İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADGWICK IMU ALGORİTMASI KULLANILARAK, ATALETSEL ÖLÇÜ BİRİMİ İLE ORYANTASYON ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Fatih ÇAKMAK

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADGWICK IMU ALGORİTMASI KULLANILARAK, ATALETSEL ÖLÇÜ BİRİMİ İLE ORYANTASYON ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Fatih ÇAKMAK
(518131011)

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU

ŞUBAT 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518131011 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet Fatih ÇAKMAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "MADGWICK IMU ALGORİTMASI KULLANILARAK, ATALETSEL ÖLÇÜ BİRİMİ İLE ORYANTASYON ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Süleyman Hakan ÜNDİL** Nişantaşı Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Deniz YILDIRIM İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 09 Aralık 2019
Savunma Tarihi : 26 Şubat 2020

Eşim ve aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı gerçekleştirmemde büyük rol oynayan, hoşgörü, özveri ve sabırla danışmanlığımı yapan, çalışma motivasyonumu arttırarak yol gösteren danışman hocam Sayın Doç.Dr.Serhat İKİZOĞLU'na değerli zamanlarını bu çalışmanın gerçekleşmesine ayırdığı ve kıymetli bilgilerini benimle paylaştığı için şükranlarımı sunuyorum.

Ayrıca, çalışma süresince yanımda olarak desteklerini esirgemeyen başta annem ve eşim olmak üzere aileme, bunun yanı sıra çalışmanın deneysel ayağında teknik olanaklarını hizmetime sunan Günmak A.Ş. firmasına teşekkürü borç bilirim.

Aralık 2019

Mehmet Fatih ÇAKMAK
Mekatronik 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 Çalışmanın Amacı 6
1.2 Çalışmanın Kapsamı 6
2. ATALETSEL ÖLÇÜ BİRİMİ **9**
2.1 AÖB Bileşenleri 9
2.1.1 Jiroskop 9
2.1.2 İvme Ölçer 9
2.1.3 Manyetometre 10
2.2 AÖB Bileşenleri'nin Oryantasyon Tahminlerine Etkileri 11
2.3 AÖB Hataları 12
2.3.1 Giriş aralığı 12
2.3.2 Sapma 13
2.3.3 Ölçek faktörü 13
2.3.4 Ölçek faktörü doğrusallığı 13
2.3.5 Gürültü 13
2.3.6 Sensörün ortogonal olmaması 13
2.3.7 Yerçekimi bağımlılığı 14
2.3.8 Zamanlama hataları 14
3.DİĞER ALGORİTMALAR **15**
3.1 Genişletilmiş Kalman Filtresi 15
3.2 Mahony Filtresi 16
4. MADGWICK ALGORİTMASI **19**
4.1 Kuaterniyon Gösterimi 19
4.2 Madgwick Filtresi'nin Türetilmesi 20
4.2.1 Açısal hızdan türetilen oryantasyon 20
4.2.2 Vektör gözlemlerinden türetilen oryantasyon 21
4.2.3 Filtre füzyon algoritması 22
4.3 Madgwick Algoritması'nın Matlab/ Simulink'te Modellenmesi 24
5. DENEY VE ÖLÇÜMLER **27**
5.1 Kullanılan Ekipmanlar 27

5.1.1 XSENS MTw 27
5.1.2 KAWASAKI Robot 28
5.2 Deney Prosedürü 29
5.3 Verilerin Toplanması 32
6. SONUÇLAR 37
6.1 Deney Sonuçları 37
6.2 Algoritmanın Modifiye edilmesi 43
6.3 Analiz ve Yorumlar 45
KAYNAKLAR 49
EKLER 51
ÖZGEÇMİŞ 55

KISALTMALAR

IMU	**:** Inertial Measurement Unit
AÖB	**:** Ataletsel Ölçü Birimi
MEMS	**:** Micro Electro Mechanical Systems
MARG	**:** Magnetic, Angular Rate, and Gravity
MIMO	**:** Multi Input Multi Output
MTw	**:** Motion Tracker
3B	**:** 3 Boyutlu
Mm	**:** milimetre
sn	**:** saniye
m	**:** metre
Hz	**:** hertz
AHRS	**:** Attitude and Heading Reference System

SEMBOLLER

$\boldsymbol{\theta}$	**:** Dönme açısı
${}^{A}\hat{\boldsymbol{r}}$	**:** A eksen takımında tanımlı bir birim vektör
$\mathbf{r}_x, \boldsymbol{r}_y, \boldsymbol{r}_z$	**:** r birim vektörünün 3 boyutta bileşenleri
$\hat{\boldsymbol{x}}_A, \hat{\boldsymbol{y}}_A, \hat{\boldsymbol{z}}_A$	**:** A eksen takımının ortogonal eksenlerini oluşturan birim vektörler
${}^{\mathbf{A}}_{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{q}}$	**:** B eksen takımının A eksen takımına göre oryantasyonu
${}^{\mathbf{A}}_{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{q}}^{*}$	**:** ${}^{\mathrm{A}}_{\mathrm{B}}\hat{\mathrm{q}}$ konjugesi
$\otimes$	**:** Kuaterniyon çarpımı
${}^{B}\boldsymbol{v}$	**:** B eksen takımında tanımlı bir vektör
${}^{S}\boldsymbol{\omega}$	**:** Jiroskoptan ölçülen açısal hız
$\boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z$	**:** Jiroskoptan ölçülen açısal hızın sensör çerçevesindeki bileşenleri
${}^{\mathbf{S}}_{\mathbf{E}}\dot{\mathbf{q}}$	**:** Dünya eksen takımının sensör eksen takımına göre oryantasyon değişim oranı
${}^{\mathbf{S}}_{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{q}}$	**:** Dünya eksen takımının sensör eksen takımına göre oryantasyonu
${}^{S}_{E}\hat{\boldsymbol{q}}_{est,t-1}$	**:** Dünya eksen takımının sensör eksen takımına göre bir önceki oryantasyon tahmini
${}^{S}_{E}\boldsymbol{q}_{\omega,t}$	**:** Jiroskoptan gelen veriye göre oryantasyon
$\mathbf{t}$	**:** zaman
$\Delta\boldsymbol{t}$	**:** Örnekleme periyodu
${}^{E}\hat{\boldsymbol{d}}$	**:** Dünya alanının dünya eksen takımında önceden tanımlanmış yönü
${}^{S}\hat{\boldsymbol{s}}$	**:** Sensör eksen takımında ölçülen alan yönü
$\boldsymbol{d}_x, \boldsymbol{d}_y, \boldsymbol{d}_z$	**:** ${}^{E}\hat{d}$ bileşenleri
$\boldsymbol{s}_x, \boldsymbol{s}_y, \boldsymbol{s}_z$	**:** ${}^{S}\hat{s}$ bileşenleri
$\boldsymbol{\mu}$	**:** Adım uzunluğu
$\mathbf{J}$	**:** Jakobyan
${}^{\mathrm{E}}\hat{\boldsymbol{g}}$	**:** Yerçekimi ivme vektörü
${}^{\mathrm{S}}\hat{\boldsymbol{a}}$	**:** İvmeölçerden gelen ivme verisi
$\boldsymbol{a}_x, \boldsymbol{a}_y, \boldsymbol{a}_z$	**:** İvme bileşenleri
$\boldsymbol{\alpha}$	**:** Katsayı
$\boldsymbol{\gamma}_t$	**:** Sensör füzyonu ağırlık oran katsayısı
${}^{S}_{E}\boldsymbol{q}_{\nabla}$	**:** Vektör gözlemlerinden türetilen oryantasyon
$\boldsymbol{\beta}$	**:** Jiroskop ölçüm hatasına karşılık gelen bir kuaterniyon türevinin büyüklüğü olarak ifade edilen ${}^{S}_{E}q_{\omega}$'nın ıraksama oranı
$\boldsymbol{\nabla f}$	**:** Nesnel fonksiyon gradyanı
$\boldsymbol{f}$	**:** Nesnel fonksiyon
$\boldsymbol{\mathcal{J}}$	**:** Jakobiyen
$\boldsymbol{\Phi}$	**:** Yuvarlanma açısı
$\boldsymbol{\theta}$	**:** Yunuslama açısı
$\boldsymbol{\psi}$	**:** Azimut açısı

$\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{0}}^{-}$: Başlangıçtaki durum vektörü
$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{0}}^{-}$: Başlangıçtaki durum kovaryans matrisi
$\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{k}}$: Kalman kazanç matrisi
$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{k}}$: Hata kovaryans matrisi
$\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{k}}$: Ölçüm matrisi
$\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{k}}$: Ölçüm gürültü kovaryans matrisi
$\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{k}}$: Sistem durum vektörü tahmini
$\boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{k}}$: Ölçüm vektörü
$\boldsymbol{\phi}_{\boldsymbol{k}}$: Sistem matrisi
$\boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{k}}$: İşlem gürültü kovaryans matrisi
$\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{k}}$: Sistem durum vektörü
$\boldsymbol{k}_{\boldsymbol{i}}$: İntegral kazancı
$\boldsymbol{k}_{\boldsymbol{p}}$: Oransal kazanç
$\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{a}_{q,t}}$: İvme referans vektörü
$\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{m}_{q,t}}$: Manyetik alan referans vektörü
$\widehat{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{t-1}}$: t-1 anındaki oryantasyonu gösteren birim kuaterniyon
$\boldsymbol{s}_{\widehat{a}_{q,t}}$: Tahmini ivme vektörü
$\boldsymbol{s}_{\widehat{m}_{q,t}}$: Tahmini manyetik alan vektörü
$\boldsymbol{s}_{\boldsymbol{w}_{mes,t}}$: Jiroskop ölçüm hatası
$\boldsymbol{s}_{\boldsymbol{a}_t}$: İvmeölçer sonucu
$\boldsymbol{s}_{\boldsymbol{m}_t}$: Manyetometre sonucu
$\boldsymbol{s}_{\widehat{w}_{b,t}}$: Jiroskop sapması
$\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{w}_{q,t}}$: t anındaki jiroskop ölçüm verisi
$\boldsymbol{s}_{\widehat{w}_{r,q,t}}$: Hesaplanan gerçek açısal hız

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : MTw hareket takip ünitesinin teknik performans verileri..... **28**
Çizelge 5.2 : Robot yörüngesindeki noktaların robota göre Euler açıları. **30**
Çizelge 5.3 : Hareket senaryoları ve parametreler..... **30**
Çizelge 6.1 : β parametresi değişim koşulları..... **44**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Jiroskop. **9**
Şekil 2.2 : İvmeölçer. **10**
Şekil 2.3 : Manyetometre. **11**
Şekil 2.4 : Yuvarlanma, yunuslama, sapma açıları. **11**
Şekil 3.1 : Genişletilmiş Kalman Filtresi blok diyagramı. **15**
Şekil 3.2 : Mahony Filtresi blok diyagramı. **17**
Şekil 4.1 : Bir eksen takımının başka bir eksen takımına göre oryantasyonu. **19**
Şekil 4.2 : Madgwick IMU filtresi blok diyagramı. **24**
Şekil 4.3 : Madgwick IMU filtresinin oluşturulan Simulink modeli……..**25**
Şekil 5.1 : XSENS MTw. **27**
Şekil 5.2 : Awinda USB Dongle. **27**
Şekil 5.3 : MT Manager arayüzü. **28**
Şekil 5.4 : Kawasaki Robot. **29**
Şekil 5.5 : MTw eksen takımı. **30**
Şekil 5.6 : Hareket yörüngesi. **31**
Şekil 5.7 : Robot konum monitör ekranı. **32**
Şekil 5.8 : Senaryo 1'e ait ivmeölçer ve jiroskop verileri. **33**
Şekil 5.9 : Senaryo 2'ye ait ivmeölçer ve jiroskop verileri. **33**
Şekil 5.10 : Senaryo 3'e ait ivmeölçer ve jiroskop verileri. **34**
Şekil 5.11 : Senaryo 4'e ait ivmeölçer ve jiroskop verileri. **34**
Şekil 5.12 : Jiroskop ve ivmeölçer verilerinin toplanması **35**
Şekil 5.13 : Senaryo 1 ve 2 için referans oryantasyon verileri. **36**
Şekil 5.14 : Senaryo 3 ve 4 için referans oryantasyon verileri. **36**
Şekil 6.1 : Senaryo 1'e ait oryantasyon tahmin sonuçları. **37**
Şekil 6.2 : Senaryo 2'ye ait oryantasyon tahmin sonuçları. **38**
Şekil 6.3 : Senaryo 3'e ait oryantasyon tahmin sonuçları. **38**
Şekil 6.4 : Senaryo 4'e ait oryantasyon tahmin sonuçları. **39**
Şekil 6.5 : Senaryo 1'e ait oryantasyon tahmin karşılaştırması. **40**
Şekil 6.6 : Senaryo 2'ye ait oryantasyon tahmin karşılaştırması. **41**
Şekil 6.7 : Senaryo 3'e ait oryantasyon tahmin karşılaştırması. **42**
Şekil 6.8 : Senaryo 4'e ait oryantasyon tahmin karşılaştırması. **43**
Şekil 6.9 : Senaryo 4'e ait modifiye filtre oryantasyon tahmin sonucu. **45**

MADGWICK IMU ALGORİTMASI KULLANILARAK, ATALETSEL ÖLÇÜ BİRİMİ İLE ORYANTASYON ANALİZİ

ÖZET

Canlıların hareket analizine yönelik çalışmalar yüzyıllardır devam etmektedir. Bu analizler, kendi zaman dilimindeki teknolojinin izin verdiği ölçülerde yapılmış ve halen yapılmaktadır. Günümüzdeki teknoloji ve hesaplama alanındaki gelişmeler daha nicel ve objektif analizler yapılmasına olanak sağlamıştır. Vücut üzerine işaretçilerin koyularak ışığa dayalı hareket ölçümünün yapılması da buna dahildir. Üstelik kameralar sayesinde bu hareketi 3 boyutlu olarak ölçmek de mümkündür. Fakat ölçümün yapılabileceği alan, kameraların çevreleyeceği alan ile sınırlıdır.
Mikroişleme teknolojisi ve mikro elektro mekanik sistemlerin gelişimi, ivmeölçer ve jiroskop gibi atalet sensörlerinin, atalet ölçüm birimleri ve hareket takip cihazlarına monte edilebilecek kadar küçük ve vücuda takılabilecek hale gelmesini sağlamıştır.

Jiroskop, ivmeölçer ve kullanıma bağlı olarak manyetometre verilerinin birleştirilmesi ile kameralara bağlı kalmadan uzayda herhangi bir konumdaki hareketleri analiz etmek mümkündür. Atalet algılama teknolojisi, labaratuar dışındaki hareketi ölçmek, sınırsız veya geniş ölçüm verileri elde etmek için büyük avantaja sahiptir. Kamera sistemine nazaran giyilebilir olması, büyük esneklik sağlamaktadır. Ayrıca, özel bir labaratuar veya altyapıya gerek olmadığından maliyetler önemli ölçüde azalmıştır.

Ataletsel ölçü birimleri ve hareket takip ünitelerinde bulunan jiroskop, ivmeölçer ve manyetometreden elde edilen verilerin birleştirilmesi, hatalarının giderilmesi ve bu vesileyle oryantasyon tahmini yapılması için çeşitli filtre ve algoritmalar mevcuttur. Bu çalışmada Madgwick filtresi ele alınmıştır. Madgwick filtresinin tercih edilme nedenlerinin başında hesaplama yükünün daha az olması ve optimize edilmiş gradyan iniş algoritmasıyla düşük örnekleme oranlarında dahi iyi performans alınması gelmektedir. Ayrıca bu filtre 3 boyutta oryantasyonu kuaterniyon gösterimi ile ifade etmektedir. Böylelikle Euler gösteriminde ortaya çıkan tekillik sorunu saf dışı edilmiştir.

Bu çalışmada Madgwick algoritması Matlab/Simulink ortamında modellenmiş, XSENS firmasının içerisinde ataletsel ölçü biriminin bulunduğu hareket takip ünitesi kullanılarak jiroskop ve ivmeölçer verileri toplanmıştır. Çevredeki manyetik materyallerden kolayca etkilendiği için manyetometre kullanımından kaçınılmıştır. Bu nedenle azimut açısı ölçümü dikkate alınmamıştır.

Jiroskop ve ivmeölçer verilerinin toplanması için gereken hareket, ataletsel ölçü birimini Kawasaki marka 6 eksenli manipulatöre bağlayıp, robotun farklı oryantasyonlarda konumlanacak şekilde programlanması ile sağlanmıştır.

Ataletsel ölçü biriminin takılı olduğu robot, aynı yörüngede, farklı hızlarda ve belirli konumlarda farklı bekleme süreleri kullanılacak şekilde programlanmış ve her programın sonunda elde edilen sensor verileri Matlab/Simulink ortamında modellenen Madgwick algoritmasına girilmiştir. Bu yöntemle elde edilen oryantasyon

tahminlerinin doğruluğu, XSENS ataletsel ölçü biriminin kendi oryantasyon verileri referans alınarak değerlendirilmiştir.

Çalışma neticesinde Madgwick filtresinin farklı hızlar ve duraklamalara verdiği tepkiler incelenmiştir. Ayrıca Madgwick algoritmasına farklı β değerleri girilerek bu parametrenin deney senaryolarındaki etkisi görülmüştür.

Daha sonra ise sabit bir β kullanımı yerine, koşullara göre değişen β olacak şekilde filtre modifiye edilmiştir. Sabit β kullanılan 4 adet senaryonun verileri incelenerek β parametresinin değişme koşulları tespit edilmiştir. Filtrenin başlangıçta gerçek değere yakınsama süresinin kısaltılması, sadece oryantasyon değişim hızının yüksek olduğu durumlarda yakınsama hızınının arttırılması, oryantasyon değişim hızının nispeten düşük olduğu durumlarda ise daha pürüzsüz bir çıkış eğrisi elde etmek amaçlanmıştır.

ORIENTATION ANALYSIS WITH INERTIAL MEASUREMENT UNIT BY USING MADGWICK IMU ALGORITHM

SUMMARY

Studies on the movement analysis of human, animals and objects have been continuing for centuries. These analyzes are carried out to the extent permitted by the technology in their time. Developments in current technology and computing have enabled more quantitative and objective analyzes. This includes placing the markers on the object and measuring the light-based motion. Moreover, it is possible to measure this movement in 3D with the help of cameras. However, the area where the measurement can be made is limited by the area surrounding by the cameras.

The development of micromachining technology and microelectromechanical systems has enabled the inertial sensors such as accelerometers and gyroscopes to be mounted to the body and small enough to be mounted on inertial measurement units and motion tracking devices. By combining gyroscope, accelerometer and magnetometer (depending on usage) data, it is possible to analyze movements in any position in space without being dependent to the cameras. Inertial detection technology has great advantage to measure the movement outside the laboratory, also to obtain unlimited or wide measurement data. Being wearable in contrast to the camera system provides great flexibility. In addition, the costs have decreased considerably since there is no need for a special laboratory or any other requirements.

Thanks to their low cost, compact structure and usage flexibility, inertial measurement units have reached wide range of usage. In addition to military field, they are also being used in industry, rehabilitation, sports sciences, virtual reality, game industry, animation and motion capture, mobile phones, smart watches and many other fields. The recent improvements on micro electro mechanical systems are encouraging the usage of inertial measurement units in many different areas. This also brings new approaches to many fields which movement analysis is subject.

Altough inertial measurement units are cheap, flexible and compact, their accuracy is not perfect unless it is corrected by some math tecniques. Because, they are generally subject to drift, noise and other sensor errors. In order to handle these errors, sensor fusion algorithms and estimation filters are used. Basically, each sensor data is used to eliminate other's errors so that the better accuracy can be achived by combining these datas.

Various filters and algorithms are available for the inertial measurement units and motion tracking devices that combining data obtained from gyroscope, accelerometer and magnetometer, estimating the orientation and eliminating the errors. These estimation algorithms generally give satisfied results and provide nearly perfect accuracy. On the other hand, they are still subject to research since each of these estimation algortihms has different characteristics.

Previous studies show that, orientation estimation algorithms may have some advantages and disadvantages when compared to others. So, it is very important to

search optimum working conditions of these filters. This can be done by comparing the filters with each other or spesifically analysing a filter in different conditions.
The most widely used orientation estimation algorithms are Extended Kalman, Mahony and Madgwick algorithms. These all have good performance, but due to their different techniques, they have some differences.

In this study, the Madgwick filter has been used as it has lower computational load and provides good performance even at low sampling rates thanks to the gradient descent algorithm. In addition, this filter shows the orientation on the three dimensions by quaternion representation. Thus, the singularity problem that emerged in Euler representation was excluded.

The aim of the study is presenting the Madgwick algorithm's performance in different movement scenarios and also presenting the effect of tunable parameter β.

