

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELDE TAŞINABİLİR BİR GÖMÜLÜ SİSTEM ÜZERİNDE KAPALI ALAN
KONUM TAHMİN YÖNTEMLERİNİN GERÇEKLENMESİ VE
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan Vahit ALTINPINAR

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELDE TAŞINABİLİR BİR GÖMÜLÜ SİSTEM ÜZERİNDE KAPALI ALAN
KONUM TAHMİN YÖNTEMLERİNİN GERÇEKLENMESİ VE
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ozan Vahit ALTINPINAR
(518141014)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müştak Erhan YALÇIN

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518141014 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Ozan Vahit ALTINPINAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ELDE TAŞINABİLİR BİR GÖMÜLÜ SİSTEM ÜZERİNDE KAPALI ALAN KONUM TAHMİN YÖNTEMLERİNİN GERÇEKLENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Müştak Erhan YALÇIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Yaprak YALÇIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İlker ÜSTOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Kasım 2017
Savunma Tarihi: 15 Aralık 2017





Anneme ve babama,



ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitim hayatımın ilk aşaması olan yüksek lisansı tamamlarken öncelikle desteğini ve bilgisini hiç esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Müştak Erhan YALÇIN'a diğer yandan tezimdeki çizimlerde bana yardımcı olan kardeşim Oğuz Kağan ALTINPINAR'a ve her daim bana destek olan Ali ÖZKAHRAMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

ARALIK 2017

Ozan Vahit ALTINPINAR
(Elektrik-Elektronik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
2. MİKRO ELEKTRO MEKANİK SİSTEM (MEMS) ALGILAYICILAR	5
2.1 Dönü Ölçer	5
2.1.1 Dönü ölçerin dinamik yapısı.....	5
2.1.2 Dönü ölçerin çalışma prensibi	7
2.2 İvme Ölçer.....	7
2.2.1 İvme ölçerin dinamik yapısı	8
2.3 Manyetometre.....	10
2.3.1 Rezonans algılayıcılar.....	10
2.3.2 Fluxgate algılayıcılar	11
2.3.3 Hall algılayıcılar	12
2.4 Devrede Kullanılan IMU Algılayıcısı ve Özellikleri	13
3. MADGWICK ALGORİTMASI İLE YÖNELİM HESABI.....	17
3.1 Dördeyler.....	17
3.3.1 Temel dördey matematiği.....	17
3.3.2 Dördeylerle döndürme işlemi	19
3.2 Açısal Hız İle Yönelim Hesabı.....	19
3.3 İvme ve Manyetik Alan Verileri ile Yönelim Hesabı	20
3.4 Algılayıcı Verilerinin Birleştirilmesi	23
3.5 Benzetim Sonuçları	24
4. YÜRÜME HAREKETİ SONUCU OLUŞAN GÜRÜLTÜLERİN VE SAPMALARIN GİDERİLMESİ	29
4.1 Alçak Geçiren Filtre İle Gürültülerin Giderilmesi	29
4.2 Kalman Filtresi	32
4.2.1 Doğrusal Kalman Filtresinin incelenmesi	32
4.2.2 Doğrusal Kalman Filtresinin amaca uygun düzenlenmesi	33
4.2.2.1 Q kovaryans matrisinin hesaplanması.....	35
4.2.2.2 R kovaryans matrisinin hesaplanması	36
4.2 Kalman Filtresi Benzetim Sonuçları	37
4.3 Rota Açısının Koşullu Belirlenmesi.....	38
5. ADIM TESPİTİ VE UYARLAMALI ADIM UZUNLUĞU TAHMİNİ.....	41

5.1 Adım Tespiti.....	41
5.1.1 Gürültü analizi ve ham ivmenin filtrelmesi	44
5.1.2 Adım tespit algoritması.....	46
5.2 Uyarlamalı Adım Uzunluğu Tahmini	47
6. KAPALI ALANDA KONUM TAHMİNİ	53
7. TASARLANAN CİHAZ VE ÖZELLİKLERİ	57
7.1 Alıcı Birimi.....	58
7.2 Verici Birimi.....	58
7.3 Yazılım Algoritması	60
8. SONUÇ	61
KAYNAKLAR.....	63
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ	73



KISALTMALAR

ADC	: Analog-to-Digital Converter
AHRS	: Attitude and Heading Reference System
ARM	: Acorn RISC Machine
CMOS	: Coplementary Metal Oxide Semiconductor
DAC	: Digital-to-Analog Converter
FFT	: Fast Fourier Transform
FIR	: Finite Impulse Response
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPS	: Global Positioning System
IIR	: Infinite Impulse Response
IMU	: Inertial Measurement Unit
INS	: Inertial Navigation Systems
I²C	: Inter-Integrated Circuits
KOH	: Potassium Hydroxide
LCD	: Liquid Crystal Display
MEMS	: Micro-Electro-Mechanical Systems
NFC	: NAND Flash Controller
PDR	: Pedestrian Dead Reckoning
PLL	: Phase-Locked Loop
PNS	: Personal Navigation System
PWM	: Pulse Width Modulation
RF	: Radio Frequency
RAM	: Random Access Memory
SDIO	: Secure Digital Input Output
SNR	: Signal-to-Noise Ratio
SPI	: Serial Peripheral Interface
SRAM	: Static Random Access Memory
TMAH	: Tetra-Methyl Ammonium Hydroxide
TWI	: Two Wire Interface
UART	: Universal Asynchronous Receiver Transmitter



SEMBOLLER

m/s^2	: metre/saniye kare
m/s	: metre/saniye
$^{\circ}$	: derece
μm	: mikrometre
pT	: pikoTesla
nT	: nanoTesla
μT	: mikroTesla
mT	: miliTesla
T	:Tesla
rad/s	: radyan/saniye
GHz	: GigaHertz
MHz	: MegaHertz
kHz	: kiloHertz
G	: Gravity
$kBps$	: kiloBit per second
$MBps$	: MegaBit per second
$A_{0x} A_{0y} A_{0z}$	: Doğrusal ivme bileşenleri
$\omega_x \omega_y \omega_z$	: Açısal hız bileşenleri
$F_x F_y F_z$	: Kuvvet bileşenleri
m	: Nokta kütle
F_s	: Elastik kuvvet
k_x, k_y	: Yay sabiti bileşenleri
Q_y	: Kalite faktörü
$w_{nx} w_{ny}$	: Rezonans açısal hız bileşenleri
C_0	: Kapasite değeri
A_c	: Elektrotların alanı
d	: Elektrotlar arasındaki mesafe
ϵ	: Malzemenin dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boş uzayın dielektrik sabiti
F_L	: Lorentz kuvveti
B_x	: x eksenindeki manyetik akı yoğunluğu
I_y	: Uyarma akımı
L_y	: Metalik döngünün uzunluğu
N_c	: Sarım sayısı
A_r	: Ferromanyetik çekirdeğin kesit alanı
μ_0	: Boş uzayın manyetik alan geçirgenliği
$\mu_r(t)$	: Ferromanyetik çekirdeğin göreceli manyetik alan geçirgenliği
$H_x(t)$	: x eksenindeki manyetik alan
V_{OFF}	: Off-set gerilimi
V_H	: Hall gerilimi

$\mathbf{q}$	: Dört boyutlu dördey vektörü
$\mathbf{q}_1 \mathbf{q}_2 \mathbf{q}_3 \mathbf{q}_4$	: Dördey bileşenleri
$\mathbb{H}$	: Hilbert uzayı
$\mathbb{R}$	: Reel sayılar kümesi
$\hat{\mathbf{u}}$	: Euler ekseni birim vektörü
$\mathbf{q}_{\omega,t}$	: Açısal hız ile hesaplanan dördey vektörü
$\mathbf{q}_{est,t}$	: Tahmini dördey vektörü
f	: Minimum değer fonksiyonu
$\mathbf{g}$	: Yerçekimi vektörü
$\mathbf{a}_n$	: Normalize ivme vektörü
$\mathbf{a}$	: Ham ivme vektörü
μ_t	: t anındaki adım aralığı
$\mathbf{q}_{\nabla,t}$	: İvme ve manyetik alan değerleri ile hesaplanan dördey vektörü
$\tilde{\omega}_{\beta x} \tilde{\omega}_{\beta y} \tilde{\omega}_{\beta z}$	: Dönü ölçerin maksimum ölçüm hata bileşenleri
β	: Dönü ölçer ölçüm hatası
ϕ	: Rota açısı
θ	: Yunuslama açısı
ψ	: Yuvarlanma açısı
$\mathbf{x}_k$	: Durum-uzay vektörü
$\mathbf{A}$	: Durum geçiş matrisi
$\mathbf{B}$	: Kontrol işareti ile durum vektörü arasındaki ilişkiyi belirleyen matris
$\mathbf{u}_k$	: Kontrol işareti
$\mathbf{w}_k$	: İşlem gürültüsü
$\mathbf{z}_k$	: Ölçüm vektörü
$\mathbf{H}$	: Ölçüm vektörü ile durum vektörü arasındaki ilişkiyi belirleyen matris
$\mathbf{v}_k$	: Ölçüm gürültüsü
$\mathbf{Q}$	: İşlem gürültüsü kovaryans matrisi
$\mathbf{R}$	: Ölçüm gürültüsü kovaryans matrisi
$\mathbf{P}_{k,k}$	: Soncul hata kovaryans matrisi
$\mathbf{K}_k$	: Kalman kazancı
$\mathbf{e}_{k,k}$	: Soncul hata durum vektörü
$\boldsymbol{\eta}_k$	: Hesaplanan yeni ölçüm gürültüsü
a_{3D}	: Ham ivme normu
$\mathbf{L}$	: Adım uzunluğu
$\mathbf{k}$	: Adım uzunluğu sabiti
$\mathbf{A}_{max}$	: Dikey eksenindeki maksimum ivme değeri
$\mathbf{A}_{min}$	: Dikey eksenindeki minimum ivme değeri
f_s	: Adım frekansı
$a_{rX} a_{rY} a_{rZ}$	: Dünya referans sistemindeki ivme bileşenleri
$\bar{v}_{step}$	: Ortalama adım hızı
$\mathbf{K}_{vel}$	: Uyarlamalı adım uzunluğu sabit

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 :Euler açılarının ölçüm sonuçları.....	28
Çizelge 4.1 :Üç farklı algoritma için standart sapma sonuçları.....	40
Çizelge 5.1 : Adım tespit sonuçları.	47
Çizelge 5.2 : 20 metrelik düz bir yolda elde edilen deney sonuçları.....	51
Çizelge 5.3 : 40 metrelik düz bir yolda elde edilen deney sonuçları.....	51
Çizelge 5.4 : Adım tespit ve toplam adım uzunluğu tahmin hataları	52
Çizelge 6.1 : Konum tahmin deneyinin sonuçları.....	56
Çizelge 7.1 :ATmega328 işlemcisinin özellikleri	58
Çizelge 7.2 :SAM3X8E ARM Cortex-M3 işlemcisinin özellikleri.....	60



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 :	Tasarlanan sistemin birimlerinin gösterimi.....	2
Şekil 1.2 :	Tasarlanan cihazda koşturulan algoritmaların tezdeki bölümlere göre akış diyagramı.....	2
Şekil 2.1 :	X-Y düzleminde asılı model kütleyi m içeren, tek bir z eksenine sahip dönü ölçerin teorik modeli	6
Şekil 2.2 :	İvmeölçer modeli.....	9
Şekil 2.3 :	Sıkıştırılmış metal levha üzerindeki Lorentz kuvvet prensibinin şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.4 :	Fluxgate algılayıcısının çalışma prensibinin en basit şekli.....	12
Şekil 2.5 :	Hall etkisi prensibinin en basit gösterimi.....	13
Şekil 2.6 :	BNO055 algılayıcısı.....	14
Şekil 2.7 :	I ² C bağlantı şeması.....	15
Şekil 2.8 :	UART bağlantı şeması	15
Şekil 3.1 :	3-eksen açısal hız verileri.....	25
Şekil 3.2 :	3-eksen ivme verileri.....	25
Şekil 3.3 :	3-eksen manyetik alan verileri.. ..	26
Şekil 3.4 :	Euler açılarının (°) zamanla değişimi.....	27
Şekil 3.5 :	Normalize dördey değerleri.....	27
Şekil 3.6 :	Algılayıcıdan alınan 3-eksen ham verilerin zamanla değişimi.	28
Şekil 4.1 :	Madgwick Algoritması ile hesaplanan rota açısının dikdörtgen yol boyunca değişimi. (Yeşil hatlar sırasıyla 0°, 90°, 180° ve 270°'dir.)....	30
Şekil 4.2 :	0°'de rota açısının frekans ile değişimi.	30
Şekil 4.3 :	Filtrelenmiş rota açısı değişimi. (kesim frekansı = 0.1 Hz).....	31
Şekil 4.4 :	Filtrelenmiş rota açısı değişimi. (kesim frekansı = 0.2 Hz).	31
Şekil 4.5 :	Konum sapmasının σ_f^2 varyans değerlerine göre değişimi	36
Şekil 4.6 :	Kalman Filtresi ile filtrelenmiş rota açısının değişimi.....	37
Şekil 4.7 :	Gaussian gürültülü rota açısının Kalman Filtresi ile filtrelenmesi.....	38
Şekil 4.8 :	Gaussian gürültülü dördeylerin Kalman Filtresi ile filtrelenmesi	38
Şekil 4.9 :	0°'de yürüme esnasında rota açısındaki değişim.	39
Şekil 4.10 :	Dört farklı yöntemle hesaplanan rota açısının değişimi.....	40
Şekil 5.1 :	Ham ivme normu.....	43
Şekil 5.2 :	Yerçekiminden arındırılmış ham ivme normu.. ..	43
Şekil 5.3 :	Ham ivme normunun frekans ile değişimi.	44
Şekil 5.4 :	Ham ivme normunun Butterworth ve hareketli ortalama filtrelerden geçirilip karşılaştırılması.	45
Şekil 5.5 :	Filtrelenmiş ivme normunun frekans ile değişimi.....	45
Şekil 5.6 :	Adım tespiti.....	46
Şekil 5.7 :	Adım tespiti akış diyagramı.. ..	47
Şekil 5.8 :	3-eksende hesaplanan hızların zamanla değişimi.....	50

Şekil 5.9 : Bir yayanın yürüme hareketi.	51
Şekil 6.1 : Kapalı alanda konum tahmininin akış diyagramı.	53
Şekil 6.2 : Dikdörtgen deney parkuru (20 m x 15 m).	54
Şekil 6.3 : Labirent veya koridor tarzı deney parkuru.	55
Şekil 6.4 : 45° ve 90° zik zak deney parkuru.	55
Şekil 7.1 : Kapal alanda konum tahmin sistemi... ..	58
Şekil 7.2 : Konum tahmin cihazının çevre birimi.	59
Şekil 7.3 : Tasarlanan cihazın çalışma mantığı... ..	60



ELDE TAŞINABİLİR BİR GÖMÜLÜ SİSTEM ÜZERİNDE KAPALI ALAN KONUM TAHMİN YÖNTEMLERİNİN GERÇEKLENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Günümüzde küresel konum belirleme sistemleri (GNSS) kişi veya araçların konumunu çok yüksek doğrulukta tahmin edebilmektedir. Ancak bazı çevre koşullarının yarattığı problemlerden dolayı uydu sinyallerinin tam alınamaması veya tamamen kesilmesi gibi durumlarla karşılaşmaktadır. Karşılaşılan bu problemleri çözmek için son zamanlarda kişisel navigasyon sistemleri (PNS) üzerine çalışmalar artmıştır. Kişisel navigasyon sistemleri, uzun mesafelerde konum hatalarının birikimli olarak artmasından dolayı GNSS gibi çok yüksek doğrulukta konum tahmini yapamadığı için ancak bu tür sistemler tamamlayıcı sistem olarak kullanılabilir.

Kişisel konum tahmin araçları, dünyanın coğrafi özelliklerine ve koordinat sistemine bağlı kalmadan kendi üzerindeki algılayıcı biriminden topladığı veriler ile konum tahmini yapmaktadır. Bu algılayıcılar atalet ölçüm birimi (IMU) adı altında toplanmıştır ve genelde 3-eksen ivme ölçer, 3-eksen dönü ölçer ve 3-eksen manyetometreden oluşmaktadır. Mikro-elektro-mekanik-sistem (MEMS) teknolojisinin gelişmesiyle birlikte bu algılayıcılar mikrometre boyutlarına kadar küçültülmüş ve elektronik devreler ile entegrasyonu kolaylaşmıştır. Boyutlarının bu kadar küçük olmasıyla güç tüketimleri çok asgari düzeye çekilmiş ve maliyeti de azalmıştır. Bu çok önemli avantajların yanında birtakım dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi algılayıcının küçülmesiyle beraber ölçüm hatalarının ve elektriksel gürültülerinin de artmasıdır.

Bu çalışmada hem günlük yaşamda kullanılması kolay hem de algılayıcıların hatalı ölçümlerini ve elektriksel gürültülerini giderecek ve mümkün olduğunca doğru konum tahmini yapacak bir cihaz tasarlanması amaçlanmıştır. Bununla ilgili araştırmalar incelendiğinde vücudun farklı bölgelerine konumlandırılmış kişisel konum tahmin cihazlarının yapıldığı görülmüştür. Bunlar içinde en uygun olanlarından biri de elde taşınabilir cihazlardır. Bu çalışmada elde taşınabilen bir cihaz yapılmış ve karşılaşılan sorunları çözmek için çeşitli algoritmalar önerilmiştir.

Öncelikle yönelim tahmini için Madgwick Algoritması kullanılmış ve bu algoritmayla hesaplanan yönelim sonuçları verilmiştir. Diğer bölümde, yürüme esnasında yönelim açısı üzerinde mekanik ve elektriksel gürültülerin Kalman ve Butterworth filtresiyle giderilmeye çalışılması anlatılmış, gene yürüme esnasında el sapmalarından dolayı meydana gelen hataları gidermek için de bir algoritma önerilmiştir. Son olarak adım tespiti için literatürde kullanılan iki filtre karşılaştırılmış ve bunlardan en iyisi seçilmiş, adım uzunluğu tahmini içinse farklı adım hızlarında bile güzel tahminler yapabilen uyarlamalı adım uzunluğu tahmin algoritması kullanılmıştır. Tüm bu algoritmalar birleştirilerek konum tahmini yapılmıştır.

Konum tahmini için üç farklı deney parkurunda üç farklı algoritma denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Önce sadece Madgwick Algoritması kullanılmış, sonra Madgwick +Koşullu Yönelim Algoritması kullanılmış son olarak da Madgwick+Kalman+Koşullu Yönelim Algoritması kullanılmıştır. En iyi yöntemin Madgwick+Kalman+Koşullu Yönelim algoritması olduğu görülmüş ve tasarlanan cihazda bu algoritma kullanılmıştır.

Üç farklı parkurda kullanılan bu algoritmanın performansı ise dikdörtgen parkurda %1.94 mesafe hatası ve % 0.364 konum sapması, labirent parkurda % 0.42 mesafe hatası ve % 0.34 konum sapması ve son olarak 45°'lik zik zak parkurda % 0.331 mesafe hatası ile % 2.017 konum sapması şeklinde gözlemlenmiştir.



IMPLEMENTATION AND COMPARISON OF INDOOR LOCATION ESTIMATION METHODS ON A HANDHELD EMBEDDED SYSTEM

SUMMARY

Nowadays, Global Navigation Satellite Systems, which is called GNSS, has estimated the location of the person or vehicle with high accuracy. However, not exactly receiving of satellite signals or interruption of them has been observed due to some disturbances. The studies about Personal Navigation Systems, which is called PNS, has recently been increasing to overcome these problems. Since the error of positioning increases cumulatively, PNS can not make accurately dead reckoning whereas GNSS can do. Therefore, PNS can be used as complementary system.

PNS devices can perform the estimation of the position of an object via detecting unit gathering data without depending on geographical features and coordinate system of the world. This detecting unit is an electronic device and called Inertial Measurement Unit (IMU) consisting of three axis accelerometer, three axis gyroscope and three axis magnetometer. The integration of the electronic devices whose the sizes are reduced in micrometer into detecting device has been facilitated thanks to development of the technology of the micro electro mechanical sensor, which is called MEMS. Power consumption and cost of them decreases due to very small size of detecting unit. However, there are some disadvantages. Measurement errors and electrical noise due to small size are the most disadvantages.

In this study, a device that can perform the position of an object as accurate as possible, overcome measurement errors and electrical noise of them, be easy to use in daily life and was designed. Different types of personal position estimating devices that can be placed on different location of human body are observed when researching recent studies about it. The most suitable and useful device among them is the one that can be handheld. Therefore, handheld devices are produced and various algorithms are used to solve the issues.

Firstly, estimation of orientation was performed. There are Extended Kalman Filter, Linear Kalman Filter, Particle Filter and Madgwick Algorithm among algorithms estimating orientation in literature. In this study, it is proved that Madgwick Algorithm is better than Kalman Filters and Madgwick Algorithm was used. The estimation of orientation was performed by using quaternion after collecting data from 3 axis gyroscope, accelerometer and magnetometer. Secondly, it was explained how to mechanical and electrical noises on orientation angle during walking can be eliminated by using Kalman and Butterworth Filter. In this section, Kalman Filter and Butterworth filter were compared and it was showed that Kalman Filter was better than Butterworth filter because Kalman Filter could both estimate the next state vector and filter the noises with noise variance. In addition to this section, an algorithm was proposed to prevent the error due to the hand deviation during walking.

This algorithm is thought for labyrinth or corridor tracks. It is aimed that if the deviation angle is less than 5° , it will be round off the closest predefined eight special angles which are 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° and 315° . Finally, step detection and step length estimation algorithms were implemented. Several methods were proposed for step detection and an algorithm which detects the step by determining the maximum, minimum and zero points of 3 axis acceleration norm was used. Two filters from literature, used for filtering the noises loaded on acceleration norm, were compared and best one was chosen. These filters are eight-step moving average filter and fourth-order low pass Butterworth filter with 2.5 Hz cut-off frequency.

The next section is step length estimation after step detection. The most widely used method for step length estimation is the method proposed by Weinberg. In this method, since the step length coefficient is constant, it gives wrong results when walking in different step speeds. Adaptive step length estimation algorithms are studied in order to estimate step lengths at high accuracy in different step speeds and step lengths. Ho et al. also proposed a method of adaptively calculating the step length coefficient for handheld devices. In our work, this method was used to estimate the step length.

A system was designed to implement the indoor location algorithms which were used in our work. This system consists of two units. The first one is the receiver unit and the other is the transmitter unit. The receiver unit provides the location mapping by sending the data to the laptop. This unit consists of an Arduino Uno card and a NRF24L01 2.4 GHz transceiver. The data received by the receiving unit is sent to the laptop with serial communication at 115200 kb/s baud rate. The transmitting unit is the handheld device itself. This device sends the positioning data to the receiver after performing position estimation using the raw acceleration, angular velocity and magnetic field data from the intelligent IMU sensor. An intelligent LCD to display information, an intelligent IMU sensor, a NRF24L01 2.4 GHz transceiver, and an Arduino Due card are on the transmitter unit. These raw datas from IMU sensor were processed with indoor location algorithms, the results are displayed on the LCD and they are sent to the receiver unit by Arduino Due, which has 32 bit Arm Cortex-M3 processor.

After the system was designed, three different algorithms were tested at three different test fields and results were compared. Firstly, Madgwick Algorithm was used. Secondly, Madgwick+Conditional Orientation Algorithm was used. Lastly, Madgwick+Kalman+Conditional Orientation Algorithm was used. It was observed that best method is the algorithm combined with Madgwick, Kalman and Conditional Orientation algorithms.

The performances of the algorithm combined with Madgwick, Kalman and Conditional Orientation algorithms used in three different test filed are %1.94 of distance error and % 0.364 of position deviation in rectangular test field, % 0.42 of distance error and % 0.34 of position deviation in labyrinthian test filed, % 0.331 distance error and % 2.017 position deviation in 45° inclined zig-zag test field.

Recommendations that can be given from this work are that the preferred handheld position estimation devices due to the ease of use are more suitable if not used at the trajectories whose rotation angle is continuously changing. These trajectories cause the error accumulation.

In addition, since the Kalman Filter runs slowly on the designed system, it must be designed specifically for applications where the orientation estimation needs to be calculated very quickly. Lastly, The hand should be released so that the handheld device can accelerate freely.



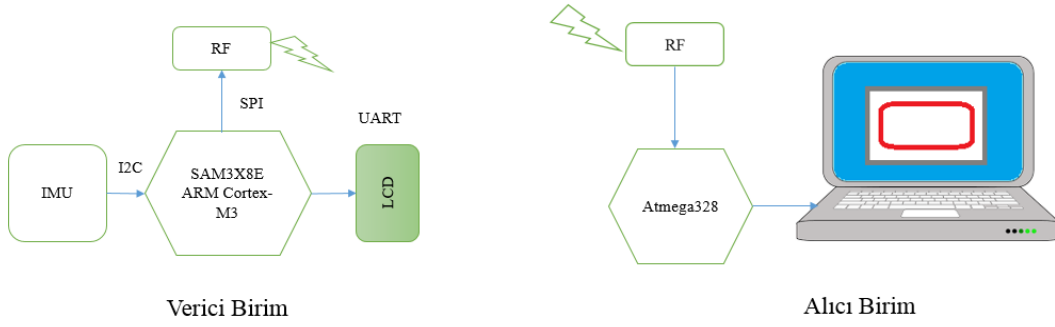


1. GİRİŞ

Kişisel navigasyon sistemleri (PNS) yayaların konumlarını yüksek doğrulukta tespit eden araçlardır. Bunlardan GPS, yayaların ve araçların konumlarını tespit etmede en yaygın olarak kullanılanıdır [1]. Ancak çevre koşullarının değişmesi, yeterince haberleşmeyi sağlayacak istasyonların olmaması veya maden, tünel [1] gibi kapalı alanlarda uydu sinyallerinin bozulması veya tamamen kesilmesi gibi durumlarda küresel konum belirleme sistemlerine (GNSS) yardımcı veya bunları tamamlayıcı sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemler yayalarda konum tahmin sistemleri (PDR) gibi sistemlerdir ve dünyanın herhangi bir koordinat sistemine bağlı kalmadan kendi birimleri sayesinde etraftan topladıkları veriler ile konum tahmini yaparlar [2]. Bu birimler ise atalet ölçüm birimi (IMU) algılayıcılarıdır.

