KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SUALTI SİSTEMLERİ İÇİN GÖMÜLÜ ELEKTRONİK CİROSKOP PUSULA

BAYRAM GÜRKAN BAYRAMCIK

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SUALTI SİSTEMLERİ İÇİN GÖMÜLÜ ELEKTRONİK CİROSKOP PUSULA

BAYRAM GÜRKAN BAYRAMCIK

Doç.Dr. Oğuzhan URHAN
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Doç.Dr. Ahmet ÖZMEN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Anıl ÇELEBİ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.03.2014

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tezde yönsel akustik sensörler ve ince dizinlerde kullanılmak üzere sensörlerin yön ile yatay ve dikey düzleme olan açıları ölçebilen bir ciroskop pusula donanımın tasarlanması ile ilgili çalışmamın bu konuda benden sonra çalışacak diğer insanlara faydalı olmasını temenni ederim.

Öncelikle tez konumun belirlenmesinde ve böylesine önemli bir projede bana yer verdiği için Doç. Dr. Oğuzhan URHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Başta Dr. Tuncay AKAL olmak üzere Yard. Doç. Dr. Selçuk KİZİR'a, SAN-TEZ programı kapsamında "Sualtı Sistemleri İçin Elektronik Ciroskop-Pusula" proje adı ve "00696.STZ.2010-2" proje kodu altında destekleyen Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na ve Sualtı Sistemleri Teknoloji Geliştirme Sanayi Tic. Ltd. Şirketine teşekkür ederim. Ayrıca her adımımda arkamda olan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mart 2014 Bayram Gürkan BAYRAMCIK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ iv
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
GİRİŞ 1
1. ATALETSEL YÖNELİM KESTİRİM SİSTEMLERİ 3
1.1. Ciroskop Pusulalarda Kullanılan Veri Kaynaştırma Yöntemleri 5
1.1.1. Kalman filtresi 7
1.1.2. Mahony filtresi 9
1.1.3. Madgwick filtresi 10
2. GÖMÜLÜ SİSTEM TASARIMI 18
2.1. Donanım Gerçeklemesi 18
2.1.1. Sensör birimi 19
2.1.1.1. 3-Eksen ciroskop sensör 19
2.1.1.2. 3-Eksen manyetik sensör 21
2.1.1.3. 3-Eksen ivme sensörü 22
2.1.2. Mikrodenetleyici birimi 23
2.1.3. CAN iletişim birimi 23
2.1.4. Güç birimi 24
2.1.5. PCB tasarımı 24
2.2. Yazılım Gerçeklemesi 25
3. DENEYSEL SONUÇLAR 28
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 33
KAYNAKLAR 34
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 37
ÖZGEÇMİŞ 38

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Robert Bosch Vibrasyon Diski 3
Şekil 1.2. AMR model 4
Şekil 1.3. Mahony filtresi blok diyagramı.....10
Şekil 1.4. Madgwick filtresi ara blok diyagramı 15
Şekil 1.5. Madgwick filtresi ana blok diyagramı.....17
Şekil 2.1. Temel ağ yapısı 18
Şekil 2.2. Donanım diyagramı.....18
Şekil 2.3. 3-Eksen Ciroskop MEMS yapısı 19
Şekil 2.4. 3-Eksen Ciroskop ASIC yapısı 20
Şekil 2.5. L3G4200D'nin yapısal gösterimi 20
Şekil 2.6. LSM303DLHC ASIC yapısı 22
Şekil 2.7. Modülün PCB tasarımı 25
Şekil 2.8. Modülün gerçeklenmiş hali 25
Şekil 2.9. Keil derleyici arayüzü.....26
Şekil 2.10. Bilgisayar üzerinden CAN iletişim arayüzü 26
Şekil 2.11. Sensörlerden alınan ham verilerin MATLAB çıktısı 27
Şekil 2.12. CAN ağına bağlı iki modül.....27
Şekil 3.1. Stewart platformu temel yapısı 28
Şekil 3.2. SP sistemi.....29
Şekil 3.3. Test düzeneği 29
Şekil 3.4. X ekseninde gerçekleştirilen hareket.....30
Şekil 3.5. Y ekseninde gerçekleştirilen hareket.....30
Şekil 3.6. Z ekseninde gerçekleştirilen hareket 31

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Statik RMS performansı 31

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

G	: Gauss (Gauss)
g	: Yer çekimi ivmesi (m/sn²)
V	: Volt (V)

Kısaltmalar

AMR	: Anisotropik Magnetoresistif
ASIC	: Application Specific Integrated Circuit (Uygulamaya Özgü Tümleşik Devre)
CAN	: Controller Area Network Bus (Kontrol Alan Ağı Veri Yolu)
CSMA/CD	: Carrier Sense Multiple Access With Collision Dedection (Çarpışma Algılacıyla Taşıyıcı Dinlenen Çoklu Erişim)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DCM	: Direction Cosine Matrix (Yönsel Kosinüs Matrisi)
DPS	: Degree Per Second (Saniyedeki Açısal Değişim)
FPU	: Floating Point Unit (Noktalı Sayı Hesaplama Birimi)
I2C	: Inter-Integrated Circuit (Seri Veriyolu)
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
PCB	: Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
RMS	: Root Mean Square (Karekök Ortalama)
SP	: Stewart Platform

SUALTI SİSTEMLERİ İÇİN GÖMÜLÜ ELEKTRONİK CİROSKOP PUSULA

ÖZET

Yönelim tespit sistemleri birçok navigasyon uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ataletsel algılayıcıların kullanılarak bir sistemin yöneliminin etkin şekilde tespit edilmesi önemli bir araştırma konusudur. Literatürde ataletsel algılayıcılardan alınan verilerin kaynaştırılarak yönelim tespitine yönelik birçok çalışma mevcuttur.

Bu tez çalışması kapsamında özellikle su altında kullanılan ince çekilebilir dizinlerde kullanılmak üzere bir gömülü yönelim tespit sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem oldukça küçük fiziksel boyutlara sahip olan ince çebilebilir dizine monte edilebilir yapıda olup 3-eksenli ivme, ciroskop ve manyetik alan ölçer algılayıcıları içermektedir. Bu algılayıcılardan alınan ham veriler literatürde bulunan bayır inişi (gradient-descent) tabanlı bir yöntem ile kaynaştırılarak yönelim bilgisi elde edilmektedir. Geliştirilen yönelim tespit modülleri seri bir haberleşme kanalından merkezi bir bilgisayara veri aktarabilmek için CAN-BUS arayüzüne sahiptir. Yapılan kontrollü deneyler, tez kapsamında geliştirilen gömülü yönelim tespit modülünün hedeflenen isterleri sağlandığını göstermiştir.

Özetle, bu tez çalışması sonucunda, ince akustik çekilebilir dizinlerde kullanılabilir ölçülerde bir gömülü elektronik ciroskop pusula prototipi geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektronik Ciroskop, Elektronik Pusula, Sualtı Sistemleri.

EMBEDDED ELECTRONICS GYROSCOPE COMPASS FOR UNDERWATER SYSTEMS

ABSTRACT

Orientation determination systems are widely used in many navigation applications. Especially, effective determination of orientation by making use of inertial sensors is an emerging topic. There are many works in literature that aims to fuse raw data taken from inertial sensors to determine orientation.

Within the scope of this thesis, an embedded orientation determination system that can be used in particularly underwater thin line towed arrayis developed. The system developed can be integrated into thin line towed arrays which have quite small pysical dimensions and includes 3 axis accelerate, gyroscope and magnetometer. Orientation of the modüle is obtained by the fusion of raw sensor data using a gradient descent based technique avaliable in the literature. The developed orientation determination modules have CAN-BUS interface to transmit data to main computer systems via a serial communication channel. The controlled experimentscarried out show that the orientation determination module developed is able to satisfy target requirements.

In summary, at the end of this thesis an embedded electronic gyroscope compass module prototype for thin line towed arrayshas been developed.

Keywords: Electronic Compass, Electronic Gyroscope, Underwater Systems.

GİRİŞ

Son yıllarda, insanların kara, hava ve sulardaki tehlikeli durumlarda robot kullanımlarından dolayı, uzaktan kontrol edilebilen robot uygulamalarına olan ihtiyaç artmıştır. Bu araçların herhangi bir zamandaki yönelimini bilmek büyük bir önem taşımaktadır. Aracın/platformun yönü, yatay ve dikey düzlemdeki eğimi, karaya veya suya göre derinliği; karada, suda veya havada kullanılan bu platformların kontrol edilebilmesi için gerekli olan en önemli parametrelerdir. Bu bilgiler aynı zamanda çekilebilen dizin ve diğer deniz dibinde konuşlandırılmış sensörler gibi tüm uzaktan ve özerk olarak kullanılan sistemler için gereklidir.

Bu tezde özellikle su altı sistemlerine yönelik olarak yön ile yatay ve dikey düzleme olan açıları ölçebilen bir elektonik ciroskop-pusula modülü geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu tip modüller sualtı sistemlerinde çekilebilir dizinlerin yönelimlerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Çekilebilir dizinin boyutuna göre her dizinde genellikle 10 ile 32 arasında değişen sayıda yönelim tespit modül kullanılmaktadır. Aynı zamanda akış gürültüsü ve gemide kullanılacak olan vinç benzeri cihazların boyutu gibi etkenlerden dolayı, mümkün olan en küçük çapa sahip dizinlerin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle en az sayıda akustik veya akustik olmayan bigileri taşıyan kablo kullanımı önemli bir gereksinimdir. Geleneksel 10 cm çapına sahip dizinlerde her bir yönelim tespit modülü için ayrı bir iletişim hattı kullanmak mümkün iken 3 cm ve altında bir çapa sahip olan ince dizinlerde bu mümkün değildir. Bu nedenle bu tez kapsamında ince çekilebilir dizinlere monte edilebilecek boyutta ve seri bir kanal üzerinden birçok modülün bağlanabileceği bir yönelim tespit modülü geliştirilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen modülüSualtı Sistemleri Teknoloji Geliştirme Sanayi Tic. Ltd. Şirketi, Türkiye Savunma Sanayi için geliştirilecek olan çekilebilir dizinler ve su altı araçlarındakullanılması planlanmaktadır.

Tez çıktısı olan modül, üzerinde 3 eksen MEMS ciroskop, 3 eksen manyetik alan sensörü ve 3 eksen ivme sensörü bulunmaktadır. Ciroskop ve manyetik alan gibi iki farklı sensör türünden gelen veriler kaynaştırılırken, titreşim etklerini azaltabilmek için, ayrıca bir adet ivme sensörü kullanılmıştır. Veri kaynaştırma işleminde, Madgwick [1] tarafından önerilen algoritma mikrodenetleyici üzerinde gerçeklenmiştir. Elde edilen veriler CAN iletişim protokolü ile bilgisayara yollanmaktadır. Kullanılan iletişim protokolü birden fazla modülün aynı kablo hattı üzerinden haberleşmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede, birden fazla sensör ihtiyacı bulunan çekilebilir dizinler için uygun bir çözüm olmaktadır.

Bu tezin birinci bölümde gömülü elektronik ciroskop pusulalar için kullanılan veri kaynaştırma konusu üzerinde durulmuştur. Genel veri kaynaştırmasının yanı sıra kullanılan farklı teknikler bu başlık altında incelenmiştir.

İkinci bölümde, gömülü sistem tasarımından bahsedilmiştir. Kullanılan sensörler ve teknolojileri bu başlıkda açıklanmıştır. Gömülü sistem yazılım geliştirme ve veri toplama ile ilgili çalışmalar bu başlık altındadır.

Üçüncü bölümde, tez çalışması sonucunda elde edilen modülü ile yapılan kontrollü testlere yer verilmiştir. Kullanılan test düzeneği ve elde edilen veriler bu başlık altında incelenmiştir.

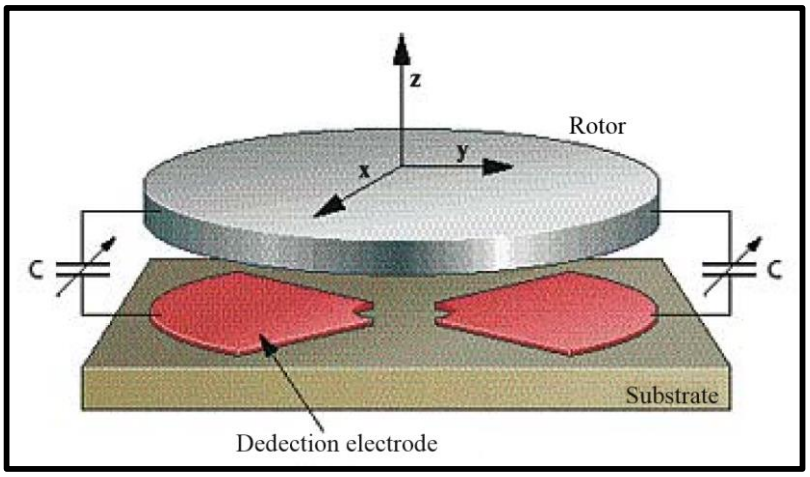
Sonuçlar ve öneriler bölümünde, daha önceki bölümlerden elde edilen veriler incelenmiştir. Tez kapsamında gerçeklenen modül için yapılabilecek değişiklikler ve iyileştirmeler önerilmiştir.

1.ATALETSEL YÖNELİM KESTİRİM SİSTEMLERİ

Birataletölçümmodülü (IMU), ivme hızı, dönme hızı ve dünyanın manyetik alanını ölçerek kullanıldığı cihazın açısal durumunu belirlemektedir. Fakat alınan veriler direk olarak kullanılamamaktadır. Farklı tip sensörlerden gelen verilerin karşılaştırılması ve kaynaştırılması gerekmektedir. Bu sensörlerden gelen verilerin işlenmesine veri füzyonu denilmektedir.

Elektronik ciroskoplar robotik sistemlerde, oyun konsollarında, navigasyon sistemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Özellikle insansız araçlar ve hassas ölçüm sistemleri için hayati öneme sahiptir. İnsansız uçaklarda, insansız denizaltı araçlarında, çekilebilir akustik dizinler gibi askeri alanlarda da kullanılmaktadır.

