

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NAVİGASYON HASSASİYETİNİ ARTTIRMAK İÇİN ATALETSEL ÖLÇÜM
BİRİMİNE TAMAMLAYICI FİLTRE UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Emin OKUDAN

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

KASIM 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NAVİGASYON HASSASİYETİNİ ARTTIRMAK İÇİN ATALETSEL ÖLÇÜM
BİRİMİNE TAMAMLAYICI FİLTRE UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Emin OKUDAN
(511101136)**

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi İsmail BAYEZİT

KASIM 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511101136 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet Emin OKUDAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “NAVİGASYON HASSASİYETİNİ ARTTIRMAK İÇİN ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİNE TAMAMLAYICI FİLTRE UYGULANMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi İsmail BAYEZİT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Fikret ÇALIŞKAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GARİP
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 19 Eylül 2019
Savunma Tarihi : 21 Kasım 2019





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez süreci boyunca yardımını ve desteğini esirgemeyen, çalışmalarım esnasında teşvik edici davranan ve süreci kolaylaştıran danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İsmail BAYEZİT'e, önceden danışmanlıklarımı yapan Prof. Dr. Elbrus CAFEROV ve Prof. Dr. Metin Orhan KAYA hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım sürecinde ve çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan çalışma arkadaşlarım Hasan KAZDAL'a ve fikirlerini esirgemeyen Ahmet KUZU'ya teşekkür ederim.

Bu uzun süreçte benden ümidini kesmeyen ve beni bugünlere taşıyan annem Fatma OKUDAN ve babam İsmail OKUDAN'a, hep yanımda olan ablam Esra OKUDAN KARATAŞ ve abim Ahmet Yasin OKUDAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Eylül 2019

Mehmet Emin OKUDAN
Elektronik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Ataletsel Ölçüm Birimi	1
1.1.1 İvmeölçerler	4
1.1.2 Dönüölçerler.....	6
1.1.3 Manyetometreler	8
1.2 Problemin Tanımlanması	9
1.3 İlgili Çalışmalar	11
1.4 Tezin Amacı	13
2. YÖNTEM.....	15
2.1 Yönelim Belirleme	15
2.1.1 İvmeölçerden açı belirleme	15
2.1.2 Dönüölçerden açı belirleme	16
2.1.3 Manyetometreden açı belirleme.....	17
2.2 Sensör Verilerinin Tamamlayıcı Filtre ile Birleştirilmesi.....	18
2.3 Ayarlanabilir Tamamlayıcı Filtre için Bulanık Mantık Uygulaması	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE ÇIKTILARI.....	27
3.1 Kullanılan Platform ve Algoritma	27
3.2 Durgun Halde Sensör Modellerinden Alınan Veriler.....	27
3.3 Benzetim Ortamı	31
3.4 Benzetim Parametrelerini Belirleme	32
3.4.1 Bulanık mantık girişlerini belirleme	32
3.4.2 Çalışılacak kesim frekansı aralığını belirleme	34
3.5 Benzetim Çıktıları	35
4. SONUÇ.....	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ.....	47



KISALTMALAR

AÖB	: Ataletsel Ölçüm Birimi
ANS	: Ataletsel Navigasyon Sistemi
dps	: Degree Per Second
ECI	: Earth-Centered Inertial
FFT	: Fast Fourier Transform
FOG	: Fiber Optic Gyroscope
Hz	: Hertz
IMU	: Inertial Measurement Unit
INS	: Inertial Navigation System
KKS	: Küresel Konumlandırma Sistemi
MEMS	: Mikroelektromekanik Sistemler
mm	: Milimetre
ppm	: Part Per Million
rad	: Radyan
RLG	: Ring Laser Gyroscope
TF	: Tamamlayıcı Filtre



SEMBOLLER

g : Gram, İvme

m : Kütle

F : Kuvvet

t : Zaman

T : Tesla

V : Volt





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Stabilize platform sistemi ile analitik sistemin karşılaştırılması [3].	3
Çizelge 1.2 : Ataletsel sensörlerin performans açısından kıyaslanması [4].	4
Çizelge 2.1 : Bulanık mantık kuralları.....	24
Çizelge 3.1 : MPU-9250 teknik özellikleri.....	27





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : ANS Çalışma Yöntemi [2].	2
Şekil 1.2 : Stabilize Platform (a) ve Analitik Platform (b) için AÖB bileşenlerinin yerleşimi [3].	2
Şekil 1.3 : AÖB bileşenleri [3].	3
Şekil 1.4 : Denge durumundaki ivmeölçer (a) ile sağa doğru ivmelenmiş ivmeölçer (b) gösterimi [3].	5
Şekil 1.5 : Bohnenberger dönüölçeri	6
Şekil 1.6 : Dairesel dönen (Sagnac) girişimölçer [2].	7
Şekil 1.7 : Coriolis kuvvetinin oluşumu [2].	8
Şekil 1.8 : Sabit kayma hatası gösterimi [7].	9
Şekil 1.9 : Orantı katsayısı hatası gösterimi [7].	10
Şekil 1.10 : Eksenel kaçıklık hatası gösterimi [7].	10
Şekil 2.1 : Farklı sensör verilerinin toplanması [17].	18
Şekil 2.2 : Tamamlayıcı filtrenin uygulanışı [17].	19
Şekil 2.3 : Yunuslama açısı için tamamlayıcı filtre sensör füzyon uygulaması [18].	21
Şekil 2.4 : Sapma açısı için tamamlayıcı filtre sensör füzyon uygulaması.	22
Şekil 2.5 : Bir Bulanık Mantık Sistemi.	22
Şekil 2.6 : Sigmoidal komşuluk ilişkisi fonksiyonu [16].	23
Şekil 2.7 : Yunuslama açısı için bulanık mantık kullanılmış tamamlayıcı filtre sensör füzyon uygulaması.	24
Şekil 3.1 : Durgun haldeki ideal sensör ivmeölçer verisi	28
Şekil 3.2 : Durgun haldeki MPU9250 sensörü ivmeölçer verisi	28
Şekil 3.3 : Durgun haldeki ideal sensör dönüölçer verisi	29
Şekil 3.4 : Durgun haldeki MPU9250 sensörü dönüölçer verisi	29
Şekil 3.5 : Durgun haldeki ideal sensör manyetometre verisi	30
Şekil 3.6 : Durgun haldeki MPU9250 sensörü manyetometre verisi	30
Şekil 3.7 : İdeal ve MPU9250 sensör verilerinin işlendiği Simulink ortamı.	31
Şekil 3.8 : Sabit kesim frekansına sahip tamamlayıcı filtre bloğu	32
Şekil 3.9 : Değişken kesim frekansına sahip bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtre bloğu	32
Şekil 3.10 : 0 °/s açısal hız uygulandığında elde edilen $x_i(t)$ değerleri.	33
Şekil 3.11 : 360 °/s açısal hız uygulandığında elde edilen $x_i(t)$ değerleri.	33
Şekil 3.12 : Bulanık mantık girişleri için uygulanan komşuluk ilişkisi fonksiyonları.	34
Şekil 3.13 : Değişken katsayılı filtre için belirlenen frekans sınırları.	35
Şekil 3.14 : Durgun durumda X eksenini için karşılaştırılan sensör verileri.	35
Şekil 3.15 : Durgun durumda Y eksenini için karşılaştırılan sensör verileri.	36
Şekil 3.16 : Durgun durumda Z eksenini için karşılaştırılan sensör verileri.	37
Şekil 3.17 : X eksenine uygulanan açısal hareket.	38
Şekil 3.18 : Şekil 3.17'den bir kesit.	38
Şekil 3.19 : Y eksenine uygulanan açısal hareket.	39

Şekil 3.20 : Şekil 3.19'den bir kesit.....	39
Şekil 3.21 : Z eksenine uygulanan açısal hareket.	40
Şekil 3.22 : Şekil 3.21'den bir kesit.....	40



NAVİGASYON HASSASİYETİNİ ARTTIRMAK İÇİN ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİNE TAMAMLAYICI FİLTRE UYGULANMASI

ÖZET

Navigasyon, hareketli bir platformun herhangi bir referans koordinat çerçevesine göre yerinin ve hızının hesaplanmasıdır. Ancak pek çok uygulamada platformun referans eksene göre açısal hareketinin de hesaplanması gereklidir. Açısal hareket, hareketli platformun yönelim bilgisini elde etmek için kullanılır. Navigasyon sistemleri pek çok askeri ve sivil uygulamada hayati önem taşımaktadır. Günümüzde askeri veya sivil, hava, deniz ve kara taşıtlarında, navigasyon sistemleri, araçların koordinasyonun sağlanması, etkinliğin artırılması gibi sayısız amaçla kendilerine yer bulmaktadır. Ancak bu tip navigasyon sistemlerinin ürettiği hatalar sistemlerin etkinliğini azaltmaktadır. Bu nedenle bu sistemlerin hatalarının giderilmesi ya da en aza indirilmesi birincil öncelik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun için kullanılan yöntemlerden en etkili olanı sistemlerin avantajlı yönlerinin bütünleştirilmesidir.

Ataletsel Navigasyon Sistemi (ANS), herhangi bir dış kaynağa ihtiyaç duymadan hareketlinin kendi dinamik durumundan ortaya çıkan parametreleri kullanarak belli bir referans sistemine göre konum hesaplar. Bu nedenle sistem dış etkilere karşı dayanıklı ve sağladığı veriler sürekli. Ataletsel Navigasyon Sistemleri diğer yöntemlere kıyasla daha ucuz, kurulumu kolay, çalışma için harici kaynaklara ihtiyaç duymama gibi özelliklerinden dolayı ön plana çıkmaktadır. Güç sarfiyatındaki cimrilikleri, hafif olmaları ve veri alışverişinin kolay olmasından dolayı küçük ölçekli uygulamalar için idealdir. ANS, Küresel Konumlama Sistemi'nin (KKS) aksine dış girişimlerden etkilenmemektedir ve kesintisiz navigasyon çıktılarını üretebilmektedir. Çünkü ANS otonom bir sistemdir ve dışarıdan bir sinyale bağlı değildir. Bu özelliği ile uydudan gelecek sinyalleri işleyerek konum, hız ve yönelim gibi navigasyon parametrelerini hesaplayan KKS'ye göre tercih edilebilir.

Bir ANS, birbirine dik olarak yerleştirilmiş 3-eksen ivmeölçer, 3-eksen dönüölçer ve 3-eksen manyetometreden oluşan Ataletsel Ölçüm Birimi (AÖB) sensörlerinin birleşmesiyle meydana gelmektedir. Ayrıca ANS'de, AÖB'den aldığı ölçüm verilerini işleyen mikroişlemci gibi akıllı bir bölüm de bulunmaktadır. ANS'lerde ivmeölçerler doğrusal ivme ölçümleri, dönüölçerler açısal hız ölçümlerinden ve manyetometreler ise manyetik pusula ölçümlerinden sorumludur. Ataletsel Ölçüm Birimi'nin ana bileşenleri olan ivmeölçerlerin ve dönüölçerlerin üretimindeki maliyetin düşmesi ile birlikte üretim sayılarında artış meydana gelmiştir. Fakat ivmeölçerlerin ve dönüölçerlerin düşük maliyetle yüksek sayıda üretilmesi ile birlikte sensör performanslarında düşüş olduğu gözlemlenmektedir.

Hareketli bir platformun kendi ivme ve açısal değişim ölçümleri, üzerindeki sensörler sayesinde elde edildiği için kendi kendine yeterlidir ve yönelim bilgisi tüm koşullarda yer istasyonlarına gerek olmadan temin edilebilir. Ancak ANS'yi oluşturan sensörler olan dönüölçerlerin ve ivmeölçerlerin en önemli sıkıntıları, konum başlangıç koşulları ve sensörlerin karakteristiklerinden ötürü, uzun süreli navigasyon süreçlerinde

sistemin hatasının sürekli olarak artmasıdır. Bu durum bir süre sonra elde edilen yönelim bilgilerinin sapmasına neden olmaktadır. Bu yüzden ANS'nin hatalarının giderilmesi için sensör birleştirme algoritmalarından faydalanılır.

Bu çalışmada AÖB'nin üzerinde bulunduğu bir sistem için yönelim bilgisinin doğru olarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle sensör birleştirme algoritması olarak tamamlayıcı filtre tasarımı uygulanmıştır. Tamamlayıcı filtre, yuvarlanma, yunuslama ve sapma açılarını elde etmek için dönüölçer, ivmeölçer ve manyetometre sensör verilerini birleştirmenin basit ve yaygın bir yoludur. Bir sensörün avantajlı yönlerini kullanarak diğer sensörün zayıf yanlarının üstesinden gelmek için kullanılan algoritmada sensörlerin birbirlerini tamamlayıcı özelliklerinden faydalanılmıştır. Tamamlayıcı filtre algoritması ivmeölçer için alçak geçiren bir filtreden ve dönüölçer için yüksek geçiren bir filtreden oluşur. Ardından bu filtre çıkışları birleştirilir. Bu sayede uzun süreli navigasyon uygulamalarında dönüölçer sensöründe oluşan sapma hatası ve ivmeölçer sensöründe oluşan gürültü hatası elimine edilerek daha güvenilir bir yönelim tahmini yapılmış olur. Tamamlayıcı filtre algoritmasının sabit kazançlı olması değişen hareket durumları için sistemin yönelim tahminini sınırlamaktadır. Bu yüzden sistemin hareketine göre uygun kazanç değeri bulunması için bulanık mantık algoritması tamamlayıcı filtre ile birlikte kullanılmıştır.

Bilgisayar dilinde bir sistemin verilen giriş değerine karşılık çıkışın 1 ya da 0 olması beklenir. Bulanık mantık tasarımına göre ise bir sistemin belirlenen giriş şartlarına göre çıkış değerlerinin derecelendirilmesi amaçlanır. Bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtre tasarımında sistemin hareketi modellenerek tamamlayıcı filtre algoritmasının kazancının 0 ile 1 arasında değiştirilmesi amaçlanmıştır. Hareket modelinin tanımlanması için dönüölçer ve ivmeölçer sensörlerinden alınan veriler kullanılmıştır. Bu veriler kullanılarak belirlenen kurallar çerçevesinde platformun hareketi tanımlanmıştır. Platformun hareketi, durgun ve hareketli oluşuna göre dönüölçer ve ivmeölçer sensörlerinden alınan veriler ışığında bir fonksiyona bağlı olarak derecelendirilmiştir. Bu sayede tamamlayıcı filtrenin kazancı için platformun hareketine göre optimum bir değer belirlenmiştir.

Bu çalışmada AÖB sensörü olarak InvenSense firmasına ait 9-eksen MPU9250 parça numaralı ürününün MATLAB sensör modeli kullanılmıştır. Bu ürün üzerinde 3-eksen ivmeölçer, 3-eksen dönüölçer ve 3-eksen manyetometre sensörü bulunmaktadır. MPU-9250 ucuz, düşük güç tüketimli ve hafif olmasından dolayı pek çok çalışmada MEMS AÖB olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın uygulama kısmı, MATLAB ile modelleme ve Simulink ile benzetim ortamı oluşturularak gerçekleştirilmiştir. MPU9250 sensörü "Sensor Fusion and Tracking Toolbox" kullanılarak MATLAB programında modellenmiştir. MPU9250 sensör modeli için firmanın sağladığı veri yapağındaki elektriksel özellikler kullanılmıştır. Öncelikle ideal sensör modelinin çıktıları ile MPU9250 sensör modelinin çıktıları kıyaslanmıştır. MPU9250 sensör modelinden alınan sonuçlardaki hata payları gözlemlenmiştir. Bu hata paylarını azaltmak adına basit bir kalibrasyon modeli oluşturulmuştur. Ardından MATLAB Simulink uygulaması üzerinde farklı oryantasyon bilgileri girilerek elde edilen sensör çıktıları tamamlayıcı filtre ve bulanık filtre tabanlı tamamlayıcı filtre bloklarına sokulmuştur. Bu bloklardan elde edilen çıktılar kendi aralarında ve gerçek oryantasyon hareketi ile karşılaştırılarak performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

Sonuç olarak, filtre performansları sistemin durgun veya hareketli halde olmasına göre X, Y ve Z olmak üzere 3 eksen için değerlendirilmiştir. Durgun halde, bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtre X ve Y eksenlerinde çok fazla bir iyileşme sağlayamamış

fakat Z ekseninde sağlamıştır. Ayrıca sabit katsayılı tamamlayıcı filtreye göre 3 ekseninde de gürültü performansında iyileştirme sağladığı görülmüştür. Hareketli halde ise bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtre, sabit katsayılı tamamlayıcı filtreye kıyasla X ekseninde %39.89, Y ekseninde % 31.37 ve Z ekseninde % 40.53 oranında iyileşme sağlamıştır.





IMPLEMENTATION OF COMPLEMENTARY FILTER TO INERTIAL MEASUREMENT UNIT TO INCREASE NAVIGATION SENSITIVITY

SUMMARY

Navigation is the calculation of the location and velocity of a moving platform relative to any reference coordinate frame. However, in many applications, it is also necessary to calculate the angular motion of the platform relative to the reference coordinate frame. Angular motion is used to obtain orientation information of the moving platform. Navigation systems are crucial in many military and civilian applications. Nowadays, navigation systems are used for several purposes such as coordination of vehicles and increasing efficiency in air, sea and land military vehicles. However, the errors produced by such navigation systems reduce the efficiency of the systems. Therefore, eliminating or minimizing the errors of these systems has become the primary priority working area. The most effective method for this is to fusion the advantageous aspects of the systems.

The Inertial Navigation System (INS) calculates the navigation information according to a particular reference system using parameters resulting from the dynamic state of the mobile itself without the need for any external source. Therefore, the system is not mixed and the data it provides is continuous. Inertial navigation systems stand out because of their special features such as cheaper, easier to install and no need for external sources for operation compared to other methods. They are ideal for small scale applications due to their low power consumption, lightweight and easy data exchange. The Inertial Navigation System (INS) is unaffected by external interference, unlike the global positioning system (GPS) and can produce uninterrupted navigation outputs. Because ANS is an autonomous system and is independence connected to an external signal. With this feature, it can be preferred according to GPS which calculates navigation parameters such as position, speed and orientation by processing the signals coming from the satellite.

An INS consists of a combination of 3-axis accelerometer, 3-axis gyroscope and 3-axis magnetometer Inertial Measurement Unit sensors placed perpendicular to each other. There is also a smart section in the INS, such as a microprocessor that processes the measurement data it receives from the IMU. In INS, accelerometers are responsible for linear acceleration measurements, gyroscopes are responsible for angular velocity measurements, and magnetometers are responsible for magnetic compass measurements. Accelerometers and gyroscopes, which are the main components of the inertial measurement unit, have increased the number of products with the decrease in the cost of production. However, it is observed that sensor performance decreases with the high number of accelerometers and gyroscopes produced at low cost.