In this study, the Madgwick algorithm was modeled in Matlab / Simulink environment. The gyroscope and accelerometer datas were collected by using the motion tracking device which contains the inertial measure unit. Magnetometers were avoided because they are easily affected by the ferromagnetic materials in the environment. Therefore, the azimuth angle measurement was not taken into account.
The movement required to collect the gyroscope and accelerometer data was achieved by connecting the inertial measurement unit to the Kawasaki 6-axis manipulator and programming the robot with various orientations on different positions. The reason of using 6-axis manipulator was keeping the orbit exactly the same in all scenarios. Thus, reliable experiment environment was provided.
The robot, in which the inertial measurement unit was installed, was programmed to use different waiting times at the same orbit, at different speeds and at certain positions, and the sensor data obtained at the end of each program was entered into the Madgwick algorithm modeled in Matlab / Simulink environment. The accuracy of the orientation estimations obtained by this method was evaluated with reference to the XSENS IMU's own orientation data.
Totally 4 scenarious were tested. In every scenario, 4 different β parameters were used. The evaluation has been made for β parameter and movement scenarious seperately.
As a result of the study, the Madgwick filter's responses to different speeds and wait times were evaluated. In addition the the effect of β parameter was seen by entering different values.
As it is already known, it has been observed that the β parameter affects the settle time directly. Increasing the β value provides to respond the real changes faster but it increases the output noise at the same time.
Slow motions have given better accuracy on orientation estimates in smaller β values. It has been seen that the speed of the movement should be taken into consideration when choosing β parameter if output noise is wanted to keep minimum.

Different waiting times between positions didn't effect the accuracy of estimation results.

Then, instead of using a fixed β, the filter was modified to has variable β according to the conditions. It is aimed to shorten the convergence time of the filter to the real value at the beginning, to increase the convergence rate only in cases where the orientation change rate is high, and to obtain a smoother output curve in cases where the orientation change rate is relatively low.

It was observed that the initial convergence rate was increased in the modified filter using dynamic β. In addition, even in cases where the motion acceleration is highest, the closest results to the true orientation value are obtained here. The β value is only increased at the beginning of the movement and in areas with high orientation change speed. Noise from the accelerometer occurs only in these areas. Basically, the convergence rate in the modified filter at the beginning and when the speed is high; in cases where the movement speed is low or constant, the smoothness of the output curve is targeted. According to the result, a satisfactory result was obtained in this regard.

Measurement results made with the same trajectory and different parameters can be evaluated to explain the reactions of Madgwick's IMU algorithm under different conditions. Knowing the effects of movement speeds and β parameters can enable the use of the algorithm with optimum efficiency in different usage areas with dynamic use of β.

1. GİRİŞ

İnsan hareket analizi bilimi, yüksek disiplinlerarası yapısı ve geniş uygulama yelpazesi nedeniyle etkileyicidir. Bu bilim dalının tarihi genellikle, algı gücümüzle bağlantılı olarak dünyanın doğası ile ilgili bir insan araştırmasının kaydını tutan eski Yunanlılarla başlar. Aristotales (M.Ö. 384-322) hayvanların hareketi üzerine yazdığı "De Motu Animalium" adlı kitap ile ilk biyomekanisyen olarak kabul edilebilir. O, hayvanların bedenlerini sadece mekanik sistemler olarak görmemiş, ancak bir eylemi gerçekleştirmeyi hayal etmek ile gerçekte bunu yapmak arasındaki fizyolojik fark gibi soruları takip etmiştir (Martins, 1999). Yaklaşık iki bin yıl sonra, ünlü anatomik çizimlerinde Leonardo da Vinci (1452-1519) ayakta durma, tepeden inip çıkma, oturma pozisyonundan yükselme ve atlama mekaniğini anlatmaya çalıştı. Galileo Galilei (1564-1643) yüz yıl sonra, fizyolojik işlevi matematiksel olarak analiz etme girişimlerinin bir kısmını izledi. Galilei'nin çalışması üzerine inşa ettiği çalışmalarında Borelli (1608-1679), Newton kendi adıyla anılan hareket yasalarını yayınlamadan çok önce insan vücudunun çeşitli eklemlerinde denge için gerekli kuvvetleri buldu. Bu biyomekaniğin öncülerinin ilk çalışmalarını Newton (1642-1727), Bernoulli (1700-1782), Euler (1707-1783), Poiseuille (1799-1869), Young (1773-1829) ve diğerleri izledi. Muybridge (1830-1904), insan ve hayvan hareketini ardarda çektiği dizi halindeki fotoğrafları kullanarak inceleyen ilk fotoğrafçıydı. Bu teknik ilk olarak, yer reaksiyonu kuvvetlerini hareketle ilişkilendiren ve modern hareket analizine öncülük eden Marey (1830-1904) tarafından kullanılmıştır. 20. yüzyılda, birçok araştırmacı ve mühendis, insan kinematiği ve kinetiği hakkında artan bilgiye katkıda bulundu (Roetenberg, 2006).

Son yıllarda ise insanların haraketini analiz etmek ve performansını ölçmek amaçlı ataletsel ölçü birimlerinin, dünya literatüründe bilinen adıyla IMU'ların, ortaya çıktığı görülmektedir. Ataletsel sensörler, ivmeölçerler ve jiroskoplardan oluşurlar. Harici bir referans olmaksızın ivmeölçerler spesifik ivmeyi, jiroskoplar ise açısal hızı ölçerler. Ataletsel ölçü birimlerinin ortaya çıkışı, hareket veya performans ölçümüne bağlı alanlarda gelişmelere neden olmuştur. AÖB'ler yaygın olarak biyomekanik,

rehabilitasyon, spor ve egzersiz bilimleri, ergonomi, sanal gerçeklik, animasyon ve hareket yakalama gibi çok sayıda alanda kullanılmaktadır (MTw User Manual). Hareket ölçümünün optik sistemlere bağlı kalmaması, MEMS alanındaki gelişmeler neticesinde AÖB boyutlarının vücuda giyilebilecek kadar küçük olması ve ölçüm maliyetlerinin düşmesi gün geçtikçe AÖB kullanım alanlarını arttırmaktadır (Bellusci ve diğ., 2013). AÖB'lerin kullanım alanları ilk olarak geleneksel askeri alanlarda olmuş olsa da zamanla genişleyip günümüzde endüstriyel segmentlerde daha yaygın uygulamalar bulur hale gelmişlerdir. Günümüzün AÖB'leri, daha kompakt form faktörleri, daha düşük güç gereksinimleri ve daha yüksek kararlılık özellikleriyle tasarımcılara ataletsel algılama ve kontrol uygulamaları oluştururken esneklik kazandırmaktadır (Pupo, 2016). Bununla birlikte, boyut ve fiyattaki düşüşle, bu sensörlerin doğruluğu aynı şekilde azalmış ve düşük maliyetli AÖB'lerin, yani sensörün kayma sorununa yol açmıştır. Sensör kayması, üretim yanlışlıkları, sıcaklık değişimleri veya elektronik bileşenlerin yaşlanması nedeniyle meydana gelen doğrusal olmayan ve düşük frekanslı zamana bağlı bir kaymadır (Haid ve Breitenbach, 2004). Kusursuz bir ölçüm cihazı yoktur ve bu nedenle ölçümün doğruluğunu arttırmak amacıyla birden fazla sensör tipinin kullanılmasına gerek duyulmaktadır. Bu, sensör füzyonu olarak adlandırılır. Her sensör tipinin güçlü ve zayıf noktaları vardır. Sensör füzyonunun arkasındaki fikir, bir tür sensörün özelliklerinin başka bir sensörün sınırlamalarının üstesinden gelmek için kullanılmasıdır. Örneğin, manyetik sensörler, jiroskop entegrasyonunun Durum ve İstikamet Referans Sistemi'nin oryantasyon tahminlerinde dikey eksen etrafında kaymasını önlemek için referans olarak kullanılır. Bununla birlikte, demir ve diğer manyetik malzemeler yerel manyetik alanı bozacak ve sonuç olarak oryantasyon tahmini yapılacaktır. Manyetik bozukluklarla ilgili hatalar, jiroskop kayma hatalarından özelliklere sahip olacaktır. Bu öncül bilgi kullanılarak, sürüklenme ve gürültülerin etkileri en aza indirilebilir (Roetenberg, 2006).

Düşük maliyetli sensörler gerektiren yeni uygulamalar mikro elektromekanik sistem sensörlerinin (MEMS) gelişimini tetiklemiştir. MEMS son yılların en heyecan verici alanlarından biridir. Mevcut ataletsel sensör gelişimi mikro elektro-mekanik sistem (MEMS) teknolojisine odaklanmıştır. Bu, kuvars ve silikon sensörlerin düşük maliyetle seri üretilmesini sağlamaktadır. MEMS sensörleri küçük ve hafif olmakla birlikte geleneksel mekanik tasarımlardan çok daha fazla darbe toleransı sergiler.

Bununla birlikte, şu anda nispeten düşük performans sunmaktadırlar. Bu cihazlar, maliyet, boyut ve daha düşük güç tüketiminin anahtar olduğu uygulamalarda çok önemli hale gelmiştir. Baz malzeme olarak silikon ve kuvars kullanımı bu parametrelere ulaşmak için verim sağlar. Ortaya çıkan sensörlerin özellikleri aşağıdaki gibidir:

- küçük boyut;
- düşük ağırlık;
- sağlam yapı;
- düşük güç tüketimi;
- kısa başlangıç zamanı;
- yüksek hacimli üretim için ucuzluk;
- yüksek güvenilirlik;
- düşük bakım gereksinimi;
- kötü ortamlarda kullanılabilirlik. (Pupo, 2016).

AÖB'ler geniş bir kullanım alanına sahiptir ve ultrason ,barometre ve manyetometre gibi diğer sensörlerle birleştirilebilir. Örneğin taşınabilir bir yaya izleme sistemi için sensörlerin küçük, hafif ve düşük maliyetli olması gerekir. Bu nedenle, çoğunlukla MEMS teknolojisine dayanan IMU'lar kullanılır. Bununla birlikte, XSENS tarafından üretilenler gibi üst düzey ticari MEMS AÖB'leri bile zaman içinde önemli bir sapmadan muzdariptir ve biriken hataları azaltmak için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir (Zizzo ve Ren, 2017).

Ataletsel sensör ölçümleri yüksek örnekleme hızlarında elde edilir ve konum ve oryantasyon bilgisi elde etmek için entegre edilebilir. Konum ve oryantasyon tahmini için atalet sensörlerinin kullanımı ile ilgili çok sayıda literatür bulunmaktadır. Bunun nedeni sadece çok sayıda uygulama alanı değildir. Önemli nedenler, tahmin problemlerinin doğrusal olmaması ve her biri kendine özgü özelliklere sahip farklı oryantasyon parametrelerinin dikkate alınması gerektiğidir (Grisetti ve diğ., 2010; Kurz ve diğ. 2013). İlginç bir şekilde, basit konum ve oryantasyon tahmin algoritmaları pratikte oldukça iyi çalışır. Bununla birlikte, dikkatli modelleme ve dikkatli algoritma seçimi, tahminlerin doğruluğunu artırır.

AÖB'lerin pozisyon ve oryantasyon tahminini yapma şekli temel olarak ele alınacak olursa, jiroskop ölçümlerinin entegrasyonu sensörün yönü hakkında bilgi verir.

Dünyanın yerçekiminin çıkarılmasından sonra, ivmeölçer ölçümlerinin iki kez entegrasyonu sensörün konumu hakkında veri sağlar. Dünyanın yerçekimini çıkarabilmek için sensörün oryantasyonunun bilinmesi gerekir. Dolayısıyla, ataletsel sensörler söz konusu olduğunda sensörün konumunun ve oryantasyonunun tahmini doğal olarak birbirine bağlıdır. İlk konum bilinecekse ve atalet sensörü ölçümleri için tatminkar modeller mevcut olacaksa, bu işlemler mükemmel konum tahminlerine yol açacaktır (Kok ve diğ., 2017).

Fakat ölçümlerdeki hataların yalnızca atalet sensörlerini kullanarak tahmini konum ve oryantasyon kalitesi üzerinde büyük bir etkisi vardır. Bu, özellikle ivmenin çift entegrasyonuna ve dünyanın yerçekimini çıkarmak için doğru oryantasyon tahminlerine dayanan konum için geçerlidir. Bu nedenle, doğru konum ve oryantasyon tahminleri elde etmek için eylemsizlik sensörlerinin diğer sensörlerle ve diğer modellerle desteklenmesi gerekir. Ataletsel sensörler, kısa zaman ölçeğinde doğru olan ancak daha uzun zaman ölçeklerinde sürüklenen yüksek örnekleme oranlarında konum tahminleri sağlarlar. Bu nedenle, daha düşük örnekleme hızına sahip ancak zaman içinde kaymayan bilgiler toplayan sensörler ile birleştirilmek için çok uygundurlar. Konum tahmini için atalet sensörleri genellikle küresel navigasyon uydu sistemi, ultra geniş bant sistemi veya kameralar ile; oryantasyon tahmini için ise, genellikle manyetik alanın yönünü ölçen manyetometrelerle birlikte kullanılırlar (Kok ve diğ., 2017).

AÖB'ler global koordinat sistemine göre sensör oryantasyon tahmini yapan ve AÖB hatalarını düzelten belli başlı tahmin algoritmaları kullanırlar. Bu algoritmaların kendilerine özgü güçlü ve zayıf olduğu koşullar mevcuttur. Yapılacak uygulamaya göre kullanılan algoritma değişkenlik gösterebilir. Günümüz AÖB'lerinde en yaygın kullanılan algoritmalar Genişletilmiş Kalman, Mahony ve Madgwick algoritmalarıdır (Marins ve diğ., 2001; Mahony ve diğ., 2008; Madgwick ve diğ., 2011).

Bu algoritmaların performansları her ne kadar tatminkar olsa da farklı koşullar ve gereksinimlerde hangi algoritmanın performansının daha iyi olduğu hala araştırma konusu niteliğini taşımaktadır ve bu konularda literatürde pek çok çalışma mevcuttur. Ludwig ve diğ. (2018), bu konudaki ilk çalışmalarında, bir insanın yürüme hareketinin verilerini kullanarak Madgwick, Mahony ve temel AHRS algoritmalarını kıyaslamıştır. Bu çalışmanın sonucunda Madgwick algoritmasının performansı gözle görülür şekilde diğerlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. Fakat yürüyüş hareketinde

veri kümesinin çok periyodik olması oryantasyon tahminin kolay olabileceği endişesini beraberinde getirmiştir. Bu nedenle Ludwig ve Burnham (2018), Genişletilmiş Kalman, Mahony ve Madgwick algoritmalarını kıyaslayan yeni bir çalışma ortaya koymuştur. Bu çalışmada veri kümesi olarak serbest bir şekilde uçan 4 pervaneli robot helikoptere ait uçuş verileri kullanılmıştır. Sonuç olarak 3 algoritma da doğruluk olarak benzer sonuçlar verse de Mahony algoritması bir adım öndedir. Bununla birlikte Mahony algoritmasının en hızlı işlem süresine sahip olduğu görülmüştür. Genişletilmiş Kalman algoritması ise en yavaş işlem süresine sahip çıkmıştır ki hesaplama yükü dikkate alındığında bu doğal bir sonuçtur.

Mahony ve diğ. (2008), çalışmasında Madgwick algoritmasını bir Kalman algoritması uygulamasına karşı test etmiştir. Üç eksenli MIMU'larla ham veri toplanmıştır. Deney, sensörü bir eksen etrafında 90 derece, ters yönde 180 derece ve başlangıç noktasına geri getirmek için 90 derece döndürmeyi içeriyordu. Bu, her eksen etrafında birçok kez tekrarlandı ve sensör, her dönüş arasında 3 ve 5 saniye arasında sabit tutuldu. Bu deney ile, Kalman filtresinden daha iyi sonuçlar elde edildi. Ancak, veri kümesi çok basitti; yalnızca filtrenin oryantasyonunu doğrulamak amaçlıydı ve hareket halindeki bir nesneyi temsil etmiyordu. Ayrıca AÖB'lerin çoğu uygulamasında bu kadar yavaş ve düzgün bir hareket yoktur.

Cirillo ve diğ. (2016), mobil bir platform üzerinde bulunan bir manipulatör kullanarak Genişletilmiş Kalman, Madgwick ve Mahony algoritmalarını kıyaslamıştır. Veriler iki aşamada toplanmıştır. İlk aşama, üç eksenin ayrı ayrı döndürülmesinden oluşmuştur. İkincisinde, eklemler aynı anda birden fazla eksen etrafında dönecek şekilde koordine edilmiştir. Her üç algoritma da Simulink'te uygulanmıştır. Yazarlar Genişletilmiş Kalman algoritmasının daha yüksek bir hesaplama yükü olmasına rağmen 3 filtrenin de benzer şekilde çalıştığı sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada ise Madgwick algoritmasının farklı koşullardaki performansı, kendi içerisinde değerlendirilmek üzere incelenmiştir. Daha sonra ise filtre modifiye edilerek daha adaptif hale getirilmeye çalışılmıştır. Madgwick algoritmasında jiroskop ölçümlerinin entegrasyonundan doğan hata ivmeölçer verileri kullanarak düzeltilmeye çalışılır. Jiroskop ölçümleri kısa zaman aralıklarında iyidir. Fakat zamana bağlı olarak entegrasyon dolayısıyla kayma sorunu yaşarlar. Bu yüzden daha uzun zaman periyotlarında doğru sonucu veren ivmeölçer ile jiroskop hatası düzeltilir. Fakat ivmeölçerler titreşimden ve yanal ivmelerden kolayca etkilenirler. Bu yüzden kısa

zaman aralıklarında gürültülü sonuç verirler. Madgwick filtresinde jiroskop ölçümleri ile ivmeölçer ölçümleri arasındaki bağ β kazancı parametresiyle yönetilir. Bu kazancın arttırılması ivmeölçerin sensör füzyonundaki ağırlığını arttırır. Dolayısıyla β kazancını arttırmak jiroskop ölçüm hatasının daha hızlı düzeltilmesini, yani oryantasyon ölçüm sonucunun gerçek değere daha hızlı yakınsamasını sağlar. Fakat bu, aynı zamanda sonucun daha gürültülü olmasına yol açacaktır. Bu bağlamda β parametresinin dinamik değişken olarak kullanılması filtre verimliliğini arttırabilir. Bu çalışmada 4 adet hareket senaryosu farklı β değerleriyle incelenmiş; bunun sonuçları baz alınarak β kazancının jiroskop ölçümlerinden gelen oryantasyon değişim hızının değerine göre dinamik olarak değiştiği şekilde Madgwick filtresi modifiye edilmiştir. Madgwick 2010, çalışmasında dinamik β kullanımını teşvik etmiştir.

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada jiroskop ve ivmeölçer verilerinden oryantasyon tahmini yapan Madgwick'in IMU algoritması ele alınmıştır (Madgwick, 2010). Manyetometrenin de kullanıldığı Madgwick'in MARG algoritmasının kullanımından kaçınılma nedeni manyetometrenin manyetik alanlardan kolayca etkilenmesidir.

Madgwick IMU algoritmasının farklı hızlara ve hareketler arasındaki farklı duraksama sürelerine verdiği tepkiler ölçülmüş; bu sayede azimut açısının gerekmediği kullanım alanlarında, algoritmanın optimum kullanım koşulları görülmüştür. Ayrıca, Madgwick algoritmasının tek ayarlanabilir parametresi olan β parametresinin farklı değerleri incelenerek bu parametrenin etkisi gösterilmiştir. Daha sonra ise, β parametresi değişken yapılarak filtrenin başlangıçtaki yakınsama süresinin kısaltılması; sadece oryantasyon değişim hızının yüksek olduğu zaman dilimlerinde β değerini arttırarak gerekmeyen zamanlarda ivmeölçerden kaynaklı gürültünün azaltılması; aynı zamanda yüksek hızlarda gerçek değere yakınsama hızının arttırılması amaçlanmıştır.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Bölüm 2'de, AÖB bileşenleri olan jiroskop, ivmeölçer ve manyetometre tanıtılmaktadır. Daha sonra bu birimlerin oryantasyon tahmini hesaplamadaki işlevleri anlatılmıştır. Son olarak da belli başlı AÖB hatalarından bahsedilmektedir.

Bölüm 3’te, yaygın kullanımdaki diğer algoritmalar olan Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Mahony Filtresi anlatılmaktadır.

Bölüm 4’te, Madgwick’in türettiği algoritmanın matematiksel gösterimi ve bu gösterimde kullanılan teknikleri açıklanmakta olup, akabinde Matlab/Simulink ortamında oluşturulan Madgwick IMU algoritması gösterilmektedir.

Bölüm 5’te, deneyde kullanılan ekipmanlar, deney senaryoları ve uygulanan prosedürler anlatılmaktadır.

Bölüm 6’da, ölçüm sonuçları değerlendirilerek hareket analizi yapılmaktadır.

