İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEMS DUYARGALI EYLEMSİZLİĞE DAYALI SEYRÜSEFER DİZGESİ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Meriç YÜCEL

Anabilim Dalı: Disiplinler Arası Programlar
Programı: Savunma Teknolojileri

Tez Danışmanı: Yrd. Doç.Dr. Burak Berk ÜSTÜNDAĞ

OCAK 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEMS DUYARGALI EYLEMSİZLİĞE DAYALI SEYRÜSEFER DİZGESİ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Meriç YÜCEL
(514051007)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Ocak 2009

Tez Danışmanı : Yrd. Doç.Dr. Burak Berk ÜSTÜNDAĞ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Hakan TEMELTAŞ (İ.T.Ü.)
Doç. Dr. Levent TRABZON (İ.T.Ü.)

OCAK 2009

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasına başlamamı teşvik eden ve çalışma sürem boyunca değerli görüşleri ile bana sürekli yardımcı olan tez danışmanım Sn. Yrd. Doç. Dr. Berk Üstündağ'a ve yaptığı devre tasarımı ile deneylerimi daha kolay yapabilmeme olanak sağlayan Sn. Ali İhsan Yılmaz'a değerli katkılarından dolayı teşekkür ediyorum.

Bu çalışmamı, tüm öğrenim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini bir an olsun dahi esirgemeyen başta babam İhsan Atilla Yücel ve annem Nezihe Yücel olmak üzere tüm aileme ithaf ediyorum.

Ocak 2009

Meriç Yücel

Bilgisayar Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR ..... **v**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **viii**
ÖZET ..... **x**
SUMMARY ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Tarihsel Gelişim 2
1.3 Modern Çağ Seyrüsefer Sistemleri 4
1.4 Eylemsizliğe Dayalı Duyarga Sistemlerindeki Yönelimler 5
2. SEYRÜSEFER KOORDİNAT SİSTEMLERİ **6**
2.1 Yaygın Kullanılan Seyrüsefer Çerçeveleri 6
2.1.1 Atalet çerçevesi 7
2.1.2 Dünya çerçevesi 7
2.1.3 Seyrüsefer çerçevesi 7
2.1.4 Wander-Azimuth çerçevesi 7
2.1.5 Gövde çerçevesi 7
2.2 Referans Çerçeve Dönüşüm Hesaplama 8
2.2.1 Doğrultu kosinüsleri matrisi 8
2.2.2 Euler açıları 9
2.2.3 Kuaterniyonlar 11
3. EDSD, KALMAN FİLTRESİ **15**
3.1 Eylemsizliğe Dayalı Seyrüsefer Dizgesi 15
3.1.1 EDSD sistem konfigürasyonu 15
3.1.1.1 Sabit düzlem sistemleri 15
3.1.1.2 Analitik EDSD sistemleri 17
3.1.2 Jiroskoplar 17
3.1.2.1 Mekanik jiroskoplar 18
3.1.2.2 Optik jiroskoplar 19
3.1.2.3 MEMS jiroskoplar 20
3.1.3 Doğrusal ivmeölçerler 21
3.1.3.1 Mekanik ivmeölçerler 21
3.1.3.2 Katı hal ivmeölçerler 21
3.1.3.3 MEMS ivmeölçerler 22
3.2 Analitik EDSD 22
3.2.1 Analitik EDSD hareket denklemleri 22
3.2.2 EDSD hataları 27
3.2.2.1 EDSD hataları ve etkileri 28
3.2.2.2 EDSD kalibrasyon 30
3.2.3 Kalman filtresi 33

3.2.3.1 Ayrık Kalman filtresi 33
3.2.3.2 Kalman filtresi ve seyrüsefer 35
4. SEYRÜSEFER ALGORİTMASI VE TEST SONUÇLARI 40
4.1 Seyrüsefer Algoritması 40
4.1.1 İlk durumların ayarlanması 41
4.1.1.1 Seyrüsefer çerçeve eksenlerinin ayarlanması 41
4.1.1.2 Duyarga ilk durum ayarları 41
4.1.1.3 Konum ve yönelim ilk değerlerinin atanması 42
4.1.1.4 Kalman filtresi ilk durumlarının belirlenmesi 42
4.1.2 İteratif konum ve yönelim bulma 43
4.1.3 Hata düzeltme 44
4.2 Test Sonuçları 48
4.2.1 İteratif analitik EDSD test sonuçları 48
4.2.2 Sezgisel hata ile iteratif analitik EDSD test sonuçları 50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 51
KAYNAKLAR 52
EKLER 54
ÖZGEÇMİŞ 56

KISALTMALAR

EDSD	**:** Eylemsizliğe Dayalı Seyrüsefer Dizgesi
MEMS	**:** Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler
MOEMS	**:** Mikro-Optik-Elektro-Mekanik Sistemler
YAD	**:** Yüzey Akustik Dalga
EDHB	**:** Eylemsizliğe Dayalı Hesaplama Birimi
HLJ	**:** Halka Lazer Jiroskop
FOJ	**:** Fiber Optik Jiroskop
DCM	**:** Doğrultu Kosinüsleri Matrisi (Rotasyon Matrisi)
a-çerçeve	**:** Atalet Çerçevesi
d-çerçeve	**:** Dünya Çerçevesi
s-çerçeve	**:** Seyrüsefer Çerçevesi
wa-çerçeve	**:** Wander-Azimuth Çerçevesi
g-çerçeve	**:** Gövde Çerçevesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 **:** EDSD hataları ve hata etkisi..... 28
Çizelge 3.2 **:** Sabit duyarga hatası ve konuma etkisi örneği…… 29
Çizelge 4.1 **:** ADIS16350 duyarga hassasiyetleri..... 41

ŞEKİL LİSTESİ

			Sayfa
Şekil 2.1	:	Dünya üzerinde seyrüsefer çerçeveleri	6
Şekil 2.2	:	Gövde çerçevesi	8
Şekil 2.3	:	G-çerçeve koordinat sisteminin S-çerçeve cinsinden tanımı	9
Şekil 2.4	:	Euler açıları	10
Şekil 2.5	:	Değişmez eksen i	12
Şekil 2.6	:	Kuaterniyon birim vektör yönelimi ve dönüş açısı	12
Şekil 3.1	:	Sabit düzlem EDHB	16
Şekil 3.2	:	Temel sabit düzlem EDS algoritması	16
Şekil 3.3	:	Temel analitik EDSD çalışma algoritması	17
Şekil 3.4	:	Konvansiyonel jiroskop	18
Şekil 3.5	:	Sagnac etkisi	19
Şekil 3.6	:	Titreşen kütle jiroskopu	20
Şekil 3.7	:	Eksenlerin yönelimi	23
Şekil 3.8	:	Küresel eksenler ve dünyanın dönüşü	25
Şekil 3.9	:	Kalman filtresi döngüsü	35
Şekil 3.10	:	Kalman filtresi	36
Şekil 3.11	:	Jiro X duyarga ve Kalman çıktısı (75°/s çalışma modunda)	37
Şekil 3.12	:	Jiro Y duyarga ve Kalman çıktısı (75°/s çalışma modunda)	37
Şekil 3.13	:	Jiro Z duyarga ve Kalman çıktısı (75°/s çalışma modunda)	37
Şekil 3.14	:	Jiro X duyarga ve Kalman çıktısı (300°/s çalışma modunda)	38
Şekil 3.15	:	Jiro Y duyarga ve Kalman çıktısı (300°/s çalışma modunda)	38
Şekil 3.16	:	Jiro Z duyarga ve Kalman çıktısı (300°/s çalışma modunda)	38
Şekil 3.17	:	İvmeölçer X duyarga ve Kalman çıktısı	39
Şekil 3.18	:	İvmeölçer Y duyarga ve Kalman çıktısı	39
Şekil 3.19	:	İvmeölçer Z duyarga ve Kalman çıktısı	39
Şekil 4.1	:	Genel seyrüsefer algoritması akış diyagramı	40
Şekil 4.2	:	İlk durumların belirlenmesi algoritması genel akış diyagramı	43
Şekil 4.3	:	Seyrüsefer blok diyagramı	44
Şekil 4.4	:	İvme X duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları	46
Şekil 4.5	:	İvme Y duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları	47
Şekil 4.6	:	İvme Z duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları	47
Şekil 4.7	:	Jiro X duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktılar	47
Şekil 4.8	:	Jiro Y duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları	48
Şekil 4.9	:	Jiro Z duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları	48
Şekil 4.10	:	İteratif EDSD hareketsiz ölçüm	49
Şekil 4.11	:	İteratif EDSD hareketli ölçüm	49
Şekil 4.12	:	Sezgisel hata düzeltme ile seyrüsefer testi	50
Şekil A.1	:	Tek boyutta iteratif ve kayan ortalamalı kayıklık hataları	55

SEMBOL LİSTESİ

G	:	Yer çekimi ivmesi
C_g^s	:	Gövde çerçevesinden seyrüsefer çerçevesine dönüşüm matrisi
$\vec{r}^{\,s}$	:	S-çerçeve vektörü
$\vec{r}^{\,b}$	:	G-çerçeve vektörü
ψ	:	Yalpa açısı
θ	:	Dikilme açısı
ϕ	:	Yatış açısı
P	:	Jiro x açısal hızı
Q	:	Jiro y açısal hızı
R	:	Jiro z açısal hızı
U	:	G-çerçeve x ekseni hızı
V	:	G-çerçeve y ekseni hızı
W	:	G-çerçeve z ekseni hızı
$\dot{U}$	:	G-çerçeve x ekseni ivmesi
$\dot{V}$	:	G-çerçeve y ekseni ivmesi
$\dot{W}$	:	G-çerçeve z ekseni ivmesi
q_0, q_1, q_2, q_3	:	Kuaterniyon parametreleri
$\vec{Q}$	:	Kuaterniyon vektörü
W	:	Açısal hız
M	:	Kütle
V	:	Hız
F	:	Kuvvet
A	:	İvme
λ	:	Enlem değeri
μ	:	Boylam değeri
H	:	Yükseklik değeri
$\dot{\lambda}$	:	Enlemdeki değişim oranı
$\dot{\mu}$	:	Boylamdaki değişim oranı
$\dot{H}$	:	Yükseklik değişim oranı
Ω	:	Dünyanın batıdan doğuya açısal hızı
ω'	:	Açısal hız
V_K	:	S-çerçeve kuzey eksen hızı
V_D	:	S-çerçeve doğu eksen hızı
V_A	:	S-çerçeve aşağı eksen hızı
X_K	:	S-çerçeve kuzey eksen konumu
X_D	:	S-çerçeve doğu eksen konumu
X_A	:	S-çerçeve aşağı eksen konumu
X_S	:	S-çerçeve x eksen konumu

y_S	:	S-çerçeve y eksen konumu
z_S	:	S-çerçeve z eksen konumu
R_d	:	Dünyanın yarıçapı
$\delta\phi$	:	Yatış hızı
$\delta\theta$	:	Dikilme hızı
$\delta\psi$	:	Yalpa hızı
l_ω	:	Ölçülen açısal oran
ω	:	Gerçek açısal oran
b_ω	:	Jiroskop kayıklığı
S	:	Doğrusal ölçekleme birimi matrisi
N	:	Dikey olmama matrisi
$\varepsilon(\omega)$	:	Duyarga gürültüsü
l_f	:	Ölçülen ivme
f	:	Gerçek kuvvet
b_f	:	İvmeölçer kayıklığı
S_1	:	Doğrusal ölçekleme birimi matrisi
S_2	:	Doğrusal olmayan ölçekleme birimi matrisi
$\varepsilon(f)$	:	Duyarga gürültüsü
δg	:	Teorik yerçekimi kuvvetinden sapma
Δt	:	Toplam geçen süre
$\delta p(t)$	:	Pozisyon hatası toplamı
δp_0	:	t_0 zamanındaki pozisyon hatası
δv_0	:	t_0 zamanındaki hız hatası
δb_{0a}	:	t_0 zamanındaki kalan ivmeölçer kayıklığı
δb_{0g}	:	t_0 zamanındaki kalan jiroskop kayıklığı
$\delta\alpha_0$	:	t_0 zamanındaki dikey hizalama hatası
δH_{0z}	:	Azimut hizalama hatasının $V\Delta t$ yaklaşık mesafesi ile çarpımı
SF_{0a}	:	İvmeölçer kalan ölçekleme birimi hatası
SF_{0g}	:	Jiroskop kalan ölçekleme birimi hatası
F	:	Ölçülen ivme
$\vec{r}^{\,b}$	:	Duyargaların yukarı yönünde ölçümleri
$l_f^{aşağı}$	:	Duyargaların aşağı yönünde ölçümleri
K	:	Bilinen referans

MEMS DUYARGALI EYLEMSİZLİĞE DAYALI SEYRÜSEFER DİZGESİ

ÖZET

Seyrüsefer sistemleri geçmişte olduğu gibi günümüzde de çok ilgi duyulan bir konudur. Seyrüsefer belirli bir referansa göre konum, hız ve yönelim bulma işlemidir. Eylemsizliğe Dayalı Seyrüsefer Dizgesi ise konum, hız ve yönelimi herhangi bir dış referans sistemden bağımsız, kendi kendine hesaplayabilen bir sistemdir. Eylemsizliğe Dayalı Seyrüsefer Dizgeleri, 3 adet ivmeölçerden ölçülen ivme değerleri ve 3 adet jiroskoptan ölçülen açısal hız değerlerini kullanarak belirli başlangıç değerlerine göre konum, yönelim ve hızı bulur.

İkinci dünya savaşı ile başlayan süreçte teknolojiye paralel olarak gelişen duyargalar ile çeşitli EDSD'ler günümüze kadar yapılagelmiştir. EDSD hataları zamanla hızla büyüdüğünden yalnız başına çalışan bir seyrüsefer dizgesi için çok hassas ve kaliteli duyargalara ihtiyaç vardır. Duyarga kalitesi arttıkça buna paralel olarak maliyet, hacim, enerji tüketimi vb. de artmaktadır. 20.yy.ın sonlarında MEMS teknolojisinin gelişimi ile bu problemler büyük ölçüde aşılmıştır. Ancak günümüz teknolojisinde MEMS duyarga hassasiyetleri ve kaliteleri büyük ölçüde gelişmiş olsa da, pahalı fiber optik ve lazer duyargalar seviyesinde değildir. Yakın gelecekte bu seviyeye gelecekleri düşünülmektedir. Düşük bütçeli EDSD'lerin hata paylarının zamanla üstel olarak artması, genelde EDSD'leri başka bir seyrüsefer sistemi ile paralel olarak çalıştırılması yöntemini doğurmuştur. Buna alternatif olarak, seyrüseferin niteliği, coğrafi özellikleri ve seyrüsefer yapan kişi/aracın özelliklerine göre EDSD hata düzenleme algoritmaları geliştirmek de mümkündür.

Bu çalışmada, genel EDSD çalışma prensipleri anlatılmış, EDSD hataları belirtilmiş, iteratif ve hata denetimsiz çalışan EDSD sistem yazılımı tasarlanmış, sezgisel hata sezme algoritmaları, Kalman filtresi, kayan ortalamalı kayıklık filtreleri ile EDSD sistem yazılımı güncellenmiş ve farklar ortaya konulmuştur. Sonuç bölümünde, genel bir değerlendirme yapılmış ve daha iyi sonuç alabilmek için önerilerde bulunulmuştur.

INERTIAL NAVIGATION SYSTEM WITH MEMS INERTIAL SENSORS

SUMMARY

Navigation system design is a highly impressive subject today, as it in the past was. Navigation is basically a process which is focused on finding position, velocity and orientation according to a particular reference point. On the other hand, Inertial Navigation System (INS) is a system that can find position, velocity and orientation without the need for external references. INS calculates position, velocity and orientation according to a start point by measuring the linear acceleration of the system with 3 accelerometers and angular velocity of the system with 3 gyroscopes.

Parallel to the technological developments made since II. World War, many kinds of INS has been produced. As INS navigation errors increases with respect to time, very qualified and sensitive inertial sensors are required for un-aided INS. Also with the enhancement of the sensor quality, the size, energy consumption and cost of the systems have raised. In the late 20th century, with MEMS sensor development, many these constraints were solved. In spite of the fact that technology today is not capable of developing inertial MEMS sensors as qualified as fiber optic or laser inertial sensors, MEMS sensors are expected to reach that level in the near future. Because of the high error increase of low cost INS systems with respect to time, they are aided with other navigation systems. Alternatively, it is possible to develop INS error compensation algorithms according to navigation type, geographic conditions and navigating person/vehicle's properties.

In this study, general INS system principles and INS errors are explained. Plus, iterative INS software without error inspection is developed. In addition, the INS software is updated by heuristic error compensation algorithms, Kalman filter and moving average offsets and the differences of the methods are defined. In conclusion part, a general conclusion is given and future works are suggested.

1. GİRİŞ

Seyrüsefer insanlık tarihi kadar eski bir kavramdır. İlk çağlardan bu yana değişik seyrüsefer teknikleri kullanılagelmiştir. İz bırakma, sabit yıldız kullanımı, harita okuma ve pusuladan gelişmiş seyrüsefer tekniklerine kadar birçok teknik buna örnek olarak verilebilir. Belirli bir başlangıç noktasından başka bir noktaya gitmek/varmak ve gidiş yolu üzerinde hangi konumda olduğunu bilmek günümüz dünyasında da çok ilgi duyulan bir çalışma alanıdır.

Eylemsizliğe Dayalı Seyrüsefer Dizgesi (EDSD) dünya üzerinde veya uzayda herhangi bir istasyon ile haberleşmeye veya referans almaya ihtiyaç duymadan seyrüsefer yapabilen bir dizgedir. Radyo dalgalarının kullanılmadığı tek uzun menzilli seyrüsefer sistemidir. Bir bilgisayar ile beraber görev yapmakta ve tamamıyla dışarıdan bağımsız olarak çalışmaktadır. Seyrüsefer yapan aracın bir noktadan başka bir noktaya en kısa yoldan gidebilmesi, herhangi bir anda aracın konumu ve doğrultusunun tespit edilmesi amacına hizmet eder. Seyrüsefer bilgisayarı ve atalet ölçme sistemi olmak üzere iki alt elemanı vardır (Titterton ve Weston, 2004).