The acceleration and angular rate measurements of a mobile platform are self-sufficient as they are obtained by sensors on them, and orientation information can be provided in all conditions without the need for ground stations. However, the most important problems of the gyroscopes and accelerometers, which consist the INS, are

the continuous increase of system error in long-term navigation processes due to the initial conditions of the position and the characteristics of the sensors. Therefore, sensor fusion algorithms are used to eliminate INS errors.

In this study, it is aimed to accurately predict the orientation information for a system on which the IMU is located. For this purpose, complementary filter design is applied as sensor fusion algorithm. The complementary filter is a simple and common way to combine gyroscope, accelerometer and magnetometer sensor data to obtain roll, pitch, and yaw angles. In the algorithm used to overcome the weaknesses of the other sensor by using advantageous aspects of one sensor, complementary features of the sensors are utilized. The complementary filter algorithm consists of a low-pass filter for the accelerometer and a high-pass filter for the gyroscope. These filter outputs are then combined. In this way, a more reliable orientation estimation is made by eliminating deviation error in the gyroscope sensor and noise error in the accelerometer sensor in long-term navigation applications. The constant gain of the complementary filter algorithm limits the estimation of the orientation of the system for changing motion situations. Therefore, fuzzy logic algorithm is used with complementary filter in order to find the appropriate gain value according to the movement of the system.

In the computer language, the output is expected to be 1 or 0 versus a given input value. According to fuzzy logic design, it is aimed to rate the output values of a system according to the specified input conditions. In the fuzzy logic based complementary filter design, the motion of the system is modeled and it is aimed to change the gain of the complementary filter algorithm between 0 and 1. The data obtained from the gyroscope and accelerometer sensors were used to define the motion model. Using this data, the movement of the platform is defined in accordance with the rules determined. The movement of the platform is graded depending on a function in the light of the data received from the gyroscope and accelerometer sensors according to its stagnation and motion. Thus, an optimum value for the gain of the complementary filter is determined according to the movement of the platform.

In this study, MATLAB sensor model of 9-axis MPU9250 which is the product of InvenSense company was used as IMU sensor. This product has a 3-axis accelerometer, 3-axis rotary meter and 3-axis magnetometer sensor. MPU-9250 is used as MEMS IMU in many studies because of inexpensive, low power consumption and lightweight. The application part of this study was realized by modeling with MATLAB and creating a simulation environment with Simulink. The MPU9250 sensor is modeled in MATLAB using the "Sensor Fusion and Tracking Toolbox". For the MPU9250 sensor model, electrical specifications in the datasheet provided by the company are used. First, the outputs of the ideal sensor model are compared with those of the MPU9250 sensor model. The margins of error obtained from the MPU9250 sensor model were observed. A simple calibration model has been developed to reduce these margins. Then, by entering different orientation information on MATLAB Simulink application, the sensor outputs obtained were inserted into complementary filter and fuzzy filter based complementary filter blocks. The results obtained from these blocks were compared with each other and with the actual orientation movement and the performance evaluation was made.

As a result, filter performances were evaluated for 3 axes, X, Y and Z, depending on whether the system is in stagnant state or in motion state. In the stagnant state, the complementary filter based on the fuzzy logic did not achieve much improvement in the X and Y axes, but did in the Z axis. In addition, it has been observed that it improves

noise performance in 3 axes compared to the complementary filter with constant coefficients. In motion state, the fuzzy logic based complement filter improved 39.89% in X axis, 31.37% in Y axis and 40.53% in Z axis compared to complementary filter with constant coefficient.





1. GİRİŞ

1.1 Ataletsel Ölçüm Birimi

Ataletsel Ölçüm Birimi (AÖB), belirli bir referans noktasına göre üç ekseninde özgül kuvvet ve açısal hız ölçümü veren çok sayıda ivmeölçer ve dönüölçerin tümleştirilmesiyle oluşturulan bir sensördür. Özgül kuvvet serbest düşüş ile ilgili bir ivme ölçümüdür. Yerçekimi ivmesinin çıkarılmasıyla gerçek koordinattaki ivmeye ulaşılır. Açısal hız ise dönme hızı ölçümüdür. Son yıllarda AÖB terimi, Ataletsel Navigasyon Sistemi (ANS) gibi geniş ürün çeşitliliği olan ataletsel sistemleri de içine alan kapsayıcı bir tanım haline gelmiştir. Bu tezde AÖB terimi klasik anlamı uyarınca 3 eksen ivmeölçer ve 3 eksen dönüölçer sensörlerinden müteşekkil olarak tanımlanacaktır. Ayrıca bunlara ek olarak kullandığımız tümleşik sensörün içine yerleştirilmiş 3 eksen manyetometre sensöründen de faydalanılacaktır.

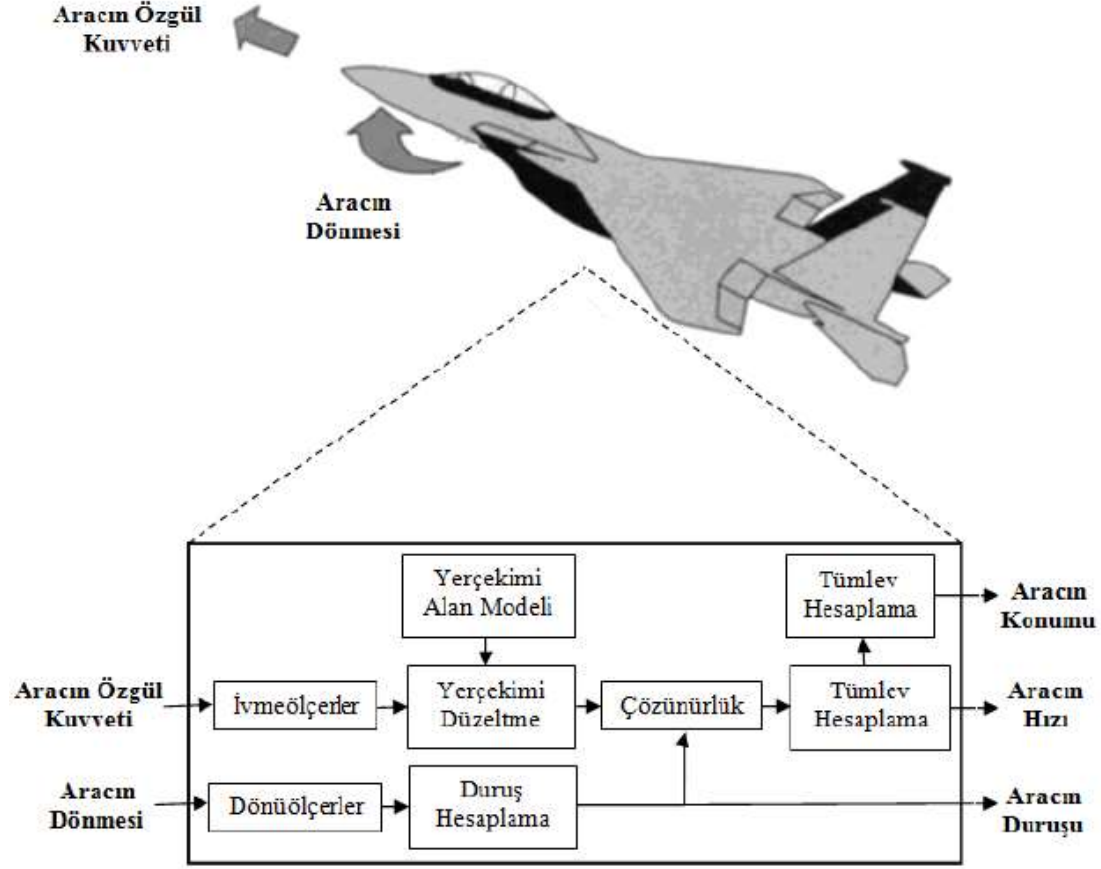
AÖB tek başına pozisyon, hız ve yönelim gibi navigasyon verileri sağlamaz. AÖB ANS'nin aksine bir sensör gibi davranır. ANS ise, içindeki AÖB'nin kedisine sağladığı ölçüm verilerini birleştirerek bir navigasyon çözümü sunar. Örneğin, bir ANS, AÖB tarafından kendisine sağlanan ölçüm verileri vasıtasıyla bir başlangıç noktasına, yönelimine ve hızına göre kendi kendine yetebilecek pozisyon, hız ve yönelim takibi gibi navigasyon bilgilerini oluşturabilir [1]. Şekil 1.1'de ANS'nin çalışma yöntemi gösterilmektedir.

ANS yapısal özelliklerine göre Şekil 1.2'de gösterildiği gibi iki ana kategoride incelenir.

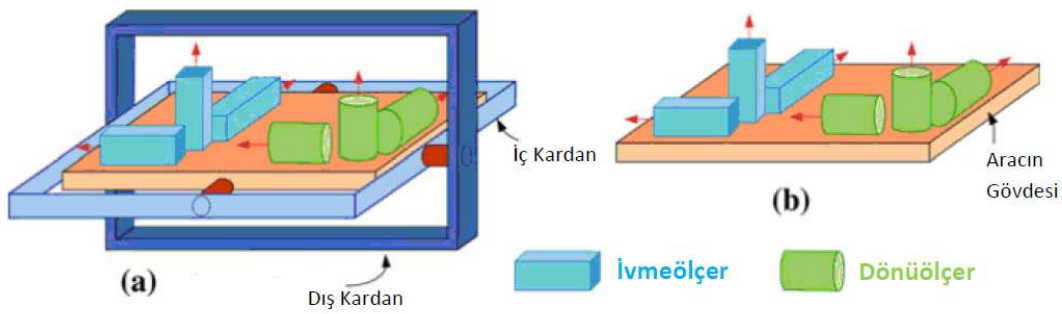
- Stabilize Platform Sistemi
- Analitik Sistem

Stabilize platform sisteminde, ataletsel sensörler platformun navigasyon çerçevesi ile aynı hizada kalacakları bir dizi kadran üzerine yerleştirilirler. Bu hizalama işlemi, tork motoru setinin dönüölçerlerden algıladığı dönüş tepkisine göre platformu döndürmesiyle gerçekleştirilir. Böylece ivmeölçer ölçümlerinin integralinin

alınmasıyla doğrudan navigasyon çerçevesindeki hız ve konum bilgileri elde edilir. Stabilize platformlar mekanik olarak kompleks ve pahalı oldukları için kullanımları sınırlıdır [3].



Şekil 1.1 : ANS Çalışma Yöntemi [2].



Şekil 1.2 : Stabilize Platform (a) ve Analitik Platform (b) için AÖB bileşenlerinin yerleşimi [3].

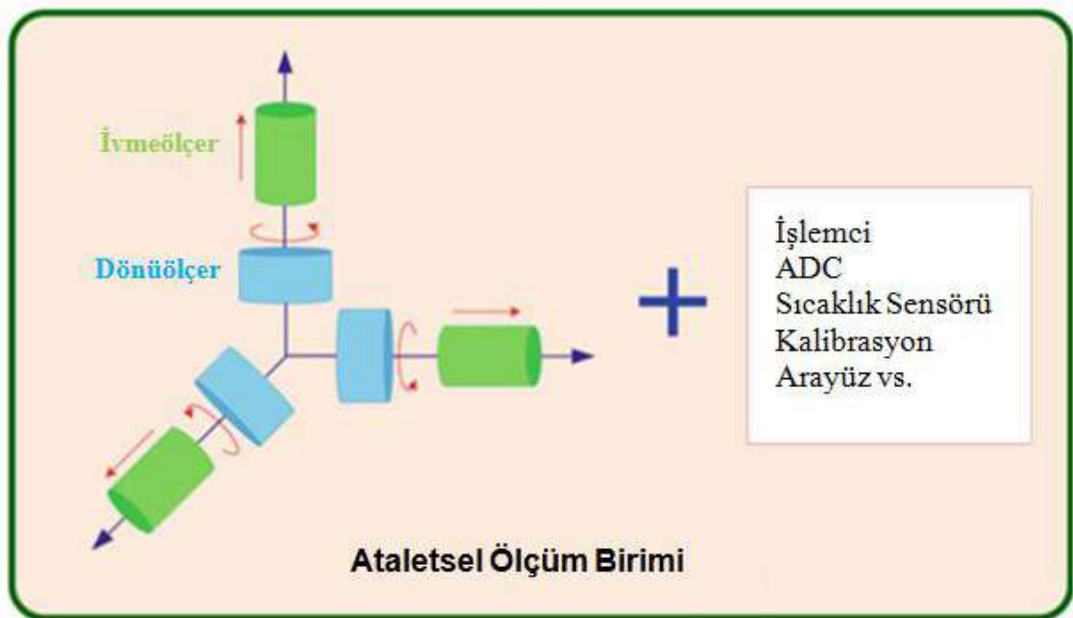
Elektronikteki gelişmeler analitik sistemleri daha kullanılabilir hale getirmiştir. Bu sistemlerde, ataletsel sensörler doğrudan platform üzerine sabitlenir ve kadranlar yerine dönüşün bilgisayar tarafından simüle edildiği bir sistem kullanılır. Bu sistemde bir dönüşüm matrisi mevcuttur. Dönüölçer aracılığıyla ölçülen açısız hız navigasyon

çerçevesi ile platformun çerçevesi arasındaki dönüşümü sürekli olarak günceller. İvmeölçer ölçümleri de bu dönüşümden geçerek navigasyon çerçevesinde ivme elde edilir. Analitik sistemler güvenilirliği, kullanım kolaylığı, az güç tüketimi, hafif ve ucuz olması nedeniyle stabilize sistemlere göre tercih edilir. Çizelge 1.1’de iki sistemin karşılaştırılması görülmektedir [3].

Çizelge 1.1 : Stabilize platform sistemi ile analitik sistemin karşılaştırılması [3].

Özellikler	Stabilize Platform Sistemi	Analitik Sistem
Boyut	Büyük	Küçük
Ağırlık	Ağır	Hafif
Performans	Üstün performans	Yüksek hassasiyet
Dayanıklılık	Yüksek güvenilirlik, şok ve titreşime karşı düşük bağışıklık	Yüksek güvenilirlik, şok ve titreşime karşı yüksek bağışıklık

Ataletsel sensörler ivmeölçer ve dönüölçerleri kapsamaktadır. İvmeölçer ve dönüölçerler sırasıyla tek eksende özgül kuvvet ve açısal hız ölçümü için kullanılırlar. AÖB ise herbir sensörden her ekseninde birer tane olmak üzere birbirlerine dik olarak yerleştirilmiş 3 ivmeölçer ve 3 dönüölçerden oluşur. Şekil 1.3’de bu bileşenler gösterilmektedir.



Şekil 1.3 : AÖB bileşenleri [3].

Ataletsel sensörler için ürün fiyatı ve performansına göre geniş bir seçim aralığı mevcuttur. Genel olarak ataletsel sensörler performans açısından 4 ana kategoride sınıflandırılır.

- Ticari Seviye
- Taktik Seviye
- Navigasyon Seviye
- Stratejik Seviye

Kullanım alanına göre uygun sensörler seçilmelidir. Örneğin kıtalararası balistik füze, gemi, denizaltı ve uzay aracı gibi araçlarda stratejik seviye sensörler tercih edilirken, ticari ve askeri uçaklarda navigasyon seviye sensörler kullanılır. Ticari seviye ve taktik seviye sensörler benzer kullanım alanlarına sahiptir. Aralarındaki hassasiyet farkı üretim sırasındaki kalibrasyon kalitesinden kaynaklanmaktadır. Bu sensörler de yönelim belirleme, yaya takip sistemi, araç fren sistemleri, hava yastıkları ve oyun kontrolleri gibi kullanım alanlarına sahiptir [1]. Çizelge 1.2’de bu performans kategorilerine göre ataletsel sensörler arasındaki kıyaslama gösterilmektedir.

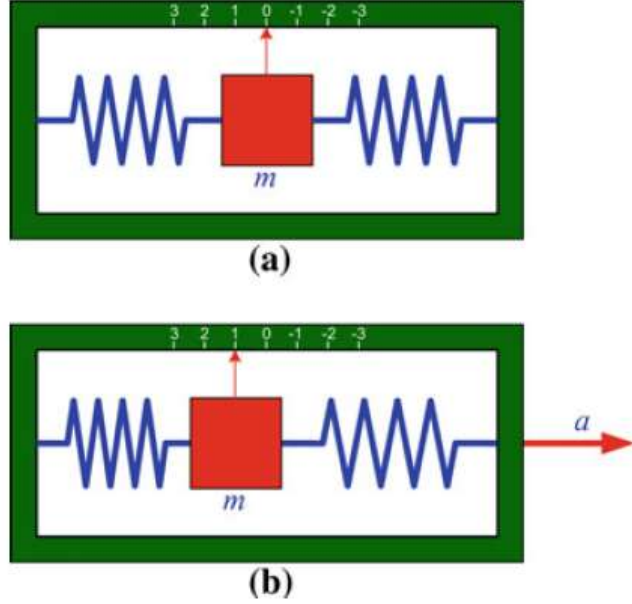
Çizelge 1.2 : Ataletsel sensörlerin performans açısından kıyaslanması [4].

Performans Kategorisi	Dönüölçer Performansı	İvmeölçer Performansı
Ticari Seviye	>1 %/sa	>50 mg
Taktik Seviye	~1 %/sa	~1 mg
Navigasyon Seviye	0.01 %/sa	25 µg
Stratejik Seviye	~0.001 %/sa	~1 µg

1.1.1 İvmeölçerler

İvmeölçer duyarlı olduğu eksen boyunca uygulanan ivmeyi algılar ve bununla ilgili elektriksel sinyal üretir. İvmeölçer eylemsizlik kanununa göre çalışır. Şekil 1.4’de görüldüğü gibi bir dayanıklı kütle ve bunu içinde bulunduğu kutuya sabitleyen iki adet yaydan oluşur. Uygulanan ivmeye bağlı olarak dayanıklı kütle denge durumundan çıkacak ve içinde bulunduğu kutuya göre yer değiştirecektir. Bu durumda yaylardan biri sıkışırken diğeri gerilecektir. Dışarıdan uygulanan kuvvet ile yayların dayanıklı kütleyle uyguladığı kuvvet eşitlenene kadar hareket devam edecektir. Sonuç olarak dayanıklı kütle referans noktasına göre son konumu uygulanan ivme ile orantılı olacaktır.