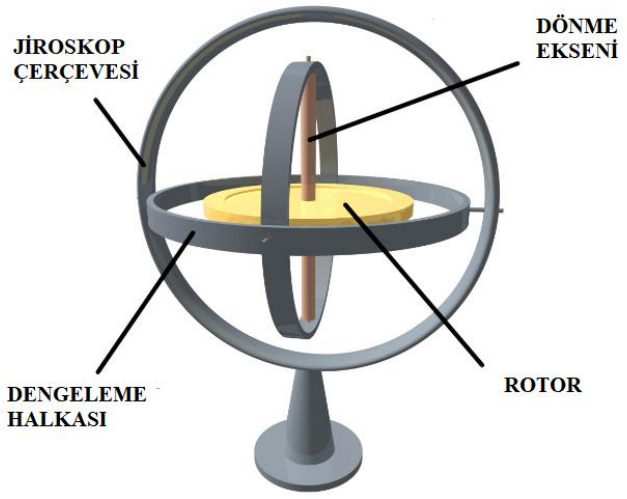
2. ATALETSEL ÖLÇÜ BİRİMİ

Atalet ölçü birimleri (IMU'lar) olarak da bilinen atalet sensörleri, kendi üç boyutlu lokal koordinat sistemindeki ivmeyi, açısal hızı ve manyetik alan vektörünü ölçerler (Seel ve diğ., 2014). Ataletsel ölçü birimleri temelde içlerinde jiroskop, ivmeölçer ve kullanım durumuna göre manyetometre barındırırlar.

2.1 AÖB Bileşenleri

2.1.1 Jiroskop

Jiroskop, açısal momentumun korunması prensibiyle çalışarak açısal hız tespiti ve yön ölçümü yapılmasına yarayan, 3 adet iç içe geçmiş halka ve en içte de rotor bulunduran bir alettir (Şekil 2.1). Yapısı sayesinde açısal hız sürekli olarak korunma eğiliminde olduğu için jiroskop döndürülme, devrilme gibi hareketlerden etkilenmez.



Şekil 2.1 : Jiroskop.

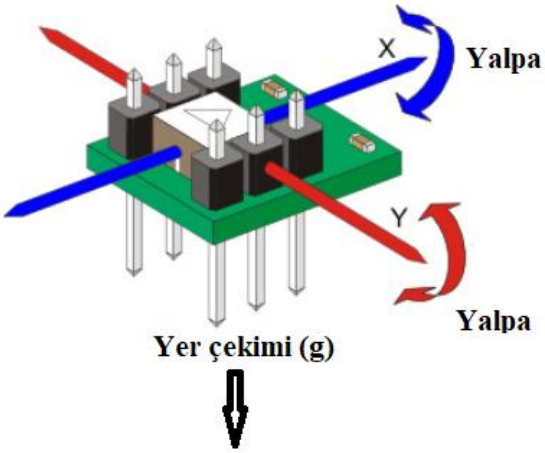
2.1.2 İvmeölçer

İvmeölçerler , üzerinde bulunduğu gövdeye etki eden ivmeyi ölçen cihazlardır (Şekil 2.2). AÖB'lerde kullanılan ivmeölçerler genellikle 3 eksenli olurlar ve kendi

eksenlerindeki ivmeyi verirler. Genellikle AÖB'lere etkiyen en büyük ivme yerçekimi ivmesidir.

En yaygın ivmeölçerler kapasitif ve piezoelektrik prensipleriyle çalışanlarlardır. Piezoelektrik ivmeölçerler içindeki kristallere etkiyen baskıyla doğru orantılı olarak bir gerilim değeri meydana getirirler. Bu gerilim değeri ise referans gerilim değeriyle kıyaslanarak ivme değerini verir.

Kapasitif ivmeölçerlerde ise sabit ve haraketli elektrotlar vardır. Birbirine paralel iki levha arasında bir kapasitans değeri meydana gelir. İvme oluşup hareketli elektrot ve sabit elektrot arasındaki mesafe değiştiğinde kapasitans değeri de değişir ve bu fark ivme değerini bulmak için kullanılır.

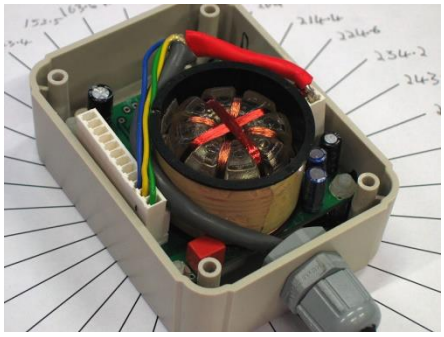


Şekil 2.2 : İvmeölçer.

2.1.3 Manyetometre

Manyetometre, bulunduğu yerdeki manyetik alanın yoğunluğunu ölçmekte kullanılır (Şekil 2.3). AÖB'lerde dünyanın manyetik kutbundan yola çıkılarak azimut açısının hesaplanmasında rol oynamaktadır.

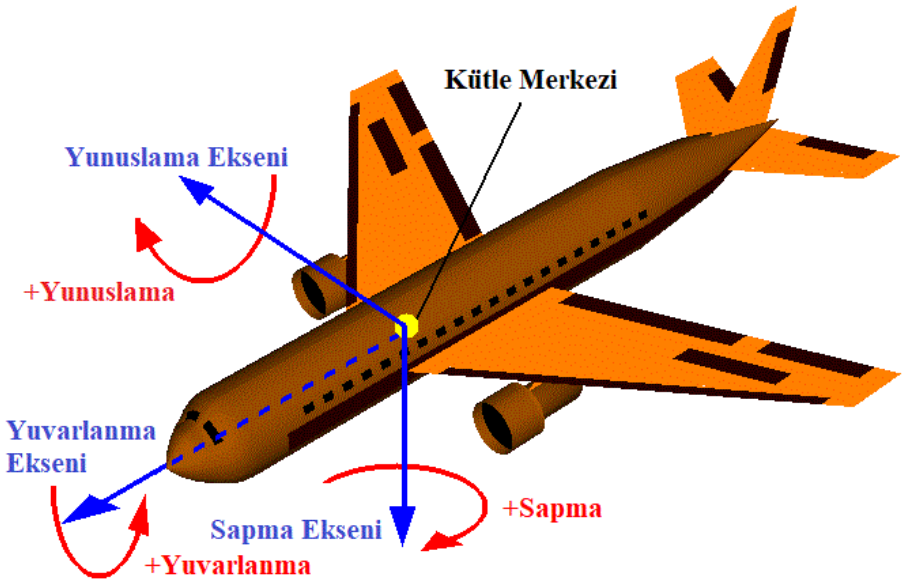
AÖB'lerde kullanılan manyetometreler halka şeklindeki iki adet manyetik çekirdeğin etrafına tel sarılarak yapılırlar. İlk çekirdekten geçen alternatif akım neticesinde çekirdek manyetik doygunluğa ulaşır ve diğer çekirdekten akım indüklenir. Bu akımın değerine göre manyetik alanın büyüklüğü bulunur.



Şekil 2.3 : Manyetometre.

2.2 AÖB Bileşenlerinin Oryantasyon Tahminine Etkileri

AÖB bileşenleri olan jiroskop, ivmeölçer ve manyetometrenin oryantasyon tahmini yapmada ayrı ayrı görevleri vardır. Oryantasyon tahmininde amaç, AÖB'nin bağlı olduğu gövdenin dünya eksen takımına göre yönelimini ifade etmektir. Bu yönelim literatürde Euler gösterimi olarak adlandırılan yuvarlanma, yunuslama ve sapma açılarıyla temsil edilmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Yuvarlanma, yunuslama, sapma açıları.

AÖB'lerde kullanılan jiroskoplar, bir dönme ekseni etrafındaki açısal hızı algılarlar. Jiroskopların verdiği değerler mutlak oryantasyon değillerdir. Gerçek dereceyi değil, açısal hızı verirler. Bu sensörlerden oryantasyonu elde etmek için, hız değerlerini bilinen bir ilk oryantasyon kullanılarak bütünleştirmek, yani integralini almak gerekir.

Jiroskoplar genellikle üç eksenlidir ve 3 eksenli ivmeölçer ile birleşince 6 serbestlik dereceli bir atalet ölçüm birimi oluştururlar.

AÖB içinde bulunan ivmeölçerler 3 eksenli olup, serbest düşüşü referans alarak ilgili eksen boyunca oluşan ivmeyi ölçerler. Yeryüzünde sabit bir nesnenin ivmesinin dikey bileşen değerinin yerçekimine eşit olması gerektiğinden, ünitenin eğim açısı (dolayısıyla ünitenin bağlı olduğu nesneyi) basitçe hesaplanabilir.

Referans olarak alınan yerçekimi ivmesi dikey eksende olduğundan yuvarlanma ve yunuslama açıları bulunabilir, fakat yatay eksende bir referans olmadığı için sapma açısı (azimut) bulunamaz (Şekil 2.2).

Manyetometreler ise AÖB içinde pusula vazifesi görürler. Harici bir manyetik alan bozucu materyalin yokluğunda manyetometreler her zaman dünyanın manyetik kuzeyini ölçerler. Manyetik kuzeyin ise ivmeölçerdeki yerçekiminin aksine yatay bileşeni de bulunmaktadır. Bu yatay bileşenin referans alınması ise sapma açısı tespitini mümkün kılar. Fakat manyetik materyallerden kolayca etkilenmeleri problem yaratmaktadır.

Özetlenecek olursa, ivmeölçer yeryüzüne göre yapılan eğim açılarını (yuvarlanma, yunuslama) verir fakat rotayı (sapma) vermez. Teoride şayet başlangıç konumu biliniyorsa, bu konuma ivme verisi eklenerek pozisyon tahmini yapılabilir ama pratikte çok hızlı hata birikmesi olur. Manyetometre ise yere paralel tutulduğu takdirde azimut açısını verir. Jiroskoplar açısal hız değerlerini verme konusunda iyidirler fakat kesin bir referansları bulunmamaktadır. Eğer başlangıçtaki yönelim biliniyorsa, yüksek kare hızlarında oryantasyon tahminleri alınabilir. Buna rağmen jiroskoplarda kayma(sapma) hatası hızlıca meydana gelir.

2.3 AÖB Hataları

Ataletsel ölçü birimlerinde genel olarak rastlanılan hatalar aşağıdaki gibidir (IMU Errors and Their Effects, 2019).

2.3.1 Giriş aralığı

Giriş aralığı, IMU'nun anlamlı şekilde ölçebileceği maksimum açısal hız veya ivmedir. Bu aralığın dışındaki kalmak hatalı ölçüm alınmasına veya hiç ölçüm alınmamasına neden olur. Ayrıca sensörlerin bant genişliği, sensörlerin gerçek hareketi ölçme

becerisinde önemli bir rol oynar. Düşük bir bant genişliği, yüksek frekanslı titreşimin doğru bir şekilde ölçülmediği anlamına gelir ve elde edilen ölçüm zarar görür. Bu nedenle, önemli titreşimlerin olduğu veya düşük bant genişliği sensörleri bulunan durumlarda titreşim yalıtımı yapılması önerilir.

2.3.2 Sapma

Fiziksel bir sensör girişi için ölçüm değeri belirli bir sapma miktarıyla birlikte verilir. Bu sapma miktarı kadar gerçek sonuçtan uzaklaşılmış olunur. Bu sapma miktarının tekrarlanabilirliği ve kararlığı da önemli faktörlerdir.

2.3.3 Ölçek faktörü

Ölçek faktörü hatası giriş ve çıkış arasındaki ilişkidir. Giriş %100 ise, beklenen çıkış %100'dür. Gerçek çıktı, çıkışın girdi ile orantılı ancak ölçeklendirildiği doğrusal bir etkinin sonucudur.

2.3.4 Ölçek faktörü doğrusallığı

Doğrusallık, ölçek faktörü için başka bir husustur. Ölçek faktörü etkisinin doğrusal olmayan kısmı bu husus ile açıklanmaktadır. Çoğu zaman, AÖB üreticileri ölçek faktörünün doğrusal ve doğrusal olmayan kısımlarını bir değerde birleştirir. Ölçek faktörü etkileri en yüksek hızlanma ve dönme zamanlarında belirgindir.

2.3.5 Gürültü

Bir sensör sabit bir sinyali ölçüyorsa, ölçümde rastgele bir gürültü (hata) her zaman mevcuttur. Bu, stokastik bir işlem olarak tanımlanır ve istatistiksel teknikler kullanılarak en aza indirilir.

2.3.6 Sensörün ortogonal olmaması

Üç adet jiroskop ve üç adet ivmeölçer birbirine dik olarak monte edilir. Bununla birlikte, bağlantıların hataları vardır ve bu nedenle kusursuz bir şekilde 90 derece değildir. Bu, sensörler arasında bir korelasyona yol açar. Dikkatli üretim ve fabrika kalibrasyonu bu hata kaynağını en aza indirmeye yardımcı olabilir. Sistem çalışması

sırasında sürekli tahmin ve düzeltme de bu etkiyi en aza indirmek için kullanılan bir yaklaşımdır.

2.3.7 Yerçekimi bağımlılığı

Bazı jiroskoplar ve ivmeölçerler, sensörün nasıl hızlanma yaşadığına bağlı olarak sapma miktarında bir değişikliğe maruz kalırlar. Bu, kütle algılama ekseni boyunca ivmelenmeye başladığında, MEMS jiroskoplarında en yaygın olanıdır. Bu etki ölçümlerden modellenebilir ve sıklıkla ölçümlerin çıktısından önce AÖB sinyal şartlandırma aşamasında dahil edilir.

2.3.8 Zamanlama hataları

Ölçüm sonuçları eşzamanlı bir şekilde harici bir kaynağa aktarılırken yaşanan gecikme ile ivmeölçer ve jiroskop verilerinin senkronizasyon bozukluğundan kaynaklanan hatalardır.

3. DİĞER ALGORİTMALAR

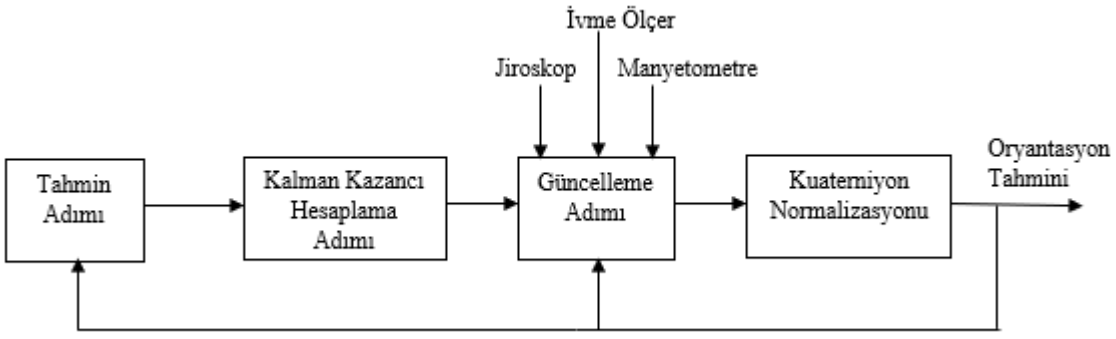
3.1 Genişletilmiş Kalman Filtresi

Kalman Filtreleri, bir prosesin ölçülmemiş durumlarını tahmin etmek için kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir tahmin düzeltici algoritmasıdır. Genişletilmiş Kalman Filtresi ise tahmin teorisinde Kalman filtresinin doğrusal olmayan sistemlerde kullanılan versiyonudur.

Genişletilmiş Kalman filtresi, aşağıdaki dört adımdan oluşan kapalı bir döngü sistemidir:

- Tahmin
- Kalman kazancı
- Güncelleme
- Kuaterniyon normalizasyonu

MIMU sensörü girişi güncelleme adımı sırasında sağlanır ve dört adımın her biri yürütüldükten sonra, çıktı olarak bir oryantasyon tahmini elde edilir. Genişletilmiş Kalman filtresi, doğrusal olmayan stokastik diferansiyel denklemler tarafından yönetilen durumlarla ilgilenen doğrusal olmayan sistemleri modellemek için kullanılır (Ludwig ve Burnham, 2018).



Şekil 3.1 : Genişletilmiş Kalman Filtresi blok diyagramı (Cirillo ve diğ., 2016).

Genişletilmiş Kalman Filtresi Algoritması adımları aşağıda gösterilmektedir. Denklem 3.1 ile 3.4 arasındaki denklemler ölçüm güncelleme denklemleridir. Denklem 3.5 ile 3.7 arasındaki denklemler ise adım k'dan k + 1'e kadar olan zaman güncelleme denklemleridir. İyileştirilmiş ardıl bir tahmini hesaplamak için, denklemler ölçüm değerini bir önsel tahmine dönüştürür. P_k hata kovaryans matrisidir. Buradaki $\hat{x}_k$, sistem durumu vektörü x_k'nın tahmini ve K_k, Kalman kazanç matrisidir. Algoritma başlangıç koşul değerleri $\hat{x}_0^-$ ve P_0^- ile başlar ve yeni ölçüm Z_k kullanılabilir hale geldiğinde, durumların tahmini ve karşılık gelen hata kovaryansı tekrar tekrar hesaplanır. R_k ölçüm gürültü kovaryans matrisi, Q_k işlem gürültü kovaryans matrisi, Z_k ölçüm vektörüdür.

- Durum vektörünün ve durum kovaryans matrisinin başlatılması:

$$\hat{x}_0^- \text{ ve } P_0^-$$

- Kalman kazanç matrisinin hesaplanması:

$$K_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R_k]^{-1} \quad (3.1)$$

- Durum düzeltme vektörü ve güncelleme durumu vektörünün hesaplanması:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k\left[Z_k - \hat{Z}_k^-\right] \quad (3.2)$$

$$\hat{z}_k^- = \mathrm{h}\,(\hat{x}_k^-, k) \quad (3.3)$$

- Hata kovaryansının güncellenmesi:

$$P_k = [I - K_k H_k] P_k^- \quad (3.4)$$

- Yeni durum vektörü ve durum kovaryans matrisinin tahmini:

$$\hat{x}_{k+1}^- = \mathrm{f}\left(\hat{x}_{k,} k\right) \quad (3.5)$$

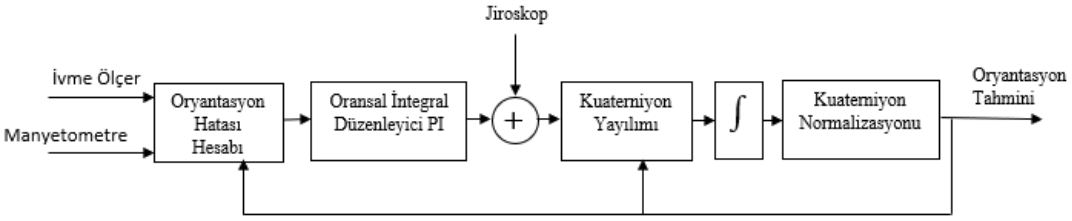
$$P_{k+1}^- = \phi_k P_k \phi_k^T + Q_k \quad (3.6)$$

Sistem matrisi ϕ_k ve ölçüm matrisi H_k için doğrusal yaklaşım denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\phi_k \approx \frac{\partial f_k}{\partial_x}\Big| x = \hat{x}_k^-;\ H_k \approx \frac{\partial h_k}{\partial_x}\Big|\ x = \hat{x}_k^- \quad (3.7)$$

3.2 Mahony Filtresi

Algoritma, ölçülen ve tahmini vektörleri, ivme ve manyetik alanı çapraz çarparak hatayı hesaplar. Bu jiroskop sapmasının düzeltilmesine izin verir.



Şekil 3.2 : Mahony Filtresi blok diyagramı (Cirillo ve diğ., 2016).

Mahony filtresi, kuaterniyon uzayında oryantasyon tahmini yapan tamamlayıcı bir filtredir. Mahony filtresinin genel fikri, jiroskop ölçümlerinden elde edilen oryantasyon verisi ve ivmeölçer ölçümleriyle elde edilen doğrultu verisini birleştirerek mevcut oryantasyonu tahmin etmektir. İlk olarak, ölçülen açısal hızı düzeltmek için Oransal-İntegral (PI) dengeleyicisine dayanan bir düzeltme adımının uygulandığı önceki adımdan gelen bir oryantasyon hatası hesaplanır. Bu açısal hız, kuaterniyon yayılımına girer ve oryantasyon tahminini elde etmek için entegre edilir.