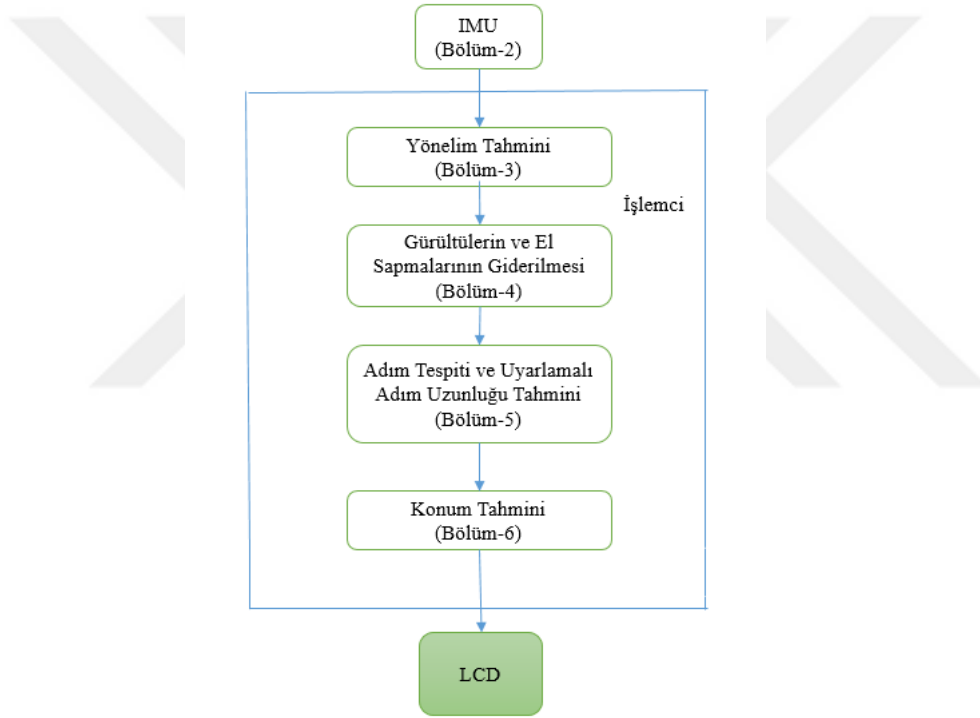
IMU algılayıcı paketi genelde 3-eksen ivme ölçer, 3-eksen dönü ölçer ve 3-eksen manyetometreden oluşmaktadır. Bazı durumlarda basınç ve sıcaklık algılayıcıları da buna dahil edilmektedir [3]. Gelişen teknoloji ile birlikte bu algılayıcıların boyutları muazzam derecede küçülmüş, güç tüketimleri çok asgari düzeye çekilmiş ve maliyeti de azalmıştır. Bu çok önemli avantajların yanında birtakım dezavantajlar da oluşmaktadır. Bunlardan en önemlileri algılayıcının küçülmesiyle beraber ölçüm hatalarının ve gürültülerinin de artmasıdır. IMU algılayıcılarından gürültülü ve hatalı ham verileri toplayan ve yüksek doğrulukta yönelim tahmini yapan yönelim algoritmaları bulunmaktadır [4,5,6]. Bu algoritmalar seçilirken tahmin doğruluğunun, işlem gücünün ve hızının yüksek olması gibi parametreler göz önünde bulundurularak seçilir.

Bu çalışmada elde taşınabilir bir konum tahmin cihazı tasarlanmış ve bu cihazda kullanılan algoritmalar açıklanmıştır. Öncelikle yönelim tahmini algoritmasına değinilmiş arkasından yürüme hareketi sonucu oluşan gürültülerin ve el sapmasından kaynaklanan hataların nasıl giderildiği farklı algoritmalarla karşılaştırılarak anlatılmıştır. Son olarak da adım tespiti ve adım uzunluğu tahmin algoritmalarına değinilmiştir. Tasarlanan sistemin birimleri Şekil 1.1'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Tasarlanan sistemin birimlerinin gösterimi.

Cihazda kullanılan algoritmaların tezde işleniş sırasına göre akış diyagramı da Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: Tasarlanan cihazda koşutulan algoritmaların tezdeki bölümlere göre akış diyagramı

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, kapalı alanda konum tahmini için gerekli olan çalışmaları araştırmak, bu çalışmalarda doğruluk oranı ve işlem gücü yüksek algoritmaları tespit etmek ve bunlar üzerine araştırma yapmak, yayalar için konum tahmin cihazlarını vücut üzerinde konumlandırıldıkları yere göre incelemek, kullanım kolaylığına göre içlerinden birini seçip çalışmaları onun üzerinden yapmak ve çalışma esnasında

karşılaşılan sorunları tespit edip bunları çözmektir. Bu sorunları çözmeden önce karşılaşılan problemleri konusuna göre kategorize etmeli o konuya ait algoritmalar üzerinde durulmalıdır. Örneğin; sorun yönelim açıları üzerine binen gürültüler ve sapmalar ise bunun konusu yönelim algoritmaları ve filtrelerdir.

GPS gibi uyduya ve Dünya koordinat sistemlerine bağlı kalmadan kapalı alanda konum tahmini yapan cihazlarının en önemli elemanı olan IMU algılayıcıların amaca uygun seçilmesi de bu tezin başlıca amaçlarından biridir. Eğer cihazda ucuz bir algılayıcıdan yüksek performans alan algoritmalar kullanmışsanız çalışmalarınız o kadar amacına ulaşmış olur. Bu çalışmada ise akıllı IMU algılayıcısı kullanılmıştır. Çünkü bu algılayıcıdan ham verileri çekebildiğiniz gibi içerisinde bulunan işlemci ile BOSCH firması tarafından tasarlanan algoritmalarla mutlak yönelim hesabı da yapabilmektedir. Algılayıcı tarafından hesaplanan mutlak yönelim ile tezde kullanılan algoritmalar sayesinde ham verilerden hesaplanan yönelimin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yani burada algılayıcının hesapladığı yönelim referans olarak kullanılmıştır. Bunlara ilaveten cihazda kullanılan malzemelerin maliyeti, boyutlarının elde tutulmaya uygun olması ve üzerindeki işlemci hızının ve kapasitesinin bu algoritmaları kaldırabilecek şekilde seçilmesi de bu tezin amaçları arasındadır.



2. MİKRO ELEKTRO MEKANİK SİSTEM (MEMS) ALGILAYICILAR

Mikro-elektro-mekanik sistem algılayıcılar, genelde kalınlığı 1 ile 100 mikrometre arasında değişen bileşenlerden meydana gelmektedir. Bu algılayıcılar verileri işleyen bir merkezi birim ve fiziksel dünyayla iletişim halinde olan birkaç bileşenden meydana gelmektedir. Bu kadar küçük ölçeklerde, klasik fiziğin temel yapıları her zaman uygulanamamaktadır. MEMS algılayıcıların hacmine oranla geniş yüzey alanları elektrostatik gibi yüzeysel etkiler ile atalet ve termal kütle gibi hacimsel etkiler yapabilir. Bu gibi etkiler önemli derecede istenmeyen kazançların oluşmasına neden olabilmekte ve sonucunda algılayıcı hassasiyetini etkilemektedir.

MEMS teknolojisi ilk olarak 60'lı yılların sonlarına doğru geliştirilmiştir. Fabrikasyon teknolojisi olgunlaşmaya başlamasıyla beraber önemli ölçüde yayılmıştır. Yaygın olarak kullanılan fabrikasyon teknolojileri; kaplama, ıslak dağlama (KOH, TMAH) ve kuru dağlama gibi teknikleri içermektedir [7]. Bu çalışmada ise MEMS teknolojisiyle üretilen dönü ölçer (gyroscope), ivme ölçer (accelometer) ve manyetometre (magnetometer) üzerinde durulacaktır. Bu algılayıcıların bir arada senkronize bir şekilde kullanıldığı birime ise atalet ölçüm birimi (IMU) denir. IMU'lar, Dünya'nın manyetik referansına göre ölçüm yapılmasına olanak sağlar [7].

2.1 Dönü Ölçer

Dönü ölçerler, bir atalet referansına göre bir nesnenin açısal hareketini algılayan ve ölçen fiziksel algılayıcılardır. Tüm dönü ölçerler açısal hız ve yönelim ölçümüne göre iki ana kategoriye ayrılabilir. Oran dönü ölçerleri, bir nesnenin dönme oranını veya açısal hızını ölçer. Açı dönü ölçerleri ise bir nesnenin yönelimini veya açısal pozisyonunu ölçer. Aslında tüm mevcut MEMS dönü ölçerler bir nesnenin hareketinin algılanmasında ve yöneliminin izlenmesinde kullanılır. Doğru INS ve AHRS uygulamalarının en temel elemanlarından biridir [8].

2.1.1 Dönü ölçerin dinamik yapısı

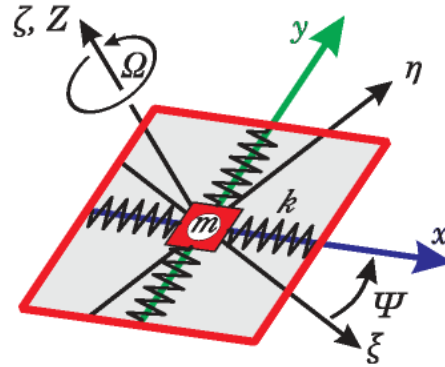
Dönü ölçerlerin çalışma prensipleri klasik mekaniğin temel kanunlarından türetilir. Birkaç eksenle dönmenin eş zamanlı algılanabilmesi için çok modlu algılayıcılar

içeren bir mimarinin olması gerekir. $S\zeta\eta\zeta$, bir atıl referans sistemini ve $Oxyz$ ise $A_0=(A_{0x} A_{0y} A_{0z})$ doğrusal ivmesi ve $\omega=(\omega_x \omega_y \omega_z)$ açısal hızıyla hareket eden atıl olmayan bir referans sistemini belirtsin. Bir nokta kütlenin atıl ve atıl olmayan referanslardaki vektörleri de sırasıyla $\rho = (\zeta, \eta, \zeta)$, $r = (x, y, z)$ şeklinde verilsin. Eşitlik 2.1'deki A_S ise atıl referans sistemindeki doğrusal ivmedir. Bir nokta kütlenin m , atıl referans sistemine göre $F=(F_x F_y F_z)$ kuvveti altındaki hareketinin Newton Yasası'ndaki ifadesi Eşitlik 2.1'deki gibidir [8].

$$\ddot{\rho} = A_S = F/m \quad (2.1)$$

$$\ddot{r} = A_{rel} = F/m - 2[\omega \dot{r}] - (A_0 + [\omega[\omega r]] + [\dot{\omega} r]) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2'de diferansiyel vektör eşitliği bize Coriolis titreşim dönü ölçeri için matematiksel bir ifade sunar. Açısal hızın ve $r = (x, y, z)$ koordinat sisteminin vektörel çarpımı olan Coriolis, (x, y, z) atıl olmayan eksenleri arasında enerji birleşimi ve değişimini yönetir. Bu etki, $Oxyz$ atıl olmayan koordinat sistemine göre model kütle m üzerindeki titreşimi gözlemleyerek açısal hızın, ω , ölçülmesini sağlar. Tek bir z eksenli Coriolis dönü ölçerin teorik modeli Şekil 2.1'de gösterildiği gibidir. Coriolis kuvvetine duyarlı model kütlenin, atıl olmayan $Oxyz$ referans sistemindeki hareket tarafından meydana gelen atıl kuvvetler ve askılardaki elastik kuvvetlerin etkisi altında, Oxy düzlemindeki hareketi sınırlanır.



Şekil 2.1: X-Y düzleminde asılı model kütleyi miçeren, tek bir z eksenine sahip dönü ölçerin teorik modeli [8].

Basitçe model kütlenin yaylar ile asılı olması elastik kuvvetleri $F_s = (k_x x, k_y y)$ oluşturur. Ayrıca orijindeki ivmelenme, yer çekimi ivmesinin Oxy düzlemi üzerindeki iz düşümü ve düzlem dışı Oz eksenindeki dinamik etkiler ihmal edilebilir. Eşitlik 2.2, açısal hız bileşenlerine göre lineerleştirildikten sonra Eşitlik 2.3 ve 2.4'teki gibi ifade edilebilir [8].

$$\ddot{x} + xw_{nx}^2 - y\dot{\omega}_z - 2\omega_z\dot{y} = F_x \quad (2.3)$$

$$\ddot{y} + yw_{ny}^2 + x\dot{\omega}_z + 2\omega_z\dot{x} = F_y \quad (2.4)$$

$w_n = (w_{nx}, w_{ny})$: x ve y eksenlerindeki doğal veya rezonans açısal hız değerleri (ω açısal hız değerinden farklı) ,

$k = (k_x, k_y)$: x ve y eksenlerindeki yay sabitleri.

2.1.2 Dönü ölçerin çalışma prensibi

Mikrometre mertebesinde üretilen dönü ölçerler, çalışma modu ve algılama modundaki rezonans frekansları arasında göreceli uyuma veya uyumsuzluğa bağlı olarak genelde iki sınıfa ayrılır. Çalışma frekansı, algılama modundaki rezonans frekansının bant genişliğinin tepe değerinde olduğunda, dönü ölçerin mekanik hassasiyeti algılama modundaki kalite faktörü Q_y için oransal olarak maksimize edilir. Ancak, bu metod hassasiyet ve sinyal gürültüsü (SNR) açısından bir avantaj olurken algılayıcının çalışma frekansının bant genişliğinin azalması açısından da bir dezavantajdır. Kapalı çevrim çalışma modu ve açık çevrim algılama moduyla denklemler Eşitlik 2.4 ve 2.5'teki gibi basitleştirilebilir.

$$x = \sin(w_{nx}t) \quad (2.4)$$

$$\ddot{y} + y(w_{ny}/Q_y) + yw_{ny}^2 = -2\omega_z\dot{x} \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5'te Q_y , algılama modundaki kalite faktörü olup açısal hızın, ω_z , çok yavaş değiştiği durumlarda $-2\omega_z\dot{x}$ terimi ihmal edilebilir.

2.2 İvme Ölçer

İvme ölçer, ivme kuvvetlerini ölçen mikro-elektro-mekanik yapıdaki bir cihazdır. Bu kuvvetler yer çekimi kuvveti gibi durağan ve ivme ölçerin hareketi ile titreşiminden kaynaklı dinamik yapıda olabilir. Literatürde ivme ölçerin pek çok çeşidi bulunmaktadır. Bunun büyük bir bölümü piezoelektrik kristallerine dayanmaktadır.

Fakat bunların çoğu büyük boyutlu ve yavaş çalışmaktadır. Araştırmacılar kullanım kolaylığı, yüksek kalite ve hızlı çalışma performansı için boyutları küçültmeyi denemişler ve mikrometre mertebesindeki MEMS ivme ölçerleri geliştirmeyi başarmışlardır. İlk MEMS ivme ölçerler 1979 yılında Stanford Üniversitesi tarafından tasarlanmıştır; fakat bunun uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılması 15 yılın üzerinde bir zaman almıştır.

Günümüzde düşük güç tüketimi ve yüksek hassasiyetle çalışabilen yüksek teknolojiye ivme ölçerler üretilmektedir [9].

2.2.1 İvme ölçerin dinamik yapısı

İvme ölçer yapımında birkaç yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan biri de kapasitif yapıda olanıdır. Çalışması, kapasitedeki değişimlerin algılanması prensibine dayanmaktadır. Kapasite elemanları hem algılayıcı hem de aktüatör olarak çalışabilir. Kapasite elemanı kullanılmasıdaki nedenler; hem ölçüm hassasiyetinin çok fazla olabilmesi hem de sıcaklıktan fazla etkilenmemesidir. Kapasitif hassasiyet, ana malzemeden bağımsız olarak, kapasite elemanı geometrisinin değişimi ile meydana gelen kapasitans değişimine bağlıdır [9]. En basit haliyle kapasite elemanı, karşılıklı iki paralel metal levha ve bunların arasına konmuş bir dielektrik malzemeden oluşur. Kapasite elemanı içindeki dielektrik sadece hava ise kapasitif hassasiyet esasen sıcaklıktan bağımsızdır. Bu bilgiler ışığında paralel levha kapasite elemanının kapasitesinin nelere bağlı olduğu Eşitlik 2.6'da daha iyi anlaşılmaktadır. İvme ölçer ile ilgili eşitliklerin tamamı [9] nolu referanstan alınmıştır.

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon \frac{A_c}{d} \quad (2.6)$$

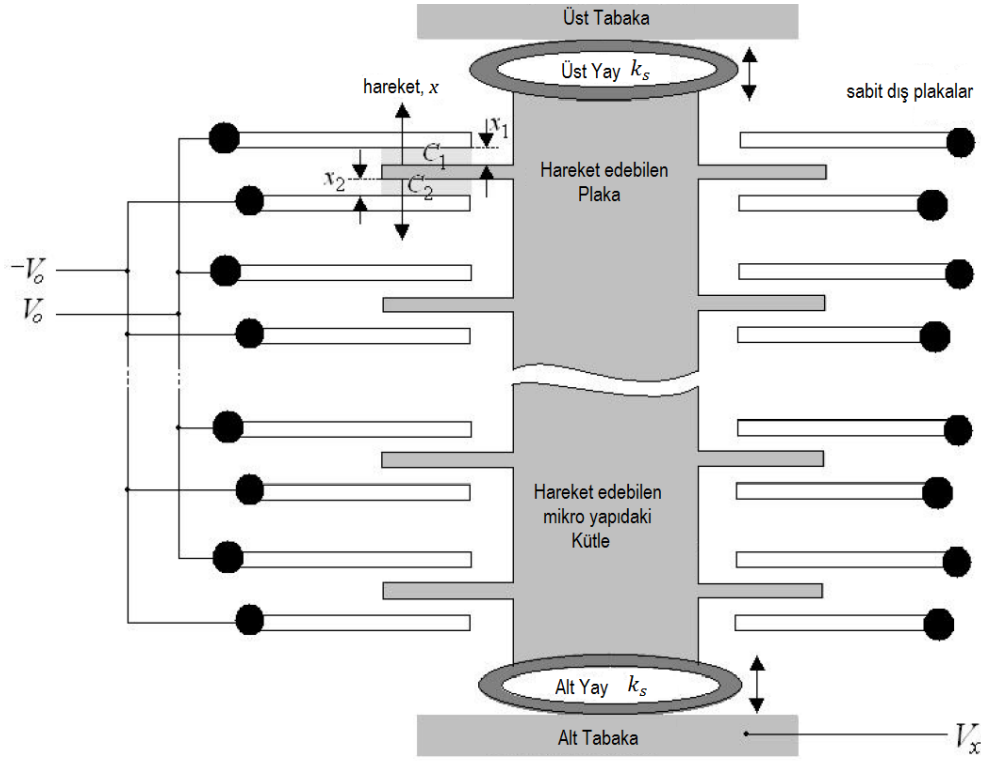
A_c : Elektrotların alanı,

d : Elektrotlar arasındaki mesafe,

ϵ : Malzemenin dielektrik sabiti,

ϵ_0 : Boş uzayın dielektrik sabiti [9].

Genel olarak MEMS ivme ölçerler, mekanik süspansiyon sistem aracılığı ile referans sistemine yerleştirilmiş plakalar ve hareketli model kütleden oluşmaktadır. Şekil 2.2' de hareketli ve sabit levhalar, kapasite elemanlarını temsil etmektedir.



Şekil 2.2: İvme ölçer modeli (k_s :yay sabiti) [9].

Hareketli ve sabit plakalar arasındaki C_1 ve C_2 kapasite elemanları, kütlenin yukarı ve aşağı hareketi sonucu meydana gelen mesafe değişimlerinin fonksiyonudur. Bu kapasitans değerleri ile mesafe değişimleri arasındaki ilişki Eşitlik 2.7 ve 2.8'deki gibidir.

$$C_1 = \epsilon_A \frac{l}{x_1} = \epsilon_A \frac{l}{d+x} = C_0 - \Delta C \quad (2.7)$$

$$C_2 = \epsilon_A \frac{l}{x_2} = \epsilon_A \frac{l}{d-x} = C_0 + \Delta C \quad (2.8)$$

$$\epsilon_A = \epsilon_0 \epsilon_c \quad (2.9)$$

ΔC : Kapasitelerdeki değişim miktarı.

Eğer ivmelenme sıfır ise C_1 ve C_2 kapasite değerleri eşittir; çünkü x_1 ve x_2 değerleri birbirine eşittir. Eğer model kütlenin hareketinden dolayı x_1 ve x_2 mesafeleri birbirinden farklı değerlerde ise kapasite değerleri arasındaki fark Eşitlik 2.10'daki gibi bulunabilir.

$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = 2\epsilon_A \frac{x}{d^2 - x^2} \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.10'daki değerlerin çarpaz çarpımı sonucu Eşitlik 2.11 elde edilir.

$$\Delta C x^2 + \epsilon_A x - \Delta C d^2 = 0 \quad (2.11)$$

ΔC değerinin ölçülmesiyle Eşitlik 2.11'deki x değeri bulunabilir. Ayrıca çok küçük mesafe değişimlerinde ΔCx^2 ifadesi ihmal edilebilir. Böylece x değerin yaklaşık olarak değeri Eşitlik 2'deki gibi verilebilir.

$$x \approx \frac{d^2}{\epsilon_A} \Delta C = d \frac{\Delta C}{C_0} \quad (2.12)$$

İdeal yay için Hook Yasası'na göre yayın gerilmesi sonucu oluşan kuvvet F_s , mesafe değişimine x bağlıdır. Kuvvet ile mesafe değişimi arasındaki ilişki Eşitlik 2.13'teki gibidir.

$$F_s = k_s x \quad (2.13)$$

Newton'un ikinci yasasına göre ivme ile kuvvet arasındaki ilişki Eşitlik 2.14'teki gibidir.

$$ma = m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_s = k_s x \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.14'teki ivme yalnız bırakılıp x yerine de Eşitlik 2.12'deki değer konursa Eşitlik 2.15 elde edilir.

$$a = \frac{k_s}{m} x = d \frac{\Delta C k_s}{C_0 m} \quad (2.15)$$

Böylece ivme değeri, a , kapasite değerleri cinsinden elde edilerek hesaplanabilir.

2.3 Manyetometre

Manyetometrelerin kullanım amacı, bulunduğu konumun manyetik alanını ölçmektir. Bu ölçüm için kullanım amacına göre farklı prensiplerle çalışan ve MEMS teknolojisine dayanan manyetik alan algılayıcıları geliştirilmiştir. Bu algılayıcılar: rezonans algılayıcılar, fluxgate algılayıcılar ve Hall algılayıcılarıdır.

Manyetik alan algılayıcıları bilim, mühendislik, sanayi gibi birçok alanda ve farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Manyetik algılayıcılarının uygulama alanları, algılayıcının dinamik aralığı ve çözünürlüğüne bağlıdır. Bu algılayıcılar hız tespiti, konum algılama, elektronik pusula, uzay araştırması ve beyin fonksiyonu haritalama gibi alanlarda kullanılmaktadır [10].

2.3.1 Rezonans algılayıcılar

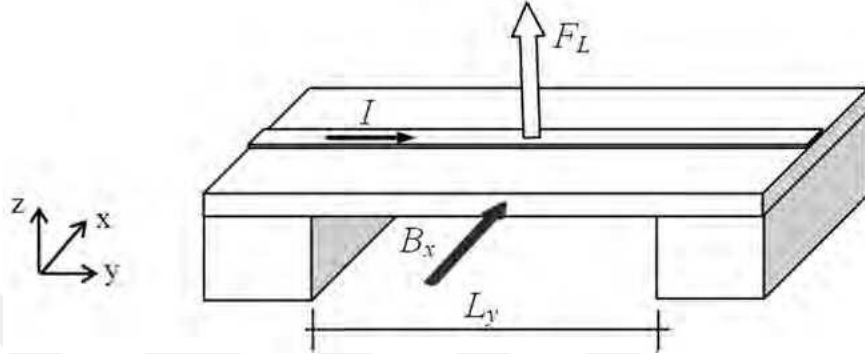
Rezonans algılayıcılar, rezonans modların birinde mikromakine yapıların uyarılması sonucu oluşan Lorentz kuvvet prensibine göre çalışmaktadır. Kenetlenmiş bir metal levha içinden, ilk rezonans frekansına eşit bir frekansta uyarma akımı (I_y) akıtılması ve x yönünde belli bir manyetik akı yoğunluğuna sahip (B_x) bir ortama konulması

sonucu bunlara dik olarak z yönünde Lorentz kuvveti oluşur. Eşitlik 2.16’da Lorentz kuvvetinin (F_L) manyetik akı yoğunluğu (B_x), uyarma akımı (I_y) ve metalik döngünün uzunluğuna (L_y) bağlı formülü gösterilmektedir.

$$F_L = I_y B_x L_y \quad (2.16)$$

$$I_y = \sqrt{2} I_{rms} \sin(2\pi f t) \quad (2.17)$$

Eşitlik 2.17’de f frekansı, t ise zamanı temsil etmektedir. Lorentz kuvvetinin nasıl oluştuğu Şekil 2.3’te daha iyi anlaşılmaktadır.

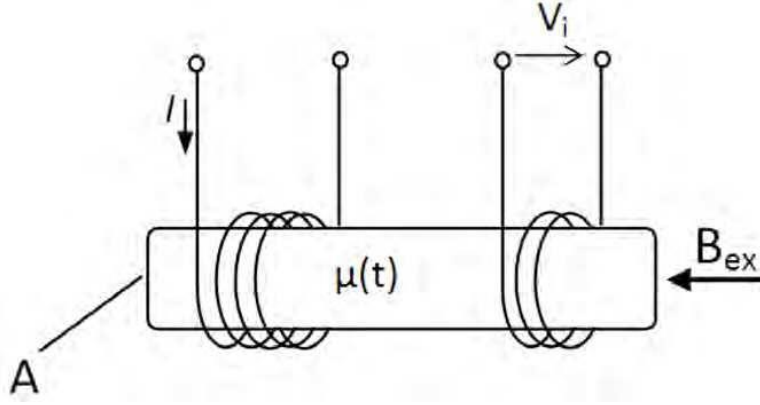


Şekil 2.3: Sıkıştırılmış metal levha üzerindeki Lorentz kuvvet prensibinin şematik gösterimi [10].

Ayrıca rezonans algılayıcılar 1 nT (tesla) hassasiyetle 1T’ye kadar manyetik alan ölçümü yapabilmektedir.

2.3.1 Fluxgate algılayıcılar

Fluxgate algılayıcılar, bir ferromanyetik çekirdeğin etrafına sarılmış uyarma ve algılama bobinlerinden oluşan endüktif yapıdaki aygıtlardır. Fluxgate algılayıcılar 100pT hassasiyetle 1 mT’ye kadar manyetik alan ölçümü yapabilmektedir. Bu algılayıcıların klasik olanları pahalı ve oldukça büyüktür. Ancak son yıllarda mikrofabrikasyon teknolojisi kullanılarak mikro fluxgate algılayıcıların yapılabilmesi için büyük çaba sarf edilmiştir. Mikro fluxgate algılayıcılarının çok küçük boyutunun yanında çok hafif olması, düşük güç tüketimi, elektronik entegreler içinde kullanılabilmesi ve düşük maliyeti açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Tabi küçük boyutlarda olmasının da getirdiği bazı dezavantajlar vardır. Bunlardan bazıları düşük hassasiyet ve yüksek seviyelerde gürültü oluşumudur. Fluxgate algılayıcısının yüzeysel şematiği Şekil 2.4’teki gibidir.



Şekil 2.4: Fluxgate algılayıcısının çalışma prensibinin en basit şekli [10].