Dünya üzerindeki hareketsiz bir cismin ivme verisi, yerçekiminin etkilediği eksen doğrultusunda yerçekimi ivmesine eşit olur. Bu durumda cismin dikey eksendeki ivme verisi hesaplanırken yerçekimi ivmesi çıkarılmalıdır.



Şekil 1.4 : Denge durumundaki ivmeölçer (a) ile sağa doğru ivmelenmiş ivmeölçer (b) gösterimi [3].

İvmeölçerler 3 ana gruba ayrılırlar.

- Mekanik İvmeölçerler
- Kuvars İvmeölçerler
- Mikroeletromekanik Sistemler (MEMS) İvmeölçerler

MEMS sensörler varolan mekanik ve elektronik sistemlerin mikron boyutunda tasarlanmış halleridir. Boyutları 1 ila 100 mikrometre arasında değişen MEMS sensörler için boyutlarından ötürü evrensel fizik kanunları geçerliliğini kaybetmektedir. Bu yapılarda hacimin yüzey alanına oranı çok düşük olduğundan elektrostatik kuvvet gibi yüzey etkileri eylemsizlik gibi hacim etkilerine baskındır [5].

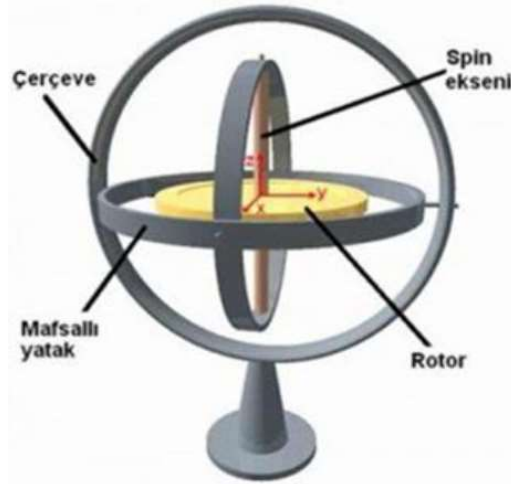
MEMS sensörler küçük boyutları, düşük fiyatları ve yüksek güvenilirlikleri sebebiyle tercih edilmektedir. Bu teknoloji ile üretilmiş ivmeölçerler 1 ila 1000g ivme seviyelerinde ölçüm yapabilmektedirler. Bu tezde MEMS ivmeölçerler kullanılmıştır.

MEMS ivmeölçerler yapılarına göre kapasitif, optik, piezorezistif, piezoelektrik, termal, tünel akımı, rezonans ve manyetik ivmeölçer gibi gruplara ayrılırlar. Her çeşidin kendine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Kapasitif ivmeölçerler,

düşük üretim maliyeti, yüksek hassasiyet, yüksek verimlilik ve sıcaklığa bağımlılığının az olması sebebiyle tercih edilmektedir. Buna karşın optik ivmeölçerlerin üretimi zor olmasına rağmen elektromanyetik girişime duyarlı olması yüksek sıcaklıklarda ve yüksek performansta çalışabilmesi öne çıkan avantajlarından. Piezorezistif ivmeölçerlerin ise üretimi kolay fakat kapasitif ivmeölçerlere göre sıcaklığa bağımlılığı fazla olduğundan tercih edilmemektedir. Piezoelektrik ivmeölçerler ile düşük frekanslı ivme ölçümü mümkün olmamaktadır. Rezonans ivmeölçerler piezorezistif olanlara nazaran daha hassasdır fakat doğrusal çıkış verememeleri en büyük problemleridir. Tünel akımı ivmeölçerler ise çok düşük gürültü seviyelerine sahip olmalarına rağmen imalat karışıklığı ve yüksek maliyet gibi dezavantajları vardır.

1.1.2 Dönüölçerler

Bir cismin 3 boyutlu uzayda tam olarak hareketini tanımlamak için dönüş hareketinin ve referans çerçeveler arası dönüştürülmüş hareketin ölçülmesine ihtiyaç vardır. Dönüölçerler atalet çerçevesini referans alarak duyarlı olduğu eksen için açısal hız çıktısı veren sensörlerdir. Alınan bu verinin matematiksel olarak integralinin alınmasıyla referans başlangıç açısına göre oluşan açı değişimi elde edilir. Bir dönüölçerin çıktısı tipine göre açısal hız veya açı olabilir [3]. Şekil 1.5’de örnek bir dönüölçer görülmektedir.



Şekil 1.5 : Bohnenberger dönüölçeri

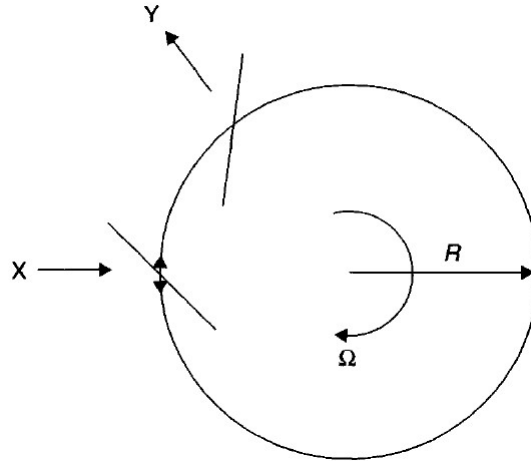
Dönüölçerleri de 3 ana gruba ayırabiliriz.

- Mekanik Dönüölçerler

- Optik Dönüölçerler
- MEMS Dönüölçerler

Mekanik dönüölçerler, Bohnenberger dönüölçeri prensibine göre çalışırlar. Dönen bir kütle ve bunun etrafındaki mafsallardan oluşur. Dönen kütle üzerine bir dış kuvvet uygulansa da kendi eksenine paralel olacak şekilde pozisyonunu korur. Bu sayede bu sistemin yerleştirildiği araç herhangi bir ekseninde dönü hareketi yaptığıında dönü açısı hesaplanmış olur. Bu tip dönüölçerler artık kullanılmamaktadır. Bunların yerini optik dönüölçerler almıştır.

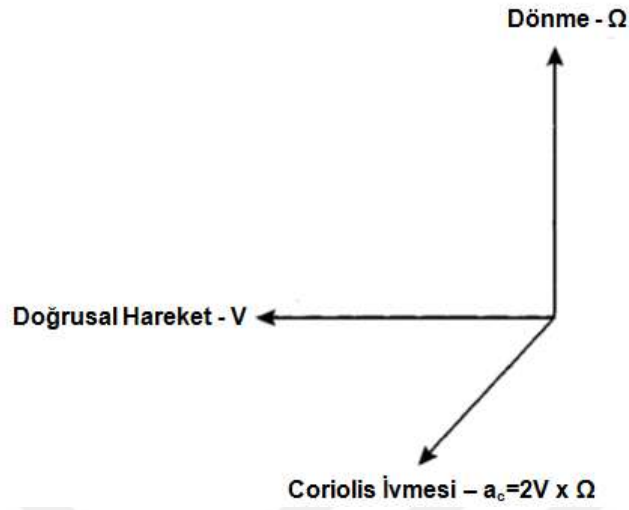
Optik dönüölçerler çok hassas ölçümler yapabilir. Daha çok uzun mesafe kateden araçlarda kullanılır. Deniz araçları, uzay araçları ve güdümlü füzeler gibi kullanım alanları vardır. Optik dönüölçerlerin çalışma prensibi Sagnac etkisine dayanır. Sagnac etkisine göre kapalı bir döngüde birbirlerine zıt hareket eden iki ışık açısal bir harekete maruz kaldığında aralarında bir faz farkı oluşur. Şekil 1.6'da Sagnac etkisi görülmektedir. Açısal olarak hareketsiz bir durumda X noktasından birbirlerine zıt yönlerde hareket eden ışıklar yine X noktasında buluşurken, bir dönü oluştuğunda ise ayrılan ışıklar Y noktasında buluşur. İki ışığın katettiği yollar arasındaki farka bakılarak dönü açısı hesaplanır. Işığın üretilme yöntemine ve katettiği yol farkının hesaplanma yöntemine göre farklı optik dönüölçerler vardır. En çok bilinenleri RLG ve FOG optik dönüölçerleridir.



Şekil 1.6 : Dairesel dönen (Sagnac) girişimölçer [2].

MEMS dönüölçerler Coriolis etkisine göre çalışırlar. Şekil 1.7'de görüldüğü gibi Coriolis etkisi hareket eksenine dik bir eksen üzerindeki dönme hareketini belirlemeye

dayanır. Coriolis ivmesinin yönü hem doğrusal hareket eksenine hem de dönme eksenine diktir.



Şekil 1.7 : Coriolis kuvvetinin oluşumu [2].

Sensör boyutlarının küçük olması, hafif olması ve düşük fiyatlı olması sebebiyle kısa süreli navigasyon uygulamalarında MEMS dönüölçerler tercih edilir. Bu tezde MEMS dönüölçerler kullanılmıştır.

1.1.3 Manyetometreler

Manyetometre manyetik alan yönünü ve büyüklüğünü ölçen bir sensördür. Manyetometre, sensör konumunda jeomanyetik alanın yönünü gösteren 3 eksenli bir vektör sağlayarak bir pusula görevi görür. Manyetometreler ucuz, güvenilir ve hafif olmaları yönelim tahmininde kullanımlarını uygun kılar. Manyetik alanları 10–15T aralığında ölçebilen çeşitli sensörler ve ölçüm prensipleri vardır.

Yaygın MEMS manyetometreleri, bir manyetik alan uygulandığında öz direnci değişen Hall etkisi veya dirençlere dayanır. Ölçeklenme ve yanlış hizalama sapmalarından kaynaklanan sensör hatalarının yanı sıra, manyetik alan ölçümleri sensörün çevresindeki ferromanyetik elemanlar tarafından bozulmakta ve sert-demir (*İng.* hard-iron) ve yumuşak demir (*İng.* soft-iron) bozulmaları olarak isimlendirilmektedir. Sert demir bozulmalarına, ilave bir manyetik alan sergileyen malzemeler neden olurken, yumuşak demir bozulmaları, alanı oluşturan etkileyici veya deforme eden ancak zorunlu olarak üretmeyen malzemelerin sonucudur. Bu hatalar kalibrasyon sırasında dikkate alınmalıdır ve bu işlemi oldukça karmaşık hale getirmektedir.

Manyetometre, algılanan vektörün referans manyetik alan vektörü ile karşılaştırılması ve ivmeölçerin hesaplamada yetersiz olduğu sapma açısını iyi bir şekilde tahmin etmek için kullanılabileceğinden büyük bir kolaylık sunmaktadır. Ayrıca manyetometre, ivmeölçeri etkileyen dış ivmelenmeler tarafından da rahatsız edilmez.

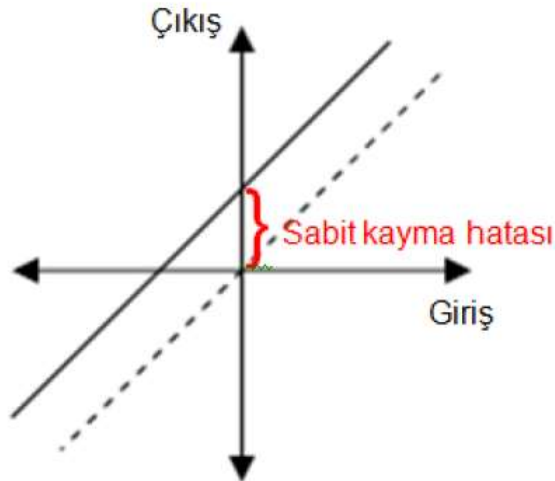
1.2 Problemin Tanımlanması

Her çeşit ivmeölçer ve dönüölçer sensöründe hata kaynakları mevcuttur. Bu hatalar, sabit kayma hatası, orantı katsayısı hatası, aksenel kaçıklık hatası ve rastgele gürültü hatasıdır. Ayrıca sensör tipine göre yüksek dereceli hatalar ve açısal hız – özgül kuvvet çapraz hassasiyet hataları da görülebilir [6].

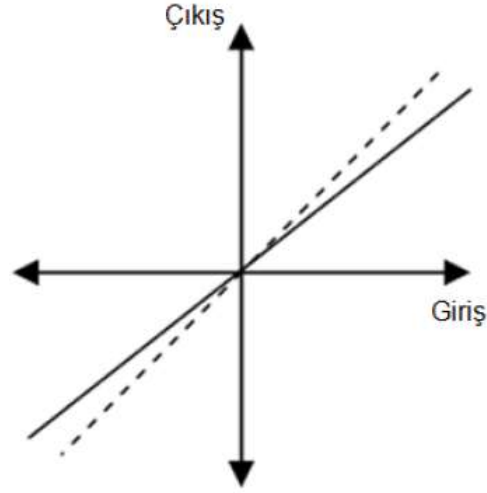
Sabit kayma hatası, sensöre herhangi bir müdahale olmadığında ölçülen değerdir. Şekil 1.8’de gösterilmiştir. Laboratuvar ortamında yapılacak kalibrasyon ile belirlenebilir. İvme veya açı verisi ile ifade edilir.

Orantı katsayısı hatası, sensörün girişine göre çıkışının nasıl değiştiğini gösterir. Şekil 1.9’da gösterilmiştir. Girişin çıkışa oranıdır. Oran (ppm) ile ifade edilir.

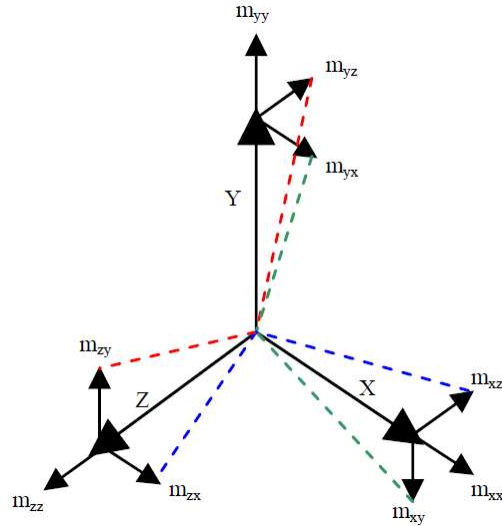
Eksenel kaçıklık hatası, sensör üretimi esnasında sensörün duyarlı olduğu eksene ne kadar paralel yerleştirildiği ile ilgili bir hatadır. Dahili bir hatadır. İlgili ekseninde ölçüm yapıldığında diğer eksenlerden veri alınmaz ise eksen kaçıklığının olmadığı söylenebilir. Şekil 1.10’da gösterilmiştir. Açı verisi (milirad) ile ifade edilir.



Şekil 1.8 : Sabit kayma hatası gösterimi [7].



Şekil 1.9 : Orantı katsayısı hatası gösterimi [7].



Şekil 1.10 : Eksenel kaçıklık hatası gösterimi [7].

Rastgele gürültü hatasının birden fazla kaynağı vardır. Elektriksel gürültü sensörlerin çözünürlüğünü düşürmektedir. 1 Hz'in altında sensör çıktılarında beyaz gürültü görülmektedir. MEMS sensörler yüksek frekanslı gürültü gösterirler. Ayrıca AÖB'den veri alımı esnasında oluşan örnekleme hatası da rastgele gürültü hatalarından biri olarak sayılabilir [6].

Sabit kayma hatası, orantı katsayısı hatası ve eksenel kaçıklık hatası sistematik hatalardır. Her sistematik hatanın dört bileşeni vardır. Bunlar da sabit hatalar, sıcaklığa bağlı oluşan hatalar, çalışmadan çalışmaya oluşan hatalar ve çalışma sırasında oluşan hatalardır. Sabit hatalar ve sıcaklığa bağlı oluşan hatalar laboratuvar kalibrasyon verileri kullanılarak AÖB işlemcisi ile elimine edilebilir. Eğer sıcaklığa bağlı hata

giderilemezse sistem normal çalışma sıcaklığına gelene kadar hatalı veri akışı olabilir. Çalışmadan çalışmaya oluşan hatalar ANS algoritmaları ile giderilebilir. Bunun yanında çalışma esnasındaki hataların giderilmesi için diğer navigasyon sensörlerinden faydalanılabilir [6].

1.3 İlgili Çalışmalar

ANS hassasiyetini arttırmak adına gerek donanımsal olarak gerek algoritma bazında fazlaca çalışma gerçekleştirilmiştir. Birden fazla AÖB kullanılması veya farklı filtrelerin kombinasyonları gibi uygulamalar yapılmıştır.

Bir robot yılan çalışmasında düşük maliyetli MEMS AÖB kullanılmıştır. Gürültüleri minimize etmek ve takip hassasiyetini arttırmak adına alçak geçiren filtre, referans kalibrasyon ve Kalman filtresi olmak üzere üç algoritma kullanılmıştır [8].

Gerçek zamanlı insan hareketini takip etmek için yapılan başka bir çalışmada uyarlanabilir tamamlayıcı filtre kullanılmıştır. Yakınsama oranı için Gauss-Newton optimizasyon algoritması, iraksama oranı için ise dönüölçerden faydalanılmıştır. Ayrıca kapalı alanlardaki manyetik bozunma ve hareket esnasındaki artan ivmelenme ile başetmek için Gauss-Newton optimizasyon algoritmasına yardımcı olarak dünyanın manyetik alanının seçilebileceği referans vektör şemaları tanıtılmıştır [9].

Yine MEMS AÖB ile yapılan bir çalışmada quaternion tabanlı yönelim belirleme algoritması kullanılmıştır. Hata sapmasının az olduğu ilgili sensör verilerinin çıkışları birleştirilerek yeni bir sabit kazançlı tamamlayıcı filtre tasarlanmıştır. İvmeölçer sensöründen alınan veriler kullanılarak yönelim belirleme lineer bir sisteme dönüştürülmüştür. Kararlı bir sistem çözümü sadece bir matris çarpımı ile başarılmıştır. Önerilen tamamlayıcı filtre metodu hızlıdır çünkü iterasyon içermemektedir. Bu sayede hareketli cisimler için daha kararlı ve iyi yönelim tahmini sağlanması amaçlanmaktadır [10].

Matematiksel karmaşanın az olduğu ve yüksek yönelim tahmini hassasiyetine sahip bir çalışmada ise quaternion, dereceli alçalma teorisi ve tamamlayıcı filtre kullanılmıştır. Tamamlayıcı filtre algoritması, quaternion ve dereceli alçalma metodu kullanılarak sensör verilerinin birleştirilmesi için ivmeölçer çıkışına göre optimize edilmiştir. Buna göre hassas anlık durum tahmini elde edilmiştir ve artan bir hataya sebep olmamıştır [11].