1.1 Tezin Amacı

Fiber optik ve lazer teknolojilerini kullanan duyargalarla üretilen, güvenilir konum bilgisi sağlayan EDSD'lerin seyrüseferde kullanımında enerji tüketimi, boyut, maliyet gibi engeller ortaya çıkmaktadır. Yarı iletken teknolojisini kullanan atalet duyargalarının güvenilirliği fiber optik ve lazer duyargalara oranla çok daha düşüktür. Bu yüzden karasal seyrüsefer sistemlerinde bu duyargalar, belirli bir referans konumlama sistemi ile (GPS gibi) paralel çalışır. Bu sistemi kullanan seyrüsefer cihazlarında, genelde GPS küresel konumlamayı ve GPS verisine göre yüksek frekansta konum bilgisi veren EDSD'ler de GPS sinyal gelme aralığında anlık davranışı modellemede kullanılır. Herhangi bir dış seyrüsefer sistemi ile çalışma durumunun olmadığı alanlarda, seyrüsefer bilgisi yalnızca EDSD'ler ile sağlanmalıdır. Bu gibi alanlar için düşük maliyetli bir EDSD gerçeklemek ve

seyrüsefer yapan kişinin davranış modellerine ve seyrüseferin niteliğine göre bir EDSD algoritması geliştirmek amaçlanmaktadır.

1.2 Tarihsel Gelişim

İlkçağlardan bu yana insanlar güzergâhlarını bularak veya bilerek bir yerden başka bir yere gitmişlerdir. İlk önce karada gelişen seyrüsefer teknikleri daha uzaklara gitmek ve yeni yerler bulmak için gelişimini sürdürmüş, denizlerde, denizin altında, karada, havada ve uzayda ihtiyaçtan doğan sorunlara cevap bulmak için sürekli gelişmiştir.

İlk çağlardaki insanlar temel ihtiyaçları için seyrüsefer yapmaktaydı. Yemek aramak, iklim şartlarından göçmek vb. sebeplerle seyrüsefer yapan insanlar yerimlerini kullanmışlardır. Bunlar, gözleme dayalı seyrüsefere örnek gösterilebilir. Zamanla gelişen pozisyon sabitleme teknikleri ile Polinezyalılar Pasifik Okyanusu'nu gökimlerini ve yerimlerini kullanarak geçmişlerdir.

13. yy.da Çinlilerin pusulayı keşfetmeleri ile uzun mesafeli seyrüseferlerin yapılabilmesine olanak sağlanmıştır. Uzun mesafeli seyrüseferler için bir başka mihenk taşı ise Sekstant'ın bulunmasıdır. Sekstant, gök cisimleri ile ufuk çizgisi bağlantısından rota hesabı ve pozisyon düzeltmek için kullanılmaktadır.

Her ne kadar eylemsizliğe dayalı duyargaların keşfi için bir kaç yüzyıl beklemek gerekse de 17. yy.da Eylemsizliğe Dayalı Seyrüsefer'in dayalı olduğu temel ilkeler Sör Isaac Newton tarafından bulunmuştur. 18 yy.ın başlarında birçok önemli gelişme olmuştur; Serson'ın kararlılaştırılmış sekstantı ve Harrison'ın kronometreyi bulması ile ufuktan referans almadan gökyüzü cisimlerini görmeye olanak sağlanmış, gök cisimlerinin yerlerinin bulunduğu referans tabloları kullanılarak daha doğru seyrüsefer yapmayı olağan kılmıştır.

Foucault geniş bir çevre tarafından, 1852 yılında jiroskobik etkiyi ilk keşfeden kişi olarak anılır. En azından bu kelimeyi kullanan ilk kişidir. Bohneberger, Johnson ve Lemarle da benzer cihazlar üretmişlerdir. Tüm bu bilim adaları dünyanın döngüsel hareketi ve döngüsel dinamikleri belirlemek üzere çalışmışlardır. 19 yy.da pek çok başarılı çalışan jiroskoplar geliştirilmiştir.

20.yy.ın başlarında jiroskoplu pusulanın keşfi gerçekleşmiştir. Bulunan ilk jiroskoplu pusula ivmeye duyarlı idi. Kuzeyi bulmak için kullandığı temel çalışma prensibi, pusulayı taşıyan alanın dönüşünden kaynaklanan açısal momentum ile cihazın salınımı arasındaki dengeyi sağlamak prensibine dayalıdır. Dr. Max Schuler'in bu dönemde ivmeye duyarlılığı ortadan kaldıracak yeni buluşları dönemin önemli gelişmeleri arasında gösterilebilir. Daha sonra bu buluşlar "Schuler Tuning" adı ile anılmıştır. Ayrıca, Elman ve Lawrence Sperry kardeşler jiroskoplu pusulanın gelişimi ve jiroskobik etkinin kontrol altına alınması ile ilgili bu dönemde önemli çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmaları sonucunda uçaklar için oto pilot, seyrüsefer cihazları ve torpidolarda kullanılan jiroskoplar üretilmiştir.

1920'lerde uçaklar için dönme gösterge oranı, yapay ufuk ve doğrultu jiroskopları üretilmiştir. Bu dönemde, sabit platform duyarga sistemlerinin keşfi ve ilgili cihazların geliştirilmesi sonucu bu cihazlar, gemilerin ateşleme sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, Boykow, ilk defa ivmeölçerlerin ve jiroskopların atalete dayalı bir seyrüsefer sisteminde kullanılabileceğini de bu dönemde belirtmiştir. Ancak bu dönemde atalet duyargalarının kalitesi böyle bir sistem yapmak için uygun değildi.

İkinci Dünya Savaşı'nda Alman bilim adamları V1 ve V2 roketlerinde eylemsizliğe dayalı yön bulma ilkelerini kullanmışlardır. Doğru yönelim ve pozisyon bulma açısından geri beslemeli bir sistem yapılması öncül bir adım olarak görülebilir. Bu dönemlerde dünyanın çeşitli bölgelerinde eylemsizliğe dayalı duyarga gelişimi önem kazanmıştır ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Tüm bu çalışmaların ortak hedefi daha doğru ölçüm yapabilen atalet duyargaları yapmaktı. Bu dönemin önemli bir gelişmesi ise 1949'da seyrüsefer için ilk kez analitik EDSD kavramının bir yayında önerilmesidir.

1950'lerin başlarında denizcilik ve havacılık alanlarında kullanılması amacı ile eylemsizliğe dayalı seyrüsefer teknikleri ve duyargalarında hızlı bir gelişim gözlenmiştir. Bu dönemde duyargaların gelişim süreci eski dönemlere oranla çok hızlanmıştır. Örneğin, jiroskop hataları 15°/saat'ten 0.01°/saat'e kadar düşürülmüştür. Bu gelişmelerle birlikte EDSD'ler 1960'larda askeri uçaklarda, denizaltılarda ve gemilerde standart teknoloji olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu döneme kadarki tüm ataletsel sistemlerde, Sabit Platform teknolojileri kullanılmıştır.

Bu dönemlerden sonra duyarga hassalığının düşürülmesi ve duyarga boyutlarının küçültülmesi konularında önemli gelişmeler olmuştur. Ve nihai olarak, halka lazer jiroskopların üretilmesi çalışmalarına başlanmıştır. Bu dönemlerdeki en önemli gelişme, ataletsel sistem teknolojilerinin balistik füze geliştirme ve uzay programlarında kullanılmaya başlanmasıdır.

Son 25 yılda mikro bilgisayar teknolojisindeki ve yüksek dinamik menzilli jiroskoplardaki gelişim analitik EDSD teknolojisinin gerçeklenmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmeler ataletsel sistemlerin boyutları ve karmaşıklığını büyük ölçüde azalttığı için daha yaygın ve kolay olarak kullanılmasını sağlamıştır. Minyatür oran-jiroskopları, dinamik olarak ayarlanmış jiroskoplar ve daha sonraları halka lazer ve fiber optik oran duyargaları ve titreşimli jiroskopların üretilmesi, bu dönemdeki gelişmelerin başlıcaları olarak gösterilebilir.

Son yıllarda nanoteknolojideki gelişime paralel olarak Mikro-Elektro-Mekanik duyargaların gelişmesi, EDSD'nin uygulama alanlarının genişlemesini sağlayacak heyecan verici bir gelişim olarak görülebilir. Bu duyargalar ucuzlayan maliyet ve boyutlarıyla birçok yeni uygulamada ataletsel duyargaların kullanılmasına olanak sağlamıştır.

1.3 Modern Çağ Seyrüsefer Sistemleri

Günümüzde EDSD'lerin kullanımı çok geniş bir perspektife yayılmıştır ve hızla her geçen gün kullanım alanları daha da yaygınlaşmaktadır. Gemilerin, uçakların, stratejik füzelerin ve uzay araçlarının hemen hepsinde, EDSD'ler standart teknoloji olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, özellikle son dönemlerde robotik sistemlerde ve yüksek performanslı motorların aktif süspansiyon sistemlerinde, yer altı kuyularında ve boru hatlarında vb. da EDSD'ler kullanılmaya başlanmıştır.

Seyrüsefer sistemlerinde kullanılan uygulamalar, yüksek performans seyrüsefer bilgisi sağlamanın yanında, bu bilgileri uzun süreli çalışmalarda yeterli doğrulukta sağlamalıdır. Örnek olarak, ataletsel seyrüsefer kullanan taktik füze uygulamaları dakikalar hatta saniyeler içinde uzun mesafeli hedeflerini bir kaç yüz metre hata payı içinde bulmalıdır. Diğer yandan, denizcilik ve uzay seyrüseferi için tasarlanmış EDSD'ler, seyrüsefer bilgisini haftalar, aylar hatta daha uzun süreler için hesaplamak durumundadır. Buna örnek olarak, uzayda, güneş sistemi etrafında araştırma yapan

Voyager adlı uzay aracı çalışmalarını 25 yıldan fazla süredir sürdürmesi gösterilebilir (Titterton ve Weston, 2004).

1.4 Eylemsizliğe Dayalı Duyarga Sistemlerindeki Yönelimler

Son on yılda, atalet duyargalarının kategorileri önemli derecede arttı. Mikro-elektro-mekanik sistemlerin (MEMS) gelişimi, EDSD sistemlerinde çok önemli bir ilerlemedir. Bu duyargaların gelişimi sadece ucuz olduğundan dolayı değil, her geçen gün hassalıklarının artması ile kullanım alanlarını yaygınlaştırması açısından da önemlidir. Orta dönemde, Mikro-optik-elektro-mekanik (MOEMS) duyargaların gelişimi ile yüksek performanslı duyargaların seyrüseferde kullanılabileceği düşünülmektedir.

Fiber optik jiroskopların gelişiminde sağlanan ilerleme, yakın vadede bu sistemin pahalı halka jiroskopların yerini alacağını göstermektedir.

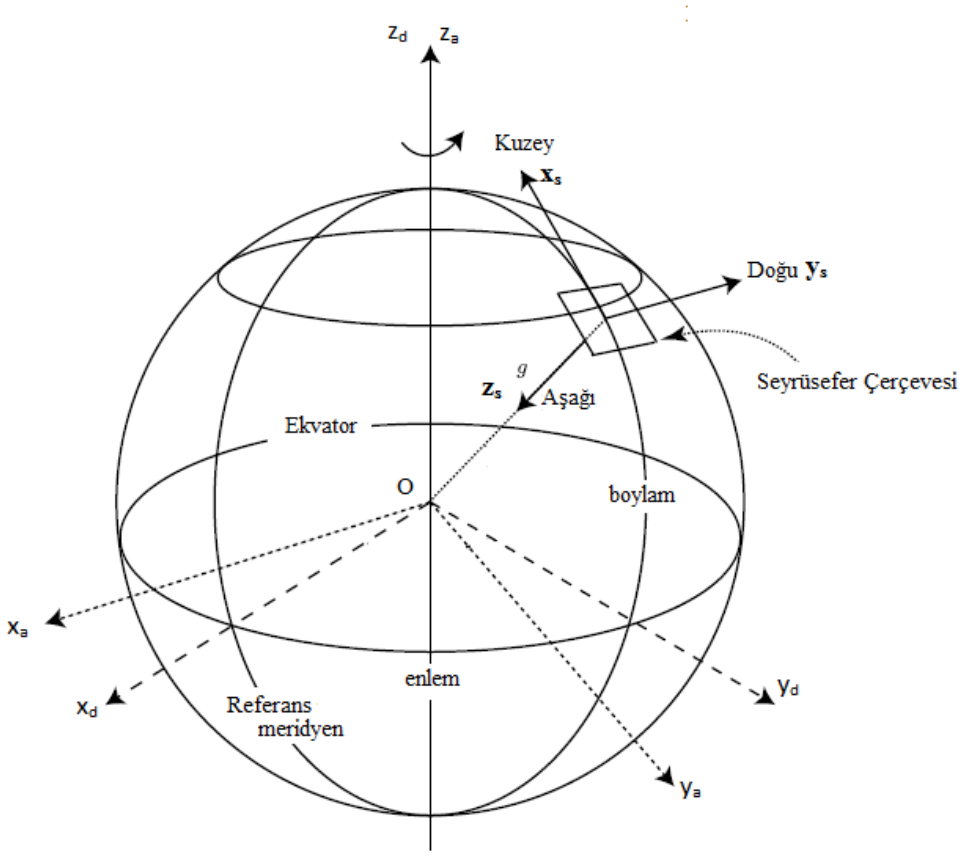
Soğuk atom girişimölçerlerin geliştirilmesi konusundaki araştırmalar (tamamlanmaktan çok uzaktadır günümüzde) devam etmektedir. Bu sistemin geliştirilmesi ile çok başarılı atalet duyargalarının üretilebileceği öngörülmektedir.

2. SEYRÜSEFER KOORDİNAT SİSTEMLERİ

Seyrüsefer sistemlerinin temel çalışması, seçilmiş bazı Kartezyen koordinat referans çerçevelerine bağlıdır. Her çerçeve dikey, sağ-el kuralına göre belirlenmiş koordinat çerçevesi veya eksen setleridir. Bu bölümde yaygın olarak kullanılan bazı seyrüsefer çerçeveleri ve çerçeveler arası dönüşüm anlatılacaktır.

2.1 Yaygın Kullanılan Seyrüsefer Çerçeveleri

Seyrüsefer sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bazı referans çerçeveleri **Şekil 2.1** 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Dünya üzerinde seyrüsefer çerçeveleri

2.1.1 Atalet çerçevesi (a-çerçeve)

Orijini dünyanın merkezindedir. Eksenleri Ox_a, Oy_a, Oz_a olmak üzere, dönüş yapmaz ve uzaydaki sabit yıldızlara göre ayarlanmıştır. Oz_a ekseni dünyanın kuzey kutbundan geçmektedir. **Şekil 2.1**'de detaylı olarak gösterilmiştir.

2.1.2 Dünya çerçevesi (d-çerçeve)

Bu koordinat sisteminin orijini dünyanın merkezidir ve dünya ile birlikte döner. X-ekseni dünyanın merkezinden sıfır meridyeni ile ekvatorun kesiştiği noktaya doğrudur; z-ekseni kuzey kutup noktasından geçer ve y-ekseni de sağ el gösterimini tamamlar. **Şekil 2.1**'de detaylı olarak gösterilmiştir.

2.1.3 Seyrüsefer çerçevesi (s-çerçeve)

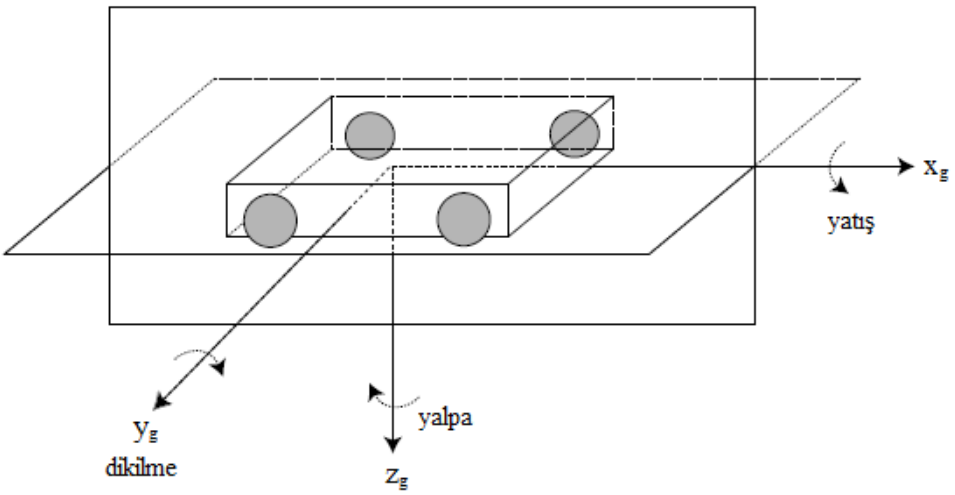
Yerel jeodezik çerçeve olarak da adlandırılır. Gündelik hayatta kullanılan kuzey ve doğu yönlerini eksen olarak kullanır. Eksenleri, seyrüsefer yapan cihazın yerel olarak merkezinden Kuzey, Doğu ve dünyanın merkezine doğrudur. **Şekil 2.1**'de detaylı olarak gösterilmiştir.

2.1.4 Wander-Azimuth çerçevesi (wa-çerçeve)

S-çerçevenin dünyanın dönüşü ile her zaman kuzeyi gösterebilmesi probleminden ortaya çıkan bir çerçevedir. Seyrüsefer çerçevesinin dünyanın kendi etrafında daimi dönüşünden kaynaklanan kuzeyden sapma etkisini çerçeve içinde hesaplayan bir çerçevedir.

2.1.5 Gövde çerçevesi (g-çerçeve)

Seyrüsefer sistemi üzerinde olan aracın dikey yatış, dikilme ve yalpa eksenlerine göre ayarlanmış eksen kümesidir. **Şekil 2.2**' de gövde çerçevesi görülmektedir.



Şekil 2.2: Gövde çerçevesi

2.2 Referans Çerçeve Dönüşüm Hesaplama

Seyrüsefer davranışının belirlenmesinde uygun çerçevelerin seçilmesi önemlidir. Bu seçim seyrüseferin coğrafi özellikleri ve davranışı ile doğrudan ilintilidir. Referans ve seyrüsefer için seçilen çerçeveler arasında dönüşüm yapılmalıdır. Analitik sistemlerde g-çerçeve anlık seyrüsefer davranışının belirlenmesinde kullanılır. Referans çerçeve ise seferin yapıldığı uzay için seçilmiş çerçevedir. G-çerçeve ile ölçülen anlık doğrultu, dönüş ve hız hesaplamaları referans çerçeveye aktarılarak, seyrüseferin konum değişikliği ve doğrultusu hesaplanabilir. Çerçeveler arası bu geçiş için değişik dönüşüm teknikleri kullanılmaktadır.

2.2.1 Doğrultu kosinüsleri matrisi (Rotasyon matrisi)

Doğrultu kosinüsleri matrisi (DCM), kolonları gövde eksenindeki birim vektörlerin referans eksenlere izdüşümünü gösteren 3x3 boyutlu bir matristir.