Burada fluxgate algılayıcısının çalışma prensibi, bir manyetik akı yoğunluğuna (B_x) sahip ortamın içerisine etraflı, uyarma akımı (I_y) akışını sağlayan uyarma bobinleri tarafından sarılmış bir ferromanyetik yapıdaki çekirdek konduktan sonra bu çekirdeğin algılama bobininden manyetik akı (Φ_x) değişimine bağlı olarak üretilen gerilimin (V_i) ölçülmesine dayanmaktadır. Faraday Kanunu kullanılarak üretilen gerilim Eşitlik 2.18'deki gibidir.

$$V_i = \frac{d\Phi_x}{dt} = \frac{d(N_c A_r \mu_0 \mu_r(t) H_x(t))}{dt} \quad (2.18)$$

N_c : Sarım sayısı,

A_r : Ferromanyetik çekirdeğin kesit alanı,

μ_0 : Uzayın manyetik alan geçirgenliği,

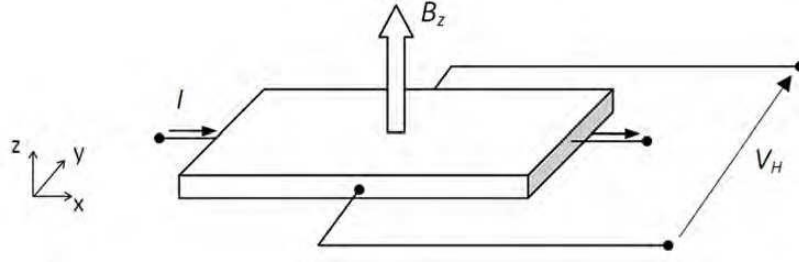
$\mu_r(t)$: Ferromanyetik çekirdeğin göreceli manyetik alan geçirgenliği,

$H_x(t)$: Ortamın manyetik alanı.

2.3.3 Hall algılayıcılar

Hall algılayıcılar manyetik alanı algılamak için Hall etkisi iletim prensibine göre çalışırlar. Genelde CMOS teknolojisi kullanılarak üretilirler ve 1 μ T ölçüm hassasiyetiyle 1 T'ye kadar manyetik alan ölçümü yapabilirler. Bu algılayıcılar durağan veya zamana göre değişen manyetik alanları algılayabilirler. Çalışma frekans limitleri genelde 1 MHz civarındadır ve geniş sıcaklık aralığında çalışabilirler.

Hall etkisi bir manyetik alanda hareketli yükler tarafından üretilen Lorentz kuvvet prensibine dayanmaktadır. Şekil 2.5'te bir manyetik akı yoğunluğu (B_x) veya manyetik alan içerisine yerleştirilmiş ince metal levhanın klasik şematığı görülmektedir [10].



Şekil 2.5: Hall etkisi prensibinin en basit gösterimi [10].

Sabit akımda oluşan Hall gerilimi eşitlik 2.19'daki gibidir.

$$V_H = V_{OFF} + \frac{B_z I_x}{en_{2D}} \quad (2.19)$$

Burada V_{OFF} (offset) gerilimi, manyetik alanın 0 olduğu durumdaki Hall gerilimidir. n_{2D} ise metal levhanın kalınlığı t_L ve dökme levhanın yük konsantrasyon ürünü n_L cinsinden Eşitlik 2.20'deki gibi verilen levha yük konsantrasyonudur.

$$n_{2D} = n_L t_L \quad (2.20)$$

Eğer akım sabitse, daha düşük yük taşıyıcı konsantrasyonu daha yüksek bir taşıyıcı hızı içerir; bu da yüksek Lorentz kuvvetinin oluşmasını sağlar. Böylece düşük yük taşıyıcı konsantrasyonu yüksek Hall gerilimine neden olur.

Hall gerilimi, manyetik alanın sadece z eksenı bileşenine bağlı olduğundan Hall manyetik algılayıcıları aslında tek eksenli cihazlardır.

2.4 Devrede Kullanılan IMU Algılayıcısı ve Özellikleri

Öncelikle kapalı alanda konum tahmini uygulamasının en önemli elemanı IMU algılayıcısıdır. Daha doğru tahminler yapabilmek için seçilen algılayıcı da büyük önem arz etmektedir. Bu durum dikkate alınarak bir araştırma yapılmıştır. Literatürde ADIS16405BMLZ [11], MTi-G-700 [3] ve AltIMU-10 [12] markalarında IMU algılayıcıları kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Fakat bizim çalışmada BOSCH firmasının üretmiş olduğu BNO055 marka akıllı IMU algılayıcısının alınmasına karar verilmiştir. Bunun nedeni ise kullandığımız akıllı algılayıcı mutlak yönelim hesabı yapabildiği için yönelim algoritması kullanılarak ham verilerden hesaplanan yönelim ile akıllı algılayıcının hesapladığı yönelimi karşılaştırmaktır [13].

BOSCH firması, daha önce bahsettiğimiz MEMS teknolojisi ile üretilen 3-eksen dönü ölçer, ivme ölçer ve manyetometre algılayıcılarını tek bir kart üzerinde birleştirmiştir. Bunun yanında, bu kart üzerine yerleştirilen ARM Cortex-M0 tabanlı

32 bitlik hızlı bir işlemci ile IMU algılayıcılarından aldığı ham verileri bu mikrodenetleyicide işleyerek mutlak doğrulukta yönelim açılarını üretebilmektedir [13]. Aynı zamanda bu akıllı algılayıcının ham verilerine de istenildiğinde ulaşılabilir. Yani IMU algılayıcısı gibi de kullanılabilir. Tezin amaçlarından biri de bu ham verileri farklı yönelim algoritmaları uygulayarak yüksek doğruluğa sahip yönelim elde etmek olduğundan tezde ham veriler kullanılmıştır. Sonra da bu akıllı algılayıcının yüksek doğruluğa sahip yönelim açıları ile ham verilerden algoritma kullanılarak hesaplanan yönelim açıları karşılaştırılmıştır. Yani akıllı algılayıcının hesapladığı açılar referans olarak kullanılmıştır. Bu algılayıcının verilerini elde ederken her veri için farklı modlar ve kodlar kullanılmaktadır. Bu değerlere algılayıcının veri kitabından bakılarak ulaşılmıştır [13]. BNO055 akıllı algılayıcısının üstten görünümü daha iyi anlaşılması açısından Şekil 2.6'da verilmiştir.



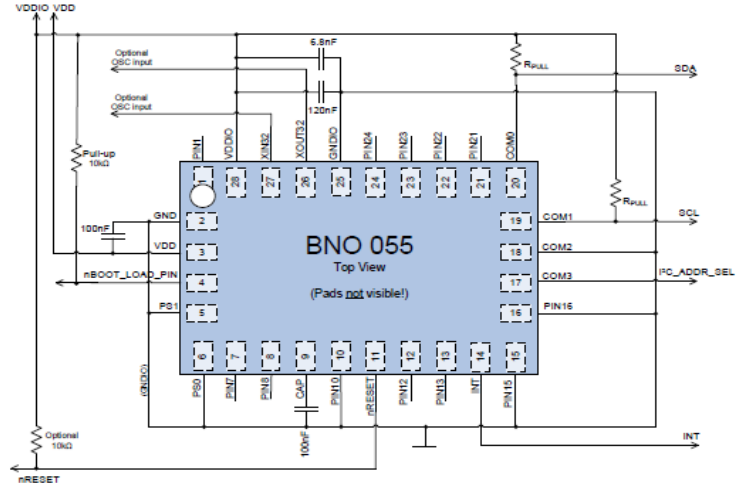
Şekil 2.6: BNO055 algılayıcısı.

BNO055 akıllı algılayıcısı 3-eksen ivme, açısal hız ve manyetik alan ölçümlerini diğer algılayıcılarda olduğu gibi belirli çözünürlükte ve ölçeklerde yapar. İvme ölçeri 3 ekseninde de 14 bit çözünürlüğünde ve $\pm 2G / \pm 4G / \pm 8G / \pm 16G$ ölçeklerinde, dönü ölçeri 16 bit çözünürlüğünde $\pm 125 / \pm 250 / \pm 500 / \pm 1000 / \pm 2000$ $\frac{\text{derece}}{\text{saniye}}$ ölçeklerinde, manyetometresi ise x, y ve z eksenlerinde sırasıyla 13/13/15 bit çözünürlüğünde, $0.3 \mu T$ hassasiyetle x ve y ekseninde $\pm 1300 \mu T$, z ekseninde ise $\pm 2500 \mu T$ ölçeklerinde ölçüm yapabilmektedir [13]. Bu algılayıcı, kişisel navigasyon

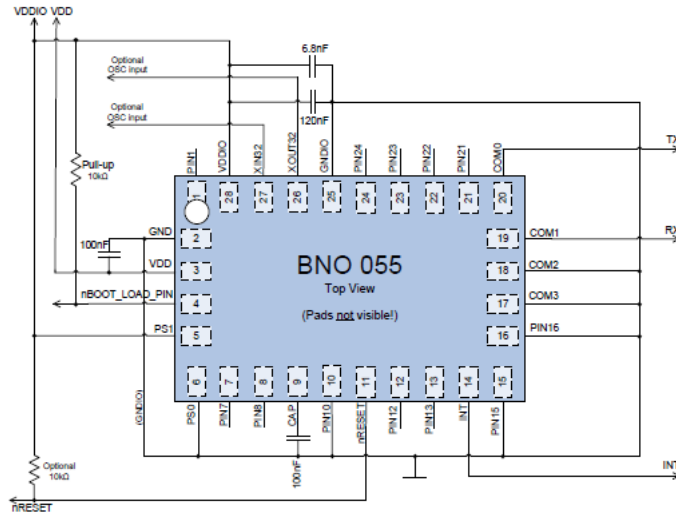
sistemleri, oyun konsolları, notebooklar, multicopter ve robotik gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Akıllı algılayıcıdan verilerin çekilmesi işlemi farklı protokoller ile yapılabilmektedir. Bunlar I²C ve UART protokolleridir. Bu çalışmada ise I²C protokolü kullanılmıştır. Bu protokolün saat hızı ise 400 kHz olarak ayarlanmıştır.

Şekil 2.7’da ve 2.8’de sırasıyla I²C ve UART protokolleri için bağlantı şemaları verilmiştir.



Şekil 2.7: I²C bağlantı şeması [13].



Şekil 2.8: UART bağlantı şeması [13].



3. MADGWICK ALGORİTMASI İLE YÖNELİM HESABI

Yayalar ya da araçlar için bir konum tahmini yapılacaksa bunun en önemli bölümlerinden biri de şüphesiz yönelim hesabıdır. Eğer konum tahmini algılayıcıdan alınan veriler ile yapılacaksa yönelim tahmin hesabını gerçeğe en yakın şekilde yapan algoritmalar araştırılmalı ve bunların içinden en iyisi seçilmelidir. Bu algoritmalar kullanılarak algılayıcı kalibrasyonu yapılmalı, algılayıcıdan alınan gürültülü veriler filtrelenmeli ve bir an için algılayıcıdan hatalı ölçüm alınsa bile doğru ölçüme en yakın değer tahmin edilmelidir. Literatürde bu amaca hizmet eden algoritmalarından en yaygın olanlarından biri Kalman Filtresidir [14]. Fakat Madgwick, yönelimin sadece dönü ölçerden alınan veriler ile yapılmasının eksik olduğunu düşünerek, yerçekimi ivmesi ve manyetik alan verileri ile yönelim hesabı yapan “Gradient Descent” algoritmasını kullanıp bu algoritmayı dönü ölçer verilerinden elde edilen yönelim hesabı ile birleştirmiştir. Amaç ise dönü ölçerin bir an için hatalı ölçüm yapması durumunda yapılan yanlış yönelim hesabının Gradient algoritması ile giderilmesidir. Madgwick tasarlamış olduğu algoritmanın Kalman Filtresinden daha iyi olduğunu göstermiş [4] ve bu nedenle çalışmamızda Madgwick algoritması kullanılmıştır. Madgwick algoritmasında kullanılan tüm formüller S.O.H. Madgwick ve diğer yazarlar tarafından hazırlanan raporundan alınmıştır [4].

3.1 Dördeyler

Dördeyler, 1843 yılında İrlanda’lı matematikçi William Rowan Hamilton tarafından bulunmuştur [15]. Dördeyler, 3 boyutu karmaşık sayılardan ve bir boyutu da gerçel sayıdan oluşmak üzere toplamda 4 boyutlu bir vektördür [15]. Aygıt referanslı veya Dünya’nın coğrafi koordinatlarına göre yapılan yönelim tahminlerinde kullanılabilir. Madgwick Algoritmasında kullanılan yönelim hesabı da dördeylerle yapıldığı için dördeyler hakkında bilgi verilme gereği duyulmuştur.

3.1.1 Temel dördey matematiği

Dördey , $q \in \mathbb{H}$ şeklinde tanımlı dört boyutlu bir vektördür. Bu dördey vektörü $q = [s, v]$ şeklinde ifade edilebilir. Bu dördeyin skaler kısmı $s \in \mathbb{R}$, vektörel kısmı ise $v = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ olarak tanımlanmaktadır [2, 15].

$$\begin{aligned}
q &= [s, v] s \in \mathbb{R}, v = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \\
&= [s, (x, y, z)] s, x, y, z \in \mathbb{R} \\
&= s + \mathbf{i}x + \mathbf{j}y + \mathbf{k}z, x, y, z \in \mathbb{R} \\
&= [q_1, q_2, q_3, q_4] \quad q_1 \in \mathbb{R}, \quad q_2, q_3, q_4 \in \mathbb{C}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{i}\mathbf{j}\mathbf{k} = -1 \tag{3.2}$$

Bir dördeyin vektör kısmındaki sanal bileşenlerin vektörel çarpımı Eşitlik 3.3'teki gibidir.

$$\begin{aligned}
\mathbf{i}\mathbf{j} &= \mathbf{k}, \quad \mathbf{j}\mathbf{i} = -\mathbf{k} \\
\mathbf{j}\mathbf{k} &= \mathbf{i}, \quad \mathbf{k}\mathbf{j} = -\mathbf{i} \\
\mathbf{k}\mathbf{i} &= \mathbf{j}, \quad \mathbf{i}\mathbf{k} = -\mathbf{j}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Dördeylerde toplama ve çarpma işlemleri tanımlıdır. Örneğin $q, \acute{q} \in \mathbb{H}$ olmak üzere $q = [s, (x, y, z)]$ ve $\acute{q} = [\acute{s}, (\acute{x}, \acute{y}, \acute{z})]$ iki tane dördey vektörü tanımlansın. Toplama işlemi Eşitlik 3.4'teki gibidir.

$$q + \acute{q} = [s, (x, y, z)] + [\acute{s}, (\acute{x}, \acute{y}, \acute{z})] = (s + \mathbf{i}x + \mathbf{j}y + \mathbf{k}z) + (\acute{s} + \mathbf{i}\acute{x} + \mathbf{j}\acute{y} + \mathbf{k}\acute{z}) \tag{3.4}$$

Çarpma işlemi ise Eşitlik 3.5'teki gibidir.

$$q \otimes \acute{q} = [s, (x, y, z)] \otimes [\acute{s}, (\acute{x}, \acute{y}, \acute{z})] = (s + \mathbf{i}x + \mathbf{j}y + \mathbf{k}z) \otimes (\acute{s} + \mathbf{i}\acute{x} + \mathbf{j}\acute{y} + \mathbf{k}\acute{z}) \tag{3.5}$$

Eşitlik 3.5'teki $\otimes$, matris çarpım sembolüdür. Bu matris çarpımı, $\zeta, \delta, \tilde{\zeta} \in \mathbb{H}$ olmak üzere Eşitlik 3.6, 3.7 ve 3.8'deki gibi gösterilebilir [16].

$$\tilde{\zeta} = \delta \otimes \zeta \tag{3.6}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_1 \\ \tilde{\zeta}_2 \\ \tilde{\zeta}_3 \\ \tilde{\zeta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_1 \\ \tilde{\zeta}_2 \\ \tilde{\zeta}_3 \\ \tilde{\zeta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 & -\delta_2 & -\delta_3 & -\delta_4 \\ \delta_2 & \delta_1 & -\delta_4 & \delta_3 \\ \delta_3 & \delta_4 & \delta_1 & -\delta_2 \\ \delta_4 & -\delta_3 & \delta_2 & \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_1 \\ \tilde{\zeta}_2 \\ \tilde{\zeta}_3 \\ \tilde{\zeta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_1 & -\zeta_2 & -\zeta_3 & -\zeta_4 \\ \zeta_2 & \zeta_1 & \zeta_4 & -\zeta_3 \\ \zeta_3 & -\zeta_4 & \zeta_1 & \zeta_2 \\ \zeta_4 & \zeta_3 & -\zeta_2 & \zeta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

q^* , q dördey vektörünün eşleniği olmak üzere q vektörünün normu, $\|q\|: \mathbb{H} \rightarrow \mathbb{R}$ Eşitlik 3.9'daki gibidir.

$$\|q\| = \sqrt{qq^*} = \sqrt{s^2 + v \cdot v} = \sqrt{s^2 + x^2 + y^2 + z^2} \tag{3.9}$$

3.1.2 Dördeylele döndürme işlemleri

Bir Euler ekseni etrafında γ açısı kadar döndürme işlemi, Euler ekseni birim vektörü $\hat{u}$ ve γ ile ifade edilebilir. $\hat{u}$ birim vektörü Eşitlik 3.10'da verilmiştir [2,16].

$$\hat{u} = [ie_x, je_y, ke_z] \quad (3.10)$$

Euler koordinat sisteminde dördeylele ile döndürme işlemi Eşitlik 3.11'deki gibi gösterilebilir [2,16].

$$q = e^{\frac{\gamma}{2}(ie_x, je_y, ke_z)} = \cos\frac{\gamma}{2} + (ie_x, je_y, ke_z)\sin\frac{\gamma}{2} \quad (3.11)$$

Sırasıyla A ve B referanslarında tanımlanmış ${}^A v$ ve ${}^B v$ vektörleri aynı büyüklüğe sahip vektörlerdir. Bu iki vektör arasındaki geçiş ise Eşitlik 3.12'de verilen formül ile sağlanmaktadır.

$${}^B v = {}^A_B q^* \otimes {}^A v \otimes {}^A_B q \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.12'deki ${}^A_B q$ ifadesi, B referans sisteminin A referans sistemine göre tanımlanmış birim dördeylele vektörüdür.

3.2 Açısız Hız İle Yönelim Hesabı

3-eksen ölçüm yapan bir dönü ölçerin x , y ve z eksenlerindeki açısız hız ölçümleri sırasıyla ω_x , ω_y ve ω_z olarak verilsin. Yönelimin dördeylele ile yapıldığı düşünülürse Eşitlik 3.13'de verilen algılayıcı referans sistemindeki ${}^S \omega$ (rad/s) açısız hız vektöründen, algılayıcı referans sisteminin dünya referans sistemine göre elde edilen dördeylele türevi, ${}^S_E \dot{q}$, Eşitlik 3.14'deki gibi hesaplanabilir.

$${}^S \omega = [0 \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z] \quad (3.13)$$

$${}^S_E \dot{q} = \frac{1}{2} {}^S_E q \otimes {}^S \omega \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.14'te, $\otimes$, matris çarpımıdır. Matris çarpımı formülleri ise Eşitlik 3.6, 3.7 ve 3.8'de verilmiştir. Algılayıcı referans sisteminden dünya referans sistemine göre t anında dönü ölçer ile hesaplanan dördeylele yönelimi ${}^S_E \dot{q}_{\omega,t}$, örnekleme periyodu Δt , t anında ölçülen açısız hız vektörü ${}^S \omega_t$ ve bir adım önceki tahmini yönelim ise ${}^S q_{est,t-1}$ ifadeleri ile gösterilirse açısız hız verilerinden elde edilen yönelim Eşitlik 3.15 ve 3.16'daki gibi olur.

$${}^S_E \dot{q}_{\omega,t} = \frac{1}{2} {}^S_E q_{est,t-1} \otimes {}^S \omega_t \quad (3.15)$$

$${}^S q_{\omega,t} = {}^S q_{est,t-1} + {}^S_E \dot{q}_{\omega,t} \Delta t \quad (3.16)$$

3.3 İvme ve Manyetik Alan Verileri ile Yönelim Hesabı

İvme ve manyetik alan verilerini kullanarak yapılan yönelim hesabında, ivme ölçerden alınan verilerden yerçekimi ivmesi ile manyetometreden alınan ölçümlerden dünyanın manyetik alan şiddeti kullanılacaktır. Dünya referans sisteminde dünyanın alanının yön vektörü biliniyorsa, algılayıcı referansında yapılan ölçümlerden dünya referansına göre bir yönelim hesabı yapılabilir. Dünya referans sisteminin algılayıcı referans sistemine göre yönelimi ${}^S_E q$, dünya referansında tanımlı bir ${}^E d$, yön vektörü ve algılayıcı referansında ölçülmüş bir ${}^S s$ vektörü ile bulunabilir [2, 4].

$$\min_{{}^S_E q \in R^4} f({}^S_E q, {}^E d, {}^S s) \quad (3.17)$$

$$f({}^S_E q, {}^E d, {}^S s) = {}^S_E q^* \otimes {}^E d \otimes {}^S_E q - {}^S s \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.17'deki f , dünya referans sistemi ile algılayıcı referans sistemi arasındaki minimum değeri veren fonksiyondur. Birçok optimizasyon algoritması olmasına rağmen gradient descent algoritması bu hesabı yapan en basit algoritmalardan biridir. Eşitlik 3.19'da n . iterasyondaki tahmini yönelim ${}^S_E q_{k+1}$, dördeylerin başlangıç değeri ${}^S_E q_0$ ve her adımda değeri değişebilen adım aralığı ise μ_k dır. Eşitlik 3.20'deki J ise f , fonksiyonunun Jacobian'ıdır [4].

$${}^S_E q_{k+1} = {}^S_E q_k - \mu_k \frac{\nabla f({}^S_E q_k, {}^E d, {}^S s)}{\|\nabla f({}^S_E q_k, {}^E d, {}^S s)\|}, \quad k = 0, 1, 2 \dots n \quad (3.19)$$

$$\nabla f({}^S_E q_k, {}^E d, {}^S s) = J^T({}^S_E q_k, {}^E d) f({}^S_E q_k, {}^E d, {}^S s) \quad (3.20)$$

$${}^S_E q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4] \quad (3.21)$$

$${}^E d = [0 \ d_x \ d_y \ d_z] \quad (3.22)$$

$${}^S s = [0 \ s_x \ s_y \ s_z] \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} & f({}^S_E q_k, {}^E d, {}^S s) \\ &= \begin{bmatrix} 2d_x(0.5 - q_3^2 - q_4^2) + 2d_y(q_2q_3 + q_1q_4) + 2d_z(q_2q_4 - q_1q_3) - s_x \\ 2d_x(q_2q_3 - q_1q_4) + 2d_y(0.5 - q_2^2 - q_4^2) + 2d_z(q_3q_4 + q_1q_2) - s_y \\ 2d_x(q_2q_4 + q_1q_3) + 2d_y(q_3q_4 - q_1q_2) + 2d_z(0.5 - q_2^2 - q_3^2) - s_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.24)$$

$f({}^S_E q_k, {}^E d, {}^S s)$ fonksiyonunun türev matrisi ise Eşitlik 3.26'da verilmiştir.

$$J^T({}^S_E q_k, {}^E d) = \left[\frac{\partial f}{\partial q_1} {}^E d \quad \frac{\partial f}{\partial q_2} {}^E d \quad \frac{\partial f}{\partial q_3} {}^E d \quad \frac{\partial f}{\partial q_4} {}^E d \right] \quad (3.25)$$

$$J^T({}^S_E q_k, {}^E d) = \begin{bmatrix} 2d_y q_4 - 2d_z q_3 & 2d_y q_3 + 2d_z q_4 & -4d_x q_3 + 2d_y q_2 - 2d_z q_1 & -4d_x q_4 + 2d_y q_1 + 2d_z q_2 \\ -2d_x q_4 - 2d_z q_2 & 2d_x q_3 - 4d_y q_2 + 2d_z q_1 & 2d_x q_2 + 2d_z q_4 & -2d_x q_1 - 4d_y q_4 + 2d_z q_3 \\ 2d_x q_3 - 2d_z q_2 & 2d_x q_4 - 2d_y q_1 - 2d_z q_2 & 2d_x q_1 + 2d_y q_4 + 4d_z q_3 & 2d_x q_2 + 2d_y q_3 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Eşitlik 3.26 genel olarak herhangi bir konum için uygulanacak gösterimdir. 3-eksende verilen bu gösterim, dünya referans sisteminde özel durumlarda bir veya iki eksene indirgenebilir. Yerçekimi vektörü düşey eksende z eksenini olarak tanımlanabilir. Bu eşitliği f fonksiyonunda uygularsak işlemler daha basit hale gelmektedir. Eşitlik 3.27 ve 3.28’de verilen ${}^E g$ yerçekimi vektörü ve ${}^S a_n$ normalize ivme vektörü ${}^E d$ ve ${}^S s$ vektörleri yerine konabilir. Eşitlik 3.29’daki ${}^S a$ ise algılayıcı referans sisteminde ölçülen ham ivme vektörüdür.

$${}^E g = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (3.27)$$

$${}^S a_n = [0 \ a_{nx} \ a_{ny} \ a_{nz}] \quad (3.28)$$

$${}^S a = [0 \ a_x \ a_y \ a_z] \quad (3.29)$$

$$a_{nx} = \frac{a_x}{\| {}^S a \|} \quad (3.30)$$

$$\| {}^S a \| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (3.31)$$

$$f_g({}^S q, {}^S a_n) = \begin{bmatrix} 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) - a_{nx} \\ 2(q_3 q_4 + q_1 q_2) - a_{ny} \\ 2(0.5 - q_2^2 - q_3^2) - a_{nz} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$J_g({}^S q) = \begin{bmatrix} -2q_3 & 2q_4 & -2q_1 & 2q_2 \\ 2q_2 & 2q_1 & 2q_4 & 2q_3 \\ 0 & -4q_2 & -4q_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Dünyanın manyetik alanı, yatay ve düşey eksende bileşenleri olan bir ${}^E b$ vektörü ile tanımlanabilir. Bu vektörü f fonksiyonunda uygularsak işlemler daha basit hale gelmektedir. Eşitlik 3.34’te verilen ${}^S m_n$ (normalize manyetik alan ölçüm değerleri) ve Eşitlik 3.35’te verilen ${}^E b$ vektörleri sırasıyla ${}^S s$ ve ${}^E d$ vektörlerinin yerine konup Eşitlik 3.38 ve 3.39 elde edilebilir.

$${}^S m_n = [0 \ m_{nx} \ m_{ny} \ m_{nz}] \quad (3.34)$$

$${}^E b = [0 \ b_x \ 0 \ b_z] \quad (3.35)$$

Dünya referansında tanımlı manyetik alan vektörü ${}^E b$, Eşitlik 3.36 ve 3.37'deki formüller ile bulunur. Manyetik alan vektörünün b_y değeri manyetik alan bozulmalarını önlemek için 0 alınmıştır. b_x ve b_z değerlerinin hesaplanıp b_y değerinin 0 alınmasıyla bir nevi manyetik alan kompanzasyonu yapılmıştır. Eşitlik 3.36'daki ${}^E h_t$ vektörü, dünya referansında t anında ölçülmüş manyetik alan vektörü ve ${}^S m_n$ ise algılayıcı referansında ölçülmüş normalize manyetik alan vektörüdür. Yani Eşitlik 3.36'daki işlemle algılayıcı referansında ölçülmüş manyetik alan ölçüm değerleri dünya referansına göre dönüştürülmüştür [4].

$${}^E h_t = [0 \ h_x \ h_y \ h_z] = {}^S_E q \otimes {}^S m_n \otimes {}^S_E q^* \quad (3.36)$$

$$b_x = \sqrt{h_x^2 + h_y^2}, \quad b_z = h_z \quad (3.37)$$

$$f_b({}^S_E q, {}^E b, {}^S m_n) = \begin{bmatrix} 2b_x(0.5 - q_3^2 - q_4^2) + 2b_z(q_2q_4 - q_1q_3) - m_{nx} \\ 2d_x(q_2q_3 - q_1q_4) + 2d_z(q_3q_4 + q_1q_2) - m_{ny} \\ 2d_x(q_2q_4 + q_1q_3) + 2d_z(0.5 - q_2^2 - q_3^2) - m_{nz} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$J_b({}^S_E q, {}^E b) = \begin{bmatrix} -2b_zq_3 & 2b_zq_4 & -4b_xq_3 - 2b_zq_1 & -4b_xq_4 - 2b_zq_2 \\ -2b_xq_4 + 2b_zq_2 & 2b_xq_3 + 2b_zq_1 & 2b_xq_2 + 2b_zq_4 & -2b_xq_1 + 2b_zq_3 \\ 2b_xq_3 & 2b_xq_4 - 4b_zq_2 & 2b_xq_1 - 4b_zq_3 & 2b_xq_2 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Dünyanın manyetik alanı ile yerçekiminden elde edilen f minimum fonksiyonları ile Jacobian matrisleri birleştirilerek tam bir yönelim elde edilebilir. Bu birleştirme işlemi Eşitlik 3.40 ve 3.41'de verilmiştir.

$$f_{gb}({}^S_E q, {}^S a_n, {}^E b, {}^S m_n) = \begin{bmatrix} f_g({}^S_E q, {}^S a_n) \\ f_b({}^S_E q, {}^E b, {}^S m_n) \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$J_{gb}({}^S_E q, {}^E b) = \begin{bmatrix} J_g^T({}^S_E q) \\ J_b^T({}^S_E q, {}^E b) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Eşitlik 3.40 ve 3.41 gradient descent algoritmasına sokularak eşitlik 3.42 elde edilir. Bu eşitlikteki her hangi bir t anındaki tahmini yönelim ${}^S_E q_{\nabla,t}$, f fonksiyonunun türev matrisi ∇f , eşitlik 3.43'teki gibi hesaplanmaktadır. ${}^S_E q_{est,t}$, algılayıcı referans

sisteminden dünya referans sistemine göre yönelim tahmini, μ_t ise t anındaki adım aralığıdır.

$${}^S_E q_{\nabla,t} = {}^S_E q_{est,t-1} - \mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (3.42)$$

$$\nabla f = \begin{cases} J_g^T({}^S_E q_{est,t-1}) f_g({}^S_E q_{est,t-1}, {}^S a_n) \\ J_{gb}^T({}^S_E q_{est,t-1}, {}^E b) f_b({}^S_E q_{est,t-1}, {}^E b, {}^S m_n) \end{cases} \quad (3.43)$$

3.4 Algılayıcı Verilerinin Birleştirilmesi

Pratikte ${}^S_E q_{\omega,t}$, dönü ölçer ölçüm gürültüsü ve ölçüm hatalarından dolayı yanlış başlama koşullarıyla başlayabilir. ${}^S_E q_{\nabla,t}$ ise ivme ölçer hareket halindeyken veya manyetometre parazitlere maruz kalıyorken hatalı tahmin yapabilir. Bu iki yönelim hesabının birleştirilmesindeki amaç ${}^S_E q_{\omega,t}$, ${}^S_E q_{\nabla,t}$ yönelimindeki yüksek frekanslı parazitlerin süzülmesini sağlayan bir filtre gibi davranırken, ${}^S_E q_{\nabla,t}$ ise hem ${}^S_E q_{\omega,t}$ hesabında oluşan sapmaları telafi etmek hem de başlangıç koşullarına yakınsamak için kullanılır.