Elektronik ciroskoplar bulundukları eksen ile arasındaki açıyı ölçen yapılardır. Sensörü oluşturan birçok mimari bulunmaktadır. Aşağıdaki şekil 1.1'de görmüş olduğunuz mimari x-y eksenindeki açıyı bulmak için tasarlanmıştır [2].

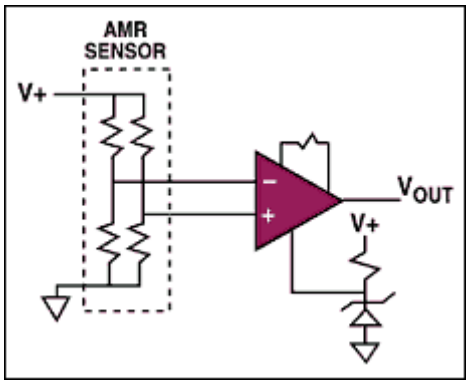


Şekil 1.1. Robert Bosch Vibrasyon Diski [2]

Şekil 1.1'de görüleceği gibi bir disk dedektör elektrotlala kaplı bir yüzeyin üzerinde bulunmaktadır. Sensör düzlemle olan açısı değiştiriğinde üzerindeki disk elektrotlarla olan mesafesi değişmekte ve şekilde görülen kapasitelerin değerleri değişmektedir.

Böylece kapasitelerin değerindeki değişme ile sensörün eksenlerle olan açısı hesaplanabilmektedir [2].

Elektronik pusulalar temel olarak mekanik pusulalarda olduğu gibi Dünya merkezinin oluşturduğu manyetik alandan yararlanarak çalışır. MEMS teknolojisi ile üretilen çok hassas bir direnç üzerinde uygulanan akım ile manyetik alan ile oluşan akım arasındaki farka göre çalışan bu sistemler anisotropik resistif olarak sınıflandırılır. Şekil 1.2'de tek eksen anisotropik magnetoresistif sensör modeli gösterilmiştir. Elektronik pusula uygulamalarında endüktif yaklaşıma çevresel etkilerden daha az etkilenen bu yöntem yarı iletken üreticileri tarafından tercih edilmektedir [3].



Şekil 1.2. AMR modeli[3]

Veri füzyonu esas olarak bir bilgi bütünleştirmesi problemidir. Bu yöntem çoklu algılayıcıdan gelen verilerin birleştirilerek ilgili durum için tek bir algılayıcı kullanımından daha iyi bir analiz yapılmasına ve daha iyi kararların verilmesini sağlamaktadır [4].

Literatür incelemesi yapıldığında veri füzyonu tanımı için çeşitli açık tanımlamaların yapıldığı görülür. Klein'nın yapmış olduğu tanımlama; çok seviyeli, çok yüzlü bir yöntem olarak belirtilen veri birleştirme işi, otomatik bulma, kurma, değişkenleri birbirleriyle bağlama, bir kanıya varma ve verinin farklı kaynaklardan gelen bilgilerle birleşmesi isini yapan bir işlemler sürecidir [5]. Weisstein'e göre; iki veya daha fazla algılayıcılarla ya da iki veya daha fazla biçimlerdeki bir algılayıcının çalışmasıyla elde edilen veriden arzu edilen bilgiyi çıkarma ve birleştirme olarak da belirtilir [6]. Waltz, Llinas ve Hall'e göre; fiziksel olaylar, hareketler veya durumlar hakkında sonuç çıkarmak için mevcut teknolojiler doğrultusunda çoklu algılayıcılardaki bilgilerin birleşimidir [7, 8]. Robotik uygulamalar üzerine çalışmaları bulunan Richardson ve

Marsh ise gözlenen sistemin kazancının çoklu algılayıcılardan gelen veriler ile en iyi durum vektörlerinin oluşturulmasıyla hesaplanması olarak tanımlamıştır [9]. Avrupa Birliği Uzaktan Algılama Laboratuvarları(EARSeL) ve Fransa Elektrik ve Elektronik Topluluğu (SEE) tarafından benimsenen tanıma göre ise veri füzyonu; farklı kaynaklardan meydana gelen veri topluluğu için istenen tanımlamaların yapıldığı biçimsel bir yapıdır [10].

Veri füzyon yeni bir fikir olmamasına rağmen, son yıllarda teknolojinin ilerlemesi ve yeni algılayıcıların ortaya çıkması, gerçek zamanlı veri füzyonunun artarak mümkün kılınmasını sağlamaktadır [11, 12]. 1970'lerin başlarında itibaren bilgisayar alanındaki gelişmeler yapay zekâ programlarına uygulama alanları sağlamıştır [13]. Hesaplama ve algılamadaki bu gelişmelerin sonucu olarak insanların ve hayvanların farklı veri kaynaklarını birleştirme kabiliyetlerinin donanım ve yazılım ile bir benzerliğinin oluşturulmasını sağlamıştır.

1.1. Ciroskop Pusulalarda Kullanılan Veri Kaynaştırma Yöntemleri

Günümüzde ciroskop pusulalarda sıklıkla kullanılan yöntemler, Kalman filtresi [14] Premerlani ve Bizard [15], Starlino [16], Mahony [17-19], ve Madgwick [1, 20]'dir. Genel olarak bakıldığında kullanılan yöntemlerin benzer noktaları olduğu görülmektedir. Bunla beraber yöntemler arasındaki farklılıkları incelendiğinde ortaya atılan algoritmaların gelişimi ortaya çıkmaktadır. Kalman filtresi (durum matrisleri ile) ve Mahony [19] ve Madgwick [1] filtresi olmak üzere üç temel filtre yaklaşımı inceleyebiliriz. Bu yaklaşımlar üzerinden matematiksel olarak 1 boyutlu bir veri üzerinden karşılaştırma yapabiliriz.

Atalet kestirim işleminde mödülün açısı gösteren kinematik denklemi Denklem (1.1) aşağıdaki gibidir.

$$R = R\Omega_x,\ \Omega_x = wJ = \begin{pmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{pmatrix} \tag{1.1}$$

$$w = \left(w_x, w_y, w_z\right)^T \tag{1.2}$$

Denklem (1.2) vektörü ölçülen rotasyon açısını gösterir. R referans kabul edilen sabit cisim düzleminden gözlemlenen, Dünya'daki rotasyon haretketini gösterir. Dünya üzerindeki hareket koordinatlarına $v_{Dünya}$ dersek, referans düzdemle sabit cisim Denklem (1.3) gösterilmiştir. Buradan yola çıkarak Denklem (1.4) elde edilir.

$$v_{cisim} = R^T v_{Dünya} \tag{1.3}$$

$$\dot{v}_{cisim} = \Omega_x^T v_{cisim} = -\left(w \times v_{cisim}\right) \tag{1.4}$$

Bu denklemden anlaşılacağı üzere denklem lineer değildir. Bu yüzden filtre tasarımı kolay olmayacaktır. Filtre nümerik hatalara duyarlıdır. Mikro işlemciler üzerinde gerçekleştirilmiş her iteratif hesaplamada rakamsal hata miktarı artar. Ancak Denklem (1.1)'de görüldüğü gibi eğer önlem alınmazsa bu hatalar iteratif olarak artmaya devam eder ve R sonunda bir açı göstermeyi bırakır. Bu problemi düzeltmek için yönsel cosinüs matris (Direction Cosine Matrix-DCM) ya da kuaterniyon gibi bazı hesapsal teknikler kullanılır [21].

R matrisi birçok yolla gösterilebilir ve her gösterimin kendine ait avantajları ve dezavantajları vardır [22]. En çok bilinenleri DCM ya da açı matrisi, Euler açıları, Cardan açıları, Tait-Bryan açıları ve kuaterniyon açılarıdır [23]. Hangi gösterimin kullanılacağına, seçilecek algoritma karar verir.

Ciroskop pusulalarda kullanılan algoritmalarda ortak 3 aşamaya bölerek inceleyebiliriz. Bu aşamaları T1, T2 ve T3 olarak adlandırabiliriz.

T1 aşamasında, kullanılacak algoritmaya göre DCM, Euler, kuaterniyon gibi açısal dönüşümü yapılarak R matrisinin oluşturulmasıdır. Burda DCM, Euler ya da kuaterniyon açıları kullanılacaksa yönsellik için gravite vektörü Denklem (1.5)'deki gibi kabul edilir.

$$d = -R^T e_z \tag{1.5}$$

T2 aşamasında, R nin rakamsal gösteriminin aslında gerçek fiziksel açıyı temsil etmesi sağlanmalıdır. Bu sağlamak için birçok strateji izlenebilir. Premerlani ve Bizard [15] ile Starlino [16], x ve y doğrultularını eşit parçalara ayrırarak DCM'deki hataları

hesaptan çıkartır. Mahony, expotansiyel matrisleri ve Rodriguez formüllerini ya da 2. dereceden Runge-Kutta metodunu önerir [17]. Madgwick ise kuaterniyon ile normalizasyon yöntemini kullanır [1, 20].

T3 aşamasında, ivme ve ciroskop verileri birleştirilmesi ile atalet kestirimi yapılır. Filtre performansı olarak filtrenin performansı hakkında karar verdiğinden dolayı en önemli aşamadır. Bu aşamada bilinen atalet vektörüne R dersek, ölçülen ivme verktörü a olmak üzere hesapsal kestirim yapılmış atalet vektörü Denklem (1.6)'da gösterilmiştir. Bu denklem sayesinde yukarıda bahsedilen Kalman filtresi, Mahony ve Madgwick filtreleri karşılaştırılabilir.

$$R^{\text{kestirim}} = f\left(R, a\right) \tag{1.6}$$

1.1.1. Kalman filtresi

Kalman filtresi, doğrusal bir sistemin herhangi bir andaki durum parametrelerinin kestirim yapılmasına imkân vermektedir. Kalman filtresi, bir sonraki durum kestirimi için, önceki durum kestirimi ve yeni ölçüm değerini kullanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, özyineli (iteratif) bir yaklaşıma sahiptir. Kalman filtesi Denklem (1.7), Denklem (1.8), ve Denklem (1.9) ile ifade edilmektedir.

$$\hat{x}_k^- = F_k \hat{x}_{k-1} \tag{1.7a}$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \tag{1.7b}$$

$$\tilde{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_k^- \tag{1.8a}$$

$$z_k = H_k \hat{x}_k + v_k \tag{1.8b}$$

$$S_k = H_k P_k^- H_k^T + R_k \tag{1.8c}$$

$$K_k = P_k^- H_k^T S_k^{-1} \tag{1.8d}$$

$$\hat{x}_k = x_k^- + K_k \tilde{y}_k \tag{1.9a}$$

$$P_k = \left(I - K_k H_k\right) P_k^- \tag{1.9b}$$

Burada Denklem (1.7) kestirim modelini oluşturmaktadır. $\hat{x}_k^-$ ilk durum kestirimini, F_k durum geçiş matrisini, P_k^- ise hata kovaryans kestirimi ifade etmektedir. Denklem (1.8)'de ise; $\tilde{y}_k$, S_k, K_k ve H_k sırasıyla gerçek ölçüm ile tahmini ölçüm arasındaki farkı, gerçek ölçüm ile tahmini ölçüm arasındaki farkın kovaryansını, Kalman kazancını ve gözlem modelini göstermektedir [24]. Yine aynı denklemde z_k gerçek ölçüm değerini göstermektedir. Denklem (1.9)'da gösterilen $\hat{x}_k$ son aşamada elde edilen durum kestirimini, P_k ise bir sonraki durumda Kalman kazancını belirlemede kullanılacak hata kovaryansını ifade etmektedir. Kalman kazancı (Kalman matrisi) sonsal hata kovaryansını minimum yapmayı amaçlamaktadır. Bu durum, Denklem (1.10) ve (1.11)'de gösterilmiştir.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K\left(z_k - H\hat{x}_k^-\right) \tag{1.10a}$$

$$e_k = x_k - \hat{x}_k \tag{1.10b}$$

$$e_k = x_k - \hat{x}_k = x_k - \left(\hat{x}_k^- + K\left(z_k - \hat{x}_k^-\right)\right) \tag{1.10c}$$

$$P_k = E\left\{e_k e_k^T\right\} \tag{1.11a}$$

$$P_k = E\left\{e_k e_k^T\right\} = E\left\{\left(x_k - \left(x_k^- + K\left(z_k - Hx_k^-\right)\right)\right)\left(x_k - \left(x_k^- + K\left(z_k - Hx_k^-\right)\right)\right)^T\right\} \tag{1.11b}$$

$$\frac{d}{dK}\left(P_k\right) = 0 \Rightarrow K_k = P_k^- H^T\left(HP_k^- H^T + R\right)^{-1} \tag{1.11c}$$

Ölçüm gürültüsü R büyük ise, S büyük olacaktır ve K küçülecektir. Bu durumda, sonsal kestirimi hesaplarken o anda hesaplanan ölçüm değerinin etkisi azalacaktır. Diğer yandan ölçüm gürültüsü küçükse S küçülecek ve K değeri artacaktır. Gerçek ölçüm değeri, kestirilen ölçüm değerine göre daha güvenilir olmaktadır. Önsel hata kovaryans P_k^- değerinin sıfıra yaklaşması durumunda; gerçek ölçüm değeri, kestirilen ölçüm değerine göre daha az güvenilir olmaktadır.

Kalman süzgeci yeni durum kestirimleri için yukarıdaki denklemlerden de görüldüğü üzere sadece bir önceki durum ile yeni ölçüm değerlerini kullanmaktadır. Kalman

filtresi eldeki verilere dayanarak bir sonraki durumu kestirir ve daha sonra gelen ölçümleri kullanarak kestirilen durumu günceller [25]. Fakat doğrusal olan sistemlerde kullanılabilir. Doğrusal olmayan sistemlerde ise sistem doğrusallaştırılmalıdır. Doğrusallaştırılamayan sistemlerde Kalman filtresi kullanılamaz. Bir atalet ölçme sistemi doğrusal olamadığı için önce doğrusallaştırılması gerekir. Bu yüzden fazladan hesapsal yük oluşmaktadır.