Yönelim tahmini için ucuz maliyetli MEMS atalet (ivmeölçer ve dönüölçer) ve manyetometre sensörlerinin kullanıldığı bir çalışmada ise dayanıklı ve basit bir algoritma tanımlanmıştır. İvmeye dayalı anahtarlamalı bir yapı kurularak programlanabilir kazançlı bir tamamlayıcı filtre önerilmiştir. Yüksek ivmeli hareketlerle testler yapılmış ve önerilen filtre geleneksel lineer tamamlayıcı filtre ile karşılaştırılmıştır [12].

Bir başka çalışmada yönelim tahmini için yeni bir metot olan kazanç ayarlamalı tamamlayıcı filtre kullanılmıştır. Yönelim tahmini için kullanılan sabit katsayılı geleneksel tamamlayıcı filtreler dinamik değişikliklere karşı duyarsız olduklarından hatalı sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada, bulanık mantık ile ayarlanabilen tamamlayıcı filtre önerilerek sabit kazanç durumu düzeltilmeye çalışılmıştır. Önerilen filtre, Kalman filtresi ile değerlendirilmiş ve doğrulanmıştır [13].

Bir diğer çalışmada ise yüksek dinamikli hareketlerde, ucuz maliyetli ataletsel sensörler ve manyetometre ile yapılan ölçümlerin hassasiyetini arttırmak için sensör hatalarını hafifletmek adına uyarlanabilir kazançlı tamamlayıcı filtre kullanılmıştır. Bunun için bulanık mantık kontrolcüsünden faydalanılmıştır. Kontrolcünün giriş değerleri için ivme ve ivme değişim hızı olmak üzere iki parametre seçilmiştir. Belirli bir zaman aralığında iyi sonuç verdiği gözlenmiştir [14].

Tamamlayıcı filtrenin etkinliğini arttırmak adına, zamana bağlı değişebilen bir sonuç vermesi için yapılan bir çalışmada, bulanık mantık kullanılarak filtre çıkışının dinamik hale getirilmesi sağlanmıştır. İvmeölçer ve dönüölçer verileri kullanılarak, önerilen metodun doğruluğunun ispatı için kararlılık analizi ve deneysel çalışmalar yapılmıştır [15].

Bir önceki metot kullanılarak yapılan başka bir çalışmada, buna ek olarak manyetometre verisinden de faydalanılmıştır. Ayrıca bulanık mantık kullanılarak zamanla değişen tamamlayıcı filtreye başka yönelim bulma metotları da ilave edilmiştir. Eksenler üzerinde vektör ölçümü yapılarak yapılan bir yönelim bulma metodu kullanılmıştır. Bunların dışında genişletilmiş Kalman filtresi kullanılmış ve elde edilen çıktılar sadece dönüölçerden elde edilen verilerle ve birbirleriyle kıyaslanmıştır [16].

1.4 Tezin Amacı

Bu tezde MEMS tabanlı InvenSense firmasına ait MPU9250 parça numaralı AÖB sensör modeli kullanılacaktır. Ayrıca bu AÖB içinde manyetometrede mevcuttur. Bu modülden alınan verilerdeki gürültü, ölçölmek istenen verilerde bozulmaya yol açmaktadır. Bu bozulmaları minimize etmek için sistemin hareketine göre kesim frekansını değiştirebilen bulanık mantık tabanlı bir tamamlayıcı filtre tasarlanacaktır. İlgili sensör modeli ve bahsedilen filtre için MATLAB ve Simulink ortamında benzetim yapılarak, tasarlanan filtrenin etkinliği araştırılacaktır.





2. YÖNTEM

2.1 Yönelim Belirleme

Yönelim belirlemede en iyi sonuç farklı tip sensörlerin datalarının birleştirilmesiyle elde edilir. Bu sayede her sensörün iyi tarafları kullanılmış olur. Örneğin kısa zamanlı ölçümlerde dönüölçerden alınan veriler integral alınarak açı verisine ulaşılabilir. Fakat uzun zamanlı ölçümlerde dönüölçer verilerinde sapma görülür. Diğer taraftan ivmeölçer kısa zamanlı ölçümlerde titreşime ve yerçekimi haricindeki ivmelere karşı hassastır. Fakat uzun zamanlı ölçümlerde açı hesabı için güvenilir bir sensördür, zamanla alınan verilerde kötüleşme olmaz. Dönüölçer ve ivmeölçer verilerinin birleştirilmesiyle ölçülen açı verisi ise titreşime karşı dirençli ve uzun zamanlı ölçümlerdeki kaymaya karşı bağışıklık kazanmış olacaktır.

2.1.1 İvmeölçerden açı belirleme

3 eksenli ivmeölçerin çıktısı denklem (2.1)'deki gibi modellenebilir.

$$a_m = \frac{1}{m}(F - F_g) \quad (2.1)$$

Burada a_m ölçülen ivme verisi, m cismin kütlesi, F cismin üzerindeki toplam kuvvet ve F_g ise yerçekimi kuvvetidir. $F = 0$ kabul edilirse, ivmeölçer çıkıtısı denklem (2.2) gibi olur.

$$a_m = -\frac{F_g}{m} \quad (2.2)$$

Atalet çerçevesinde yerçekimi kuvveti $(0 \ 0 \ mg)^T$ vektörü ile verilir. Bunun anlamı x ve y ekseninde bir kuvvet olmadığı fakat z ekseninde mg kadar kuvvet olduğudur.

Yerçekimini sensörün cisim çerçevesine dönüştürsek denklem (2.3)'ü elde ederiz. R_I^B atalet çerçevesinden sensör cisim çerçevesine olan dönüşüm matrisidir.

$$F_g = R_I^B \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -mg \sin \theta \\ mg \cos \theta \sin \phi \\ mg \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Böylece cisim çerçevesinde beklenen ivmeölçer verisi denklem (2.4)'deki gibi olur.

$$a_m = \begin{pmatrix} -g \sin \theta \\ g \cos \theta \sin \phi \\ g \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

a_m bileşenini $a_{m,x}$, $a_{m,y}$ ve $a_{m,z}$ olarak tanımlayalım. Yuvarlanma (ϕ) ve yunuslama (θ) açılarını aşağıdaki gibi bulabiliriz.

$$\phi = \text{atan2}(a_{m,y}, a_{m,z}) \quad (2.5)$$

$$\theta = \text{atan2}(-a_{m,x}, \sqrt{a_{m,y}^2 + a_{m,z}^2}) \quad (2.6)$$

Bu yöntem yunuslama ve yuvarlanma açılarının hesabı için hızlı ve basit bir yoldur. Fakat burada ivmeölçere sadece yerçekimi kuvvetinin etki ettiğini varsayılmıştır. Bunun yanında titreşim ve harici kuvvetler ölçülen yunuslama ve yuvarlanma açlarına gürültü bindirmekte, çoğu zaman kullanılamaz hale getirmektedir.

2.1.2 Dönüölçerden açı belirleme

Dönüölçerler de açı ölçümü için kullanılabilir. İvmeölçerin aksine dönüölçerler ivmeden etkilenmezler, harici kuvvetlerin bozucu etkilerine karşı bağışıklıdırlar.

Dönüölçer sensörün cisim çerçevesine göre x, y ve z eksenindeki açısal hızı ölçer. Euler açılarını elde etmek için farklı bir çerçevedeki yuvarlanma, yunuslama ve sapma açılarını uygun çerçeveye dönüştürmek gerekir.

p , q ve r sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki dönüölçer çıktılarını göstermek üzere Euler açılarının türevleri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Dönüölçerin T zaman aralığında örneklendiğini düşünürsek, yuvarlanma yunuslama ve sapma açıları aşağıdaki gibi tahmin edilebilir.

$$\phi^+ = \phi + T\dot{\phi} \quad (2.8)$$

$$\theta^+ = \theta + T\dot{\theta} \quad (2.9)$$

$$\psi^+ = \psi + T\dot{\psi} \quad (2.10)$$

Yukarıdaki denklemlerde geçen $+$ sembolü yeni açı tahmini ile eski açı tahminini birbirinden ayırmak için kullanılmıştır.

Bu yöntem titreşimden ve dış kuvvetlerden etkilenmeyen açı ölçümü yapmamızı sağlar. Fakat dönüölçerler gürültülü ve mükemmel olmadıklarından her yeni açı ölçümü eklenmesinde tahmin edeceğimiz son açığa hata ölçümü de eklenmiş olacaktır. Zamanla hatalar toplanarak artacak ve açı tahmininde kayma meydana gelecektir. Bu hata sensör verilerinin birleştirilmesi esnasında giderilmeye çalışılacaktır.

2.1.3 Manyetometreden açı belirleme

3 eksen bir manyetometre sensör cisim çerçevesine göre m_x , m_y ve m_z olmak üzere manyetik alan ölçüm değerleri vermektedir. Kuzey, doğu ve aşağı (*ing.*, North, East, Down) olmak üzere m_N , m_E ve m_D şeklinde ifade edilen dünyanın manyetik alan vektörleri ile manyetometreden okunan değerler arasındaki ilişki denklem (2.11)'de gösterilmiştir.

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \psi \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_N \\ m_E \\ m_D \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Gerçek manyetik kuzeyi gösteren sapma açısı ψ gerekli düzenlemeler yapılarak yuvarlanma açısı ϕ ve yunuslama açısı θ cinsinden ifade edilebilir. X eksenini kuzey kutbunu gösterecek şekilde, yerel teğet düzlem üzerinde jeomanyetik vektör çözümü yapılırsa, doğuyu gösteren vektör sıfıra eşit olacaktır. Bu durumda denklem (2.11) aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{pmatrix} m_N \cos \psi \\ m_N \sin \psi \\ m_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & -\cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

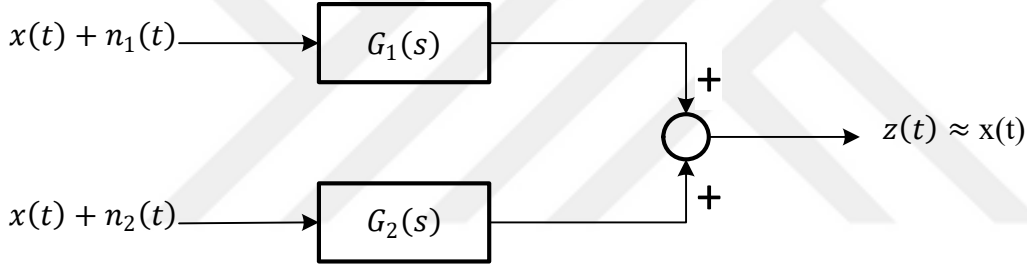
Buradan birinci ve ikinci satırların oranlanması ile denklem (2.13) elde edilir.

$$\psi = -\text{atan2}(Y_h, X_h) \quad (2.13)$$

$X_h = m_N \cos \psi$ ve $Y_h = m_N \sin \psi$ dünyanın yatay manyetik alan vektörlerini ifade etmektedir. Bu denklem ile tüm durumlardaki sapma açısı $0 - 2\pi$ arasında bulunabilir.

2.2 Sensör Verilerinin Tamamlayıcı Filtre ile Birleştirilmesi

Farklı sensörlerin harmanlanıp iyi bir ölçüm elde edilmesi için tamamlayıcı filtre kullanılmalıdır. Buradaki iyi bir ölçümden kasıt, gürültüden arındırılmış doğru değere yakın bir sinyaldir. Bununla birlikte tamamlayıcı filtre, sadece frekans karakteristikleri birbirinin tamamlayıcısı olan sensörler için kullanılabilir. Örneğin sensörlerden biri ölçülecek fiziksel büyüklüğün düşük frekans bileşenlerine duyarlı iken diğer sensör yüksek frekans bileşenlerine duyarlı olmalıdır. Şekil 2.1'de aynı fiziksel büyüklüğün iki farklı sensör tarafından ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Farklı sensör verilerinin toplanması [17].

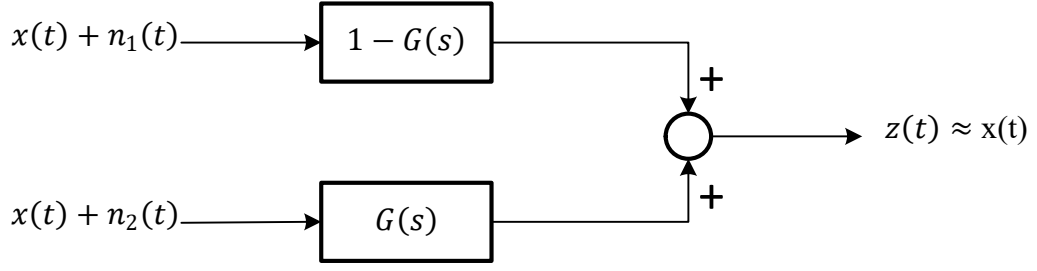
$x(t)$ ilgilenilen fiziksel büyüklüğün gerçek değerini göstermektedir. $n_1(t)$ ve $n_2(t)$ herbir sensörden alınan ölçüme eklenen gürültüyü ifade eder. $G_1(s)$ ve $G_2(s)$ sensörlere uygulanan filtrelerdir. $z(t)$ ise ölçüm sonucunu ifade eder.

Sistemin amacı sensörlere uygun filtreler uygulandıktan sonra sensör verilerinin toplanmasıyla gerçek doğru veriye ulaşmaktır. Tamamlayıcı filtre $G_2(s)$ için aşağıdaki şekilde düzenlenir.

$$G_1(s) = 1 - G(s) \quad (2.14)$$

$$G_2(s) = G(s) \quad (2.15)$$

Burada $G(s)$ alçak geçiren veya yüksek geçiren filtredir. $G_1(s)$ ve $G_2(s)$ 'yi Şekil 2.1'de yerine yazarsak Şekil 2.2'yi elde ederiz.



Şekil 2.2 : Tamamlayıcı filtrenin uygulaması [17].

Şekil 2.2’de gösterilen zaman bölgesindeki bileşenler Laplace dönüşümü ile frekans bölgesine geçirilir ve gerekli işlemler yapılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned}
 Z(s) &= \{1 - G(s)\} * \{X(s) + N_1(s)\} + G(s) * \{X(s) + N_2(s)\} \\
 &= \{1 - G(s)\}X(s) + \{1 - G(s)\}N_1(s) + G(s)X(s) + G(s)N_2(s) \\
 &= X(s) - G(s)X(s) + \{1 - G(s)\}N_1(s) + G(s)X(s) + G(s)N_2(s) \\
 &= X(s) + \{1 - G(s)\}N_1(s) + G(s)N_2(s)
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Denklem (2.16), ölçüm verisi $X(s)$ ’nin herhangi bir değişime uğramadan çıktığını göstermektedir. Uygulanan filtrelerin orijinal sinyal üzerinde bir etkisi yoktur. Aksine filtreler gürültü sinyalleri üzerinde bir değişime neden olur. Uygun tasarlanması durumunda gürültülerin güzel bir şekilde bastırılması sağlanabilir. Tam olarak bunu başarmak mümkün değildir elbet ama orijinal sinyale olabildiğince yaklaşılacaktır.

Yine de gürültü sinyallerini bastıracak özel bir durum ortaya çıkabilir. Örneğin $N_1(s)$ ’nin alçak frekansta, $N_2(s)$ ’nin ise yüksek frekansta bir gürültü kaynağı olduğunu düşünelim. $G(s)$ alçak geçiren filtre olarak tasarlanırsa $G(s)N_2(s)$ çok küçük bir değer olacaktır. Bu durumda $1 - G(s)$ yüksek geçiren filtre olarak $N_1(s)$ gürültüsünü bastıracaktır. Sonunda denklem (2.17)’de görüldüğü gibi gerçek değere yakın bir sonuç elde edilecektir.

$$\begin{aligned}
 Z(s) &= X(s) + \{1 - G(s)\}N_1(s) + G(s)N_2(s) \\
 &\cong X(s)
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Peki ikiden fazla sensör olması durumunda üçüncü ve daha fazla sayıdaki sensör için nasıl bir filtre uygulanacaktır? Tamamlayıcı filtrede temel prensip orijinal sinyali etkilememek adına filtrelerin toplamının 1 olmasıdır. Bu nedenle $G_1(s)$ birinci filtrenin transfer fonksiyonu ve $G_2(s)$ ikinci filtrenin transfer fonksiyonu ise üçüncü filtrenin transfer fonksiyonu $1 - G_1(s) - G_2(s)$ olacaktır.

Özetle tamamlayıcı filtre, bir sinyalin iki veya daha fazla sensör ile ölçülmesini sağlar. Tamamlayıcı filtrenin ölçülen sinyal üzerinde bozucu bir etkisi yoktur. Sadece ölçülen sinyal üzerindeki gürültüleri elimine eder. Ayrıca açık devre bir sistem olmasına rağmen verilerin sapması ile ilgili bir endişeye düşmeye gerek kalmaz.

Yuvarlanma, yunuslama ve sapma açılarını belirlemek için kullanılan ivmeölçer, dönüölçer, ve manyetometre sensörleri de kendi içlerinde birbirlerini tamamlayabilen frekans cevaplarına sahiptirler. Yuvarlanma ve yunuslama hareketi için ivmeölçer ve dönüölçer sensörlerinden faydalanılır. Yunuslama hareketi üzerinden bu sensörlerin çıktıları incelenecek olursa aşağıdaki denklemleri elde ederiz. Aynı hesaplamalar yuvarlanma hareketi için de geçerlidir.

$$\theta_A = \theta_b + e_A \quad (2.18)$$

$$\omega_G = \frac{d}{dt} \theta_b + e_G \quad (2.19)$$

θ_A ivmeölçerden elde edilen yunuslama açısını, ω_G ise dönüölçerden alınan açısal hızı ifade etmektedir. e_A ve e_G sensör hatalarını θ_b ise gerçek yunuslama açısını belirtmektedir. Dönüölçerden yunuslama açısı verisinin (θ_G) elde edilebilmesi için açısal hızın integralinin alınması gerekmektedir.