Denklem 3.8-3.12, Mahony filtresi algoritmasını göstermektedir. k_i ve k_p sırasıyla integral ve oransal ayarlanabilir kazançlardır. Algoritma, ölçülen ve tahmini vektörleri ve ivme ve manyetik alanı çarparak hatayı hesaplar. Bu jiroskop sapmasının düzeltilmesine izin verir. $E_{a_{q,t}}$ sadece z eksenindeki yerçekimi bileşeninden oluşan ivme referans vektörüdür. $E_{m_{q,t}}$ ise manyetik alan için referans vektördür. Bu referans vektörler ve t-1 anındaki birim oryantasyonu gösteren $\hat{q}_{t-1}$ kuaterniyonu sayesinde $s_{\hat{a}_{q,t}}$ tahmini ivme vektörü ve $s_{\hat{m}_{q,t}}$ tahmini manyetik alan vektörleri bulunur. s_{a_t} ivmeölçerden, s_{m_t} ise manyetometreden t anında gelen verilerdir. Ayrıca $s_{w_{mes,t}}$ jiroskop ölçüm hatası, $s_{\hat{w}_{b,t}}$ jiroskop sapması, $S_{w_{q,t}}$ t anındaki jiroskop ölçüm verisi, $s_{\hat{w}\,r,q,t}$ ise hesaplanan gerçek açısal hızı ifade etmektedir.

Mahony filtresi algoritmasının matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$s_{\hat{a}_{q,t}} = \hat{q}_{t-1}^{-1} \otimes E_{a_{q,t}} \otimes \hat{q}_{t-1} \tag{3.8}$$

$$s_{\hat{m}_{q,t}} = \hat{q}_{t-1}^{-1} \otimes E_{m_{q,t}} \otimes \hat{q}_{t-1} \tag{3.9}$$

$$s_{w_{mes,t}} = \left[s_{a_t}\, x\, s_{\hat{a}_t}\right] + \left[s_{m_t}\, x\, s_{\hat{m}_t}\right] \tag{3.10}$$

$$s_{\hat{w}_{b,t}} = -k_i s_{w_{mes,t}} \tag{3.11}$$

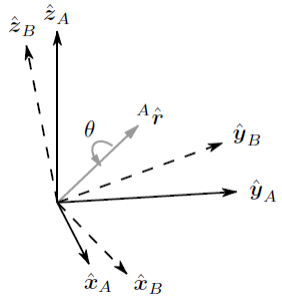
$$s_{\hat{w}\,r,q,t} = S_{w_{q,t}} - \left[0 \quad s_{\hat{w}_{b,t}}\right] + \left[k_p s_{w_{mes,t}}\right] \tag{3.12}$$

$$\dot{\hat{q}} = \frac{1}{2}\hat{q}_{t-1} \otimes s_{\hat{w}\,r,q,t} \tag{3.13}$$

4. MADGWICK ALGORİTMASI

4.1 Kuaterniyon Gösterimi

Kuaterniyon 3 boyutlu uzayda oryantasyonu ifade eden 4 boyutlu bir kompleks sayıdır. Örneğin B eksen takımının A eksen takımına göre oryantasyonu, A eksen takımında tanımlı ${}^{A}\hat{r}$ birim vektörü etrafında θ açısı kadar döndürülmesinden elde edilebilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Bir eksen takımının başka bir eksen takımına göre oryantasyonu.

Kuaterniyon gösteriminde, B eksen takımının A eksen takımına göre oryantasyonu ${}^{A}_{B}\hat{q}$ şeklinde ifade edilir. Kuaterniyon aritmatiğinde her zaman tanımlanan oryantasyon öncelikle normalize edilir. Bu nedenle kuaterniyon şeklinde tanımlı olan oryantasyon birim uzunlukta olur (Madgwick, 2010).

$$ {}^{A}_{B}\hat{q} = [q_1 \; q_2 \; q_3 \; q_4] = [\cos\frac{\theta}{2} - r_x \sin\frac{\theta}{2} - r_y \sin\frac{\theta}{2} - r_z \sin\frac{\theta}{2}] \tag{4.1} $$

Referans eksen takımıyla tanımlanan eksen takımını değiştirerek aynı oryantasyonu tanımlamak için quaterniyon konjugesi kullanılır. Örneğin ${}^{A}_{B}\hat{q}$ konjugesi ${}^{B}_{A}\hat{q}$'dır ve ${}^{A}_{B}\hat{q}^*$ şeklinde gösterilir.

$$ {}^{A}_{B}\hat{q}^* = {}^{B}_{A}\hat{q} = [q_1 - q_2 - q_3 \; - q_4] \tag{4.2} $$

Kuaterniyon çarpımı, $\otimes$, birleşik oryantasyonu ifade eder.

$$ {}^{A}_{C}\hat{q} = {}^{B}_{C}\hat{q} \otimes {}^{A}_{B}\hat{q} \tag{4.3} $$

$$a \otimes b = [a_1\ a_2\ \ a_3\ a_4] \otimes [b_1\ \ b_2\ \ b_3\ \ b_4] = \begin{bmatrix} a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 - a_4b_4 \\ a_1b_2 + a_2b_1 + a_3b_4 - a_4b_3 \\ a_1b_3 - a_2b_4 + a_3b_1 + a_4b_2 \\ a_1b_4 + a_2b_3 - a_3b_2 + a_4b_1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

4.5 denkleminde gösterildiği gibi 3 boyutlu bir vektör kuaterniyon ile döndürülerek başka bir eksen takımında ifade edilebilir. Aşağıdaki denklemde A eksen takımındaki bir vektör B eksen takımına göre tanımlanmaktadır. Ortaya çıkan her iki gösterim de aslında aynı vektörü farklı eksen takımlarında ifade etmektedir. 3 boyuttaki vektörler kuaterniyon işlemleri için başlarına 0 konularak 4 elemanlı hale getirirlirler.

$$^{B}v = {}^{A}_{B}\hat{q} \otimes {}^{A}v \otimes {}^{A}_{B}\hat{q}^{*} \quad (4.5)$$

Kuaterniyon şeklindeki oryantasyon gösterimi istenirse rotasyon matrisine çevrilip Euler açıları şeklinde ifade edilebilir.

4.2 Madgwick Filtresi'nin Türetilmesi

Bu bölümde Madgwick'in türettiği IMU algoritmasının türetilişi gösterilmektedir (Madgwick, 2010).

4.2.1 Açısal hızdan türetilen oryantasyon

3 eksenli jiroskop sensör eksen takımının x, y ve z eksenlerinde açısal hızı ölçecektir. Bu açısal hızlar ω_x, ω_y, ω_z olarak adlandırılırlar ve $^{S}\omega$ vektörünü oluştururlar (4.6). Sensör eksen takımına göre dünya eksen takımının oryantasyon değişim oranı ise kuaterniyon türeviyle tanımlanır (4.7).

$$^{S}\omega = [0\ \ \omega_x\ \omega_y\omega_z\ ] \quad (4.6)$$

$${}^{S}_{E}\dot{q} = \frac{1}{2}\ {}^{S}_{E}\hat{q} \otimes {}^{S}\omega \quad (4.7)$$

Başlangıç koşulları biliniyorsa eğer t anındaki oryantasyon olan ${}^{S}_{E}q_{\omega,t}$, kuaterniyon türevinin nümerik olarak integralinin alınmasıyla bulunabilir. 4.8 ve 4.9 denklemlerinde $^{s}\omega_t$ t anında ölçülen açısal hız, Δt örnekleme periyodu ve ${}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}$ bir önceki oryantasyon tahminidir.

$${}^{S}_{E}\dot{q}_{\omega,t} = \frac{1}{2}\ {}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^{s}\omega_t \quad (4.8)$$

$${}^{S}_{E}q_{\omega,t} = {}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1} + {}^{S}_{E}\dot{q}_{\omega,t}\ \Delta t \quad (4.9)$$

4.2.2 Vektör gözlemlerinden türetilen oryantasyon

3 eksenli ivmeölçer yerçekimi ivmesinin büyüklüğü ve yönüyle beraber sensörün hareketinden doğan lineer ivmeleri ölçecektir. Oryantasyon filtresinde başlangıçta ivmeölçerin sadece yerçekimi ivmesini ölçtüğü varsayılacaktır. Eğer yerçekiminin dünya eksen takımındaki yönü biliniyorsa, sensör eksen takımında ölçülen ivme yönü, sensör eksen takımının dünya eksen takımına göre oryantasyonunun hesaplanmasını sağlayacaktır. Fakat herhangi bir ölçümde tek bir sensör oryantasyon çözümü olmayacaktır. Sonsuz çözümleri engellemek için optimizasyon yapılması gerekmektedir. Bu nedenle daha önceden ${}^{E}\hat{d}$ olarak tanımlanan yerçekimi ivmesinin dünya eksen takımındaki yönü referans olarak tanımlanır. ${}^{S}\hat{s}$ ise aynı ivmenin sensör eksen takımında ölçülen yönüdür.4.5 numaralı eksen takımları arası vektör çevrimi denklemini kullanarak ${}^{E}\hat{d}$ referansı ile ${}^{S}\hat{\boldsymbol{s}}$ ölçümü arasındaki farkın minimum olduğu ${}^{S}_{E}\hat{q}$ oryantasyonu bulunur (4.10)(4.11).

$$\min_{{}^{S}_{E}\hat{q}\in\Re^4} f\left({}^{S}_{E}\hat{q},\ {}^{E}\hat{d}, {}^{S}\hat{s}\right) \tag{4.10}$$

$$f\left({}^{S}_{E}\hat{q},\ {}^{E}\hat{d},\ {}^{S}\hat{S}\right)={}^{S}_{E}\hat{q}^{*}\otimes{}^{E}\hat{d}\otimes{}^{S}_{E}\hat{q}\ -{}^{S}\hat{S} \tag{4.11}$$

$${}^{S}_{E}\hat{q}=[q_1\ \ q_2\ \ q_3\ \ q_4] \tag{4.12}$$

$${}^{E}\hat{d}=[0\ \ d_x\ \ d_y\ \ d_z] \tag{4.13}$$

$${}^{S}\hat{s}=[0\ \ s_x\ \ s_y\ \ s_z] \tag{4.14}$$

Gradyan iniş algoritmasının tanımlandığı 4.15 numaralı denklem oryantasyon tahmini vermektedir. 4.16 numaralı denklemde objektif fonksiyon ve onun jakobyanıyla tanımlanan çözüm yüzeyinin gradyanı hesaplanmaktadır.

$${}^{S}_{E}q_{k+1}={}^{S}_{E}\hat{q}_k\ -\mu\frac{\nabla f({}^{S}_{E}\hat{q}_k,\ {}^{E}\hat{d},{}^{S}\hat{s})}{\|\nabla f({}^{S}_{E}\hat{q}_k,\ {}^{E}\hat{d},\ {}^{S}\hat{s})\|},\ \mathrm{k}=0,1,2\ldots\mathrm{n} \tag{4.15}$$

$$\nabla f({}^{S}_{E}\hat{q}_k,\ {}^{E}\hat{d},{}^{S}\hat{s})=\mathcal{J}^{T}({}^{S}_{E}\hat{q}_k,\ {}^{E}\hat{d})f({}^{S}_{E}\hat{q}_k,\ {}^{E}\hat{d},\ {}^{S}\hat{s}) \tag{4.16}$$

Yerçekimi doğrultusunun sadece düşey z ekseninde olduğunu varsaymak denklemleri sadeleştirecektir. ${}^{E}\hat{d}$ yerine ${}^{E}\hat{g}$, ${}^{S}\hat{s}$ yerine de normalize edilmiş ivme ölçümü ${}^{S}\hat{a}$ koyulur.

$${}^{E}\hat{g}=[0\ \ 0\ \ 0\ \ 1] \tag{4.17}$$

$$^{S}\hat{a} = [0 \;\; a_x \;\; a_y \;\; a_z] \tag{4.18}$$

$$f_g(\,{}^{S}_{E}\hat{q},\;\; {}^{S}\hat{a}\,) = \begin{bmatrix} 2(q_2q_4 - q_1q_3) - a_x \\ 2(q_1q_2 + q_3q_4) - a_y \\ 2\left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2\right) - a_z \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

$$J_g(\,{}^{S}_{E}\hat{q}) \;\; = \begin{bmatrix} -2_{q3} & 2_{q4} & -2_{q1} & 2_{q2} \\ 2_{q2} & 2_{q1} & 2_{q4} & 2_{q3} \\ 0 & -4_{q2} & -4_{q3} & 0 \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

μ_t ile yönetilen yakınsama oranının, oryantasyonun fiziksel değişim hızına eşit veya daha büyük olması şartıyla, her bir zaman örneklemesi başına yalnızca bir iterasyon hesaplanabilir. Böylelikle hesaplama yükü azalır. 4.21 numaralı denklem bir önceki oryantasyon tahmini olan ${}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}$ 'i baz alarak t zamanındaki oryantasyon olan ${}^{S}_{E}q_{\nabla,t}$ ifadesini hesaplamaktadır. ∇ ifadesi kuaterniyonun gradyan iniş algoritması kullanılarak hesaplandığını ifade etmektedir.

$${}^{S}_{E}q_{\nabla,t} = {}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1} - \mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \tag{4.21}$$

$$\nabla f = J_g^T(\,{}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}) f_g\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1},\; {}^{S}\hat{a}_t\right) \tag{4.22}$$

μ_t olarak ifade edilen adım uzunluğu değerinin optimumu, fiziksel oryantasyon hızıyla sınırlı olmanın etkisiyle tanımlanabilir. Böylelikle μ_t , örnekleme periyodu Δt , jiroskop tarafından ölçülen fiziksel oryantasyon hızı ${}^{S}_{E}\dot{q}_{\omega,t}$ ve α ivmeölçerdeki gürültüyü hesaba katan bir büyütme katsayısı olacak şekilde hesaplanabilir (4.23).

$$\mu_t = \alpha \left\| {}^{S}_{E}\dot{q}_{\omega,t} \right\| \Delta t, \; \alpha > 1 \tag{4.23}$$

4.2.3 Filtre füzyon algoritması

Sensör eksen takımının dünya eksen takımına göre oryantasyon tahmini için 4.21 numaralı denklemde belirtilen ${}^{S}_{E}q_{\nabla,t}$ ve 4.9 numaralı denklemde belirtilen ${}^{S}_{E}q_{\omega,t}$ verilerinin füzyonuyla oluşturulur. Bu füzyonda temel olarak jiroskop ve ivmeölçer kullanılarak elde edilen oryantasyonlar nispi ağırlıklar verilerek denklem haline getirilir (4.24). Bu nispi ağırlıklar γ_t ve (1-γ_t) ile ifade edilir.

$${}^{S}_{E}q_{est,t} = \gamma_t {}^{S}_{E}q\nabla, t \; + (1 - \gamma_t) {}^{S}_{E}q_{\omega,t}, \; 0 \leq \gamma_t \leq 1 \tag{4.24}$$

γ_t ifadesinin optimum değeri, ${}_E^S q_\omega$ ifadesinin ağırlıklı ıraksamasının ${}_E^S q_\nabla$ ifadesinin ağırlıklı yakınsamasına eşit olmasını sağlayacak şekilde tanımlanabilir. Bu, $\frac{\mu t}{\Delta t}$ ifadesinin ${}_E^S q_\nabla$ ifadesinin yakınsama hızı olduğu ve ${}_E^S q_\omega$ ifadesinin jiroskop ölçüm hatasına karşılık gelen bir kuaterniyon türevinin büyüklüğü olarak ifade edilen β sapma oranı olduğu denklem 4.25 ile temsil edilir. Denklem 4.25, denklem 4.26 olarak γ_t ifadesini tanımlayacak şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$(1\text{-}\gamma_t)^{\beta} = {}^{\gamma_t}\frac{\mu t}{\Delta t} \tag{4.25}$$

$$\gamma_t = \frac{\beta}{\frac{\mu t}{\Delta t}+\beta} \tag{4.26}$$

Denklemler 4.24 ve 4.26, α tarafından yönetilen ${}_E^S q_\nabla$' nin yakınsama hızının fiziksel oryantasyon değişim hızına eşit veya daha yüksek olduğu varsayılarak ${}_E^S q_{\omega,t}$ ve ${}_E^S q_\nabla, t$ 'nin optimum füzyonunu sağlar. Dolayısıyla α değerinin üst sınırı yoktur. α değerinin çok büyük olduğu varsayılırsa, denklem 4.23 ile tanımlanan μt, aynı zamanda çok büyür ve oryantasyon filtre denklemleri basitleşir. Denklem 4.21 'de kullanılan büyük bir μt değeri, ${}_E^S \hat{q}_{est,t-1}$ 'in ihmal edilebilir hale geldiği ve denklemin denklem 4.27 olarak yeniden yazılabileceği anlamına gelir.

$${}_E^S q_{\nabla,t} \approx -\mu t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \tag{4.27}$$

4.26 numaralı denklemdeki γ_t ifadesinin tanımlanması, paydadaki terimin ihmal edilebilir hale gelmesi ve denklemin denklem 4.28 olarak yeniden yazılabilmesi nedeniyle de basitleşir. Denklem 4.28 'den $\gamma_t \approx 0$ olduğunu varsaymak da mümkündür.

$$\gamma_t \approx \frac{\beta \Delta t}{\mu t} \tag{4.28}$$

Denklem 4.9 , 4.27 ve 4.28 'i denklem 4.24' e koymak doğrudan denklemi 4.29'u verir. Denklem 4.29'da γ_t ifadesinin denklem 4.27'de olduğu gibi değerlendirildiğine dikkat edilmelidir.

$${}_E^S q_{est,t} = \frac{\beta \Delta t}{\mu t}\left(-\mu t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|}\right) + (1\text{-}0)\left({}_E^S \hat{q}_{est,t-1} + {}_E^S \dot{q}_{\omega,t} \Delta t\right) \tag{4.29}$$

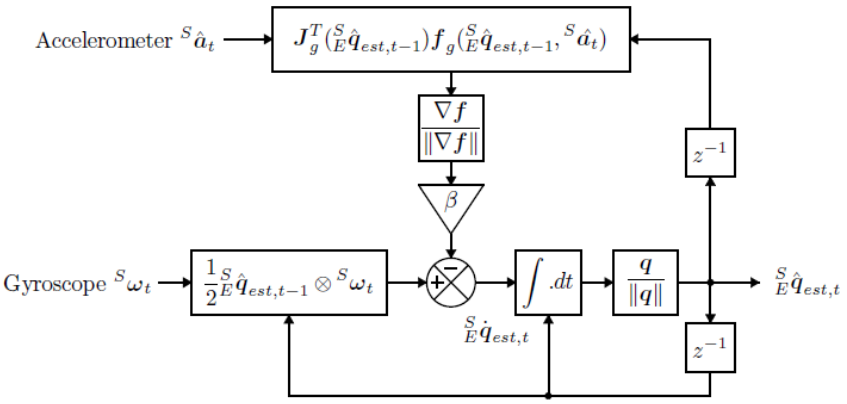
Denklem 4.29, 4.30 denklemi ile basitleştirilebilir. Burada ${}_E^S \dot{q}_{est,t}$, denklem 4.31 tarafından tanımlanan oryantasyonun tahmini değişim hızıdır ve ${}_E^S \dot{\hat{q}}_{\epsilon,t}$, denklem 4.32 tarafından tanımlanan ${}_E^S \dot{q}_{est,t}$ hatasının yönüdür.

$$ {}^{S}_{E}q_{est,t} = {}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1} + {}^{S}_{E}\dot{q}_{est,t}\Delta t \tag{4.30} $$

$$ {}^{S}_{E}\dot{q}_{est,t} = {}^{S}_{E}\dot{q}_{\omega,t} - \beta\, {}^{S}_{E}\hat{\dot{q}}_{\epsilon,t} \tag{4.31} $$

$$ {}^{S}_{E}\hat{\dot{q}}_{\epsilon,t} = \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \tag{4.32} $$

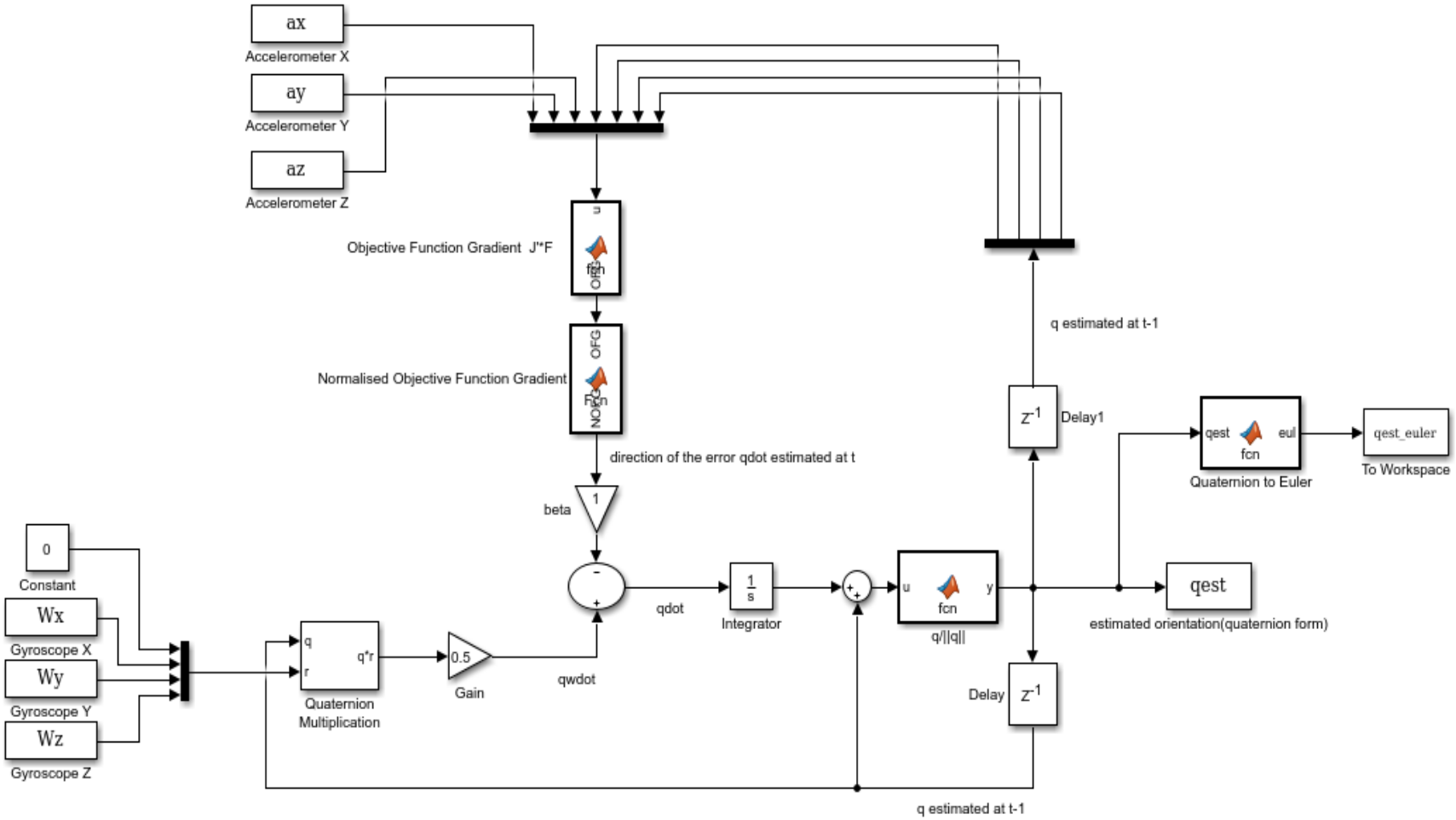
4.30 ile 4.32 arasındaki denklemlerde görüldüğü gibi filtre, tahmini oryantasyon hızının nümerik olarak integralini alarak ${}^{S}_{E}q_{est}$ oryantasyonunu hesaplar. Bu ${}^{S}_{E}\dot{q}_{est,t}$ oryantasyon hızı ise jiroskoptan gelen ölçümden, jiroskop ölçüm hatasının ivmeölçerin hesapladığı tahmini hata yönünde β büyüklüğünde çıkartılmasıyla elde edilir (Madgwick, 2010).