1.1.2. Mahony filtresi

3 eksen atalet verisi elde etmek için veri kaynaştırması yapılırken sistemin tam olarak lineer olmaması Denklem (1.1) gösterilmiştir. Bu durumdan dolayı tasarlanmış Kalman filtreleri işlem fazlalığı ve hesapsal yük getirmektedir. Ciroskop ve ivme verisinin nasıl birleştireceği üzerinde düşünürken açıkça görülen problem, w'nun dönüş açısının farklı sensörü doğasından, a ivme vektörününde sadece yönü gösteren farklı sensör doğasından olmasıdır. Yani elimizde rotasyon açısını veren bir sensör tipi ve yönsel ivme veren başka bir sensör tipinin bulunmasıdır. Bu iki farklı tipteki verilen kaynaştırılması için Mahony, Kalman filtresinden daha basit bir yöntem ileri sürmüştür.

Mahony'nin ileri sürmüş oluğu yöntem, PI kontrol mekanizması ile bir önceki atalet kestirimden sağlanan e hata vektörü yardımıyla bir düzeltme vektörü δw oluşturularak kinematik denklemin girişindeki w verisini düzeltmektir [19]. Ayrıca atalet hesaplamasında gravite vektörünün yerine Denklem (1.12) kullanmayı önermiştir.

$$e = a \times d \tag{1.12}$$

$$w' = w + \delta w \tag{1.13}$$

$$\delta w = \left(K_p + K_i \frac{1}{s} \right) \tag{1.14}$$

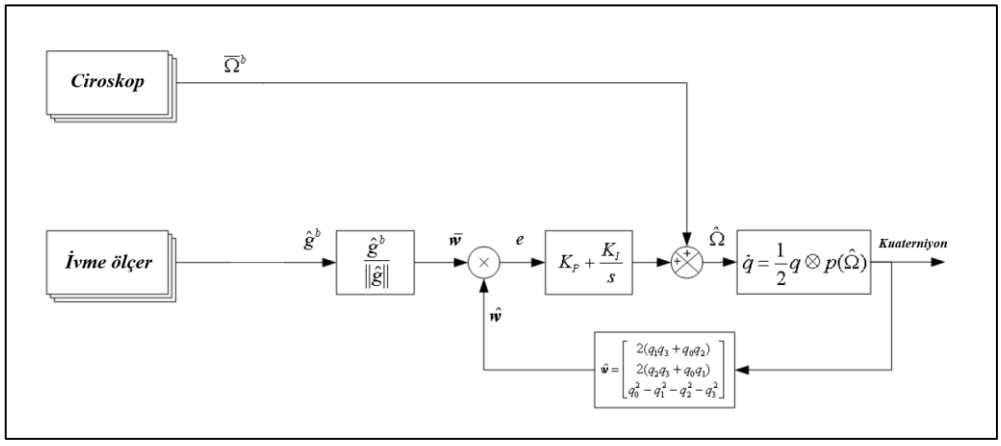
$$w' = w + \left(K_p + K_i \frac{1}{s} \right) a \times d \tag{1.15}$$

$$R = \frac{1}{s} R\Omega'_x \tag{1.16}$$

Bu algoritmada sırasıyla şu işlemler gerçekleştirilir:

1. Sensörlerden gelen w ve a verisi hesaplanarak anlamlı hale getirilir. a ivme verisi normalize edilir.
2. O anki atalet kestiriminden gravite vektörü DCM'de tanımladığı gibi Denklem (5) 'de hesaplanır.
3. Sonrasında yukarıda bahsetmiş olduğumuz Denklem (1.12) ile hata vektörü hesaplanır.
4. Dönüş açısını düzeltmek için PI denetçi ile δw Denklem (1.14)'de belirtildiği üzere düzeltme vektörü belirlenir.
5. Düzeltilmiş dönüş açısı w' Denklem (1.13)'deki formül ile hesaplanır.
6. w' değeri ile Ω_x hesaplanarak DCM de belirtilen Denklem (1.16) ile kinematik denklemin sonucuna ulaşılır.
7. Adım 1 tekrar edilir.

Adım 2 ve 4'de görüleceği üzere kuaterniyon hesaplamalarına dikkat edilmelidir. Filtrenin K_p ve K_i kazanç katsayıları kullanılan sensör ve sisteme göre değişebilmektedir. Şekil 1.3'de Mahony filtresinin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Mahony filtresi blok diyagramı

1.1.3. Madgwick filtresi [20]

3 Eksen bir ciroskop sensörü x, y, z eksenlerinde açısal dönüşü ölçer. Madgwick denkleminde bunlar w_x, w_y, w_z olarak belirtmiştir. Bu parametreleri radyan/saniye

cinsinden tanımlarsak s_w Denklem (1.17)'deki gibi tanımlayabiliriz. Kuaterniyon cebrine göre gravitite vektörü ${}^{S}_{E}\dot{q}$ Denklem (1.18)'deki gibi olacaktır.

$$s_w = \left[0, w_x, w_y, w_z\right] \tag{1.17}$$

$${}^{S}_{E}\dot{q} = \frac{1}{2}\,{}^{S}_{E}\hat{q} \otimes s_w \tag{1.18}$$

Rotasyonun t anındaki haline göre denklemleri yeniden düzenlenerek Denklem (1.19) elde edilir. Ayrıca iki örnek arasındaki zamana da Δt dersek, Denklem (1.20) aşağıdaki gibi olacaktır.

$${}^{S}_{E}\dot{q}_{w,t} = \frac{1}{2}\,{}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1} \otimes s_{w,t} \tag{1.19}$$

$${}^{S}_{E}q_{w,t} = {}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1} + {}^{S}_{E}\dot{q}_{w,t}\Delta t \tag{1.20}$$

3 Eksen bir ivme sensörü ile yer çekimi ivmesini ve lineer ivme verilerinin genliğini ölçmek mümkündür. 3 eksen bir manyetik alan ölçver sensörü ile Dünya'nın manyetik alanı ve manyetik gürültüleri ölçülebilir. Eğer Dünya'nın manyetik alan yönünü bilirsek, ölçülmüş olan sensör verisi ile gerçekte olan atalet arasında bir bağlantı kurabiliriz. Yalnız, sensörlerden ölçülen veriler her zaman tek bir çözüm sunmaz. Herhangi bir paralel düzleme yapılan hareketin sonsuz çözüm denklemi oluşabilir. Bu yüzden bazı uygulamalarda iki bilinen Euler açısı, bir bilinmeyen Euler açısı kullanılarak tamamlanmamış çözümler elde edilebilir. Bir kuaterniyon denkleminde ise tüm çözümler elde edilir. Burada sensörün rotasyonunu formüle ederken bazı problemlerle karşılaşılır. Sensörün rotasyonu ${}^{S}_{E}\hat{q}$, referans yön uzay çerçevemiz ${}^{E}\hat{d}$, sensörden ölçtüğümüz çerçevemiz ${}^{s}\hat{s}$ olarak tanımlayalım.

$$\min_{{}^{S}_{E}\hat{q}\in R^4} f\left({}^{S}_{E}\hat{q}, {}^{E}\hat{d}, {}^{s}\hat{s}\right) \tag{1.21}$$

$$f\left({}^{S}_{E}\hat{q}, {}^{E}\hat{d}, {}^{s}\hat{s}\right) = {}^{S}_{E}\hat{q}^{*} \otimes {}^{E}\hat{d} \otimes {}^{S}_{E}\hat{q} - {}^{s}\hat{s} \tag{1.22}$$

$${}^{S}_{E}\hat{q} = \left[q1 \quad q2 \quad q3 \quad q4\right] \tag{1.23}$$

$$ {}^{E}\hat{d} = \begin{bmatrix} 0 & d_x & d_y & d_z \end{bmatrix} \tag{1.24} $$

$$ {}^{s}\hat{s} = \begin{bmatrix} 0 & s_x & s_y & s_z \end{bmatrix} \tag{1.25} $$

Optimizasyon algoritmalarında hesaplaması ve birleştirilmesi en kolay yöntemlerden biri olan bayır inişi algoritmasını ekleyelim. Aşağıdaki Denklem (1.26), n defa iterasyon sonucu elde edilen rotasyon kestirimi ${}^{S}_{E}\hat{q}_{n+1}$, tahmin edilen ilk kestirim ${}^{S}_{E}\hat{q}_{0}$ ve adım aralığı μ olarak tanımlanmıştır.

$$ {}^{S}_{E}\hat{q}_{k+1} = {}^{S}_{E}\hat{q}_{k} - \mu \frac{\nabla f\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{k}, {}^{E}\hat{d}, {}^{s}\hat{s}\right)}{\left\| \nabla f\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{k}, {}^{E}\hat{d}, {}^{s}\hat{s}\right)\right\|}, k = 0,1,2,...n \tag{1.26} $$

$$ \nabla f\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{k}, {}^{E}\hat{d}, {}^{s}\hat{s}\right) = J^{T}\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{k}, {}^{E}\hat{d}\right) f\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{k}, {}^{E}\hat{d}, {}^{s}\hat{s}\right) \tag{1.27} $$

$$ f\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{k}, {}^{E}\hat{d}, {}^{s}\hat{s}\right) = \begin{bmatrix} 2d_x\left(\frac{1}{2} - q_3^2 - q_4^2\right) + 2d_y\left(q_1q_4 + q_2q_3\right) + 2d_z\left(q_2q_4 - q_1q_3\right) - s_x \\ 2d_x\left(q_2q_3 - q_1q_4\right) + 2d_y\left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_4^2\right) + 2d_z\left(q_1q_2 + q_3q_4\right) - s_y \\ 2d_x\left(q_1q_3 + q_2q_4\right) + 2d_y\left(q_3q_4 - q_1q_2\right) + 2d_z\left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2\right) - s_z \end{bmatrix} \tag{1.28} $$

$$ J\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{k}, {}^{E}\hat{d}\right) = \begin{bmatrix} 2d_yq_4 - 2d_zq_3 & 2d_yq_3 - 2d_zq_4 \\ -2d_xq_4 + 2d_zq_2 & 2d_xq_3 - 4d_yq_2 + 2d_zq_1 \\ 2d_xq_3 - 2d_yq_2 & 2d_xq_4 - 2d_yq_1 - 4d_zq_2 \\ -4d_xq_3 + 2d_yq_2 - 2d_zq_1 & -4d_xq_4 + 2d_yq_1 + 2d_zq_2 \\ 2d_xq_2 + 2d_zq_4 & -2d_xq_1 - 4d_yq_4 + 2d_zq_3 \\ 2d_xq_1 + 2d_yq_4 - 4d_zq_3 & 2d_xq_2 + 2d_yq_3 \end{bmatrix} \tag{1.29} $$

Daha önceden bahsettiğimiz üzere sadece manyetik alan ya da yerçekimi ölçümüyle tek bir rotasyon elde etmek mümkün değildir. Bu yüzden aldığımız ölçümler ile referans rotasyon verilerini birleştirmemiz gerekir. Bu, aşağıdaki denklemlerde belirtildiği gibi gerçeklenir.

$$f_{g,b}\left({}^{S}_{E}\hat{q}, {}^{S}\hat{a}, {}^{E}\hat{b}, {}^{S}\hat{m}\right) = \begin{bmatrix} f_g\left({}^{S}_{E}\hat{q}, {}^{S}\hat{a}\right) \\ f_b\left({}^{S}_{E}\hat{q}, {}^{E}\hat{b}, {}^{S}\hat{m}\right) \end{bmatrix} \tag{1.30}$$

$$J_{g,b}\left({}^{S}_{E}\hat{q}, {}^{E}\hat{b}\right) = \begin{bmatrix} J_g^T\left({}^{S}_{E}\hat{q}\right) \\ J_b^T\left({}^{S}_{E}\hat{q}, {}^{E}\hat{b}\right) \end{bmatrix} \tag{1.31}$$

Bu yaklaşım itibariyle her sensörden veri ölçüldüğünde yeni rotasyon açısı iteratif denklemler ile hesaplanacaktır. Algoritmanın daha verimli çalışması optimum bir μ adım aralığı ayarlanmalıdır. Bunun için Hessian matrisleri kullanılabilir [20], fakat getirdiği işlem yükü dolayısıyla mikrodenetleyicili sistemlerde kullanılmaz. Aşağıdaki Denklem (1.32)'de rotasyon kestirimi ${}^{S}_{E}q_{\nabla,t}$, bir önceki çevrim kestirimi ${}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}$ ve t zamanındaki sensörlerden ölçülen ivme ${}^{S}\hat{a}_t$, manyetik alan ${}^{S}\hat{m}_t$ olmak üzere gradient fonksiyonu ∇f olarak tanımlanmıştır.

$${}^{S}_{E}q_{\nabla,t} = {}^{S}_{E}q_{est,t-1} - \mu\frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \tag{1.32a}$$

$$\nabla f = \begin{Bmatrix} J_g^T\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}\right) f_g\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}, {}^{S}\hat{a}\right) \\ J_{g,b}^T\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}, {}^{E}\hat{b}\right) f_{g,b}\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}, {}^{S}\hat{a}, {}^{E}\hat{b}, {}^{S}\hat{m}\right) \end{Bmatrix} \tag{1.32b}$$

Optimum bir μ_t değeri, gereksiz büyük adımların sebep olduğu taşmalardan kaçınmak için ${}^{S}_{E}q_{\nabla,t}$ yakınsama değeri fiziksel rotasyonda tutmayı sağlar. μ_t eğeri, Δt örnekleme frekansında ve ciroskop sensöründen ölçülmüş rotasyon oranıyla ${}^{S}_{E}\dot{q}_{w,t}$ ivme ve manyetik alan ölçümlerindeki kaynaklanan gürültü α ile aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanır.

$$\mu_t = \alpha\left\|{}^{S}_{E}\dot{q}_{w,t}\right\|\Delta t,\ \alpha > 1 \tag{1.33}$$