Algılayıcı referans sisteminden dünya referans sistemine göre yönelim tahmini, ${}^S_E q_{est,t}$, ${}^S_E q_{\omega,t}$ ve ${}^S_E q_{\nabla,t}$ iki farklı yönelim hesabının birleştirilmesiyle elde edilir. Eşitlik 3.44'te γ_t ve $(1 - \gamma_t)$ her bir yönelim hesabı için uygulanan ağırlıklı değerleridir [4].

$${}^S_E q_{est,t} = \gamma_t {}^S_E q_{\nabla,t} + (1 - \gamma_t) {}^S_E q_{\omega,t}, \quad 0 \leq \gamma_t \leq 1 \quad (3.44)$$

Uygun bir γ_t değerini bulma işlemi, $(1 - \gamma_t) {}^S_E q_{\omega,t}$ değerinin ıraksadığı nokta ile $\gamma_t {}^S_E q_{\nabla,t}$ değerinin yakınsadığı noktaların birbirine eşit olması ile tanımlanır [2]. ${}^S_E q_{\omega,t}$ yöneliminin ıraksama hızı β , ${}^S_E q_{\nabla,t}$ yöneliminin yakınsama hızı ise $\frac{\mu_t}{\Delta t}$ şeklinde tanımlanmış olup bunların birbirleriyle olan ilişkisi de Eşitlik 3.45'te verilmiştir.

$$(1 - \gamma_t) \beta = \gamma_t \frac{\mu_t}{\Delta t} \quad (3.45)$$

Eşitlik 3.45'teki γ_t değeri yalnız bırakılırsa Eşitlik 3.46 elde edilir.

$$\gamma_t = \frac{\beta}{\frac{\mu_t}{\Delta t} + \beta} \quad (3.46)$$

Eğer μ_t değerinin yeterince büyük olduğu düşünülürse Eşitlik 3.42'deki ${}^S q_{est,t-1}$ değeri ile Eşitlik 3.46'da paydada bulunan β değeri ihmal edilebilecek ve eşitliklerin son hali Eşitlik 3.47'deki ve 3.48'deki gibi olacaktır.

$${}^S q_{v,t} \approx -\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (3.47)$$

$$\gamma_t \approx \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \quad (3.48)$$

Eşitlik 3.48'de μ_t çok büyük ve Δt küçük olduğu için γ_t değeri sıfır alınabilir. Tüm ihtimaller düşünüldüğünde Eşitlik 3.47 ve 3.48, Eşitlik 3.44'te yerine konursa Eşitlik 3.49 elde edilir. Eşitlik 3.49 da sadeleştirildiğinde Eşitlik 3.50 elde edilir.

$${}^S q_{est,t} = \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \left(-\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \right) + (1-0) \left({}^S q_{est,t-1} + {}^S \dot{q}_{\omega,t} \Delta t \right) \quad (3.49)$$

$${}^S q_{est,t} = -\beta \Delta t \left(\frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \right) + \left({}^S q_{est,t-1} + {}^S \dot{q}_{\omega,t} \Delta t \right) \quad (3.50)$$

Eşitlik 3.50'de ${}^S \dot{q}_{\omega,t}$ değeri Eşitlik 3.15 ile hesaplanır. β değeri dönü ölçer ölçüm hatasıdır. Eşitlik 3.51'deki q , birim dördey vektörüdür ve bu dördeylerin karelerinin toplamı 1'e eşittir. $\tilde{\omega}_{\beta x}$, $\tilde{\omega}_{\beta y}$ ve $\tilde{\omega}_{\beta z}$ değerleri ise her bir eksenindeki maksimum dönü ölçer hatası olup bu 3-eksenindeki maximum dönü ölçer hatalarının yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu kabul edilirse β değeri Eşitlik 3.51'deki gibi hesaplanabilir [4].

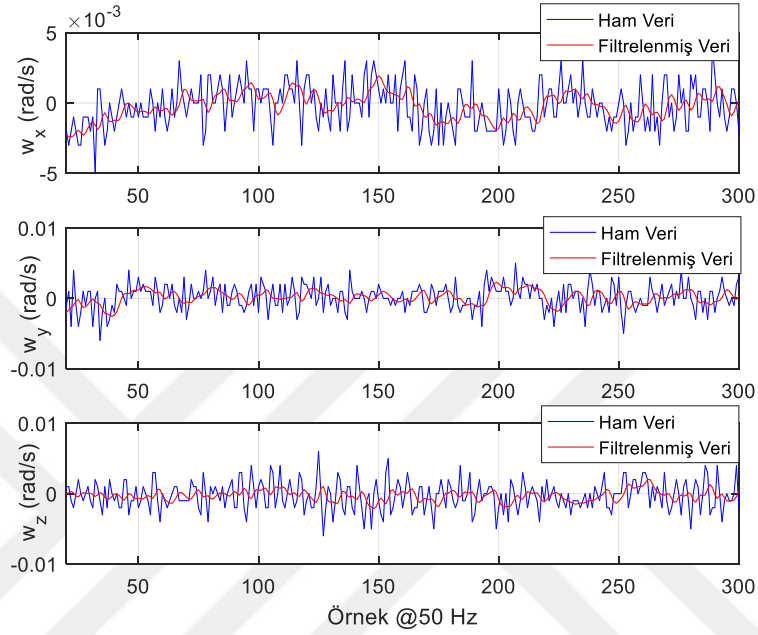
$$\beta = \left\| \frac{1}{2} q \otimes [0 \ \tilde{\omega}_{\beta x} \tilde{\omega}_{\beta y} \tilde{\omega}_{\beta z}] \right\| = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_{\beta x} \quad (3.51)$$

3.5 Benzetim Sonuçları

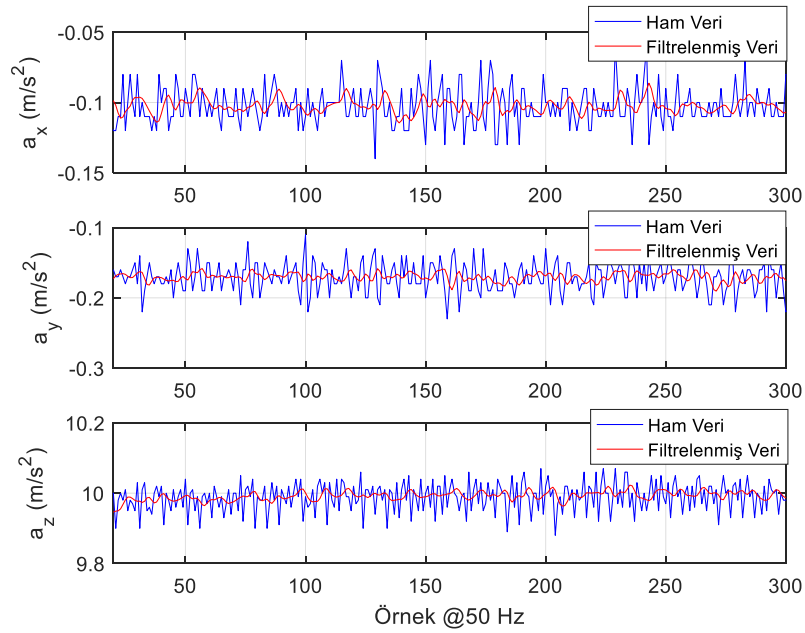
Öncelikle IMU algılayıcısından Arduino Due kartı üzerindeki SAM3X8E ARM Cortex-M3 mikrodenetleyicisi tarafından I²C protokolü ve 50 Hz örnekleme frekansı ile alınan ham verilerin durağan haldeki yapısı incelenmiş ve gürültülerin giderilmesi için daha önce kullanılan 1 Hz kesim frekansına sahip ikinci dereceden bir Butterworth filtre kullanılmıştır. Elde edilen ham veriler incelendiğinde algılayıcı kaliteli ve yüksek hassasiyete sahip olduğu için verilerde önemli derecede sapmalar gözlenmemiştir. Bu yüzden sapmaları gidermek için ekstra bir algoritma kullanılmamıştır. Açısal hız birimi olarak rad/s, ivme birimi olarak m/s² ve manyetik alan birimi olarak da mGauss kullanılmıştır. Dünyanın manyetik alanı kutuplarda

yaklaşık 650 mG iken ekvator civarında ise yaklaşık 250 mG olarak ölçülmüştür [18]. Ölçümler İstanbul’da yapıldığı için manyetik alan değerinin yaklaşık 440 mG olduğu gözlemlenmiştir.

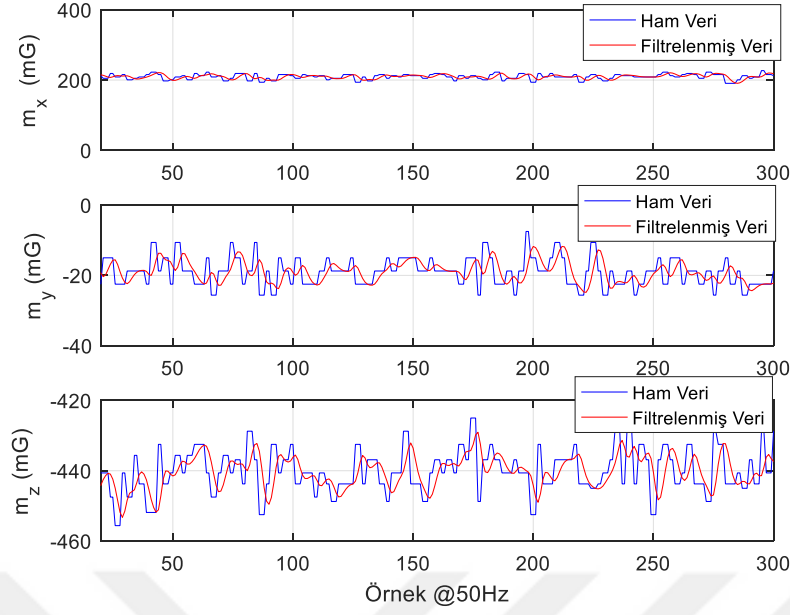
Algılayıcıdan alınan 3-eksen açısal hız, ivme ve manyetik alan grafikleri sırasıyla Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.1: 3-eksen açısal hız verileri.



Şekil 3.2: 3-eksen ivme verileri.



Şekil 3.3: 3-eksen manyetik alan verileri.

Ham verilerin analizi yapıp dönü ölçer hatası β , yaklaşık 0.002 olarak hesaplandıktan sonra bu değerler Madgwick Algoritmasında yerlerine konmuş ve dördeyler üzerinden yönelim hesabı yapılmıştır; fakat yönelim açılarının hesaplanabilmesi için dördey koordinat sisteminden Euler koordinat sistemine geçilmesi gerekmektedir.

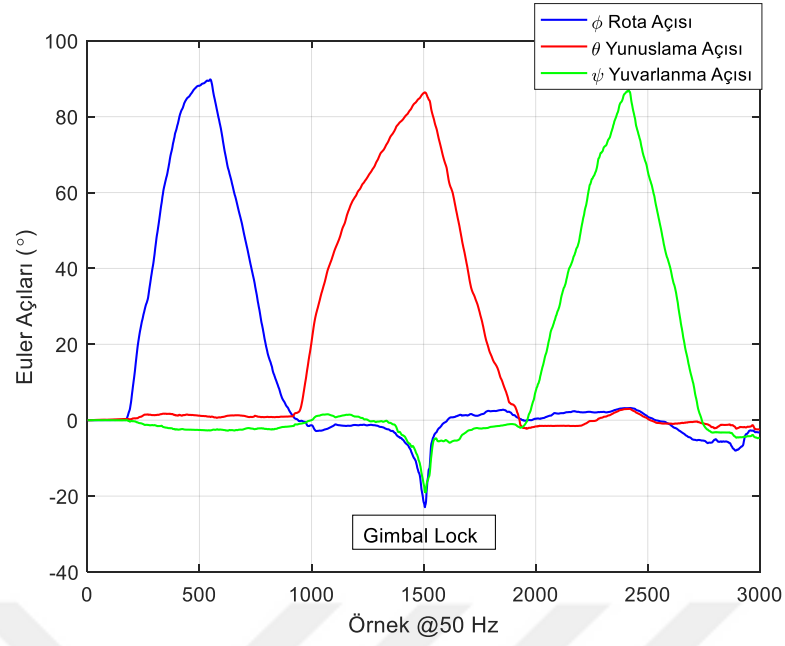
Dördeylerden Euler açılarının hesaplanması Eşitlik 3.52, 3.53 ve 3.54'te verilmiştir [16]. Bu eşitliklerde ϕ açısı rota veya sapma (yaw) açısı, θ açısı yunuslama (pitch) açısı ve ψ açısı da yuvarlanma (roll) açısıdır.

$$\tan\phi = \frac{2(q_2q_3 + q_1q_4)}{2(q_1^2 + q_2^2) - 1} \quad (3.52)$$

$$\sin\theta = 2(q_1q_3 - q_2q_4) \quad (3.53)$$

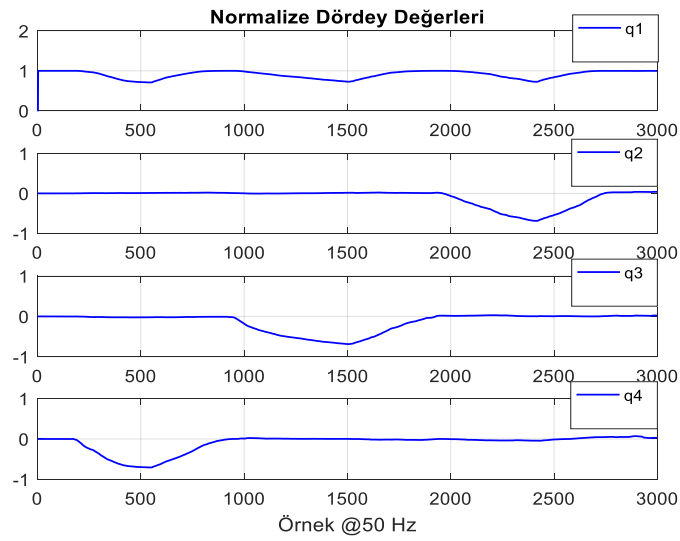
$$\tan\psi = \frac{2(q_1q_2 + q_3q_4)}{2(q_1^2 + q_4^2) - 1} \quad (3.54)$$

Euler açıları hesaplandıktan sonra bir test senaryosu hazırlanmış ve sonuçlar Şekil 3.4'teki gibi MATLAB ortamında çizdirilmiştir. Bu senaryoya göre cihaz belli bir süre başlangıç noktasından itibaren x , y ve z eksenlerinde 90° 'lik açılarla döndürülüp tekrar başlangıç noktasına getirilmiştir.

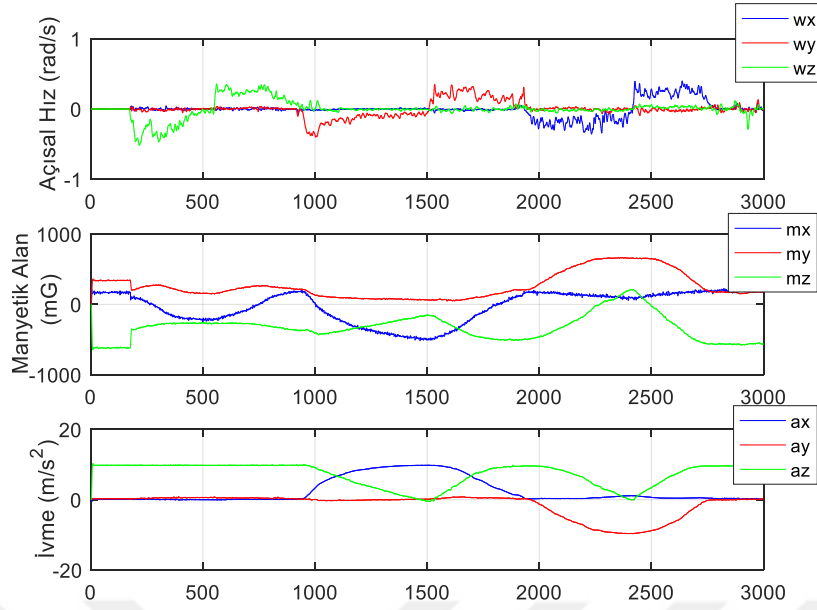


Şekil 3.4: Euler açılarının (°) zamanla değişimi.

Şekil 3.4'te gösterilen Euler açılarında yunuslama açısının (pitch) olduğu bölümde rota (yaw) ve yuvarlanma (roll) açılarında bir kararsız hal durumu görülmektedir. Bunun nedeni ise algılayıcı y eksenini etrafında dönerken, 90° 'ye ulaştığında x ve z eksenlerinde çakışma olur. Bu da diğer açıların kararsız davranmasına neden olur. Bu olaya da Gimbal Lock denir [2, 15]. Bu test senaryosu gerçekleştirirken dördey değerleri ile algılayıcıdan alınan ham verilerin davranışı sırasıyla Şekil 3.5'te ve 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5: Normalize dördey değerleri.



Şekil 3.6: Algılayıcıdan alınan 3-eksen ham verilerin zamanla değişimi.

Son olarak Madgwick Algoritması ile hesaplanan yönelim açıları ile referans alınan akıllı algılayıcı tarafından hesaplanan yönelim açıları karşılaştırılmıştır ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Euler açılarının ölçüm sonuçları.

Euler Açıları	Olması Gereken Açıları (°)	Ölçülen Açı (°)	Hata (%)
ϕ	90	89.56	0.49
θ	90	89.45	0.61
ψ	90	88.72	1.42

4. YÜRÜME HAREKETİ SONUCU OLUŞAN GÜRÜLTÜLERİN VE SAPMALARIN GİDERİLMESİ

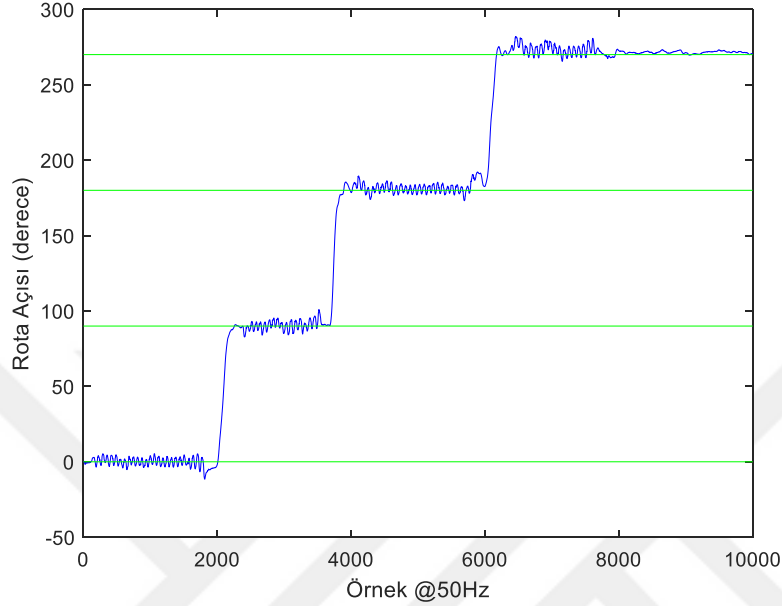
Tahmin edileceği üzere elde taşınan ve konum tahmini yapan yaya navigasyon cihazlarının kullanım kolaylığı gibi avantajının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar: yürüme hareketi sonucu meydana gelen sallanmaların neden olduğu dinamik gürültüler ile insan eli algısının çok hassas olmamasından dolayı meydana gelen sapmalardır. Örneğin sıfır derecede yürüyen biri, cihaz birkaç derece sapsa bile cihazın sıfır derecede olduğunu düşünmesinden dolayı elini düzeltme gereği duymayabilir ve bunun sonucunda da o önemsiz olduğunu düşündüğümüz 2-3 derecelik sapmaların bile birikimli olarak artması, kayda değer konum hatalarına neden olabilir.

Ölçüm esnasında çeşitli sebeplerden alınan işaretin üzerinde gürültüler bulunmaktadır. Gürültülerin giderilmesi içinse çeşitli filtreler kullanılmıştır. Gürültü analizi yapıldıktan sonra hangi filtrenin kullanılacağına bu çalışmada karar verilmiştir. Gürültüler genelde yüksek frekanslı olduğundan ve yönelim açısının elektrik-elektronik terimi ile DC bileşeninin elde edilmesi istendiğinden öncelikle alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Kullanılan alçak geçiren filtre hem gürültüyü tam filtreleyememesi hem de yönelim açısı değeri arttıkça kırılmanın olmasından dolayı çok da başarılı olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun yerine farklı filtreler araştırılmış ve hem yönelim tahmini yapabilen hem de gürültüleri filtreleyebilen Kalman Filtresi tercih edilmiştir.

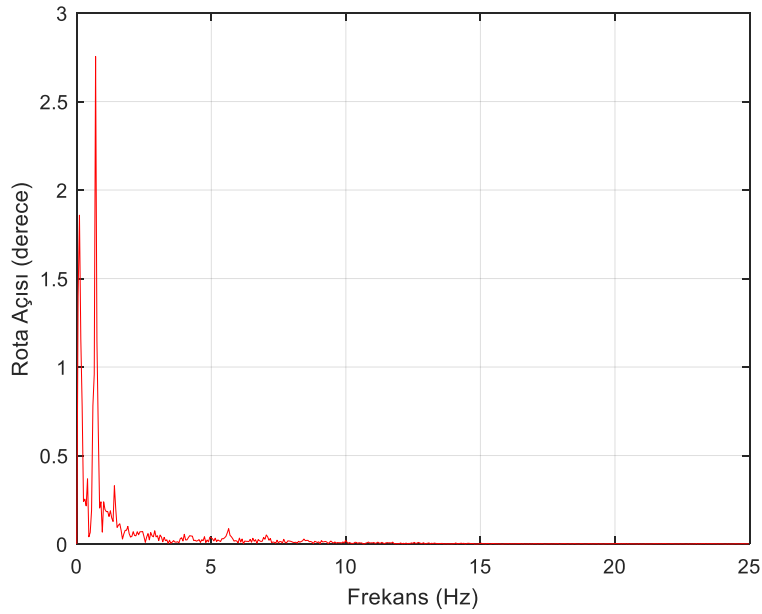
4.1 Alçak Geçiren Filtre İle Gürültülerin Giderilmesi

Sayısal gürültülerin giderilebilmesi için literatürde çeşitli sayısal filtreler mevcuttur. Bunlar; FIR, IIR, uyarlamalı ve özyinelemeli (recursive) tahmin yapan filtrelerdir [14, 20, 21]. Özyinelemeli tahmin yapan filtreler örnek olarak Kalman Filtresi verilebilir. Genelde uyarlamalı ve özyinelemeli tahmin yapan filtre algoritmaları FIR ve IIR filtreler göre daha karmaşıktır. Gürültüleri daha kısa yoldan, işlem yükü az filtrelerle gidermek için IIR filtre veya FIR filtre kullanılması düşünülmüş ve IIR filtreler, FIR filtrelerden daha düşük derecede (low order) gürültüleri süzebildiğinden

bir IIR filtre olan Butterworth filtre kullanılmaya karar verilmiştir. Öncelikle Madgwick Algoritması ile hesaplanan yönelim ile dikdörtgen bir parkurda örnek alınmış bu örnek üzerinden gürültü analizleri yapılmıştır. Şekil 4.1’de görülen örneğin sıfır derece 0° yönündeki frekans cevabı Şekil 4.2’de verilmiştir.



