç noktasından yer değiştirmelerin ölçülmesi ya da hesaplanmasıyla elde edilen bir konum çözümüdür. Ataletsel navigasyon ve pusula / hız göstergesi olarak bilinen iki tür DR tekniği mevcuttur [80]. DR mekanizmasında önce adım anı tespit edilir, daha sonra adım uzunluğu belirlenir. Jiroskop veya pusuladan elde edilen dönüklük bilgisiyle yön ve konum hesaplanır. Hesaplanan konumlar ve adım uzunluklarından, toplam katedilen mesafe elde edilir. Şekil 2.7'de DR tekniğinde bilinen bir başlangıç noktası P_0'dan varış noktası P_N'ye gidilen yol temsil edilmektedir. Burada, S ile ifade edilen, P_0, P_1 noktası arası veya P_1, P_2 noktası arası mesafe, adım uzunluğunu göstermektedir. θ açısı ise heading açısı olarak bilinmektedir. Önceki konum N_1 ve E_1 ile ifade edildiğinde, güncel konum N_n ve E_n Eşitlik (2.13) ve (2.14) kullanılarak hesaplanmaktadır.



Şekil 2.7 Dead Reckoning ilkesi [81]

$$E(t_n) = E(t_0) + \sum_{0}^{n-1} S(t_i) * sin(\theta(t_i)) \tag{2.13}$$

$$N(t_n) = N(t_0) + \sum_{0}^{n-1} S(t_i) * cos(\theta(t_i)) \tag{2.14}$$

Yayalar için DR (PDR) olarak da bilinen DR, sinyal tabanlı diğer yöntemlere bir alternatif oluşturmaktadır [82]. DR genellikle IMU ve MEMS ile birlikte kullanılır. Böylece DR'nin konum doğruluğu IMU ve MEMS'ten sağlanan ivme, hız, dönüklük gibi bilgiler ile artmaktadır. Bu tekniğin en önemli eksikliği, başlangıçtaki konum hatasının navigasyon boyunca kümülatif şekilde artmasıdır [83]. Bu artış, sistem IMU ile birlikte kullanıldığında sıfır hız güncellemeleri (ZUPTs: Zero Velocity Updates) uygulanarak azaltılabilir. Sistem IMU ile yeterli doğruluğa ulaşabilirken IMU kullanımı, yayaya bir kısıtlılık getirir. Bu nedenle çok sayıda araştırmacı, doğruluğu düşük de olsa MEMS kullanımı üzerinde yoğunlaşmıştır [3, 29, 39, 41]. Ayrıca IMU veya MEMS'ten alınan dönüklük bilgilerinin yayanın vücuduna göre hesaplanması bu tekniğin kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır [84].

2.2.2 İç Mekân Konumlama Teknolojileri

Kızılötesi (IR: Infrared), ultrason, manyetik, optik ve görüntü gibi iç mekân navigasyonunda kullanılan çeşitli teknolojiler mevcuttur. Bu teknolojilerin iç mekân navigasyonunda kullanılmasının bazı üstünlükleri ya da kısıtları olabilir [85].

IR teknolojisi, diğer iç mekân navigasyon teknolojileriyle karşılaştırıldığında görece daha doğru sonuçlar veriyor görünse de algılayıcı kurulum maliyeti yüksektir ve algılayıcının gün ışığına duyarlı olması gibi birçok zorluk barındırır [83]. Ultrason teknolojisinin sinyallerinin yansıma, gürültü kaynaklarından kötü etkilenme ve IR'ye göre daha düşük ölçüm doğruluğu verme gibi eksiklikleri vardır [85]. Radyo Frekansı

teknolojisinde radyo dalgalarının insan bedeninden ya da duvar gibi engellerden kolaylıkla geçmesi önemli bir üstünlük olarak düşünülebilir.

IMU algılayıcıları, hava ve kara taşıtları navigasyonunda ve robotik gibi alanlarda geniş bir kullanıma sahiptir [28]. Algılayıcılar önceleri GPS ile birlikte dış mekân navigasyonunun doğruluğunu artırmak için kullanılmaktaydı. Günümüzde ise DR tekniği ile birlikte iç mekân navigasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır [86]. Navigasyon için gerekli olan verilerin direkt algılayıcılardan toplanması, algılayıcılardan elde edilen sinyallerin Wi-Fi, kızılötesi sinyalleri gibi kesintiye uğramaması ve yüzeylerden yansımaması IMU tabanlı sistemlerin üstünlüğüdür. IMU algılayıcılarının ölçüm doğruluğunun yüksek olması da sistemin diğer bir üstünlüğü olarak kabul edilmektedir. Ancak algılayıcılar çok küçük hatalar ile veri toplasa bile PDR tekniği kullanıldığında bu hatalar kümülatif olarak artar. Gidilen yol uzadıkça beklenen doğruluk azalır [87]. Bu nedenle PDR dışındaki teknikler IMU tabanlı sisteme entegre edilebilir. IMU tabanlı teknoloji kullanılarak yapılan çalışmalarda yararlanılan algılayıcılar arasında pedometre, pusula, barometre, adım uzunluk algılayıcısı, laserscanner ve RFID etiketleri ve alıcıları sayılabilir. Ayrıca, Connectivity, ZUPTs, Sensor Fusion ve Waypoints gibi bazı konum izleme algoritmaları IMU tabanlı teknolojiler ile birlikte kullanılmaktadır [88].

IMU ile yaya navigasyonu ek sistemler ile daha yüksek doğrulukta sonuçlar vermesine karşın, günlük hayatta yayaların kolay kullanamayacağı bir sistemdir. Hem maliyetinin yüksek olması hem de yayaların bellerine veya ayaklarına giydikleri IMU sistemleri kullanıcı dostu değildir. Diğer taraftan akıllı telefonlar, oyuncaklar, elektrikli aletler, tabletler, bilgisayarlar gibi mobil cihazlara takılan son teknoloji ürünü düşük maliyetli MEMS tabanlı IMU kullanımı son yıllarda önem kazanmaktadır [89].

Düşük maliyetli MEMS tabanlı IMU, standart IMU teknolojisi kadar hassas olmamasına rağmen INS içeren çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. MEMS tabanlı IMU'yu cazibeli hale getiren husus geleneksel IMU gibi ek donanıma gereksinim duymaması ve her an her yerde yayaların yanında bulundurduğu akıllı telefonların bir parçası olmasıdır. Bunun yanında sistematik hata, algılayıcı ölçek faktörü hatası ile eksenlerin hizalanması ve birbirine göre dik konumlanması hataları MEMS tabanlı IMU'nun başlıca hata kaynaklarıdır [61].

• **İvmeölçer**, ivme (m/s^2) değerlerini üç eksen boyunca veren bir cihazdır [47]. Temelde kütle, yay ve ölçek olarak adlandırılan üç bileşenden oluşur [64]. Kütle yaya bağlıdır ve harekete geçtiğinde ölçek yer değiştirme hareketini elektronik sinyale dönüştürür. İvmeölçerden elde edilen ivme verileri, adım tespiti için kullanılabilir [3, 90]. İvme verilerinin birinci dereceden integrali alınarak hız verisi elde edilir ve buna

dayalı olarak da adım uzunluğu bulunabilir [91]. İvme değerlerinin ikinci dereceden integrali alınarak doğrudan adım uzunluğu da hesaplanabilir [91–93].

Diğer MEMS algılayıcılarında olduğu gibi ivmeölçerin de hata kaynakları vardır. Sistematik hataların yanı sıra yayanın hareketleri veya telefonun yayanın üzerinde bulunduğu konumdan kaynaklı hatalar mevcuttur. Sistematik hataları belirlemek için uzun süreli ölçümler yapılabilir. Böylece tespit edilen hata miktarı algılayıcı verilerinden çıkarılarak daha duyarlı veri elde edilebilir.

• **Jiroskop**, üç eksen boyunca açısal hız bilgisini (rad/s) sağlar [29]. Açısal hız ve ivmeölçer verileri iç mekân navigasyonunda birlikte kullanılarak anlık konum bilgisinin hesaplanması için gereken heading açısı belirlenebilir [25]. Üç boyutlu dönüklük bilgisi sağlayan jiroskop, sürüklenme hatası ve sistematik hataları içinde barındırır. Bu hatalar örneğin düşük geçirgenli filtre kullanılarak giderilir [94].

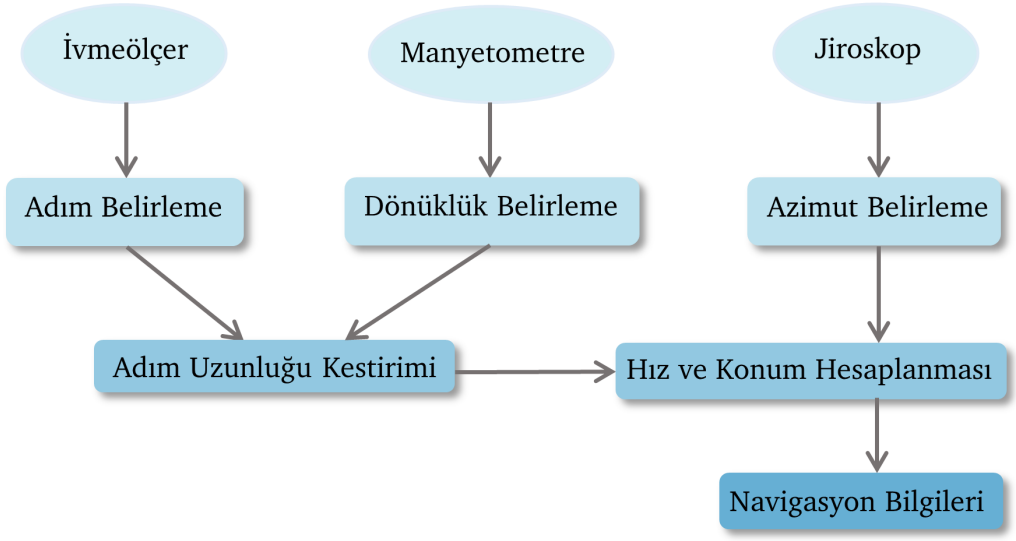
• **Manyetometre**, Tesla ya da Gauss biriminde manyetik alanı ölçer [61]. Kuzeye göre yön bulmayı sağlar. İvmeölçer ve jiroskop gibi kendi içinde hatalar barındırır. Ayrıca dünyanın manyetik alanından kaynaklanan etkinin yanında çevredeki manyetik alanlardan da etkilendiği için MEMS kullanılan navigasyon sistemlerinde çok fazla tercih edilmez [95].

2.3 MEMS Tabanlı Yaya Navigasyonu

Navigasyonda algılayıcılar ile yeryüzü arasındaki dönüklükleri belirlemek önemlidir. Ardından ivmeölçer verisinden yararlanılarak ivmenin en yüksek olduğu değerlere ya da sıfır olduğu zamanlara göre adımlar tespit edilebilir. Navigasyonun en önemli aşamalarından biri olan adım uzunluğu kestirimi, adım verilerinden yararlanılarak boy, katsayı, sıklık gibi parametrelere sahip yöntemler ile gerçekleştirilir. Adım uzunluğundan sonra doğrultu bilgisi hesaplanır ve navigasyon bilgileri kullanıcı ile paylaşılır (Şekil 2.8). Farklı yöntemler, algılayıcılar ve filtreler ile desteklenen navigasyon sonuçları iyileştirilebilir [12, 37, 61].

2.3.1 Dönüklük Belirleme

Akıllı telefonlar ile gerçekleştirilen yaya navigasyonunda yayanın yeryüzündeki temsili ENU koordinatları ile, telefon algılayıcıları kartezyen koordinatlar (X_b, Y_b, Z_b) ile temsil edilir. Başlangıçta akıllı telefonun koordinat sistemi ile temsil edilen yaya hareketi yer merkezli herhangi bir sisteme bir dönüşüm matrisi kullanılarak aktarılır. Öncelikle ivmeölçerden elde edilen üç boyutlu veriden (a) yukarı değer hesaplanır (Eşitlik 2.15).



Şekil 2.8 MEMS tabanlı iç mekân navigasyonunun aşamaları [13]

$$U = \frac{a}{||a||} \tag{2.15}$$

Manyetik kuzeyi gösteren manyetik alan vektörü (m) ile ivme vektörünün çarpımı iki vektöre dik yönü gösteren doğuyu (e) verir (Eşitlik 2.16).

$$e = a \times m$$
$$E = \frac{e}{||e||} \tag{2.16}$$

Yukarı yönlü vektör manyetik kuzey yönlü vektör ile birbirlerine dik olmayabilir. Bu sebeple kuzey yönü; yukarı (U) ve doğu (E) yön vektörlerinin çarpımı ile bulunmaktadır (Eşitlik 2.17) [96].

$$N = E \times U$$
$$N = \frac{N}{||N||} \tag{2.17}$$

Eşitlik 2.18 ile gövde koordinat sistemi ve navigasyon koordinat sistemi arasındaki dönüklük matrisi hesaplanır.

$$R_b^n = \begin{bmatrix} E_x & E_y & E_z \\ N_x & N_y & N_z \\ E_x & E_y & E_z \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

2.3.2 Adım Belirleme

MEMS tabanlı navigasyonun ilk basamağını oluşturan adım belirleme ivme değerlerinden yararlanılarak bulunur. Pik noktası belirleme, sıfır noktası belirleme ve zemin bölgesi belirleme en çok kullanılan adım belirleme yöntemleridir.

2.3.2.1 Pik Noktası Belirleme

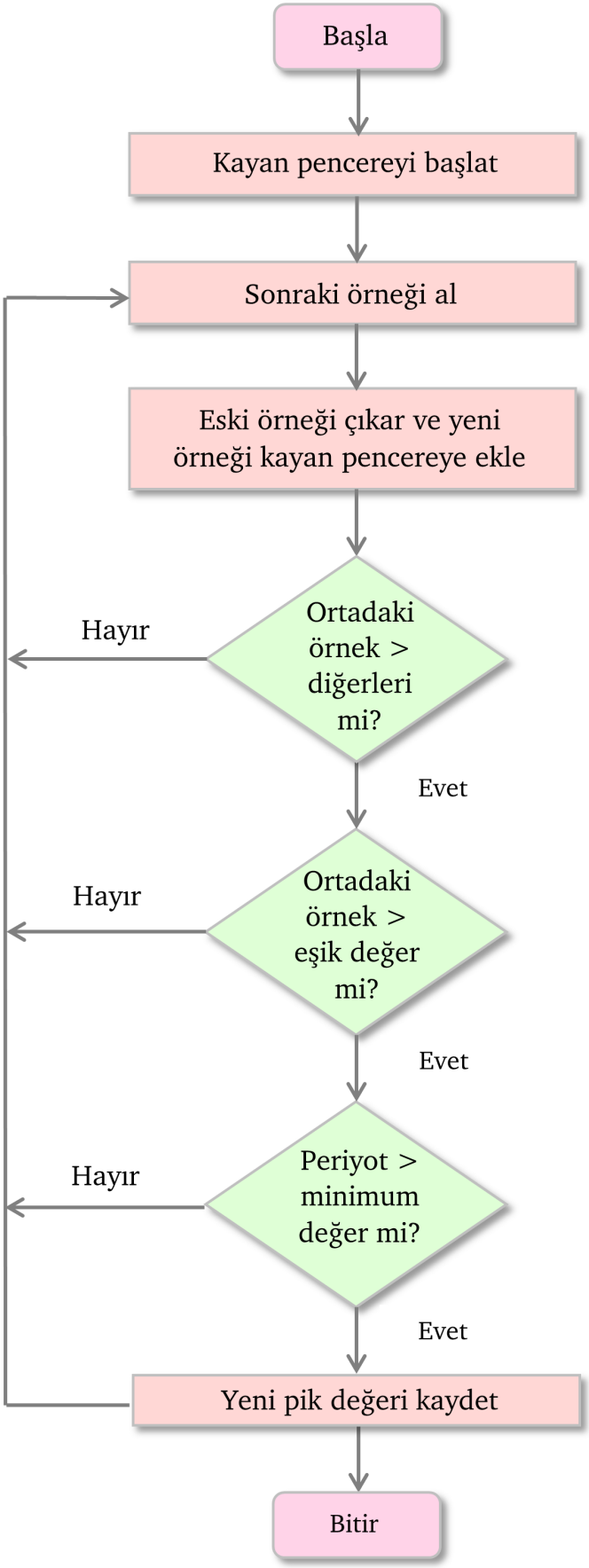
Bu yöntemde ivmeölçer değerleri, belirlenen ve birbiriyle çakışan pencereler içinde incelenir [80]. Her pencerenin ortasında bulunan ivme değeri seçilir. Eğer bu değer pencere içinde kalan diğer değerlerden daha büyükse o, muhtemel adım yani pik noktası olarak seçilir. Pencere kaydırılarak işleme devam edilir ve en yüksek ivme değerleri belirlenir [45, 97]. İki pik noktası arası bir adıma karşılık gelir [19, 80] (Şekil 2.9).