Şekil 4.2 : Madgwick IMU filtresi blok diyagramı (Madgwick, 2010).

4.3 Madgwick Algoritması'nın Matlab/Simulink'te Modellenmesi

Madgwick'in IMU algoritması Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Oluşturulan modelde, ivmeölçer ve jiroskop dataları daha once kaydedilmiş ham veriler şeklinde modele giriş olarak verilmiştir. Sonuçların daha rahat yorumlanması açısından algoritma sonucunda çıkan kuaterniyon gösterimi Euler açılarına çevrilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Madgwick IMU filtresinin oluşturulan Simulink modeli.

5. DENEY VE ÖLÇÜMLER

5.1 Kullanılan Ekipmanlar

5.1.1 XSENS MTw

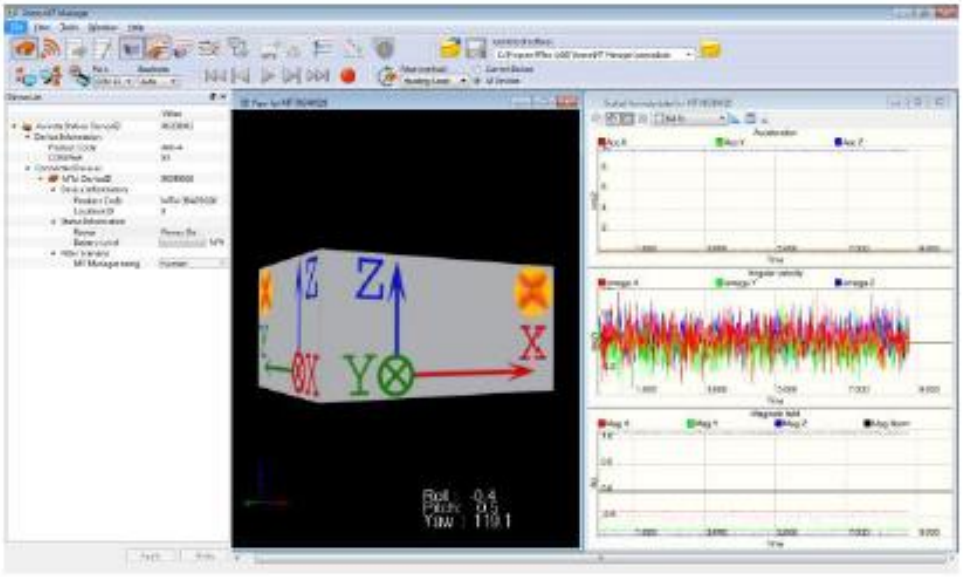
Hareket analizi yapmak için gerekli olan AÖB olarak XSENS firmasının ürettiği hareket takip ünitesi, MTw, kullanılmıştır (Şekil 5.1). MTw insan vücuduna giyilebilir ve kablosuz veri aktarımı ile eşzamanlı veri aktarımı yapabilir. Bunun için 1 adet Awinda USB dongle (Şekil 5.2) ile XSENS'in kendi arayüz yazılımı olan MT Manager gereklidir (Şekil 5.3). Çizelge 5.1, MTw hareket takip ünitesinin teknik performans verilerini göstermektedir.



Şekil 5.1 : XSENS MTw.



Şekil 5.2 : Awinda USB Dongle.



Şekil 5.3 : MT Manager arayüzü.

MTw, hız jiroskopları kullanarak 3B açısal hız, ivmeölçerler kullanarak 3B hızlanma, manyetometreler kullanarak 3B toprak manyetik alan ve barometre kullanan atmosferik basınç sağlar (MTw User Manual, 2010).

Çizelge 5.1 : MTw hareket takip ünitesinin teknik performans verileri.

	Açısal Hız	İvme
Boyut	3 Eksen	3 Eksen
Tam Ölçek	±1200 derece/sn	±160 m/sn^2
Doğrusallık	% 0.1	% 0.2
Sapma Kararlılığı	20 derece/saat	-
Gürültü	0.05 derece/sn/√Hz	0.003 m/sn^2/√Hz
Hizalama Hatası	0.1 derece	0.1 derece
Bant Genişliği	140 Hz	120 Hz

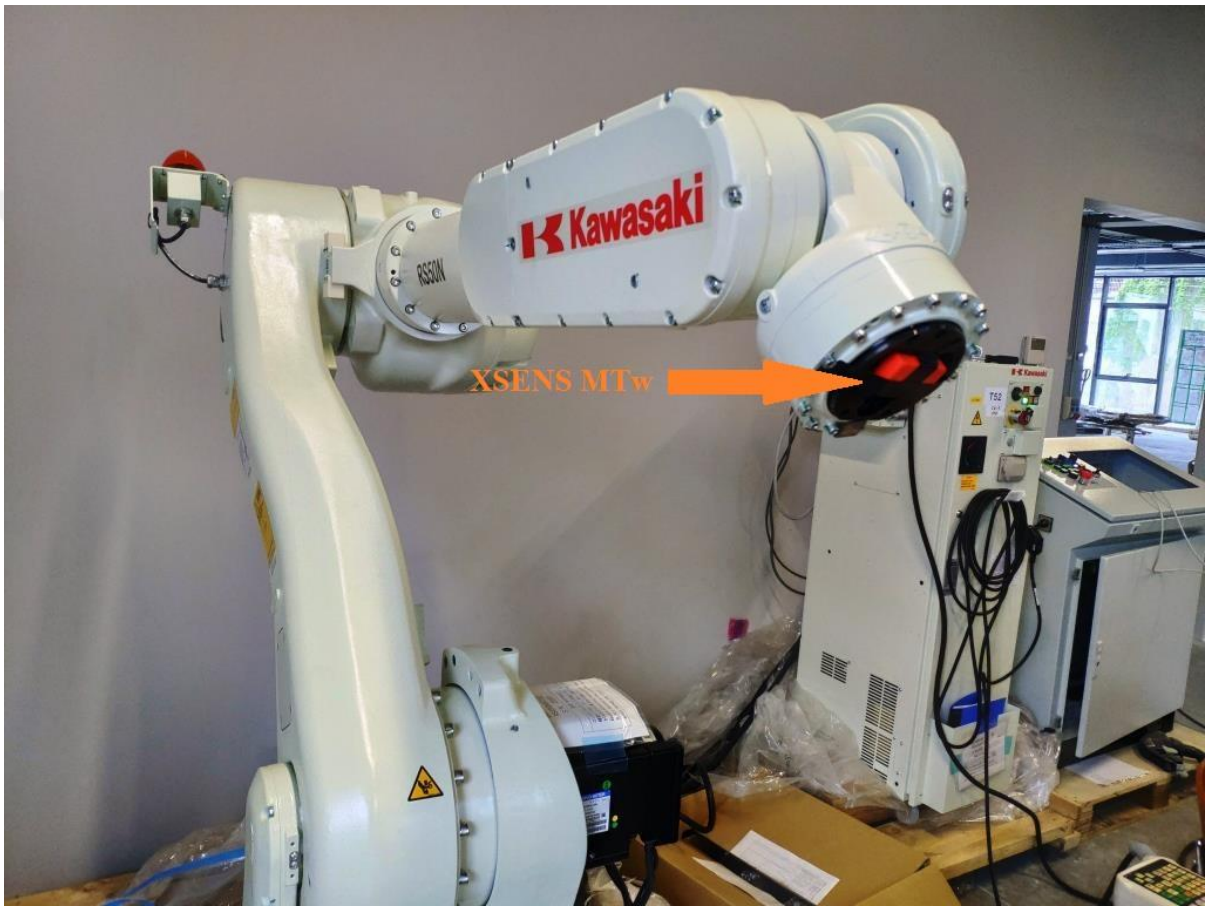
5.1.2 Kawasaki Robot

Yapılacak hareket analizinde, oryantasyon tahmin algoritmasının tepkisi, hız ve zaman gibi parametrelerin değiştirilmesiyle incelenecektir. Bu parametrelerin etkisinin ölçülebilmesi için ise AÖB'nin hareket yörüngesi her seferinde aynı olmalıdır.

Bununla birlikte, hareket hızı ve bekleme süreleri isteğe göre değiştirilebilmelidir.

Yörünge tekrarlanabilirliğinin hassas bir şekilde sağlanması ve gözlenecek parametrelerin kolayca ayarlanabilmesi için 6 eksenli bir robotun kullanımı uygun görülmüştür.

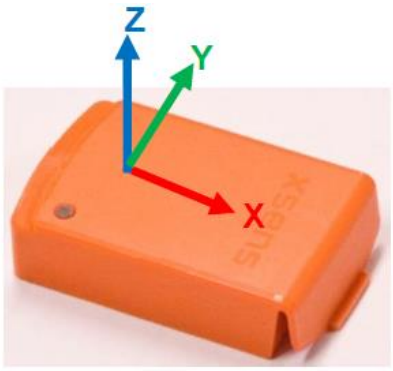
Deneyde 0.06 mm hassasiyete sahip KAWASAKI marka, RS050N model robot kullanılmıştır (Şekil 5.4). Robotun teknik özelliklerinde beirtilen hızı 13400 mm/sn olarak belirtilmiştir. Bu hız robot hız ayarının %100 yapıldığındaki en yüksek hızıdır.



Şekil 5.4 : Kawasaki Robot.

5.2 Deney Prosedürü

Öncelikli olarak MTw ünitesi robotun 6. eksen flanş yüzeyine takılmıştır. Robotun kendi global eksen takımını baz alarak flanş yüzeyinin yaptığı Euler açılarını gösterdiği araç koordinatlarının, XSENS MTw ünitesinin koordinat sistemiyle eşleşecek şekilde olmasına dikkat edilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 : MTw eksen takımı.

Robota başlangıç konumu da dahil olmak üzere farklı oryantasyonlarda 6 adet nokta tanıtılmıştır (Şekil 5.6). Robotun konum monitörü kullanılarak bu noktalardaki Euler açıları kaydedilmiştir (Şekil 5.7). Çizelge 5.2 robot hareket yörüngesindeki 6 adet noktanın robota göre euler açılarını göstermektedir.

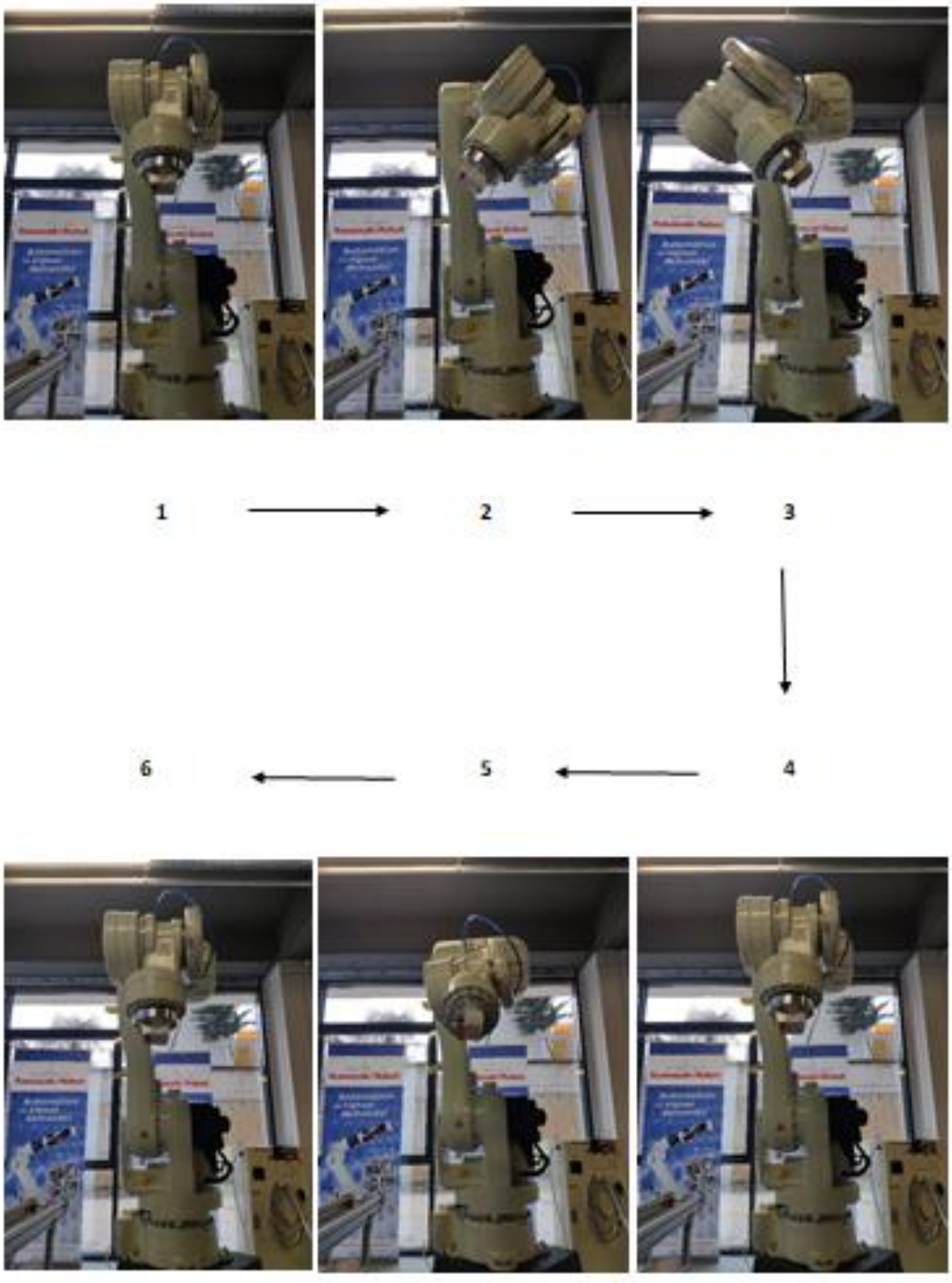
Çizelge 5.2 : Robot yörüngesindeki noktaların robota göre euler açıları.

Konum	O	A	T
1	108.653	177.485	110.069
2	1.53	141.430	3.789
3	175.813	139.347	176.375
4	85.274	177.634	86.712
5	88.401	139.548	89.791
6	80.900	178.986	82.338

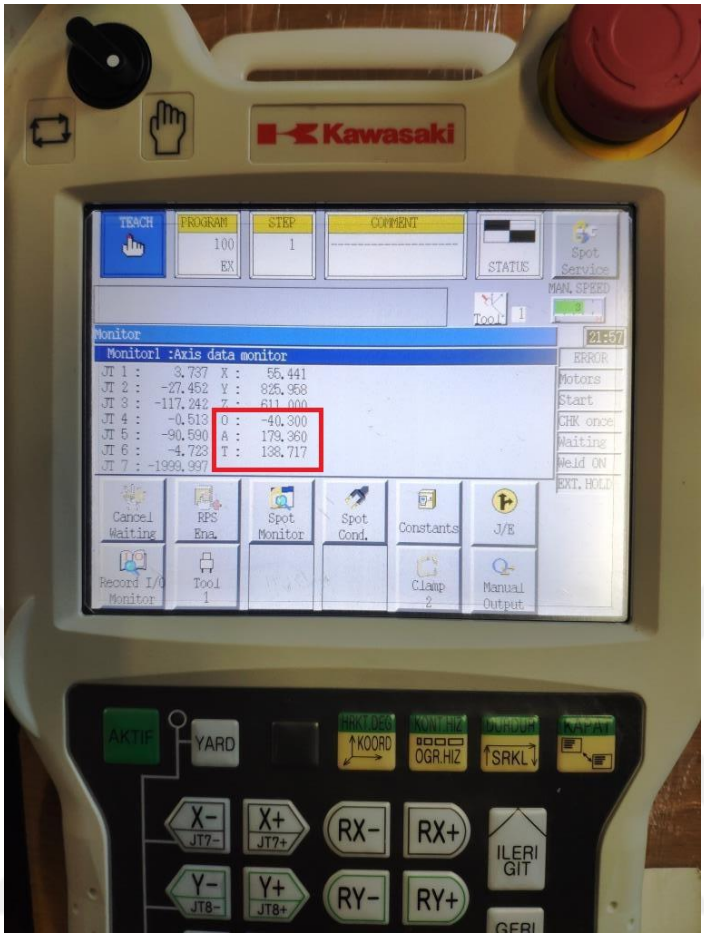
Robota aynı yörüngede farklı hızlar ve kaydedilen noktalar arasında farklı bekleme süreleri olacak şekilde programlar yazılmıştır (EK A). Çizelge 5.3'te hareket senaryolarındaki değişken parametreler gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : Hareket senaryoları ve parametreler.

Senaryo No	Robot Hızı(%)	Noktalar Arası Bekleme Süresi(sn)
1	5	0.5
2	10	0.5
3	5	3
4	10	3



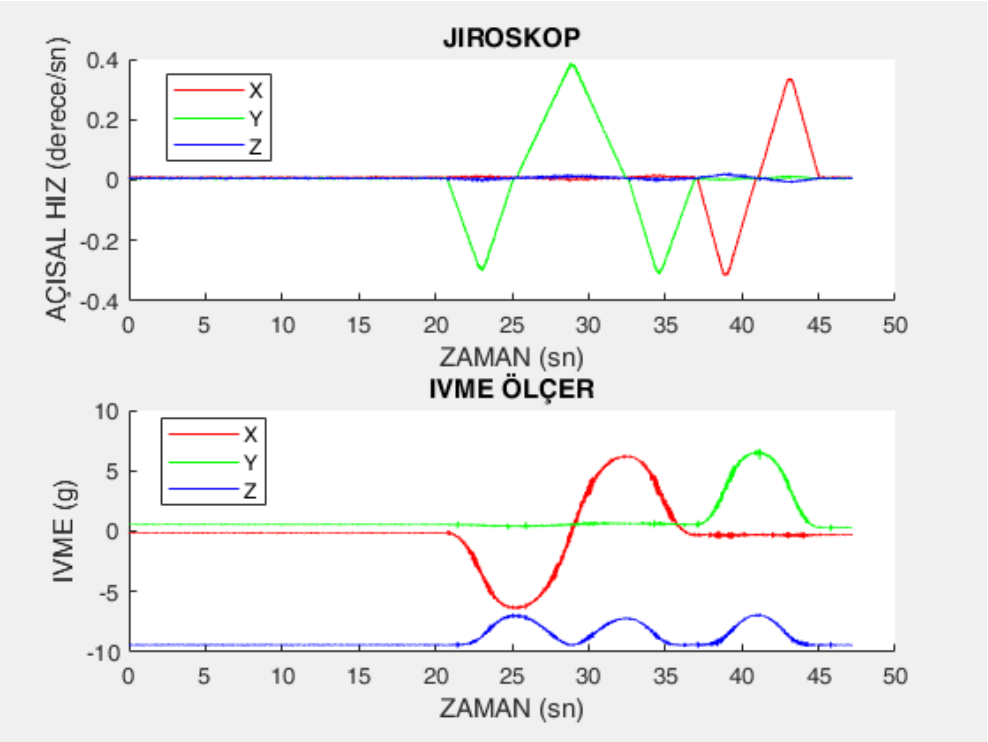
Şekil 5.6 : Hareket yörüngesi.