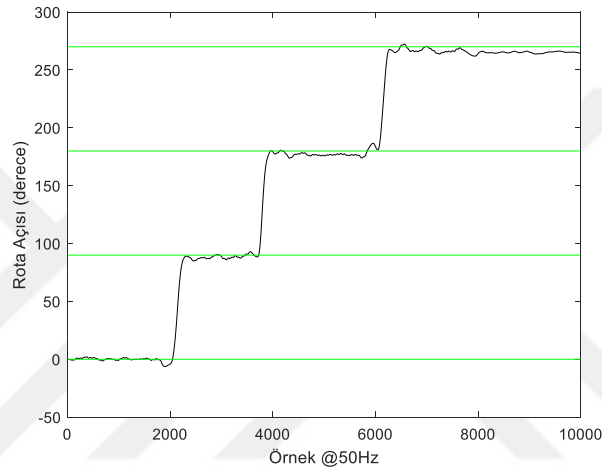
Şekil 4.1: Madgwick Algoritması ile hesaplanan rota açısının dikdörtgen yol boyunca değişimi (Yeşil hatlar sırasıyla 0° , 90° , 180° ve 270° dir.).



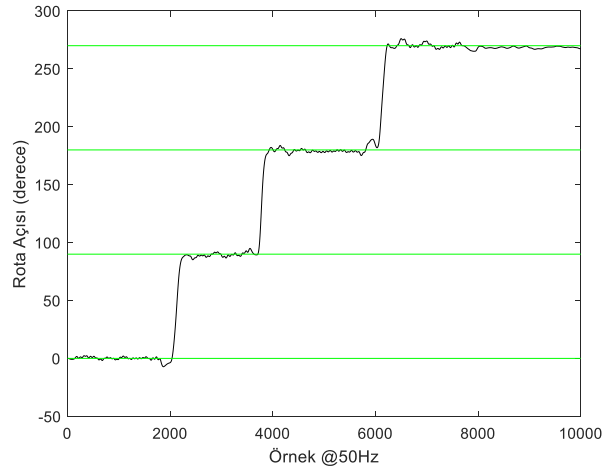
Şekil 4.2: 0° ’de rota açısının frekans ile değişimi.

Şekil 4.2’deki rota açısının frekans ile değişimi grafiği incelendiğinde yaklaşık olarak 0.1 ve 0.7 Hz frekanslarında sinüs şeklinde gürültülerin oluştuğu diğer

frekanslarda ise çok küçük genlikte gürültülerin olduğu anlaşılabılır. Bu gürültüleri gidermek için MATLAB ortamında Butterworth filtre fonksiyonları kullanılarak kesim frekansı önce 0.1 Hz olan ikinci dereceden Butterworth filtre katsayıları oluşturulmuştur. Bu katsayılar kullanılarak gürültülü rota açısı filtreden geçirilmiş ve şekil 4.3'te de görüldüğü üzere her dönmede biraz kırılmaya uğramış 270° sonunda da yaklaşık 3.8° kayma olduğu görülmüştür. 3.8° önemli hatalara neden olabileceğinden kesim frekansı 0.2 Hz'e ayarlanmıştır. Tüm hesaplamalar baştan yapılmış ve Şekil 4.4'te de görüldüğü gibi 270° sonunda yaklaşık olarak 1.1° derece kayma olmuştur.



Şekil 4.3: Filtrelenmiş rota açısı değişimi (kesim frekansı = 0.1 Hz).



Şekil 4.4: Filtrelenmiş rota açısı değişimi (kesim frekansı = 0.2 Hz).

Grafiklerden de anlaşılabacağı üzere kesim frekansı azaldıkça kırılma artmaktadır. Ayrıca üçüncü ve dördüncü derece Butterworth filtresi de denenmiş fakat üretilen katsayılar kullanıldığında sonuç kararsız bir hal almıştır. 0.2 Hz'de sonuçlar daha iyi olsa da yine de gürültüler oluşmaktadır.

Bu sonuçlara göre 0°, 90°, 180° ve 270°'de standart sapma değerleri sırasıyla 1.86°, 1.25°, 2.7° ve 1.95°'dir.

4.2 Kalman Filtresi

Kalman Filtresi 50 yılı aşkın süredir kullanılan ve hala popülaritesini koruyan bir tahmin edici filtredir. Bu filtre aslında gürültülü ölçümlerin gürültülerini, gürültü varyanslarına göre filtreleyen ve gerçek ölçüm değerine en yakın olacak şekilde özyinelemeli (recursive) olarak tahmin edebilen bir algoritmadır. Bu filtre tasarlanırken gürültülerin sıfır ortalamalı ve belirli bir varyansa sahip Gaussian gürültü olduğu farz edilerek tasarlanmıştır; fakat gerçek hayatta gürültülerin çoğu Gaussian olmadığından ve bu filtre Gaussian olmayan gürültülü ölçümlerin gerçek değerlerini de yüksek doğrulukta tahmin edebildiğinden önemi daha da artmıştır. Aslında Gaussian gürültülü ölçümlerde hem optimum filtre hem de tahmin edici olarak, Gaussian gürültülü olmayan ölçümlerde ise normal filtre ve tahmin edici olarak kullanılabilir [14].

Bu çalışmada Kalman Filtresinin kullanılma nedeni, elle taşınan cihazla yayalarda konum tahmini yaparken yürüme esnasında sallanmalardan ve el titremesinden meydana gelen dinamik gürültüleri filtrelemek ve doğru değeri tahmin etmektir. Literatürde de yönelim hesabı yaparken gürültülerin giderilmesi ve doğru yönelim yapılabilmesi için Kalman Filtresinin kullanılması oldukça yaygındır [14]. Hatta Madgwick Algoritması ile Kalman Filtresini bir arada kullanan çalışmalar da vardır. [12].

Kalman Filtresini kullanmadan önce bu algoritmayı iyi anlamak ve bu algoritmadaki matrisleri amaca uygun bir şekilde titizlikle hesaplamak gerekir.

4.2.1 Doğrusal Kalman Filtresinin incelenmesi

Doğrusal Kalman Filtresi algoritması oluşturulurken önce sistemin durum-uzay eşitlikleri çıkarılır. Aslında durum-uzay eşitlikleri filtrenin tahmin bölümünü oluşturur. Bu durum-uzay eşitliklerindeki matrisler oluşturulduktan sonra Kalman Filtresi algoritmasında yerine konur. Daha sonra Kalman Filtresi algoritmasındaki hata ve gürültü kovaryans matrisleri hesaplanır ve algoritma çalışmaya hazır hale getirilir. Durum-uzay eşitlikleri Eşitlik 4.1 ve 4.2'deki gibidir [14].

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.1)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.1 ve 4.2’de x_k tahmini durum vektörü, A durum geçiş matrisi, u_{k-1} kontrol sinyali, B kontrol sinyali ile durum vektörü arasındaki ilişkiyi belirleyen matris, w_{k-1} işlem gürültüsü, z_k algılayıcıdan gelen ölçüm vektörü, H ölçüm vektörü ile durum vektörü arasındaki ilişkiyi belirleyen matris, v_k ise ölçüm gürültüsü olarak ifade edilebilir. Buradaki ölçüm ve işlem gürültüleri sıfır ortalamalı ve belirli bir varyansa sahip Gaussian gürültü olarak kabul edilmiştir. A , B ve H matrisleri hesaplandıktan sonra aşağıdaki Kalman algoritması eşitliklerinde yerine konur.

$$\hat{x}_{k,k-1} = A\hat{x}_{k-1,k-1} + Bu_{k-1} \quad (4.3)$$

$$P_{k,k-1} = AP_{k-1,k-1}A^T + Q \quad (4.4)$$

$$K_k = P_{k,k-1}H^T(HP_{k,k-1}H^T + R)^{-1} \quad (4.5)$$

$$\hat{x}_{k,k} = \hat{x}_{k,k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k,k-1}) \quad (4.6)$$

$$P_{k,k} = (I_{4 \times 4} - K_kH)P_{k,k-1} \quad (4.7)$$

Yukarıdaki eşitliklerde $\hat{x}_{k,k-1}$ ve $\hat{x}_{k,k}$ sırasıyla öncül ve soncul tahmini durum vektörleri, $P_{k,k-1}$ ve $P_{k,k}$ sırasıyla öncül ve soncul hata kovaryans matrisleri, K_k Kalman kazancı, Q ve R sırasıyla işlem ve ölçüm gürültüsü kovaryans matrisleri ve son olarak $I_{4 \times 4}$ de birim matristir [14]. Pratikte ise $P_{k,k}$ matrisi $P_0 = 0.01.I_{4 \times 4}$ başlangıç değeri verilerek hesaplanmıştır.

Bu algoritmada hata kovaryans matrisinin asıl hesabı ise aşağıdaki eşitliklerdeki gibidir [14].

$$e_{k,k-1} \equiv x_k - \hat{x}_{k,k-1} \quad (4.8)$$

$$e_{k,k} \equiv x_k - \hat{x}_{k,k} \quad (4.9)$$

$$P_{k,k} = E[e_{k,k}e_{k,k}^T] \quad (4.10)$$

$$P_{k,k-1} = E[e_{k,k-1}e_{k,k-1}^T] \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.8’de ve 4.9’da $e_{k,k}$ ve $e_{k,k-1}$ sırasıyla soncul ve öncül durum hata vektörleridir.

4.2.2 Doğrusal Kalman Filtresinin amaca uygun düzenlenmesi

Bir önceki bölümde verilen Kalman Filtresi algoritmasındaki matrisler amaca uygun olarak belirlenmiş ve bazı varsayımlar ile yeniden hesaplanmıştır. Öncelikle rota açısının sürekli değişmediği yani uzun süre düz gidilen koridor tarzı yollar için bazı sadeleştirmeler yapılabilir. Farz edelim ki düz bir yolda gidiyoruz ve bu yolun rotası uzun süre değişmiyor. O halde Ek A1’de açılal hız ve örnekleme periyodu cinsinden hesaplanan ve Eşitlik 4.12’de verilen durum geçiş matrisi A [17], Eşitlik 4.13’teki

gibi sadeleştirilebilir. Bu sadeleştirme işlemi şu mantık kullanılarak çok basit bir şekilde yapılabilir. Eğer yönelim açıları uzun süre değişmiyorsa yani sabitse açının zamana göre türevi olan açısal hızın sıfır olması beklenir. Yani ${}^s\omega = \frac{d\phi}{dt} \approx 0$ 'dır.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 {}^s\omega_x \Delta t & -0.5 {}^s\omega_y \Delta t & -0.5 {}^s\omega_z \Delta t \\ 0.5 {}^s\omega_x \Delta t & 1 & 0.5 {}^s\omega_z \Delta t & -0.5 {}^s\omega_y \Delta t \\ 0.5 {}^s\omega_y \Delta t & -0.5 {}^s\omega_z \Delta t & 1 & 0.5 {}^s\omega_x \Delta t \\ 0.5 {}^s\omega_z \Delta t & 0.5 {}^s\omega_y \Delta t & -0.5 {}^s\omega_x \Delta t & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

O halde Eşitlik 4.13'teki A matrisi alındığında ve u_{k-1} kontrol sinyali kullanılmadığında yeni durum uzay eşitlikleri, Eşitlik 4.14 ve 4.15'teki gibi olur.

$$x_k = x_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.14)$$

$$q_{est,k-1} = x_{k-1} + v_{k-1} \quad (4.15)$$

Eşitlik 4.15'te H matrisi ölçüm uzayı ile durum uzayının aynı olduğu kabul edilerek birim matris alınmıştır. $q_{est,k-1}$ dördeyi ise Madgwick Algoritmasının çıkış, Kalman Filtresinin ise giriş değeri ya da ölçüm değeri olarak ifade edilebilir. Amaç ise Madgwick Algoritması ile hesaplanan dördey üzerine binen yürüme hareketinden kaynaklı dinamik gürültülerin filtrelenmesi ve doğru yönelimin tahmin edilmesidir. A matrisi hesaplandıktan sonra sıra Q ve R gürültü kovaryans matrislerini hesaplamaya gelmiştir. Bu gürültü kovaryans matrisleri genelde sabit varyanslı diyagonal matris olarak kabul edilir. Çünkü her boyuttaki gürültüler, birbirlerinden bağımsız işaretler olarak kabul edildiği için bunların birbirleri arasındaki kovaryansı sıfırdır. Ancak pratikte gürültüler Gaussian olmadığından ve yürüme esnasından varyansları sürekli değişebildiğinden gerçek zamanlı bir hesap yapmak gerekmektedir. Bazı uygulamalarda Genişletilmiş Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter) başlığı altında bu gürültü varyansları hesaplanırken [19] bazıları da birkaç deneme ile ortalama bir değer bularak bu değerleri kullanmışlardır [12]. Bu çalışmada ise Q gürültü kovaryans matrisi gerçek zamanlı olarak yani her örnek alımında yeniden hesaplanırken R gürültü matrisi ise birkaç deneme sonucu bulunan varyansların ortalaması alınarak sabit bir diyagonal matris olarak belirlenmiştir [14]. Bu sistemin daha iyi anlaşılabilmesi için Kalman Filtresi sistem modeli Ek B1'de verilmiştir.

4.2.2.1 Q kovaryans matrisinin hesaplanması

Q kovaryans matrisini hesaplamadan önce durum-uzay eşitliklerinde birkaç oynama yapılmıştır. Eşitlik 4.15'te x_{k-1} yalnız bırakılırsa Eşitlik 4.16 elde edilir.

$$q_{est,k-1} - v_{k-1} = x_{k-1} \quad (4.16)$$

Eşitlik 4.14'teki x_{k-1} ifadesinin yerine Eşitlik 4.16'daki $q_{est,k-1} - v_{k-1}$ değeri yazılırsa Eşitlik 4.17 elde edilir.

$$x_k = q_{est,k-1} - v_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.17)$$

Eşitlik 4.17'deki $-v_{k-1} + w_{k-1}$ ifadesi yerine $-\eta_{k-1}$ alınırsa son durum Eşitlik 4.18'deki gibi olur.

$$\eta_{k-1} = q_{est,k-1} - x_k \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.18'deki η_{k-1} yeni işlem gürültüsü gibi kabul edilirse ve yeni işlem gürültüsü kovaryans matrisine $\hat{Q}_{k-1}$ denirse bu matrisin hesabı Eşitlik 4.19'daki gibi gösterilebilir.

$$\hat{Q}_{k-1,i,j} = Cov(\eta_{k-1,i}, \eta_{k-1,j}) = Cov(q_{est,k-1,i} - x_{k,i}, q_{est,k-1,j} - x_{k,j}) \quad (4.19)$$

Başta durum tahmin vektörü olan x_k ifadesinin uzun süre sabit olacağı farz edildiği için bu değer sabit bir sayı gibi düşünülürse kovaryans hesabında etkisiz eleman gibi davranır ve Eşitlik 4.20 çıkarılabilir.

$$\hat{Q}_{k-1,i,j} = Cov(\eta_{k-1,i}, \eta_{k-1,j}) = Cov(q_{est,k-1,i}, q_{est,k-1,j}) \quad (4.20)$$

Kovaryans ise Eşitlik 4.21 ve 4.22'deki formüllerden yararlanılarak hesaplanabilir

$$Cov(q_{est,k-1,i}, q_{est,k-1,j}) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (q_{est,k-1,i}(n) - \tilde{q}_{est,k-1,i})(q_{est,k-1,j}(n) - \tilde{q}_{est,k-1,j}) \quad (4.21)$$

$$\tilde{q}_{est,k-1,i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N q_{est,k-1,i}(n) \quad k = 1, 2 \dots \quad (4.22)$$

$$q_{est,k-1} = [q_{est,k-1,1} q_{est,k-1,2} q_{est,k-1,3} q_{est,k-1,4}]^T \quad (4.23)$$

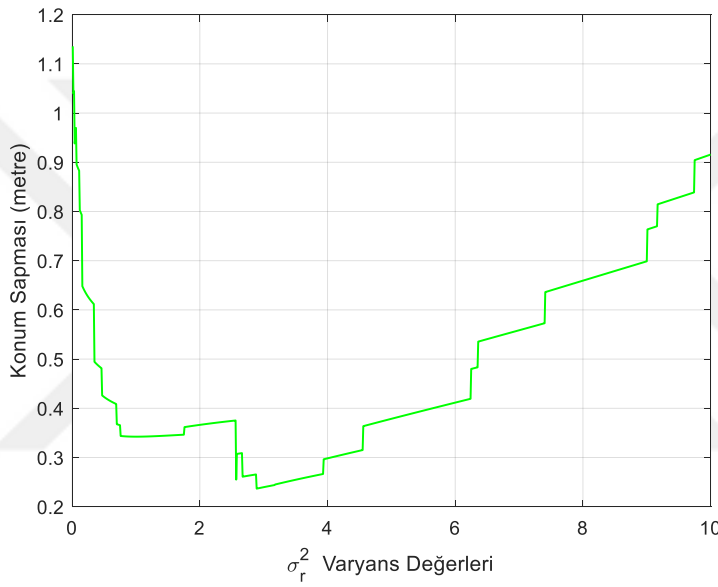
Eşitlik 4.23'te $q_{est,k-1}$ dördey vektörünün her bir elemanı $N = 50$ elemanlı birer dizi olarak tanımlanmıştır. $\frac{S}{E} q_{est,k,i}$ Madgwick Algoritması ile hesaplanan tek elemanlı dördey değerleridir. N ise örnekleme frekans değeridir. Bu dördeylerin her bir elemanının bir önceki değeri ile bir sonraki değeri arasındaki ilişki Eşitlik 4.24 ve 4.25'teki gibidir.

$$q_{est,k,i}(n-1) = q_{est,k-1,i}(n) \quad n=1, 2 \dots 50 \quad (4.24)$$

$$q_{est,k,i}(n) = \frac{S}{E} q_{est,k,i} \quad (4.25)$$

4.2.2.2 R kovaryans matrisinin hesaplanması

R matris değerleri aynı zamanda Kalman Filtresinin gürültüleri süzme derecesini de belirlediği için Q matrisi gibi hesaplamak yerine bu değerler deneme ve testler yoluyla elde edilmiştir. Öncelikle literatür araştırması sonucu bulunan kaynaklardaki gibi R gürültü kovaryans matrisi $\sigma_r^2 \times I_{4 \times 4}$ diyagonal matris olarak seçilmiştir. Daha sonra dikdörtgen bir parkurda denemeler yapılarak deney ölçümleri kaydedilmiş ve Şekil 4.5'teki konum sapmasının varyans değerlerine bağlı grafiği çıkarılarak konum sapmasının en az olduğu varyans değerleri tespit edilmiş ve bunların ortalaması alınarak sabit bir R matrisi elde edilmiştir.

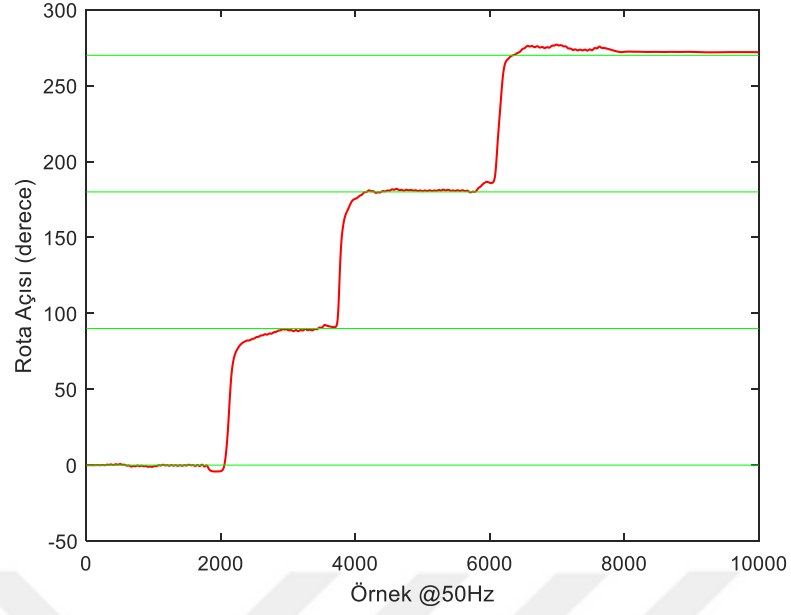


Şekil 4.5: Konum sapmasının σ_r^2 varyans değerlerine göre değişimi
(Konum sapmasının minimum değerinde $\sigma_r^2 = 2.89$).

Bu deney parkurunda beş kere ölçüm alınmış ve Şekil 4.5'teki gibi grafikleri çıkarılarak konum sapmasının minimum olduğu varyans değerleri bulunmuştur. Bu varyans değerlerinin ortalaması alınmış ve yaklaşık olarak ortalama varyans değeri $\sigma_{or}^2 = 3.9$ hesaplanmıştır. Tüm bu matris değerleri hesaplandıktan sonra Kalman Filtresi algoritmasında yerine konmuş ve ilk alınan örnek üzerinde uygulanmıştır.

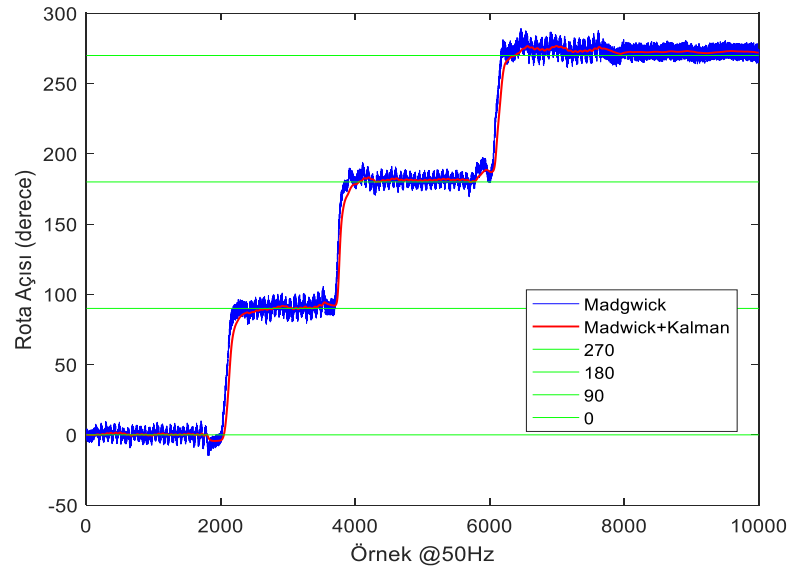
4.2.3 Kalman Filtresi benzetim sonuçları

Kalman Filtresi algoritmasındaki matris değerleri hesaplanıp yerine konduktan sonra Şekil 4.6'daki gibi bir sonuç elde edilmiştir.

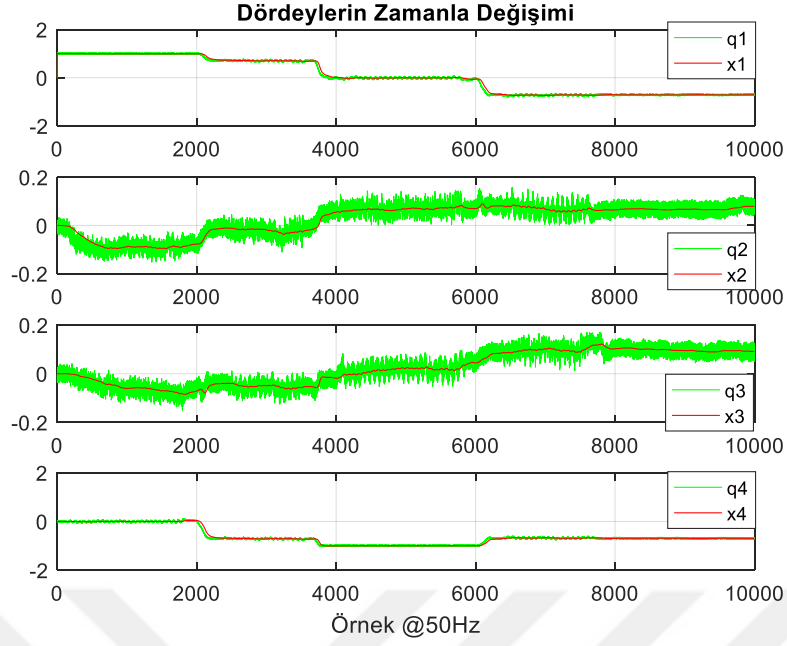


Şekil 4.6: Kalman Filtresi ile filtrelenmiş rota açısının değişimi.

Şekil 4.6'daki grafiğe göre 0° , 90° , 180° ve 270° 'de standart sapma değerleri sırasıyla 1.14° , 1.23° , 1.01° ve 1.42° olarak hesaplanmış alçak geçiren Butterworth filtresine göre daha iyi sonuç elde edildiği görülmüştür. Daha sonra acaba Madgwick Algoritması ile hesaplanan rota açısının üzerine bir Gaussian gürültü binse Kalman Filtresinin cevabı nasıl olur diye düşünülmüş ve bunun cevabını görmek için her bir dördey üzerine varyansı 5×10^{-4} olan gürültüler eklenmiştir ve sonuçların Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'deki gibi olduğu görülmüştür.



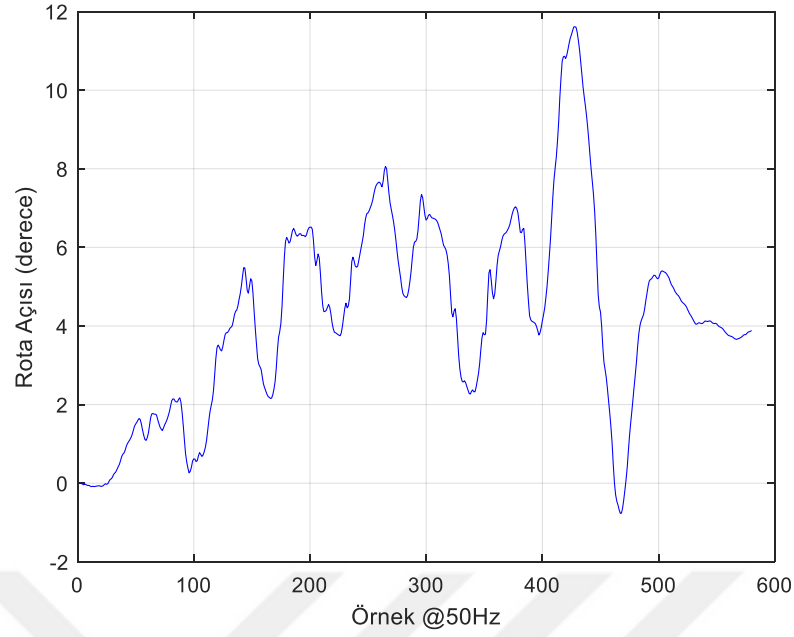
Şekil 4.7: Gaussian gürültülü rota açısının Kalman Filtresi ile filtrelenmesi.



Şekil 4.8: Gaussian gürültülü dördeylerin Kalman Filtresi ile filtrelenmesi (q_i: Madgwick, x_i: Madgwick + Kalman).