2.3.2.2 Sıfır Noktası Belirleme

Bu işlem, ivmeölçerden elde edilen değerlerin sıfır olduğu anları tespit eder. Pik noktası belirleme yöntemine alternatif bir yöntemdir. Pik noktası belirleme yönteminde yayanın yürüme hızına bağlı olarak ivmeölçerden elde edilen değerler değişir ve verim düşer [3, 49]. Bu sorunun üstesinden gelmek için sıfır noktası belirleme yöntemi tercih edilebilir. Sıfır noktası belirleme işleminde pik noktası belirlemede kullanılan pencere mantığına benzer şekilde bir zaman aralığı eşik değer olarak seçilir. Böylece yayanın durma anında üst üste kaydedilen her sıfır değerinin bir adım olarak algılanmasının önüne geçilir. Eğer eşik değer zaman aralığı doğru seçilmez ise güvenilir sonuçlar almak zorlaşır. Veriler kalibrasyona tabi tutulmadan bu yöntem uygulanamaz [97].

2.3.2.3 Zemin Bölgesi Belirleme

Zemin bölgesi belirleme, yayanın ne zaman hareket halinde ne zaman durma halinde olduğunu tespit ederek adımı belirler. Genellikle ayağa bağlanmış IMU algılayıcısı bulunan çalışmalarda kullanılır. Algılayıcının belde veya elde taşınması durumunda

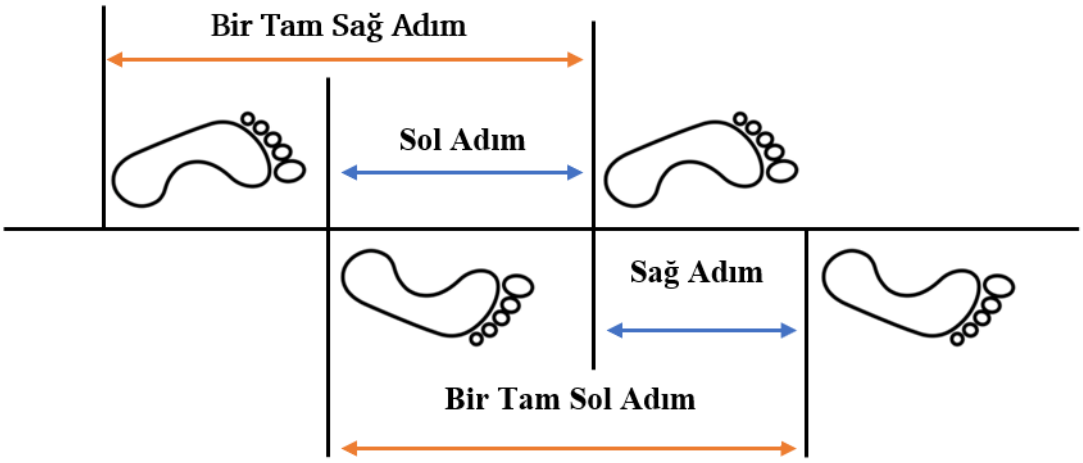


Şekil 2.9 Pik noktası belirleme işlemi [80]

yaya durduğu süre boyunca bile ivme değerlerinde sürekli bir değişim olur [49]. Bu yöntem yayanın ayağının ivme değeri ve yerçekimi ivmesi değerinden yararlanarak çalışır. İvmeölçer, hareket halindeki yaya için hem yayanın ivmesini hem de yerçekimi ivmesini ölçer. Yaya duruyor ise yayanın ivmesi sıfıra eşittir ve geriye sadece yerçekimi ivmesi değeri kalır. Böylece yayanın ayağının yere bastığı an yakalanır. Bu, adımın tespiti anlamına gelir. Yayaların günlük hayatta kullanabileceği bir yöntem değildir. Kullanıcı dostu olan ve özel bir amaca hizmet etmeyen çalışmalarda genellikle pik noktası belirleme ve sıfır noktası belirleme yöntemleri tercih edilir [97].

2.3.3 Adım Uzunluğu Kestirimi

Bir tam adım, aynı ayağın bir kere öne doğru atılmasıyla oluşan mesafedir. Başka bir deyişle sağ ve sol ayağın peş peşe adımlamasıyla oluşan mesafe bir tam adım olarak nitelendirilir (Şekil 2.10). Adım ne kadar doğru tahmin edilirse adım uzunluğu da



Şekil 2.10 Bir tam adım uzunluğunun tarifi [12]

o kadar hassas hesaplanır. Tam adım uzunluğu, konumun hassas olarak belirlenmesi gereken çalışmalarda önemlidir. %1'lik bir hata 8 km'lik bir güzergâh için 80 m'ye karşılık gelir [98]. Navigasyonun en önemli aşamalarından biri olan adım uzunluğu kestirimi (SLE) için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Diez (2018) bunları; integral yöntemleri, biyomekanik modeller ve istatistiksel regresyon yöntemleri olarak üç ana başlık halinde derlemiştir [98]. Vezovcnik (2018), adım sıklığı tabanlı modeller, ivme tabanlı modeller, açı tabanlı modeller ve çok parametreli modeller olarak bir sınıflandırma yapmıştır [57]. Modeller, uygulamada yararlanılacak algılayıcı tipleri, yayanın onları nasıl taşıyacağı, yaya hakkında sahip olunan bilgiler (ağırlık, yaş, boy, bacak boyu vb.) gibi ölçütlere göre seçilir.

2.3.4 Azimut, Hız ve Konum Belirleme

Açıklık açısı (heading), bir uçağın, geminin veya bir akıllı telefonun boylamsal ekseninin gerçek, manyetik, grid veya pusula kuzeyinden olan saat yönündeki sapma açısı olarak tanımlanır. Açıklık açısı, yaya navigasyonunda z ekseni etrafındaki dönüş olarak bilinen sapma (yaw) miktarıdır [99, 100]. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi P noktalarının koordinatlarının bulunabilmesi için adım uzunluğu ve azimut açısına ihtiyaç duyulur. Azimutun doğru hesaplanması konum doğruluğuna adım uzunluğundan daha çok etki eder [94]. Gade (2016), azimut belirleme için en yaygın kullanılan yedi yöntemi manyetik pusula, döner-pusula, dış nesnelere yapılan çoklu gözlem, konumu bilinen bir nesneye yapılan bearing (kırılma açısı, kerteriz) ölçümü, çoklu GNSS anteni, araç hızı ve araç ivmesi olarak sınıflandırmıştır [100]. MEMS teknolojisi ve PDR tekniği ile yapılan navigasyonda azimut genellikle jiroskopla, manyetometreyle veya ikisi birlikte kullanılarak bulunur [25, 94].

Azimut belirleme yaklaşımları genellikle algılayıcıların yayaya sabit bir şekilde monte edildiği durumlar için tasarlanmıştır [7, 29]. Algılayıcıların ayağa monte edildiği uygulamalarda azimut hesaplamak için yaygın olarak ZUPTs tekniğinin KF ile entegre edildiği çözümler kullanılır [39]. Uygulamaların çoğunda yaya vücudunun ve akıllı telefonun yönünün aynı olduğu varsayılarak KF ile çözüm yapılmaktadır. Bu varsayım elde sabit tutulan telefon için geçerliyken, telefonun hareket ettirildiği uygulamalar için geçersizdir.

MEMS tabanlı yaya navigasyonunun son aşaması için daha önce elde edilen azimut açısından ve adım uzunluğundan yararlanılarak PDR tekniğine göre konum hesaplanır. Hesapla bulunan konum her bir adımda güncellenir. Güncellemeler navigasyon bilgisi olarak kullanıcı ile paylaşılır.

3
ADIM UZUNLUĞU KESTİRİMİ UYGULAMASI

Bu çalışmada kullanılan adım uzunluğu kestirimi ile ilgili 10 yöntem bu bölümde açıklanmıştır. Her bir yöntemin sonuçlarını elde etmek için bu çalışma kapsamında bir masaüstü uygulaması geliştirilmiştir. Bu uygulamanın çalışma prensipleri aşağıda açıklanmaktadır.

3.1 Adım Uzunluğu Kestirim Yöntemleri

Bu çalışmada test edilen adım uzunluğu kestirim yöntemlerini tasarlayan araştırmacılar, geliştirdikleri ampirik eşitlikler ve ampirik olarak hesaplanabilen yöntem parametreleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Weinberg (2002), pedometre kullanarak bir çalışma yapmıştır [43]. Pedometreler ile genelde z eksenindeki hareketten yola çıkılarak adım sayısı hesaplanmakta ve adım sayısı, ortalama adım uzunluğu ile çarpılarak yürünen yol tespit edilmektedir. Adım tespiti genellikle pik noktası belirleme yöntemi ile yürütülmektedir. Eğer yaya aynı hızda yürümez ise pik değerler periyodik olmaz. Bunun sonucunda adım sayısı eksik ya da fazla bulunabilir. Gidilen yol uzunluğu hatalı hesaplanabilir. Weinberg (2002), doğruluğu yükseltmek için düşey yöndeki yer değiştirmeyi dikkate almıştır. Katedilen mesafeyi hesaplamak için ampirik bir ifade olan Eşitlik (3.1)'i geliştirmiştir.

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = K \times \sqrt[4]{Acc_{vmax} - Acc_{vmin}} \tag{3.1}$$

Ladetto (2000), bir GPS alıcısı ve yüksek doğruluğa sahip bir konumlama modülü kullanmıştır [42]. Modül üç manyetik algılayıcı, üç ivmeölçer ve bir termometre içerir. İvmeölçer sinyalinin varyans değeri yayanın yürüme periyodunun tespit edilmesini sağlar. Ancak hızlı yürüyen bir kişinin adım sıklığı ile yavaş yürüyen kişininki birbirinden farklıdır. Bu, adım sıklığını tespit etmek için belirlenen eşik değer üzerine etki eder. Yanlış belirlenen zaman aralığı adım sayısının eksik ya da fazla hesaplanmasına neden olur. Ladetto (2000), adım periyodunu daha doğru tespit edebilmek için ham ivme verilerine Meyer Wavelet Fonksiyonu uygulamıştır [101].

Tablo 3.1 Adım uzunluğu kestirim yöntemleri

Model Kaynakları	Adım Uzunluğu Formülleri	Parametreler
Weinberg vd. [43]	$K \times \sqrt[4]{a_{vmax} - a_{vmin}}$	ayarlanabilir sabit (K), maksimum ve minimum düşey ivme (a_{vmax}, a_{vmin})
Ladetto [42]	$\alpha \cdot f + \beta \cdot v + \gamma$	katsayılar (α, β, γ), yürüyüş sıklığı (f), ivmenin varyansı (v)
Kim vd. [7]	$K \times \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{N} \frac{\lvert a_i \rvert}{N}}$	katsayı (K), ortalama ivme (a_i), örnek sayısı (N)
Scarlett [44]	$K \times \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{\lvert a_i \rvert}{N} - a_{min}}{a_{max} - a_{min}}$	katsayı (K), ortalama ivme(a_i), maksimum ve minimum düşey ivme (a_{max}, a_{min})
Alvarez vd. [51]	$K_1 \cdot F + K_2$	ayarlanabilir sabitler (K_1, K_2), adım sıklığı (F)
Bylemans vd. [52]	$0.1 \sqrt[2.7]{a_{avg,abs} \sqrt{K \sqrt{\frac{F}{a_v}}}}$	ayarlanabilir sabit (K), adım sıklığı (F), ortalama mutlak düşey ivme ($a_{avg,abs}$), maksimum ve minimum düşey ivme arasındaki fark (a_v)
Mikov vd. [53]	$\frac{K}{F} \sqrt[4]{a_v}$	ayarlanabilir sabit (K), adım sıklığı (F), maksimum ve minimum düşey ivme arasındaki fark (a_v)
Guo vd. [54]	$K_1 \sqrt[3]{a_{avg}} + K_2$	ayarlanabilir sabitler (K_1, K_2), ortalama mutlak ivme (a_{avg})
Tian ve Wang [48]	$K \times h \times \sqrt{F}$	kaysayı (K), adım sıklığı (F), kullanıcının boyu (h)
Zeng vd. [55]	$\frac{\sqrt{{K_2}^2 - 4 \times K_1 \times (K_3 - F)} - K_2}{2 \times K_1}$	katsayılar (K_1, K_2, K_3), adım sıklığı (F)

Böylece her bir adım için ivmenin tek bir pik noktası olduğunu saptamıştır. Ancak bu durum, düzenli adımlar atan bir yaya için geçerlidir. Dış mekânda yapılan testler adım sıklığı ve adım uzunluğu arasında sıkı bir ilişki olduğunu göstermiştir. Ladetto (2000), bu çıkarımlardan hareket ederek adım uzunluğu kesitirmi için Eşitlik (3.2)'yi ortaya çıkarmıştır. GPS verisine ulaşılamayan durumlarda 'Recursive Least Squares' yöntemini uygulayarak adım uzunluğunu hesaplamıştır.

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = \alpha \cdot f + \beta \cdot v + \gamma \tag{3.2}$$

Bir yaya navigasyon sistemi (PNS: Pedestrian Navigation System) için adım tespitinin önemini bilen Kim vd. (2004) güvenilir adım tahmini yapmak için doku tabanlı bir yöntem geliştirmiştir [7]. Bir adım boyunca düşey ve yatay ivmeyi analiz ederek yürüme davranışını ortaya çıkarmıştır. Böylelikle adımları %1 hata ile tespit etmiştir. Adım uzunluğu kişiden kişiye ve yürüme hızına göre değiştiği için test işlemlerini adım uzunluğu 60 ve 80 cm olan farklı yaya grupları üzerinde gerçekleştirmiştir. Deneysel olarak hesaplama için Eşitlik (3.3)'ü ortaya koymuştur. Birincisi 100 adım, ikincisi 200 adımdan oluşan iki ayrı test verisini kullanarak gidilen toplam mesafeyi, %5'ten daha az bir hata ile tespit etmiştir.