Sensörden uzay vektör düzlemi ile bağlantılı sensör vektör düzlemindeki rotasyon kestirimi ${}^{S}_{E}q_{est,t}$, rotasyon hesaplamasının kaynaştırılmasından oluşan ${}^{S}_{E}q_{w,t}$ ve ${}^{S}_{E}q_{\nabla,t}$ ağırlık katsayısı γ_t eklenerek aşağıdaki gibi ilişkilendirilmiştir.

$$ {}^{S}_{E}q_{est,t} = \gamma_t \, {}^{S}_{E}q_{\nabla,t} + (1-\gamma_t) \, {}^{S}_{E}q_{w,t}, \; 0 \le \gamma_t \le 1 \tag{1.34} $$

γ_t ağırlık katsayısının optimum değeri, ${}^{S}_{E}q_w$ 'nın ağırlıklı diverjansının, ${}^{S}_{E}q_\nabla$ 'nın ağırlıklı yakınsak değerinin eşit olduğu noktadadır. ${}^{S}_{E}q_\nabla$ ağırlıklı diverjansı $\frac{\mu_t}{\Delta t}$ dir. ${}^{S}_{E}q_w$ yakınsama oranı β 'dır.

$$ (1-\gamma_t)\beta = \gamma_t \frac{\mu_t}{\Delta t} \tag{1.35} $$

$$ \gamma_t = \frac{\beta}{\frac{\mu_t}{\Delta t} + \beta} \tag{1.36} $$

Denklemlerin kaynaştırılabilmesi için α ile değişen ${}^{S}_{E}q_\nabla$ değeri, fiziksel rotasyon değişiminden eşit ya da büyük olmalıdır. α değerinin üst sınırı yoktur. Eğer α değerini μ_t değerinden çok büyük olursa, rotasyon filtresi basitleştirilebilir. Büyük değerde bir μ_t seçilirse, ${}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}$ ihmal edilebilir. Bu durumda denklem aşağıdaki gibi olur.

$$ {}^{S}_{E}q_{\nabla,t} \approx -\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \tag{1.37} $$

Aynı şekilde γ_t ağırlık katsayısı ve β katsayıları da ihmal edilebilir düzeye gelir. Denklemi basitleştirmek için ağırlık katsayısını sıfıra yakın kabul edebilir ve aşağıdaki gibi belirtilebilir.

$$ \gamma_t = \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \tag{1.38} $$

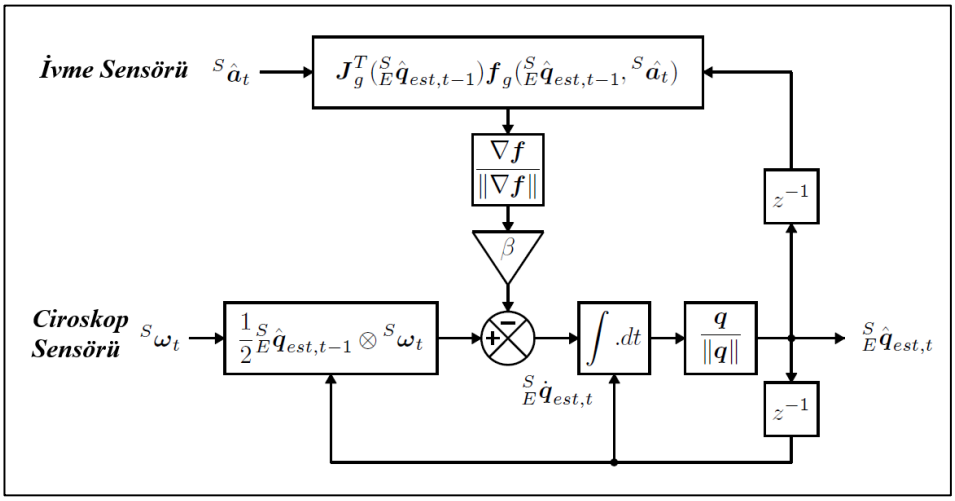
$$ {}^{S}_{E}q_{est,t} = \frac{\beta \Delta t}{\mu_t}\left(-\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|}\right) + (1-0)\left({}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1} + {}^{S}_{E}\dot{q}_{w,t}\Delta t\right) \tag{1.39} $$

$$ {}^{S}_{E}q_{est,t} = {}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1} + {}^{S}_{E}\dot{q}_{est,t}\Delta t \tag{1.40} $$

$$ {}^{S}_{E}\dot{q}_{est,t} = {}^{S}_{E}\dot{q}_{w,t} - \beta \, {}^{S}_{E}\dot{\hat{q}}_{\in,t} \tag{1.41} $$

$$ {}^{S}_{E}\hat{\dot{q}}_{\epsilon,t} = \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \tag{1.42} $$

Yukarıdaki denklemlerden görüldüğü üzere filtre ile hesaplanan rotasyon kestirimi ${}^{S}_{E}q_{est}$, rotasyon kestirim oranı ${}^{S}_{E}\dot{q}_{est}$ ile elde edilmektedir. Şekil 1.4'de bayır inişi algoritmasının manyetik alan hesabı olmaksızın oluşturulmuş ara blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Madgwick filtresi ara blok diyagramı [20]

Manyetik alan sensörleri, Dünya'nın manyetik alanını ölçerken ferromanyetik elementlerden etkilenirler. Bu manyetik gürültüler atalet ölçer cihazların performansında kayıplara sebep olurlar. Yapılan çalışmalarda elektrikli cihazların, metal eşyaların ve metal yapıların bu gürültülere sebep olduğu görülmüştür. Bu tür gürültüler sabit gürültü kaynaklarının olduğu durumlarda, sert demir olarak tanımlanan yöntemler ile düzeltmeler yapılabilmektedir [20]. Dünya'nın manyetik alanın yönünü ölçerken oluşan girişimi düzeltmek için zayıf demir olarak adlandırılan yöntemler kullanılır. Sapma hataları, Dünya yüzeyine paralel düzlemde oluşan ve referans yönelmenin doğrulanamamasından kaynaklanan hatalardır. Eğim hataları, Dünya yüzeyine dik olan düzlemde, ivme sensörleriyle düzeltilebilen atalet ölçüm hatalarıdır.

Dünya'nın manyetik alanının t anındaki ölçülen yönü, ${}^{E}\hat{h}_t$, normalize edilmiş manyetik ölçüm, ${}^{S}\hat{m}_t$, bir önceki t anında elde edilen rotasyon kestirimi, ${}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1}$

olarak tanımlanır. Manyetik etkilerden dolayı hatalı ölçülen ${}^{E}\hat{h}_t$, referans manyetik yönelim kabul edilen ${}^{E}\hat{b}_t$ hesaplanarak düzeltilebilir. Burada normalizasyon işlemi sadece x ve z eksenlerine uygulanır. Çünkü yapılan işlemde sadece rota açısını doğru hesaplamak için x ve z eksenleri yeterlidir.

$${}^{E}\hat{h}_t = \begin{bmatrix} 0 & h_x & h_y & h_z \end{bmatrix} = {}^{S}_{E}\hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^{S}\hat{m}_t \otimes {}^{S}_{E}\hat{q}^{*}_{est,t-1} \tag{1.43}$$

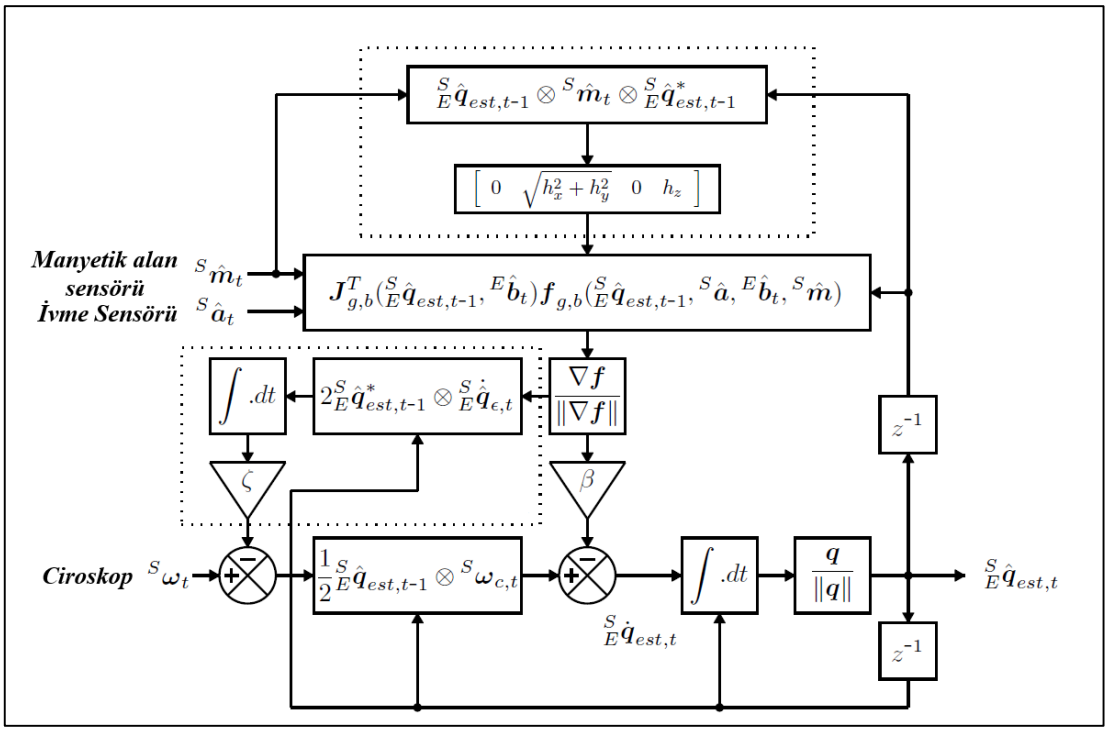
$${}^{E}\hat{b}_t = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{h_x^2 + h_y^2} & 0 & h_z \end{bmatrix} \tag{1.44}$$

Rotasyondaki kestirilmiş hata miktarının normalize yönü ${}^{S}_{E}\hat{\dot{q}}_{\epsilon}$, ciroskop denklemlerindeki her eksendeki açısal hatayı gösterir. Ciroskop biası, ${}^{S}w_b$, ciroskop ölçümünden gelen ${}^{S}w_e$ hatasının DC bileşenlerinden arınmış halidir. Başka bir deyişle hata miktarının salınıma sahip olan kısmıdır. Burada integral alındığında katsayısal bir denklem oluşturulur. Dengelenmiş olan ciroskop ölçümü ${}^{S}w_c$ olarak gösterilir. Algoritmada ilk değeri 0 alınması gerekir. Şekil 1.5'de manyetik alan gürültülerinden temizlenmiş ve ciroskop biası normalize edilmiş Madgwick algoritmasının ana blok diyagramı gösterilmiştir.

$${}^{S}w_{\epsilon,t} = 2\,{}^{S}_{E}\hat{q}^{*}_{est,t-1} \otimes {}^{S}_{E}\hat{\dot{q}}_{\epsilon,t} \tag{1.45}$$

$${}^{S}w_{b,t} = \zeta \sum_t {}^{S}w_{\epsilon,t}\Delta t \quad \text{“} \tag{1.46}$$

$${}^{S}w_{c,t} = {}^{S}w_t - {}^{S}w_{b,t} \tag{1.47}$$

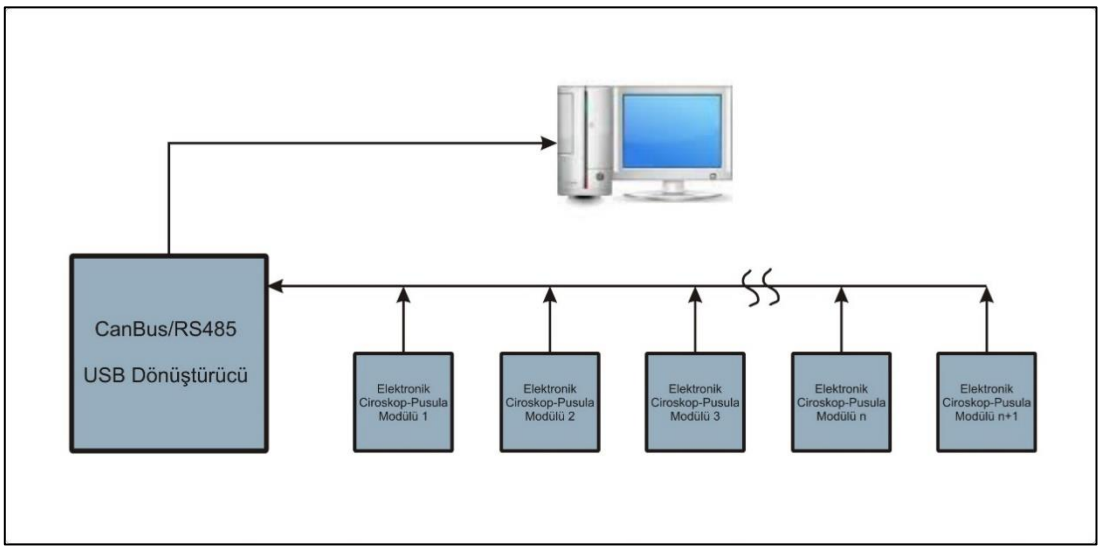


Şekil 1.5. Madgwick filtresi ana blok diyagramı [20]

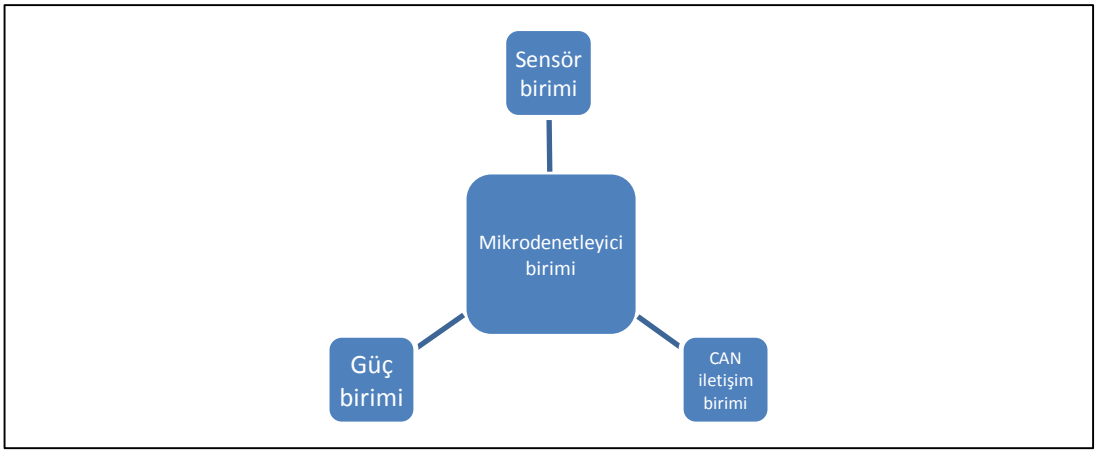
2. GÖMÜLÜ SİSTEM TASARIMI

2.1. Donanım Gerçeklemesi

Tez kapsamında 3 eksen manyetik sensör, 3 eksen ciroskop sensör ve 3 eksen ivme sensörü üzerinden gelen verilerin toplanarak bir sayısal filtre ile işlenip, daha sonra CAN Bus iletişim protokolü ile işlenen verinin ana bilgisayara aktarılmasını sağlayan bir modül elde edilmiştir. Şekil 2.1'de modüllerden oluşan ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 2.1. Temel ağ yapısı



Şekil 2.2. Donanım diyagramı

Bu tez kapsamında oluşturulan donanım mimarisi 4 ana birimden oluşmaktadır. Bu birimler sensör birimi, mikrodenetleyici birimi, CAN iletişim birimi ve güç birimidir. Şekil 2.2'de donanım diyagramı gösterilmiştir.