4.3 Rota Açısının Koşullu Belirlenmesi

Yayalar için konum tahmini yaparken, yürüme hareketinin neden olduğu gürültülerin yanında, insanların el ile yönelim açısını ayarlama hassasiyetinin sınırlı olmasından dolayı el sapmalarının neden olduğu hatalar konum hatalarına neden olmaktadır. Örneğin 0°'de giden bir insan, belli bir süre sonra el sapmasından dolayı sağa veya sola 2°- 3° derecelik kaymalar olsa bile cihazın 0°'de olduğunu düşünebilir ve cihazı düzeltme gereği duymayabilir. Ayrıca dönmelerde de gene sapmalar olabilmektedir. Yapılan denemeler sonucunda maksimum sapmanın 4° - 5° derece arası, ortalama sapma ise yaklaşık 2.5° olduğu gözlemlenmiştir. Bu deneylerden biri Şekil 4.9'da görülmektedir. Yürüme esnasında oluşan gürültüler filtrelerle giderilse de el sapmalarından dolayı oluşan hatalara çözüm bulmak için araştırmalar yapılmıştır. Fakat bu konu hakkında yapılan bir araştırma bulunamamıştır. Bu soruna çözüm bulmak için en başta yaptığımız varsayımı göz önünde bulundurup bazı özel açılar belirlenmiştir. Parkurun açısının sürekli değişmediği ve dönmelerin de 45°'lik veya 90°'lik açılarla yapıldığı düşünülürse buna göre 8 tane özel açı belirlenmiştir. Bu açılar: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° ve 315°'dir.



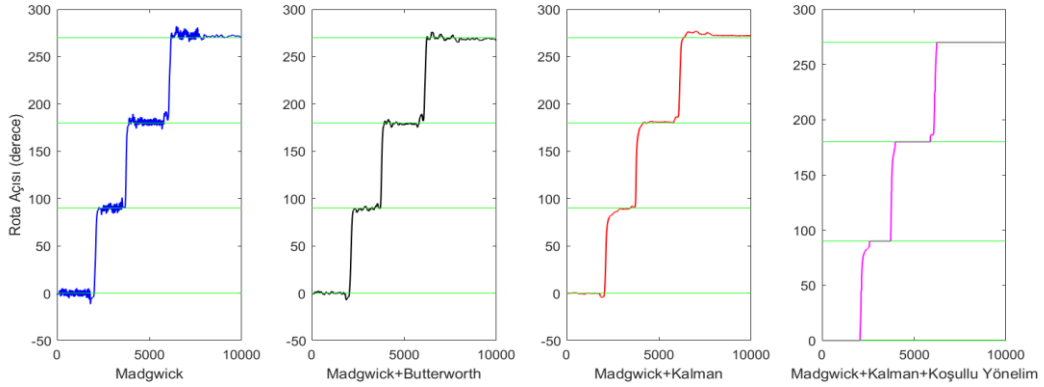
Şekil 4.9: 0°’de yürüme esnasında rota açısındaki değişim (0°’de ortalama değeri = 4.25°).

Düşünülen yöntem ise eğer maksimum el sapması $4^\circ - 5^\circ$ arasında ise bunu gidermek için koşullu bir algoritma sunulmuştur. Bu algoritmanın mantığı ise yönelim açısı bu özel açılardan 5° ’ye kadar fazla veya eksikse bu açıyı belirlenen özel açılara tamamlamaktır. Daha garanti olması için 10° ’de yapılabilirdi fakat aralık değeri ne kadar küçülürse yönelim açısına müdahale edilmesi o kadar azalır ve gerçek değerine yaklaşır. Yani sınır değeri 10° olursa 9° ’de giden biri 0° ’de gitmiş gibi olur. 10° ’lik sınır koşulunun fazla olduğu düşünülerek bu değer yerine maksimum sapma değerinden büyük, en küçük tam sayı değeri seçilmiştir. Bu algoritma eşitlikleri Eşitlik 4.26’da verilmiştir.

$$f(\phi) = \begin{cases} 0, & -5 \leq \phi \leq 5 \\ 45, & 40 \leq \phi \leq 50 \\ 90, & 85 \leq \phi \leq 95 \\ 135, & 130 \leq \phi \leq 140 \\ 180, & 175 \leq \phi \leq 185 \\ 225, & 220 \leq \phi \leq 230 \\ 270, & 265 \leq \phi \leq 275 \\ 315, & 310 \leq \phi \leq 320 \\ \phi, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.26)$$

Eşitlik 4.26’daki $f(\phi)$ fonksiyonunun sonucu rota açısını belirlemektedir. Madgwick ve Kalman Filtresi çıkışına bu algoritmanın da eklenmesiyle rota açısının son halinin

ve diğer algoritmalar tarafından hesaplanan rota açılarının karşılaştırılması Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10: Dört farklı yöntemle hesaplanan rota açısının değişimi.

Deney parkurundan alınan örneğe üç farklı algoritma uygulandıktan sonra standart sapmaları hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Kalman Filtresine koşullu yönelim algoritması da eklenince standart sapmanın 0° olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1: Üç farklı algoritma için standart sapma sonuçları.

Rota Açıları	Algoritmalar		
	Madgwick + Butterworth	Madgwick + Kalman	Madgwick+Kalman + Koşullu Yönelim
	Standart Sapma	Standart Sapma	Standart Sapma
0°	1.86°	1.14°	0°
90°	1.25°	1.23°	0°
180°	2.7°	1.01°	0°
270°	1.95°	1.42°	0°

5. ADIM TESPİTİ VE UYARLAMALI ADIM UZUNLUĞU TAHMİNİ

Yayalar için kapalı alanda konum tahmini, yayaların adım uzunluğu tahminine göre yapılıyorsa öncelikle yapılması gereken adım tespittir. Adım tespitin yapılmasının nedeni adım atma sonucu ivmede oluşan değişimlerin maksimum ve minimum değerlerinin adım uzunluğu hesabında kullanılmasıdır. Hangi adımda ne kadar değişim olduğunu belirlemek için adım tespiti gereklidir. Diğer bir nedeni ise yayanın vücudunun hareket ettiği fakat adım atmadığı durumları belirlemektir. Buna örnek olarak dönme hareketleri verilebilir.

IMU algılayıcısından alınan verilere göre adım algılama yöntemleri, algılayıcının insan vücudundaki konumlandırıldığı yere göre de değişebilir. İnsan vücudundaki konumlandırıldığı yerler el [22, 23] , bilek [24] , bel [25] , bacak [26] ve ayak [17] gibi bölgeler olabilir. Adım tespiti yapıldıktan sonra sırada adım uzunluğu tahmini gelmektedir. Adım uzunluğu tahmini için de farklı algoritmalar öngörülmüştür. Bu çalışmada ise uyarlamalı adım uzunluğu tahmin algoritması kullanılmıştır. Bunun nedeni, farklı adım hızlarında ve uzunluklarında da doğru adım uzunluğu tahmininin yapılabilmesidir.

5.1 Adım Tespiti

Adım tespiti, konum tahmininin doğru yapılabilmesi için büyük önem arz etmektedir. Fazla ya da eksik adım tespitleri doğal olarak hatalı konum tahminlerine neden olacaktır. Bu tespiti doğru bir şekilde yapabilen literatürde birkaç algoritma vardır. Bunlardan birincisi; ivme ölçerden alınan 3 eksen ham ivme verilerinin normu hesaplanıp gürültülü norm verilerinin de süzülmesi için bir alçak geçiren filtreden geçirildikten sonra norm değerlerinin sıfır geçiş noktaları, maksimum ve minimum değerleri belirlenmesi ile adım algılamanın yapılmasıdır [2, 27, 28]. İkincisi; bir PLL sistemde z ekseni yönündeki yani dikey eksenindeki ham ivme , a_z , önce bir faz algılayıcısına girmektedir. Bu faz algılayıcısı, ham ivme ile kontrollü sinüs işaret üreticiden çıkan işaretin fazını karşılaştırıp ham ivmenin fazına ayarlamaktadır (geri besleme). Ardından faz algılayıcısının çıkışından çıkan ham ivme, gürültülerin filtrelenmesi için alçak geçiren filtreden geçirildikten sonra kontrollü sinüs işaret üreticisine girmektedir. Filtrelenmiş ivmenin fazı ve frekansı

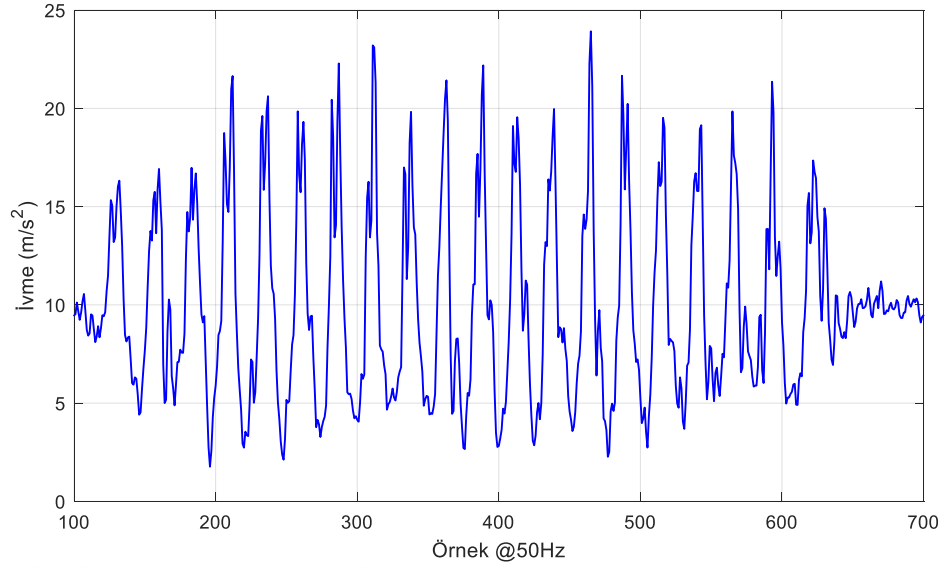
değiştirilmeden çıkışta bir sinüs işareti üretilir ve çıkış tekrardan faz algılayıcısının diğer girişine girer (İlk girişe ham ivme değerleri girmektedir.). Sinüs işaretinin tepe değerinin, ham ivme verisini düşeyde kestiği noktalara göre adım tespiti yapılmaktadır. Ayrıca adım frekansına bağlı olarak alçak geçiren filtrenin kesim frekansı değişeceğinden, adım frekansına göre kesim frekansını ayarlayan kompleks bir uyarlamalı filtre kullanılmıştır [29]. Diğer bir algoritma da 3D konum tahminleri için IMU algılayıcısının bacağa yerleştirilmesiyle yapılan adım tespiti için düşünülmüş algoritmadır [26]. Merdivenlerden inerken veya çıkarken sıfır geçiş noktalarının belirlenmesi prensibine göre düşünülen algoritma çok iyi sonuç vermemektedir. Bunun nedeni ise ham ivme verilerinin değişimi bazen sıfır çizgisinin üzerinde kalabilmektedir. Bu da hatalı adım tespitine yol açmaktadır. Bunun yerine düşünülen yöntem yunuslama (pitch) açısının değişimine göre adım tespitinin belirlenmesidir. Bu çalışmada iki boyutlu konum tahmini yapıldığından ve diğer algoritmalar çok daha karmaşık olduğundan sıfır geçiş noktalarının belirlenmesi prensibine göre çalışan algoritma kullanılmıştır. Maksimum ve minimum değerleri belirlendikten sonra bu iki değer arasındaki farkın mutlak değeri belli bir eşik değerini geçiyorsa bir adım atıldığı tespit edilmiş olur. Eşik değeri ise ortalama hızda giderken 3 eksenindeki ham ivmenin normunun minimum ve maksimum noktaları arasındaki farkın mutlak değerinin **yarısı** olarak alınmıştır. 3 eksenin normu Eşitlik 5.1'deki gibidir [2, 23].

$$a_{3D} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (5.1)$$

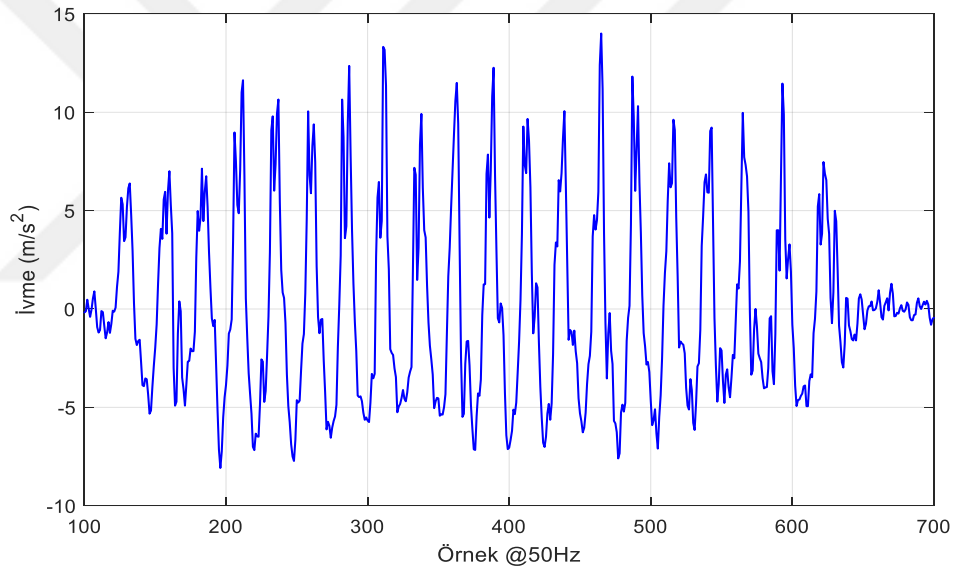
a_{3D} , üç eksenindeki ham ivmenin normu, a_x , a_y ve a_z sırasıyla x , y ve z eksenlerindeki ham ivme değerleridir. z eksenindeki ham ivmede yerçekimi bileşeni de olduğu için bu bileşenin giderilmesi için de Eşitlik 5.2'deki formül kullanılmıştır [2].

$$a_{3D} = a_{3D} - \frac{\sum_{i=1}^n a_{3D(i)}}{n} \quad (5.2)$$

Eşitlik 5.1 ve 5.2'deki formüller kullanılarak hesaplanan ham ivmenin normu Şekil 5.1'de, normun yerçekiminden arındırılmış hali de Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.1: Ham ivme normu.

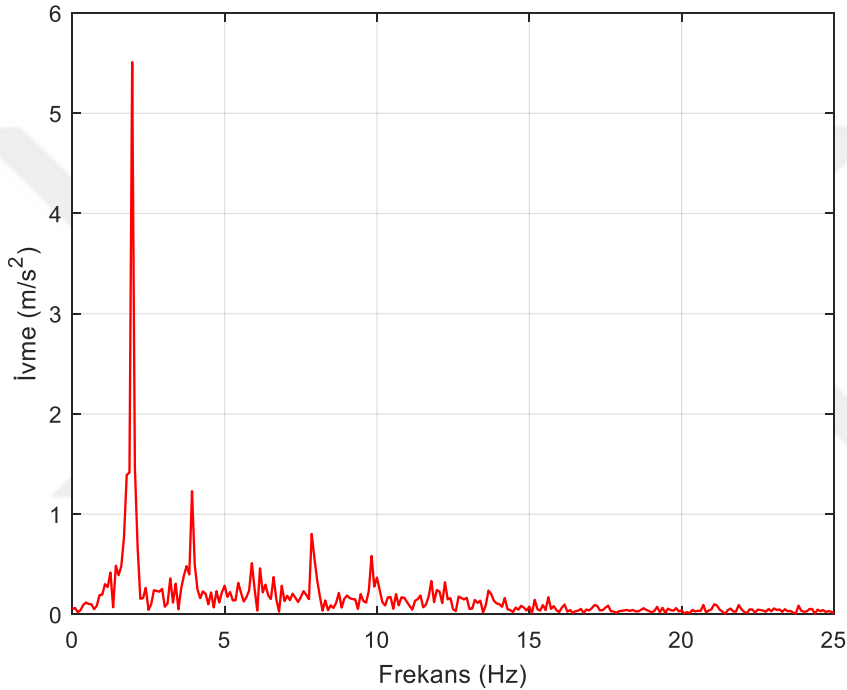


Şekil 5.2: Yerçekiminden arındırılmış ham ivme normu.

Ham ivme normu yerçekiminden arındırılıp sıfır geçiş noktaları ile maksimum ve minimum noktalarının tespitine dayanan adım tespit algoritması için uygun hale getirilmiş fakat üzerindeki gürültüler bu algoritmanın hatalı çalışmasına neden olacağı için bu gürültülerin süzülmesi gerekmektedir. Bu gürültülerin süzülmesi için alçak geçiren bir filtreye ihtiyaç duyulmuştur.

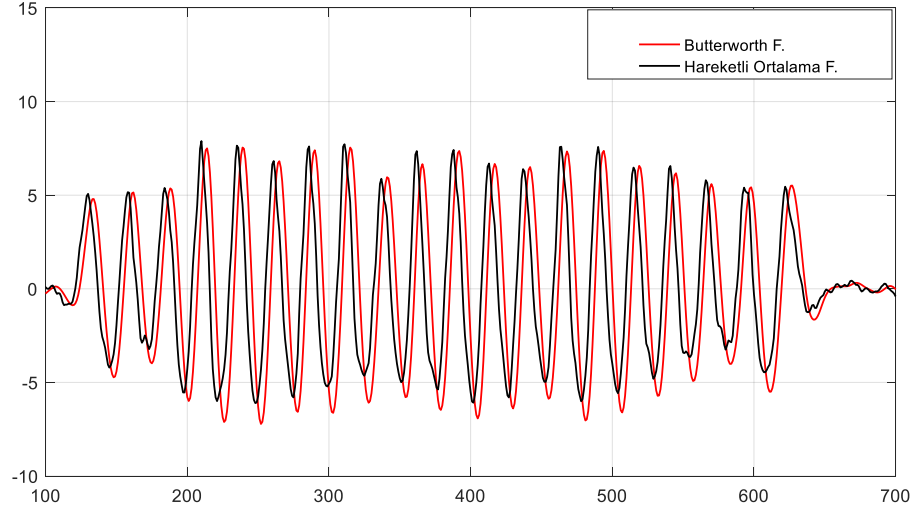
5.1.1 Gürültü analizi ve ham ivmenin filtrelenmesi

Ham ivme normu yerçekiminden arındırılıp algoritmaya uygun hale getirildikten sonra üzerindeki gürültüler yanlış adım tespitine neden olduğu için bu gürültülerin süzülmesi gerekmektedir. Bunun için de bir alçak geçiren filtre seçilmeden önce MATLAB ortamında FFT (Fast Fourier Transform) fonksiyonu ile Şekil 5.3'teki gibi ham ivmenin normunun frekansa bağlı değişim grafiği çıkartılmıştır. Böylece gürültülerin hangi frekanslarda olduğu tespit edilip kesim frekansının ona göre seçilmesi gerekmektedir [30].



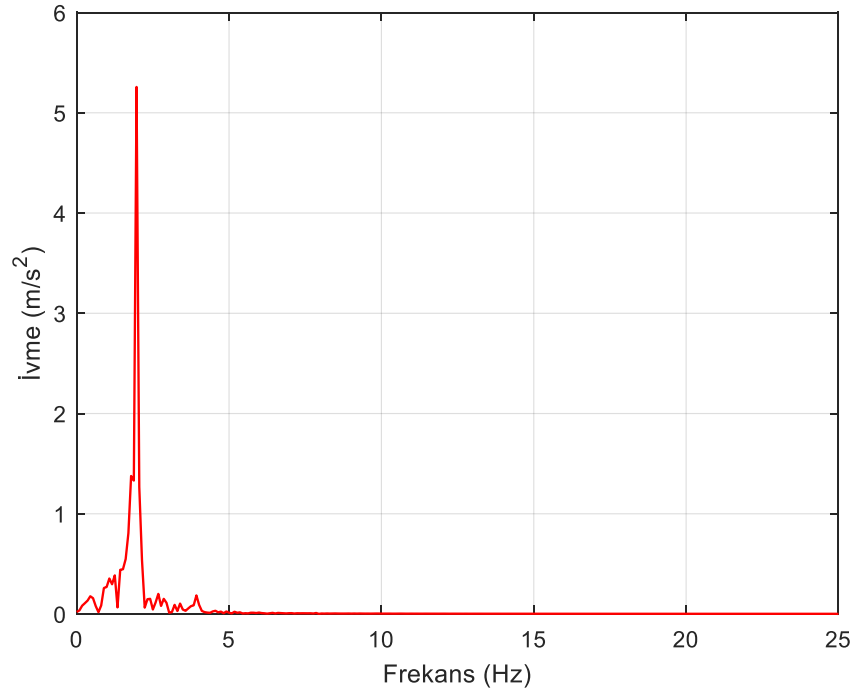
Şekil 5.3: Ham ivme normunun frekans ile değişimi.

Normal şartlarda bir insan yürüme hızının 2 Hz'e kadar olduğu kabul edilirse bu değere en yakın hızda yürüyerek bir örnek alınmış ve şekil 5.1'den itibaren tüm analizler bu örnek üzerinden yapılmıştır. Bu örnek yaklaşık 1.96 Hz olup Şekil 5.3'teki gibi frekans analizi yapılmış ve gürültülerin yaklaşık 2.5 Hz'den başladığı tespit edilmiştir. Bu gürültülerin filtrelenmesi için literatürde birkaç filtre kullanılmıştır. Bunlardan bazıları, 8 adımlı ortalama filtre , 4. dereceden Butterworth filtre ve uyarlamalı alçak geçiren filtrelerdir. Bu filtrelerden kesim frekansı 2.5 Hz seçilen ve katsayıları MATLAB programı tarafından hesaplatılan Butterworth filtre ile 8 adımlı hareketli ortalama filtresi denenmiş ve Şekil 5.4'teki gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.4: Ham ivme normunun Butterworth ve hareketli ortalama filtrelerden geçirilip karşılaştırılması.

Şekil 5.4'te de görüldüğü üzere Butterworth filtresi hareketli ortalama filtreye göre gürültüleri hem daha iyi filtrelemiş hem de daha az kırılma olmuştur. Bu yüzden çalışmada dördüncü derece Butterworth filtresi kullanılmıştır. Butterworth filtrenin gürültüleri nasıl filtrelediğini görmek içinse filtrelenmiş ivme normunun frekans cevabı Şekil 5.5'te verilmiştir.

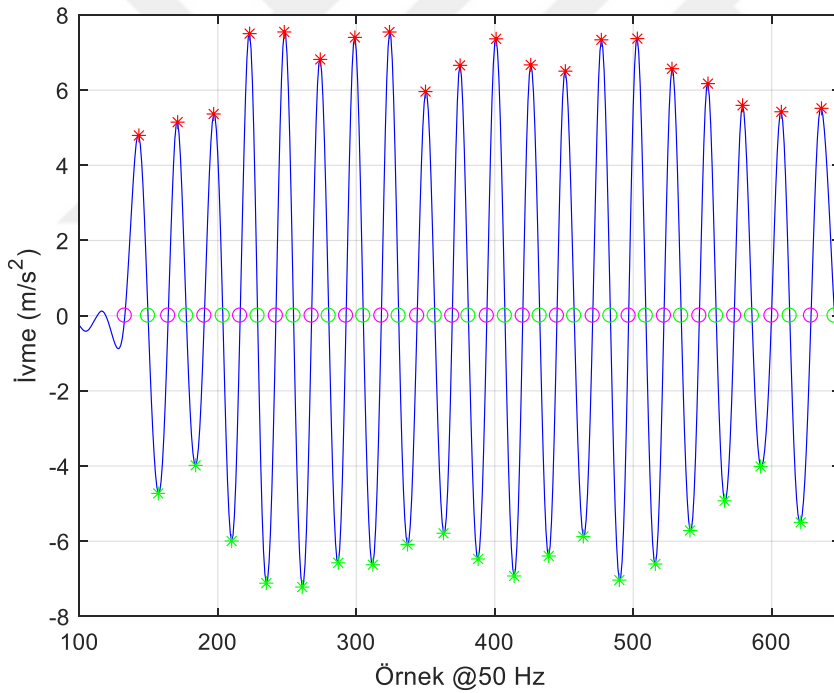


Şekil 5.5: Filtrelenmiş ivme normunun frekans ile değişimi.

Şekil 5.3'teki grafik ile 5.5'teki grafik karşılaştırıldığında kırılma oranı % 4.5 olarak hesaplanmıştır. İvme normu gürültülerden arındırıldıktan sonra adım tespit algoritmasında kullanılmaya hazır hale getirilmiştir.

5.1.2 Adım tespit algoritması

Adım tespiti için ivme normunun sıfır geçiş noktaları ile minimum ve maksimum değerlerinin belirlenmesi prensibine dayanan algoritma kullanılmıştır. Bu algoritmanın çalışması, filtrelenmiş ivmenin norm değerinin pozitif bölgeden negatif bölgeye veya negatif bölgeden pozitif bölgeye geçerken x eksenini kestiği noktaları sıfır geçiş noktaları olarak belirledikten sonra eş zamanlı olarak minimum ve maksimum değerlerini de tespit edip bu değerlerin farkının mutlak değerinin belli bir eşik değerini geçip geçmediğinin tespit edilmesi prensibine dayanır [2]. Eğer geçiyorsa adım atılmış sayılır ve adım sayısı bir artırılır. Bu algoritmanın çalışmasının daha iyi anlaşılması için Şekil 5.6'da adım tespitinin grafiği verilmiştir.

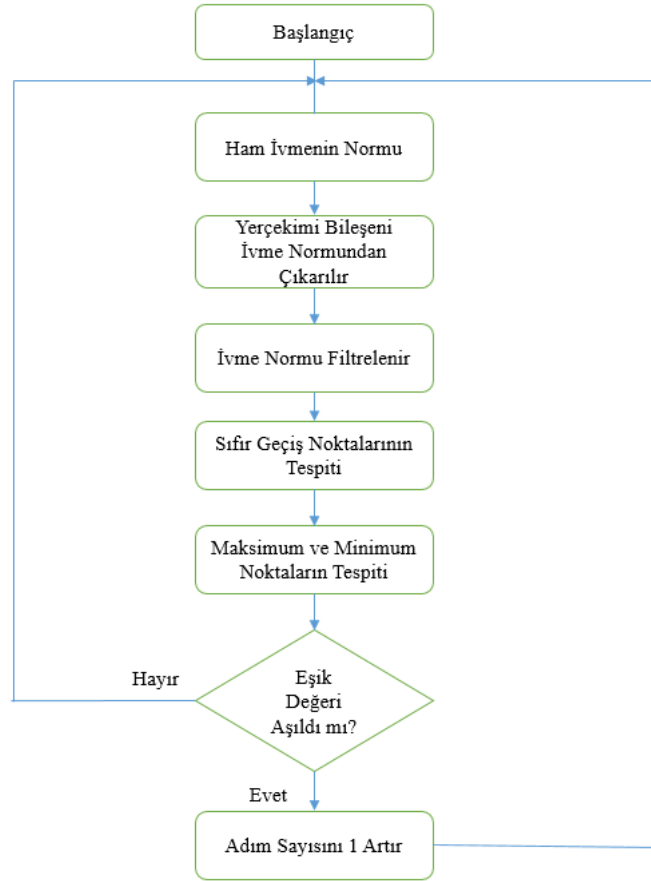


Şekil 5.6: Adım tespiti.

Bu algoritma kullanılarak adım tespiti yapılmış ve %100 başarı elde edilmiştir. Sadece yürüme esnasında herhangi bir engele takılma, çukura gireme veya hızlı bir şekilde durma gibi durumlarda elin sallanmasından dolayı adım sayısında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Düzgün gidildiğinde ise çok başarılı sonuçlar alınmıştır.

Çizelge 5.1: Adım tespit sonuçları

Gerçek Adım Sayısı (Adet)	Tespit Edilen (Adet)	Adım Frekansı (Hz)	Hata Oranı (%)
20	20	1.96	0
40	40	1.95	0
82	82	1.692	0
171	171	1.512	0



Şekil 5.7: Adım tespiti akış diyagramı.