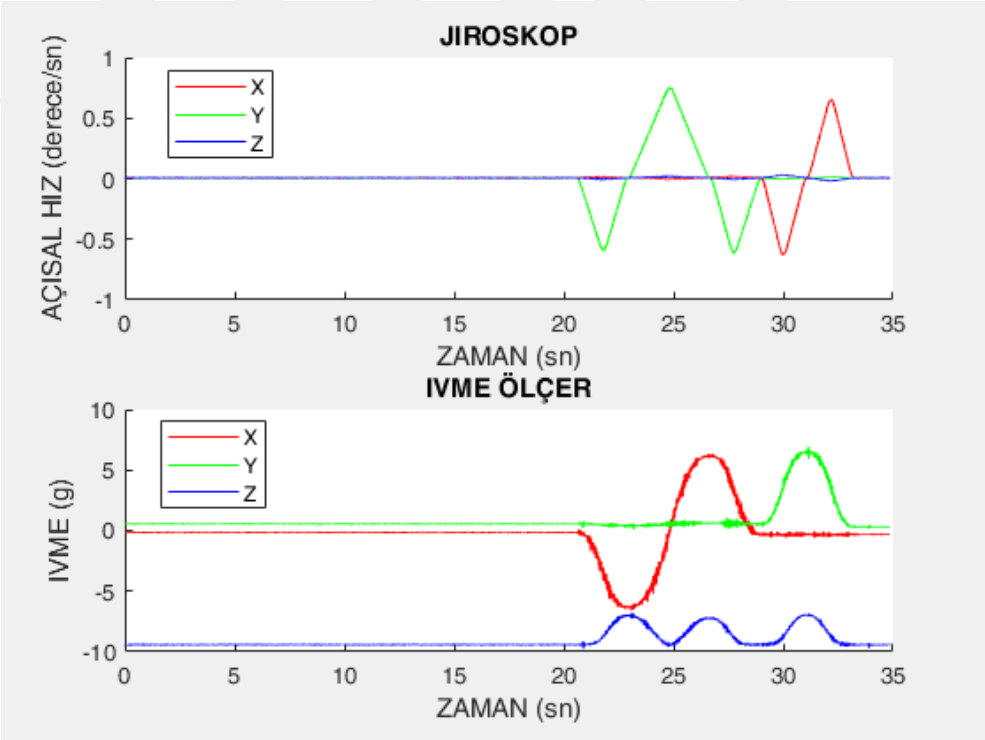
Şekil 5.7 : Robot konum monitör ekranı.

5.3 Verilerin Toplanması

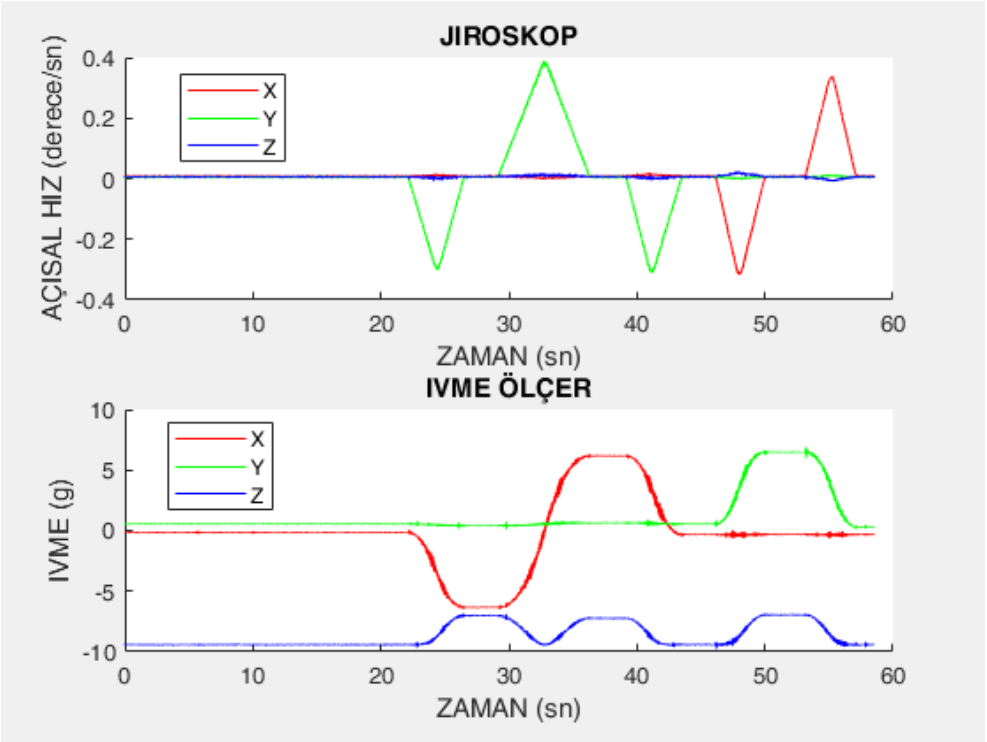
MTw robota takılı haldeyken tek tek tüm senaryolara göre robot programları çalıştırılmıştır. Robotun çalışma esnasında MT Manager programı ile MTw'ye bağlanılarak hareketler kaydedilmiştir. Veriler 100 hz frekansla toplanmıştır. Kaydedilen hareket verilerinden jiroskop ve ivmeölçer verileri elde edilmiştir. Şekil 5.8 , 5.9, 5.10 ve 5.11'de 4 farklı senaryoya ait jiroskop ve ivmeölçer verileri gösterilmektedir. Şekil 5.12'de ise MT Manager program arayüz görseli mevcuttur.



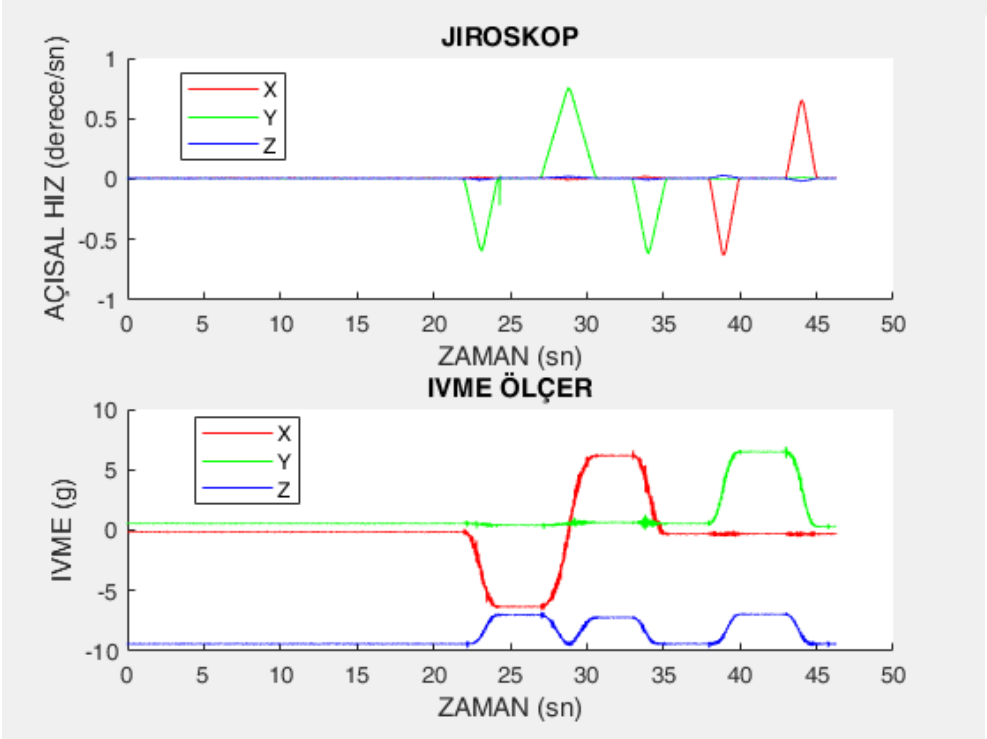
Şekil 5.8 : Senaryo 1'e ait ivmeölçer ve jiroskop verileri.



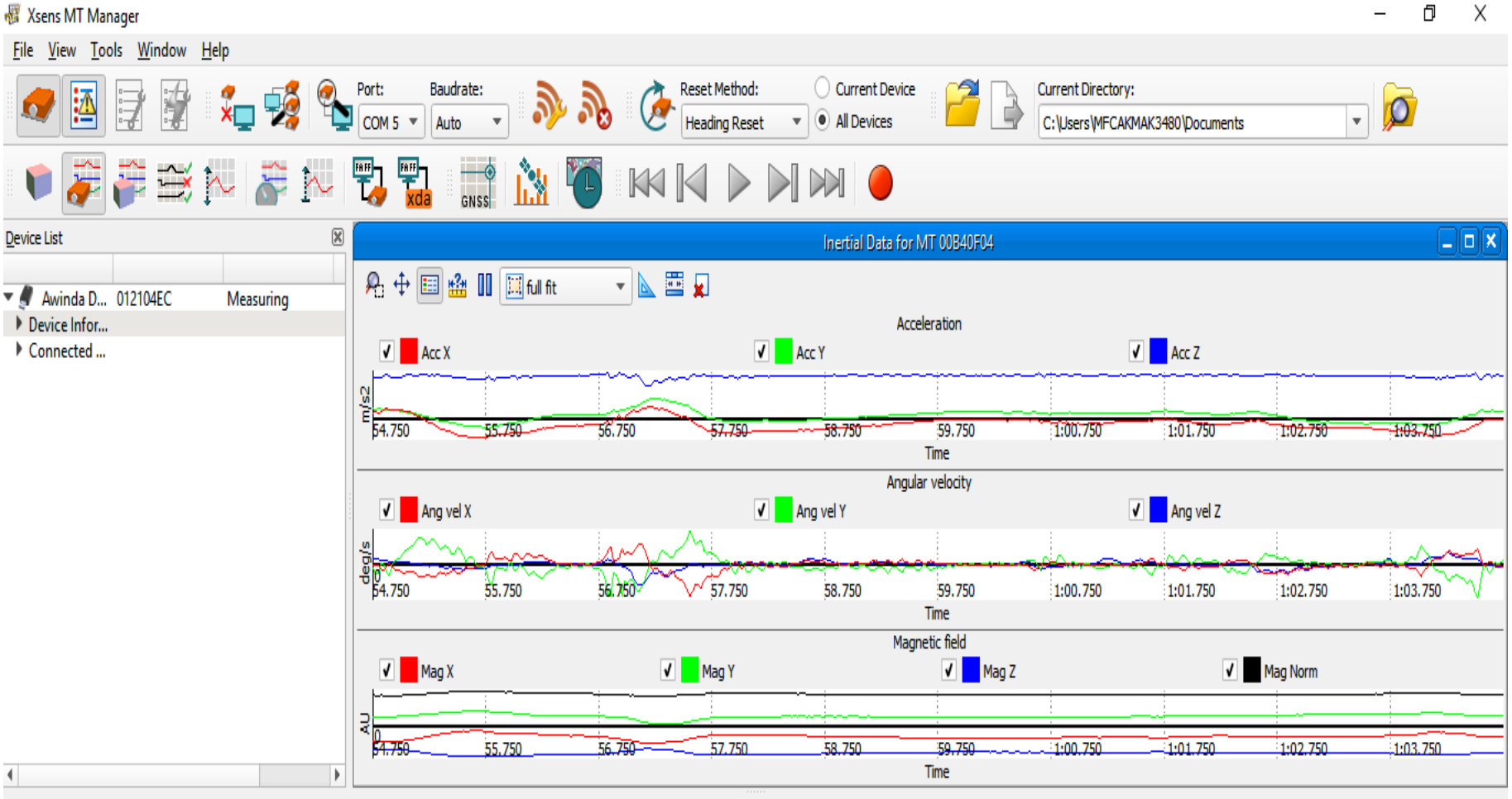
Şekil 5.9 : Senaryo 2'ye ait ivmeölçer ve jiroskop verileri.



Şekil 5.10 : Senaryo 3'e ait ivmeölçer ve jiroskop verileri.

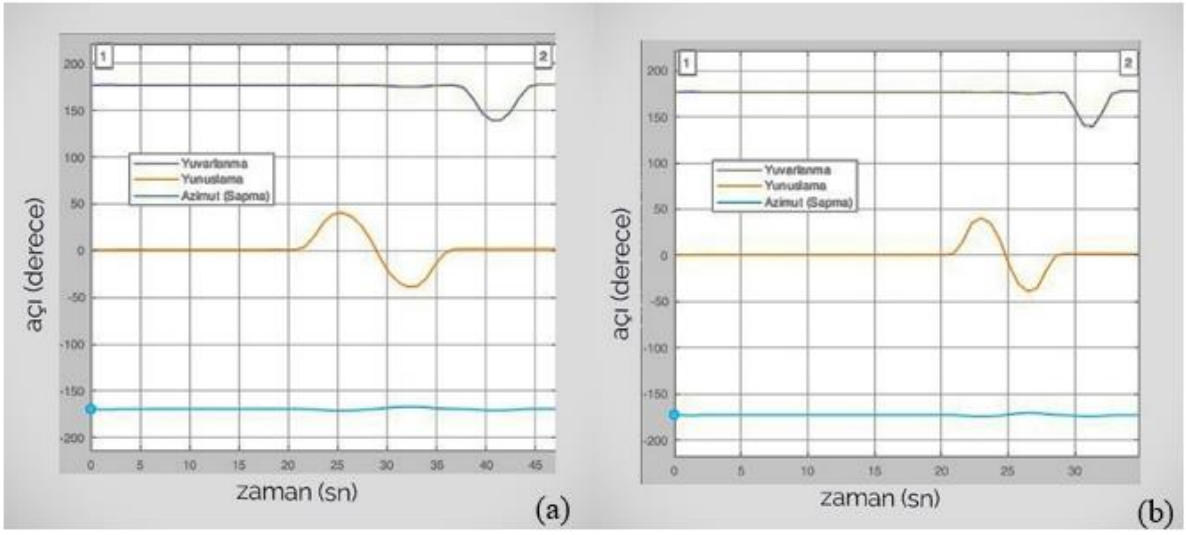


Şekil 5.11 : Senaryo 4'e ait ivmeölçer ve jiroskop verileri.



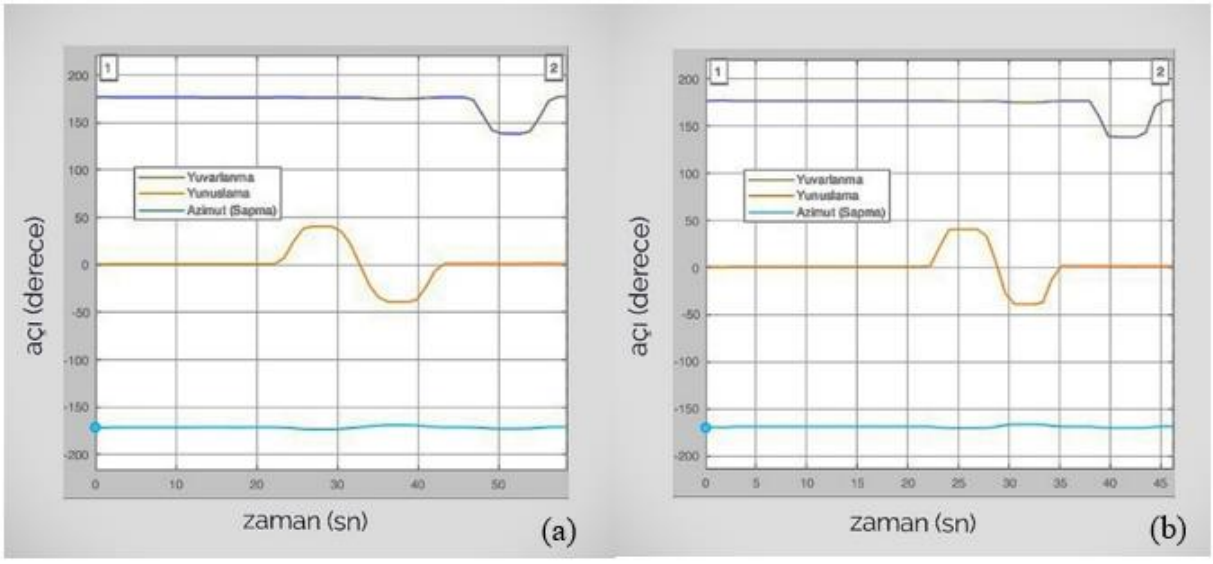
Şekil 5.12 : Jiroskop ve ivmeölçer verilerinin toplanması.

İvme ölçer ve jiroskop verilerine ilave olarak MT Manager programı aracılığıyla 4 adet senaryo için XSENS'in hesapladığı oryantasyon verileri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Bu veriler Madgwick algoritmasıyla yapılan analizler için referans olarak kullanılmıştır. Yatay eksen saniye cinsinden zamanı, düşey eksen ise derece cinsinden açıyı ifade etmektedir.



Şekil 5.13 : Senaryo 1 ve 2 için referans referans oryantasyon verileri:

(a) Senaryo 1 (b) Senaryo 2



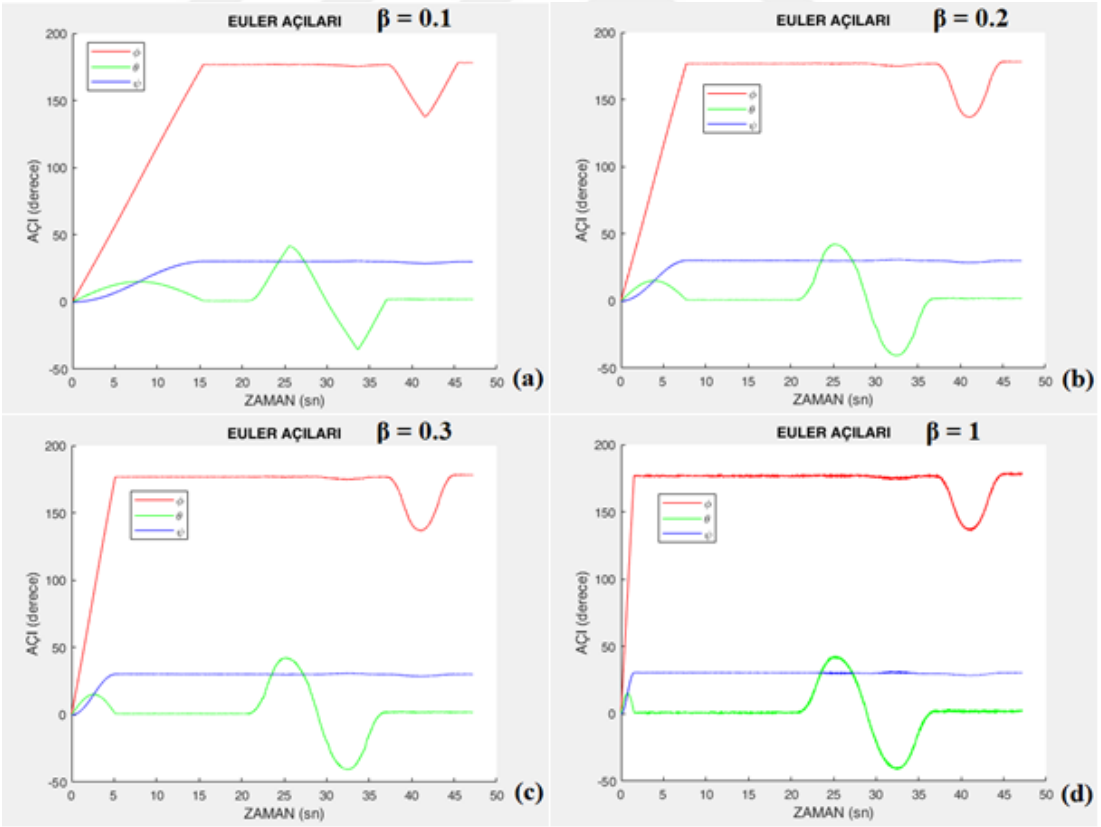
Şekil 5.14 : Senaryo 3 ve 4 için referans oryantasyon verileri.