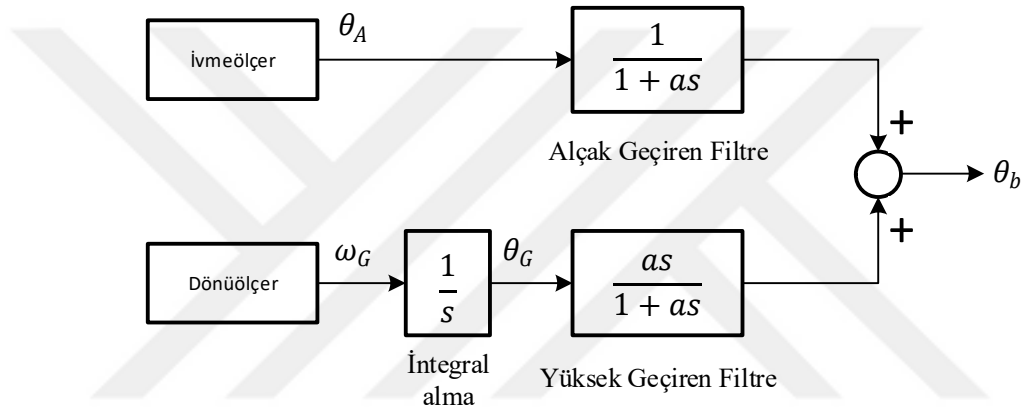
$$\begin{aligned} \theta_G(t) &= \int_0^t \omega_G(\tau) d\tau \\ &= \theta_b(t) + \int_0^t e_G(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.20)$$

Özellikle titreşim durumlarında ve osilasyon hareketleri olduğunda MEMS ivmeölçerler rastgele gürültü hatalarına yatkındırlar. Dönüölçerler için ise integral alma işlemi sırasında rastgele gürültü hataları elimine edilir fakat sistematik hatalar zamanla artış gösterir ve bu durum açısal kayma olarak ortaya çıkar. Denklem (2.20)'de görülen gerçek yunuslama açısına eklenen integral alma işlemi zamanla artan bu açısal kaymayı ifade etmektedir.

Öngörülecek yunuslama hareketinin ve benzer şekilde yuvarlanma hareketinin iyileştirilmesi için “sensör füzyon” da denilen iki sensörden alınan verilerin birleştirilmesi yöntemi kullanılır. Burada tamamlayıcı filtre kullanılarak bu yöntem gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Sensör hataları ve gürültüden dolayı, ivmeölçer ve

dönüölçerden bozunuma uğramış veriler elde edilir. Anlık veriler, tahmin edilen önceki veriler ve gürültü varsayımları göz önünde bulundurularak gerçek sonuca ulaşılmaya çalışılır. Muadil yöntemlere göre daha az işlem yoğunluğu içerdiğinden mikro denetleyiciler üzerinde uygulanması kolaydır.

Dönüölçer hataları düşük frekansta gözlemlenir ve zamanla artış gösterir. Buna karşın ivmeölçer hataları ise yüksek frekansta ortaya çıkar. Bu durumda ivmeölçerden elde edilen veriler frekansın düşük değerlerde olduğu yavaş hareket durumunda, dönüölçerden elde edilen veriler ise frekansın yüksek olduğu hızlı hareket durumunda kullanılabilir. Bunu sağlamanın en basit yolu ise ivmeölçer tahminlerine alçak geçiren filtre, dönüölçer tahminlerine ise yüksek geçiren filtre uygulanmasıdır.

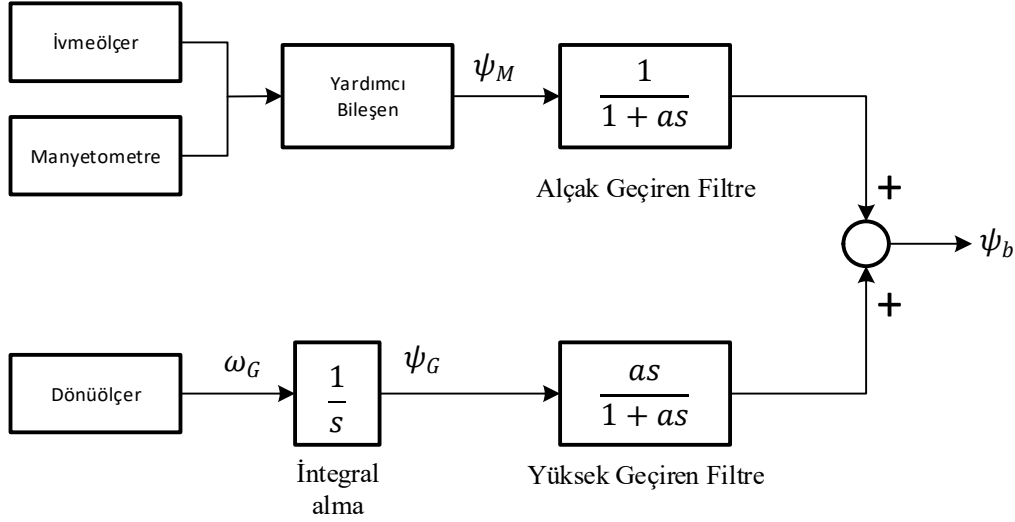


Şekil 2.3 : Yunuslama açısı için tamamlayıcı filtre sensör füzyon uygulaması [18].

$$\theta_b(s) = \left(\frac{1}{1+as}\right)\theta_A(s) + \frac{1}{s}\left(\frac{as}{1+as}\right)\omega_G(s) \quad (2.21)$$

Gerçek yunuslama açısına ulaşabilmek için alçak geçiren ve yüksek geçiren filtrenin kesim frekanslarının aynı olması gerekmektedir. Çünkü frekans bandında bu filtreler birbirlerinin tamamlayıcısıdır. İşte bu yüzden bu uygulama, tamamlayıcı filtre sensör füzyonu olarak isimlendirilmektedir.

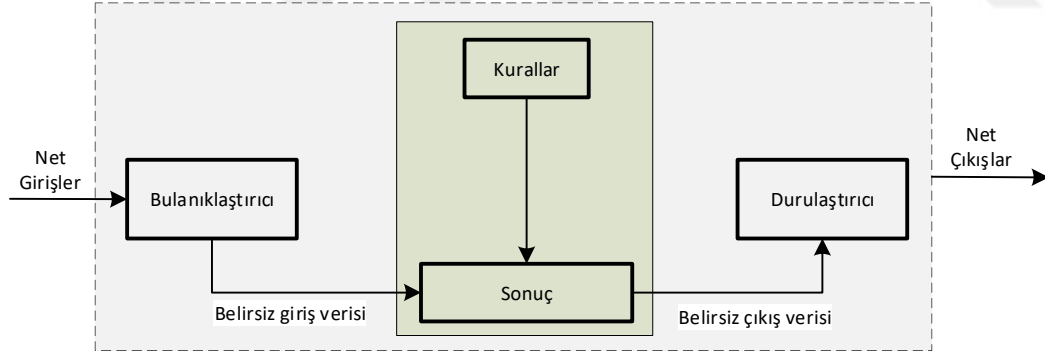
Benzer şekilde sapma açısını hesaplamak için de manyetometre verisi ile ivmeölçer verisi birlikte kullanılarak düşük frekansta sağlıklı bir sapma açısı hesaplanırken, dönüölçerden yüksek frekansta sağlıklı bir sapma açısı hesaplanır. Bu bileşenler yine bir tamamlayıcı filtre ile birleştirilerek gerçek sapma açısına ulaşılabilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Sapma açısı için tamamlayıcı filtre sensör füzyon uygulaması.

2.3 Ayarlanabilir Tamamlayıcı Filtre için Bulanık Mantık Uygulaması

Bulanık Mantık Sistemi, lineer olmayan giriş verilerinden sayısal çıkış verileri üretmek olarak tanımlanabilir [19]. Bir bulanık mantık sistemi, bulanıklaştırma, kurallar, çözüm makinesi ve durulaştırma olmak üzere 4 ana bölümden oluşur. Bu bileşenler Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Bir Bulanık Mantık Sistemi.

İlk olarak net giriş verileri toplanır ve bunlar bulanık mantık değişkenleri, ifadeleri ve komşuluk ilişkileri kullanılarak belirsiz veri kümelerine dönüştürülür. Bu aşama bulanıklaştırma olarak tanımlanır. Ardından bir kurallar bütünü çerçevesinde sonuç elde edilir. Son aşama olarak elde edilen belirsiz sonuçlar, komşuluk ilişkileri ve durulaştırma adımları ile net çıkış verilerine dönüştürülür.

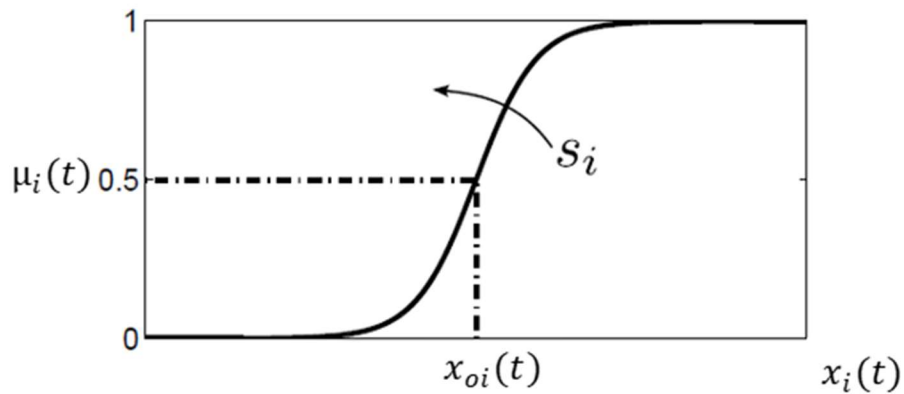
Burada MEMS ivmeölçer, dönüölçer ve manyetometre sensörlerinden alınan veriler, bulanık mantık sisteminin giriş verisi olarak kullanılmıştır. X ve Y eksenleri için 3

eksenden alınan ivmeölçer verileri ve ilgili eksenin dönüölçer verisi, Z eksen için ise yine 3 eksenden alınan manyetometre verileri ile Z ekseninin dönüölçer verisi kullanılmaktadır. X eksen için örnek bulanık mantık giriş verileri $x_i(t)$ aşağıdaki gibidir:

- $x_1(t) = \|\dot{y}_a(t)\| = \sqrt{\dot{y}_{ax}(t)^2 + \dot{y}_{ay}(t)^2 + \dot{y}_{az}(t)^2}$
- $x_2(t) = |y_{gx}(t)|$
- $x_3(t) = |\dot{y}_{gx}(t)|$

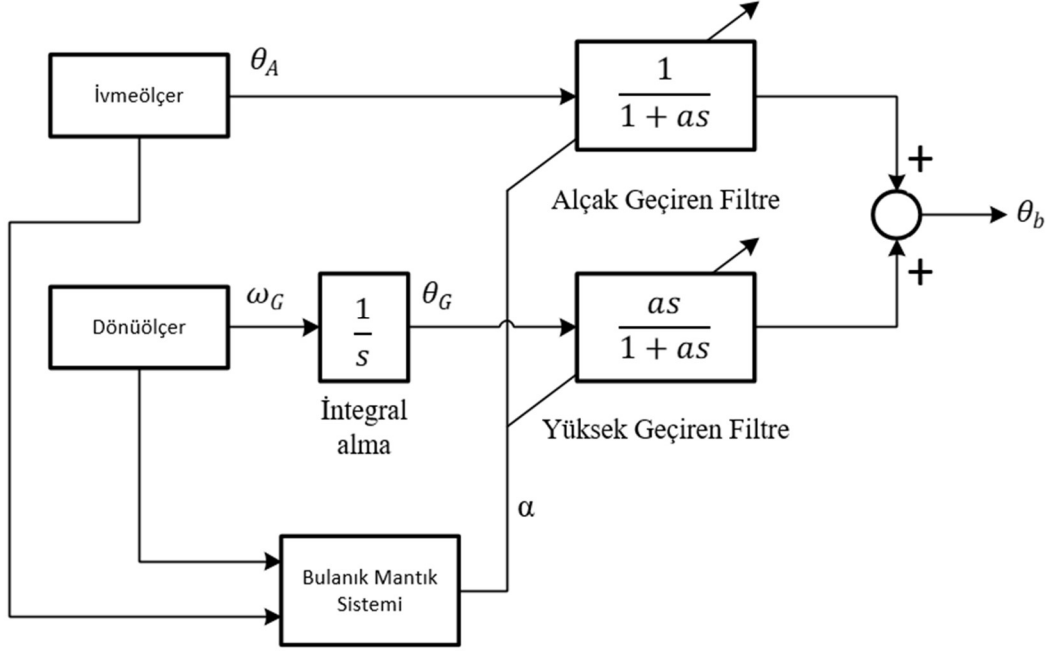
olmak üzere 3 adettir [15]. $x_1(t)$, 3 eksenden alınan ivmeölçer verilerinin türevleri kullanılarak hesaplanan bileşke bir kuvvet değişimini ifade etmektedir. Bu değişimin büyük olması sistemin hızlı, küçük olması ise sistemin yavaş hareket ettiğini göstermektedir. $x_2(t)$, X eksenindeki dönüölçer verisinin mutlak değeridir ve açısız hızın büyüklüğü ile sistem hızı doğru orantılı değişmektedir. $x_3(t)$ ise X eksenindeki dönüölçer verisinin türevinin mutlak değeridir ve elde edilen açısız ivmenin büyüklüğü yine sistem hızı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

Elde edilen bu girişler Şekil 2.6'da gösterilen, bulanık mantık çerçevesinde belirlenen sigmoidal komşuluk ilişkisi fonksiyonun göre 0 ile 1 arasında normalize edilip $\mu_i(t)$ değerlerine dönüştürülerek denklem (2.22)'ye göre işleme sokulup bir çıkış verisi elde edilir. Alınan çıkış verisi bir katsayıdır ($\alpha(t)$). Bu katsayı tamamlayıcı filtrenin kesim frekansını değiştirmek için kullanılır. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi sistemin durgun ve hareketli oluşuna göre farklı değerler alan bu katsayı, alçak ve yüksek geçiren filtrelerin sistem üzerindeki ağırlıklarını değiştirerek elde edilmek istenen açı bilgisinin doğruluğunu arttırabilecektir.



Şekil 2.6 : Sigmoidal komşuluk ilişkisi fonksiyonu [16].

$$\alpha(t) = \prod_{i=1}^3 (1 - \mu_i(t)) \quad (2.22)$$



Şekil 2.7 : Yunuslama açısı için bulanık mantık kullanılmış tamamlayıcı filtre sensör füzyon uygulaması.

Sugeno bulanık mantık sistemine göre işleme alınan bu giriş değerleri ve bunlara karşılık gelen çıkış değerleri için tanımlanan kurallar Çizelge 2.1’de görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Bulanık mantık kuralları.

Şart	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$x_3(t)$	$\alpha(t)$
Sistem durgun	küçük	küçük	küçük	1
Sistem hareketli	büyük	-	-	0
Sistem hareketli	-	büyük	-	0
Sistem hareketli	-	-	büyük	0

Bu kurallar çerçevesinde $x_1(t)$, $x_2(t)$ ve $x_3(t)$ giriş değerlerine göre elde edilecek $\alpha(t)$ değerleri 0 ile 1 arasında değişecektir. Denklem (2.23)’de gösterildiği gibi bu çıkış değeri, daha önceden sistem hareketleri incelenerek belirlenen frekans aralıkları

ile çarpılarak, tamamlayıcı filtrenin kesim frekansı ayarlanmış olur. Bu sayede sensör karakteristikleri gereği sistem hızlı hareket ederken dönüölçere daha fazla güvenilmiş, sistem yavaş hareket ederken ivmeölçere ve benzer şekilde manyetometreye daha fazla güvenilmiş olur.

$$f_c = \alpha(t)f_h + (1 - \alpha(t))f_l \quad (2.23)$$

Burada f_c kesim frekansını, f_l düşük frekans seviyesini ve f_h ise yüksek frekans seviyesini göstermektedir [15]. Elde edilen kesim frekansı Şekil 2.7’de gösterilen a katsayısını belirlemek için kullanılır. a katsayısı denklem (2.24)’de ifade edilmiştir.

$$a = 1/(2\pi f_c) \quad (2.24)$$



3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE ÇIKTILARI

3.1 Kullanılan Platform ve Algoritma

Bu tezde InvenSense firmasının MPU-9250 parça numaralı çoklu çip modülü kullanılmıştır. Bu modül 3 eksen ivmeölçer, 3 eksen dönüölçer ve 3 eksen manyetometre sensörlerinden oluşmaktadır. Çizelge 3.1’de modülün özellikleri sıralanmıştır.

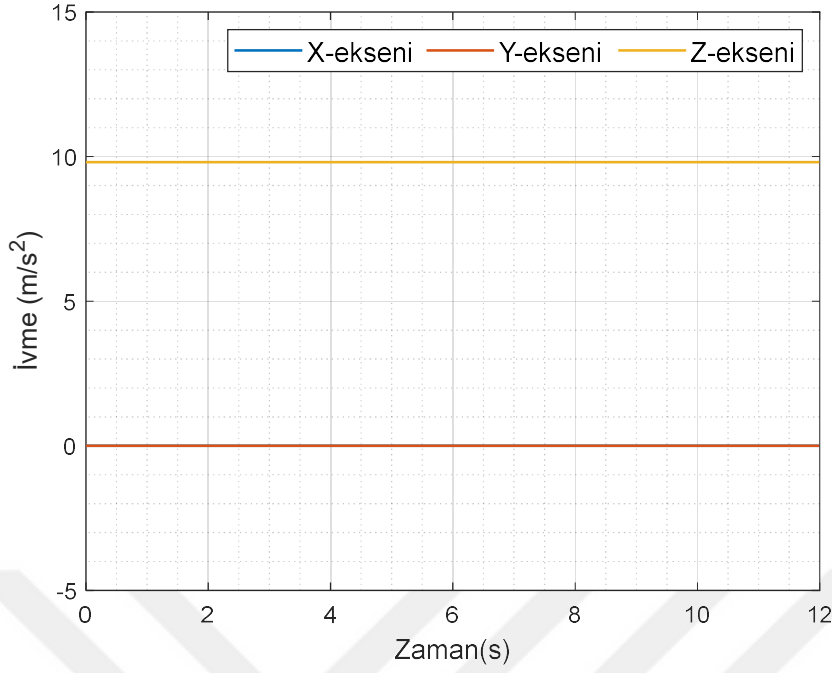
Çizelge 3.1 : MPU-9250 teknik özellikleri.