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = K \times \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{N} \frac{|a_i|}{N}} \tag{3.3}$$

Dikey sıçramayı esas alan AN-602 kodlu cihazın sahip olduğu tekniğin sonuçları, kullanıcıların bacak uzunluğuna bağlı olarak değişir [43]. Bu, pedometrenin doğruluğunu etkiler. Scarlett (2007), pedometrenin performansını iyileştirmek için ivmeölçerden yararlanmayı önermiştir [44]. İki farklı ivmeölçer içeren, iki ayrı pedometre kullanarak test işlemleri yapmıştır. Pedometre sonuçlarının doğruluğunun, kullanıcı boyu ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir. Aynı rotayı çok kez kateden bir kullanıcının hesaplanan adım uzunluklarının tutarlılık gösterdiğini belirlemiştir. Ancak kullanıcı yürüyüşü, değişken hızlarda gerçekleştiğinde farklılıklar oluşmuştur. Bu çıkarımları dikkate alarak hızlı adımlama durumundaki ivme değişim grafiğini incelemiştir. Hızlanma durumunda ivmenin negatif ve pozitif pik değerleri arasındaki farkın açıldığını tespit etmiştir. Pozitif pik değerlerini içeren eğrilerin negatiflere göre daha geniş olduğunu fark etmiştir. Bunun, ortalama ivme değerinin, pozitif pik değerine daha yakın olmasından kaynaklandığını fark etmiştir. İkinci bir yaya, normal adımlamayla yaklaşık aynı parkuru yürüdüğünde ise pik değerlere bağlı hesaplanan gidilen mesafenin, değiştiğini belirlemiştir. Bu tespitler ışığında, Eşitlik (3.4)'te sunulan formülü önermiştir. Bu eşitlikte, ivmenin x ve y bileşenlerinden yararlanmıştır ve birden fazla ivmeölçer kullanılan çoğu çalışmadan daha iyi sonuç elde etmiştir.

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = K \times \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{|a_i|}{N} - a_{min}}{a_{max} - a_{min}} \tag{3.4}$$

Alvarez vd. (2008) dört yayayı koridorda, düz bir çizgi halinde, 100 m gidiş-geliş olarak farklı hızlarda, bellerine bağlı ivmeölçer ile yürütmüştür [51]. Tempo ve adım uzunluğu arasındaki doğrusal ilişkiden faydalanarak Eşitlik (3.5)'i önermiştir. İvmenin integrali, bacak boyu verilerinden yararlanarak diğer dört yöntemi karşılaştırmıştır. Yöntemlerdeki parametreleri iki farklı şekilde kalibre etmiştir. Birinci kalibrasyon işlemi, yayaların kendi tercih ettikleri hızlarda, ilk 40 m yürümesine ve buradan

toplanan veriler ile parametrelerin hesaplanmasına dayanır. İkinci kalibrasyon, 40 m için farklı hızlardaki yürüyüşlerden toplanan verilerden hesaplanan parametreleri kullanır. Bu testler farklı hızlarda varyansın daha düşük olduğunu göstermiştir.

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = K_1 F + K_2 \tag{3.5}$$

Bylemans vd. (2009) kullanıcıların telefonlarını, en çok giysilerinin ceplerinde taşıdığından hareketle yeni bir adım uzunluğu kestirim yöntemi geliştirmiştir [52]. İki adet ivmeölçer kullanmıştır. Bir ivmeölçer z ekseni etrafında 45° açıyla döndürülmüştür. Böylece telefonun cepteki dönüklüğüne bağlı olarak iki ivmeölçerden birini seçerek onu, çalışmaya dahil etmiştir. Öncelikle ivme değerlerine yüksek ve düşük geçirgenli filtre uygulamıştır. Daha sonra pik noktası belirleme ile birlikte dinamik işleyen bir eşik değer algoritması uygulamış ve dinamik bir adım uzunluğu algoritması geliştirmiştir. İvme verileri incelendiğinde hıza ve kişiye bağlı olarak bu değerin değiştiği görülmektedir. Bu çıkarım üzerinden Bylemans vd. (2009) Eşitlik (3.6)'yı geliştirmiştir. Eşitlikteki K parametresi tüm kullanıcılar için aynı seçildiğinde mesafe hatasının bir metre için 0.06 m olduğu saptanmıştır.

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = 0.1 \sqrt[2.7]{a_{avg,abs}\sqrt{K\sqrt{\frac{F}{a_v}}}} \tag{3.6}$$

Mikov vd. (2013) öncelikle ivmeölçer gürültü hatasını gidermek için alçak geçirgen filtre uygulamıştır [53]. Filtrelenmiş ivme verilerini, kayan pencere tekniği ile birlikte kayan eşik değerlere göre potansiyel adımın olabileceği an olarak seçmiştir. Sonrasında sıfır noktası belirleme uygulamıştır. Eşik değere göre seçilen ve sıfır noktası olan an çakışıyorsa bu an, adım anı olarak tanımlanmıştır. Çalışmada statik yöntem, Weinberg (2002)'in [43], Scarlett (2007)'in [44], Kim (2004)'in [7] ve Bylemans (2009)'ın [52] yöntemlerini denemiştir. Bu yöntemlerin analiz sonuçları Eşitlik (3.7)'nin önerilmesini sağlamıştır. Önerilen yöntemin diğer yöntemlerden daha küçük dağılımı ve insan özelliklerine daha az bağlı olduğunu görmüştür.

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = \frac{K}{F}\sqrt[4]{a_v} \tag{3.7}$$

Guo vd. (2016) bina içi navigasyonda işaretçilerin doğruluğunu artırmak için atalet algılayıcıları ve radyo sinyallerini bir arada kullanmıştır [54]. SLE için öncelikle ivme verilerini ortalama filtreden geçirmiş ve adımları tespit etmiştir. Sonrasında, birçok kullanıcıdan elde ettiği farklı ivme değerlerine göre Kim (2004)'in [7]'deki yaklaşımını geliştirerek Eşitlik (3.8)'i elde etmiştir.

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = K_1 \sqrt[3]{a_{avg}} + K_2 \tag{3.8}$$

Guo vd. (2016) dört denekten elde ettiği sonuçlara göre kullanıcıların, adım uzunluğu doğruluğuna ciddi oranda etki ettiğini tespit etmiş ve adım uzunluğunun kişiselleştirilmesini önermiştir. Bunu, önce her kullanıcının önceden deneysel olarak hesaplanmış adım uzunluklarını kullanarak yapmıştır. Sonra, navigasyon sistemini, kalabalık algılamadan yararlanarak standartlaştırmıştır. Kim (2004)'in modeli [7] ile karşılaştırıldığında, önerilen bu yöntem %34 daha başarılı olmuştur.

Tian vd. (2015), telefonun elde vücudun önünde sabit, elde serbest ve pantolonun ön cebinde olmak üzere üç ayrı durumda taşınması ile bir izleme (tracking) uygulaması geliştirmiştir [48]. Öncelikle, ivme verilerine bakarak, telefonun hangi durumda olduğunu tespit etmiştir. Sonrasında bu duruma bağlı olarak pik noktası belirleme ve eşik değer yöntemlerini uygulayarak adımı saptamıştır. Tian vd. (2015), yürüyüş hızı ve adım sıklığı arasındaki ilişki ve yayanın boyundan yararlanarak Eşitlik (3.9)'u önermiştir. Modelde, ilk adım için frekans henüz mevcut olmadığından cinsiyete göre sabit bir katsayı ve yayanın boyunu içeren statik yöntemin sonucunda hesapladığı adım uzunluğundan belirlenen frekansı, başlangıç değer olarak kabul etmiştir.

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = K \times h \times \sqrt{F} \tag{3.9}$$

Gerçekleştirdikleri deneye boyları 1.56 – 1.83 m arasında değişen beş erkek ve beş kadın katılmıştır. Denekler, 28 m uzunluğunda bir koridor boyunca çeşitli hızlarda yürümüştür. Tian vd. (2015), cinsiyete bağlı olarak eşitlikteki parametre için yürüyüşlerden elde edilen ortalama değerleri seçmiştir. Onlar önerdikleri yöntemin, kendisiyle kıyaslanan, [7, 43, 97]'daki yöntemlerden daha iyi doğruluk ve daha düşük standart sapmaya sahip olduğunu görmüştür.

Zeng vd. (2018), kalabalıkta adımlama davranışını ortaya koymak üzere çalışmıştır [55]. Geliştirdikleri deneyde 60 lise öğrencisi, bir halka boyunca aynı anda yürümüştür. Zeng vd. (2018), bir yayanın, önündeki yaya ile aralarındaki mesafeye bağlı olarak adım uzunluklarının ve frekansların değişimini gözlemlemiştir. Onlar kişilerin önlerindeki insana 0.6 m'den daha yakın olduğu durumda, yürüme frekanslarının ve adım uzunluklarının fazla değişkenlik gösterdiğini, 1 m'nin üzerindeki mesafede çok az etkilendiğini ispatlamıştır. 1 m'den az mesafelerdeki yaya yürüyüşleri üzerinde durarak adım uzunluğu ve frekansın polinomal bir fonksiyon ile ifade edilebildiğini göstermişlerdir (Eşitlik 3.10)

$$Bir\ Tam\ Adım\ Uzunluğu = \frac{\sqrt{{K_2}^2 - 4 \times K_1 \times (K_3 - F)} - K_2}{2 \times K_1} \tag{3.10}$$

3.2 Çalışmada Kullanılan Veri Seti

Bu tez çalışmasında Wang vd. (2019)'nin incelediği açık veriler kullanılmıştır [12] (Ek-B). Bunlar, sekiz çekirdekli 2,4 GHz işlemciye sahip Huawei Mate 9 akıllı telefon ve bir IMU algılayıcısı ile toplanmış verilerdir. Veri seti, üç boyutta ivmeölçer, jiroskop ve manyetometreden gelen algılayıcı verilerini içermektedir. Üç algılayıcının da veri toplama sıklığı 100 Hz'dir. Bunun yanında toplanan verilere ilişkin epok cinsinden süre, adım numarası, metre biriminde adım uzunluğu ve toplam gidilen mesafe verileri de veri setinde mevcuttur.

Veriler, ikisi kadın, üçü erkek olan, beş farklı kullanıcıdan toplanmıştır. Deneklerin uzunlukları 152-196 cm arasında değişiklik göstermektedir. Kiloları 45-80 kg arasında ve yaşları 23-32 arasındadır. Kullanıcılar telefonu göğüs hizasında telefonun ekranı yere paralel olacak şekilde ve sağ elde tutarak hareket etmiştir. Hareketler ofis, alışveriş merkezi, metro istasyonu, zemin altı otopark, cadde ve yaya yolu gibi farklı dış ve iç ortamlarda kaydedilmiştir. Yürüme, asansöre binme, koşma ve zıplama gibi davranışları içermektedir.

Veri setlerinde bir adımda MEMS'den ortalama 122 kayıt alınmıştır. MEMS veri toplama sıklığı 100 Hz olduğu için her adım ortalama 1,22 s olarak düşünülebilir. Toplanan verilerin %99'unda bir adımdaki veri kaydı sayısı 200'ün altındadır.

3.3 Ham Verilerin Uygulamada Kullanılması için Ön Hazırlığı

Veri setlerine farklı yöntemleri uygulanmadan önce epok cinsinden verilen zaman saniye cinsine Eşitlik (3.11) ile çevrilmiştir.

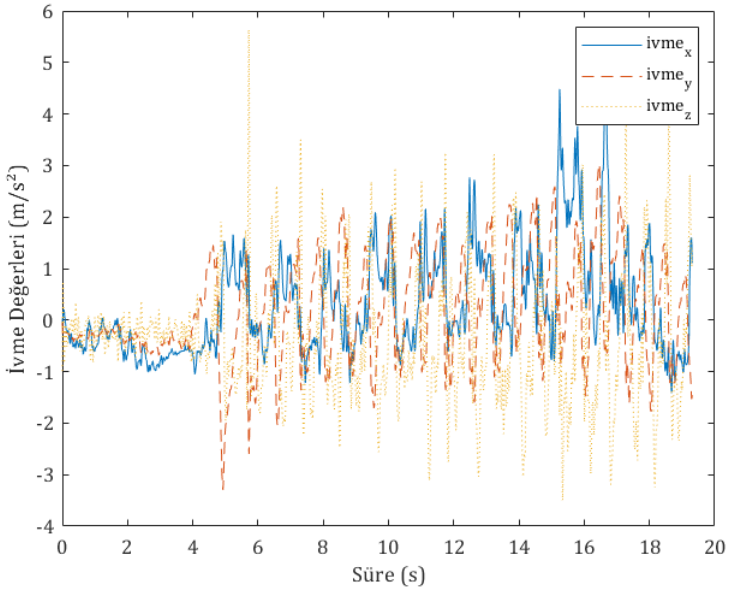
$$zaman_{i.saniye} = (zaman_{i.epok} - zaman_{1.epok}) \times 10^{-3} \tag{3.11}$$

Her bir zaman verisinden, o veri setine ait ilk zaman değeri çıkarılıp her veri arasında geçen süre hesaplanmıştır. Daha sonra bu farklar 10^{-3} ile çarpılarak saniye cinsinden ifade edilmiştir. Bu işlemler sonucunda elde edilen süre, grafik üzerinden veriler ile ilgili çıkarım yapılırken fayda sağlamıştır.

Telefon ekranı yere paralel tutulduğunda, yerçekimi ivmesinin etkisi z yönünde gözlenmektedir. Ancak yaya yürürken telefonu yere tam paralel olacak şekilde elinde tutamaz. Bu nedenle, z yönünde bir etkiye sahip olan yer çekimi ivmesi, x ve y yönlerinde de etkiye sahip olur. Bundan dolayı referans olarak seçilen bir veri setinde, durma anında kaydedilen ivmeölçer ve manyetometre verilerinden biri kullanılarak algılayıcı dönüklükleri hesaplanmış ve bir dönüşüm matrisi elde edilmiştir. Dönüşüm matrisi referans veri tabanının tümüne uygulanmıştır. Sonrasında, 9.80665 kabul

edilen yerçekimi, z yönündeki tüm ivme değerlerinden çıkarılmıştır.

Çalışmada kullanılan veri setlerinden birine ait ilk on adımı içeren x, y, z yönlerindeki ivmeölçer değerleri Şekil 3.1'de gösterilmektedir. İlk beş saniyede toplanan verilerin değerleri yaklaşık -1 ve 1 m/s^2 aralığındadır. Buradan, bu kayıtların yaya yürümeye başlamadan önce toplanan değerler olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle yaya navigasyonu için bu verilerin veri setine dahil edilmesi anlamsız görülmüş ve yayanın yürümeye başladığı ana kadar kaydedilen veriler ile ilk iki adım her veri setinden silinmiştir. Aynı şekilde harekete başlama anında da algılayıcı verilerinde aşırı



Şekil 3.1 Bir veri setindeki ilk on adım için ivmeölçer verileri

yükselme görülmektedir. Bu verilerin de analizi olumsuz etkileyeceği göz önünde bulundurularak çıkarılmasına karar verilmiştir. Ayrıca uç değerler de veri setinden uzaklaştırılmıştır. Silinecek uç değerlere, normal dağılımlı olmayan veri setlerine uygun şekilde, alt çeyrekler açıklığının (%25'lik bölüm) altında kalan ve üst çeyrekler açıklığının (%75'lik bölüm) üstünde kalanlar veriler dahil edilmiştir.

GitHub'da paylaşılan veri setinde, 30 set veri bulunmasına rağmen çalışmada 29 adet veri seti kullanılmıştır. Bir veri setinde adım uzunluğunu, adım numarasını ve toplam yürüme mesafesini içeren son üç sütunda veri bulunmamaktadır. Bir veri seti de adım uzunluğu kestirim yöntemlerinin parametrelerinin hesaplanmasında referans olarak kullanıldığı için çalışmada toplam 28 veri seti üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir.