Doğrultu Kosinüsleri matrisi C_g^s simgesi ile **(2.1)'**de gösterilmiştir.

$$C_g^s = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{32} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Denklem **(2.1)**'in i. satır ve j. sütunundaki matris elemanı, referans çerçevenin i-ekseni ve gövde çerçevesinin j-ekseni arasındaki açının kosinüsünü vermektedir.

DCM, vektör dönüşümünde **(2.2)**'deki gibi kullanılır.

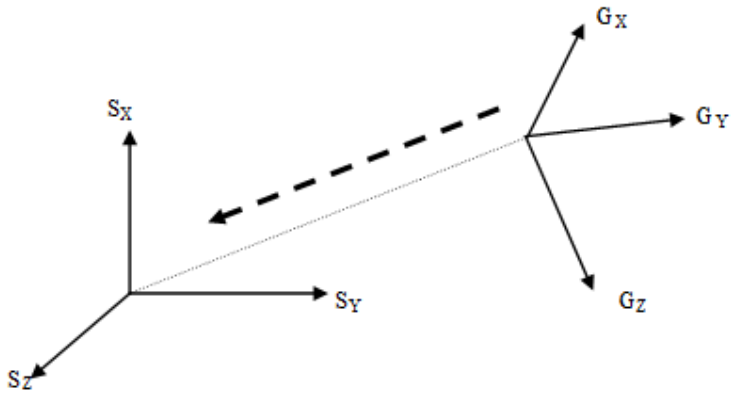
$$\vec{r}^{\,s} = C_g^s \vec{r}^{\,b} \qquad \textbf{(2.2)}$$

Denklem **(2.2)**'deki $\vec{r}^{\,s}$ s-çerçeveyi, $\vec{r}^{\,b}$ ise g-çerçeveyi göstermektedir.

G-çerçevedeki bir vektör, s-çerçeveye denklem **(2.2)'**deki formülle aktarılabilir. Yalnız, seyrüsefer yapabilmek için güncellenen veriler ile sürekli aktarım yapılmalıdır. DCM matrisinin parametreleri birbirinden bağımsız olarak tanımlanabilir. Yalnız dokuz parametreyi ayrı ayrı güncelleyebilecek bir yöntem yoktur. DCM parametrelerinin güncellenebilmesi için Euler açıları ve Kuaterniyonlardan yararlanılır.

2.2.2 Euler açıları

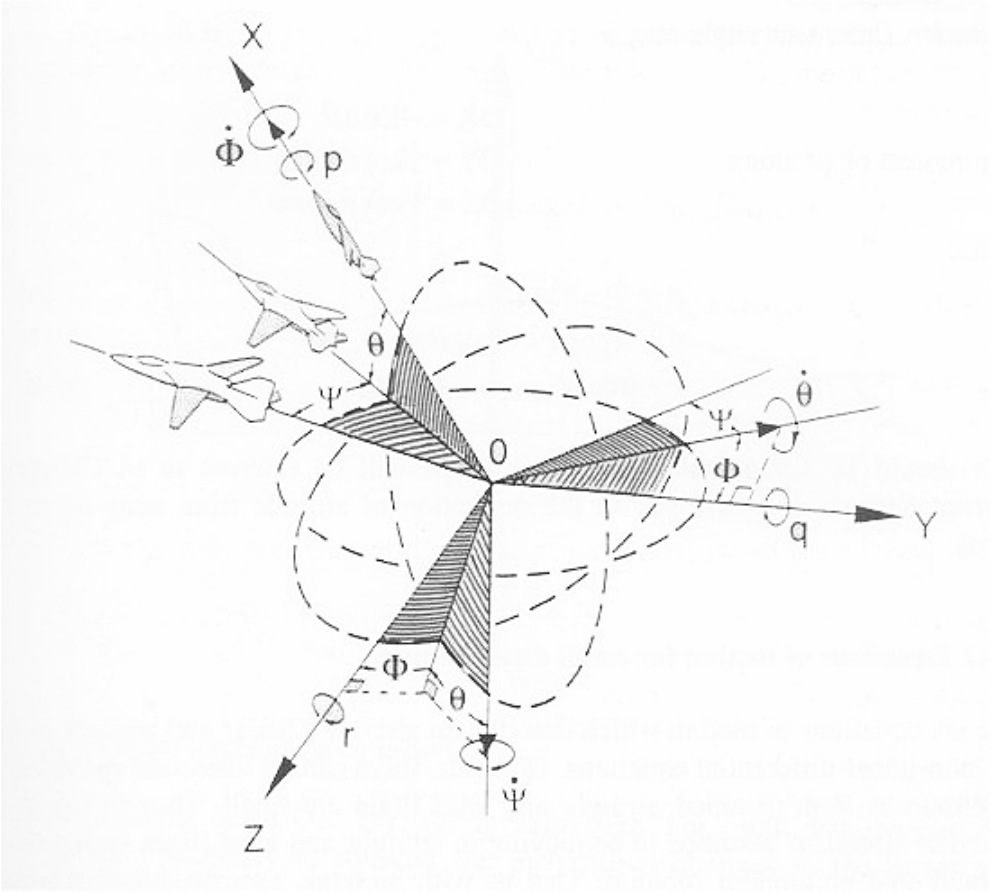
Bir koordinat çerçevesinden diğer bir koordinat çerçevesine dönüşüm 3 koordinat ekseni çevresinde, 3 dönüşüm ile gerçeklenebilir. **Şekil 2.3**'de iki referans çerçeve koordinat eksenleri görülmektedir.



Şekil 2.3: G-çerçeve koordinat sisteminin S-çerçeve cinsinden tanımı

Bir aracın sabit bir seyrüsefer çerçevesine göre yönelimi, üç Euler açısı ile tanımlanabilir. Sabit referans çerçeve eksenleri OX, OY, OZ' ye göre aracın hareketi

ve Euler açıları **Şekil 2.4** 'de gösterilmiştir. Hareket eksenlerindeki bir dizi döndürme ile aracın yönelimi OX, OY ve OZ eksenlerine dönüştürülebilir.



Şekil 2.4: Euler açıları

- Yalpa ekseninde saat yönünde ψ yalpa açısı kadar döndürme,

$$C_1 = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.3)}$$

- Yeni dikilme ekseninde saat yönünde θ dikilme açısı kadar döndürme,

$$C_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.4)}$$

- Yeni yatış ekseninde saat yönünde yatış açısı ϕ kadar döndürme

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.5)}$$

Referans çerçeveden (s-çerçeve) g-çerçeveye dönüşüm, bu üç matrisin çarpımı olarak ifade edilebilir.

$$C_s^g = C_3 C_2 C_1 \quad \textbf{(2.6)}$$

Aynı şekilde, g-çerçeveden referans çerçeveye ters dönüşüm denklem **(2.7)'**deki gibi ifade edilebilir. Eksenler birbirine dikey olduğu için ters dönüşüm matrisi çarpımın transpozesidir.

$$C_g^s = C_s^{gT} = C_1^T C_2^T C_3^T \quad \textbf{(2.7)}$$

Denklem **(2.6)**'daki değerler yerine denklem **(2.3)**, **(2.4)** ve **(2.5)**'deki matrisler yerleştirilirse;

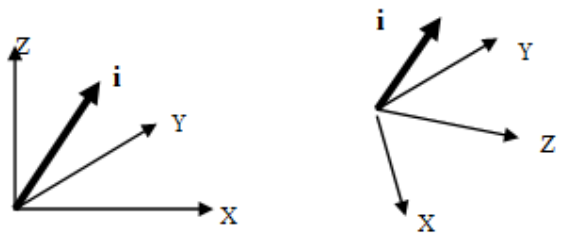
$$C_g^s = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.8)}$$

$$C_g^s = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\cos\phi\sin\psi+\sin\phi\sin\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\psi+\cos\phi\sin\theta\cos\psi \\ \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\cos\psi+\sin\phi\sin\theta\sin\psi & -\sin\phi\cos\psi+\cos\phi\sin\theta\sin\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.9)}$$

Denklem **(2.8)**'deki matris elemanlarının çarpım sonucu denklem **(2.9)**'da verilmiştir. Denklem **(2.9)**'daki matris denklem **(2.1)** ile verilen DCM matrisinin Euler açıları cinsinden ifade edilmesidir.

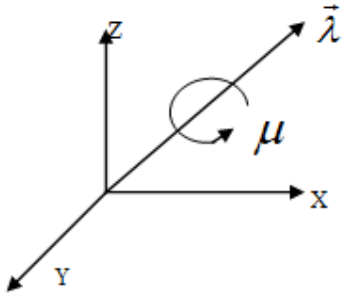
2.2.3 Kuaterniyonlar

Kuaterniyonlar, matematikte dördeyler ya da dördübir olarak da anılır. Euler'in teoremine göre iki koordinat sistemi arasında; bir koordinat sistemi kendi ekseni etrafında döndürüldüğünde, diğer koordinat ekseninin koordinat pozisyonlarını elde edebilecek şekilde değişmez bir eksen vardır.



Şekil 2.5: Değişmez eksen i

Kuaterniyonlar bu değişmez ekseni ve bu eksen etrafındaki dönüşü tanımlar. Kuaterniyonlar **Şekil 2.6**'da gösterilen $\vec{\lambda}$, yönelim birim vektörünü dönüş eksenini tanımlamak için kullanır. Bu eksen etrafındaki dönüşü tanımlamak için μ dönüş açısı kullanılır.



Şekil 2.6: Kuaterniyon birim vektör yönelimi ve dönüş açısı

Koordinat eksenlerinde Kuaterniyon birim vektör yönelimi ve koordinat eksen dönüşleri bir araya, parametreler q_0, q_1, q_2, q_3 olmak üzere dört Kuaterniyon parametresi ile oluşan $\vec{Q}$ Kuaterniyon vektörü ile getirilir.

$$\vec{Q} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mu/2) \\ (\mu_x/\mu)\sin(\mu/2) \\ (\mu_y/\mu)\sin(\mu/2) \\ (\mu_x/\mu)\sin(\mu/2) \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.10)}$$

Doğrultu Kosinüsleri Matrisi denklem **(2.10)**'daki modele göre aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$DCM_{KUATERNION} = \begin{bmatrix} q_0^2+q_1^2-q_2^2-q_3^2 & 2(q_1q_2-q_0q_3) & 2(q_1q_3+q_0q_2) \\ 2(q_1q_2+q_0q_3) & q_0^2-q_1^2+q_2^2-q_3^2 & 2(q_2q_3+q_0q_1) \\ 2(q_1q_3-q_0q_2) & 2(q_2q_3+q_0q_1) & q_0^2-q_1^2-q_2^2+q_3^2 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.11)}$$

Kuaterniyon açıları, bölüm **3**'de anlatılan seyrüsefer denklemlerinde seyrüsefer aracının hareket davranışını modellemekte kullanılacaktır. Kuaterniyon açı modelinin, tanımsızlığının olmaması ve DCM matrisini trigonometrik fonksiyonlardan bağımsız olarak oluşturması açısından modellemede iyi bir seçimdir. Kuaterniyon açı modellemesinin dezavantajları ise fiziksel olarak açıları görmenin zor olması ve her bilgisayar hesabından sonra normalizasyon yapılması gerekmesidir. Bu açıdan Euler açılarına ters dönüşüm yapılarak da seyrüsefer algoritması yapılandırılabilir.

Kuaterniyon parametrelerinin normalizasyonu modelin gerçek tanımdan fazla bilgi içermediğini garantilemeye dayanır. Bağımsız olmayan dört Kuaterniyon parametresi denklem **(2.12)**'yi sağlamalıdır.

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \quad \textbf{(2.12)}$$

Normalizasyon denklem **(2.13)** ile yapılır.

$$Q_{Normalleştirilmiş} = \frac{Q_{Yeni}}{|Q_{Yeni}|} = \frac{Q_{Yeni}}{\sqrt{q_{0\,yeni}^2+q_{1\,yeni}^2+q_{2\,yeni}^2+q_{3\,yeni}^2}} \quad \textbf{(2.13)}$$

Kuaterniyon ve Euler açıları arasında her Euler ve Kuaterniyon büyüklüklerini birbirine çevirebilme özelliği vardır. Euler açılarını kullanarak Kuaterniyon parametre hesabı DCM matrisini güncelleyebilmek için bir yöntemdir.

$$q_0 = \cos\frac{\phi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi}{2} + \sin\frac{\phi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi}{2} \quad \textbf{(2.14)}$$

$$q_1 = \sin\frac{\phi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi}{2} + \cos\frac{\phi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi}{2} \quad \textbf{(2.15)}$$

$$q_2 = \cos\frac{\phi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi}{2} + \sin\frac{\phi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi}{2} \quad \textbf{(2.16)}$$

$$q_3 = \cos\frac{\phi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi}{2} - \sin\frac{\phi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi}{2} \quad \textbf{(2.17)}$$

Ters dönüşüm (Euler açılarına dönüşüm) denklem **(2.12)**'deki Kuaterniyon matrisi değerleri kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$\phi = \arctan\left(\frac{2(q_0 q_1 + q_2 q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right) \quad \textbf{(2.18)}$$

$$\theta = \arcsin(2(q_0 q_2 - q_1 q_3)) \quad \textbf{(2.19)}$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{2(q_0 q_3 + q_1 q_2)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2}\right) \quad \textbf{(2.20)}$$

3. EDSD, KALMAN FİLTRESİ

3.1 Eylemsizliğe Dayalı Seyrüsefer Dizgesi

Eylemsizliğe dayalı seyrüsefer veya ataletsel seyrüsefer; ivmeölçer ve jiroskoplar aracılığıyla elde edilen ölçümlerin, bir cismin bilinen bir başlangıç noktası, yönelimi ve hızına göre durumunu ve yönelimini izlemek için kullanılan, kendi kendine yeten bir seyrüsefer tekniğidir. Eylemsizlik ölçüm birimleri, sırasıyla açısal hızı ve doğrusal ivmeyi ölçen üç dikey açısal-oran jiroskoptan ve üç dikey ivmeölçerden oluşur.

Ataletsel seyrüsefer; uçakların, taktik ve stratejik füzelerin, uzay gemilerinin, denizaltıların ve gemilerin seyrüseferi gibi pek çok uygulamada kullanılmaktadır. MEMS cihazlarının yapımındaki son gelişmeler küçük ve hafif eylemsizliğe dayalı seyrüsefer sistemlerinin üretimine imkân sağlamıştır. Kullanım alanları buna paralel olarak hızla yaygınlaşmaktadır.

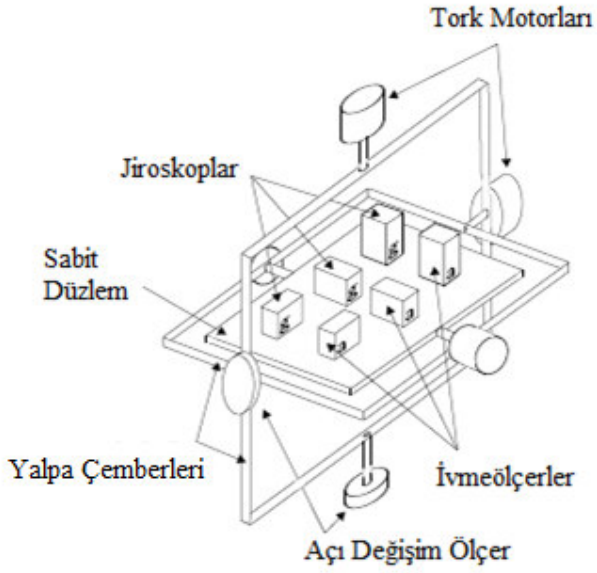
3.1.1 EDSD sistem konfigürasyonu

Çoğunlukla tüm Eylemsizliğe Dayalı Hesaplama Birimleri (EDHB) aşağıda belirtilen iki kategoriden birine girer. İki kategori arasındaki fark, açısal-oran jiroskoplar ile ivmeölçerlerin çalışma şekillerinin kaynağıdır.

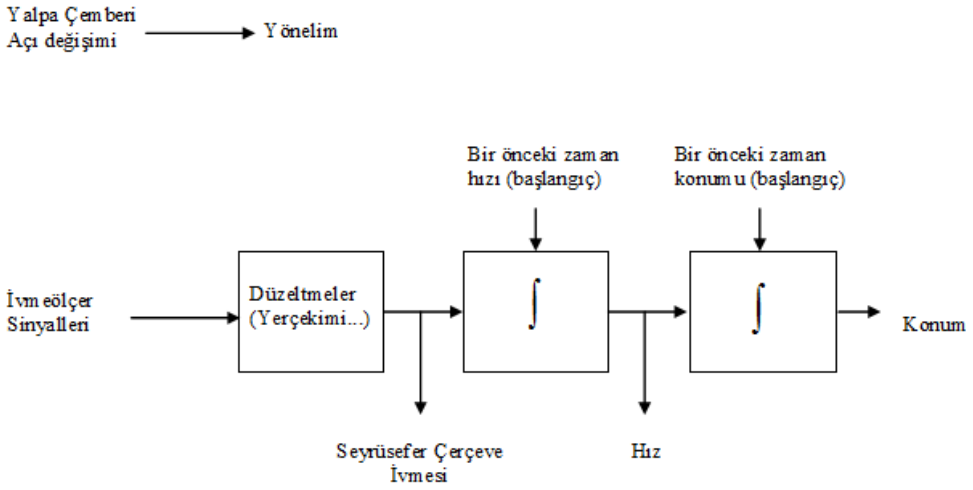
3.1.1.1 Sabit düzlem sistemleri

Sabit düzlem sistemlerinde, atalet duyargaları herhangi bir dış dönüş hareketinden izole edilmiş bir platform üzerine monte edilir. Başka bir deyişle, düzlem küresel referans çerçevesi ile aynı hizada tutulur. Bu durum **Şekil 3.1**'de gösterildiği gibi her 3 eksende düzleme serbestlik sağlayan yalpa çemberi veya çapraz mafsallı yatak kullanılarak platforma monte edilmesiyle sağlanır. Düzleme monte edilen jiroskoplar her düzlem dönüşünü saptar. Bu sinyaller dönüşleri engellemek için yalpa çemberlerini döndüren motorların devrini sağlar, böylece düzlem küresel çerçeve ile aynı hizada tutulur. Cihazın yönelimini izlemek için bitişik yalpa çemberleri arasındaki açılar açı değişim ölçer kullanılarak okunabilir. Cihazın durumunu

hesaplamak için düzleme monte edilen ivmeölçerlerden gelen sinyallerin iki kez integrasyonu alınır. İntegrasyon gerçekleştirilmeden önce dikey kanaldaki yerçekiminden kaynaklanan ivmeyi hesaptan çıkartmak gereklidir. Sabit düzlem eylemsizlik seyrüsefer algoritması **Şekil 3.2**'de gösterilmiştir.