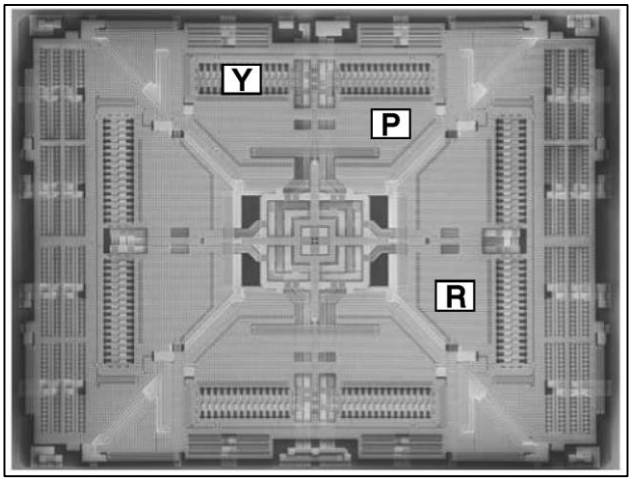
Donanımın kullanılacağı alan su altı sensörlerinin ve akustik dizilerin açısını belirlemek olduğu için, yapılan kartın oldukça küçük ebatlarda olması gerekmektedir. Bu yüzden donanım mimarisi oluşturulurken kartın fiziksel büyüklüğü göz önüne alınmıştır. Kullanılan elektronik malzemeler mümkün olduğunca küçük paketlerde seçilmiştir.

2.1.1. Sensör birimi

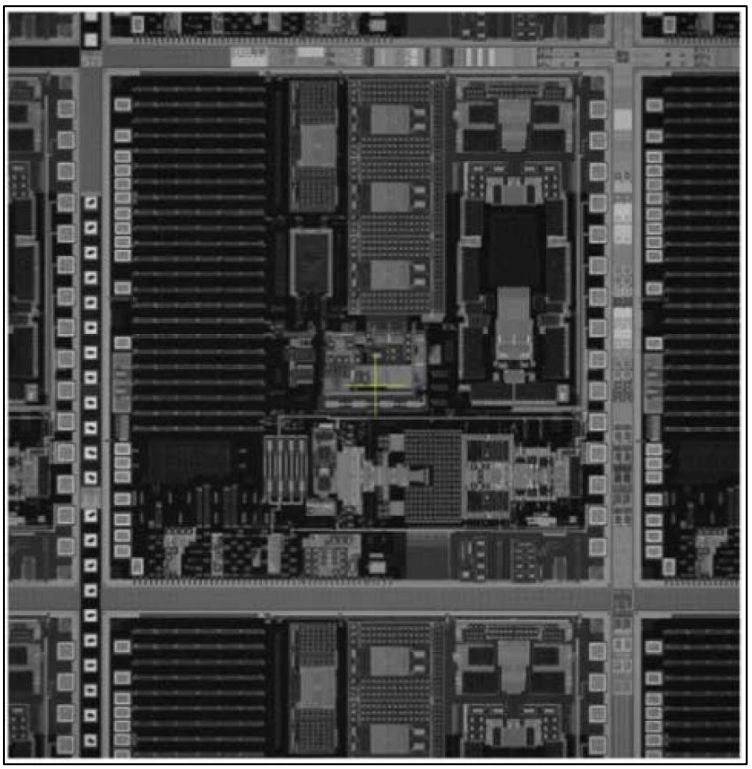
2.1.1.1. 3-Eksen ciroskop sensör

Tez kapsamında yapılan çalışmada ST üreticisinin L3G4200D numaralı 3 eksen MEMS ciroskop sensörü kullanılmıştır. ±250, ±500, ±2000 dps ölçüm aralığından herhangi bir seçilerek kullanılabilir. Sensör büyüklüğü 4 mm ene, 4 mm boya ve 1.1 mm yüksekliğindedir [26]. Tezde uygulanmak istenilen sualtı sistemlerine sığdırabilmek için yeterince küçük ebatlara sahiptir.

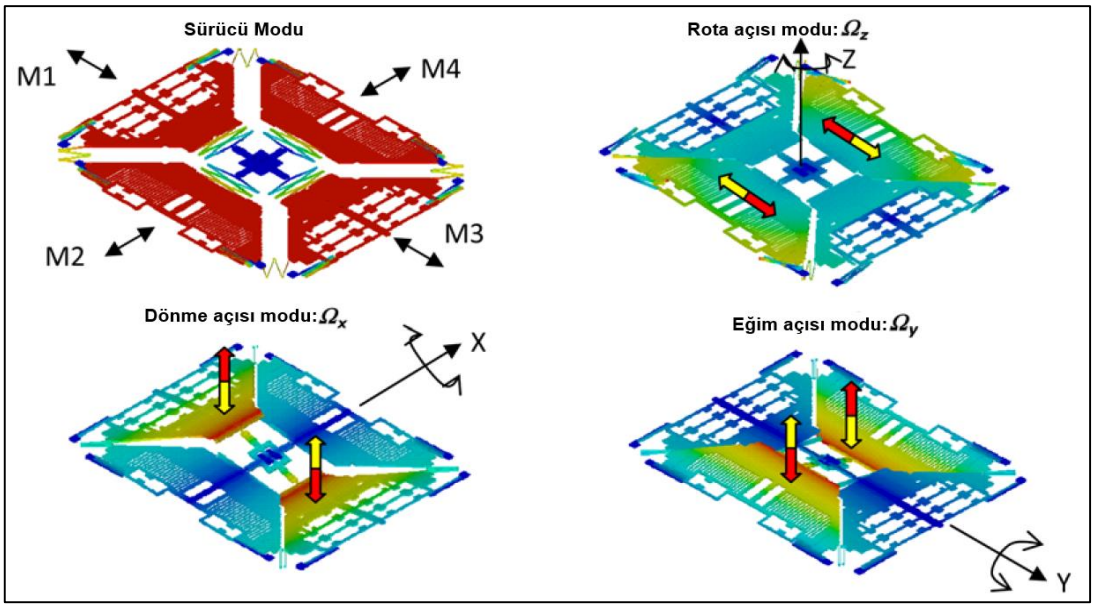
L3D4200D son derece yenilikçi olan tek sürücülü yapısal tasarıma sahiptir. Birçok üretici her eksen için farklı bir kütlesel yapı içeren farklı mekanik yapılar ile çalışırken, L3G4200D Coriolis prensibine dayanan mekanik yapı ile 3 eksendeki açıksal değişimi ölçebilmektedir. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de MEMS ve ASIC yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.3. 3-Eksen Ciroskop MEMS yapısı [27]



Şekil 2.4. 3-Eksen Ciroskop ASIC yapısı [27]



Şekil 2.5. L3G4200D'nin yapısal gösterimi [27]

Şekil 2.5'de görüldüğü gibi hissetme kütlesi rota, eğim ve dönme modlarında çalışmaktadır. Dönme ekseni Y ekseni olarak tanımlanmış ve dönme açısı Ω_y olarak gösterilmiştir. Eğim ekseni X ekseni olarak tanımlanmış ve dönme açısı Ω_x olarak gösterilmiştir. Rota ekseni Z ekseni olarak tanımlanmış ve dönme açısı Ω_z olarak

gösterilmiştir. Simetrik ve farksal yaklaşımın olduğu bu tasarım, yüksek miktardaki lineer ivmelerden etkilenmemektedir [27]. Sürücü kütlesi 4 parçadan ibaret olup şekilde M1, M2, M3 ve M4 olarak gösterilmiştir. Bu kütleler içe ve dışa doğru devamlı bir şekilde yatay düzlemde sabit frekansta hareket eder. Z eksenine açısal hız uygulandığında, Coriolis efektidan dolayı, M2 ve M4 aynı yatay düzlemde zıt yönlerde hareket eder. X eksenine açısal hız uygulandığında M1 ve M3 kütleleri aşağı ve yukarı hareket eder. Y eksenine uygulandığında ise M2 ve M4 aşağı yukarı bir hareket sergiler [27].

Her ne zaman Coriolis efekti algılanırsa sürücü kütlesindeki devamlı hareket hissetme yapısındaki kapasitansı değiştirecek ve dahili bulunan devresi ile bu değişim gerilime çevrilecektir. Bu gerilim sinyali 16 bit sayısal formata çevrilip dahili belleğe kaydedilir. Harici bir mikroişlemci ya da mikrodenetleyici ile veri I2C/SPI arayüzü ile bu veriye ulaşılabilir.

X, Y, Z eksenlerinde bir lineer ivme uygulandığında zaman sürücü kütleleri aynı yöne hareket edeceğinden kapasitif etki sıfırlanır. Böylece herhangi bir şok ya da titreşimden etkilenmez.

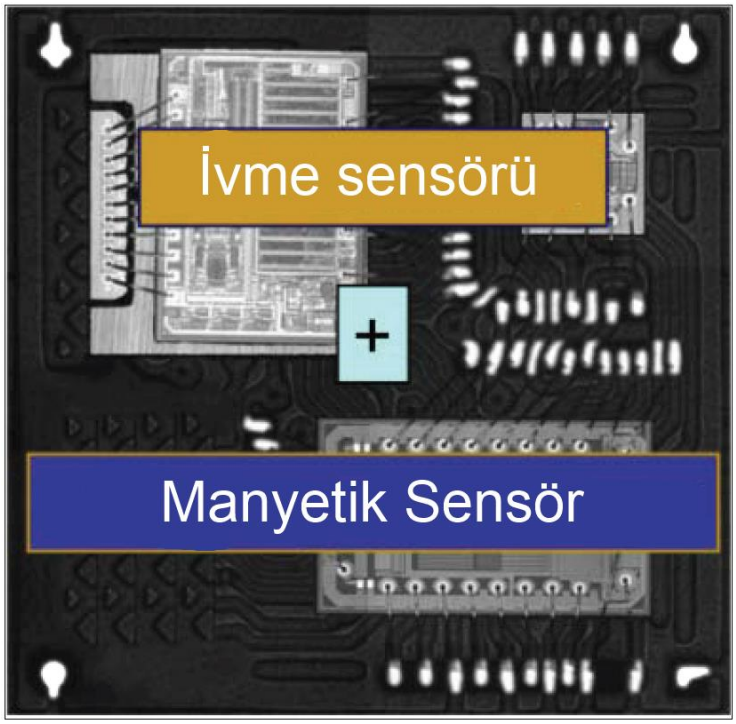
2.1.1.2. 3-Eksen manyetik sensör

Elektronik pusulalar sivil kullanımda günümüzde oldukça fazla kullanılmaktadır. Örneğin cep telefonlarında ve tabletlerde sıkça karşımıza çıkmaktadır [30]. Navigasyon sistemlerinde, hareket algılamada, pozisyon belirleme ve oyun konsolları gibi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Askeri alanlar da ise insansız uçaklar, insansız denizaltı araçları, çekilebilir akustik dizinler ilk akla gelen uygulama alanlarıdır.

LSM303DLHC tek bir kılıf içerisinde 3 boyutlu sayısal bir ivme sensörü ve 3 boyutlu manyetometre sensörü içerir. Şekil 2.6'da ASIC yapısı gösterilmiştir.

Manyetometre sensörleri dünyanın manyetik alanının yönü ve şiddetini ölçer. Bu manyetik alan kuvveti 0,5 ile 0,6 Gauss arasındadır ve her zaman Dünya'nın manyetik kuzey noktasını gösterir [28].

Bu sensör üzerinde bulunan manyetik sensör Honeywell firmasının geliştirdiği anizotropik resistif (AMR) yapısına sahiptir. Bu teknoloji ile Z ekseni, X ve Y eksenleri ile benzer hassasiyete sahiptir. Hall etkisi ile çalışan manyetik sensörlerde ihtiyaç duyulan akış yoğunlaştırıcısına bu tasarımla gerek kalmamaktadır. Bu sayede sensörün kendisini mayetize etmesi engellenmiş olup, ölçüm kesinliği artırılmıştır. Ayrıca hata dengeleyici devresi ile kalibrasyon ihtiyacı minimize etmiştir [28].