3.4 Yazılım

Yazılım matris işlemlerini kolay yapmayı sağlayan ve birçok hazır fonksiyonu içinde barındıran MATLAB programının R2020b versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seçilen adım uzunluğu kestirim yöntemleri için parametreler, referans veri setindeki adım uzunlukları kullanılarak hesaplanmıştır. Birden fazla bilinmeyen içeren yöntemlerde MATLAB'in *fmincon* fonkisyonunun özellikleri ile en küçük karelerin birlikte kullanılması ile katsayılar belirlenmiştir. Sonrasında tüm veri setleri için aynı parametreler kullanılarak adım uzunlukları kestirilmiştir. Veri setinde mevcut olan adım uzunlukları ve hesaplanan adım uzunlukları kullanılarak ortalama, medyan ve standart sapma gibi değerler hesaplanmıştır. Yazılımın iş akış diyagramı Şekil 3.2'de sunulmaktadır.

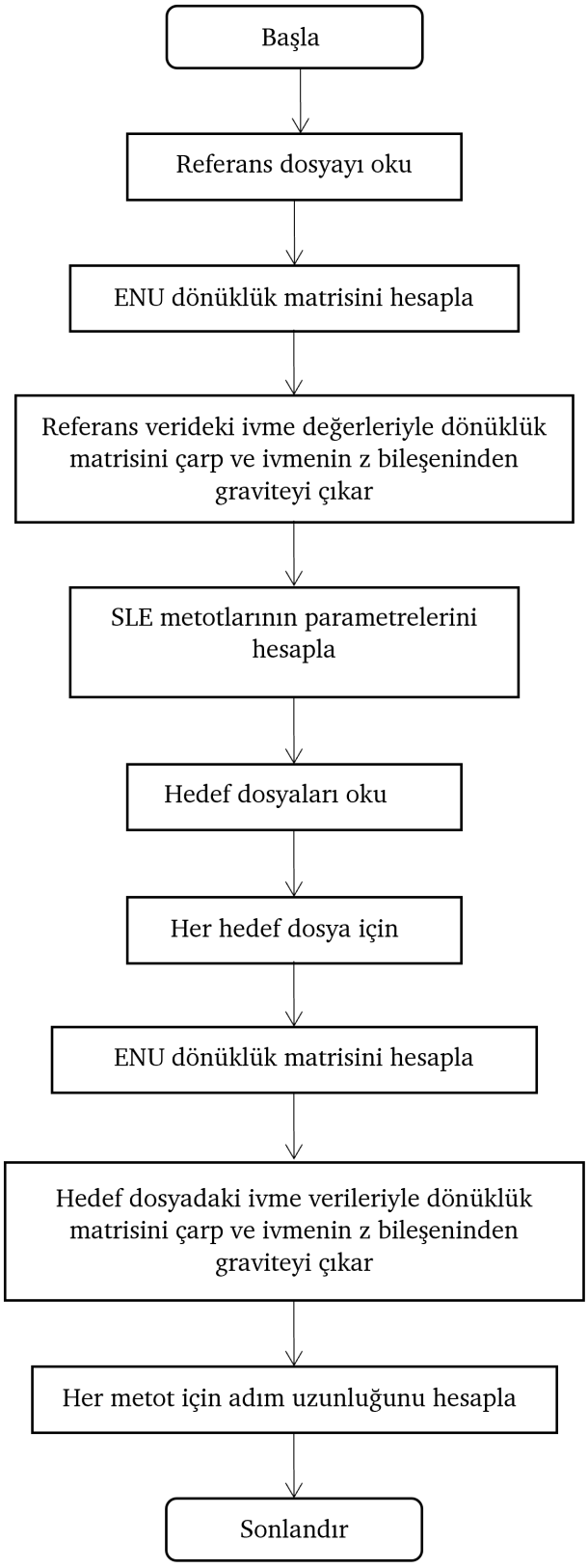
3.5 Uygulama

Yazılımın MATLAB'de arayüzü tasarlanmış ve kullanıcı kullanımına sunulmak üzere derlenmiştir. Derlenen programa Ek-A'daki GitHub linkinden erişilebilir. Uygulamanın menü kısmının hakkında sekmesinde verilerin özelliklerini içeren bir açıklama ve tez çalışmasının İngilizce ve Türkçe versiyonu bulunmaktadır (Şekil 3.3-a).

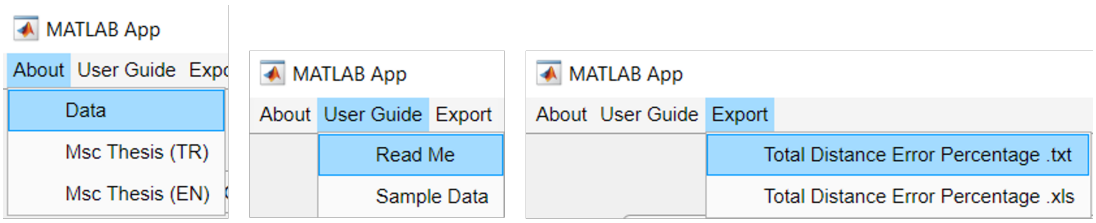
Kullanıcı kılavuzu sekmesinde uygulamanın kullanımı ile ilgili açıklamaları içeren dosya bulunmaktadır (Şekil 3.3-b). Çıktı sekmesinden navigasyonun son adımı olan toplam yürüme mesafesinin yüzde olarak hatasının çıktılarına excel ve txt formatlarında kolay ulaşım sağlanabilmektedir (Şekil 3.3-c).

Uygulamanın arayüzünde iki adet veri yükleme butonu bulunmaktadır (Şekil 3.4-a). Kullanıcılar ilk veri yükleme butonu ile bilgisayarlarındaki dosyalara erişip adım uzunluğu kestirim yöntemlerinin parametrelerinin hesaplanması için gerekli text formatında ve örnek veriye uygun formatta bir dosya seçebilir. Adım uzunluğu analizinin yapılması için istenilen dosyalar ikinci yükleme butonu ile seçilip yüklenmelidir. Seçilen dosya sayısı yükleme butonunun sağındaki kutuda belirecektir (Şekil 3.4-b). SLE Methods başlığı altında analiz için kullanılabilecek 10 yöntem için seçim kutucukları mevcuttur (Şekil 3.4-c). En üst kısımda, tüm yöntemlerin seçimini sağlayan bir seçim kutucuğu bulunmaktadır. Dosyalar ve yöntemler seçildikten sonra Çöz butonu ile çözümler gerçekleştirilir (Şekil 3.4-ç). Uygulamanın sağ tarafında ise altı analizin çıktılarının alınabileceği butonlar mevcuttur (Şekil 3.4-d). Her bir butonun yanında sonucun birimi verilmektedir. Her buton için çıktılar text veya excel formatında alınabilir. Altı analizin yukarıdan aşağıya doğru sıralaması; adım uzunluklarının medyan değerleri, RMSE değerleri, yüzde bağıl hataları; toplam gidilen yolun gerçek değerle karşılaştırması, mutlak hata ve yüzde bağıl hata

şeklindedir.

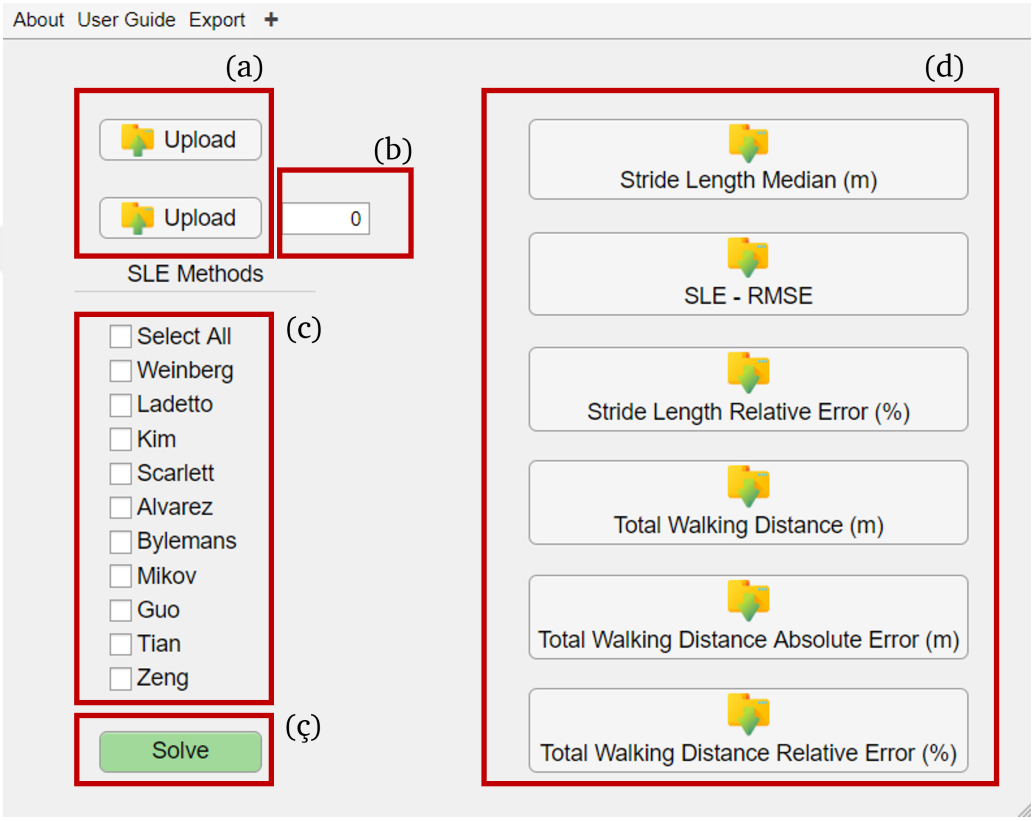


Şekil 3.2 Yazılımın akış diyagramı



(a) (b) (c)

Şekil 3.3 Uygulama üst menüsü



Şekil 3.4 Uygulama arayüzü

4
BULGULAR

Bina içinde ve dışında, merdivenler, asansörler gibi karmaşık alanlarda, hızlı, yavaş ve normal yürüme hızlarında ayrıca koşma ve zıplama gibi durumlar için kaydedilen ve beş kullanıcıya ait olan MEMS algılayıcı verilerinden on yöntemin her biri için kullanıcı adım uzunlukları kestirilmiştir. Ayrıca 28 veri seti için ayrıntılı ve tüm veri setleri dahil edilerek genel istatistiki yayılım ve dağılım özellikleri incelenmiştir. Tablolar hazırlanırken referans veri seti için de medyan, standart sapma, bağıl ve mutlak hatalar hesaplanmıştır. Ancak referans veri seti tabloların son satırında yer alan ortalama hesaplarına ve kutu diyagramı gösterimlerine dahil edilmemiştir.

Tablo 4.1'de gerçek değerlerin yanında metotlarla hesaplanan adım uzunluğu medyan değerleri verilmiştir. Tablonun son satırında her yöntemden elde edilen medyan değerlerinin gerçek değere en yakın olanları gösterilmiştir. Aynı değer tablo içerisinde yeşil ile boyanarak işaretlenmiştir. Tablonun son sütunu ise 28 veri seti için gerçeğe en yakın medyan sonuçlarını üreten yöntemleri içermektedir. Bu medyan değerleri kalın gösterilerek vurgulanmıştır. Weinberg'in (2002), 16 numaralı veri seti için 0.001 m fark ile tüm yöntemler içerisinde en iyi olduğu ve 28 veri setinden 11'inde gerçeğe en yakın sonucu verdiği görülmektedir. Weinberg'in (2002) yöntemini takiben daha fazla adım sayısına sahip veri setlerinde Bylemans'ın (2009) ve daha az adım sayısı içeren veri setlerinde Tian'ın (2015) yöntemlerinden elde edilen değerler başarılıdır. Ladetto (2000), Zeng (2018), Mikov (2013) ve Alvarez (2008) ise gerçek medyanlardan en uzak olan yöntemlerdir.

Adım uzunlukları için Eşitlik 4.3 kullanılarak gerçek değere bağlı olarak elde edilen karesel ortalama hatalar (RMSE: Root Mean Square Error) Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablonun son satırında her metodun tüm veri setleri için en küçük RMSE değerleri mevcuttur. Tablo içerisinde bunlar yeşil ile vurgulanmıştır. Tablonun son sütununda ise her veri setinin tüm metotlar için hesaplanan en küçük RMSE değerleri kalın yazı ile vurgulu olarak verilmiştir. Ladetto (2000), Alvarez (2009) ve Zeng'in (2018) 0.019 m ile standart sapma değeri en küçük olan iki yöntemdir. Onları Guo (2016) (0.020 m), Weinberg (2002) (0.021 m) ve Bylemans'ın (2009) (0.021 m) yöntemleri

takip etmektedir. Weinberg (2002) 18 veri seti için en iyi standart sapmaya sahip yöntemdir. Ancak adım sayısının fazla olduğu veri setlerinde Ladetto (2000) ve Kim'in (2004) Weinberg'ten (2002) daha düşük standart sapmaya sahip olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Mikov (2013) hariç tüm yöntemlerin cm mertebesinde standart sapmaya sahip olması tüm yöntemlerin kullanılan veri seti özelinde başarılı olduğunu gösterir.

Adım uzunluğunun ve toplam yürüme mesafesinin bağıl hata oranları aşağıda verilen Eşitlik 4.1 ve 4.2'ye göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar her bir veri seti için tekarlanmıştır. Sonuçlar Tablo 4.3 ve 4.6'da sunulmuştur. Her bir veri seti için en düşük hata elde edilen yöntemler, son sütunda paylaşılmıştır ve tablo içerisinde bu değerler kalın yazılmıştır. Tablonun pembe ile vurgulanan son iki satırı, yöntemlerin tüm veri tabanındaki ortalama göreli hatasını ve standart sapmasını içerir.

$$Bağıl\ Hata_{SLE} = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{|SL_e^i - SL_t^i|}{SL_t^i} \times 100 \right) \tag{4.1}$$

$$Bağıl\ Hata_{WD} = \frac{|\sum_{i=1}^{N}(SL_e^i) - \sum_{i=1}^{N}(SL_t^i)|}{\sum_{i=1}^{N}(SL_t^i)} \times 100 \tag{4.2}$$

$$RMSE_{SLE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(SL_e^i - SL_t^i)^2}{N}} \tag{4.3}$$

Formülde i. adım için hesaplanan ve gerçek adım uzunlukları sırayla SL_e^i ve SL_t^i ile ifade edilmiştir. N ise bir veri setindeki toplam adım sayısını göstermektedir.

Tablo 4.3'e göre 16 veri seti için Weinberg'in (2002) göreli adım uzunluğu hesabının hata değeri en düşüktür. Bu yöntem diğerlerine göre en iyi ortalama hataya sahiptir. Ayrıca dağılımı en az olan hataya sahiptir. Mikov (2013) hem veri setleri tek tek incelendiğinde hem de toplamda en kötü hata oranına sahip yöntemdir. Diğer yöntemlerin ise %1-2 gibi farklılıklarla benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Mikov'un (2013) yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha kötü sonuç vermesi kullanılan veri setine, ampirik modelin filtrelenmemiş ya da eşik değer uygulanmamış algılayıcı verileri üzerinde denenmesine bağlı olabilir.