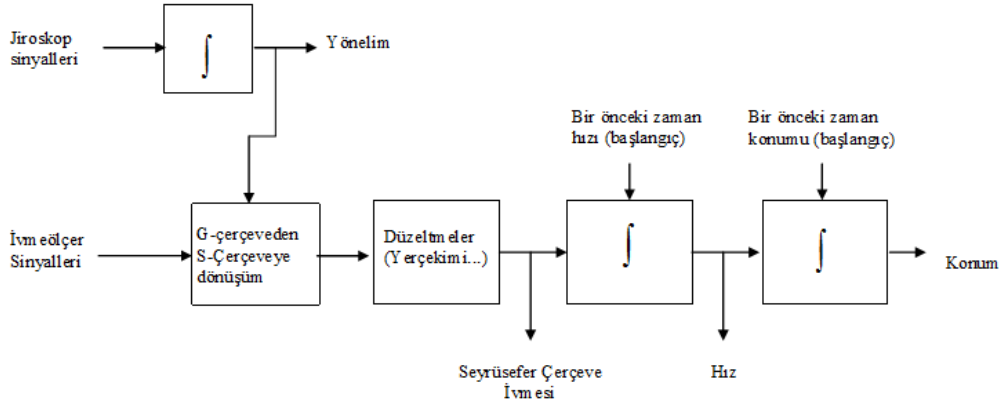
Şekil 3.1: Sabit düzlem EDHB



Şekil 3.2: Temel sabit düzlem EDS algoritması

3.1.1.2 Analitik EDSD sistemleri

Analitik sistemlerde atalet duyargaları, seyrüsefer aracının üzerine rijit olarak monte edilir ve böylece duyarga çıktı miktarları, referans seyrüsefer çerçevesi yerine gövde çerçevesinde ölçülür. Yönelimi izlemek için jiroskoplardan gelen sinyallerin integrasyonu alınır. Konumu bulmak için ise, 3 ivmeölçer sinyali jiroskop sinyallerinin integrasyonu ile belirlenen yönelimi kullanarak küresel koordinatlara dönüştürülür. Seyrüsefer çerçevesine dönüştürülen ivme sinyalleri daha sonra sabit düzlem algoritmasında olduğu gibi integre edilerek 3 boyutta hız ve konum bulunur. Temel Analitik EDSD algoritması bu şekilde kısaca özetlenebilir. Kullanılan referans çerçeveye ve kullanılan tekniklere göre bu algoritmada değişiklikler görülebilir. Bölüm **3.2** ve bölüm **4** 'de seyrüsefer algoritması daha detaylı incelenecektir.



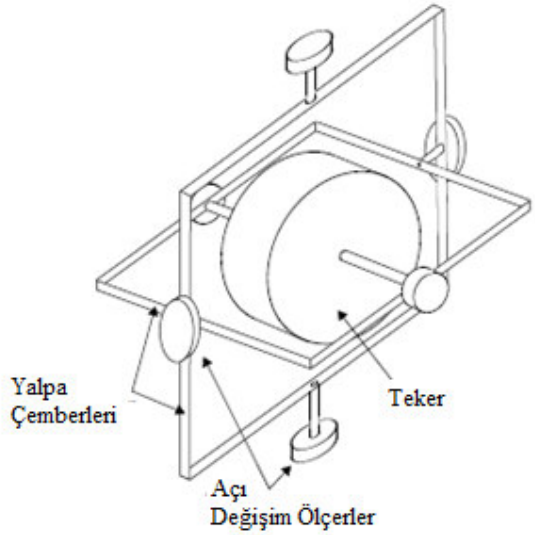
Şekil 3.3: Temel analitik EDSD çalışma algoritması

Sabit düzlem ve Analitik EDSD sistemleri aynı temel prensipler üzerine kurulmuştur. Analitik EDSD sistemleri mekanik karışıklığı azaltmıştır ve sabit düzlem sistemlerine göre şekil olarak daha küçüktür. Bütün bu avantajlar artan hesap karışıklığına neden olmuştur. Hesap maliyeti azaldıkça analitik sistemler EDSD'nin en baskın türü olmuştur.

3.1.2 Jiroskoplar

Jiroskoplar açısal hızı ölçmede kullanılır. Bazı jiroskop çeşitlerinin temel çalışma prensipleri aşağıda anlatılmıştır. Burada anlatılan jiroskop çeşitleri, tüm jiroskopları kapsayan geniş ve ayrıntılı bir liste değildir. Aşağıda belirtilen jiroskopların burada belirtilmeyen birçok çeşidi mevcuttur.

3.1.2.1 Mekanik jiroskoplar



Şekil 3.4: Konvansiyonel jiroskop

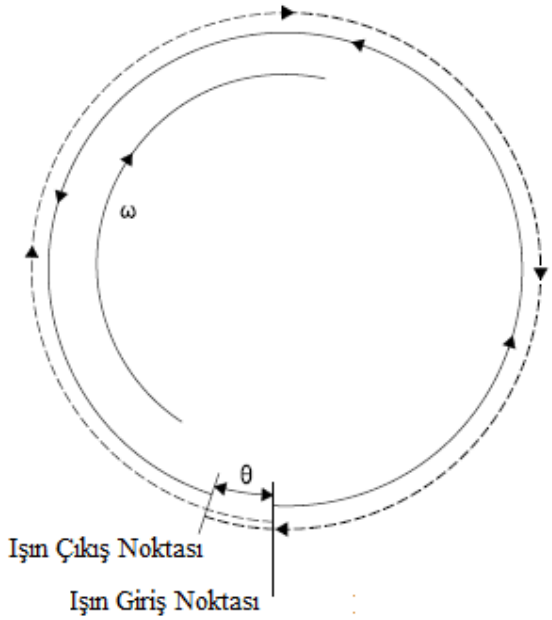
Konvansiyonel bir jiroskop **Şekil 3.4**'te gösterildiği gibi iki yalpa çemberi üzerine monte edilen ve her üç eksende dönmesini sağlayan bir döner çarktan oluşur. Açısal momentin korunmasının bir etkisi de döner çarkın yönelimdeki değişikliklere direnç göstermesidir. Bu nedenle mekanik bir jiroskop bir yönelime maruz kalırsa, çark sabit bir küresel yönelimde kalacak ve bitişik yalpa çemberleri arasındaki açı değişecektir. Cihazın yönelimini ölçmek için açı değişim ölçerler kullanılarak, bitişik yalpa çemberleri arasındaki açı okunabilir. Konvansiyonel bir jiroskop yönelimi ölçer. Buna karşılık, neredeyse tüm modern jiroskoplar (bölüm **3.1.2.3** ve **3.1.2.4**'te belirtildiği gibi optik ve MEMS jiroskop çeşitleri de dâhil) açısal hızı ölçen açısal-oran jiroskoplarıdır.

Mekanik jiroskopların başlıca dezavantajı, hareketli parçalara sahip olmasıdır. Hareketli parçalar sürtünmeye, sürtünme de çıktının sapmasına neden olur. Sürtünmeyi en aza indirmek için, cihazın maliyetine ek olarak yüksek seviyede duyarlı bağlantılar ve özel yağlar kullanılır. Ayrıca mekanik jiroskoplar, ilk durumda sistemin çalışmaya başlaması için bir kaç dakikaya gereksinim duyar ve bu her durumda mümkün olmayabilir.

3.1.2.2 Optik jiroskoplar

Fiber Optik Jiroskoplar (FOJ) açısal hızı ölçmek için ışığın girişim özelliğini kullanır. FOJ geniş bir optik tel bobininden oluşur. Eğilimi ölçmek için iki ışık ışını karşıt yönlerden bobine gönderilir. **Şekil 3.5**'de görüldüğü üzere, eğer duyarga bir dönüş yaparsa, dönüşün yönünde hareket eden ışın dönüşün aksi yönünde hareket eden ışına göre telin ucuna kadar daha uzun bir yol kat eder. Bu durum Sagnac Etkisi olarak bilinir. Işınlar teli terk ettiğinde birleşir. Sagnac Etkisi'nden kaynaklanan faz değişimi, ışınları karıştırarak şiddeti açısal hıza bağlı bir ışın birleşimine neden olur.

Halka Lazer Jiroskopların (HLJ) çalışma ilkesi de Sagnac Etkisi'ne dayanır. FOJ ve HLJ arasındaki fark; HLJ lazer ışınlarının optik bir tel yerine aynaların kullanıldığı kapalı bir yolun etrafını çevirmesidir.



Şekil 3.5: Sagnac etkisi.

Şekil 3.5'de *w* dönüş açısı yönünde ve dönüş açısına ters yönde dönüş görülmektedir. θ jiroskobun dönüşünün etkisi ile ışınlar arasında oluşan açıdır.

Mekanik jiroskopların tam tersine, optik jiroskopların hareketli parçaları yoktur ve başlatmak için sadece bir kaç saniye yeterlidir. Optik bir jiroskopun doğruluğu büyük ölçüde cihazın büyüklüğü ile sınırlanan ışık iletim yolunun (geniş olan daha iyidir.) uzunluğuna bağlıdır.

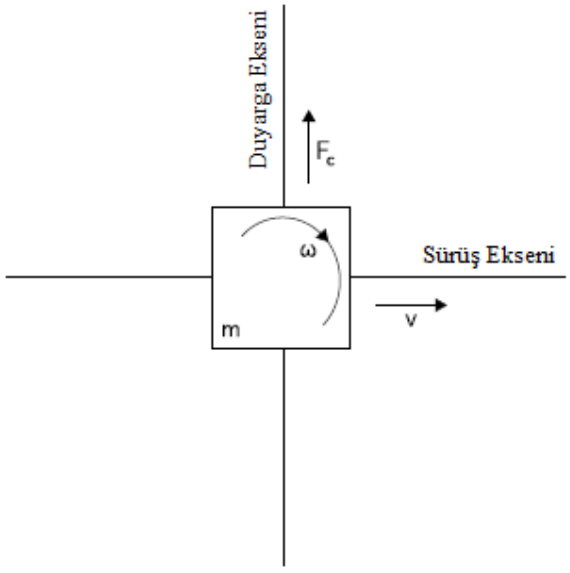
3.1.2.3 MEMS jiroskoplar

Son yıllardaki gelişmelere rağmen mekanik ve optik jiroskoplar halen karışık monte tekniklerine sahip çok fazla parçadan oluşmaktadır, bu nedenle pahalıdır. Buna karşılık, silikon mikro parçalı teknikler kullanılarak yapılan MEMS duyargaların az sayıda parçaları vardır (Bir MEMS jiroskopu 3 gibi az parça sayısından oluşabilir.) ve bu nedenle diğerlerine göre üretimi daha ucuzdur.

MEMS jiroskopların çalışma prensibi, Coriolis Kuvvet etkisini temel alır. Bu etki; bir referans çerçevesinde, w açısal hızında, m kütlesi, v hızıyla hareket ederken bir kuvvet oluşturur:

$$F_C = -2m(wxv) \qquad \textbf{(3.1)}$$

MEMS jiroskopları Coriolis etkisini ölçen titreşen maddeler içerir. Titreşen çarklar ve ses çatalı jiroskoplar gibi pek çok titreşen madde geometrileri bulunur. En basit geometri **Şekil 3.6**'da görüldüğü gibi yuvarlak bir eksenin etrafında titreşen tek bir kütleden oluşur. Jiroskop döndüğünde Coriolis kuvvetine bağlı olarak ikincil bir titreşim dik eksen üzerinde gerçekleşir. Bu ikincil dönüşü ölçerek açısal hız hesaplanabilir.



Şekil 3.6: Titreşen kütle jiroskopu

Günümüzde MEMS duyargaları optik cihazların doğruluk seviyesine erişememektedir ancak gelecekte erişebilecekleri düşünülmektedir. Aşağıda MEMS duyargalarının avantajlı özelliklerinin bir listesi yer almaktadır.

- Küçük boyut
- Düşük ağırlık
- Sağlam yapı
- Düşük enerji tüketimi
- Kısa başlatma süresi
- Ucuz üretim (yüksek miktarlarda)
- Yüksek güvenilirlik
- Düşük bakım
- Uygunsuz ortamlardaki operasyonlara uygun

Daha önce belirtildiği üzere, MEMS jiroskoplarının başlıca dezavantajı optik cihazlardan daha az doğruluk payına sahip olmalarıdır.

3.1.3 Doğrusal ivmeölçerler

Bir ivmeölçer genel olarak mekanik veya katı haldeki cihaz olarak sınıflandırılabilir. Bu bölümde MEMS ivmeölçerlerinde olduğu gibi iki çeşit ivmeölçer tanımlanmıştır. Burada sadece temel prensipleri verilmiştir.

3.1.3.1 Mekanik ivmeölçerler

Mekanik bir ivmeölçer yaylarla asılan bir kütleden oluşur. Kütlenin yer değişimi, girdi ekseninin yönünde kütlenin üzerine etki eden kuvvete (F) orantılı bir sinyal veren yer değiştirme değişim ölçeri kullanılarak ölçülür. Cihazın üzerine etki eden ivmeyi hesaplamak için Newton'un ikinci kanunu; $F=ma$ kullanılır.

3.1.3.2 Katı hal ivmeölçerler

Katı haldeki ivmeölçerler yüzey akustik dalgası, titreşimli, silikon ve kuvars cihazlarını kapsayan çeşitli alt gruplara ayrılabilir. Katı haldeki ivmeölçerler küçük, güvenilir ve sağlamdır.

Katı haldeki ivmeölçerlere Yüzey Akustik Dalga (YAD) ivmeölçeri örnek olarak verilebilir. Bir YAD ivmeölçeri belirli bir frekansta tınlayan bir dirsek ışınından oluşur. Bir kütle, ışığın serbest hareket edebilen bir ucuna bağlanır, diğer uç ise

sıkıca kasaya bağlanır. Girdi ekseni boyunca bir ivme uygulandığında dirsek eğilir. Bu, yüzey akustik dalga frekansının uygulanan gerilime orantılı olarak değişmesine neden olur, frekanstaki bu değişimi ölçerek ivme belirlenebilir.

3.1.3.3 MEMS ivmeölçerler

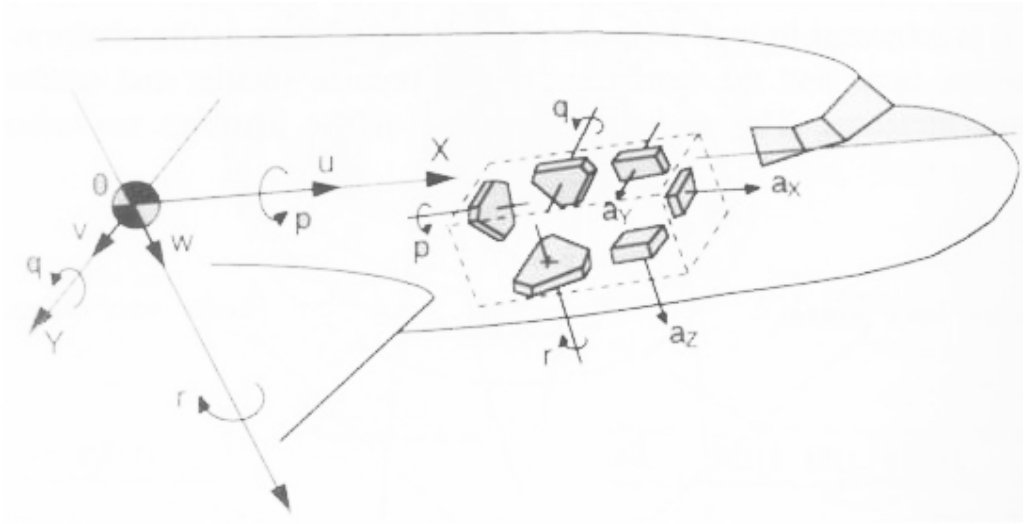
Mikro parçalı silikon ivmeölçerleri, mekanik ve katı haldeki duyargalarla aynı prensipleri kullanır. MEMS ivmeölçerlerinin başlıca iki çeşidi vardır. İlk çeşit MEMS teknikleri kullanılarak üretilen mekanik ivmeölçerlerden (ör: destekli bir kütlenin yer değişimini ölçen cihazlar) oluşur. İkinci çeşit, YAD ivmeölçerlerinde olduğu gibi, basınç değişiminden kaynaklı, titreşen maddelerin frekansındaki değişimi ölçen cihazlardan oluşur.

MEMS duyargalar için **3.1.2.3** bölümünde sıralanan avantajları jiroskoplarda olduğu gibi ivmeölçerlerde de geçerlidir. Küçük ve hafiftirler, düşük enerji tüketimine ve kısa başlatma sürelerine sahiptirler. Başlıca dezavantajları, MEMS cihazlarının performansının hızla artmasına rağmen, geleneksel teknikler kullanılarak üretilen ivmeölçerler kadar doğruluk payına sahip olmamalarıdır.

3.2 Analitik EDSD

3.2.1 Analitik EDSD hareket denklemleri

EDSD dikey olarak ayarlanmış 3-eksenli jiroskop ve 3-eksenli ivmeölçerden oluşmaktadır. İvmeölçer ve jiroskop duyargaları seyrüsefer aracının üzerine **Şekil 3.7**'deki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.7: Eksenlerin yönelimi

Şekil 2.4'de seyrüsefer yapan bir aracın yönelimi ve Euler açıları gösterilmişti. G-çerçevede açısal hızlar yatış, dikilme ve yalpaya karşılık düşen Euler açıları hızları denklem **(3.2)** ile elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.2)}$$

Euler açıları ϕ, θ *ve* ψ açılarının son durumu, denklem **(3.2)**'deki jiroskoptan okunan p, q, r değerleri ile elde edilen Euler açı değişimleri ve seyrüsefer yapan aracın bir önceki an Euler açıları değerleri ile toplanarak (integrasyon) elde edilebilir. Yalnız denklem **(3.2)**'de dikilme açısının 90° olduğu durumlarda tan θ değeri sonsuza yaklaştığı için tanımsız olur. Bu problemi aşabilmek için Kuaterniyon matematiği kullanılır.

Kuaterniyon parametreleri q_0, q_1 , q_2 ve q_3 olmak üzere bu parametreler, açısal oran cinsinden aşağıdaki denklemlerdeki gibi yazılır.

$$\dot{q}_0 = -0.5(q_1 p + q_2 q + q_3 r) \quad \textbf{(3.3)}$$

$$\dot{q}_1 = 0.5(q_0 p + q_2 r - q_3 q) \quad \textbf{(3.4)}$$

$$\dot{q}_2 = 0.5(q_0 q + q_3 p - q_1 r) \quad \textbf{(3.5)}$$

$$\dot{q}_3 = 0.5(q_0 r + q_1 q - q_2 p) \quad \textbf{(3.6)}$$

Denklem **(3.3)**, **(3.4)**, **(3.5)** ve **(3.6)**'daki q_0**,** q_1 **,** q_2 ve q_3 Kuaterniyon parametreleri denklem **(2.13)** eşitliğini sağlamak durumundadır.