Özellikler	Dönüölçer	İvmeölçer	Manyetometre
Ölçüm aralığı	± 2 ila ± 16 g	± 250 ila ± 2000 d/s	± 4800 μ T
Hassasiyet	131 ila 16,4 LSB/d/s	16384 ila 2048 LSB/g	0,6 μ T/LSB

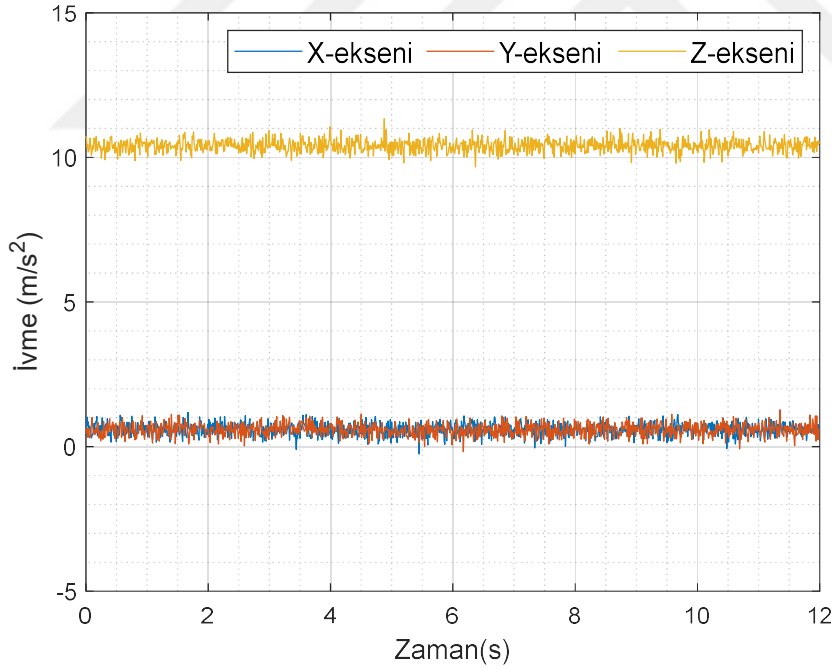
MPU9250 sensörü, karakteristik özellikleri kullanılarak MATLAB ve Simulink ortamında modellenmiştir. Bunun için MATLAB ortamındaki “Sensor Fusion and Tracking Toolbox” kullanılarak ideal ve gürültülü sensör modelleri oluşturulmuştur. Oryantasyon hareketinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için bir referans hareket belirlenmiştir. Daha sonra oluşturulan bu hareket ideal sensör modeline ve MPU9250 sensör modeline uygulanmıştır. Elde edilen sensör çıkış verileri kendi içlerindeki dönüölçer, ivmeölçer ve manyetometrenin avantajlı tarafları kullanılarak birleştirilmiştir. Bu birleştirme işlemi tamamlayıcı filtre kullanılarak sağlanmıştır. Elde edilen sonuçları iyileştirmek adına bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtre uygulanmıştır. Bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtrenin amacı ise sabit kesim frekansına sahip tamamlayıcı filtrenin kesim frekansı değerini dinamik hale getirmektir.

3.2 Durgun Halde Sensör Modellerinden Alınan Veriler

İdeal ve MPU9250 sensörlerinden durgun durumda iken alınan ivmeölçer, dönüölçer ve manyetometre verileri Şekil 3.1 ila Şekil 3.6 arasında gösterilmiştir.

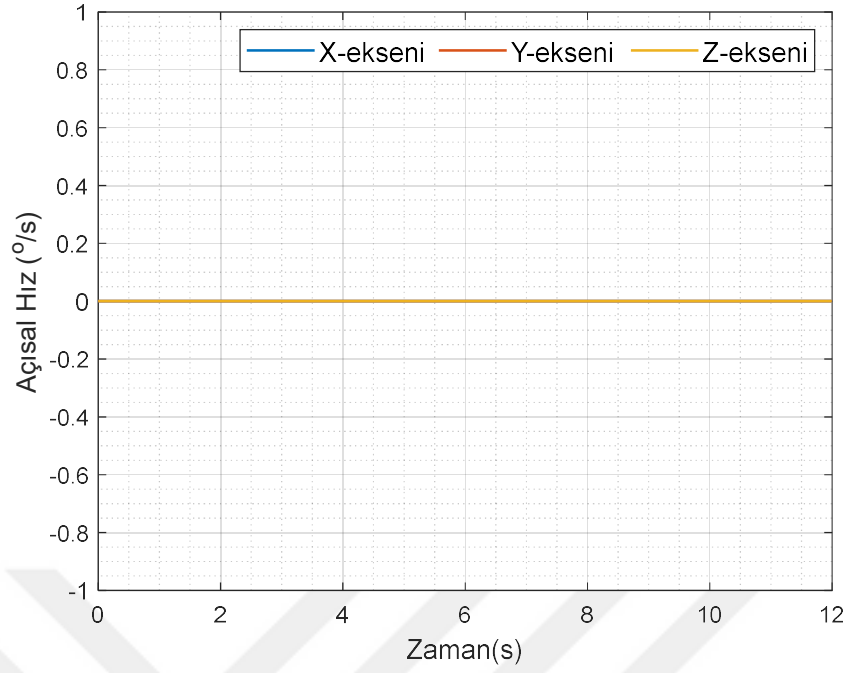


Şekil 3.1 : Durgun haldeki ideal sensör ivmeölçer verisi

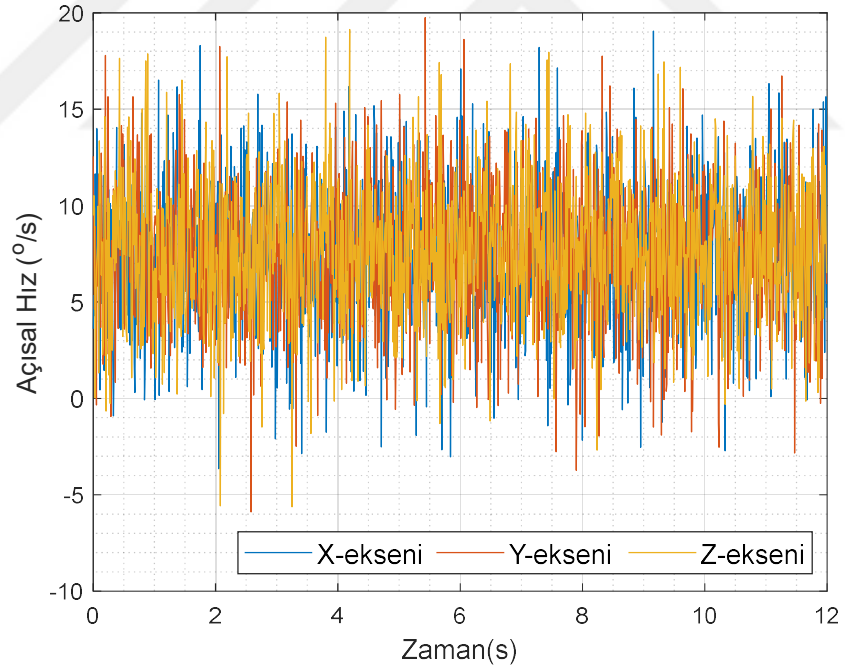


Şekil 3.2 : Durgun haldeki MPU9250 sensörü ivmeölçer verisi

Şekil 3.1’de ideal sensörde X ve Y eksenleri için sıfır olarak ölçülen ivme değeri, Şekil 3.2’de MPU9250 sensörünün karakteristiği gereği bir sapma değeri eklenmiş olarak görülmektedir. Aynı etki Z eksenleri için de geçerlidir. İdeal sensörde $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak ölçülen değer, MPU9250 sensöründe $10,4 \text{ m/s}^2$ olarak ölçülmektedir.

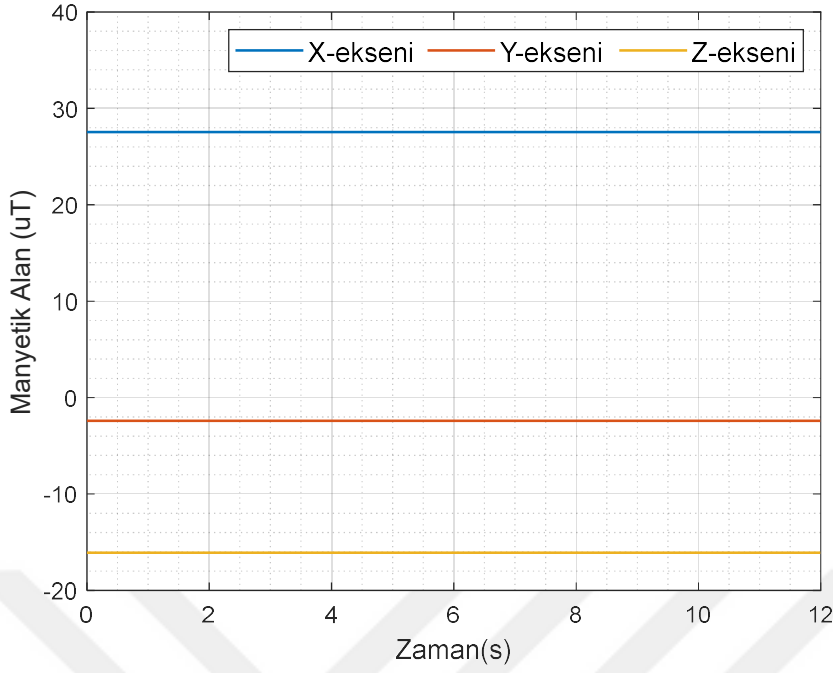


Şekil 3.3 : Durgun haldeki ideal sensör dönüölçer verisi

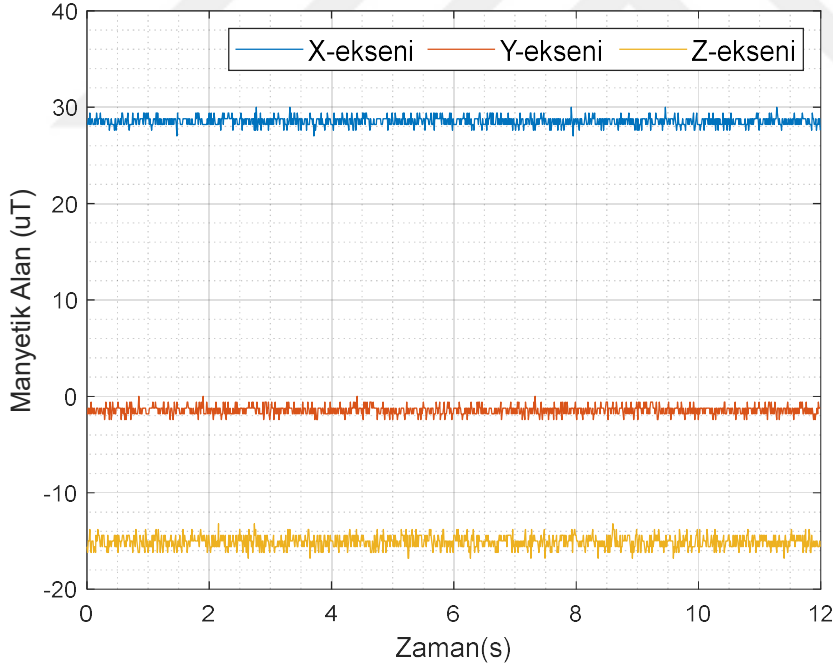


Şekil 3.4 : Durgun haldeki MPU9250 sensörü dönüölçer verisi

Şekil 3.3’de ideal sensörde X, Y ve Z eksenleri için 0 °/s olarak ölçülen açısal hız, Şekil 3.4’de MPU9250 sensörü için gürültülü ve ortalama 7,5 °/s olarak ölçülmüştür. Yine MPU9250 sensörünün karakteristiğinden kaynaklanan gürültü değerleri buna sebep olmaktadır.



Şekil 3.5 : Durgun haldeki ideal sensör manyetometre verisi

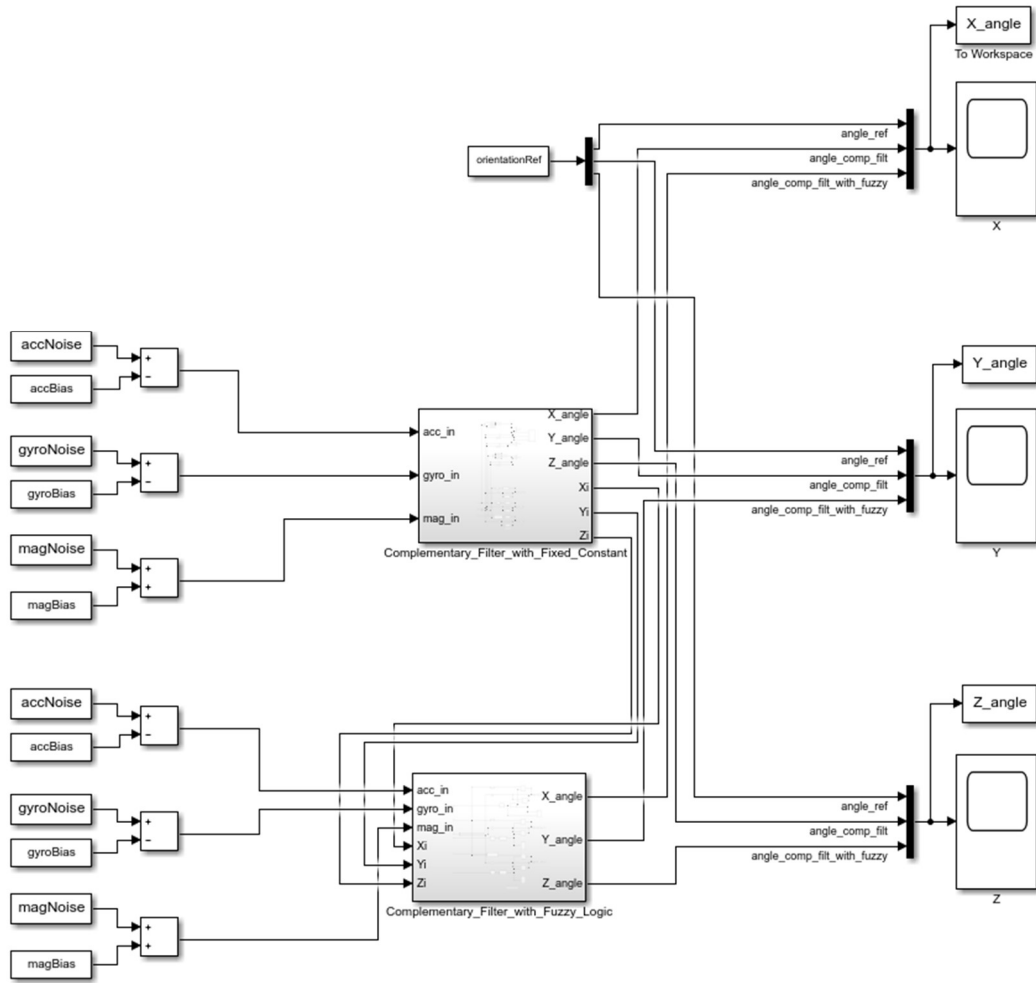


Şekil 3.6 : Durgun haldeki MPU9250 sensörü manyetometre verisi

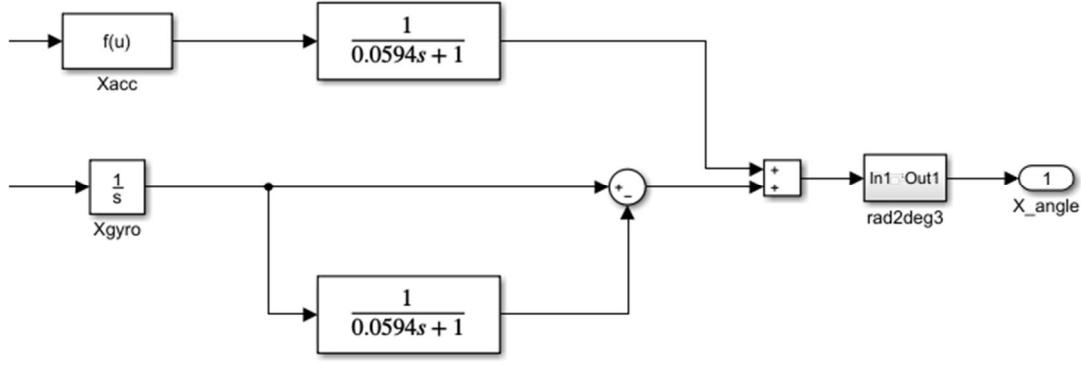
Şekil 3.5’de dünyanın manyetik alanından dolayı ideal sensör için X, Y ve Z eksenlerinde belirli değerlerde, düzgün manyetik alan değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir. Şekil 3.6’da ise bu manyetik alan değerlerinin yine MPU9250 sensörünün karakteristiğinden dolayı gürültülü olarak ölçüldüğü görülmektedir.

3.3 Benzetim Ortamı

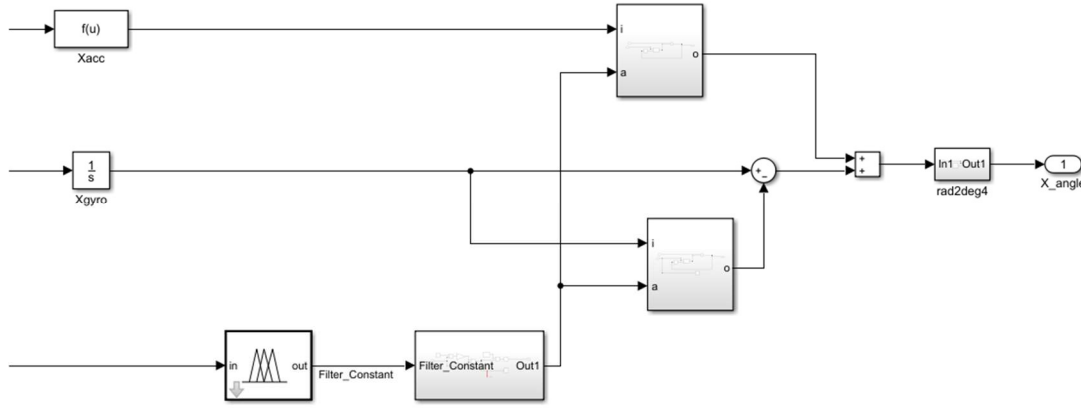
Şekil 3.7’de sensör verilerinin kullanıldığı benzetim ortamı gösterilmektedir. Şekil 3.8’de sabit kesim frekansına sahip tamamlayıcı filtre bloğu, Şekil 3.9’da ise dönüölçerin hareketine göre hesaplanan değişken kesim frekansına sahip bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtre bloğu görülmektedir. Bu benzetim ortamında MPU9250 sensörüne ait veriler (benzetim ortamında gürültülü veriler ‘Noise’ son ekiyle belirtilmiştir) sırasıyla sabit kesim frekansına sahip tamamlayıcı filtreye ve bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtreye sokularak gürültülü bir açı verisi elde edilmiş ve giriş verileriyle kıyaslanmıştır.