Toplam yürüme mesafeleri, yürüme mesafelerinin mutlak ve göreli hata kıyaslamaları Tablo 4.4, 4.5, 4.6'da verilmiştir. Buna göre saçılımı en fazla olan Mikov (2013) yönteminin sonuçları bazı veri setlerinde en düşük hataya sahiptir. Ancak hataların ortalamaları ve standart sapmaları incelendiğinde Weinberg (2002), diğer son

teknoloji metotlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Zeng (2018) ve Alvarez'in (2008) yöntemleri hiçbir veri seti için diğer yöntemlere kıyasla en iyi sonucu vermediği görülmektedir. Adım sayısı fazla olan veri setlerinde ise Kim (2004), Mikov (2013) ve Bylemans'ın (2009) iyi sonuçlar vermiştir.

Tablo 4.1 Seçilen adım uzunluğu kestirim modellerine göre kestirilen adım uzunluğu medyan değerlerinin karşılaştırılması

Veri No	Adım Sayısı	Aykırı Değerler Çıkarıldıktan Sonra Adım Sayısı	Metotların Adım Uzunluğu Medyan Değerleri (m)										
			Gerçek Değer	Weinberg	Ladetto	Kim	Scarlett	Zeng	Tian	Mikov	Alvarez	Bylemans	Guo	Gerçek Değerin Medyanına En Yakın Medyan Değerine Sahip Metot
Referans	1000	912	0.673	0.671	**0.672**	**0.672**	**0.672**	0.670	0.663	0.671	0.671	**0.672**	**0.672**	***Ladetto,Kim,Scarlett,Bylemans,Guo***
1	1000	922	0.713	0.680	0.677	0.695	0.679	0.673	0.694	0.651	0.673	**0.696**	0.672	***Bylemans***
2	1008	839	0.708	0.651	0.671	0.704	0.874	0.673	0.694	0.624	0.673	**0.711**	0.657	***Bylemans***
3	1001	873	0.701	0.657	0.670	0.675	0.766	0.671	0.662	0.660	0.671	**0.679**	0.667	***Bylemans***
4	1005	886	0.716	0.650	0.669	**0.713**	0.945	0.673	0.692	0.631	0.673	0.723	0.655	***Kim***
5	1000	924	0.675	0.651	0.665	0.644	0.691	0.671	0.660	0.688	0.671	0.646	**0.672**	***Guo***
6	1014	838	0.699	0.673	0.673	**0.682**	0.679	0.671	0.663	0.671	0.671	0.678	0.675	***Kim***
7	199	162	0.678	0.727	0.701	0.776	0.719	**0.676**	0.733	0.614	**0.676**	0.766	0.671	***Alvarez***
8	195	187	0.746	0.720	0.687	0.723	0.621	0.676	**0.737**	0.591	0.676	0.719	0.662	***Tian***
9	342	311	0.733	0.720	0.686	0.709	0.570	0.677	**0.739**	0.595	0.676	0.707	0.672	***Tian***
10	203	187	0.710	**0.718**	0.681	0.700	0.558	0.676	0.732	0.622	0.676	0.686	0.669	***Weinberg***
11	8	5	0.570	**0.590**	0.645	0.527	0.611	0.662	0.523	0.953	0.662	0.485	0.675	***Weinberg***
12	8	7	0.607	0.590	0.649	0.586	0.879	0.665	0.577	0.773	0.665	**0.598**	0.661	***Bylemans***
13	9	7	0.591	**0.599**	0.655	**0.583**	0.649	0.667	0.604	0.741	0.667	0.578	0.678	***Weinberg,Kim***
14	14	10	0.602	0.587	0.653	0.572	0.717	0.667	**0.606**	0.674	0.667	0.582	0.679	***Tian***
15	19	15	0.572	0.596	0.653	0.561	0.706	0.667	0.604	0.743	0.667	**0.568**	0.679	***Bylemans***
16	17	13	0.591	**0.592**	0.652	0.555	0.665	0.667	0.601	0.767	0.667	0.554	0.678	***Weinberg***
17	22	19	0.645	0.614	0.658	0.591	0.690	0.670	**0.652**	0.673	0.670	0.598	0.678	***Tian***
18	25	20	0.625	0.608	0.658	0.605	0.728	0.669	**0.631**	0.685	0.669	0.614	0.679	***Tian***
19	24	20	0.616	0.598	0.656	0.587	0.713	0.668	**0.629**	0.689	0.669	0.598	0.672	***Tian***
20	9	7	0.559	**0.568**	0.646	0.487	0.624	0.662	0.521	0.954	0.662	0.479	0.676	***Weinberg***
21	9	7	0.618	**0.606**	0.644	0.491	0.492	0.660	0.480	1.200	0.660	0.458	0.674	***Weinberg***
22	10	7	0.558	**0.551**	0.641	0.470	0.655	0.658	0.444	1.273	0.658	0.450	0.676	***Weinberg***
23	18	16	0.558	**0.565**	0.642	0.473	0.579	0.659	0.468	1.165	0.659	0.453	0.673	***Weinberg***
24	17	15	0.601	0.571	0.643	0.483	**0.582**	0.659	0.475	1.190	0.660	0.460	0.670	***Scarlett***
25	19	16	0.537	**0.542**	0.643	0.462	0.633	0.660	0.492	1.003	0.660	0.452	0.675	***Weinberg***
26	26	23	0.576	**0.560**	0.642	0.462	0.560	0.659	0.469	1.111	0.659	0.447	0.674	***Weinberg***
27	26	23	0.590	0.574	0.643	0.481	**0.591**	0.660	0.480	1.124	0.660	0.467	0.673	***Scarlett***
28	25	23	0.597	0.574	0.643	0.488	**0.582**	0.660	0.494	1.098	0.660	0.469	0.670	***Scarlett***
Tüm Veri Kümeleri için Gerçek Değer ile Her Yöntem Arasındaki Mutlak En Küçük Medyan Farkı				***0.001***	***0.010***	***0.004***	***0.002***	***0.002***	***0.004***	***0.013***	***0.002***	***0.002***	***0.003***	

Tablo 4.2 RMSE'nin seçilen adım uzunluğu kestirim modellerine göre karşılaştırılması

Veri No	Adım Sayısı	Aykırı Değerler Çıkarıldıktan Sonra Adım Sayısı	Metotların Standart Sapması (m)										
			Weinberg	Ladetto	Kim	Scarlett	Zeng	Tian	Mikov	Alvarez	Bylemans	Guo	Her Veri Kümesi için En İyi RMSE Değerine Sahip Metotlar
Referans	1000	912	0.025	**0.014**	0.029	0.074	0.015	0.038	0.123	0.015	0.029	0.015	***Ladetto***
1	1000	922	0.040	0.040	**0.033**	0.085	0.046	0.067	0.365	0.046	0.036	0.047	***Kim***
2	1008	839	0.062	0.047	**0.041**	0.199	0.049	0.090	0.316	0.049	0.047	0.059	***Kim***
3	1001	873	0.051	**0.035**	0.041	0.093	0.036	0.075	0.231	0.036	0.041	0.039	***Ladetto***
4	1005	886	0.072	0.052	**0.030**	0.249	0.051	0.086	0.242	0.051	0.037	0.065	***Kim***
5	1000	924	0.035	**0.019**	0.043	0.075	**0.019**	0.050	0.151	**0.019**	0.045	0.020	***Ladetto, Zeng, Alvarez***
6	1014	838	0.037	0.031	0.037	0.067	0.034	0.089	0.337	0.034	0.042	**0.030**	***Guo***
7	199	162	0.371	0.384	**0.364**	0.388	0.400	0.453	1.714	0.400	0.378	0.398	***Kim***
8	195	187	**0.482**	0.500	0.484	0.536	0.506	0.510	0.624	0.506	0.489	0.513	***Weinberg***
9	342	311	**0.513**	0.532	0.523	0.603	0.538	0.574	0.732	0.538	0.537	0.538	***Weinberg***
10	203	187	**0.332**	0.346	0.342	0.418	0.351	0.373	0.720	0.351	0.350	0.352	***Weinberg***
11	8	5	**0.044**	0.073	0.078	0.077	0.088	0.085	0.596	0.088	0.091	0.098	***Weinberg***
12	8	7	0.026	0.044	0.027	0.314	0.059	0.033	0.214	0.059	**0.021**	0.056	***Bylemans***
13	9	7	**0.031**	0.061	0.062	0.148	0.073	0.034	0.153	0.073	0.061	0.083	***Weinberg***
14	14	10	**0.034**	0.056	0.058	0.170	0.069	0.073	0.240	0.069	0.056	0.079	***Weinberg***
15	19	15	**0.035**	0.091	0.046	0.195	0.104	0.046	0.368	0.104	0.045	0.118	***Weinberg***
16	17	13	**0.028**	0.073	0.038	0.103	0.087	0.054	0.313	0.087	0.040	0.099	***Weinberg***
17	22	19	0.040	**0.032**	0.058	0.091	0.041	0.056	0.227	0.041	0.057	0.049	***Ladetto***
18	25	20	**0.022**	0.038	0.030	0.111	0.048	0.023	0.066	0.048	0.027	0.058	***Weinberg***
19	24	20	**0.024**	0.044	0.036	0.106	0.056	0.051	0.229	0.056	0.034	0.060	***Weinberg***
20	9	7	**0.048**	0.086	0.084	0.108	0.102	0.072	0.471	0.102	0.092	0.117	***Weinberg***
21	9	7	0.065	**0.060**	0.139	0.161	0.071	0.144	0.591	0.071	0.162	0.082	***Ladetto***
22	10	7	**0.049**	0.078	0.105	0.098	0.094	0.126	0.690	0.094	0.121	0.111	***Weinberg***
23	18	16	**0.043**	0.091	0.087	0.087	0.107	0.092	0.637	0.107	0.104	0.121	***Weinberg***
24	17	15	**0.049**	0.052	0.121	0.100	0.067	0.131	0.597	0.067	0.140	0.076	***Weinberg***
25	19	16	**0.021**	0.105	0.080	0.128	0.122	0.069	0.547	0.122	0.091	0.137	***Weinberg***
26	26	23	**0.049**	0.071	0.118	0.097	0.086	0.112	0.611	0.086	0.135	0.100	***Weinberg***
27	26	23	**0.049**	0.062	0.111	0.098	0.077	0.122	0.635	0.077	0.131	0.089	***Weinberg***
28	25	23	**0.046**	0.049	0.117	0.069	0.064	0.115	0.528	0.064	0.133	0.072	***Weinberg***
Tüm Veri Kümeleri için En Küçük RMSE Değerleri			***0.021***	***0.019***	***0.027***	***0.067***	***0.019***	***0.023***	***0.066***	***0.019***	***0.021***	***0.020***	

Tablo 4.3 Seçilen adım uzunluğu kestirim modelleri için adım uzunluğu yüzde bağıl hatasının karşılaştırılması

Veri No	Adım Sayısı	Aykırı Değerler Çıkarıldıktan Sonra Adım Sayısı	Adım Uzunluğu Bağıl Hatası (%)										
			Weinberg	Ladetto	Kim	Scarlett	Zeng	Tian	Mikov	Alvarez	Bylemans	Guo	Her Veri Kümesi içi Tüm Metotların En Küçük Bağıl Adım Uzunluğu Hatası
Referans	1000	912	2.86	**1.65**	3.16	8.63	1.81	3.46	8.50	1.81	3.19	1.80	***Ladetto***
1	1000	922	4.82	5.09	**3.68**	9.43	5.75	5.39	15.66	5.75	3.80	5.89	***Kim***
2	1008	839	7.71	5.60	**4.67**	24.80	5.79	6.68	22.39	5.80	5.38	7.23	***Kim***
3	1001	873	6.30	**4.27**	4.54	11.10	4.39	6.27	14.74	4.39	4.39	4.87	***Ladetto***
4	1005	886	9.25	6.52	**3.26**	32.19	6.23	7.31	19.38	6.23	4.11	8.40	***Kim***
5	1000	924	4.12	**2.26**	5.08	8.72	**2.26**	4.61	9.75	**2.26**	5.14	2.40	***Ladetto, Zeng, Alvarez***
6	1014	838	4.29	3.73	3.95	7.62	4.12	7.19	20.05	4.12	4.43	**3.63**	***Guo***
7	199	162	30.20	28.70	34.27	31.47	27.21	35.89	102.79	27.21	33.30	**26.95**	***Guo***
8	195	187	16.36	19.84	**16.17**	27.30	21.28	23.80	45.49	21.30	17.59	22.65	***Kim***
9	342	311	**16.28**	18.80	16.94	31.84	20.13	25.79	50.82	20.14	18.36	20.28	***Weinberg***
10	203	187	12.95	13.34	**12.58**	27.28	14.54	21.13	47.79	14.55	14.07	14.97	***Kim***
11	8	5	**6.73**	11.74	11.82	11.30	14.52	9.78	82.25	14.53	14.66	16.44	***Weinberg***
12	8	7	3.19	7.15	3.76	49.05	9.67	4.64	31.72	9.68	**2.76**	8.97	***Bylemans***
13	9	7	**4.09**	9.01	8.32	20.43	11.24	4.73	24.96	11.25	7.94	13.12	***Weinberg***
14	14	10	**4.14**	7.72	7.77	23.29	9.53	7.50	25.81	9.53	7.39	11.38	***Weinberg***
15	19	15	**5.26**	15.38	6.49	28.29	17.86	6.10	47.86	17.87	6.39	20.23	***Weinberg***
16	17	13	**3.78**	12.05	5.35	15.44	14.49	6.36	38.68	14.50	5.75	16.60	***Weinberg***
17	22	19	**5.37**	4.22	7.50	12.27	5.50	5.83	18.59	5.51	7.09	6.71	***Weinberg***
18	25	20	2.88	5.81	4.04	15.92	7.48	**2.80**	9.42	7.49	3.72	9.07	***Tian***
19	24	20	**3.39**	6.84	4.97	14.89	8.93	5.27	19.70	8.94	4.28	9.65	***Weinberg***
20	9	7	**6.63**	15.18	12.84	16.16	18.14	10.61	78.43	18.16	14.73	20.84	***Weinberg***
21	9	7	7.61	**7.29**	21.51	24.59	8.89	21.43	92.98	8.90	25.24	11.11	***Ladetto***
22	10	7	**7.45**	13.12	17.20	14.60	16.14	20.68	119.31	16.16	20.33	19.16	***Weinberg***
23	18	16	**6.62**	15.98	14.57	12.58	19.07	14.31	109.33	19.09	17.92	21.61	***Weinberg***
24	17	15	**6.70**	7.56	19.45	13.73	10.40	20.46	95.33	10.42	22.74	12.12	***Weinberg***
25	19	16	**2.79**	19.25	14.11	20.72	22.49	9.83	96.67	22.51	16.01	25.36	***Weinberg***
26	26	23	**6.14**	11.34	19.43	14.38	14.31	17.93	100.20	14.33	22.48	16.84	***Weinberg***
27	26	23	**7.06**	9.53	17.52	12.39	12.34	18.24	98.78	12.36	20.89	14.69	***Weinberg***
28	25	23	**6.15**	7.42	18.64	9.86	9.96	17.98	82.71	9.98	21.53	11.51	***Weinberg***
Bağıl Ortalama Hata			***7.44***	***10.53***	***11.44***	***19.34***	***12.24***	***12.45***	***54.34***	***12.25***	***12.59***	***13.67***	
Bağıl Hataların Standart Sapması			***5.66***	***6.11***	***7.50***	***9.59***	***6.33***	***8.40***	***36.70***	***6.33***	***8.40***	***6.71***	