Yukarıdaki denklemler q_0**,** q_1 **,** q_2 ve q_3 parametrelerinin zaman geçmişini yaratmakta kullanılabilir. Bu 4 parametrenin ilk durum değerlerini hesaplamada kullanılacak Euler açılarının ilk durum değerleri **2.** bölümde, denklem **(2.15)**, **(2.16)**, **(2.17)** ve **(2.18)**'de verilmişti.

Kuaterniyon parametrelerinin zaman geçmişi hesaplandıktan sonra, Euler açıları hesaplanabilir. Euler açılarının hesaplanma formülü denklem **(2.19)**, **(2.20)** ve **(2.21)**'de verilmişti.

Hesaplanan Euler açıları ile seyrüsefer aracının hareket davranışı bulunur. Konum hesaplamak için ivmeölçerlerden gelen veriler kullanılır. U**,** V**,** W g-çerçeve eksenleri x,y,z boyunca ölçülen hızlar olmak üzere; bu eksenlerdeki ivme değerleri, dönüşler ve yerçekiminden kaynaklı etkiyen ivme değerleri yok sayılırsa aşağıdaki denklemlerdeki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{U} = a_x \tag{3.7}$$

$$\dot{V} = a_y \tag{3.8}$$

$$\dot{W} = a_z \tag{3.9}$$

Pratikte ve teoride dünya üzerinde seyrüsefer yaparken g-çerçevede ölçülen ivme değerlerine bir takım ivme değerleri etki eder. Aracın eksenler etrafında dönüşü sırasında, dönüşlerden kaynaklanan merkezkaç ivmesi ve yerçekimi ivmesi değerleri g-çerçevedeki gerçek ivme değerini bulmak için hesaba katılmalıdır.

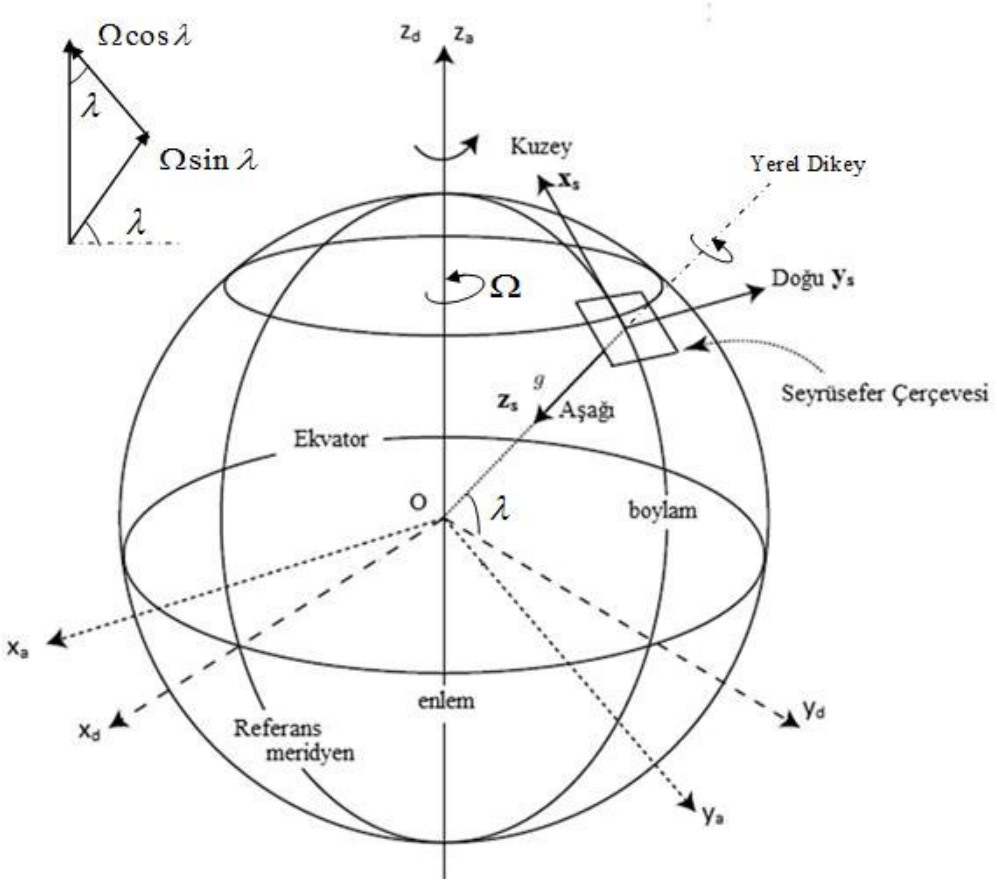
Dünya üzerindeki konuma göre, yerçekimi modeli (g) uygulanırsa ve merkezkaç ivmelerinin eksenlerdeki değerleri hesaba katılırsa; denklem **(3.7)**, **(3.8)** ve **(3.9)**'un aşağıdaki gibi tekrar düzenlenmesi gerekir. Bu denklemlerdeki p, q, r değerleri jiroskoplardan okunan açısal hız değerleridir.

$$\dot{U} = a_x + Vr - Wq + g\sin\theta \tag{3.10}$$

$$\dot{V} = a_y - Ur + Wp - g\cos\theta\sin\phi \tag{3.11}$$

$$\dot{W} = a_z + Uq - Vp - g\cos\theta\cos\phi \tag{3.12}$$

Denklem **(3.10)**, **(3.11)** ve **(3.12)**'deki eşitliğin sağ tarafındaki ilk parametreler, g-çerçevede ivmeölçerlerden ölçülen ivme değerlerini göstermektedir. Son parametreler, yerçekimi düzeltmesi, kalan parametreler de merkezkaçtan doğan ivmenin düzeltilmesidir. Aynı denklemlerdeki *g* değeri yerçekimi ivmesidir. Yerçekimi ivmesi *g,* dünyanın şekli ve dünya yüzeyinden yüksekliğe göre değer değiştirir. EDSD'nin çalışacağı seyrüsefer modeline göre bu değişimler hesaba katılabilir ama bu tezde g değeri sabit olarak alınmıştır.



Şekil 3.8: Küresel eksenler ve dünyanın dönüşü

Dünyanın güney-kuzey ekseni etrafında batıdan doğuya doğru dönüşünden kaynaklanan açısal hız (Ω) da jiroskoplardan ölçülen değerleri etkilemektedir. Dünya **Şekil 3.8**'deki gibi saatte yaklaşık 15° dönmektedir. Dünyanın bu dönüşünün 3 eksendeki etkisi denklem **(3.13)**'deki gibi ifade edilir. λ boylam değerini göstermektedir.

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega\cos\lambda \\ 0 \\ -\Omega\sin\lambda \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.13)}$$

Seyrüsefer yapan araç yer yüzeyinden belirli bir yükseklikte ise araca, denklem **(3.13)**'de gösterilen ek bir açısal hız etkir. Bu hesap uçak, roket vs gibi uygulamalarda yaygınca kullanılır. Denklem **(3.14)**'deki $\dot{\mu}$ ve $\dot{\lambda}$ sırası ile boylam ve enlemdeki değişim oranıdır.

$$\omega' = \begin{bmatrix} \dot{\mu}\cos\lambda \\ -\dot{\lambda} \\ -\dot{\mu}\sin\lambda \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.14)}$$

Gerçek açısal hızları bulabilmek için gövde çerçevesinde ölçülen açısal hızlardan Ω ve ω' açısal hızları çıkarılmalıdır. Bu açısal hızlar denklem **(3.13)** ve **(3.14)**'de s-çerçevede tanımlandığı için ilgili açısal hızlar önce gövde çerçevesine dönüştürülmelidir. Bölüm **2**, denklem **(2.6)** ile s-çerçeveden g-çerçeveye dönüşüm matrisi DCM'nin Euler açıları cinsinden ifade edilişi verilmişti. Denklem **2.9**'daki DCM matrisinin transpozesi ile s-çerçeveden g-çerçeveye dönüşüm yapılır. Bu durumda, s-çerçevede hesaplanan ek açısal hızların g-çerçeveye etkisi denklem **(3.13)**'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}_{Gerçek} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}_{Ölçülen} - DCM^{T}[\Omega + \omega'] \quad \textbf{(3.15)}$$

Yükseklik değeri (yer yüzeyine olan mesafe) dünyanın yarıçapına göre önemsenmeyecek kadar az değişen ve yerel seyrüseferler için tasarlanmış EDHB'lerde, yükseklikten doğan ek açısal hız hesaba katılmayabilir. Enleme göre değişen düzeltme ise yerel seyrüsefer dizgelerinde enlem değişimi önemsenmeyecek kadar az olduğundan, seyrüsefer yapılan enlem değerleri ilk durum sabit değer olarak belirlenip sisteme parametre olarak girilebilir. Ayrıca duyarga hassasiyeti yanında dünyanın dönüşünden kaynaklanan ek açısal hız, göreceli olarak küçük kalıyorsa pratikte bu hesap da yapılmayabilir.

Düzeltilmiş açısal oranlara göre, denklem **(3.10)**, **(3.11)** ve **(3.12)**'de g-çerçevede hesaplanan $\dot{U}$ **,** $\dot{V}$ **,** $\dot{W}$ eksen ivmeleri integre edilip, eksenin ilk hız değerleri ile

toplanarak U , V , W eksen hızları bulunur. Referans çerçeve olan s-çerçevede hızları bulabilmek için Bölüm **2**'de denklem **(2.9)** ile verilen DCM matrisi ile g-çerçeveden s-çerçeveye dönüşüm gerçekleştirilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_S \\ \dot{Y}_S \\ \dot{Z}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X}_K \\ \dot{X}_D \\ \dot{X}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_K \\ V_D \\ V_A \end{bmatrix} = DCM \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.16)}$$

Denklem **(3.16)**'de V_K, V_D, V_A referans çerçevesi s-çerçevedeki sıra ile Kuzey, Doğu ve Aşağı hız vektörlerini göstermekte; X_K, X_D, X_A sıra ile Kuzey, Doğu ve Aşağı konum vektörlerini göstermekte; X_S, Y_S, Z_S ise s-çerçevesi X,Y,Z koordinatlarındaki konum vektörünü göstermektedir. V_K, V_D, V_A hızları integre edilerek s-çerçevede konumdaki değişimler bulunur.

λ , μ , H sırası ile seyrüsefer yapan aracın enlem, boylam ve yükseklik değerleri olsun. Bu değerlerdeki değişimi oranı;

$$\dot{\lambda} = \frac{V_K}{R_d} \qquad \textbf{(3.17)}$$

$$\dot{\mu} = \frac{V_D}{R_d} \qquad \textbf{(3.18)}$$

$$\dot{H} = -V_A \qquad \textbf{(3.19)}$$

denklemleri ile hesaplanır. Bu denklemlerin yardımı ile küresel seyrüsefer yapan aracın enlem, boylam ve yükseklik pozisyon değerlerindeki farklar hesaplanabilir. Denklem **(3.17)**, **(3.18)** ve **(3.19)**'daki R_d dünyanın yarıçapını göstermektedir.

3.2.2 EDSD hataları

EDSD hatalarının birçoğu duyarga hatalarından kaynaklanmaktadır. Teorik olarak sonsuz hassaslıkta hata payı sıfır dikeylikte hatasız ölçüm yapılabilmektedir. Pratikte her duyarganın belirli bir hassaslığı ve hata payı vardır. Bunlardan dolayı ölçümde hatalar olmaktadır. Bu hatalar iteratif olarak toplandığından ve ivmeölçerlerin hata payları zamanın karesi ile jiroskoplarınki zaman ile doğru orantılı olarak büyüme

gösterdiğinden duyarga hatalarını azaltmak veya başarılı bir seyrüsefer sistemi yapabilmek için çok hassas ve doğru duyargaların kullanılması gerekmektedir. Ya da EDSD'ler başka bir seyrüsefer dizgesi ile paralel olarak çalıştırılıp diğer seyrüsefer sisteminin sağladığı bilgileri geribesleme olarak kullanarak bu hataları belirli bir aralıkta tutmaya çalışır.

3.2.2.1 EDSD hataları ve etkileri

Yaygın EDSD hataları **Çizelge 3.1** 'de gösterilmiştir. Hataların adı, tanımı ve hatanın seyrüsefer dizgesi konum bulma üzerinde etkisi sonucu çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 3.1: EDSD hataları ve hata etkisi

Hata Adı	Hata Açıklaması	Hata Sonucu
Hizalama	g-çerçevesi üzerindeki jiroskop ve ivmeölçerlerin dikey eksenlerle arasında hizalama hatası olmasıdır.	Aracın hareket yönleri ile duyargaların yerleştirildiği eksenler arasında hizalama farkı olduğundan ivmeölçer ve jiroskop verilerinin hatalı ölçülmesine sebep olur.
İvmeölçer velev veya kayıklık	İvmeölçerin kayıklık değerlerinin olmasıdır	Kayıklık sebebi ile ivmeölçerlerden okunan değerler gerçek ivme değerlerinden farklı olması sebebi ile hataya sebep olur.
İvmeölçer hassaslık (ölçekleme birimi)	İvmeölçerin ölçebildiği en hassas ivmeye karşılık düşen değerdir.	İvmeölçer hassaslığının altındaki ivme değerleri hesaplanamayacağından gerçek ivme değerlerini bulmada bir hataya sebep olur. İteratif olarak artan hatalar belirli bir süre sonra çok büyük hatalara sebep olur.
Jiroskop velev veya kayıklık	Jiroskopların kayıklık değerlerinin olmasıdır.	Kayıklık sebebi ile jiroskoplardan okunan değerler gerçek açısal oran (hız) değerlerinden farklı olması sebebi ile hataya sebep olur.
Jiroskop hassaslık (ölçekleme birimi)	Jiroskopların ölçebildiği en hassas açısal orana karşılık düşen değerdir.	Jiroskop hassaslığının altındaki açısal oran değerleri hesaplanamayacağından gerçek açısal oran değerlerini bulmakta bir hataya sebep olur. İteratif olarak artan hatalar, yönelimde ve buna bağlı olarak konumda belirli bir süre sonra çok büyük hatalara sebep olur.
Dikey olmama	Eksenlerin dikey olmama durumu	Okunan jiroskop verileri ile yanlış doğrultu hesabına, ivmeölçer verileri ile de yanlış konumlama hatalarına sebep olur. Küçük hatalar zamanla hızla büyür.

Tek eksende sabit 1 mg (≈1cm^2/s) hatanın zamanla pozisyona etkisi **Çizelge 3.2**'de gösterilmiştir. MEMS duyargalarda ivmeölçer ölçekleme birimleri genelde örnekte sabit olarak verilen hatadan daha büyüktür.

Çizelge 3.2: Sabit duyarga hatası ve konuma etkisi örneği

Zaman(saniye)	Konum Hatası(metre)
10	0.5
30	4.5
60	18
300	450
600	1800
3600	64800

Bölüm **3.2.2.1**'de tanımlanan hataların deneysel formülasyonları ve seyrüsefere etkileri ve bu hataları minimize etmek için kullanılan kalibrasyon yöntemleri bu bölümde incelenecektir.

EDSD'nin pozisyon ve hız hatası kayıklık, ölçekleme birimi, dikey olmama, hizalama ve duyarga gürültülerinden kaynaklanmaktadır. Bu hatalar hız ve pozisyona etkisi çok büyüktür. l_ω ölçülen açısal oran, ω gerçek açısal oran, b_ω jiroskop kayıklığı, S doğrusal ölçekleme birimi matrisi, N dikey olmama matrisi ve $\varepsilon(\omega)$ ise duyarga gürültüsünü göstermek üzere jiroskoplar için hata denklemi **(3.20)**'deki gibidir.

$$l_\omega = \omega + b_\omega + S\omega + N\omega + \varepsilon(\omega) \qquad \textbf{(3.20)}$$

İvmeölçerler için ise l_f ölçülen ivme, f gerçek kuvvet, b_f ivmeölçer kayıklığı S_1 ve S_2 doğrusal ve doğrusal olmayan ölçekleme birimi matrisi, N dikey olmama matrisi, δg teorik yerçekimi kuvvetinden sapma, $\varepsilon(f)$ duyarga gürültüsü olmak üzere denklem **(3.21)**'deki gibidir.

$$l_f = f + b_f + S_1 f + S_2 f + Nf + \delta g + \varepsilon(f) \qquad \textbf{(3.21)}$$

Genellikle EDSD'nin yaklaşık pozisyon kayması denklem **(3.22)** ile kestirilir.

$$\delta p(t) \approx \delta p_0 + \delta v_0 \Delta t + \delta b_{0a} \frac{\Delta t^2}{2} + \delta b_{0g} g \frac{\Delta t^3}{6} + \delta \alpha_0 g \frac{\Delta t^2}{2} + \delta H_{0z}(V \Delta t) + SF_{0a} \frac{\Delta t^2}{2} + SF_{0g}(\Delta H_z)(V \Delta t) \quad \textbf{(3.22)}$$

Denklem **(3.22)**'deki δp_0, t_0 zamanındaki pozisyon hatası; δv_0, t_0 zamanındaki hız hatası; Δt, toplam geçen süre; δb_{0a}, t_0 zamanındaki kalan ivmeölçer kayıklığı; δb_{0g}, t_0 zamanındaki kalan jiroskop kayıklığı; $\delta \alpha_0$, t_0 zamanındaki dikey hizalama hatası; δH_{0z} azimut hizalama hatası $V \Delta t$ yaklaşık mesafesi ile çarpımı; SF_{0a} ve SF_{0g} ivmeölçer ve jiroskop kalan ölçekleme birimi hatası; g, yerçekimi ivmesi; F,ölçülen ivmeyi göstermektedir.

Denklem **(3.22)** kayıklık, ölçekleme birimi, hizalama gibi hataların pozisyon üzerine etkisi zamanla üstel olarak artmakta ve çok büyük pozisyon hatalarına sebep olmaktadır. MEMS duyargalı EDSD'lerde bu hatalar çok daha büyüktür. Bunun için bu hata parametrelerinin tespiti iyi yapılmalıdır.

3.2.2.2 EDSD kalibrasyon

EDHB kalibrasyonu, ölçülen duyarga verilerini bilinen referans bilgisi ile karşılaştırılması ve bu bilgi ışığında duyarga çıktılarının ayarlanması işlemidir (Chatfield, 1997).