5.2 Uyarlamalı Adım Uzunluğu Tahmini

Yayalarda konum tahmininin bir diğer önemli kısmı ise adım uzunluğu tahminidir. Adım uzunluğunun yüksek doğrulukta hesaplanması büyük önem arz etse de adım uzunluğunu tama olarak hesaplamak neredeyse imkansızdır. Bunun nedenleri ise algılayıcı sadece ivme verileri ürettiği için ve ivme verisinden uzunluk hesabı yapılabilmesi için zamana göre ardışıl iki kere integral alınması gerekir. Sayısal ortamda çalışılması yani integral işleminin sürekli zamanlı integral hesabına göre yapılmaması zaten en başta hataların oluşmasına neden olacaktır. Hatalara sebep olan diğer faktörler ise algılayıcı verilerindeki gürültüler, ölçüm hataları ve örnekleme

sıklığının düşük olmasıdır (50 Hz). Bu nedenle adım uzunluğunu hem kolay yoldan hesaplayacak hem de hata oranı çok fazla olmayacak ampirik formüller üzerinde çalışılmıştır. Bunun en yaygın olanı Eşitlik 5.3'te verilen Weinberg'in önerdiği formüldür [31]. Bu yöntem, z eksenindeki doğrusal ivmenin maksimum ve minimum noktalarının farkına göre uzunluk hesabı yapan doğrusal olmayan bir formüle dayanmaktadır.

$$L \approx k \times \sqrt[4]{A_{max} - A_{min}} \quad (5.3)$$

Eşitlik 5.3'te verilen L , k , A_{max} ve A_{min} sırasıyla adım uzunluğu, adım uzunluğu sabiti, dikey eksenindeki maksimum ve minimum ivme değerleridir. Weinberg formülüne benzer bir yöntem de Eşitlik 5.4'te verilmiştir. Bu yöntem, ivme normunun maksimum ve minimum değerlerinin farkına göre uzunluk hesabı yapmaktadır [2].

$$L \approx k \times \sqrt[4]{a_{3D,max} - a_{3D,min}} \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.4'te verilen $a_{3D,max}$ ve $a_{3D,min}$ sırasıyla ivme normunun maksimum ve minimum değerleridir. Weinberg modelinden biraz daha yüksek doğrulukta hesap yapan formül ise Eşitlik 5.5'te verilen Kim'in önerdiği ampirik formüldür. Bu formül de lineer değildir [32].

$$L = k \times \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^M |a_i|}{M}} \quad (5.5)$$

Eşitlik 5.5'te verilen M ve a_i sırasıyla her bir adımda alınan toplam örnek sayısı ve bu örnekte i . ivme değeridir. Bir diğer formül de adım frekansına bağlı Tian'nın önermiş olduğu formüldür. Bu formül de Eşitlik 5.6'daki gibidir [33].

$$L = k \times h \times \sqrt{f_s} \quad (5.6)$$

Eşitlik 5.6'da verilen h ve f_s sırasıyla bir kişinin yüksekliği ve adım frekansdır. Bu formüller incelendiğinde hepsinde de adım sabiti olan k ifadesi bulunmaktadır. Bu sabit kişinin adım uzunluğu ya da adım hızına bağlı olarak değişebilmektedir. Yani kişiye özgü de denebilir. Verilen yöntemleri kullanmadan önce k sabiti bir test ile hesaplanmalıdır. Bu test ise belirli bir uzunluktaki bir yolda test yürüyüşü yapılarak gerçekleşir. Test sonunda formülde k sabiti yanındaki değerler hesaplanıp bunların toplamının alınan toplam yol uzunluğuna bölünmesiyle k sabiti değeri bulunabilir. Fakat daha önce de belirtildiği üzere bu k sabiti kişinin adım uzunluğu ve adım hızına göre değişebildiğinden cihazı farklı kişiler kullandığında veya farklı hızlarda

adım atıldığında hatalı sonuçlar elde edilir. Bu nedenle kişinin adım uzunluğu ve adım hızından çok fazla etkilenmeyen bir yöntem araştırılmıştır. Ho ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışma incelenmiş ve bizim çalışmamıza uygun olduğu düşünülmüştür [22]. Onların yaptığı çalışma, akıllı telefonlar için uyarlamalı adım uzunluğu tahmin algoritması geliştirmek üzerinedir. Bizim çalışmamızın mantığı da akıllı telefonların çalışma mantığına benzer olduğu için bu yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemin amacı, daha önceki yöntemlerde kullanılan k sabiti yerine her adımda adım hızına göre sürekli kendini ayarlayan uyarlamalı bir K_{vel} katsayısı elde etmektir. Böylelikle tüm adımlar için kullanılabilecek bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin elde edilişi ise öncelikle dört erkek ve dört kadından oluşan bir deney grubu oluşturulmuştur. Bu deneydeki her bir kişi, uzunluğu 10 m, 20 m, 30 m ve 40 m olan dört farklı düz yolda yavaş, orta ve hızlı yürüme hızlarında yürütülmüştür. Buradan elde edilen sonuçlar ile ortalama adım hızının bir polinomal fonksiyonu olan K_{vel} katsayısı ampirik olarak çıkarılmıştır. Öncelikle 3-eksen ham ivme verileri algılayıcı referans sisteminden dünya referans sistemine dönüştürülmüştür. Ham ivme vektörü, $\vec{V}_{acc}$, ve yönelim açısı vektörü, $\vec{V}_{angle}$, Eşitlik 5.7'deki gibidir.

$$\vec{V}_{acc} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} ; \quad \vec{V}_{angle} = \begin{bmatrix} \phi \\ \psi \\ \theta \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Eşitlik 5.7'de verilen ϕ, ψ ve θ sırasıyla rota (yaw), yuvarlanma (roll) ve yunuslama (pitch) açılarıdır.

$T_c = \cos(\vec{V}_{angle})$, $T_s = \sin(\vec{V}_{angle})$ yani $T_c = [c_x \ c_y \ c_z]^T$, $T_s = [s_x \ s_y \ s_z]^T$ olduğunu farz edersek rotasyon matrisi, R_{ZYX} Eşitlik 5.8'deki gibi hesaplanabilir.

$$R_{ZYX} = \begin{bmatrix} c_y \times c_z & s_y \times s_x \times c_z - s_z \times c_x & s_y \times c_x \times c_z + s_z \times s_x \\ c_y \times s_z & s_y \times s_x \times s_z + c_z \times c_x & s_y \times c_x \times s_z - c_z \times s_x \\ -s_y & c_y \times s_x & c_y \times c_x \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

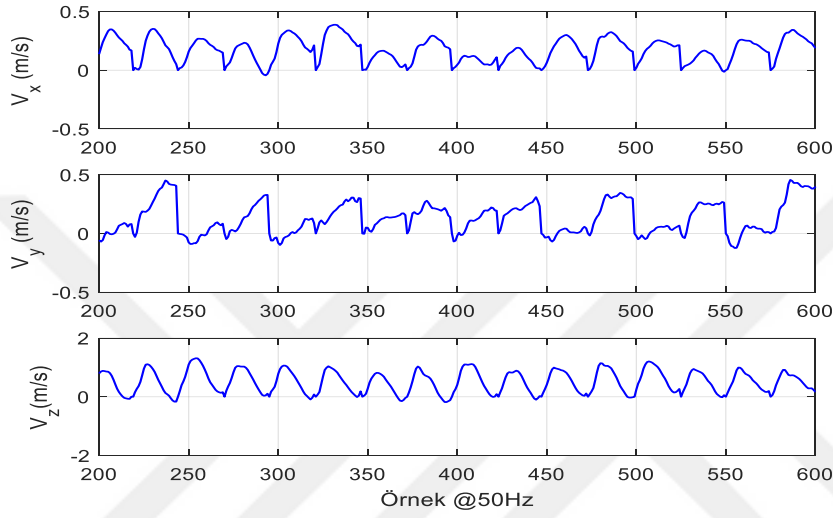
Rotasyon matrisi hesaplandıktan sonra algılayıcı referansından dünya referansına geçiş Eşitlik 5.9'daki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} a_{rX} \\ a_{rY} \\ a_{rZ} \end{bmatrix} = R_{ZYX} \times \vec{V}_{acc} \quad (5.9)$$

Eşitlik 5.9'da verilen a_{rX} , a_{rY} ve a_{rZ} sırasıyla dünya referans sisteminde x, y ve z eksenlerindeki ham ivme değerleridir. Bu ivme değerleri kullanılarak 3 eksendeki ortalama hızlar, $\bar{v}_{stepX}$, $\bar{v}_{stepY}$, $\bar{v}_{stepZ}$ Eşitlik 5.10'daki gibi zamana göre iki kere integral alınarak bulunur.

$$\begin{aligned}\bar{v}_{stepX} &= mean \left(\int a_{r_{stepX}}(t)dt \right) \\ \bar{v}_{stepY} &= mean \left(\int a_{r_{stepY}}(t)dt \right) \\ \bar{v}_{stepZ} &= mean \left(\int a_{r_{stepZ}}(t)dt \right)\end{aligned}\quad (5.10)$$

Her bir ekseninde elde edilen hızların zamanla nasıl değiştiğinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 5.8’deki grafik verilmiştir.



Şekil 5.8: 3-eksende hesaplanan hızların zamanla değişimi.

K_{vel} katsayısını bulmak için gerekli olan 3-eksendeki ortalama hızların genliği Eşitlik 5.11’deki gibidir [22].

$$\bar{v}_{step} = \sqrt{\bar{v}_{stepX}^2 + \bar{v}_{stepY}^2 + \bar{v}_{stepZ}^2} \quad (5.11)$$

Ortalama hızların genliği bulunduktan sonra Eşitlik 5.12’de yerine konarak K_{vel} değeri hesaplanmıştır.

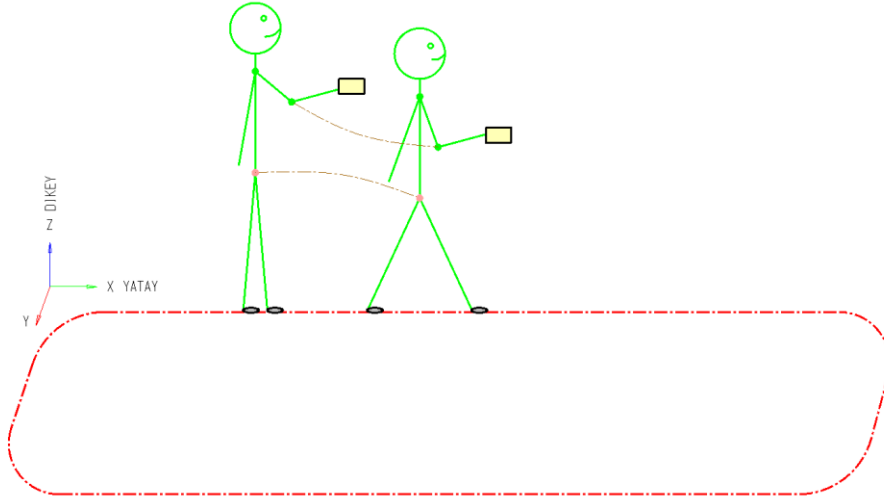
$$K_{vel} = 0.68 - 0.37 \times \bar{v}_{step} + 0.15 \times \bar{v}_{step}^2 \quad (5.12)$$

Eşitlik 5.4’te verilen formülde k sabiti yerine K_{vel} değeri yazılarak Eşitlik 5.13’teki formül elde edilmiş ve bu formüle göre adım uzunluğu tahmini yapılmıştır.

$$L_{step} = K_{vel} \times \sqrt[4]{a_{3D,max} - a_{3D,min}} \quad (5.13)$$

Uyarlamalı adım uzunluğu algoritması kullanılıp gerçek ortamda da denenmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yalnız bu algoritma ile çalışırken tüm hesaplar 3-eksendeki ivme verilerine göre yapıldığından elde tutulan cihazın yürüme hareketinde vücuda uyumlu olarak düzgün bir şekilde ivmelenebilmesi için el serbest tutulmalıdır. Eğer

ivmelenmesine müdahale edilirse sonuçlar da hatalı olacaktır. Şekil 5.9’da bir yayanın deney parkurundaki yürüme hareketi verilmiştir.



Şekil 5.9: Bir yayanın yürüme hareketi.

Uyarlamalı adım uzunluğu algoritması kullanılarak 20 m ve 40 m düz bir yolda elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.2’de, 5.3’te ve 5.4’te verilmiştir. Deneyler bacak uzunluğu yaklaşık 1.05 metre, toplam boy uzunluğu ise 1.89 metre olan kişi tarafından yapılmıştır.

Çizelge 5.2: 20 metrelik düz bir yolda elde edilen deney sonuçları.

Deneme	Adım Sayısı	Ortalama Adım Uzunluğu Tahmini (metre)	Ortalama Adım Frekansı (Hz)	Toplam Adım Uzunluğu Tahmini (metre)
1	29	0.673	1.29	19.52
2	26	0.765	1.432	19.89
3	25	0.77	1.52	19.28
4	24	0.82	1.61	19.7
5	23	0.86	1.73	19.76
6	21	0.925	1.964	19.43

Çizelge 5.3: 40 metrelik düz bir yolda elde edilendeney sonuçları.

Deneme	Adım Sayısı	Ortalama Adım Uzunluğu Tahmini (metre)	Ortalama Adım Frekansı (Hz)	Toplam Adım Uzunluğu Tahmini (metre)
1	49	0.795	1.547	38.976
2	48	0.818	1.627	39.245
3	46	0.863	1.786	39.675
4	44	0.888	1.825	39.089
5	43	0.894	1.865	38.459
6	42	0.919	1.904	38.604

Çizelge 5.4: Adım tespit ve toplam adım uzunluğu tahmin hataları.

Deney	Adım Tespit Hatası (%)		Toplam Adım Uzunluğu Tahmin Hatası (%)	
	20 metre	40 metre	20 metre	40 metre
1	0	0	2.4	2.56
2	0	0	0.55	1.888
3	0	0	3.6	0.813
4	0	0	1.5	2.278
5	0	0	1.2	3.853
6	0	0	2.85	3.49
Ort. Hata (%)	0	0	2.02	2.48

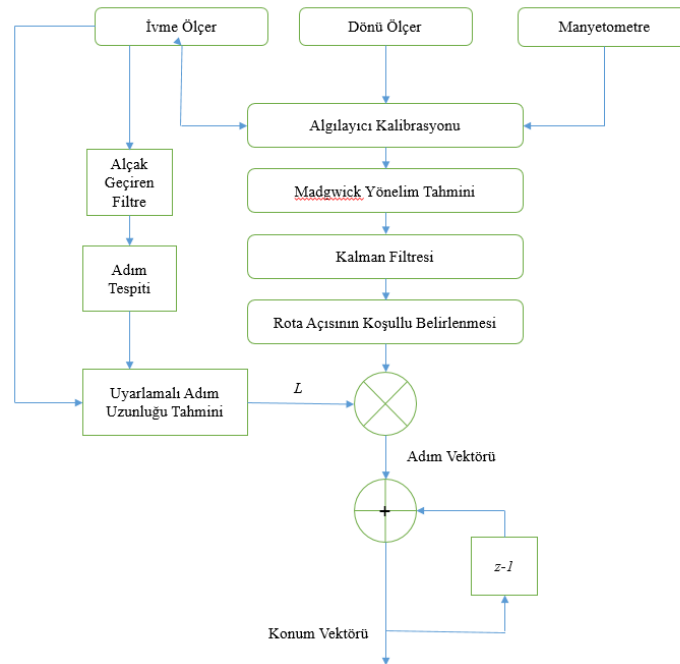
6. KAPALI ALANDA KONUM TAHMİNİ

Kapalı alanda konum tahmini için sırasıyla yönelim tahmini, adım tespiti ve adım uzunluğu tahmini yapılmıştır. Adım tespiti ve adım uzunluğu tahmini ile aslında konum vektörünün uzunluğu hesaplanmaktadır. İki boyutlu konum tahmini yapıldığı için bu vektörün x ve y eksenlerindeki bileşenlerini bulmak yeterli olacaktır. Bu bileşenler Eşitlik 6.1 ve 6.2'deki formüllerle kolayca bulunabilir [34].

$$X_{n+1} = X_n + L \times \cos(\phi) \quad (6.1)$$

$$Y_{n+1} = Y_n + L \times \sin(\phi) \quad (6.2)$$

L , X_n , Y_n ve ϕ sırasıyla tahmini adım uzunluğu, x ekseninde alınan yol, y ekseninde alınan yol ve rota açısıdır.

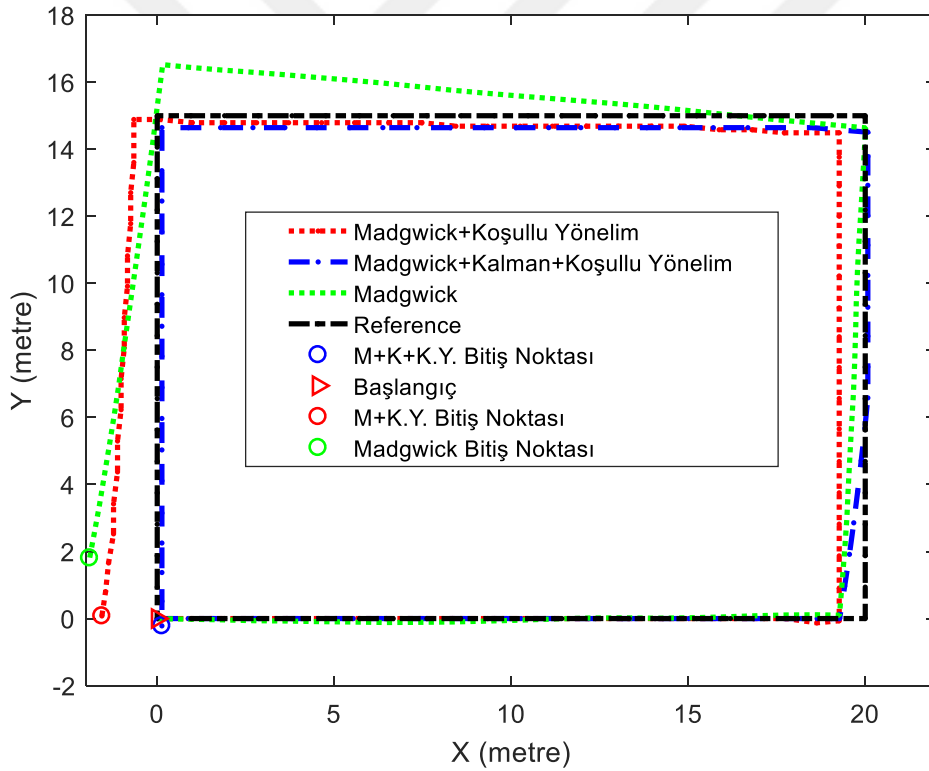


Şekil 6.1: Kapalı alanda konum tahmininin akış diyagramı.

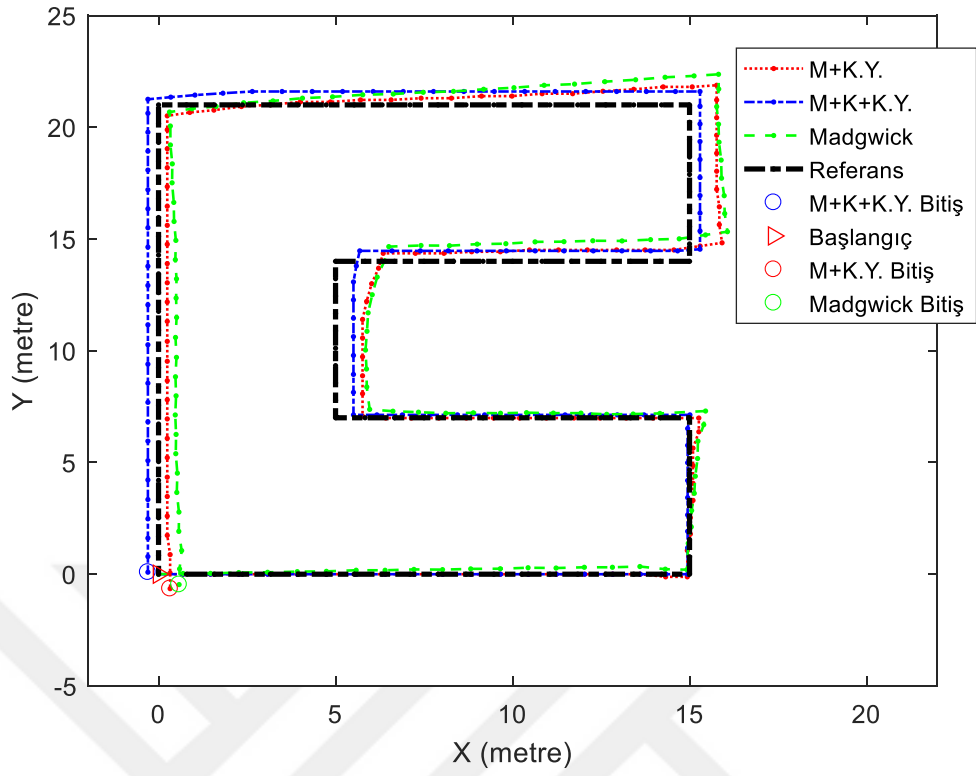
Şu ana kadar verilen formüllerin çoğu kullanılarak Arduino'nun sunmuş olduğu derleyicide kodlar yazılmış ve Arduino Due kartına gömülmüştür. Örnek alma işlemi Arduino Due kartı ile laptop arasında seri haberleşme ile sağlanmış, algılayıcıdan

50 Hz ile alınan bilgiler Due kartından laptopa 115200 bit/s hızı ile gönderilmiştir. Öncelikle laptopa gönderilen ham veriler MATLAB’da yazılan programla işlenmiş ve konum grafikleri çıkartılmıştır. İstenilen sonuçlar elde edildikten sonra bu sefer de cihaz üzerine algoritmalar gömülmüş, alıcı-verici (transceiver) eklenmiş ve kablosuz haberleşme ile konum bilgileri MATLAB’a aktarılıp MALTLAB’da sadece konum grafikleri çıkarılmıştır.

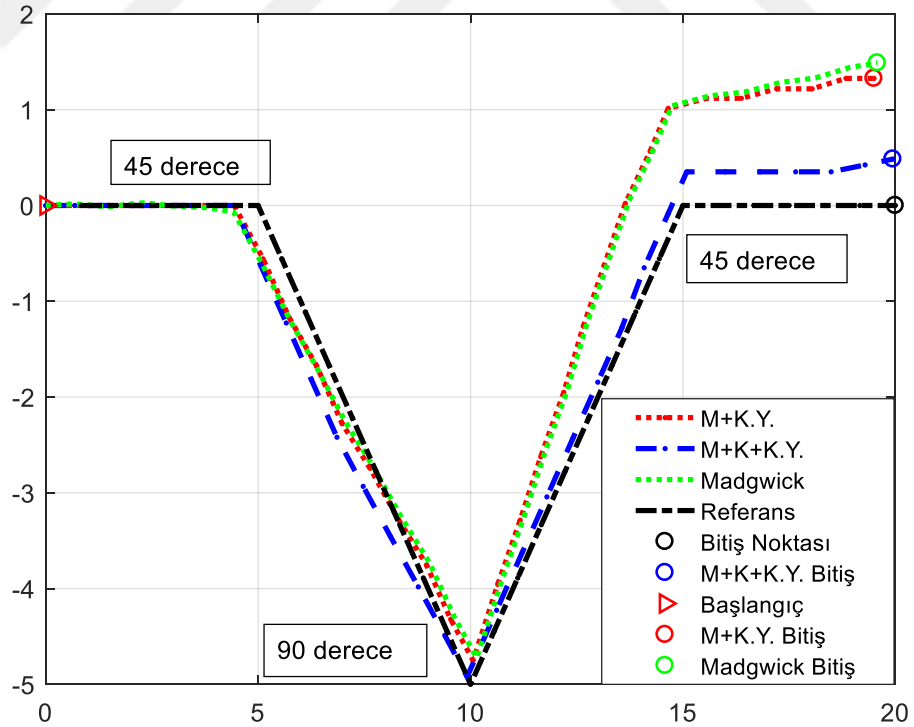
Konum tahmini için özel olarak üç ayrı parkur belirlenmiştir. Bunlar: dikdörtgen (1) , labirent veya koridor tipi (2) ve son olarak 45° ve 90° zik-zak (3) deney parkurlarıdır. Her bir parkurda alınan örneklere de üç farklı algoritma uygulanarak grafikleri çizdirilmiş ve hatalar hesaplanmıştır. Bu parkurlardan elde edilen konum grafikleri Şekil 6.2, 6.3 ve 6.4’teki gibidir.



Şekil 6.2: Dikdörtgen deney parkuru (20 m x 15 m).



Şekil 6.3: Labirent veya koridor tarzı deney parkuru.



Şekil 6.4: 45° ve 90° zikzak deney parkuru.

Üç farklı deney parkurundan elde edilen sonuçlara üç farklı algoritma uygulanarak grafikleri çıkarılmış ve hata hesapları yapılarak karşılaştırılmıştır. 1. deney

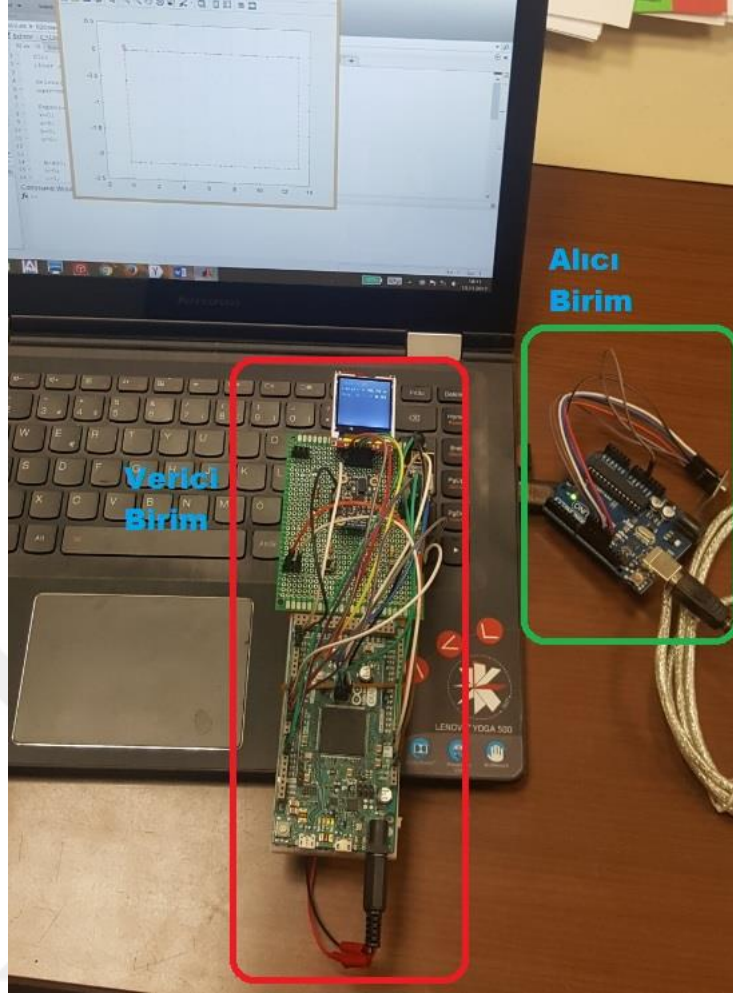
parkurundan elde edilen sonuçlara göre bir karşılaştırılma yapılacak olursa sadece Madgwick Algoritması uygulanarak % 1.94 mesafe hatası ve % 3.57 konum sapması, Madgwick + Koşullu Yönelim algoritması uygulanarak %1.94 mesafe hatası % 2.235 konum sapması ve Madgwick + Kalman + Koşullu Yönelim algoritması uygulanarak % 1.94 mesafe hatası ve % 0.364 konum sapması elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere yönelim algoritmaları mesafe hesaplamasında değil konum sapma hesabında etkilidir. Yani başlangıç noktası ile bitiş noktası arasındaki sapma ne kadar az ise kullanılan algoritma o kadar iyidir. Sonuçlara bakıldığında ise Koşullu Yönelim algoritması Kalman ile kullanıldığında çok daha etkili olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan hareketle cihazda Madgwick + Kalman+ Koşullu Yönelim algoritması kullanılmıştır. Sonuçların tamamı ise Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Konum tahmin deneyinin sonuçları.