(a) Senaryo 3 (b) Senaryo 4

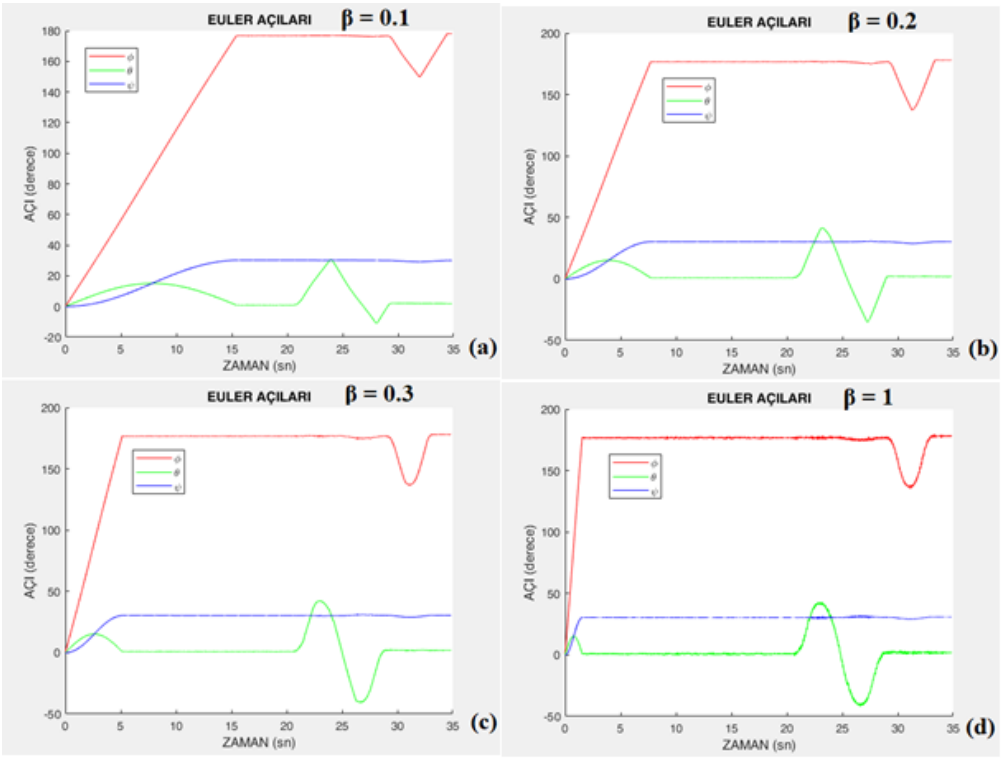
6. SONUÇLAR

6.1 Deney Sonuçları

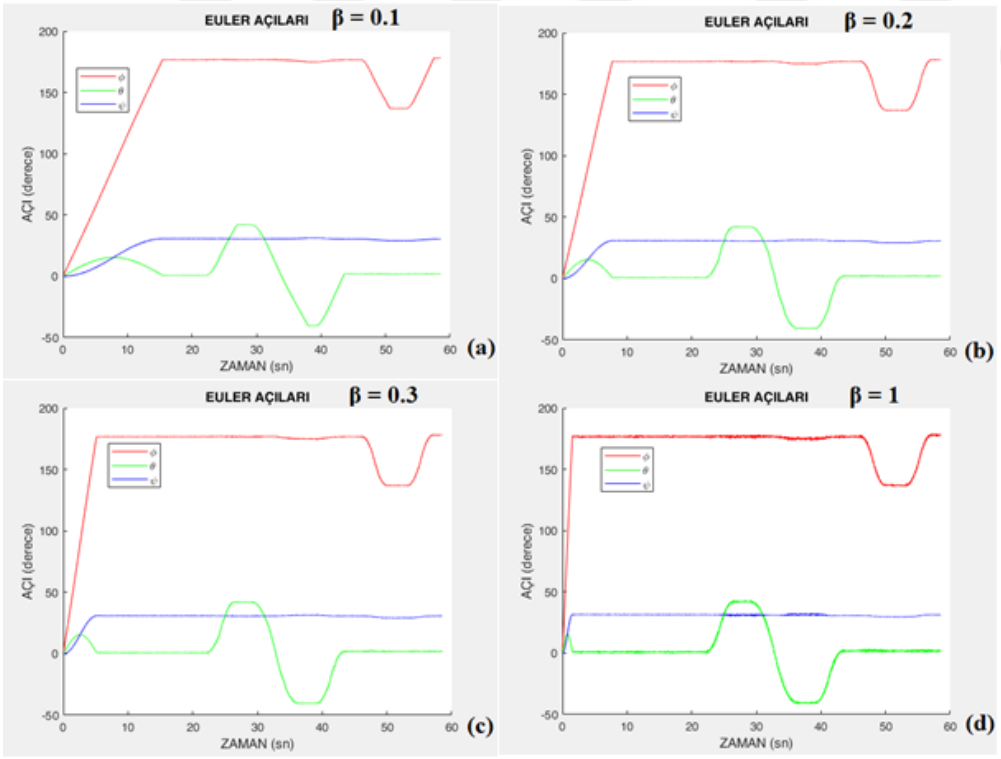
Robot yardımıyla toplanan ham jiroskop ve ivmeölçer verileri Matlab ortamında modellemesi yapılan Madgwick IMU algoritmasına girilmiştir. Çizelge 5.2'de belirtilen 4 adet senaryoya ait ölçümler, Madgwick algoritmasında β parametresi 0.1, 0.2, 0.3 ve 1 değerleri ile koşturulmuştur. Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te tüm senaryolara ait oryantasyon tahmin sonuçları gösterilmektedir. Grafiklerde kırmızı renkle gösterilen ϕ sembolü yuvarlanma açısını, yeşil renkle gösterilen θ sembolü yunuslama açısını, mavi renkle gösterilen ψ sembolü ise azimut açısını göstermektedir.



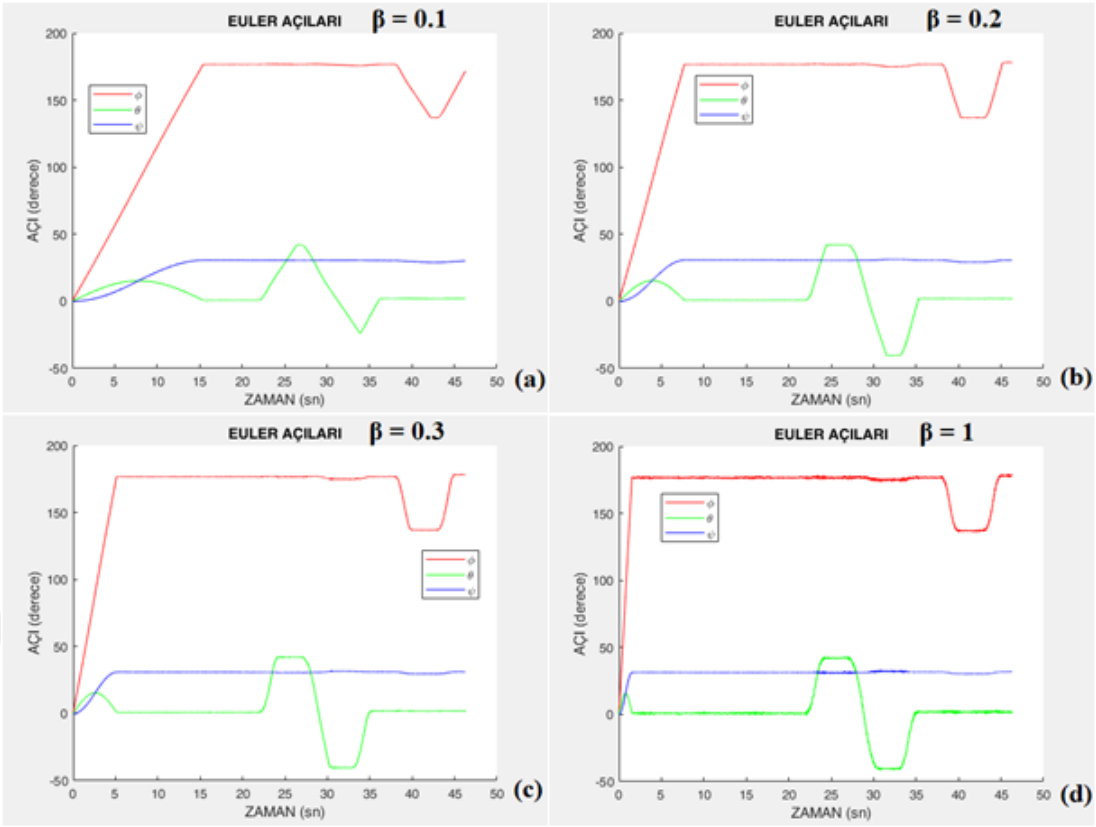
Şekil 6.1 : Senaryo 1'e ait oryantasyon tahmin sonuçları: (a) β=0.1. (b) β=0.2. (c) β=0.3. (d) β=1.



Şekil 6.2 : Senaryo 2'ye ait oryantasyon tahmin sonuçları: (a) β=0.1. (b) β=0.2. (c) β=0.3. (d) β=1.

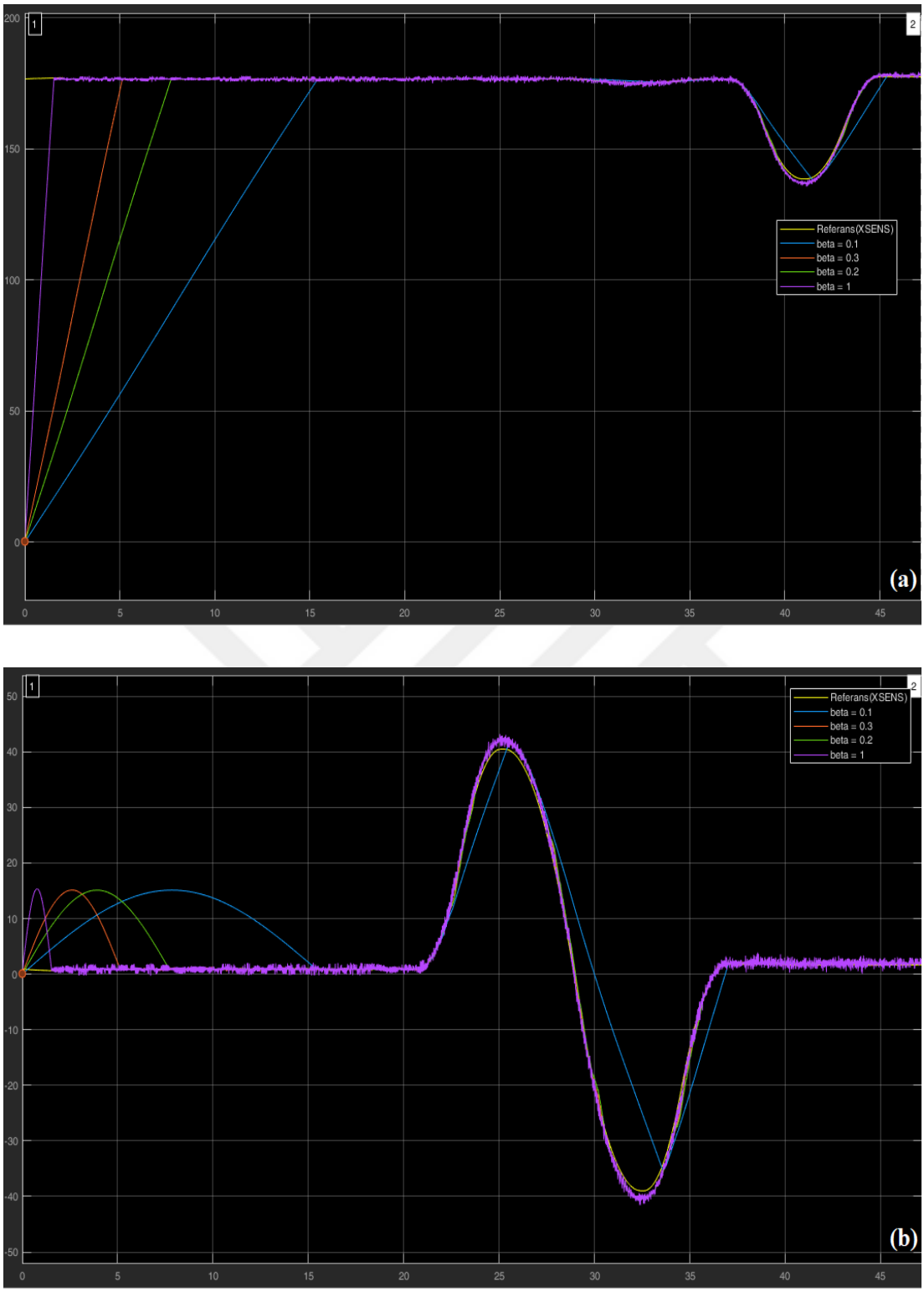


Şekil 6.3 : Senaryo 3'e ait oryantasyon tahmin sonuçları: (a) β=0.1. (b) β=0.2. (c) β=0.3. (d) β=1.

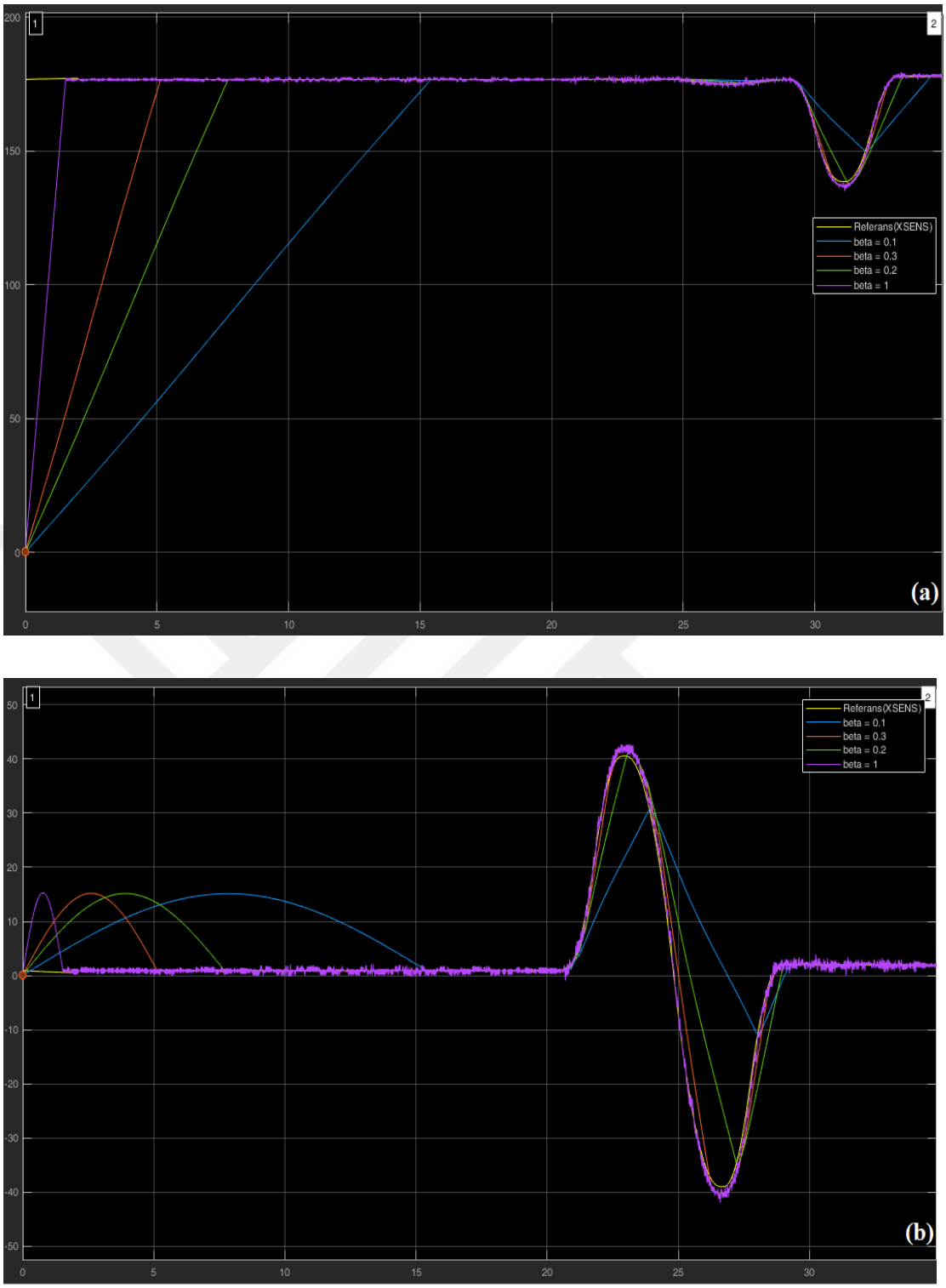


Şekil 6.4 : Senaryo 4'e ait oryantasyon tahmin sonuçları: (a) β=0.1. (b) β=0.2. (c) β=0.3. (d) β=1.

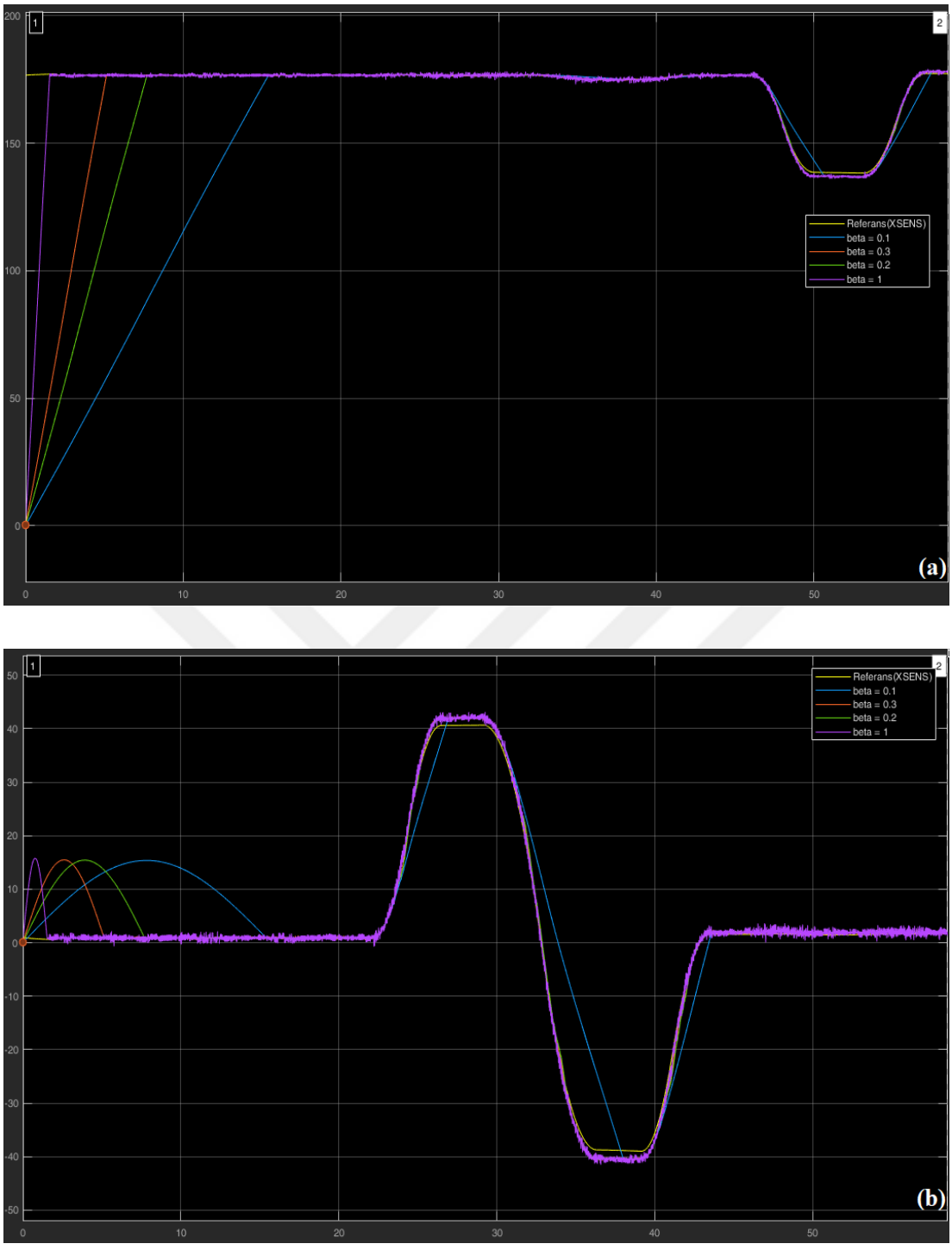
Elde edilen oryantasyon sonuçları Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'teki XSENS oryantasyon referans verileriyle kıyaslanmıştır. Bu işlem her bir senaryo için ayrı ayrı yapılmıştır. Manyetometre kullanımı olmadığı için azimut(sapma) açısı dikkate alınmamıştır. Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de tüm senaryoların farklı β değerlerine göre sonuçları referans veriyle birlikte verilmiştir. Grafiklerde yatay eksen saniye cinsinden zamanı, dikey eksen ise derece cinsinden açıyı temsil etmektedir. Referans oryantasyon sarı ile; hesaplanan oryantasyon tahminlerinden β=0.1 mavi; β=0.2 yeşil; β=0.3 kırmızı ve β=1 mor renk ile gösterilmektedir.