Yüksek hassasiyetli EDHB'lerde kalibrasyon için mükemmel düz düzlemlere ihtiyaç vardır. EDHB eksenlere dikey olarak sıra ile bir yönde ve o yönün tersinde hareket ettirilerek ölçüm yapılmalıdır (Titterton ve Weston, 2004). Altı pozisyonda kayıklık ve ölçekleme birimi ölçümleri denklem **(3.23)** ve **(3.24)**'deki gibi yapılır.

$$b = \frac{l_f^{yukarı} + l_f^{aşağı}}{2} \quad \textbf{(3.23)}$$

$$S = \frac{l_f^{yukarı} + l_f^{aşağı} - 2 \times k}{2 \times k} \quad \textbf{(3.24)}$$

Bu denklemlerdeki $l_f^{yukarı}$ ve $l_f^{aşağı}$ duyargaların iki yöndeki ölçümlerini, k bilinen referans değerini göstermektedir. İvmeölçerler için yerçekimi jiroskoplar için yeterli hassasiyet aralığında ise dünyanın kendi ekseni etrafındaki dönüş hızı veya döner bir platform kullanılabilir.

Duyarga eksenlerindeki hizalama hatalarının belirlenmesi için tüm hata parametrelerinin hizalama matrisine uygulanması gereklidir (Syed ve diğ. , 2002). İvmeölçerler için bu matris, m_{xx}, m_{yy}, m_{zz} köşegen elemanlar ölçekleme birimini; köşegen olmayan matris elemanları dikey olmama birimlerini; *b*, kayıklığı göstermek üzere denklem **(3.25)**'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{xx} & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & m_{yy} & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zx} & m_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{ax} \\ b_{ay} \\ b_{az} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.25)}$$

6 pozisyonda ölçüm sonucu 18 denklem elde edilir ve bu denklemlerin çözümü ile **(3.25)**'deki hizalama hata parametreleri bulunur.

Bu kalibrasyon yöntemi çok pahalı ve hassas ölçümler gerektirir. Ayrıca MEMS duyargalı EDHB'lerin kalibrasyonunu bu yöntem ile yapmak duyarga hassasiyetleri ve mükemmel düz düzlem gerektirdiği için oldukça güçtür (Titterton ve Weston, 2004).

Alternatif yöntem olarak çoklu-pozisyon kalibrasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, 18 farklı ve bağımsız pozisyondaki ölçümler kullanılarak gerçekleştirilir. Duyargalar yerel bir düz düzlem üzerine yerleştirilir ve referans duyargalar ile referans düz düzlem 3 doğrultu kosinüs açısı(α, β, γ) oluşturur. 3 eksendeki ivmeölçer bileşenleri denklem **(3.26)**'daki gibidir.

$$gx = g\cos\alpha, \quad gy = g\cos\beta, \quad gx = g\cos\gamma \quad \textbf{(3.26)}$$

Kalibrasyon modeli denklemi bu durumda denklem **(3.27)**'deki gibi olur.

$$gx^2 + gy^2 + gz^2 = |g|^2 (\cos\alpha^2 + \cos\beta^2 + \cos\gamma^2) = |g|^2 \quad \textbf{(3.27)}$$

Jiroskoplar için aynı şekilde referans sistem olarak dünyanın dönüşü kullanılabilir.

MEMS duyargalardaki kayıklık, ölçekleme birimi ve hizalama hataları taktik dereceli duyargalara göre çok daha büyüktür. Bu yüzden değiştirilmiş çoklu-pozisyon kalibrasyon yöntemi kullanmak daha etkilidir (Titterton ve Weston, 2004).

Bu yöntemde yaklaşık duyarga pozisyonlarına ihtiyaç vardır ve duyarga davranışının referans düzleme göre tam olarak bilmeye ihtiyaç yoktur. Öte yandan, MEMS duyargalar çok doğru veri üretmemektedir. Açısal hız ölçümlerindeki hatanın dünyanın dönüş hızına göre büyük olmasından dolayı jiroskoplar için döner bir

düzlem kullanılır. Denklem **(3.26)** ve **(3.27)**'deki ölçümlerde kayıklık, eksen hizalama kayması ve ölçekleme birimi ele alınmıştır. Duyarga eksenlerinin dikey olmama durumu 3 açı ile elde edilir; sabit x ekseni için y eksenindeki hizalama kayıklığı y ekseninin z eksenine göre θ_{yz} dönüş açısından elde edilir. Aynı şekilde z ekseninin x ve y eksenlerine göre θ_{zx} ve θ_{zy} dönüş açılarına göre diğer açılar hesaplanır.

Dönüş matrislerini ve küçük açı değişimleri için aşağıdaki denklem **(3.28)** elde edilir.

$$\begin{bmatrix} gx_1 \\ gx_2 \\ gx_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\vartheta_{gyz} & 1 & 0 \\ \vartheta_{gzx} & \vartheta_{gzy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} gx \\ gy \\ gz \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.28)}$$

Denklem **(3.28)**'deki gx_1, gx_2, gx_3 bileşenleri hizalama kayıklığı bulunan eksenlerdeki ivme değerleridir. Denklem **(3.28)**'e kayıklık ve ölçekleme birimi değerlerini eklersek denklem **(3.29)** elde edilir.

$$\begin{bmatrix} l_{gx} \\ l_{gy} \\ l_{gz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+S_{gx} & 0 & 0 \\ -\vartheta_{gyz} & 1+S_{gy} & 0 \\ \vartheta_{gzx} & \vartheta_{gzy} & 1+S_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} gx \\ gy \\ gz \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{gx} \\ b_{gy} \\ b_{gz} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.29)}$$

Denklem **(3.29)**'da l_{gx}, l_{gy}, l_{gz} duyarga ölçümleri, S_{gx}, S_{gy}, S_{gz} ölçekleme birimlerini, b_{gx}, b_{gy}, b_{gz} x, y ve z eksenlerindeki kayıklık değerlerini göstermektedir.

İvmeölçerler ve jiroskoplar için yukarıda belirtilen modele uygun durum denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$gx^2 + gy^2 + gz^2 - |g|^2 = 0 \qquad \textbf{(3.30)}$$

$$\omega x^2 + \omega y^2 + \omega z^2 - |\omega|^2 = 0 \qquad \textbf{(3.31)}$$

Bu denklemlerdeki bilinmeyen parametreler hizalama kayıklığı, ölçekleme birimi ve kayıklık parametreleridir ve en küçük kareler yöntemi kullanılarak bilinmeyen parametreler bulunabilir.

3.2.3 Kalman filtresi

Duyarga hatalarını azaltmak için bu çalışmada ayrık Kalman filtresi kullanılmıştır.

3.2.3.1 Ayrık Kalman filtresi

Kalman filtresi,

$$\hat{x} = Ax_{k\text{-}1} + Bu_k + w_{k\text{-}1} \quad . \tag{3.32}$$

doğrusal rastlantısal diferansiyel denklemi ile ayrık zamanda kontrol edilebilen bir işlemin $x \in R^n$ durumunu, $z \in R^m$ ölçümü ile kestirmeye çalışır.

$$z_k = Hx_k + v_k \tag{3.33}$$

v_k ve w_k rastgele değişkenleri, sırası ile işlem ve ölçüm gürültülerini göstermektedir. Birbirlerinden bağımsız, beyaz ve Gauss gürültüsü olarak kabul edilmiştir.

$$P(w) \sim N(0, Q) \tag{3.34}$$

$$P(v) \sim N(0, R) \tag{3.35}$$

Q işlem gürültü kovaryans matrisi, R ise ölçüm gürültü kovaryans matrisidir.

Aynı denklemdeki nx1 B matrisi x durumuna kontrol girdisi $u \in R^n$ bağlılığını gösterir. Denklem **(3.33)**'deki x_k durumunun z_k ölçümüyle ilişkisidir.

$x_{k-1} \in R^n$, k adımındaki ön durum kestirimi, $x_k \in R^n$ k adımındaki z_k ölçümüne göre yapılan son durum kestirimi olmak üzere ön durum kestirim hatası şu şekilde ifade edilebilir.

$$P_k^- = x_k - \hat{x}_k^- \tag{3.36}$$

Bu durumda ön zaman kestirim hata kovaryansı şu şekilde ifade edilebilir.

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + Q \tag{3.37}$$

Ön kestirim hatası olarak kabul edilen $\hat{x}^-$'yı, z_k ölçümünü kullanarak aşağıdaki denklemle iyileştirmeye çalışıldığında;

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H_k \hat{x}_k^-) \tag{3.38}$$

denklemi elde edilir. Bu denklemde, $\hat{x}_k$ güncellenen kestirimi ve K_k denklem **(3.39)**'daki son kestirim kovasyansını minimize eden karıştırma faktörü veya Kalman kazancını göstermektedir.

$$P_k = E[e_k e_k^T] = E[(x_k - \hat{x})(x_k - \hat{x})^T] \quad \textbf{(3.39)}$$

Denklem **(3.35)**'deki z_k eşitliğini, denklem **(3.33)**'de yerine yazılırsa ve oluşan sonuç denklem **(3.39)**'da yerine yerleştirilirse;

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad \textbf{(3.40)}$$

elde edilir. Denklem **(3.40)**'daki P_k son kestirim hatasını minimize eden Kalman kazancı formülü denklem **(3.41)**'de görülmektedir.

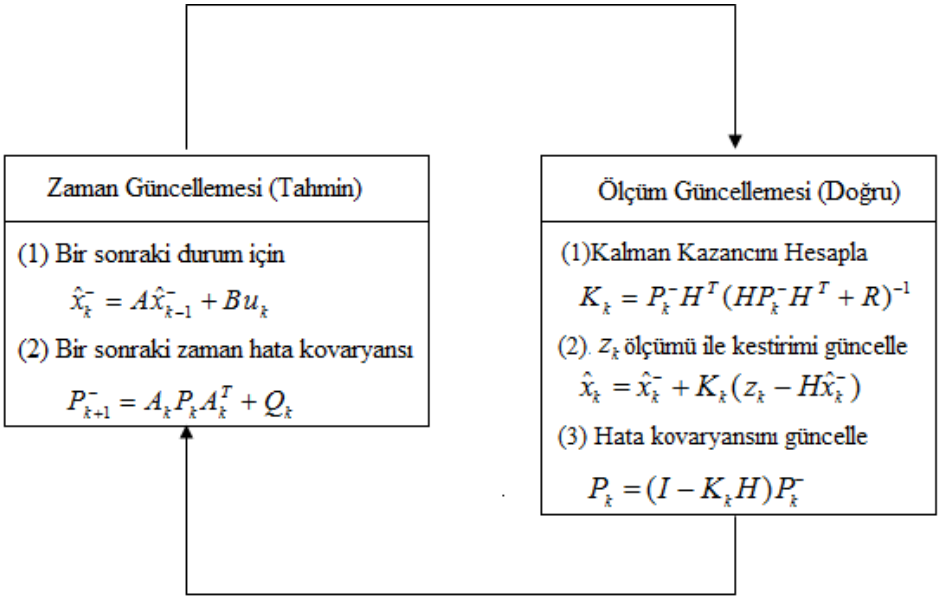
$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad \textbf{(3.41)}$$

Denklem **(3.42)** ve denklem **(3.43)** 'de bir sonraki adım kestirim hesaplaması $\hat{x}_{k+1}^-$ ve hata kovaryansı P_{k+1}^- hesaplama formülleri verilmiştir.

$$\hat{x}_{k+1}^- = A_k \hat{x}_k + B_k u_k \quad \textbf{(3.42)}$$

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + Q \quad \textbf{(3.43)}$$

Ayrık Zaman Kalman filtresi denklemleri **Şekil 3.9**'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Kalman filtresi döngüsü

3.2.3.2 Kalman filtresi ve seyrüsefer

Ayrık Kalman filtresi tasarımı için ilk adım durum değişkenlerinin tanımlanmasıdır. Bunun için birçok sistem tasarlanmıştır. Genelde Analitik EDSD'ler yardımcı bir seyrüsefer sistemi ile paralel olarak çalışırlar (GPS gibi). Özellikle MEMS duyargalarla yapılan sistemler doğru konum ve yönelim bilgilerinden sapmaması için sisteme geribesleme veren bir yardımcı seyrüsefer sistemine ihtiyaç duyar. Yardımcı seyrüsefer sistemlerinin ve tasarlanan EDSD'nin parametre çıktılarına göre durum vektörleri ve Kalman filtresi tasarımı değişkenlik gösterebilir. Ayrıca, Seyrüsefer için yalnızca Analitik EDSD kullanan sistemlerde bölüm **3.1**' de anlatılan tüm seyrüsefer algoritmasının Kalman filtresine parametre olarak verildiği ve filtre çıkışında seçilen seyrüsefer çerçevesinde konum, hız, ivme ve yönelim değerlerini veren tasarımlar da mevcuttur.

Bu tezde herhangi bir yardımcı seyrüsefer sistemi kullanılmadığından, Kalman filtresi sadece duyarga çıkışlarını filtrelemek için tasarlanmıştır. Kalman filtresi denklemleri duyargalardan ölçülen değerleri tek boyutta filtreleyen ve çıkış olarak okunan ivme ve jiroskop duyargaları değerine göre g-çerçevede ivme ve açısal hız vermektedir.

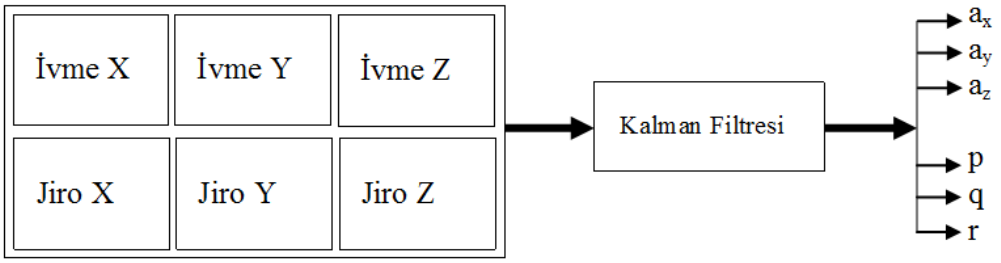
Duyargalardan gelen değerlerin otomatik kayıklık düzeltmesinin yapıldığı, duyargaların doğrusal eksen ayarlamasının yapıldığı varsayımı ve sıcaklık

değerlerinin optimize alındığı durum için denklem **(3.32)** ve denklem **(3.33)**'ün durum matrisine göre düzenlenmiş hali aşağıda görülmektedir.

$$\hat{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{Ax_{k+1}} \\ \hat{x}_{Ay_{k+1}} \\ \hat{x}_{Az_{k+1}} \\ \hat{x}_{Gx_{k+1}} \\ \hat{x}_{Gy_{k+1}} \\ \hat{x}_{Gz_{k+1}} \end{bmatrix} = \mathrm{I}_{6\times6} \times \begin{bmatrix} \hat{x}_{Ax_k} \\ \hat{x}_{Ay_k} \\ \hat{x}_{Az_k} \\ \hat{x}_{Gx_k} \\ \hat{x}_{Gy_k} \\ \hat{x}_{Gz_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{Ax_k} \\ w_{Ay_k} \\ w_{Az_k} \\ w_{Gx_k} \\ w_{Gy_k} \\ w_{Gz_k} \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

$$z_k = \mathrm{I}_{6\times6} \times \begin{bmatrix} x_{Ax_k} \\ x_{Ay_k} \\ x_{Az_k} \\ x_{Gx_k} \\ x_{Gy_k} \\ x_{Gz_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{Ax_k} \\ w_{Ay_k} \\ w_{Az_k} \\ w_{Gx_k} \\ w_{Gy_k} \\ w_{Gz_k} \end{bmatrix} \tag{3.45}$$

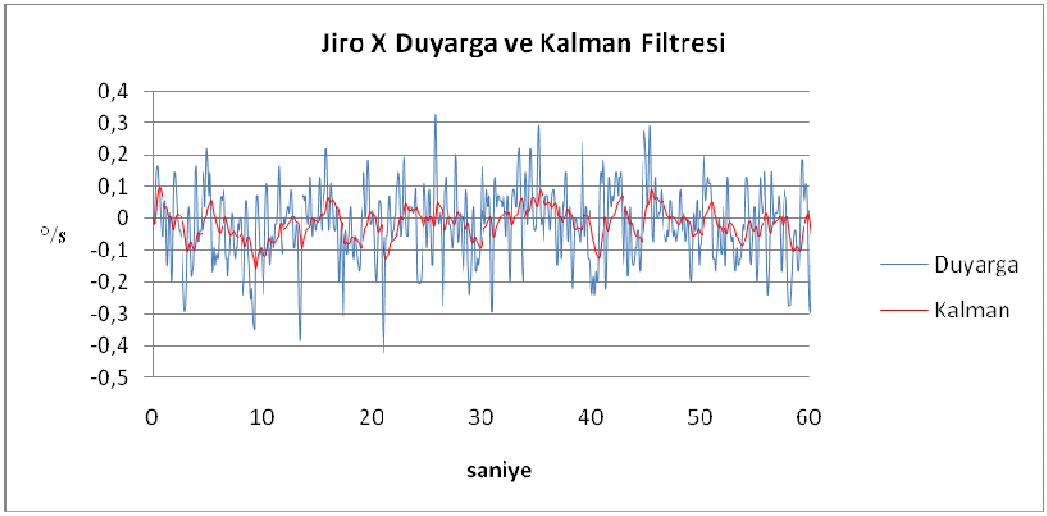
Denklem **(3.44)**'de herhangi bir kontrol girdisi olmadığından $u_k = 0$ alınmıştır. Durumlar arası geçişte teorik olarak fark olmadığı için A matrisi birim matris olarak alınmıştır. Denklem **(3.45)**'de, ölçüm matrisindeki H değeri, ilgili duyarga değerinin diğer duyarga değerlerinden bağımsız olarak düşünüldüğünden birim matris olarak alınmıştır.



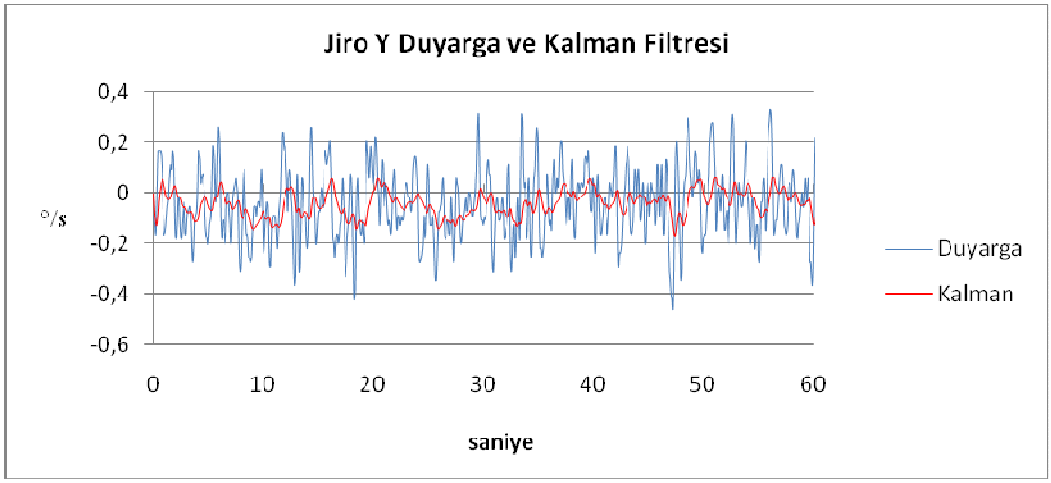
Şekil 3.10: Kalman filtresi

Aşağıdaki şekillerde, ADIS163350 MEMS ivmeölçerinden ölçülen ivme ve açısal hızların Kalman filtresi sonucu oluşan çıktıları gösterilmiştir.