Deney Parkuru	Algoritmalar	Gerçek Mesafe (m)	Tahmin Edilen Mesafe ve Hata (m) - (%)	Konum Sapması (m) – (%)
1	Madgwick	70	68.64 – 1.94	2.63 – 3.757
2		92	92.34 – 0.42	0.744 – 0.808
3		24.14	24.06 – 0.331	1.547 – 6.408
1	Madgwick+Koşullu Yönelim	70	68.64 – 1.94	1.565 – 2.235
2		92	92.34 – 0.42	0.725 – 0.788
3		24.14	24.06 – 0.331	1.42 – 5.88
1	Madgwick+Kalman +Koşullu Yönelim	70	68.64 – 1.94	0.255 – 0.364
2		92	92.34 – 0.42	0.313 – 0.34
3		24.14	24.06 – 0.331	0.487 – 2.017

7. TASARLANAN CİHAZ VE ÖZELLİKLERİ

Yüksek doğruluğa sahip konum tahmini için farklı algoritmalar denendikten sonra en uygun olanları seçilmiş vebu algoritmaları kullanarak tam anlamıyla yayalarda konum tahmini yapan bir cihaz tasarımı yapılmıştır. Akıllı telefonlar gibi elde taşınabilen cihazlarla konum tahmini yapılması üzerine çalışıldığı için elde taşınabilecek şekilde bir cihaz tasarımı yapılması gerekmektedir. Bunun için hem boyutları elde taşınmaya uygun hem de işlem hızı ve kapasitesi, kullanılan algoritmaları 50 Hz örnekleme frekansında işlemeye elverişli bir mikrodenetleyici seçilmesi önemlidir. Bunun için bir araştırma yapılmış ve bu şartlara en uygun kartlardan biri olan Arduino Due kartı seçilmiştir [35] . Arduino Due kartı cihazda master birimi olarak görev yapmakta ve çevre birimlerden okunan verileri işleyip amaca uygun veriler üretmektedir. Bu çevre birimlerden biri olan BNO055 algılayıcısından alınan veriler ile konum tahmini yapılmaktadır. İşlenen verilerin gösterilmesi için 4D Systemsfirmasının üretmiş olduğu 1.44 inchlik akıllı LCD modül kullanılmıştır [36]. Ayrıca konum bilgilerini bilgisayara aktarmak için de alıcı-verici seçimi yapılmış piyasada fiyatı, veri hızı ve veri gönderme menzili en uygun alıcı-verici modüllerinden biri olan NRF24L01 2.4GHz RFmarka alıcı-verici modülü seçilmiştir [37]. Burada elde tutulan cihaz bir verici gibi düşünülebilir. Verilerin bilgisayara aktarımı yapılabilmesi için de bir alıcı birimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç da çok fazla işlem hızı ve işlem kapasitesi gerektirmeyen fiyatı ve boyutları uygun Arduino Uno kartı ile karşılanmıştır. Konum tahmin sisteminde kullanılacak malzemeler ve cihazlar belirlendikten sonra bunların bir platformda birleştirilmesi gerekmektedir. Bunun için çift taraflı bir pertinaks kullanılmış algılayıcı, RF alıcı-verici ve akıllı LCD bunun üzerine lehimlenmiştir. Bu kartın üzerine gerekli olan direnç gibi devre elemanlarının yanında kontrol amaçlı butonlar da eklenmiştir. Tüm bu birleştirme işlemi gerçekleştikten sonra çevre birimdeki aygıtlar ile kontrol kartı arasında ve cihaz 9 V şarj edilebilir bir pille beslenmiştir.



Şekil 7.1: Kapalı alanda konum tahmin sistemi.

7.1 Alıcı Birim

Alıcı birim Arduino Uno ve NRF24L01 2.4GHz RF marka bir alıcı-verici (transciever) modülünden oluşmaktadır. Arduino Uno kartında mikrokontrolcü olarak ATmega328 kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyicinin özellikleri Çizelge 7.1’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 7.1: ATmega328 işlemcisinin özellikleri.

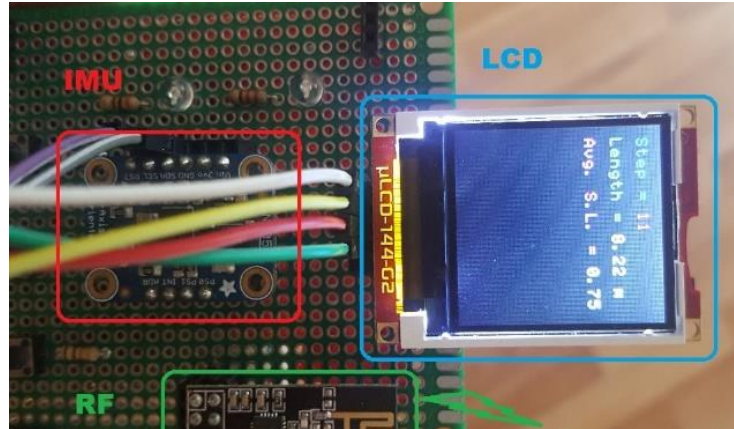
Atmega328	32 kB Flash Bellek / 16 MHz
	2 kB SRAM
	1 kB EEPROM
	UART, I ² C ve SPI

Arduino Uno kartında aynı zamanda 14 G/Ç dijital pin bulunmaktadır; bu pinlerden 6’sı PWM pini olarak kullanılabilir. 6 adet de ADC giriş pini bulunmaktadır.

NRF24L01 2.4GHz RF marka kablosuz modülü ise 250 kbps, 1 Mbps ve 2 Mbps gibi hızlarda veri iletebilir. Uygulamada ise verilerin daha net gönderilebilmesi açısından 250 kbps hızı seçilmiştir. Ayrıca ana kontrolcü ile haberleşmesi SPI protokolü ile sağlanmaktadır. Tercih edilmesindeki en önemli özellikleri ise ultra düşük güç tüketimi, fiyatının çok ucuz olması ve menzilin açık alanda 250 metreye kadar olmasıdır [36].

7.2 Verici Birimi

Verici birimi aslında elle taşınan konum tahmin cihazıdır. Bu cihaz bir mikrodenetleyici master kart ile IMU algılayıcı, akıllı LCD ekran ve RF çevre birimlerinden oluşmaktadır. Mikrodenetleyici kart seçilirken öncelikle işlem hızı, flash belleği ve boyutları dikkate alınmıştır. Yapılan araştırmalar sonucu elde tutmaya en uygun kartlardan biri olan Arduino Due kartı seçilmiştir. Bu kart üzerinde Atmel firmasının ürettiği SAM3X8E ARM Cortex-M3 temelli 32 bitlik bir mikrodenetleyici bulunmaktadır. Yayalar için konum tahmini üzerine çalışmalar yapan bir yayında da bu kartın kullanıldığı tespit edilmiştir. Tüm bunlar değerlendirildiğinde bu kartın kullanımına karar verilmiştir. Kart alındıktan sonra üzerinde çalışmalar yapılmış ve Arduino'nun kendi derleyicisi ile kodlar derlenerek karta yüklenmiştir. Şekil 7.2'de cihazın çevre birimi görülmektedir.



Şekil 7.2: Konum tahmin cihazının çevre birimi.

SAM3X8E ARM Cortex-M3 mikrodenetleyicisinde, 54G/Ç dijital pin, 12 ADC pin, 2 DAC pini ve 12 PWM pini bulunmaktadır. Bu denetleyicinin tüm bacakları dış kesme özelliği taşımaktadır.

Çizelge 7.2'de SAM3X8E ARM Cortex-M3 mikrodenetleyicisinin özellikleri verilmiştir [35].

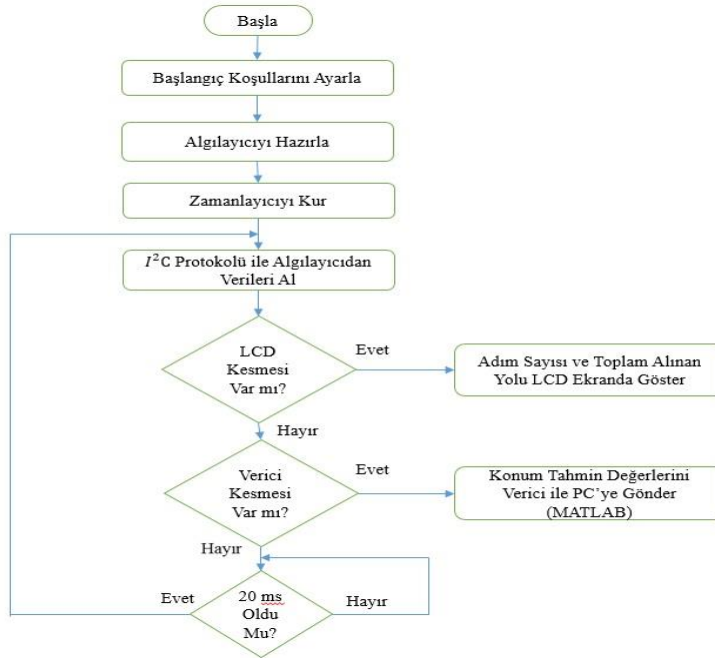
Çizelge 7.2: SAM3X8E ARM Cortex-M3 işlemcisinin özellikleri.

SAM3X8E ARM Cortex-M3	512 kB Flash Bellek / 84 MHz / 32 Bit
	96 kB SRAM
	4 kB NFC (NAND Flash Controller)
	UART, I ² C ,SPI ,SDIO ve TWI

Akıllı LCD ise 128x128 çözünürlüğüne sahip, 65 K gerçek canlı renk sunabilen 1.44 inchlik bir modüldür. Ayrıca üzerinde 10 kB flash bellek ve 510 B RAM'a sahip bir işlemci bulunmaktadır. Bu LCD ekrana bilgilerin aktarımı UART ile yapılmakta olup default durumda baud rate 9600 bit/s ile veri aktarımı yapılabilir. İstendiğinde ise bu LCD'ler için geliştirilmiş ara yüz ile baud rate ayarı yapılabilir [36].

7.3 Yazılım Algoritması

Taşınabilir gömülü sistem içindeki yazılım Arduino'nun kendi sunmuş olduğu derleyicide C dilinde yazılmıştır ve cihaz üzerindeki işlemciye gömülmüştür. Taşınabilir cihazın çalışma mantığı kabaca akış diyagramı Şekil 7.3'teki gibidir.



Şekil 7.3: Tasarlanan cihazın çalışma mantığı.

8. SONUÇ

Bu çalışmada öncelikle elde taşınabilen cihaz üzerindeki 3-eksen ivmeölçer, 3-eksen dönü ölçer ve 3-eksen manyetometreden oluşan akıllı IMU algılayıcısından alınan ham verileri Madgwick Algoritması ile toplayıp bir yönelim hesabı yapılmıştır. Ham verilerin Madgwick Algoritmasında işlenmesi ile elde edilen yönelim ile mutlak yönelim hesabı yapan akıllı algılayıcının yönelimleri karşılaştırılmış ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. Statik durumda Madgwick Algoritması ile güzel sonuçlar elde edilirken yürüme esnasında adım atma sonucunda oluşan sallanmalar ile dinamik gürültülerin olduğu görülmüştür. Bu gürültüler konum tahmin hesabı yaparken birikimli olarak hataları artırdığından önemli derecede konum sapma hatalarına neden olduğu gözlemlenmiştir.

Yönelim tahmini yaparken gürültülerden kaynaklanan hatalar farklı algoritmalar ve filtreler kullanılarak giderilmeye çalışılmıştır. Madgwick Algoritmasıyla hesaplanan yönelim açıları üzerine binen elektriksel ve dinamik gürültülerin filtrelenmesi için Butterworth Filtre ve Kalman Filtresi karşılaştırılmış ve Kalman'ın daha başarılı olduğu görülmüştür. Madgwick ve Kalman'ın birlikte kullanılması ile elde edilen yönelimde de bu sefer el sapmasından kaynaklanan hataların olduğu gözlemlenmiştir. Filtreleme işlemi başarıyla yapılmasına rağmen elin yeterince hassas olmaması ve yürüme esnasında sapmaların olması farklı bir yöntemin düşünülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Düşünülen bu yöntem ise rota açısının koşullu belirlenmesidir. Bu yöntem, açısı sürekli değişmeyen ve dönme açıları 90° ve 45° 'nin katları şeklinde olan labirent tarzı yollar için düşünülmüştür. En sonunda da Madgwick , Kalman ve koşullu yönelim algoritmaları birleştirilmiş ve çok iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Yönelim hesabı amaca uygun bir şekilde yapıldıktan sonra sıra adım tespiti ve adım uzunluğu tahminine gelmiştir. Adım tespiti için ham ivmelerin normu kullanılmış ve bunun üzerindeki gürültülerin süzülmesi için literatürde bulunan iki filtre alınmış karşılaştırılmış ve bunlardan en uygun olanı kullanılmıştır. Adım uzunluğu tahmini için en son yayınlanan uyarlamalı adım uzunluğu tahmin algoritması kullanılmış ve

farklı adım hızları için iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu algoritmalar birleştirilerek konum tahmini yapılmış farklı algoritmalar uygulanarak MATLAB ortamında grafikleri çizdirilmiş ve bu grafikler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda da Madgwick+Kalman+Koşullu Yönelim algoritmasının en iyi yöntem olduğu görülmüş ve cihazda bu yöntem kullanılmıştır. Tasarlanan cihaz ile örnekler alınmış, cihazın üstündeki verici ile laptopa gönderilmiş ve konum grafikleri gerçek zamanda çizdirilmiştir. Bu çalışmadan verilebilecek tavsiye ise kullanım rahatlığından dolayı tercih edilen elde taşınabilen konum tahmin cihazları, gürültülerden ve el sapmalarından dolayı çok hata biriktirdiğinden açısı sürekli değişen parkurlarda kullanılmaması daha uygun olur. Ayrıca Kalman Filtresi tasarlanan sistemde yavaş çalıştığı için yönelim tahmininin çok hızlı hesaplanması gereken uygulamalarda o uygulamaya özgü tasarlanmalıdır. Son olarak da cihazın rahat ivmelenebilmesi için el serbest bırakılmalı vücut ile uyumlu bir şekilde hareket etmesine özen gösterilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kim, Y., Hwang, Y., Choi, S. ve Lee, J.** (2013). Height estimation scheme of low-cost pedestrian dead-reckoning system using Kalman Filter and walk condition estimation algorithm, *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Wollongong, Australia, July 2013, pp. 1492-1497
- [2] **Urmat, S. ve Yalçın, M. E.** Design and Implementation Of An ARM Based Embedded System For Pedestrian Dead Reckoning ,in *Proc. of the 9th International Conference on Electric and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, Nov. 2015, pp. 885-889.
- [3] **Jimenez, A.R., Seco, F., Prieto, C. ve Guevara, J.** (2009). A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU, *6th IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, Budapest, Hungary, August 2009, pp. 37-42.
- [4] **Madgwick, S. O. H., Vaidyanathan, R. ve Harrison, A. J. L.** (2010). An efficient orientation filter for inertial measurement units (IMUs) and magnetic angular rate and gravity (MARG) sensor arrays, Department of Mechanical Engineering, Tech. Rep. April 2010. [5] **Lowe, D.** (2004) Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. Computer Science Department. University of British Columbia.
- [5] **Racko, J., Peter, B., Perttula, A., Parviainen, J. ve Collin, J.** (2016). Pedestrian Dead Reckoning with Particle Filter for Handheld Smartphone, *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Alcalá de Henares, Spain, October 2016.
- [6] **Lan, H., Yu, C., Li, Y. ve El-Sheimy, N.** (2015). An Efficient Method for Evaluating the Performance of Integrated Multiple Pedestrian Navigation Systems, *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Alberta, Canada, October 2015.
- [7] **Luinige, H. J.** (2002). Inertial Sensing of Human Movement, Ph.D. thesis, University of Twente.
- [8] **Trusov, A. A.** (2011). Overview of MEMS Gyroscopes: History, Principles of Operations, Types of Measurements, Ph.D. thesis, University of California.

- [9] **Andrejašič, M.** (2008). MEMS ACCELEROMETERS, Seminar, University of Ljubljana.
- [10] **Todaro, M. T., Sielo, L. ve De Vittorio, M.** (2012). Magnetic Field Sensors Based on Microelectromechanical Systems (MEMS) Technology, University of Salento, Lecce, Italy.
- [11] **Bao, H. ve Wong, W.-C.** (2013). An Indoor Dead- Reckoning Algorithm with Map Matching, pp. 1534-1539.
- [12] **Meina, M., Krasuski, A. ve Rykaczewski, K.** (2015). Model Fusion for Inertial-based Personal Dead Reckoning System, in Sensor Applications Symposium (SAS), 2015 IEEE, Zadar, Croatia, April 2015, pp. 1-6.
- [13] **Url-1**, https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST_BNO055_DS000_12.pdf.
- [14] **Welch, G. ve Bishop, G.** (2001). An Introduction to the Kalman Filter, University of North Carolina at Chapel Hill Department of Computer Science, Chapel Hill, USA, 2001
- [15] **Dam, E.B., Koch, M. ve Lillholm, M.** (1998). Quaternions , Interpolation and Animation, Reports, Technical Report DIKU-TR-98/5, 40-50.
- [16] **Schwarz, R.** (2014). Quaternions and Spatial Rotation, (1).
- [17] **Zhou, X., Chen, J., Dong, Y., Lu, X., Cui, J. ve Zheng, B.** (2014). Pedestrian Navigation with Foot-Mounted Inertial Sensors in Wearable Body Area Networks, in APSIPA 2014 Asia-Pacific, Siem Reap, Cambodia, Dec. 2014, pp. 1-7.
- [18] **Url-2**, <http://www.crystalinks.com/earthsmagneticfield.html>.
- [19] **M. Oussalah and J. De Schutter.** (2016). “Adaptive Kalman Filter for Noise Identification”, in Inertial Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, Sep. 2000, pp. 1225-1232.
- [20] **Fessler, J.** (2004) Design of Digital Filters, (8).
- [21] **Williamson, G. A.** (1999). Adaptive IIR Filters, (23).
- [22] **Ho, N.-H., Truong, P. H. ve Jeong, G.-M.** “Step-Detection and Adaptive Step-Length Estimation for Pedestrian Dead-Reckoning at Various Walking Speeds Using a Smartphone”, Sensors, Seoul, Korea, Sep. 2016, pp. 1-13.
- [23] **Racko, J., Pertulla, A., Parviainen, J. ve Collin, J.** (2016). Pedestrian Dead Reckoning with Particle Filter for Handheld Smartphone, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2016 IEEE, Spain.

- [24] **D'íez, L.E., Bahillo, A., Masegosa, A.D., Perallos, A., Azpilicueta, L., Falcone, F., Astrain, J.J. ve Villadangos, J.** (2015) Signal Processing Requirements for Step Detection Using Wrist-worn IMU, *2015 IEEE*, Spain, pp. 1032-1035.
- [25] **Park, J., Yunki, K. ve Lee J.** “Waist Mounted Pedestrian Dead-Reckoning System”, on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2012 9th International Conference on, 2012, pp. 335–336.
- [26] **Diaz, E. M.,** “Inertial Pocket Navigation System: Unaided 3D Positioning”, Sensor, Germany, April 2015, pp. 9157-9178.
- [27] **Kim, Y. K., Choi, S. H., Kim, H. W. ve Lee, J. M.** (2012). Performance Improvement and Height Estimation of Pedestrian Dead-Reckoning System using a Low Cost MEMS Sensor, 1655–1660.
- [28] **Garcia, P. ve Li, W.,** (2011), On Indoor Positioning for Mobile Devices.
- [29] **Basso, M., Galanti, M., Innocenti, G. ve Miceli, D.** (2016). Pedestrian dead reckoning based on frequency self-synchronization and body kinematics, Italy, pp. 1-12.
- [30] **Url-3,** <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>.
- [31] **Weinberg, H.** (2002). Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications; Analog Devices, Inc.: Norwood, MA, USA
- [32] **Kim, J.W., Jang, H.J., Hwang, D.-H. ve Park, C.** (2004). A Step, Stride and Heading Determination for the Pedestrian Navigation System, pp 1, 8.
- [33] **Tian, Q., Salcic, Z., Wang, K.I.-K. ve Pan, Y.** (2016). A Multi-Mode Dead Reckoning System for Pedestrian Tracking Using Smartphones. *IEEE Sens. J.*, pp. 2079–2093.
- [34] **Eriksson, J.O. ve Tengfjord, L.H.,** (2014). Indoor Positioning for Mobile Devices using Instrumentation and Dead Reckoning.
- [35] **Url-4,** <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue>.
- [36] **Url-5,** http://www.4dsystems.com.au/product/uLCD_144_G2/
- [37] **Url-6** https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Plus_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf.



EKLER

Ek A. Durum Geçiş Matrisi A 'nın Hesap Formülleri

Ek A.1. Durum Geçiş Matrisi A 'nın Hesap Formülleri

Ek B. Doğrusal Kalman Filtresi Sistem Modeli

Ek B.1. Doğrusal Kalman Filtresi Sistem Modeli





Ek A1. Durum Geçiş Matrisi A 'nın Hesap Formülleri

$${}^S_E\dot{q} = \frac{1}{2} {}^S_E q_{est,t-1} \otimes {}^S\omega \quad (A1.1)$$

$${}^S_E q_{\omega,t} = {}^S_E q_{est,t-1} + {}^S_E\dot{q}_{\omega,t} \Delta t \quad (A1.2)$$

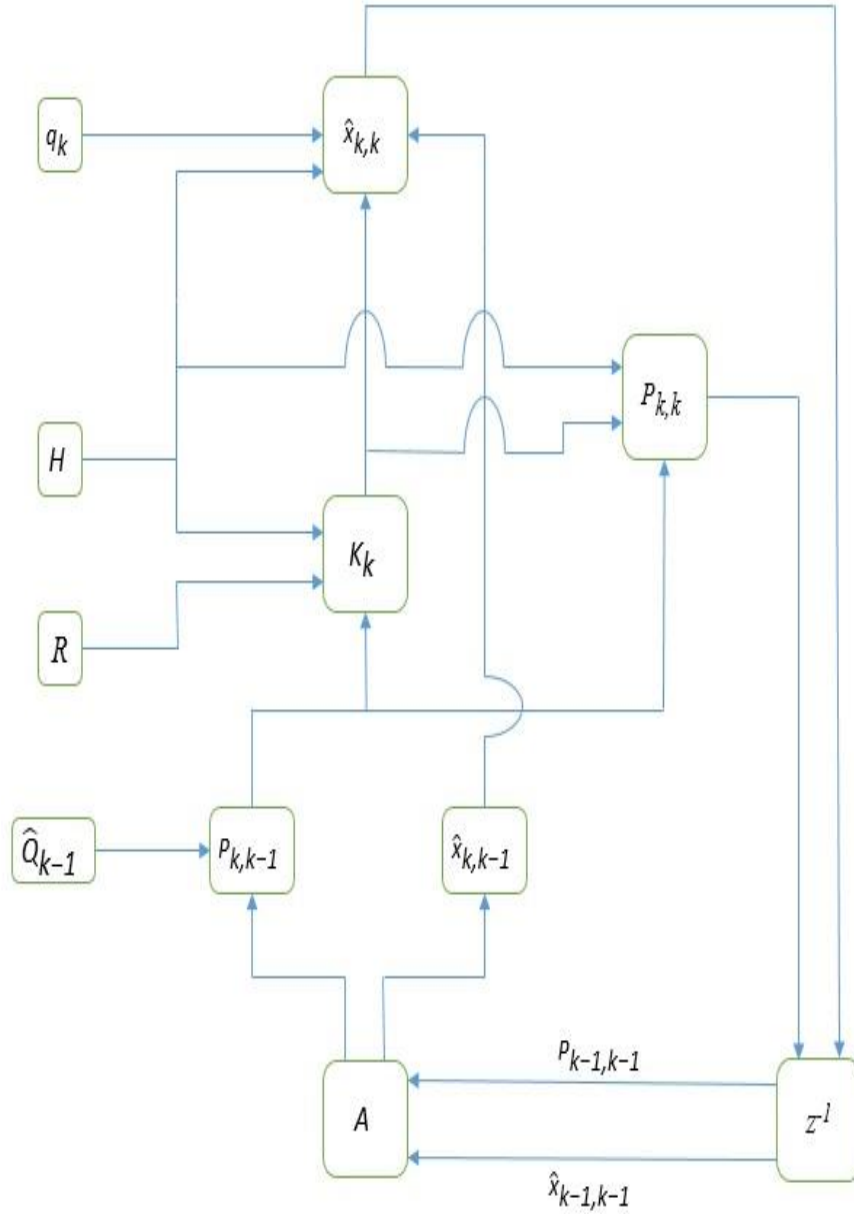
$${}^S_E q_{\omega,t} = {}^S_E q_{est,t-1} + \frac{1}{2} {}^S_E q_{est,t-1} \otimes {}^S\omega \Delta t \quad (A1.3)$$

$${}^S_E q_{\omega,t} = A {}^S_E q_{est,t-1} \quad (A1.4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 {}^S\omega_x \Delta t & -0.5 {}^S\omega_y \Delta t & -0.5 {}^S\omega_z \Delta t \\ 0.5 {}^S\omega_x \Delta t & 1 & 0.5 {}^S\omega_z \Delta t & -0.5 {}^S\omega_y \Delta t \\ 0.5 {}^S\omega_y \Delta t & -0.5 {}^S\omega_z \Delta t & 1 & 0.5 {}^S\omega_x \Delta t \\ 0.5 {}^S\omega_z \Delta t & 0.5 {}^S\omega_y \Delta t & -0.5 {}^S\omega_x \Delta t & 1 \end{bmatrix} \quad (A1.5)$$



Ek B1. Doğrusal Kalman Filtresi Sistem Modeli



Şekil B1.1: Doğrusal Kalman Filtresi sistem modeli



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ozan Vahit ALTINPINAR

Doğum Tarihi ve Yeri : 30.03.1986, ADANA

E-posta : altinpinaro@itu.edu.tr

Lisans : 2012, Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim : Cumhuriyet Üniversitesi, Araştırma Görevlisi,
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Araştırma Görevlisi
İstanbul Teknik Üniversitesi, Araştırma Görevlisi