Şekil 2.6. LSM303DLHC ASIC yapısı [29]

2.1.1.3. 3-Eksen ivme sensörü

İvme sensörleri, bir kütleye uygulanan ivmeyi ölçmeyi sağlar. Uygulanan ivmenin ölçümünde, koordinat ivmesi (referans ivme) bilinmesine gerek yoktur. Bunun yerine ivme sensörleri, içindeki test kütlesine referans eksenindeki, kütleden kaynaklı olan uygulanan kuvvetlere bakar.

İvme sensörleri, sanayide ve bilimsel çalışmalarda birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyete sahip ivme sensörleri füzelerde, uçaklarda, gemilerde ve denizaltılarda navigasyon sistemlerinde kullanılan en önemli parçalardan biridir. Bunun yanı sıra, döner makinelerde titreşimi tespit edip, bu titreşimin hangi sınırlar içinde gerçekleştiğini gözler. Günümüzde tablet bilgisayarlar ve dijital

kameralarda titreşim engelleyici sistemlerin devreye girmesinde, görüntü netleştirmede ve kullanıcı duyarlı sistemlerin etkinleşmesinde kullanılmaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen donanımda LSM303DLHC yongasında bulunan ivme sensörü kullanılmıştır. Sensör seçilen moda göre ±2g, ±4g, ±8g ya da ±16g ivme aralığını ölçebilmektedir. Sensör dijital çıkışa sahip olup veriler 16 bit uzunluğundadır [30].

2.1.2. Mikrodenetleyici birimi

Tez kapsamında geliştirilen donanımda ARM tabanlı mikrodenetleyici kullanılmıştır. Kullanılan mikrodenetleyici 168MHz çekirdek hızına ulaşabilmektedir. Ayrıca 192KB dahili bellek ve 1MB dahili hafızaya sahiptir. Tez kapsamındaki en büyük özelliği üzerinde bulunan 32 bit noktasal sayısal işlem birimi (FPU) bulundurmasıdır. Bu donanım sayesinde noktalı sayıları çok daha az çevrim süresinde matematiksel işlemler yaptırmak mümkündür. Sensörleri okumamız için gerekli I2C arayüzünü desteklemektedir. Ayrıca 1Mbit hıza kadar CAN protokolünü desteklemektedir. 1.8V ile 3.6V arasında bir besleme gerilimi ile çalışabilmektedir.

2.1.3. CAN iletişim birimi

Açılımı “Controller Area Network Bus” olan yani “Kontrol Alan Ağı Veri yolu”dur.1980’lerde Robert Bosch tarafından otomotivde kablo yumağı yerine bir kablodan yazılım kontrollü veri transferini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. CAN, otomotiv endüstrisindeki en bilinen haberleşme sistemidir. Her ne kadar başlangıçta yalnızca otomotiv uygulamaları için tasarlanmış olsa da yüksek performansı güvenirliliğinden dolayı birçok dağıtık endüstriyel kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Güvenliğin çok önemli olduğu gerçek zamanlı uygulamalarda da kullanılır [31].

Uygulama alanı yüksek hızlı ağlardan düşük maliyetli çoklu kablolamalı sistemlere kadar geniştir. CAN-BUS, otomobil elektroniği, akıllı motor kontrolü, robot kontrolü, akıllı sensörler, asansörler, makine kontrol birimleri, kaymayı engelleyici sistemler, trafik sinyalizasyon sistemleri, akıllı binalar ve laboratuar otomasyonu gibi uygulama alanlarında maksimum 1Mbit/sn lik bir hızda veri iletişimi sağlar.

CAN, iletişim ortamına erişim yöntemi olarak bit öncelikli yapı ile CSMA/CD kullanır. Bu yöntem, mesajların çarpışmamasını garanti etmekle beraber, iletişim hattının uzunluğunu sınırlandırır[32]. Dolayısıyla, CAN düğümler 1 Mbit/s veri iletim hızı ile 40 m ve 40 Kbit/s veri iletim hızı ile 1000 m'lik bir veri yolu üzerinden bağlanabilirler [31].

2.1.4. Güç birimi

Güç katı tasarımı en önemli kısımlardan biridir. Çünkü sensörlerin ve mikrodenetleyicinin doğru çalışabilmesi için olabildiğince gürültüsüz bir besleme gerilimi üretilmelidir. Ayrıca kullanılmak istenilen alan dolayısıyla, modül ağındaki kablolar üzerinde oluşacak gerilim düşümü göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebepten ötürü, giriş gerilimi olarak geniş bir aralık seçilmelidir. Bunu yaparken kurulacak devrenin fiziksel büyüklüğü de göz önünde bulundurulmalıdır.

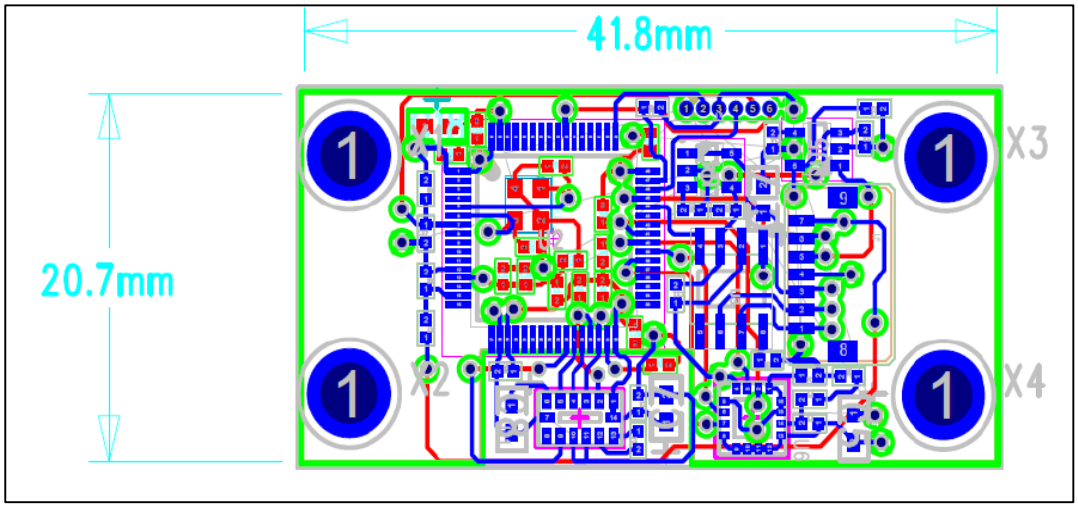
Yukarıda bahsettiğimiz sebeplerden dolayı tasarımda kullanılabilinecek en uygun yöntem olarak düşük gürültülü ve düşük düşümlü gerilim regülatörleri kullanılmıştır. Öncelikli olarak giriş gerilimi DC 5 V ile DC 16 V arasında olan ve çıkış gerilimi sabit DC 5 V olan gerilim regülatörü kullanılmıştır. Bu çıkış gerilimi CAN iletişim protokolü için kullanılan arayüz yongasını beslemek için kullanımıştır. Ayrıca geniş bir giriş gerilim aralığı şartı yerine getirilmiştir. Daha sonrasında elde edilen sabit DC 5 V gerilim tekrar gerilim regülatörüne sokularak sabit DC 3.3 V gerilim elde edilmiştir. Bu gerilim mikrodenetleyici ve sensörlerin beslemek için kullanılmıştır.

2.1.5. PCB tasarımı

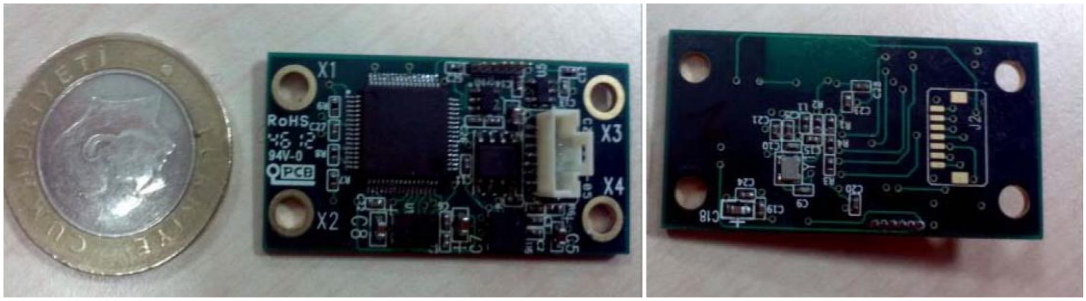
PCB'ler elektronikdevre elemanlarını monte etmek için yüzeyinde iletken yollar ve adalar, yüzeyler arasında ise içi lehim kaplı delikler içeren değişik yalıtkan materyallerden yapılmış plakalardır. Yalıtkan bir malzeme üzerine yerleştirilmiş iletken bir folyoyu uygun biçimlerde aşındırarak yolların ortaya çıkartılmasıyla üretilir. Bu özelliğinden dolayı PCB (Printed Circuit Board) baskılı devre kartı olarak da bilinir.

Şekil 2.7'de PCB tasarımı yapılmış kartın eni 20,7 mm, boyu ise 41.8 mm'ye kadar düşürmek mümkün olmuştur. Bu boyulara inebilmek için SMD malzemeler

kullanılmış olup, Şekil 2.8'de görüldüğü üzere hem kartın altına hem de üstüne malzeme yerleştirilmiştir. Bu ölçüler 30 mm çapındaki bir çekilebilir dizinde kullanılabilecek ölçüdedir.



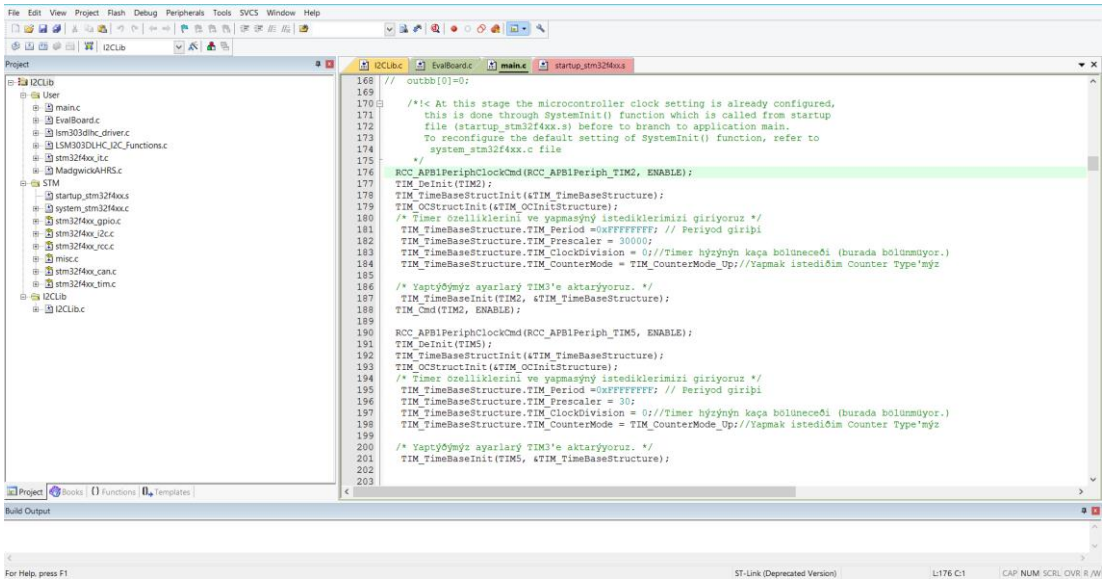
Şekil 2.7. Modülün PCB tasarımı



Şekil 2.8. Modülün gerçeklenmiş hali

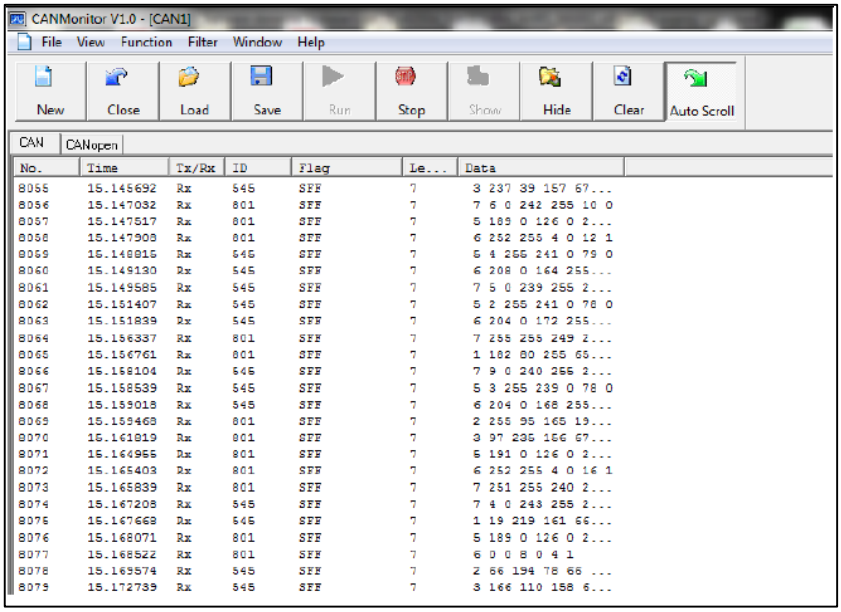
2.2. Yazılım Gerçeklemesi

Gömülü sistem yazılımı KEIL derleyicisi ile C programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Şekil 2.9'da Keil derleyici arayüzü gösterilmiştir. Bu derleyicinin kullanılma sebebi, diğer derleyicilere göre daha fazla hata ayıklama setlerinin olmasıdır. Bu derleyici ARM firması tarafından üretildiği için ARM tabanlı mikroişlemci ve mikrodenetleyicilerde gerçek zamanlı hata ayıklama işlemlerinde diğer derleyicilerden daha tutarlı sonuçlar alınabilmektedir. Ayrıca kolay kullanılabilir sade bir arayüze sahiptir.