Tablo 4.4 Gerçek toplam yürüme mesafesi ile seçilen adım uzunluğu kesitirim yöntemlerinden hesaplanan toplam yürüme mesafesinin karşılaştırması

Veri No	Adım Sayısı	Aykırı Değerler Çıkarıldıktan Sonra Adım Sayısı	Toplam Yürüme Mesafesi (m)											
			Toplam Mesafe	Weinberg	Ladetto	Kim	Scarlett	Zeng	Tian	Mikov	Alvarez	Bylemans	Guo	Her Veri Kümesi için Mutlak Yolculuk Mesafesini En Yakın Kestiren Yöntem
Referans	1000	912	612.31	611.69	**612.31**	610.18	612.77	**612.31**	610.56	628.64	**612.31**	609.58	**612.31**	***Ladetto,Zeng,Alvarez,Guo***
1	1000	922	657.77	628.02	624.15	640.23	624.64	619.71	625.53	**648.16**	619.69	639.94	618.79	***Mikov***
2	1008	839	591.92	547.69	563.22	586.30	734.09	563.41	560.41	596.35	563.39	**593.75**	552.38	***Bylemans***
3	1001	873	611.38	574.10	585.58	588.01	665.63	585.58	575.26	**625.47**	585.58	590.14	582.76	***Mikov***
4	1005	886	634.23	575.30	592.53	**630.10**	837.53	594.78	589.95	618.81	594.77	640.43	580.50	***Kim***
5	1000	924	622.39	602.01	614.80	595.36	631.92	619.03	599.49	661.38	619.05	595.22	**620.37**	***Guo***
6	1014	838	584.72	563.89	564.01	**569.53**	568.29	561.88	547.75	641.24	561.88	566.17	565.37	***Kim***
7	199	162	129.43	118.35	114.22	**125.18**	116.24	108.88	107.39	183.52	108.86	122.19	108.74	***Kim***
8	195	187	180.52	134.74	128.24	135.00	116.77	125.98	129.01	**147.49**	125.96	132.88	123.78	***Mikov***
9	342	311	300.67	223.13	212.86	219.32	178.86	209.47	211.97	**275.94**	209.42	214.88	208.99	***Mikov***
10	203	187	156.34	133.18	127.27	128.97	105.30	125.71	125.24	**162.28**	125.70	126.07	125.12	***Mikov***
11	8	5	2.90	**2.97**	3.23	2.55	3.03	3.31	2.62	5.24	3.31	2.47	3.37	***Weinberg***
12	8	7	4.25	4.12	4.55	4.11	6.33	4.66	4.07	5.58	4.66	**4.14**	4.63	***Bylemans***
13	9	7	4.21	4.16	4.57	3.93	4.63	4.67	**4.20**	5.25	4.67	3.95	4.75	***Tian***
14	14	10	6.12	5.89	6.55	5.67	7.22	6.67	**6.05**	7.57	6.67	5.72	6.79	***Tian***
15	19	15	8.51	8.71	9.78	8.12	10.79	9.98	**8.70**	12.30	9.99	8.14	10.18	***Tian***
16	17	13	7.58	7.68	8.47	7.18	8.73	8.66	**7.64**	10.48	8.66	7.18	8.82	***Tian***
17	22	19	12.13	11.59	**12.51**	11.26	13.30	12.71	11.96	13.78	12.71	11.36	12.88	***Ladetto***
18	25	20	12.46	12.19	13.17	12.08	14.43	13.38	12.76	13.63	13.38	**12.26**	13.58	***Bylemans***
19	24	20	12.27	12.00	13.11	11.69	14.08	13.36	**12.46**	14.52	13.37	11.83	13.45	***Tian***
20	9	7	3.92	**3.95**	4.52	3.42	4.49	4.63	3.60	6.98	4.63	3.35	4.74	***Weinberg***
21	9	7	4.29	**4.11**	4.50	3.35	3.76	4.62	3.35	8.24	4.62	3.19	4.72	***Weinberg***
22	10	7	3.98	**3.83**	4.49	3.28	4.47	4.61	3.14	8.70	4.61	3.16	4.73	***Weinberg***
23	18	16	8.88	**9.06**	10.28	7.57	9.45	10.55	7.63	18.54	10.56	7.28	10.78	***Weinberg***
24	17	15	8.98	**8.58**	9.64	7.22	8.44	9.89	7.12	17.53	9.89	6.92	10.05	***Weinberg***
25	19	16	8.63	**8.68**	10.28	7.41	9.88	10.56	7.77	17.00	10.56	7.24	10.81	***Weinberg***
26	26	23	13.30	**12.89**	14.77	10.69	12.69	15.17	10.89	26.55	15.17	10.29	15.50	***Weinberg***
27	26	23	13.54	13.24	14.79	11.13	**13.39**	15.18	11.04	26.91	15.18	10.68	15.49	***Scarlett***
28	25	23	13.84	13.25	14.81	11.24	**13.61**	15.19	11.34	25.19	15.19	10.84	15.40	***Scarlett***

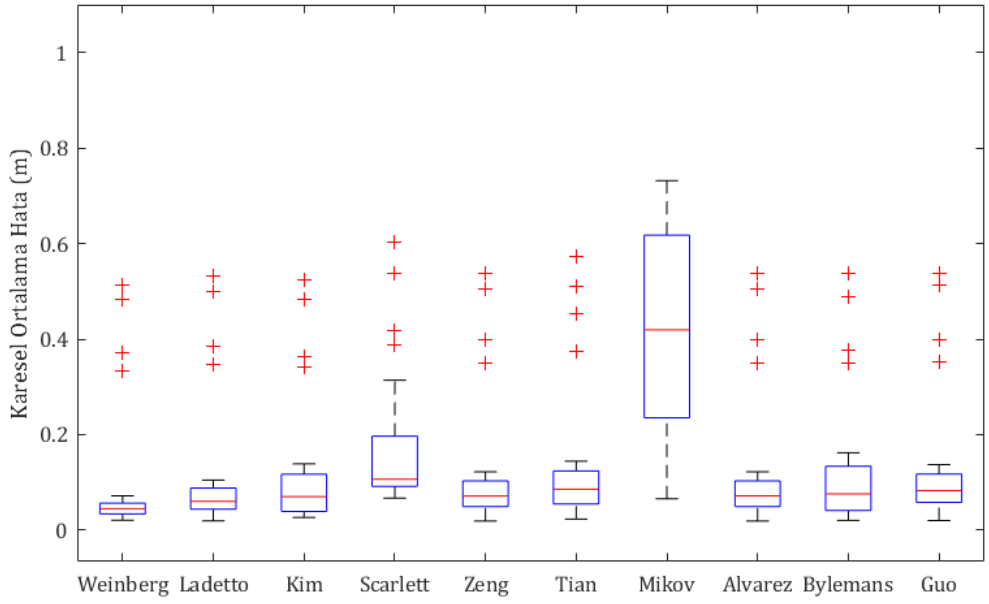
Tablo 4.5 Toplam yürüme mesafesinin mutlak hata karşılaştırması

Veri No	Adım Sayısı	Aykırı Değerler Çıkarıldıktan Sonra Adım Sayısı	Mutlak Hata (m)										
			Weinberg	Ladetto	Kim	Scarlett	Zeng	Tian	Mikov	Alvarez	Bylemans	Guo	Her Veri Kümesi için En Küçük Mutlak Hatayı Veren Yöntem
Referans	1000	912	0.62	**0**	2.13	0.46	**0**	1.76	16.33	**0**	2.73	**0**	***Ladetto,Zeng,Alvarez,Guo***
1	1000	922	29.74	33.62	17.54	33.12	38.05	32.24	**9.61**	38.07	17.83	38.98	***Mikov***
2	1008	839	44.23	28.70	5.62	142.17	28.51	31.51	4.43	28.53	**1.83**	39.54	***Bylemans***
3	1001	873	37.28	25.80	23.37	54.25	25.80	36.12	**14.10**	25.80	21.24	28.62	***Mikov***
4	1005	886	58.93	41.70	**4.13**	203.30	39.45	44.28	15.42	39.46	6.20	53.74	***Kim***
5	1000	924	20.39	7.60	27.03	9.53	3.36	22.90	38.99	3.34	27.17	**2.02**	***Guo***
6	1014	838	20.83	20.71	**15.19**	16.43	22.84	36.97	56.52	22.84	18.55	19.35	***Kim***
7	199	162	11.08	15.21	**4.25**	13.19	20.55	22.04	54.09	20.57	7.24	20.69	***Kim***
8	195	187	45.78	52.28	45.52	63.75	54.53	51.50	**33.02**	54.55	47.64	56.73	***Mikov***
9	342	311	77.54	87.81	81.35	121.81	91.20	88.70	**24.73**	91.24	85.78	91.68	***Mikov***
10	203	187	23.17	29.08	27.37	51.04	30.63	31.11	**5.94**	30.64	30.27	31.22	***Mikov***
11	8	5	**0.07**	0.33	0.35	0.13	0.41	0.28	2.34	0.41	0.43	0.47	***Weinberg***
12	8	7	0.13	0.30	0.14	2.08	0.41	0.18	1.34	0.41	**0.11**	0.38	***Bylemans***
13	9	7	0.05	0.37	0.28	0.42	0.46	**0.01**	1.04	0.46	0.26	0.54	***Tian***
14	14	10	0.24	0.43	0.46	1.10	0.55	**0.07**	1.45	0.55	0.41	0.66	***Tian***
15	19	15	0.19	1.26	0.39	2.28	1.47	**0.19**	3.79	1.47	0.38	1.67	***Tian***
16	17	13	0.11	0.90	0.40	1.15	1.08	**0.06**	2.90	1.08	0.40	1.24	***Tian***
17	22	19	0.55	**0.38**	0.87	1.17	0.57	0.17	1.65	0.58	0.77	0.74	***Ladetto***
18	25	20	0.27	0.72	0.37	1.97	0.93	0.30	1.17	0.93	**0.20**	1.12	***Bylemans***
19	24	20	0.27	0.83	0.58	1.80	1.09	**0.18**	2.24	1.09	0.44	1.18	***Tian***
20	9	7	**0.03**	0.59	0.50	0.57	0.71	0.33	3.05	0.71	0.58	0.81	***Weinberg***
21	9	7	**0.18**	0.22	0.94	0.53	0.33	0.94	3.95	0.33	1.10	0.44	***Weinberg***
22	10	7	**0.15**	0.51	0.69	0.49	0.63	0.83	4.72	0.63	0.82	0.75	***Weinberg***
23	18	16	**0.18**	1.40	1.31	0.57	1.67	1.25	9.66	1.68	1.60	1.90	***Weinberg***
24	17	15	**0.40**	0.66	1.76	0.54	0.91	1.86	8.56	0.92	2.06	1.07	***Weinberg***
25	19	16	**0.05**	1.65	1.23	1.24	1.93	0.87	8.37	1.93	1.39	2.17	***Weinberg***
26	26	23	**0.42**	1.47	2.61	0.62	1.86	2.41	13.24	1.86	3.02	2.20	***Weinberg***
27	26	23	0.30	1.26	2.40	**0.15**	1.64	2.50	13.37	1.64	2.86	1.95	***Scarlett***
28	25	23	0.59	0.97	2.60	**0.23**	1.35	2.50	11.36	1.36	3.00	1.57	***Scarlett***

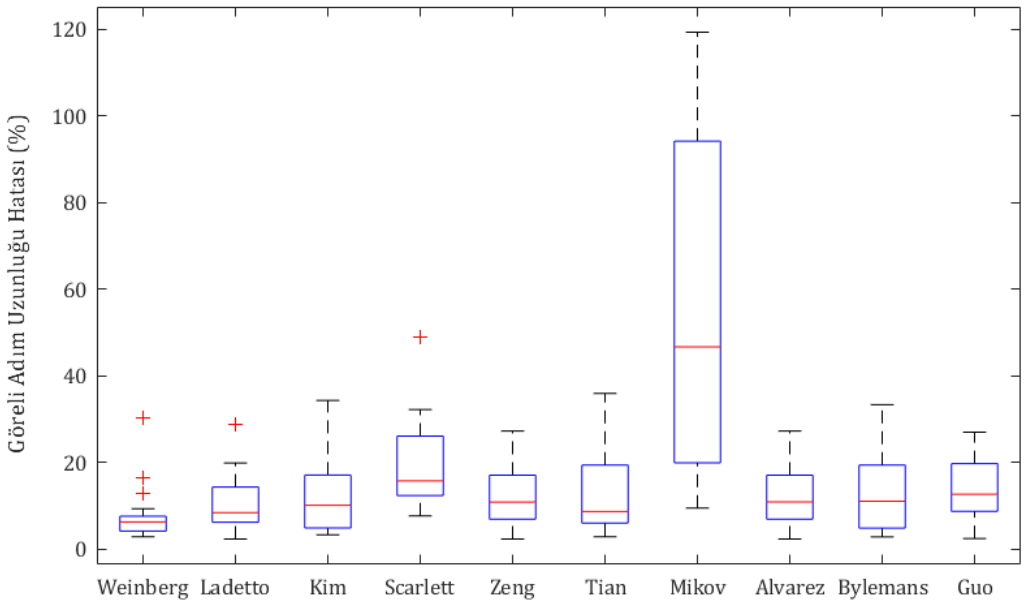
Tablo 4.6 Seçilen adım uzunluğu kestirim modelleri için toplam yürüme mesafesi bağıl hatası karşılaştırması