Şekil 3.7 : İdeal ve MPU9250 sensör verilerinin işlendiği Simulink ortamı



Şekil 3.8 : Sabit kesim frekansına sahip tamamlayıcı filtre bloğu

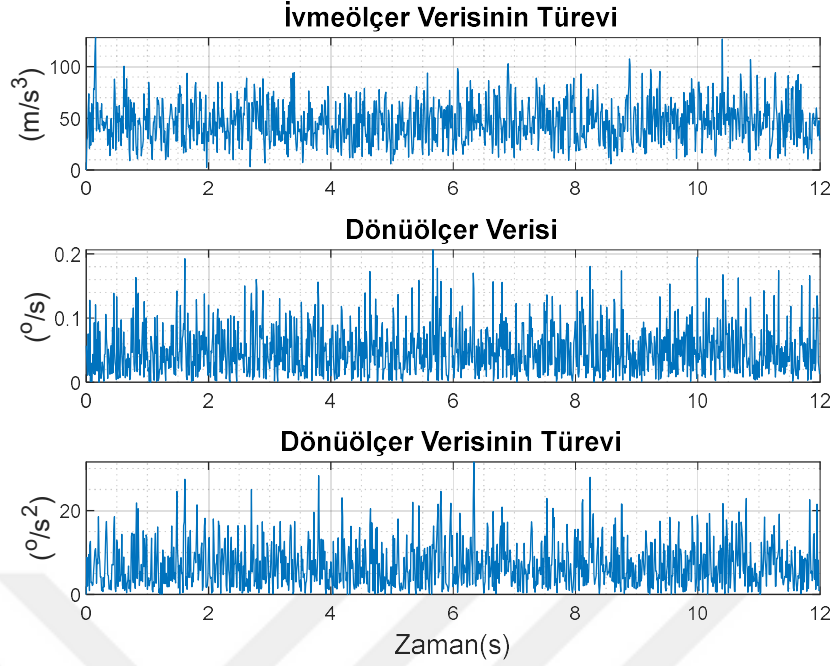


Şekil 3.9 : Değişken kesim frekansına sahip bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtre bloğu

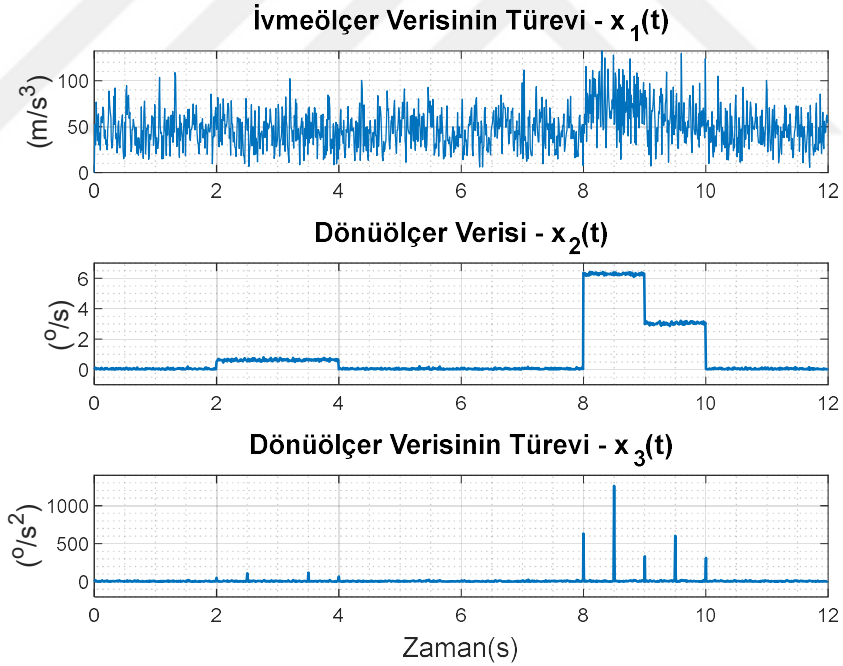
3.4 Benzetim Parametrelerini Belirleme

3.4.1 Bulanık mantık girişlerini belirleme

Bulanık mantık girişlerini belirlemek için MPU9250 sensör modeline uygulanacak en düşük ve en yüksek açısal hızlar belirlenmiştir. En düşük açısal hız 0 %/s, en yüksek açısal hız ise 360 %/s seçilmiştir. Bu giriş verilerine göre Şekil 2.6’da gösterilen $x_i(t)$ ve $\mu_i(t)$ için sınır değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.10’da ve Şekil 3.11’de sırasıyla 0 %/s ve 360 %/s için elde edilen $x_i(t)$ değerleri gösterilmektedir.



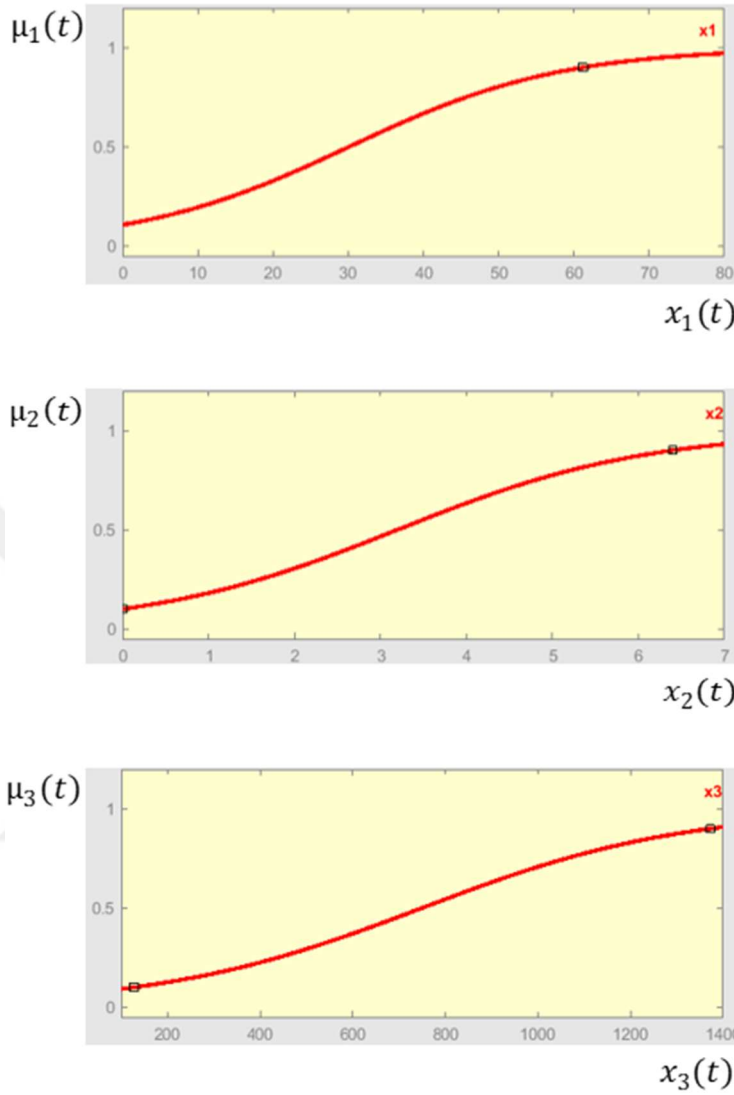
Şekil 3.10 : 0 °/s açısal hız uygulandığında elde edilen $x_i(t)$ değerleri.



Şekil 3.11 : 360 °/s açısal hız uygulandığında elde edilen $x_i(t)$ değerleri.

Elde edilen sonuçlara göre $x_1(t)$ için 0 – 80, $x_2(t)$ için 0 – 7 ve $x_3(t)$ için ise 0 – 1400 sınır değerleri belirlenmiştir. Şekil 2.6’da gösterilen sigmoidal komşuluk ilişkisi fonksiyonuna göre de 0 ila 1 arasında normalize edilerek uygun bulanık mantık

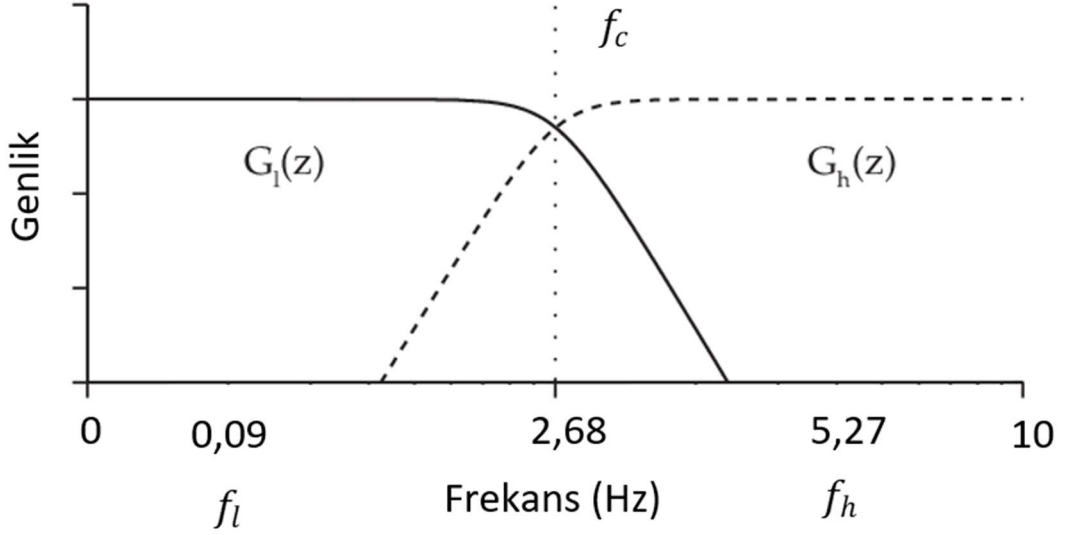
girişlerine dönüştürülmüştür. Şekil 3.12’de bulanık mantık girişleri için kullanılan komşuluk ilişkisi fonksiyonları gösterilmektedir.



Şekil 3.12 : Bulanık mantık girişleri için uygulanan komşuluk ilişkisi fonksiyonları.

3.4.2 Çalışılacak kesim frekansı aralığını belirleme

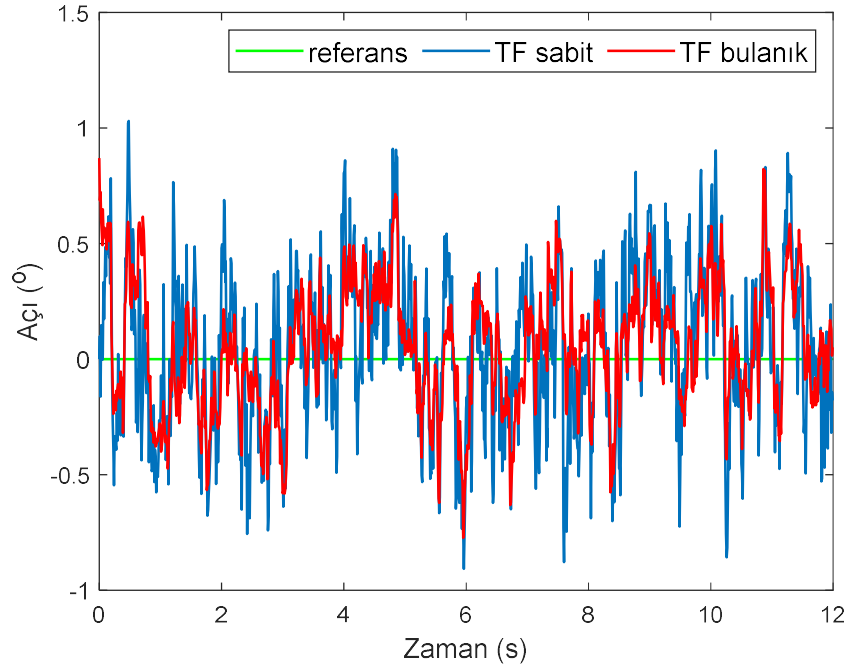
Çalışılacak kesim frekansı aralığı belirlenirken de yine uygulanan en düşük ve en yüksek açısal hızlar dikkate alınmıştır. Farklı sınır değerler denenerek en uygun olan frekanslar seçilmiştir. Sonuç olarak değişken kesim frekansına sahip bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtre için alt frekans sınırı $f_l = 0,09$ Hz ve üst frekans sınırı ise $f_h = 5,27$ Hz olarak belirlenmiştir (Şekil 3.13). Bulanık mantık girişlerine göre f_c kesim frekansı bu değerler arasında değişecektir. Sabit katsayılı tamamlayıcı filtre için ise kesim frekansı sınır değerlerin ortası olan $f_c = 2,68$ Hz seçilmiştir.



Şekil 3.13 : Değişken katsayılı filtre için belirlenen frekans sınırları.

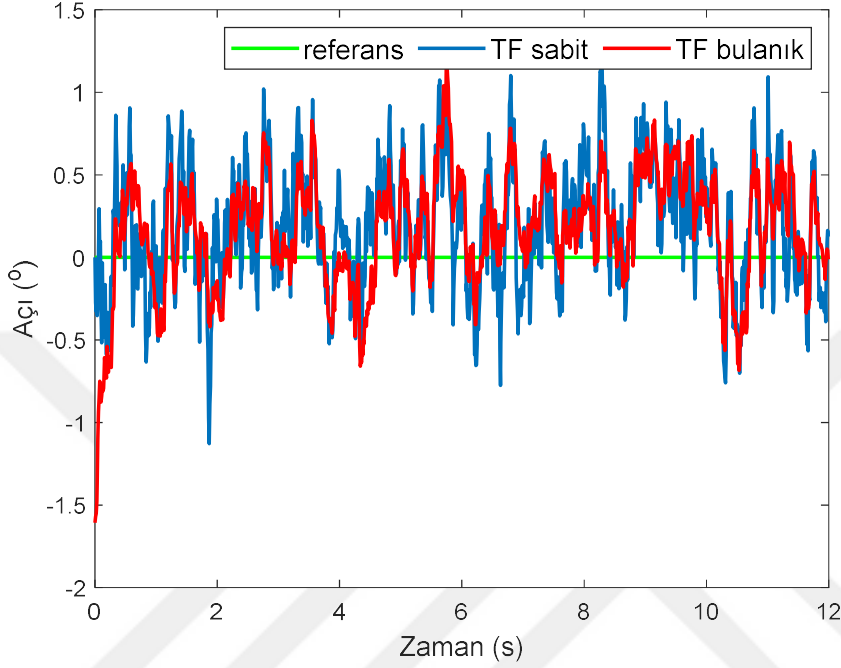
3.5 Benzetim Çıktıları

İlk olarak durgun haldeyken, referans hareket ile MPU9250 sensör modelinin sabit katsayılı ve bulanık mantık sayesinde değişken katsayılı filtre çıktıları kıyaslanmıştır. Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'de sırasıyla X, Y ve Z eksenleri için durgun pozisyondaki sensör verileri görülmektedir.



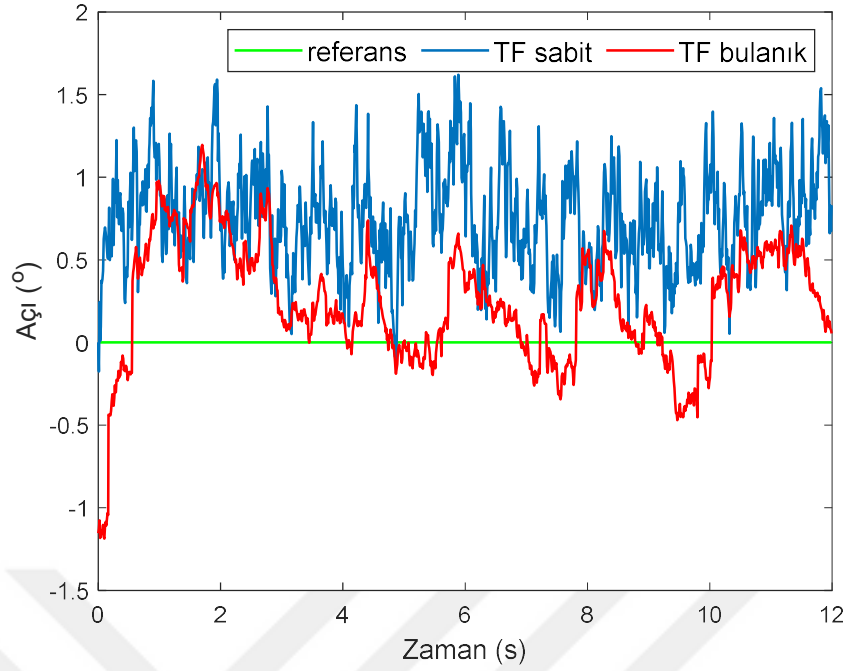
Şekil 3.14 : Durgun durumda X eksenini için karşılaştırılan sensör verileri.

X eksenini için sabit katsayılı filtre çıkışının ortalaması alındığında 0,0440 bulunurken, değişken katsayılı filtre çıkışının ortalaması 0,0525 olarak bulunmuştur. X eksenini için değişken katsayılı filtre çıkışının, sabit katsayılı filtre çıkışına göre referans değerden daha fazla kaydığı görülmüştür.



Şekil 3.15 : Durgun durumda Y eksenini için karşılaştırılan sensör verileri.

Y eksenini için sabit katsayılı filtre çıkışının ortalaması alındığında 0,1834 bulunurken, değişken katsayılı filtre çıkışının ortalaması 0,1663 olarak bulunmuştur. Y eksenini için sabit katsayılı filtre çıkışının, değişken katsayılı filtre çıkışına göre referans değerden daha fazla kaydığı görülmüştür.