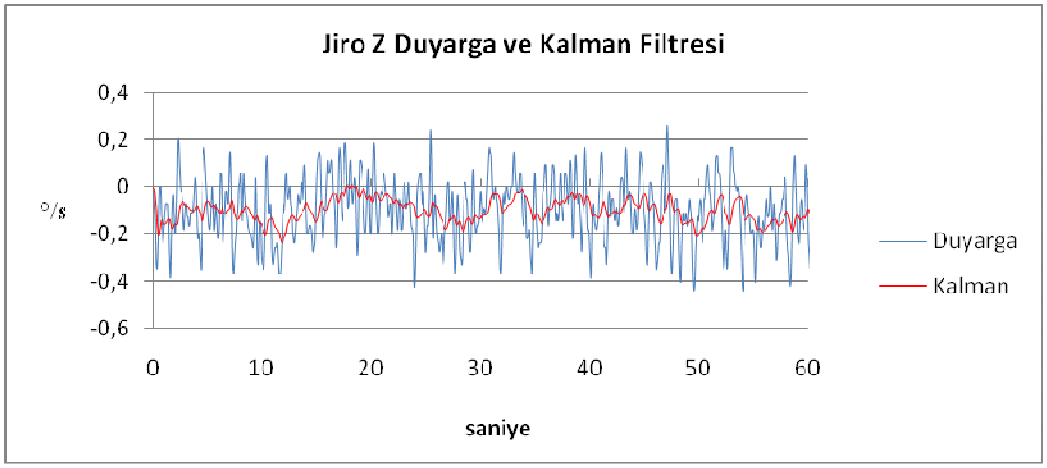
ADIS 16350'nin jiroskoplarının 3 farklı çalışma biçimi vardır. 75°/s, 150°/s ve 300°/s ölçüm biçimlerinde duyarga çıkışları 14 bit sayı ile temsil edilir ve hassaslıkları sırası ile 0.018315°/s, 0.03663°/s, 0.7326°/s 'dir. Jiroskop ölçümleri ve Kalman filtresi sonuçları ile bazı şekiller aşağıda verilmiştir.



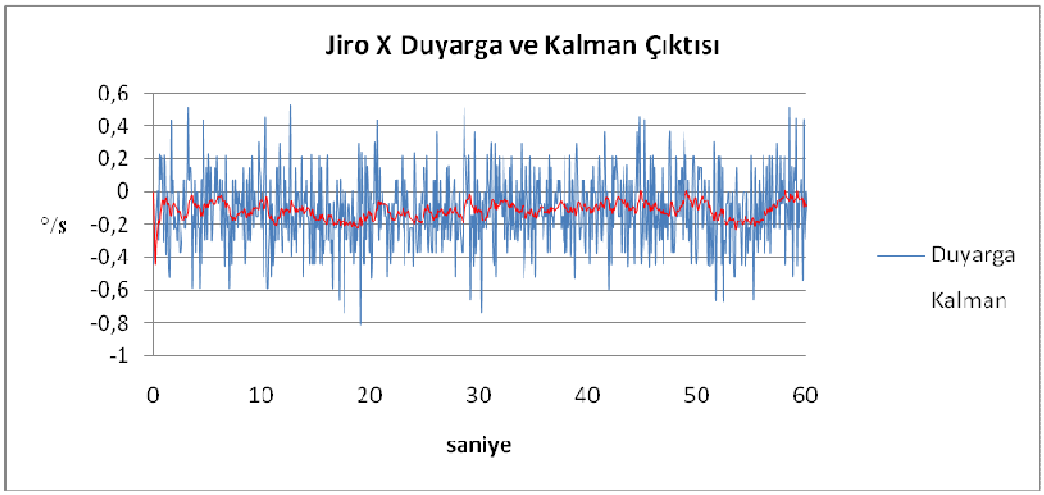
Şekil 3.11: Jiro X duyarga ve Kalman çıktısı (75°/s çalışma modunda)



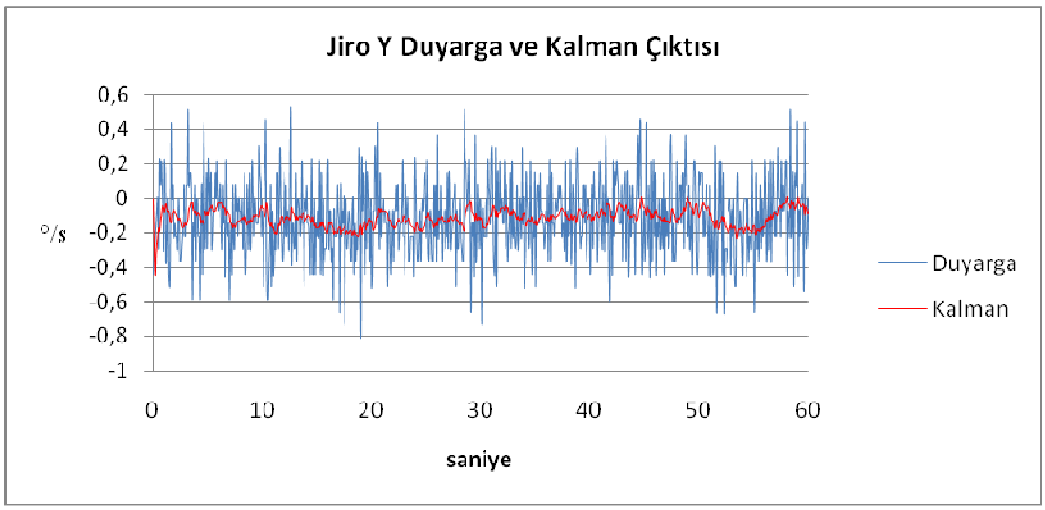
Şekil 3.12: Jiro Y duyarga ve Kalman çıktısı (75°/s çalışma modunda)



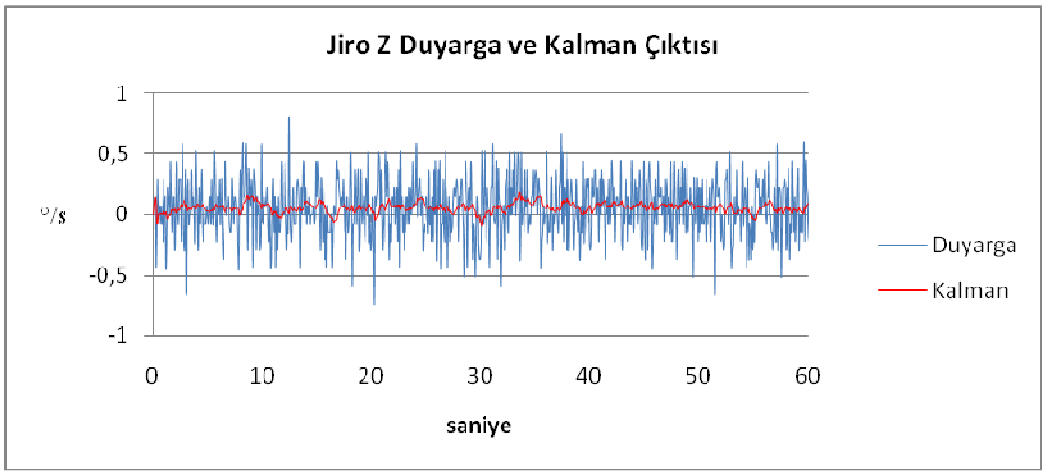
Şekil 3.13: Jiro Z duyarga ve Kalman çıktısı (75°/s çalışma modunda)



Şekil 3.14: Jiro X duyarga ve Kalman çıktısı (300°/s çalışma modunda)

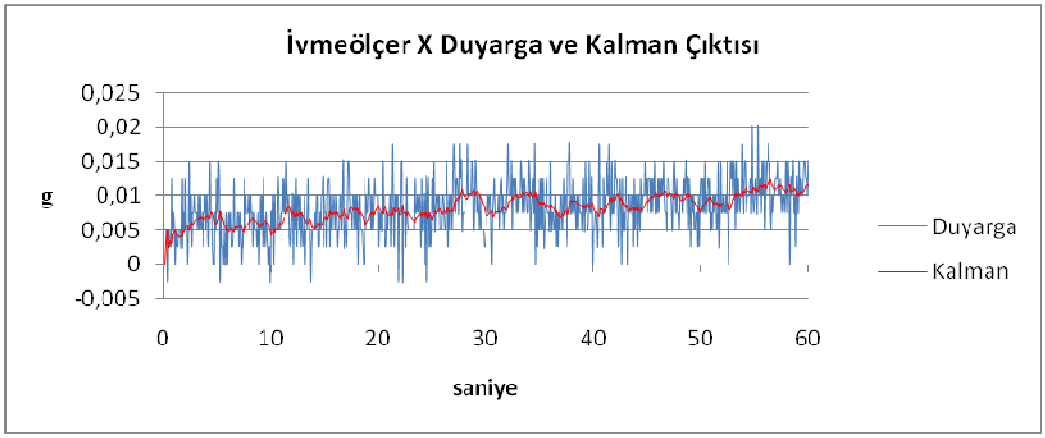


Şekil 3.15: Jiro Y duyarga ve Kalman çıktısı (300°/s çalışma modunda)

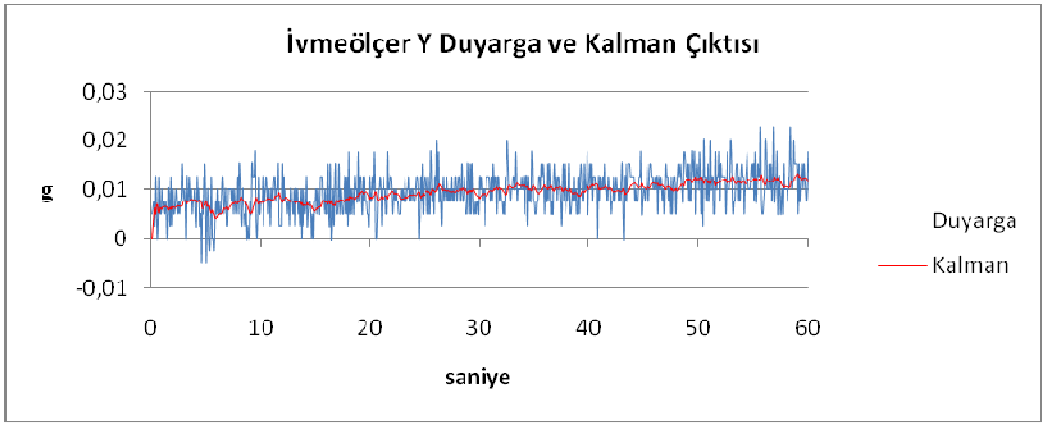


Şekil 3.16: Jiro Z duyarga ve Kalman çıktısı (300°/s çalışma modunda)

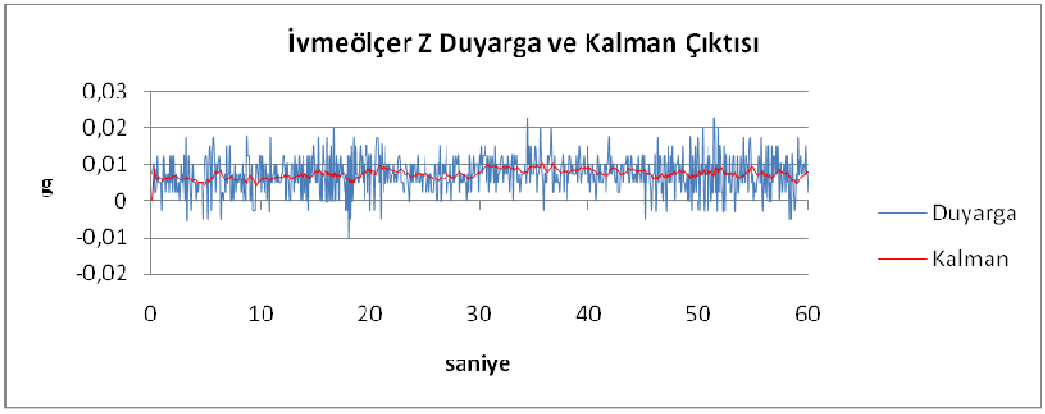
İvmeölçer çıktıları ve Kalman çıktıları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. ADIS16350 ivmeölçerleri, 10g ölçümü 14 bit ile çözümlemekte ve ivmeölçerin hassasiyeti 2.522 mg'dir.



Şekil 3.17: İvmeölçer X duyarga ve Kalman çıktısı



Şekil 3.18: İvmeölçer Y duyarga ve Kalman çıktısı



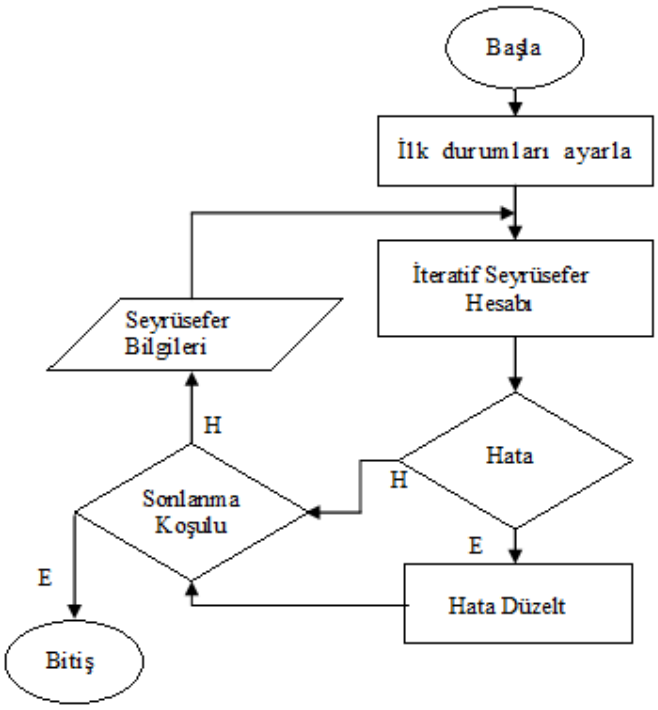
Şekil 3.19: İvmeölçer Z duyarga ve Kalman çıktısı

4. SEYRÜSEFER ALGORİTMASI VE TEST SONUÇLARI

Bölüm **3** 'de anlatılan seyrüsefer algoritmasının gerçeklenmesi ve algoritmanın çalışmasına dair test sonuçları bu bölümde incelenecektir.

4.1 Seyrüsefer Algoritması

Bölüm **2** ve bölüm **3**'de seyrüsefer algoritmasının çalışması ile ilgili denklemler verilmişti. Bu denklemler ışığında kullanılacak seyrüsefer algoritması, ilk durum ayarlaması, iteratif konum, yönelim bulma ve hata düzeltme olarak üç ana bölümde incelenecektir.



Şekil 4.1: Genel seyrüsefer algoritması akış diyagramı

4.1.1 İlk durumların ayarlanması

İlk durumlar seyrüsefer çerçeve eksen ayarlaması, duyarga ilk durum ayarlaması ve konum, yönelim ilk durum ayarlaması olarak üç aşamada gerçeklenir.

4.1.1.1 Seyrüsefer çerçeve eksenlerinin ayarlanması

Seyrüseferde kullanılan gövde çerçevesi ve seyrüsefer çerçevesi (yerel yeryüzü ekseni) ayarlarının yapılması bu aşamada gerçeklenir. Seyrüsefer çerçevesinin eksenleri Kuzey, Doğu ve Aşağı olduğundan, ilk durumlar için gerçek kuzeyi tam olarak bulmak bir problem oluşturur. Bu problemi aşmak için, alternatif bir yöntem olarak yaklaşık kuzey ekseni ilk durum olarak seçilebilir. Gövde çerçevesinin eksenleri, seçilen yaklaşık kuzey ekseni doğrultusuna getirilir. Gerçek kuzey ile yaklaşık kuzey arasındaki seçimden dolayı, dünyanın kendi etrafında dönüş hızının hesaba katılması gibi durumlarda küçük hatalara sebep olabilir. Pratikte, bu hatalar bu çalışmada kullanılan jiroskop hassasiyetinden küçük olduğu için gerçek kuzey ile arasındaki küçük sapma sistemin diğer hatalarına oranla çok daha az etkiyeceğinden, seyrüsefer için ilk durum eksenlerinin seçiminde yaklaşık kuzey seçimi en uygun çözüm olarak görülebilir.

4.1.1.2 Duyarga ilk durum ayarları

Bölüm **3.2.2**'de EDSD hatalarında, duyarga hataları ve bu hataların sisteme nasıl etki ettiği açıklanmıştı. Eksen diklik ayarlaması, kayıklık düzeltme, doğrusal kompanzasyon, hassaslık gibi duyarga parametrelerinin düzeltilmesi ve ilk durum ayarlarının yapılması bu başlıkta incelenecektir.

Hassaslık(Ölçekleme): Duyarga seçimine bağlıdır ve seçilen duyargalar için değişmezdir. ADIS16350 jiroskop ve ivmeölçer duyarlılığı **Çizelge 4.1'**de verilmiştir. Sadece yapılan seyrüsefere göre bu hassalık ayarlanabilir.

Çizelge 4.1: ADIS16350 duyarga hassasiyetleri

Duyarga	**Jiroskop**			**İvmeölçer**
Çalışma Modu	300°/s	150°/s	75°/s	-
Hassaslık	0.07326°/s	0.03663°/s	0.018315°/s	2.522mg

Kayıklık düzeltme: Kayıklık, ilk durumda belirtilen ivmeölçer ve jiroskopların olması gereken değerden farklı olması durumudur. Bunun için belirli bir süre seyrüsefer cihazı oynatılmadan test verileri alınıp ortalaması ve standart sapmasına göre bir ilk durum kayıklık değeri belirlenebilir. ADIS16350 bunu jiroskoplar için otomatik olarak yapabilmektedir. Elle ayarlama da mevcuttur.