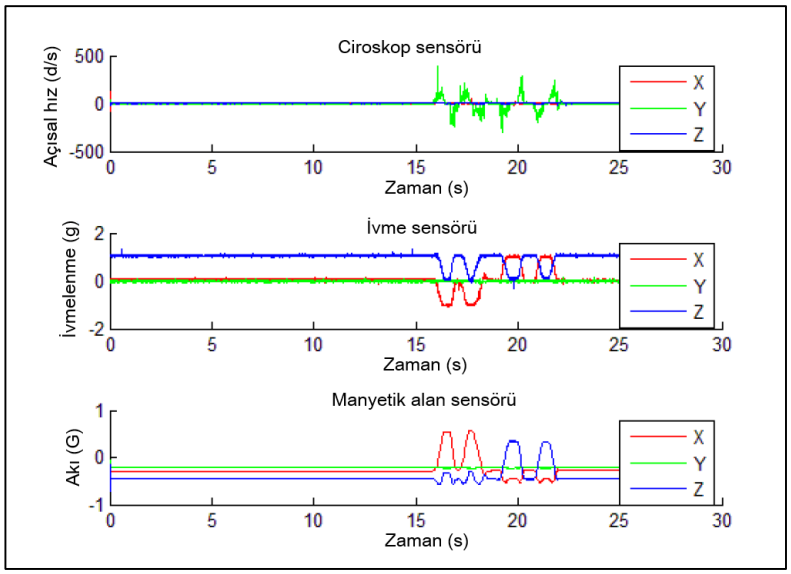


Şekil 2.9. Keil derleyici arayüzü

Yazılım gerçeklemesinde öncelikli olarak sensörleri I2C protokolü ile okuma ve yazma işlemleri üzerine çalışılmıştır. Sensörlerin hangi bant genişliğinde çalışacağı, veri güncelleme sıklığı gibi parametreler öncelikli olarak sensöre I2C protokolü üzerinden yazılmıştır. Sonrasın ise alınan ham verilerin, daha önceden seçtiğimiz bant genişliğine bağlı olarak fiziksel büyüklükleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler CAN iletişim arayüzü ile bilgisayara aktarılmıştır. Şekil 2.10'da bilgisayar ile CAN verilerinin alınışı gösterilmektedir. Şekil 2.11'de alınan ham verilerin MATLAB yazılımı ile elde edilmiş grafikleri gösterilmiştir.

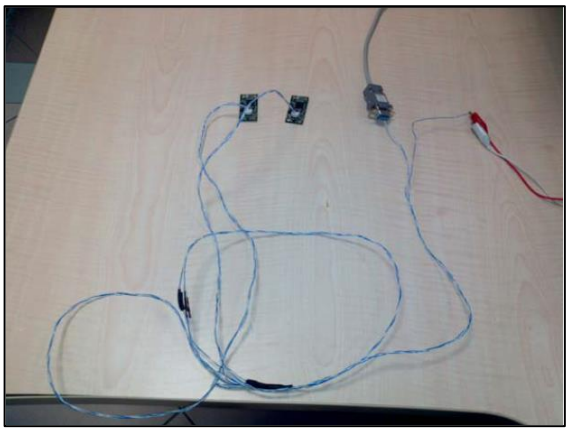


Şekil 2.10. Bilgisayar üzerinden CAN iletişim arayüzü



Şekil 2.11. Sensörlerden alınan ham verilerin MATLAB çıktısı

Birden fazla modülün aynı kablo ile haberleşebilmesi için CAN protokolü ile haberleşmesi üzerine çalışılmıştır. Birden fazla modül için, her modüle birbirinden farklı mesaj numaraları verilmiştir. Bu numaralar sayesinde hangi sensörden veri aldığımızı rahatlıkla öğrenebilmektedir. Şekil 2.12'de aynı kablo ağına bağlı 2 adet modül görülmektedir.

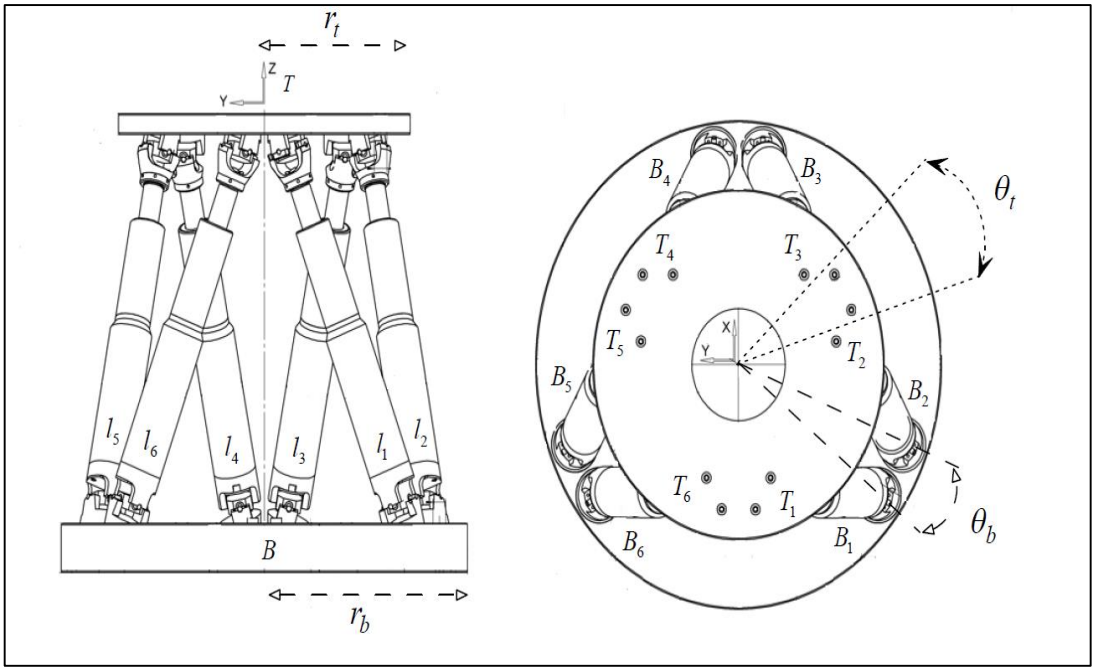


Şekil 2.12. CAN ağına bağlı iki modül

Yazılım geliştirme işleminde en zorlayıcı kısım filtrenin mikrodenetleyici üzerinde çalışabilir bir hale getirilmesidir. Direk olarak matris çarpımlarının yapılamaması dolayısıyla denklemler tek tek açılımları çıkarılarak matematiksel işlemler C diline aktarılmıştır. Bu işlem yapılırken matematiksel işlemlerin FPU üzerinde gerçeklenecek şekilde ayarlanmasına özen gösterilmiştir. FPU birimi ile verilerin daha hızlı işlenebilmesi sağlanmıştır.

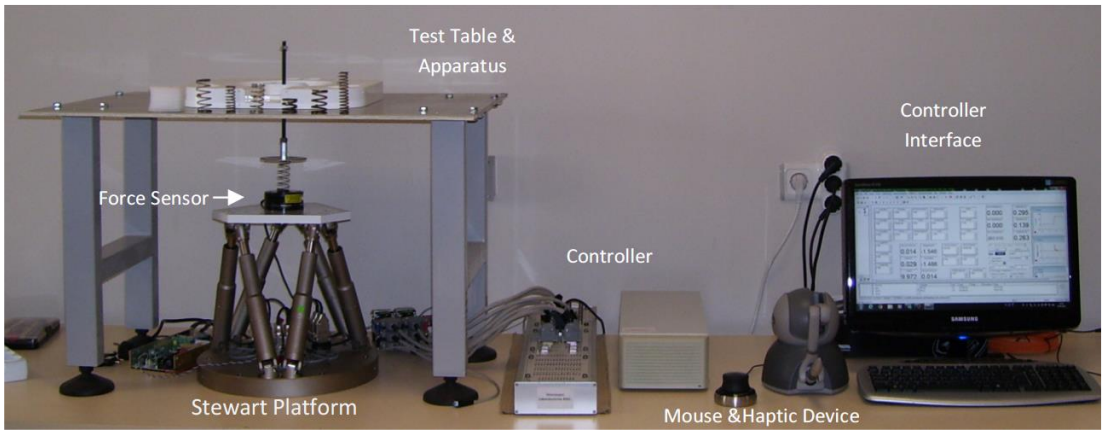
3.DENEYSEL SONUÇLAR

Deney yapılan platform, kontrollü açısal yönelim gerçekleştirebilmesi gerekmektedir. Yapılan kontrollü açısal yönelimler ile geliştirilen modülün performansı test edilebilir. Bu yüzden deney yapılan platform olarak, Stewart platformu (SP) olarak bilinen, 6 eksen hareketin gerçeklenmesini sağlayan bir elektromekanik yapı kullanılmıştır. Bu platfomun çalışma prensibi, bir sabit plakanın üzerine yerleştirilmiş, 6 adet doğrusal motorun üsteki plakayı itme ve çekme hareketleriyle kontrollü bir şekilde hareket ettirmesine dayanmaktadır. Şekil 3.1'de temel yapısı görülmektedir.



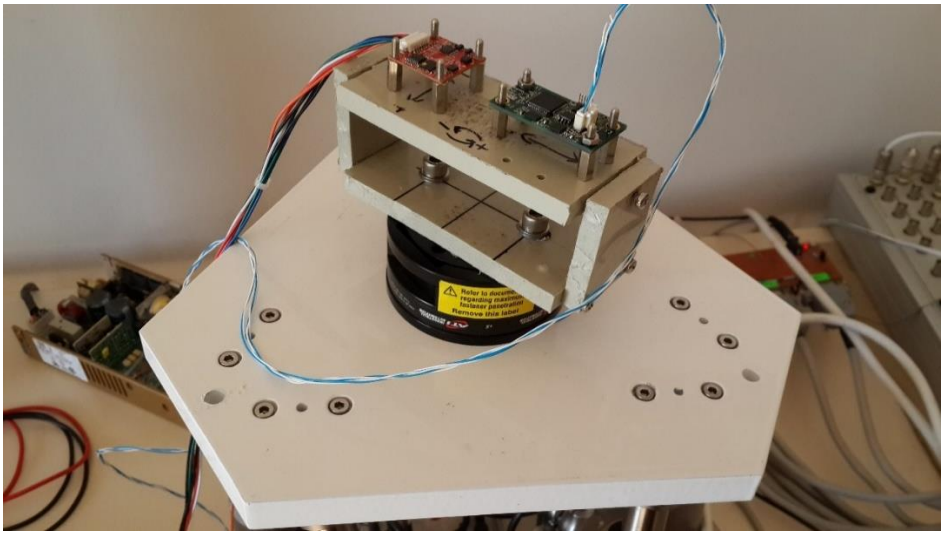
Şekil 3.1. Stewart platformu temel yapısı [33]

SP sistemi iki ana gövde, 6 doğrusal motor, denetleyici, üç boyutlu fare, haptik, kuvvet-tork sensörü, güç kaynağı, acil durum devresi ve denetleyici-robot ara geçiş kartından oluşmaktadır. Kontrol algoritmalarının uygulanması için dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrolör kullanılmıştır [33]. Şekil3.2'de düzenek görülmektedir.



Şekil 3.2. SP sistemi [34]

Deneysel sonuçlar Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Stewart platormunda test edilmiştir. Test için şekil 3.3'de gösterilen düzenek kurulmuştur. Platform x ve y eksenin ±15 derece, z ekseninde ise ±30 derece hareket edebilmektedir [34].

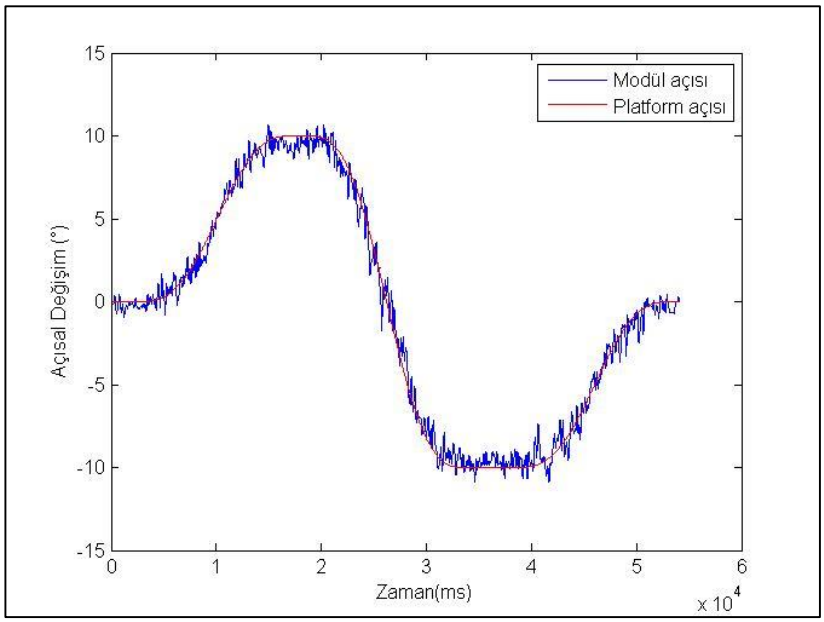


Şekil 3.3. Test düzeneği

Saniyede 5 dereceden az olan hareketlerde hesaplanan RMS değeri, statik RMS kabul edilir [20]. Bu hareket miktarı çekilebilir dizinler için uygun bir hareket aralığıdır.