Veri No No	Adım Sayısı	Aykırı Değerler Çıkarıldıktan Sonra Adım Sayısı	Bağıl Hata(%)										
			Weinberg	Ladetto	Kim	Scarlett	Zeng	Tian	Mikov	Alvarez	Bylemans	Guo	Her Veri Kümesi için En Küçük Bağıl Hataya Sahip Metot
Referans	1000	912	0.1	**0**	0.35	0.08	**0**	0.29	2.67	**0**	0.45	**0**	***Ladetto,Zeng,Alvarez,Guo***
1	1000	922	4.52	5.11	2.67	5.04	5.78	4.90	**1.46**	5.79	2.71	5.93	***Mikov***
2	1008	839	7.47	4.85	0.95	24.02	4.82	5.32	0.75	4.82	**0.31**	6.68	***Bylemans***
3	1001	873	6.10	4.22	3.82	8.87	4.22	5.91	**2.31**	4.22	3.47	4.68	***Mikov***
4	1005	886	9.29	6.58	**0.65**	32.05	6.22	6.98	2.43	6.22	0.98	8.47	***Kim***
5	1000	924	3.28	1.22	4.34	1.53	0.54	3.68	6.26	0.54	4.37	**0.33**	***Guo***
6	1014	838	3.56	3.54	**2.60**	2.81	3.91	6.32	9.67	3.91	3.17	3.31	***Kim***
7	199	162	8.56	11.75	**3.28**	10.19	15.88	17.03	41.79	15.89	5.59	15.99	***Kim***
8	195	187	25.36	28.96	25.22	35.32	30.21	28.53	**18.29**	30.22	26.39	31.43	***Mikov***
9	342	311	25.79	29.21	27.06	40.51	30.33	29.50	**8.22**	30.35	28.53	30.49	***Mikov***
10	203	187	14.82	18.60	17.51	32.65	19.59	19.90	**3.80**	19.60	19.36	19.97	***Mikov***
11	8	5	**2.31**	11.44	12.00	4.63	14.21	9.58	80.69	14.22	14.77	16.14	***Weinberg***
12	8	7	3.00	7.11	3.29	49.02	9.63	4.18	31.43	9.64	**2.64**	8.93	***Bylemans***
13	9	7	1.20	8.71	6.54	9.95	10.93	**0.16**	24.81	10.94	6.16	12.80	***Tian***
14	14	10	3.88	6.95	7.46	17.95	8.95	**1.16**	23.68	8.96	6.64	10.85	***Tian***
15	19	15	2.29	14.86	4.60	26.82	17.30	**2.18**	44.49	17.31	4.42	19.61	***Tian***
16	17	13	1.40	11.83	5.30	15.23	14.25	**0.82**	38.25	14.26	5.30	16.34	***Tian***
17	22	19	4.50	**3.09**	7.18	9.67	4.74	1.42	13.57	4.74	6.32	6.14	***Ladetto***
18	25	20	2.16	5.77	3.00	15.84	7.44	2.44	9.41	7.45	**1.58**	9.03	***Bylemans***
19	24	20	2.20	6.79	4.72	14.70	8.88	**1.49**	18.27	8.89	3.60	9.60	***Tian***
20	9	7	**0.82**	15.12	12.84	14.59	18.08	8.29	77.83	18.09	14.72	20.76	***Weinberg***
21	9	7	**4.23**	5.05	21.81	12.36	7.68	21.98	92.14	7.70	25.63	10.15	***Weinberg***
22	10	7	**3.77**	12.86	17.44	12.36	15.88	20.90	118.82	15.90	20.55	18.90	***Weinberg***
23	18	16	**2.01**	15.77	14.76	6.40	18.86	14.09	108.80	18.87	18.07	21.39	***Weinberg***
24	17	15	**4.46**	7.35	19.60	6.02	10.18	20.68	95.31	10.20	22.90	11.89	***Weinberg***
25	19	16	**0.54**	19.08	14.22	14.39	22.31	10.04	96.94	22.33	16.15	25.18	***Weinberg***
26	26	23	**3.12**	11.04	19.65	4.63	14.00	18.13	99.52	14.01	22.67	16.52	***Weinberg***
27	26	23	2.21	9.28	17.76	**1.11**	12.09	18.49	98.75	12.11	21.12	14.43	***Scarlett***
28	25	23	4.26	7.02	18.78	**1.64**	9.78	18.06	82.08	9.80	21.65	11.33	***Scarlett***
Ortalama Bağıl Hata			***5.61***	***10.47***	***10.68***	***15.37***	***12.38***	***10.79***	***44.63***	***12.39***	***11.78***	***13.83***	
Hataların Standart Sapması			***6.27***	***6.89***	***7.86***	***12.46***	***7.30***	***8.74***	***39.92***	***7.30***	***9.12***	***7.60***	

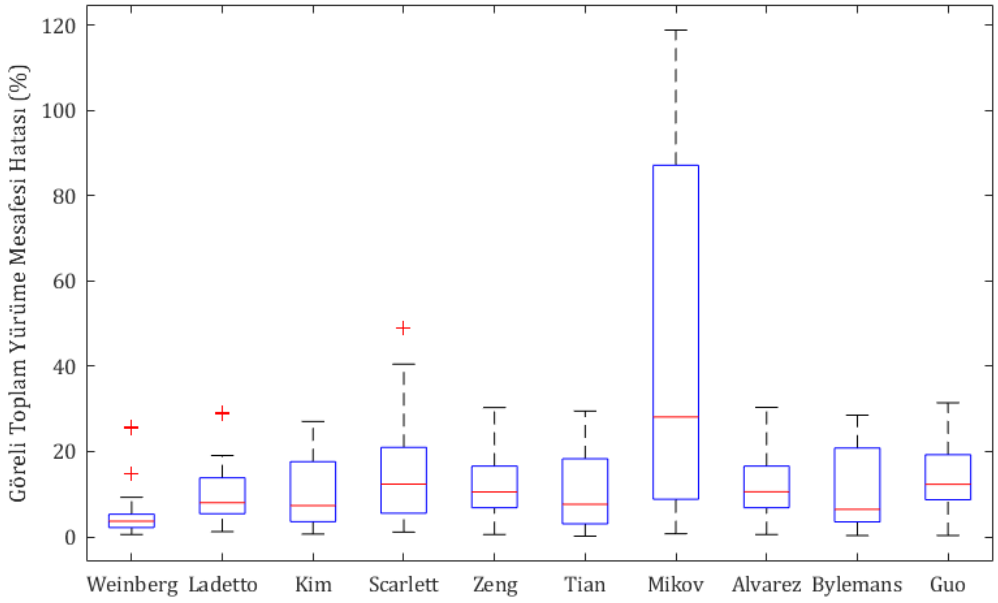
Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te adım uzunluğunun ve toplam yürüme mesafesinin hata oranları kutu diyagramı ile görselleştirilmiştir. Her kutuda, merkezdeki kırmızı çizgi medyanı, kutuyu sınırlayan alt ve üst kenarlar sırasıyla 25. ve 75. yüzdelik dilimleri simgeler. Kutuların dışındaki çizgiler ise %99.3'lük veri kapsamını temsil eder. Maksimum çizgi uzunluğu çeyrekler arası aralığın 1,5 katı olarak belirtilir. Çizgilerin dışındaki veri noktaları kırmızı artı (+) kullanılarak görüntülenir.



Şekil 4.1 Adım uzunluğu karesel ortalama hatasının kutu diyagram gösterimi



Şekil 4.2 Adım uzunluğu göreli hatasının kutu diyagram gösterimi



Şekil 4.3 Yürüme mesafesi göreli hatasının kutu diyagram gösterimi

Şekil 4.1 RMSE'si en az olan, Weinberg yönteminin hassasiyetinin ve doğruluğunun diğer yöntemlerden daha fazla olduğunu göstermektedir. Mikov diğer yöntemler arasında saçılımı ve RMSE'si en yüksek olandır. Geri kalan yöntemlerin birbirlerine karşı önemli bir üstünlüğü yoktur. Şekil 4.2 ve 4.3'te toplam yürüme mesafesi ve adım uzunluğu göreli hatalarının Mikov hariç, en fazla %20 civarında değiştiği gözlemlenmektedir. RMSE sonuçlarında da görüldüğü gibi aynı şekilde göreli hatada da Weinberg yöntemi oldukça başarılıdır.

Uygulanan on yöntem göz önünde bulundurulduğunda Weinberg'in adım uzunluğu için %7.44 ve toplam yürüme mesafesi için %5.61 ortalama göreli hata ile doğruluğu en yüksek sonucu verdiği görülmektedir. Weinberg'in aksine Mikov'un sonuçlarının güvenilirliği oldukça düşüktür. Geri kalan yöntemlere bakıldığında ise aynı eğilim içerisinde oldukları söylenebilir. RMSE değerleri göz önünde bulundurulduğunda en fazla iyi sonucun Weinberg'e ait olduğu; adım sayısı fazlalaştığında ise Kim'in öne çıktığı söylenebilir. Ayrıca 0.19 m ile en düşük hata değerini Ladetto, Zeng ve Alvarez yöntemleri vermiştir. Pratik navigasyon uygulamalarında olduğu gibi kullanıcı hakkında bilgi sahibi olmadan, kullanıcının hareket çeşitliliğini bilmeden, adım tespit etmek için eşik değer uygulamadan ya da algılayıcı verilerine çeşitli filtreler uygulamadan diğer parametrelerden bağımsız olarak salt SLE yöntemleri karşılaştırıldığında Mikov (2013) dışındaki dokuz yöntem birbirine yakın ve navigasyon için yeterli sonuçlar vermiştir (Birinci bölüm birinci sayfada ve ikinci bölüm yirmi üçüncü sayfada bu yeterlilikle ilgili bilgiler paylaşılmıştır.). Mikov'dan

(2013) alınan en kötü standart sapma değeri 1.7 m'dir. Bu değer, uygulamalarda filtreler kullanılarak, iyileştirilmeler yapılarak, yayalar hakkındaki bilgiler parametrik hale getirilerek uygun seviyeye çekilebilir.

Ayrıca sunulan tabloların ilk satırında yer verilen ve yöntemlerdeki parametrelerin hesaplanmasında kullanılan referans veri setinin sonuçları incelendiğinde; medyan değerinin gerçeğe yakınlığının en iyi sonucunun 0.001 m, SLE yöntemlerinin standart sapmasının en iyi sonucunun 0.014 m, SLE yöntemlerinin yüzde bağıl hatasının en iyi sonucunun %1.65 ve bazı yöntemler için gidilen gerçek toplam mesafe ile hesaplanan gidilen toplam mesafenin aynı olduğu görülmektedir. Referans olmayan diğer veri setlerine kıyasla referans veri setinin başarısından yola çıkılarak yöntem parametrelerinin ve ENU dönüklük matrisinin her veri seti için ayrı ayrı hesaplanması ile daha doğru sonuçlar elde edilebileceği söylenebilir.

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Yaya navigasyonunun en önemli aşamalarından biri adım uzunluğu kestirimidir. Bu çalışmada on farklı adım uzunluğu kestirim yöntemi karşılaştırılmıştır. Test işlemleri için Wang vd. (2019), tarafından paylaşılan açık kaynaklı veri tabanı kullanılmıştır. Bu veri tabanı beş kullanıcının, altı farklı ortamda, farklı hızlarda ve dokuda hareket etmesi ile elde edilmiştir. MEMS algılayıcıları kullanılarak toplanan veriler 28 farklı veri tabanı içermektedir. Veri setinin ilk manyetometre ve ivmeölçer kayıtlarına bakılarak bir dönüşüm matrisi oluşturulmuştur. Aynı şekilde metotlardaki parametreler hesaplanırken tek bir veri setindeki verilerden yararlanılmıştır. Elde edilen adım uzunluklarından medyan, standart sapma, mutlak hata ve göreli hata miktarları hesaplanmıştır. Sekiz yöntemin birbiriyle yaklaşık aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Adım uzunluğu ortalama %13.06 hata ile hesaplanmıştır. Ancak Weinberg'in (2002) yönteminin sırasıyla adım uzunluğunda ve toplam yürüme mesafesinde %7.44 ve %5.61 hata ile en başarılı yöntem olduğu söylenebilir. Buna karşın, Mikov'un (2013) yöntemi %54.34 ve %44.63 ile en başarısız yöntemdir.

İvme dönüklüğü, ENU dönüşüm matrisi yerine, her veri seti için kayıtların medyanına göre hesaplanırsa daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Ancak gerçek zamanlı bir PNS için bu hesaplama önemsizdir çünkü tüm adım verileri elde edilememektedir. Bununla birlikte, her veri kümesinde her bir yöntem için ayrı parametre kestirimi yapılırsa sonuçlar iyileşebilir. Veriler içerdikleri adım sayısına, kullanıcılara ya da yürüme ortamlarına göre gruplandırılırsa ve parametreler bu gruplara göre hesaplanırsa doğruluğu daha yüksek sonuçlar elde edilebilir. Örneğin, kullanıcının boy bilgisine sahip olunmadığı için Tian (2015) yönteminde boy, bir sabit kabul edilip optimizasyonla hesaplanmıştır. Optimizasyon yönteminin değiştirilmesi veya başlangıç değerin farklı seçilmesi bu yöntemin doğruluğunu olumlu ya da olumsuz yönde etkileyebilir. Weinberg (2002) yöntemi, birçok navigasyon uygulaması için veri tabanı ile ilgili yeterli öznitelik bilgisinin olmadığı durumlarda, doğruluğu ve hassasiyeti göz önünde bulundurulduğunda ilk tercih edilen yöntem olmalıdır.

Gelecek araştırmalar için daha fazla kullanıcıdan gelen verilerin kaydedildiği, daha

çeşitli insan davranışlarını içeren ve hem az adım hem de çok adım içeren çeşitli açık kaynak veri setlerinin üretilmesi önemini koruyacaktır. Ayrıca verilerin, veriyi kaydeden yayaya ait boy, kilo, yaş gibi özellikler ve yürüme hızı veya yaya davranışı gibi bilgiler ile sunulması analizlerin daha kapsamlı yapılmasında faydalı olacaktır. Bu veri setleri eğitilerek yapay zekâ ile daha verimli sonuçlar elde edilebilir. Bu sayede, çevrimiçi uygulamalarda, önceki adımlara düzeltme getirilerek daha sağlıklı bilgi sağlanabilir. Çalışmada tasarlanan masaüstü uygulaması yapay zekâ ile zenginleştirilebilir, daha çeşitli adım uzunluğu kestirim yöntemleri için, veri setinin girdilerine göre otomatik olarak adım uzunlukları hesaplanabilir ve doğruluk analizi yapılabilir, analiz sonuçlarının grafik halinde çıktıları alınabilir.

KAYNAKÇA

[1] K. J. Walchko, "Low cost inertial navigation: Learning to integrate noise and find your way," Ph.D. dissertation, University of Florida, 2002.

[2] N. Samama, *Indoor positioning: technologies and performance*. John Wiley & Sons, 2019.

[3] S. Shin, C. Park, J. Kim, H. Hong, J. Lee, "Adaptive step length estimation algorithm using low-cost mems inertial sensors," in *2007 ieee sensors applications symposium*, IEEE, 2007, pp. 1–5.

[4] H. A. Karimi, *Indoor wayfinding and navigation*. CRC Press, 2015.

[5] Z. Farid, R. Nordin, M. Ismail, "Recent advances in wireless indoor localization techniques and system," *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2013, 2013.

[6] X. Tao, X. Zhang, F. Zhu, F. Wang, W. Teng, "Precise displacement estimation from time-differenced carrier phase to improve pdr performance," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 20, pp. 8238–8246, 2018.

[7] J. W. Kim, H. J. Jang, D.-H. Hwang, C. Park, "A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system," *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 3, no. 1-2, pp. 273–279, 2004.

[8] J. Kang, J. Lee, D.-S. Eom, "Smartphone-based traveled distance estimation using individual walking patterns for indoor localization," *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 3149, 2018.

[9] M. Zhang, Y. Wen, J. Chen, X. Yang, R. Gao, H. Zhao, "Pedestrian dead-reckoning indoor localization based on os-elm," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6116–6129, 2018.

[10] D. H. Titterton, J. L. Weston, "Strapdown inertial navigation technology. 2nd," *London: Institution of Electrical Engineers*, 2004.

[11] A. Martinelli, H. Gao, P. D. Groves, S. Morosi, "Probabilistic context-aware step length estimation for pedestrian dead reckoning," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 1600–1611, 2017.

[12] Q. Wang, L. Ye, H. Luo, A. Men, F. Zhao, Y. Huang, "Pedestrian stride-length estimation based on lstm and denoising autoencoders," *Sensors*, vol. 19, no. 4, p. 840, 2019.

[13] S. Y. Cho, C. G. Park, "Mems based pedestrian navigation system," *The Journal of Navigation*, vol. 59, no. 1, pp. 135–153, 2006.

[14] O. Woodman, R. Harle, "Pedestrian localisation for indoor environments," in *Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing*, 2008, pp. 114–123.

[15] S. Bichler, G. Ogris, V. Kremser, F. Schwab, S. Knott, A. Baca, "Towards high-precision imu/gps-based stride-parameter determination in an outdoor runners' scenario," *Procedia Engineering*, vol. 34, pp. 592–597, 2012.

[16] A. J. May, T. Ross, S. H. Bayer, M. J. Tarkiainen, "Pedestrian navigation aids: Information requirements and design implications," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 7, no. 6, pp. 331–338, 2003.

[17] A. Millonig, K. Schechtner, "Developing landmark-based pedestrian-navigation systems," *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, vol. 8, no. 1, pp. 43–49, 2007.