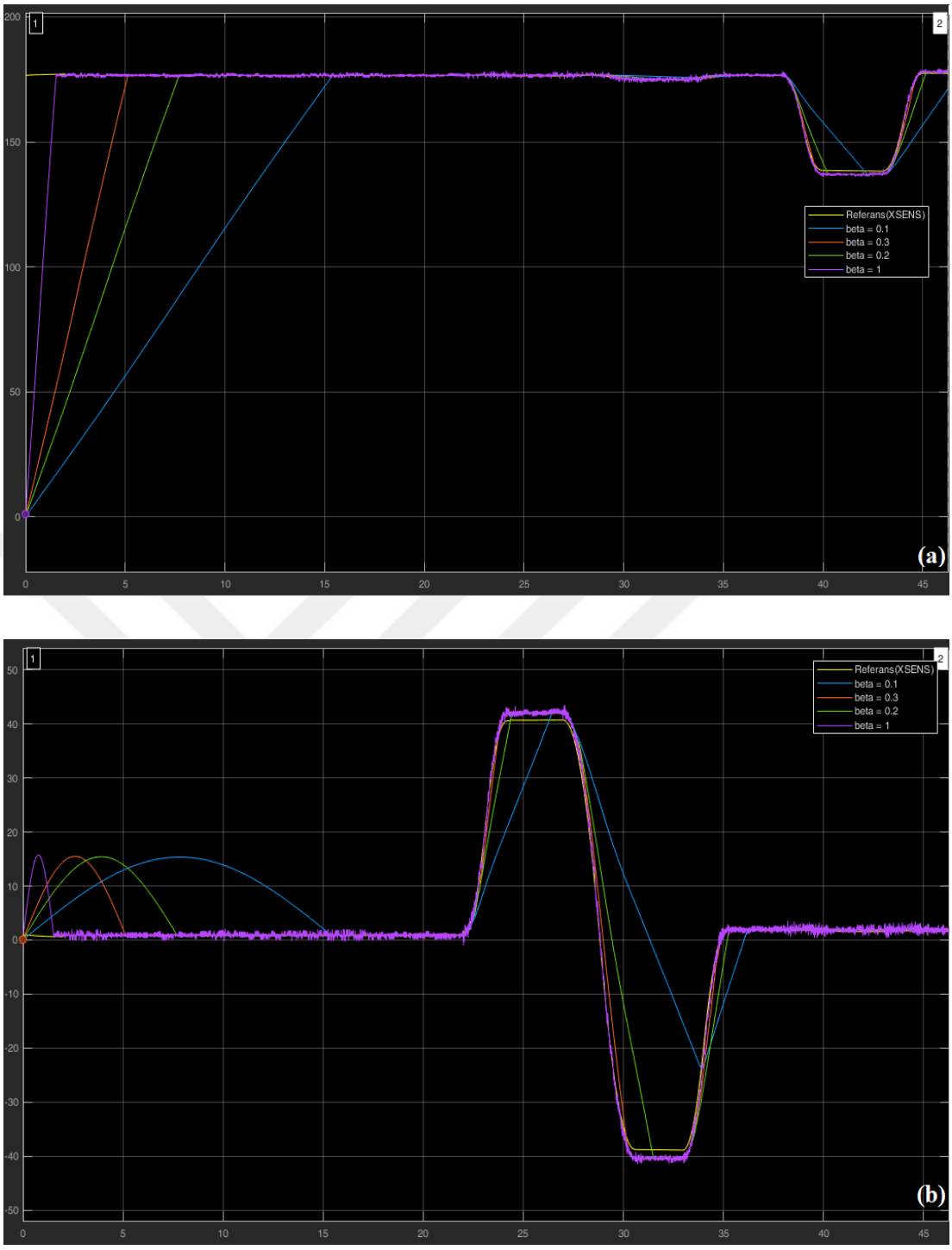
Şekil 6.5 : Senaryo 1'e ait oryantasyon tahmin karşılaştırması: (a) Yuvarlanma (b)Yunuslama.



Şekil 6.6 : Senaryo 2'ye ait oryantasyon tahmin karşılaştırması: (a) Yuvarlanma (b)Yunuslama.



Şekil 6.7 : Senaryo 3'e ait oryantasyon tahmin karşılaştırması: (a) Yuvarlanma (b)Yunuslama.



Şekil 6.8 : Senaryo 4'e ait oryantasyon tahmin karşılaştırması: (a) Yuvarlanma (b)Yunuslama.

6.2 Algoritmanın Modifiye Edilmesi

Tüm senaryolardan elde edilen veriler incelendiğinde, hareket hızının daha yüksek olduğu durumlarda oryantasyon tahmininde daha çok sapma meydana geldiği

görülmektedir. Bu yüzden oryantasyon değişim hızının yüksek olduğu durumlarda β parametresinin değeri arttırmak, jiroskop ölçüm hatasının daha hızlı azaltılmasına, yani filtre tahmininin gerçek oryantasyona yakınsama hızının arttırılmasına vesile olacaktır. Fakat β parametresinin artmasıyla birlikte ivmeölçerden kaynaklanan gürültü artışı kaçınılmazdır. Bu yüzden oryantasyon değişim hızının nispeten yavaş olduğu durumlarda β kazancının düşük tutulması gerektiği düşünülmüştür. Hareketin hızına göre β değerini değiştirmek için jiroskoptan gelen oryantasyon değişim hızları kullanılmıştır. Sabit β kullanılarak yapılan deneylerde jiroskop ölçümlerinin x ve y eksenlerindeki değerlerinin yunuslama ve yuvarlanma açılarını değiştirdiği görülmüştür. Jiroskop verilerinin β değerleri ile korelasyonu çalışmada kullanılan ekipman ve hareket senaryosu için çıkartılmıştır. Böylelikle β parametresinin değişim koşulları oluşturulmuştur.

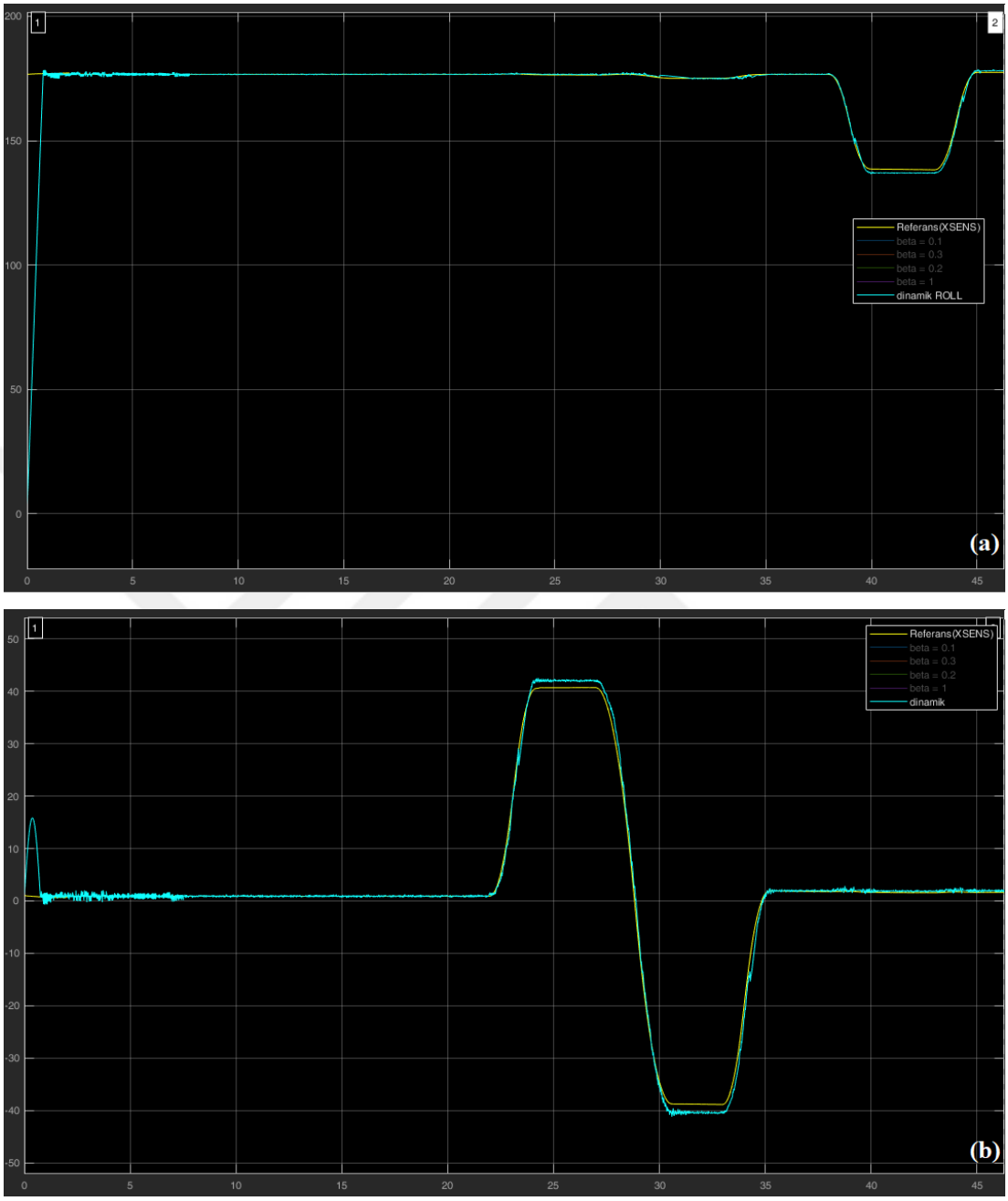
Senaryo sonuçlarında açıkça görülebilecek bir diğer husus ise filtre başlangıcındaki yakınsama süresinin β büyüklüğü ile olan ters orantısıdır. Filtrenin başlangıcında gerçek oryantasyona yakınsama hızının, ivmeölçerin gürültü probleminden daha önemli olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle β kazanç parametresi başlangıçta büyük tutularak filtre yakınsaması hızlandırılmıştır. Çizelge 6.1'de β parametresinin değişim koşulları verilmiştir.

Çizelge 6.1 : β parametresi değişim koşulları.

Koşul	β
$0 < t < 1.5$ (saniye)	2
$1.5 < t < 7.7$ (saniye)	1
$\|$Jiroskop x veya y$\| < 0.3$ (rad/s)	0.2
$0.3 < \|$Jiroskop x veya y$\| < 0.5$ (rad/s)	0.3
$\|$Jiroskop x veya y$\| > 0.5$ (rad/s)	0.5

Dinamik β kullanılan modifiye edilmiş Madgwick filtresi senaryo 4 için kullanılmıştır. Şekil 6.9'de senaryo 4'e ait modifiye filtrenin oryantasyon sonucu gösterilmektedir. Grafiklerde yatay eksen saniye cinsinden zamanı, dikey eksen ise derece cinsinden

açıyı temsil etmektedir. Referans oryantasyon sarı ile; hesaplanan oryantasyon tahmini ise mavi renk ile gösterilmektedir.



Şekil 6.9 : Senaryo 4'e ait modifiye filtre oryantasyon tahmin sonucu:
(a) Yuvarlanma (b)Yunuslama.

6.3 Analiz ve Yorumlar

Toplam 4 farklı senaryoya dayalı deney sonuçları incelendiğinde β parametresinin gerçek oryantasyonu yakalama hızına etkisi açıkça görülmektedir.

Bu parametrenin küçük olduğu durumlarda Madgwick algoritması gerçek oryantasyonu daha geç sürede yakalamaktadır. Fakat, β parametresinin değeri arttığında algoritmanın tepkisi hızlanmakta ve doğru oryantasyon tahminine daha hızlı ulaşmaktadır. Madgwick algoritmasında ivmeölçer ölçümlerinin yalnızca yerçekimi ivmesini ölçtüğü varsayılır. Bu varsayım kullanılarak ivmeölçer verileri ile jiroskop kayması düzeltilir. Bu düzeltmenin oranı ise β parametresi ile ayarlanır. Dolayısıyla β parametresinin değerini arttırılması, algoritma tahminlerinin yerçekimi haricindeki ivmelere karşı daha hassas olmasına yol açmaktadır. Deney sonuçları detaylı incelendiğinde, β değeri arttıkça çıkış verilerinde gürültünün arttığı görülmektedir. Düşük β değerlerinde ise daha pürüzsüz bir çıkış eğrisine rastlanmaktadır.

Senaryolar hareket hızı baz alınarak değerlendirildiğinde, yavaş hızlara sahip senaryo 1 ve senaryo 3 sonuçları, diğer iki senaryoya kıyasla doğruluk oranı daha yüksek sonuçlar vermiştir. Tüm senaryolarda β=1 değeri en doğru tahminleri vermiş olsa da yavaş senaryolarda β=0.3 değerinde mükemmele yakın, β=0.2 değerinde ise tatminkar sonuçlar alınmıştır. Hareketin daha hızlı uygulandığı senaryo 2 ve senaryo 4'te, algoritma tahminlerinin doğruluğu düşük β değerlerinde diğer senaryolara kıyasla daha az olmuştur. Fakat β=1 olduğu durumda ivmeölçerden kaynaklanan gürültü problemi kendini göstermektedir.

Senaryolar, konumlar arası bekleme süresi baz alınarak incelendiğinde oryantasyon tahminleri arasında bir fark görülmemiştir. Bekleme süresi, filtre tahminin gerçek değeri yakalaması için algoritmaya zaman kazandırabilir, fakat bekleme süresinden sonra hareketin daha yavaş olması halinde bu durum işe yarayabilir.

Dinamik β kullanılan modifiye filtrede başlangıçtaki yakınsama hızının arttırıldığı görülmüştür. Ayrıca hareket ivmesinin en yüksek olduğu durumlarda dahi gerçek oryantasyon değerine en yakın sonuçlar burada elde edilmiştir. β değeri sadece hareketin başlangıcında ve oryantasyon değişim hızının yüksek olduğu bölgelerde arttırılmıştır (Çizelge 6.1). İvme ölçerden kaynaklanan gürültü sadece bu bölgelerde meydana gelmektedir. Temel olarak, modifiye filtrede başlangıçta ve hızın yüksek olduğu durumlarda yakınsama hızı; hareket hızının düşük veya sabit olduğu durumlarda ise çıkış eğrisinin pürüzsüzlüğü hedeflenmiştir. Şekil 6.9'a göre bu konuda tatminkar sonuç elde edilmiştir.

Aynı yörünge ve farklı parametrelerle yapılan ölçüm sonuçları Madgwick'in IMU algoritmasının farklı koşullardaki tepkilerini açıklar nitelikte değerlendirilebilirler.

Hareket hızlarının ve β parametresinin etkilerini bilmek, dinamik β kullanımı ile farklı kullanım alanlarında algoritmanın optimum verimlilikte kullanılmasını sağlayabilir.

KAYNAKLAR

Bellusci, G. & Dijkstra, F. & Slycke (2013). Xsens MTw: Miniature Wireless Inertial Motion Tracker for Highly Accurate 3D Kinematic Applications.

Cavallo, A. & Cirillo, A. & Cirillo, P. & de Maria, G. & Falco, P. & Natale, C. & Pirozzi, S. (2014). Experimental comparison of sensor fusion algorithms for attitude estimation. 19th World Congress, The International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa, 24–29 Ağustos 2014; sayfa: 7585–7591

Cirillo, A. & Cirillo, P & De Maria, G. & Natale, C. & Pirozzi S. (2016). A comparison of multisensor attitude estimation algorithms. Multisensor Attitude Estimation: Fundamental Concepts and Applications, Bölüm: 29, Yayıncı: CRC Press, Editorler: H. Fourati, D. E. C. Belkhiat, sayfa: 529-539.

Grisetti, G. & Kümmerle, R & Stachniss, C. & Burgard W. (2010). A tutorial on graph-based SLAM. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2(4):31–43.

Haid, M. & Breitenbach, J. (2004). Low cost inertial orientation tracking with Kalman filter. Appl. Math. Comput. 2004, 153, 567–575.

IMU Errors and Their Effects (2019). Erişim: 24 Nisan 2019, https://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/APN064.pdf

Kok, M. & Hol, J. D. & Schön, T. B. (2017). Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation", Foundations and Trends in Signal Processing: Vol. 11: No. 1-2, sayfa: 1-153. http://dx.doi.org/10.1561/2000000094

Kurz, G. & Gilitschenski, I. & Julier, S. & Hanebeck, U. D. (2013). Recursive estimation of orientation based on the Bingham distribution. Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion, sayfa: 1487–1494, İstanbul, Türkiye.

Ludwig, S. A. & Burnham, K. D. (2018). Comparison of Euler Estimate using Extended Kalman Filter Madgwick and Mahony on Quadcopter Flight Data, 2018 Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst, sayfa: 1236-1241.

Ludwig, S.A. & Burnham, K. D. & Jimnez, A. R. & Touma, P. A. (2018). Comparison of attitude and heading reference systems using foot mounted MIMU sensor data: basic, Madgwick, and Mahony, SPIE Conference on Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, Denver, CO, USA.

Madgwick, S. O. H. (2010). An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. Report. University of Bristol, UK.

Madgwick, S. O. H. & Harrison, A. J. L. & Vaidyanathan, R. (2011). Estimation of imu and marg orientation using a gradient descent algorithm. IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics (ICORR), sayfa: 1–7.

Mahony, R. & Hamel, T. & Pflimlin, J.M. . (2008). Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group. IEEE Transactions on Automatic Control, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, 53 (5), sayfa: 1203-1217. ff10.1109/TAC.2008.923738ff. ffhal-00488376f

Marins, J.L. & Yun, X. & Bachmann, E.R. & McGhee, R.B. & Zyda, M.J. (2001) An extended kalman filter for quaternion-based orientation estimation using marg sensors. In Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol 4, sayfa: 2003–2011.

Martins, R. B. (1999). A genealogy of biomechanics. In 23rd Annual Conference of the American Society of Biomechanics.

MTw User Manual (2014). XSENS MTw User Manual, Document MW0502P, Revision I, 06 June 2014.

Pupo, L. B. (2016). Characterization of Errors and Noises in MEMS Inertial Sensors Using Allan Variance Method. (Yüksek Lisans Tezi). Universitat Politecnica De Catalunya Barcelonatech , Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, Barcelona.

Roatenberg, D. (2006). Inertial and Magnetic Sensing of Human Motion, ISBN-13: 978-90-9020620-2.

Seel, T. & Raisch, J & Schauer, T (2014). IMU-Based Joint Angle Measurement for Gait Analysis.

Zizzo G. & Ren L. (2017). Position Tracking During Human Walking Using an Integrated Wearable Sensing System. Sensors 2017, 17(12), 2866.

EKLER

EK A: Robot Programları

EK A

```
.PROGRAM r1_pg100
SPEED 5 ALWAYS
TWAIT 20
JMOVE nokta1
TWAIT 0.5
JMOVE nokta2
TWAIT 0.5
JMOVE nokta3
TWAIT 0.5
JMOVE nokta4
TWAIT 0.5
JMOVE nokta5
TWAIT 0.5
JMOVE nokta6
.END

.PROGRAM r1_pg200
SPEED 10 ALWAYS
TWAIT 20
JMOVE nokta1
TWAIT 0.5
JMOVE nokta2
TWAIT 0.5
JMOVE nokta3
TWAIT 0.5
JMOVE nokta4
TWAIT 0.5
JMOVE nokta5
TWAIT 0.5
JMOVE nokta6
.END

.PROGRAM r1_pg300
SPEED 5 ALWAYS
TWAIT 20
JMOVE nokta1
TWAIT 3
JMOVE nokta2
TWAIT 3
JMOVE nokta3
TWAIT 3
JMOVE nokta4
TWAIT 3
JMOVE nokta5
TWAIT 3
JMOVE nokta6
.END
```

```
.PROGRAM r1_pg400
SPEED 10 ALWAYS
TWAIT 20
JMOVE nokta1
TWAIT 3
JMOVE nokta2
TWAIT 3
JMOVE nokta3
TWAIT 3
JMOVE nokta4
TWAIT 3
JMOVE nokta5
TWAIT 3
JMOVE nokta6
.END
```

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Mehmet Fatih ÇAKMAK

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 21.05.1989 / İSTANBUL

E-posta **:** mfatihcakmak@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2013, Okan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği(İng.)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013-2018 yılları arasında Günmak A.Ş. firmasında Robotik Otomasyon Mühendisi
- 2018-halen Günmak A.Ş. firmasında Proje Müdürü