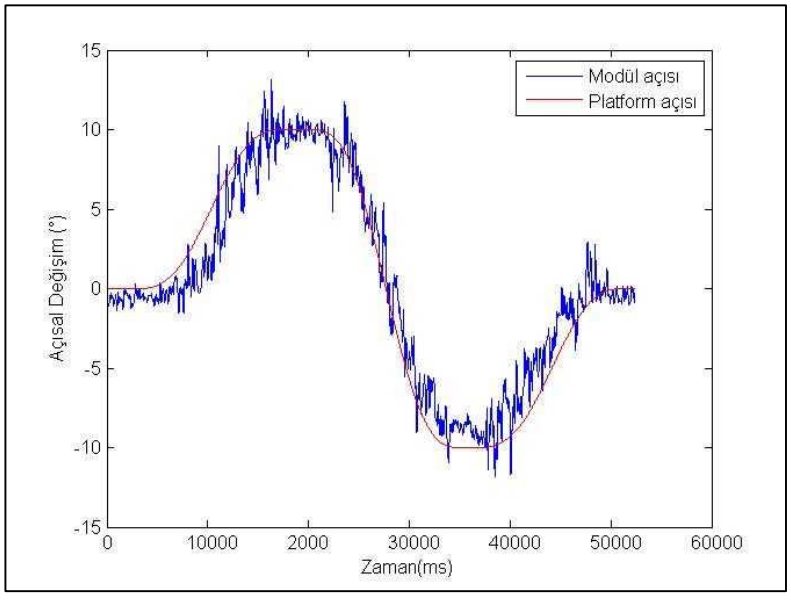
Test düzeneği ile önce +10 derece x ekseninde 15 saniye süren bir rotasyon uygulanmıştır. Sonrsasında x ekseninde, 10 saniye içerisinde +10 dereceden, -10 dereceye bir rotasyon uygulanmıştır. Sonrasında tekrar 0 konumuna geri dönülmüştür. Şekil 3.4'de kırmızı çizgi Stewart platformunun hareketini, mavi çizgi ise tez

kapsamında geliştirilen modülün hareketini gösterimiştir. X ekseninde statik RMS değeri 0,6542 derece bulunmuştur.



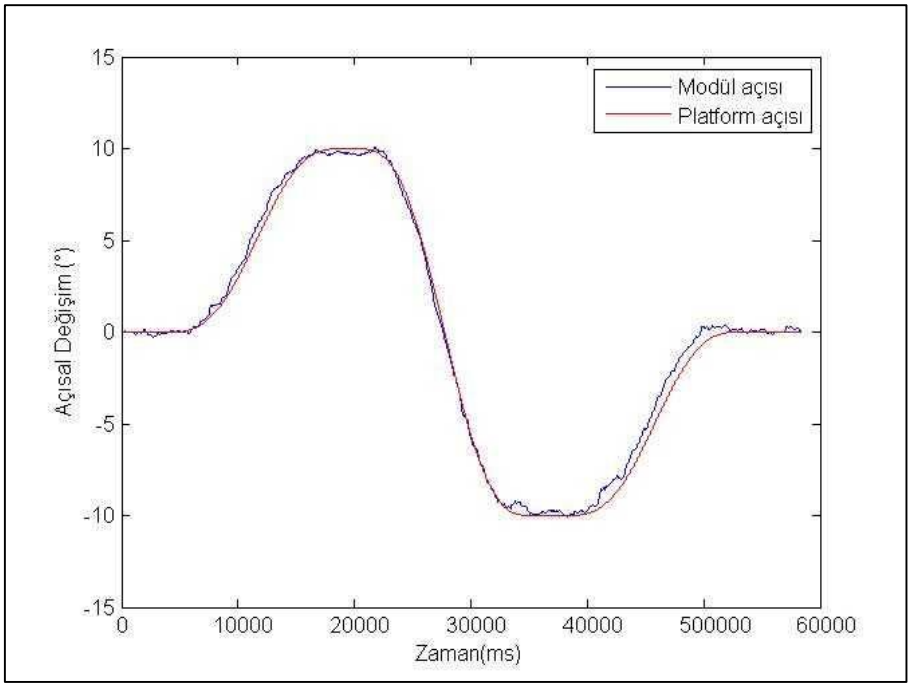
Şekil 3.4. X ekseninde gerçekleştirilen hareket

İkinci test olarak önce y ekseninde, 0 dereceden +10 dereceye 15 saniyelik bir rotasyon uygulanmıştır. Sonrasında x ekseninde, 15 saniye içerisinde +10 dereceden, -10 dereceye bir rotasyon uygulanmıştır. Sonrasında tekrar 0 konumuna geri dönülmüştür. Şekil 3.5'de yapılan harekette elde edilen veriler gösterilmektedir. Y ekseninde statik RMS değeri 1,671 derece bulunmuştur.



Şekil 3.5. Y ekseninde gerçekleştirilen hareket

Üçüncü test olarak önce z ekseninde, 0 dereceden +10 dereceye 15 saniyelik bir rotasyon uygulanmıştır. Sonrasında x ekseninde, 15 saniye içerisinde +10 dereceden, -10 dereceye bir rotasyon uygulanmıştır. Sonrasında tekrar 0 konumuna geri dönülmüştür. Şekil 3.6'da yapılan harekette elde edilen veriler görülmektedir. Z ekseninde statik RMS değeri 0,4238 derece bulunmuştur. Ayrıca Madgwick'in [20] yapmış olduğu ölçümler ile de karşılaştırması Tablo 3.1'de yapılmıştır.



Şekil 3.6. Z ekseninde gerçekleştirilen hareket

Tablo 3.1. Statik RMS performansı

	Kalman tabanlı algorirma	Madgwick algortiması	Tez test sonuçları
X ekseni statik RMS performansı	0,789˚[20]	0,581˚[20]	0,6542˚
Y ekseni statik RMS performansı	0,819˚[20]	0,502˚[20]	1,671˚
Z ekseni statik RMS performansı	1,150˚[20]	1,073˚[20]	0,4238˚

Tablo 3.1'de görüldüğü üzere Y eksenindeki hata miktarı beklenenden yüksek çıkmıştır. Y eksenindeki hata miktarının yüksek çıkmasının nedeni olarak, kullanılan platformun 6 adet doğrusal motorun oluşturduğu manyetik gürültüden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Algoritmadaki manyetik alan sensörünün Y ekseninde normalizasyona gerek duymamasından dolayı manyetik gürültü Y ekseninde hatalara sebep olabilir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması sonucunda, üzerinde 3 eksen MEMS ciroskop, 3 eksen manyetik alan sensörü ve 3 eksen ivme sensörü olan, CAN iletişim protokolü ile haberleşen bir gömülü elektronik ciroskop pusula modülü geliştirilmiştir. Sensörlerin veri füzyonu, Madgwick [3, 22] tarafından önerilen algoritma mikrodenetleyici üzerinde gerçeklenmiştir. Stewart platformu ile yapılan testlerde modülün başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür.

Tez çalışmasında elde edilen modül, donanım olarak hedeflenen ince çekilebilir dizinlerde kullanılabilecek boyutlara indirilmiştir. Birden fazla sensörün aynı ağ üzerinden düzgün bir şekilde veri yolladığı görülmüştür.

Donanım daha fazla küçültebilmek için, BGA pinli mikrodenetleyici kullanımasını önermekteyiz. Ayrıca kullanılan 0402 standart direnç ve kondansatörler yerine 0201 standardı daha ufak pasif elemanlar kullanılabilir. Fakat bu malzemelerin kullanımı beraberinde lehimleme ve montaj zorluklarını da beraberinde getirecektir. Kara ve hava platformlarında kullanılması için aynı ürünün RS-232 ve USB iletişim arayüzü olan modellerinin türetilmesi, sistem entegrasyonu açısından uygun olacaktır.

Yazılım olarak hedeflediğimiz üzere x, y, ve z eksenlerindeki yönelim açısını elde edilmiştir. Sadece son testler aşamasında Stewart platformu kullanılmıştır. Dolayısı ile en optimum β ve ζ katsayıları için kapsamlı testler yapılmalıdır. Ayrıca farklı bant genişlikleri ve normalizasyon katsayıları değiştirilerek sonuçlar kontrollü bir ortamda test edilmelidir.

KAYNAKLAR

[1] Madgwick S. O. H., Harrison A. J. L., Vaidyanathan R., Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm, *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, Zurich, Switzerland, June 29 2011 - July 1 2011.

[2] Nasiri S., A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status, http://invensense.com/mems/gyro/documents/whitepapers/MEMSGyroComp.pdf (Ziyaret tarihi: 17.03.2014).

[3] Caruso M. J., Bratland T., AMR magnetic field sensors, http://archives.sensorsmag.com/articles/0399/0399_18/index.htm (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2014).

[4] Biroğul S., Sönmez Y., Güvenç U., Neden Veri Füzyonu, *Politeknik Dergisi*, 2007, **10** , 3.

[5] Klein L. A., *Sensor and data fusion concepts and application*, 2nd ed., SPIE,Bellingham, 1999.

[6] Weisstein W. E., Eric Weissten's world of science, Science World, http://scienceworld.wolfram.com/physic (Ziyaret tarihi:16 Mart 2014).

[7] Hall D., *Mathematical techniques in multisensor data fusion*, 2nd ed., Artech House, Pennsylvania, 2004.

[8] Hall L. D., Llinas J., An introduction to multisensor data fusion, *Proceedings of the IEEE*, 1997, **85**, 6-23.

[9] Richardson J. M., Marsh K. A., Fusion of multi-sensor data, *Int. J. Robotics Research*, 1988, **7**, 78-96.

[10] Wald L., Some terms of reference in data fusion, *Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**, 1190-1193.

[11] Hall D. L., Llinas J., A challenge for the data fusion community I: Research imperatives for improved processing, *Proc. 7th Natl. Symp. On Sensor Fusion*, Albuquerque, 1994, **1**, 17.

[12] Llinas J., Hall D. L., A challenge for the data fusion community II: Infrastructure imperatives, *Proc. 7th Natl. Symp. On Sensor Fusion*, 1994, **1**, 14.

[13] Gelfaud J., "*Selective guide to literature on artificial intelligence and expert systems*", 1st ed., American Society For engineering education, Washington, 1992.

[14] Faragher R., Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, **28**, 128-132.

[15] Premerlani W., Bizard P., Direction cosine matrix imu: Theory, gentlenav.googlecode.com/files/DCMDraft2.pdf (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2014).

[16] A Guide To using IMU (Accelerometer and Gyroscope Devices) in Embedded Applications, Starlino, http://www.starlino.com/imu_guide.html (Ziyaret tarihi : 10 Şubat 2014).

[17] Mahony R., Hamel T., Pflimlin M., Complementary filter design on the special orthogonal group SO (3), *44th IEEE Conference on Decision and Control and The European Control Conference*, Seville, Spain, 12-15 Dec 2005.

[18] Baldwin G., Mahony R., Trumpf J., Hamel T., Cheviron T., Complementary filter design on the Special Euclidean group SE (3), *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, Florida, USA, 12-15 Dec 2011.

[19] Mahony R., Hamel T., Pflimlin J. M., Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group, *IEEE Transactions on Automatic Control*, DOI: 10.1109/TAC.2008.923738.

[20] Madgwick S. O. H., An Efficient Orientation Filter For Inertial And Inertial / Magnetic Sensor Arrays, Department of Mechanical Engineering, University of Bristol, http://www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf (Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2014).

[21] DCM Tutorial – An Introduction to Orientation Kinematics, http://www.starlino.com/dcm_tutorial.html (Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2014).

[22] Eberly D., Rotation Representations and Performance Issues, Geometric Tools LLC, http://www.geometrictools.com/Documentation/RotationIssues.pdf (Ziyaret Tarihi: 20.02.2014).

[23] Diebel J., Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors, Stanford University, www.swarthmore.edu/NatSci/mzucker1/e27/diebel 2006attitude.pdf (Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2014).

[24] Welch G., Bishop G., An Introduction to the Kalman Filter, Department of Computer Science University of North Carolina, http://www.cs.unc.edu/ ~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2014).

[25] Simon D., Kalman Filtering, Embedded Systems Programming, http://academic.csuohio.edu/simond/cources/eec644/kalman.pdf (Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2014).

[26] ST Microelectronics, L3G4200D MEMS motion sensor, ST, www.st.com/st-web-

ui / active / en / resource / technical / document / datasheet/CD00265057.pdf (Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2014).

[27] ST Microelectronics, TA0343 Technical article: Everything about STMicroelectronics 3-axis digital MEMS gyroscopes, ST, http://www.adafruit.com/datasheets/STMEMS.pdf (Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2014).

[28] ST Microelectronics, AN3192 Application Note, ST, http://www.pololu.com/file/download/LSM303DLH-compass-app-note.pdf?file_id=0J434, (Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2014).

[29] Pasolini F., Geo-magnetic sensors: propelling disruptive consumer apps, www.eetasia.com/ART_8800601197_480500_TA_098bb1f5.HTM (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2014).

[30] ST Microelectronics, LSM303DLHC datasheet, ST, http://www.pololu.com/file/download/LSM303DLHC.pdf?file_id=0J564 (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2014).

[31] Robert Bosch GmbH, CAN Specification Version 2.0, BOSCH, http://esd.cs.ucr.edu/webres/can20.pdf (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2014).

[32] Texas Instruments, SLOA101A Application Report: Introduction to the Controller Area Network, http://www.ti.com/lit/an/sloa101a/sloa101a.pdf (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2014).

[33] Kizir S., Bingül Z., Fuzzy impedance and force control of a Stewart Platform, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, DOI: 10.3906/elk-1208-54.

[34] Bingül Z., Kizir S., Haptik Kontrollü Stewart Platformu ile Endoskop Konumlama, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK-2012),* Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Bayramcık G.**, Urhan O., An Embedded Orientation Estimation Module for Thin Line Towed Arrays, *21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Lefkosa, North Cyprus, 24-26 April 2013.

ÖZGEÇMİŞ

1987 Zonguldak doğumlu olan Bayram Gürkan Bayramcık ilk ve orta öğretimini Bartın'da tamamladı. Bartın Davut Fırıncıoğlu Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2005 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden 2010 yılında Lisans derecesini aldı.

Ağustos 2009 yılında Sualtı Sistemleri Teknoloji Geliştirme San.Tic. Ltd. Şti.'de araştırmacı olarak çalışmaya başladı. 2010 yılında "European Conference on Underwater Acoustics" konferansında gönüllü olarak çalıştı. 2013 yılında Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Teknogirişim Sermaye desteği programına önermiş olduğu projesi kabul edildi. Nisan 2013 ayından beri E2DAS Elektrik Elektronik Dizayn ve Analiz Sistemleri San. Tic. Ltd. Şti. firmasında şirket sahibi olarak gömülü sistem tasarımı üzerine çalışmaktadır.