[18] M. B. Dias, E. A. Teves, G. J. Zimmerman, H. K. Gedawy, S. M. Belousov, M. B. Dias, "Indoor navigation challenges for visually impaired people," *Indoor Wayfinding and Navigation*, pp. 141–164, 2015.

[19] R. Jirawimut, P. Ptasinski, V. Garaj, F. Cecelja, W. Balachandran, "A method for dead reckoning parameter correction in pedestrian navigation system," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 52, no. 1, pp. 209–215, 2003.

[20] P.-Y. Gilliéron, D. Büchel, I. Spassov, B. Merminod, "Indoor navigation performance analysis," in *Proceedings of the 8th European navigation conference GNSS*, 2004.

[21] E. M. Diaz, A. L. M. Gonzalez, "Step detector and step length estimator for an inertial pocket navigation system," in *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, IEEE, 2014, pp. 105–110.

[22] T. Yoshida *et al.*, "Sampling rate dependency in pedestrian walking speed estimation using dualcnn-lstm," in *Adjunct Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers*, 2019, pp. 862–868.

[23] Q. Ladetto, V. Gabaglio, B. Merminod, "Two different approaches for augmented gps pedestrian navigation," in *International symposium on location based services for cellular users, Locellus*, vol. 2001, 2001.

[24] S. Tiwari, V. K. Jain, "Smart-phone based improved multi-floor indoor localization system," in *The World Congress on Engineering*, Springer, 2018, pp. 265–279.

[25] A. Manos, I. Klein, T. Hazan, "Gravity-based methods for heading computation in pedestrian dead reckoning," *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1170, 2019.

[26] J. Jahn, U. Batzer, J. Seitz, L. Patino-Studencka, J. G. Boronat, "Comparison and evaluation of acceleration based step length estimators for handheld devices," in *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, IEEE, 2010, pp. 1–6.

[27] J. Kuang, X. Niu, X. Chen, "Robust pedestrian dead reckoning based on mems-imu for smartphones," *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1391, 2018.

[28] 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.

[29] P. Nguyen, T. Akiyama, H. Ohashi, G. Nakahara, K. Yamasaki, S. Hikaru, "User-friendly heading estimation for arbitrary smartphone orientations," in *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, IEEE, 2016, pp. 1–7.

[30] I. LEPSIS, "Pedestrian stride frequency and length estimation in outdoor urban environments using video sensors,"

[31] A. Rasouli, I. Kotseruba, J. K. Tsotsos, "Are they going to cross? a benchmark dataset and baseline for pedestrian crosswalk behavior," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, 2017, pp. 206–213.

[32] A. Dalton, H. Khalil, M. Busse, A. Rosser, R. van Deursen, G. ÓLaighin, "Analysis of gait and balance through a single triaxial accelerometer in presymptomatic and symptomatic huntington's disease," *Gait & posture*, vol. 37, no. 1, pp. 49–54, 2013.

[33] J. Hannink *et al.*, "Mobile stride length estimation with deep convolutional neural networks," *IEEE journal of biomedical and health informatics*, vol. 22, no. 2, pp. 354–362, 2017.

[34] A. Ralhan, "A study on machine learning algorithms for fall detection and movement classification," Ph.D. dissertation, Master's thesis, Department of Electrical and Computer Engineering ..., 2009.

[35] Q. Ladetto, J. Van Seeters, S. Sokolowski, Z. Sagan, B. Merminod, "Digital magnetic compass and gyroscope for dismounted soldier position & navigation," in *Military Capabilities enabled by Advances in Navigation Sensors, Sensors & Electronics Technology Panel, NATO-RTO meetings, Istanbul, Turkey*, 2002.

[36] R. C. Gonzalez, D. Alvarez, A. M. Lopez, J. C. Alvarez, "Modified pendulum model for mean step length estimation," in *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, IEEE, 2007, pp. 1371–1374.

[37] C. Fischer, P. T. Sukumar, M. Hazas, "Tutorial: Implementing a pedestrian tracker using inertial sensors," *IEEE pervasive computing*, vol. 12, no. 2, pp. 17–27, 2012.

[38] N. Roy, H. Wang, R. Roy Choudhury, "I am a smartphone and i can tell my user's walking direction," in *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile systems, applications, and services*, 2014, pp. 329–342.

[39] Z.-A. Deng, G. Wang, Y. Hu, D. Wu, "Heading estimation for indoor pedestrian navigation using a smartphone in the pocket," *Sensors*, vol. 15, no. 9, pp. 21 518–21 536, 2015.

[40] N. W.-H. Tsang, K.-Y. Lam, U. M. Qureshi, J. K.-Y. Ng, I. Papavasileiou, S. Han, "Indoor activity tracking for elderly using intelligent sensors," in *Intelligent Data Sensing and Processing for Health and Well-being Applications*, Elsevier, 2018, pp. 197–222.

[41] C. R. Ehrlich, J. Blankenbach, "Pedestrian localisation inside buildings based on multi-sensor smartphones," in *2018 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS)*, IEEE, 2018, pp. 1–10.

[42] Q. Ladetto, "On foot navigation: Continuous step calibration using both complementary recursive prediction and adaptive kalman filtering," in *Proceedings of ION GPS*, vol. 2000, 2000, pp. 1735–1740.

[43] 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.

[44] J. Scarlett, "Enhancing the performance of pedometers using a single accelerometer," *Application Note, Analog Devices*, no. AN-900, 2007.

[45] N.-H. Ho, P. H. Truong, G.-M. Jeong, "Step-detection and adaptive step-length estimation for pedestrian dead-reckoning at various walking speeds using a smartphone," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1423, 2016.

[46] H. Xing, J. Li, B. Hou, Y. Zhang, M. Guo, "Pedestrian stride length estimation from imu measurements and ann based algorithm," *Journal of Sensors*, vol. 2017, 2017.

[47] S. Ayub, X. Zhou, S. Honary, A. Bahraminasab, B. Honary, "Sensor placement modes for smartphone based pedestrian dead reckoning," in *Computer, informatics, cybernetics and applications*, Springer, 2012, pp. 123–132.

[48] Q. Tian, Z. Salcic, I. Kevin, K. Wang, Y. Pan, "A multi-mode dead reckoning system for pedestrian tracking using smartphones," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 7, pp. 2079–2093, 2015.

[49] S. H. Shin, C. G. Park, "Adaptive step length estimation algorithm using optimal parameters and movement status awareness," *Medical engineering & physics*, vol. 33, no. 9, pp. 1064–1071, 2011.

[50] H. Don, R. Lakmal, "Enhanced indoor localization system based on inertial navigation," 2016.

[51] D. Alvarez, R. C. González, A. López, J. C. Alvarez, "Comparison of step length estimators from wearable accelerometer devices," in *Encyclopedia of Healthcare Information Systems*, IGI Global, 2008, pp. 244–250.

[52] I. Bylemans, M. Weyn, M. Klepal, "Mobile phone-based displacement estimation for opportunistic localisation systems," in *2009 Third International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies*, IEEE, 2009, pp. 113–118.

[53] 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.

[54] Y. Guo, Y. Sun, H. Luo, N. Guizani, "Accurate indoor localization based on crowd sensing," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 17, pp. 2852–2868, 2016.

[55] G. Zeng, S. Cao, C. Liu, W. Song, "Experimental and modeling study on relation of pedestrian step length and frequency under different headways," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 500, pp. 237–248, 2018.

[56] K. Abdulrahim, T. Moore, C. Hide, C. Hill, "Understanding the performance of zero velocity updates in mems-based pedestrian navigation," *International Journal of Advancements in Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 53–60, 2014.

[57] M. Vezočnik, 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.

[58] C. Jekeli, *Inertial navigation systems with geodetic applications*. Walter de Gruyter, 2012.

[59] A. Lawrence, *Modern inertial technology: navigation, guidance, and control*. Springer Science & Business Media, 2012.

[60] J. Van Sickle, "Basic gis coordinates," 2004.

[61] C. M. R. Ehrlich, U. D.-I. A. Eichhorn, "Echtzeit-positionierung für fußgänger innerhalb von gebäuden auf basis von smartphone-sensoren,"

[62] C. Emiliani *et al.*, *Planet earth: cosmology, geology, and the evolution of life and environment*. Cambridge University Press, 1992.

[63] P. D. Groves, "Principles of gnss, inertial, and multisensor integrated navigation systems, [book review]," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 30, no. 2, pp. 26–27, 2015.

[64] P. Aggarwal, *MEMS-based integrated navigation*. Artech House, 2010.

[65] E. Kaplan, C. Hegarty, *Understanding GPS: principles and applications*. Artech house, 2005.

[66] R. M. Rogers, *Applied mathematics in integrated navigation systems*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[67] K. R. Britting, "Inertial navigation systems analysis.," 1971.

[68] E. BEŞDOK, A. ÖZÇELİK, "İnersİyal navİgasyon sİstemlerİ (ins),"

[69] K. Pahlavan, P. Krishnamurthy, *Principles of wireless networks: A unified approach*. Prentice Hall PTR, 2011.

[70] P. Bahl, V. N. Padmanabhan, "Radar: An in-building rf-based user location and tracking system," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064)*, Ieee, vol. 2, 2000, pp. 775–784.

[71] K. Pahlavan, X. Li, J.-P. Makela, "Indoor geolocation science and technology," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 112–118, 2002.

[72] J. Zhou, K.-K. Chu, J.-Y. Ng, "Providing location services within a radio cellular network using ellipse propagation model," in *19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05) Volume 1 (AINA papers)*, IEEE, vol. 1, 2005, pp. 559–564.

[73] T. P. Deasy, W. G. Scanlon, "Simulation or measurement: The effect of radio map creation on indoor wlan-based localisation accuracy," *Wireless Personal Communications*, vol. 42, no. 4, pp. 563–573, 2007.

[74] A. Hatami, K. Pahlavan, "Comparative statistical analysis of indoor positioning using empirical data and indoor radio channel models," in *CCNC 2006. 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2006.*, IEEE, vol. 2, 2006, pp. 1018–1022.

[75] R. Mautz, "Indoor positioning technologies," 2012.

[76] T. Liu, X. Zhang, Q. Li, Z. Fang, "A visual-based approach for indoor radio map construction using smartphones," *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1790, 2017.

[77] M. Raspopoulos, C. Laoudias, L. Kanaris, A. Kokkinis, C. G. Panayiotou, S. Stavrou, "Cross device fingerprint-based positioning using 3d ray tracing," in *2012 8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, IEEE, 2012, pp. 147–152.

[78] M. B. Kjærgaard, "A taxonomy for radio location fingerprinting," in *International symposium on location-and context-awareness*, Springer, 2007, pp. 139–156.

[79] A. Pérez-Navarro *et al.*, "Challenges of fingerprinting in indoor positioning and navigation," in *Geographical and Fingerprinting Data to Create Systems for Indoor Positioning and Indoor/Outdoor Navigation*, Elsevier, 2019, pp. 1–20.

[80] R. W. Levi, T. Judd, *Dead reckoning navigational system using accelerometer to measure foot impacts*, US Patent 5,583,776, Dec. 1996.

[81] Z. Zhou, T. Chen, L. Xu, "An improved dead reckoning algorithm for indoor positioning based on inertial sensors," in *2015 International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering*, Atlantis Press, 2015.

[82] F. Jamil, D. H. Kim, "Improving accuracy of the alpha–beta filter algorithm using an ann-based learning mechanism in indoor navigation system," *Sensors*, vol. 19, no. 18, p. 3946, 2019.

[83] M. H. V. Le, D. Saragas, N. Webb, "Indoor navigation system for handheld devices," *Worcester Polytechnic Institute, Worcester (October 22, 2009)*, 2009.

[84] O. Mezentsev, G. Lachapelle, J. Collin, "Pedestrian dead reckoning—a solution to navigation in gps signal degraded areas?" *Geomatica*, vol. 59, no. 2, pp. 175–182, 2005.

[85] Y. Gu, A. Lo, I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13–32, 2009.

[86] F. Evennou, F. Marx, "Advanced integration of wifi and inertial navigation systems for indoor mobile positioning," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2006, no. 1, p. 086 706, 2006.

[87] M. Dehkordi, A. Frisoli, E. Sotgiu, C. Loconsole, "Pedestrian indoor navigation system using inertial measurement unit," *Sensor Netw Data Commun*, vol. 3, no. 115, p. 2, 2014.

[88] C. Fuchs, N. Aschenbruck, P. Martini, M. Wieneke, "Indoor tracking for mission critical scenarios: A survey," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 1–15, 2011.

[89] I. Skog, J.-O. Nilsson, P. Händel, "An open-source multi inertial measurement unit (mimu) platform," in *2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS)*, IEEE, 2014, pp. 1–4.

[90] S. Beauregard, H. Haas, "Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning," in *Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, 2006, pp. 27–35.

[91] B. Mariani, C. Hoskovec, S. Rochat, C. Büla, J. Penders, K. Aminian, "3d gait assessment in young and elderly subjects using foot-worn inertial sensors," *Journal of biomechanics*, vol. 43, no. 15, pp. 2999–3006, 2010.

[92] A. Rampp, J. Barth, S. Schülein, K.-G. Gaßmann, J. Klucken, B. M. Eskofier, "Inertial sensor-based stride parameter calculation from gait sequences in geriatric patients," *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol. 62, no. 4, pp. 1089–1097, 2014.

[93] A. M. Sabatini, "Quaternion-based strap-down integration method for applications of inertial sensing to gait analysis," *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 43, no. 1, pp. 94–101, 2005.

[94] A. Manos, I. Klein, T. Hazan, "Gravity direction estimation and heading determination for pedestrian navigation," in *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, IEEE, 2018, pp. 206–212.

[95] S. Ayub, A. Bahraminasab, B. Honary, "A sensor fusion method for smart phone orientation estimation," 2012.

[96] E. Damiani, R. J. Howlett, L. C. Jain, L. Gallo, G. De Pietro, *Intelligent interactive multimedia systems and services*. Springer, 2015.

[97] A. R. Pratama, R. Hidayat, *et al.*, "Smartphone-based pedestrian dead reckoning as an indoor positioning system," in *2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, IEEE, 2012, pp. 1–6.

[98] L. E. Dıez, A. Bahillo, J. Otegui, T. Otim, "Step length estimation methods based on inertial sensors: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 17, pp. 6908–6926, 2018.

[99] *Heading definition*, https://www.harita.gov.tr/e-3-terimler-sozlugu.html, Accessed: 2020-05-09.

[100] K. Gade, "The seven ways to find heading," *The Journal of Navigation*, vol. 69, no. 5, pp. 955–970, 2016.

[101] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.-M. Poggi, "Wavelet toolbox," *The MathWorks Inc., Natick, MA*, vol. 15, p. 21, 1996.

A
MATLAB PROGRAMI

Tanım:

Linkteki profilden erişilebilen MATLAB programı ile SLE yöntemlerinin istatistiksel analizi yapılabilmektedir.

URL:

https://github.com/NimetKrgz

(Erişim Tarihi: Tez basıldıktan sonra eklenecektir.)

B
KULLANILAN VERİ SETİ

Tanım:

Link; Qu Wang vd.'nin kendi çalışmalarında kullandıkları, bu tez kapsamında da yararlanılan veri setini içermektedir.

URL:

https://github.com/Archeries/StrideLengthEstimation/tree/
master/Benchmark-Dataset-for-Adaptive-Stride-Length-Estimation

(Erişim Tarihi: 10.06.2020)

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Karagöz N, Gülgen F (2021), Comparative analysis of pedestrian stride length estimation methods. Intercontinental Geoinformation Days (IGD), 74-77, Mersin, Turkey