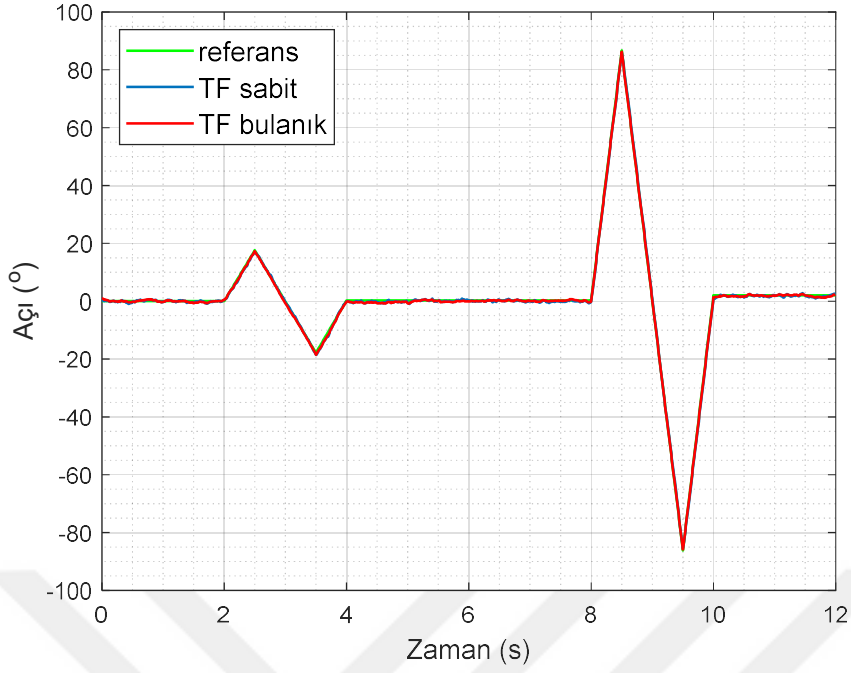


Şekil 3.16 : Durgun durumda Z eksenini için karşılaştırılan sensör verileri.

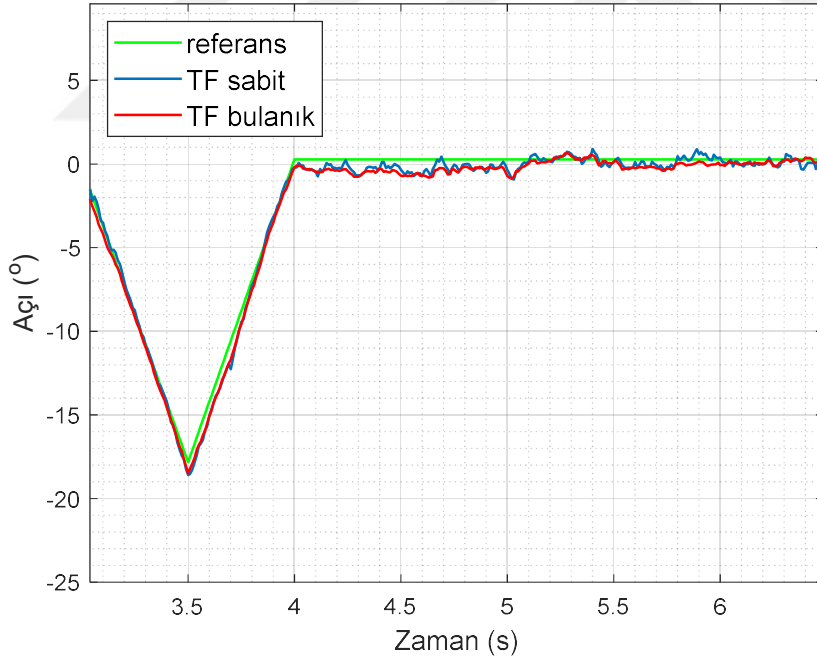
Z eksenini için sabit katsayılı filtre çıkışının ortalaması alındığında 0,7560 bulunurken, değişken katsayılı filtre çıkışının ortalaması 0,2437 olarak bulunmuştur. Z eksenini için sabit katsayılı filtre çıkışının, değişken katsayılı filtre çıkışına göre referans değerden daha fazla kaydığı görülmüştür.

İkinci olarak eksenlere belli açısal hareketler verilerek sensör çıktıları gözlenmiştir. 3 eksen içinde aynı açısal hareketler belirlenmiştir. Eksenlere ilk 2 saniye 0 %s açısal hız verilerek, MPU9250 sensörünün çıkışında her bir eksen için görülen sapma verileri sıfırlanmak istenmiştir. Alınan sonuçların hata payı denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Ölçülen sinyal ile referans sinyal arasındaki fark ile referans sinyalin güçleri kıyaslanarak bir hata oranı çıkarılmaya çalışılmıştır. Bunun için ilgili sinyallerin karelerinin toplamının ortalamasının karekökü alınmıştır (*İng.* root mean square).

$$hata\ oranı = \frac{rms(X_{referans} - X_{ölçülen})}{rms(X_{referans})} * 100 \quad (3.1)$$



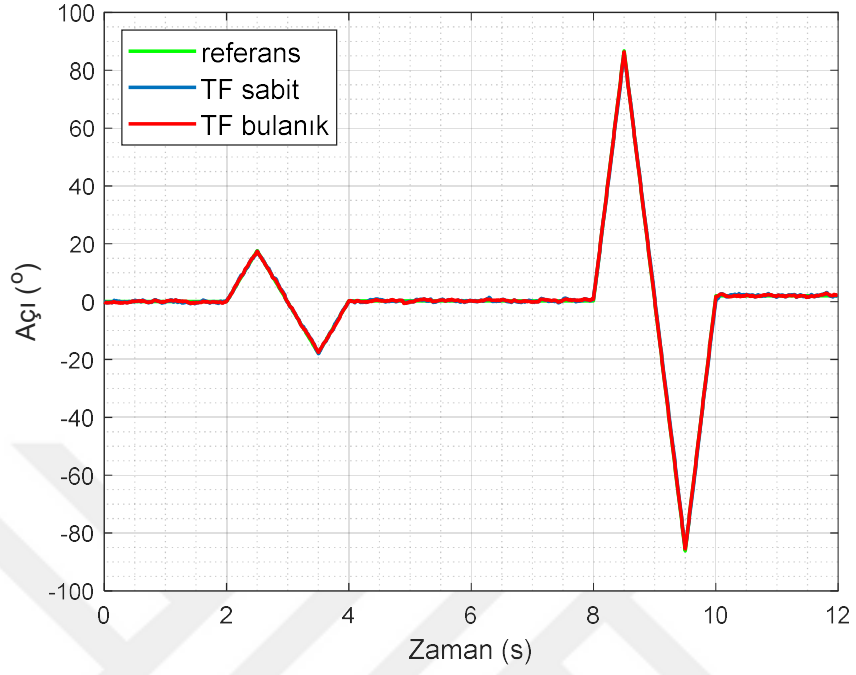
Şekil 3.17 : X eksenine uygulanan açısal hareket.



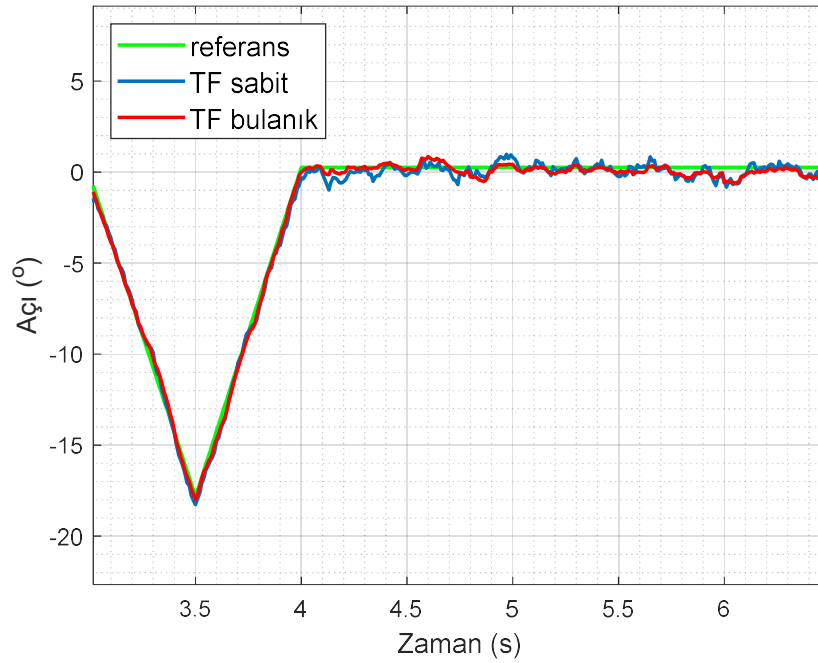
Şekil 3.18 : Şekil 3.17'den bir kesit.

Şekil 3.17'de X eksenine açısal hız uygulandıktan sonra alınan sonuçlar görülmektedir. Şekil 3.18'de ise bu sonuçtan bir kesit alınarak büyütülmüştür. Bu ölçümden alınan hata oranı sabit kesim frekansına sahip tamamlayıcı filtre için

%1,4839 iken, bulanık mantık tabanlı değişken kesim frekansına sahip filtre için ise %1,4293'dür.



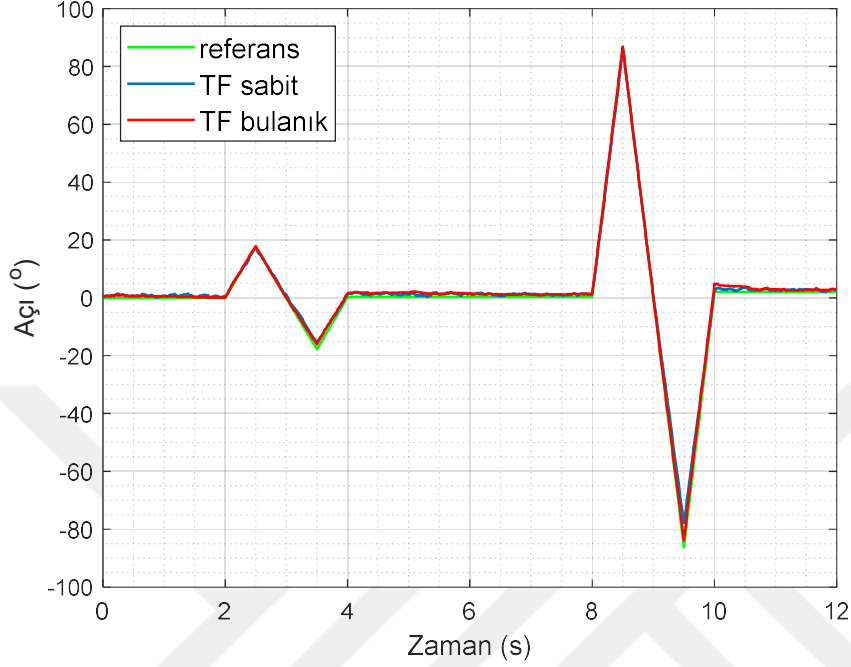
Şekil 3.19 : Y eksenine uygulanan açısal hareket.



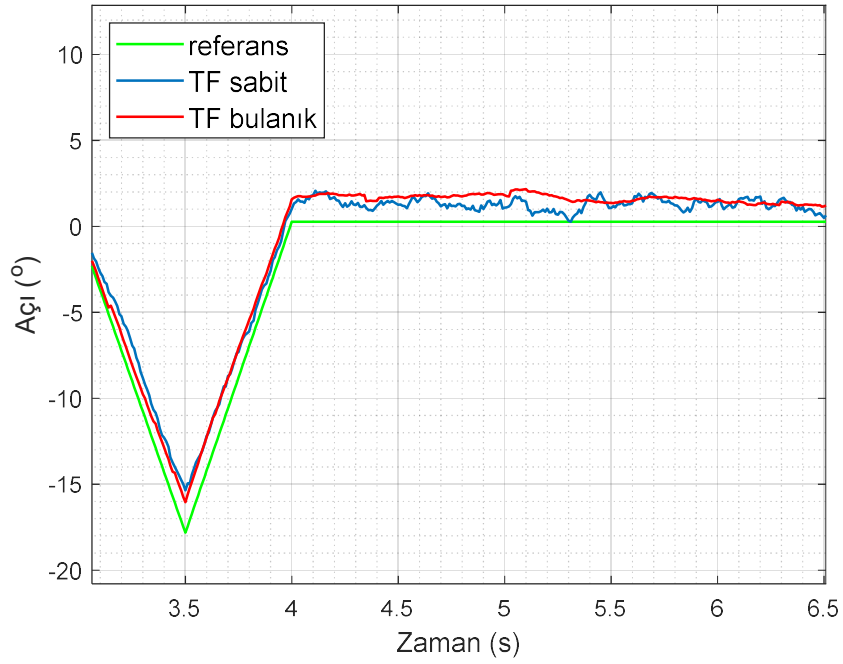
Şekil 3.20 : Şekil 3.19'den bir kesit.

Şekil 3.19'de Y eksenine açısal hız uygulandıktan sonra alınan sonuçlar görülmektedir. Şekil 3.20'da ise bu sonuçtan bir kesit alınarak büyütülmüştür. Bu

ölçümden alınan hata oranı sabit kesim frekansına sahip tamamlayıcı filtre için %2,5813 iken, bulanık mantık tabanlı değişken kesim frekansına sahip filtre için ise %1,7714'dür.



Şekil 3.21 : Z eksenine uygulanan açısal hareket.



Şekil 3.22 : Şekil 3.21'den bir kesit.

Şekil 3.21’de Z eksenine açısal hız uygulandıktan sonra alınan sonuçlar görülmektedir. Şekil 3.22’de ise bu sonuçtan bir kesit alınarak büyütülmüştür. Bu ölçümden alınan hata oranı sabit kesim frekansına sahip tamamlayıcı filtre için %8,1343 iken bulanık mantık tabanlı değişken kesim frekansına sahip filtre için ise %4,8371’dir.





4. SONUÇ

Bu çalışmada InvenSense firmasının MPU9250 parça numaralı AÖB sensör modeli kullanılarak MATLAB ve Simulink ortamında farklı yönelim değerleri için benzetim yapılmıştır. X ve Y eksenlerinde açı hesaplamaları için ivmeölçer ve dönüölçerden, Z eksenindeki açı hesaplamaları için ise ivmeölçer, dönüölçer ve manyetometreden faydalanılmıştır. Tasarlanan bulanık mantık tabanlı ayarlanabilir katsayılı tamamlayıcı filtrenin performans analizi yapılmıştır. Her bir eksen için farklı sonuçlar elde edilmiştir. Sensör durgun haldeyken tasarlanan filtre sabit katsayılı filtreye göre X ve Y ekseninde çok fazla bir iyileşme sağlayamamış fakat daha az gürültülü bir çıkış vermiştir. Z ekseninde ise hem ortalama hem de gürültü bakımından daha iyi sonuç vermiştir.

Sensör hareketli haldeyken X eksenine ait yuvarlanma hareketi için %39,89 oranında, Y eksenine ait yunuslama hareketi için %31,37 oranında ve Z eksenine ait sapma hareketi için %40,53 oranında bir iyileşme sağlamıştır.

İleriki çalışmalarda her bir eksen için kalibrasyon hesaplamaları iyileştirilerek daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtrenin performansını arttırmak adına mevcut girişler dışında başka değişkenlere de bakılması ve bu değişkenlerin daha ayrıntılı analiz edilmesiyle hareketin daha iyi tanımlanması filtre çıkışının ideale daha fazla yaklaşmasını sağlayacaktır. Mesela, sensör çıkışlarının FFT'si alınarak görülen frekans bandına göre de bulanık mantık tabanlı tamamlayıcı filtrenin kesim frekansı değiştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<https://www.vectornav.com/support/library/imu-and-ins>>, erişim tarihi 27.04.2019.
- [2] **Titterton, D. H., & Weston, J. L.** (2004). Strapdown Inertial Navigation Technology (2nd ed., pp. 10, 117, 193). The Institution of Electrical Engineers.
- [3] **Noureldin, A., Karamat, T. B., & Georgy, J.** (2013). Fundamentals of Inertial Navigation Satellite-based Positioning and their Integration (pp. 126-129, 131). Springer.
- [4] **Günhan, Y.** (2014). Ataletsel Ölçüm Birimi Hatalarının Belirlenmesi ve Düzeltilmesi (Yüksek Lisans tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [5] **Aydeniz, D.** (2011). MEMS İvme Sensörlü Ataletsel Seyrüsefer Sistemi İçin Arayüz Tasarımı (Yüksek Lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Groves P. D.** (2013). Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems (2nd ed., pp. 151-157). Artech House.
- [7] **Flenniken, W., Wall, J., & Bevly, D.M.** (2005). Characterization of Various IMU Error Sources and Effect on Navigation Performance, Proceedings of ION GNSS.
- [8] **Yang, W., Bajenov, A., & Shen, Y.** (2017). Improving low-cost inertial-measurement-unit (IMU)-based motion tracking accuracy for a biomorphic hyper-redundant snake robot, Robotics and Biomimetics.
- [9] **Tian, Y., Wei, H., & Tan, J.** (2013). An Adaptive-Gain Complementary Filter for Real-Time Human Motion Tracking With MARG Sensors in Free-Living Environments (Vol: 21, I: 2, pp. 254-264). IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering.
- [10] **Wu, J., Zhou, Z., Chen, J., Fourati, H., & Li, R.** (2016). Fast Complementary Filter for Attitude Estimation Using Low-Cost MARG Sensors (Vol 16, Is 18, pp. 6997-7007). IEEE Sensors Journal.
- [11] **Guan, Y., & Song, X.** (2018). Sensor Fusion of Gyroscope and Accelerometer for Low-Cost Attitude Determination System. Chinese Automation Congress (CAC).
- [12] **Yoo, T. S., Hong, S. K., Yoon, H.M., & Park, S.** (2011). Gain-Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System (pp. 3816-3830). Sensors.
- [13] **Duong, D. Q., Sun, J., Nguyen, T. P., & Luo, L.** (2016). Attitude estimation by using MEMS IMU with Fuzzy Tuned Complementary Filter. IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT).
- [14] **Widodo, R. B., Edayoshi, H., & Wada, C.** (2014). Complementary Filter for Orientation Estimation: Adaptive gain based on dynamic acceleration and its change. Joint 7th International Conference on Soft Computing

and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)

- [15] **Chang-Siu, E., Tomizuka, M., & Kng, K.** (2011). Time-Varying Complementary Filtering for Attitude Estimation. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems
- [16] **Wang, Y., Chang-Siu, E., Brown, M., Tomizuka, M., Almajed, M., & Alsuwaidanan, B.** (2012). Three Dimensional Attitude Estimation Via the TRIAD Algorithm and a Time-Varying Complementary Filter. ASME
- [17] **Kim, P., & Huh, L.** (2011). Kalman Filter for Beginners with MATLAB Examples (pp. 207-210).
- [18] **Url-2** <<https://fkeng.blogspot.com/2018/05/digital-implementation-of-complementary.html>>, erişim tarihi 15.09.2019.
- [19] **Mendel, J. M.** (1995). Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial (Vol: 83, No: 3, pp. 345-377). Proceedings of the IEEE.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet Emin OKUDAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 21.11.1987, Eminönü / İstanbul
E-posta : eminokudan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013-2017 yılları arasında TÜBİTAK SAGE'de çalıştı.
- 2017 yılından beri TÜBİTAK BİLGEM'de çalışmaktadır.