Eksen hizalaması: Duyarga eksenlerinin birbiri ile dikey olmasının ayarlanmasıdır. Bunun için duyarga verilerinin farklı sabit noktalarda hareketsizken değerleri okunarak eksenlerden ölçülen ivme değerlerinin vektörel toplamının, g yer çekimi ivmesi ile farkından eksenler arasındaki dikey bozulma hesaplanabilir. ADIS16350'de bu işlem otomatik olarak gerçeklenebilmektedir.

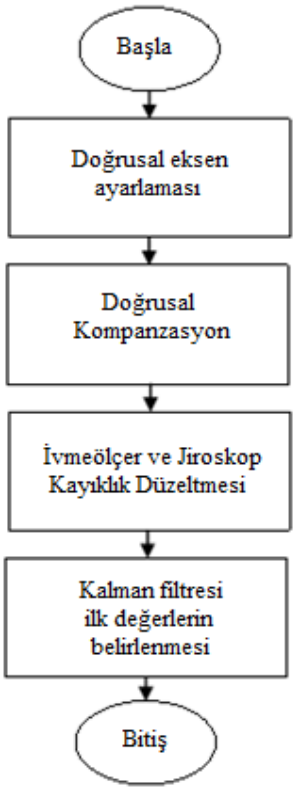
Kalibrasyon sürecinde seyrüsefer cihazı hareketsiz tutularak yukarıdaki kalibrasyon işlemleri yapılır. Gerçek kuzey yönü bulamamaktan kaynaklanan dünyanın kendi ekseni etrafındaki dönüş hızının, jiroskop değerlerine etkisi ilk durum için bu şekilde sıfırlanır.

4.1.1.3 Konum ve yönelim ilk değerlerinin atanması

Kalibrasyonu yapılan cihazın konum ve ilk durum değerleri sisteme giriş parametresi olarak verilir. Genelde durağan olarak başlayacak sistem için gövde ve seyrüsefer çerçeve hız, ivme, konum bilgileri ve ilgili parametreleri 0 olarak alınır.

4.1.1.4 Kalman filtresi ilk durumlarının belirlenmesi

Kalman filtresinin ilk durum değerleri, duyarga karakteristiği ve test sonuçları değerlerine göre belirlenir. **Şekil 4.2**'de akış diyagramı gösterilmiştir.

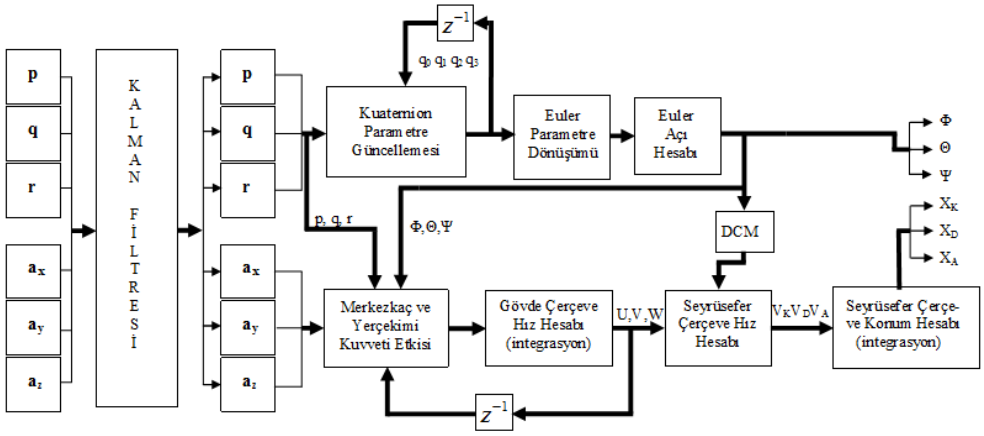


Şekil 4.2: İlk durumların belirlenmesi algoritması genel akış diyagramı

4.1.2 İteratif konum ve yönelim bulma

Bölüm **2** ve **3**'deki seyrüsefer denklemlerinin EDSD duyargalarının çıktıları için uygulanmasıdır. İlk durumları belirlenen Euler açılarının Kuaterniyon parametreleri cinsinden ifade edilişi bulunur. Kuaterniyon parametrelerinin ilk durumları bu şekilde belirlenir. Kuaterniyon parametre güncellemesi sonucu oluşan anlık son durum parametrelerinin normalizasyonu alınır. Normalize edilen Kuaterniyon parametreleri Euler açılarına dönüştürülür (Euler parametrelerine tekrar dönüşüm zorunlu değildir. Kuaterniyon DCM matrisi kullanılarak da işlemlere devam edilebilir. Ancak test aşamalarında Euler açılarının görselliğinin Kuaterniyon parametrelerine göre daha iyi olmasından dolayı dönüşüm gerçekleştiriliyor). Bu dönüşüm sonucu gövde çerçevesinde daha önceki anlık son durum yönelimleri elde edilir. Gövde çerçevesinde ivmeölçerlerden okunan değerlerden merkezkaç ve yerçekimi ivmelerinden oluşan ek ivme değerleri çıkarılarak gövde çerçevesinde gerçek ivme verileri elde edilir. Bu değerlerin integrasyonu sonucu gövde çerçevesindeki hızlar elde edilir. Bulunan bu değerlerin seyrüsefer çerçevesindeki

yansıması DCM matrisi ile dönüştürülerek elde edilir. Gövde çerçevesinin anlık konum, hız ve yönelim bileşkeleri bu değerler ile toplanarak seyrüsefer çerçevesi eksenlerindeki varılan nokta hesaplanır. Son varılan nokta değerleri güncellenir ve seyrüsefer süresince işlemler tekrar yapılır. Bu noktada yerden yükseklik ve dünyanın dönüş hızı etkisi bulunan konum ve açı değerleri üzerindeki etkisi de hesaplanıp konum ve yön bilgisi güncellenebilir. Dünyanın kendi ekseni etrafındaki dönüşünden kaynaklanan jiroskobik etki jiroskop duyargalarının ilk durum değişkenleri atanırken hesaba katıldığından bu kısım bu noktada atlanır. **Şekil 4.3'**de genel hatları ile seyrüsefer blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.3: Seyrüsefer blok diyagramı

4.1.3 Hata düzeltme

Her ne kadar Kalman filtresi duyarga çıkışının hata payını belirli bir oranda azaltsa da MEMS atalet duyargaları ile çok kısa sürelerden sonra hesaplanan seyrüsefer bilgisi güvenilirlikten uzaktır. Uzun vadede duyargalardaki ufak hatalar çok büyük hatalara sebep olabilir. Bu yüzden bir dizi hata düzeltme algoritması sisteme (seçime bağlı olarak) eklenmiştir. Bu algoritmalar, iteratif seyrüsefer algoritması ile birlikte çalışırlar ve temel mantıkları, küçük ivme ve açısal hız değişikliklerini (zamanla küçük hatalar üstel olarak artıyor) hesaba katmamaktır. Aynı zamanda, eskiye yönelik (belirli bir zaman) seyrüsefer bilgisini bellekte tutarak sistemin davranışına göre sezgisel olarak seyrüseferin durduğu anları belirleyerek, belirlenen anla en başarılı düğüm arasında olası bir seyrüsefer son anlık durumunu, varılan son nokta

olarak tanımlarlar. Bu hata giderme algoritmaları her zaman doğru sonuç vermeyebilir. Sezgisel tahminde yanıldığında aslında seyrüsefere devam eden bir hareketi durma olarak da algılayabilir. Küçük değer seyrüsefer düzeltme ve son başarılı seyrüsefer noktasına göre hata düzeltme olarak iki alt gruba ayrılabilir.

Eşik değer: Temel olarak, seyrüseferin niteliği ile belirlenen bir referans ivme ve açısal hız değerinin altındaki hatadan kaynaklanma ihtimali yüksek değerleri yok sayarak (ilk durum 0'ı) değerlendirme işlemidir. Hareketin niteliğine göre referans değer aralığında kalan duyarga değerlerini yok sayma işlemi değişiklik gösterebilir. Örnek olarak, durağan seyrüsefer halindeki sistem duyargalarından okunan değerler yok sayılır ama hareketli haldeki duyarga değerlerinin işaret değiştirmesi ile referans noktası içinde kaldığı durumlarda bu değerler hesaba katılabilir.

Küçük değer seyrüseferleri: DCM matrislerinin küçük açı dönüşümlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem de küçük açı seyrüsefer hesaplamasıdır. δt zaman aralığında, gövde çerçevesinin dikilme, yatış ve yalpa eksenlerindeki $\delta\phi$, $\delta\theta$, $\delta\psi$ açı dönüşleri çok küçük ise; $\sin\delta\phi \to \delta\phi$, $\sin\delta\theta \to \delta\theta$, $\sin\delta\psi \to \delta\psi$ olarak ve bu açıların kosinüsleri de bir olarak kabul edilebilir. Denklem **(2.9)**'daki DCM matrisinin Euler açıları cinsinden ifadesi bu değerler ile aşağıdaki gibi güncellenir.

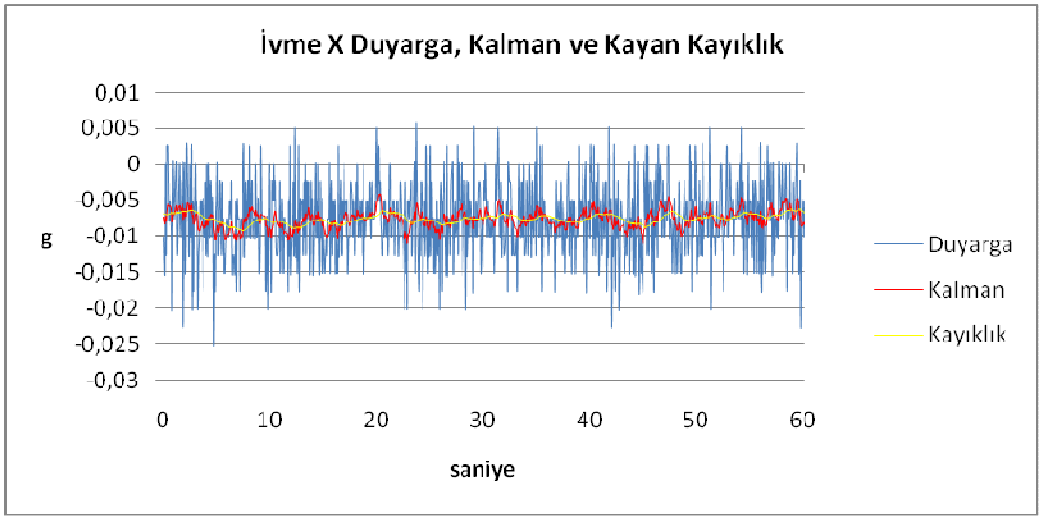
$$DCM_{KAD} = \begin{bmatrix} 1 & -\delta\psi & \delta\theta \\ \delta\psi & 1 & -\delta\phi \\ -\delta\theta & \delta\phi & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\delta\psi & \delta\theta \\ \delta\psi & 0 & -\delta\phi \\ -\delta\theta & \delta\phi & 0 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(4.1)}$$

DCM_{KAD} küçük açı değişimi için DCM matrisini ifade etmektedir.

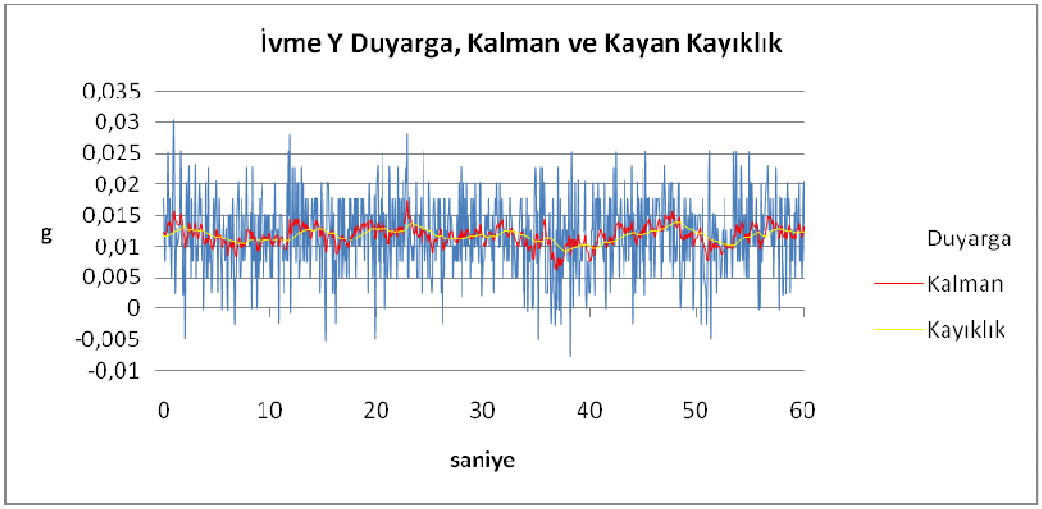
Son başarılı durum düğümü: İnsan hareketleri göz önüne alınarak ve bilinen bir ilk durum hızında bir yer değiştirme işleminin en basit ifadesinin, yani belirli bi yönde ivme ve akabinde ters yönde ivme ile durma veya ilk hız durumuna geri dönme göz önüne alınarak tasarlanmış bir sezgisel hata ayıklama algoritmasıdır. Hareket eksenlerinde okunan değeri belirli sayıda son ivme değerleri ile karşılaştırıp hareket davranışını belirler. Anlık hıza etki eden bir ivme değeri sezdiğinde son başarılı seyrüsefer düğümü olarak ivme değerinin sisteme etkiyen anını kaydeder ve ivmelerin değişimine göre belirli bir süre boyunca ivmelerin davranışını inceler. İvme değerlerindeki değişimi ve kovaryansını takip ederek bu değerlerin belirlenen 0'a yaklaşıklıkta olup olmadığına göre ivme değerlerini hesaba katıp katmamaya

karar verir. Hesaba katılan ivme değerleri için belirli aralıkla son başarılı düğüm değeri atanır ve sezgisel olarak karşılaştırma döngüsel olarak devam eder.

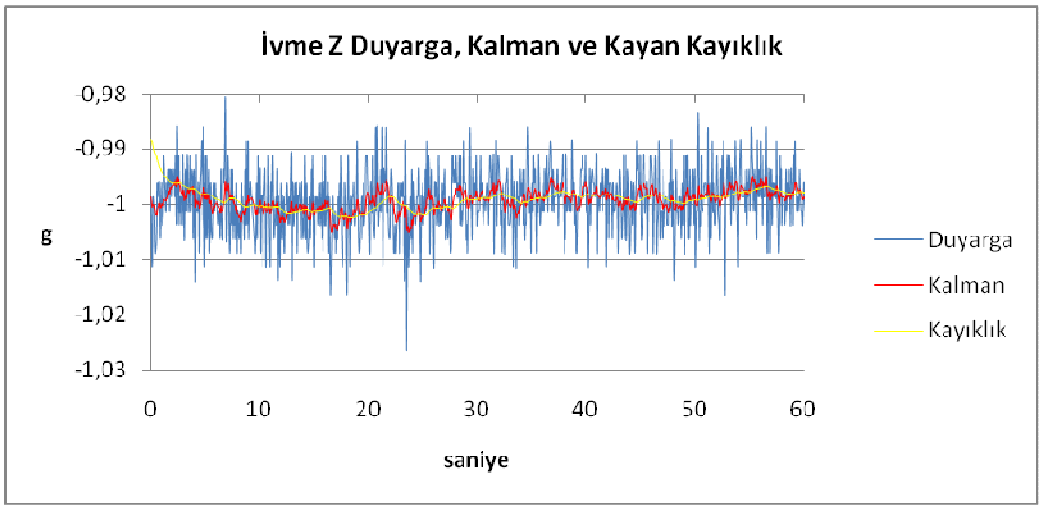
Kayan ortalamalı kayıklık: Duyarga kayıklıkları her ne kadar ilk durum ayarlamalarında kayıklık değerleri düzletiliyorsa da çalışma zamanında, duyarga gürültüleri, sıcaklık vb. etkenler ile değişim gösterebilir ve ilk durumdaki duyarga kayıklık değerleri çalışma zamanında farklı olabilir. Bu problemi ortadan kaldırmak için kayan ortalamalı bir kayıklık değerine göre eksenlerdeki 0 değeri güncellenir. Yazılımla belirlenen bir sayıdaki son okunan değerlerin ortalaması alınarak bu kayan kayıklık değeri belirlenir. EDHB algoritmasında kullanılacak duyarga değerleri Kalman filtresi çıktısının hesaplanan kayan ortalamalı sıfır değerlerinden farkıdır. Bu değerlerin güncellenmesi sezgisel olarak veya eşik değerin altında kalan duyarga değerleri okunduğu zamanlarda yapılmaktadır. Doğru sonuç vermesi sezgisel algoritmanın veya kullanılan eşik değerin başarımı ile doğru orantılıdır. İvmeölçerler ile ilgili Duyarga çıktısı, Kalman filtresi sonucu ve kayan sıfır kayıklık değerleri **Şekil 4.4**, **4.5** ve **4.6**'da; Jiroskop duyargaları ile ilgili çıktılar **Şekil 4.7**, **4.8** ve **4.9**'da görülmektedir.



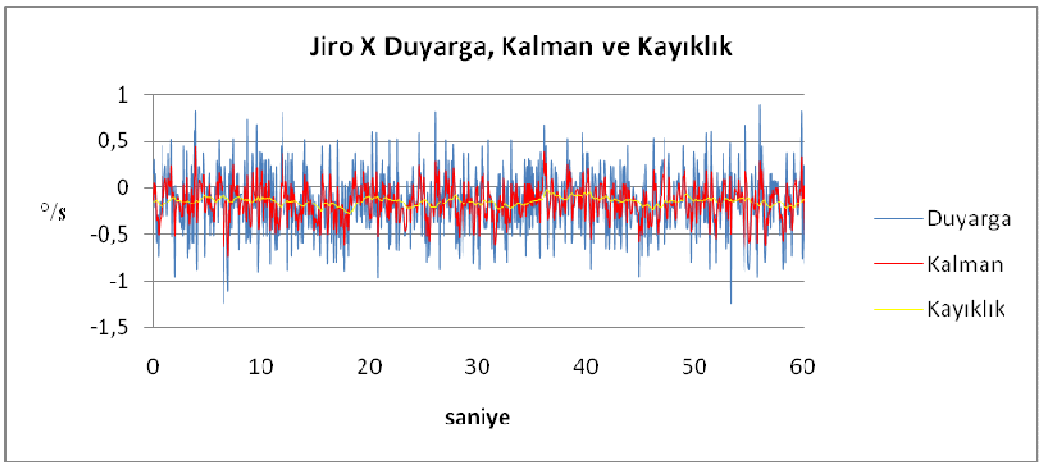
Şekil 4.4: İvme X duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları



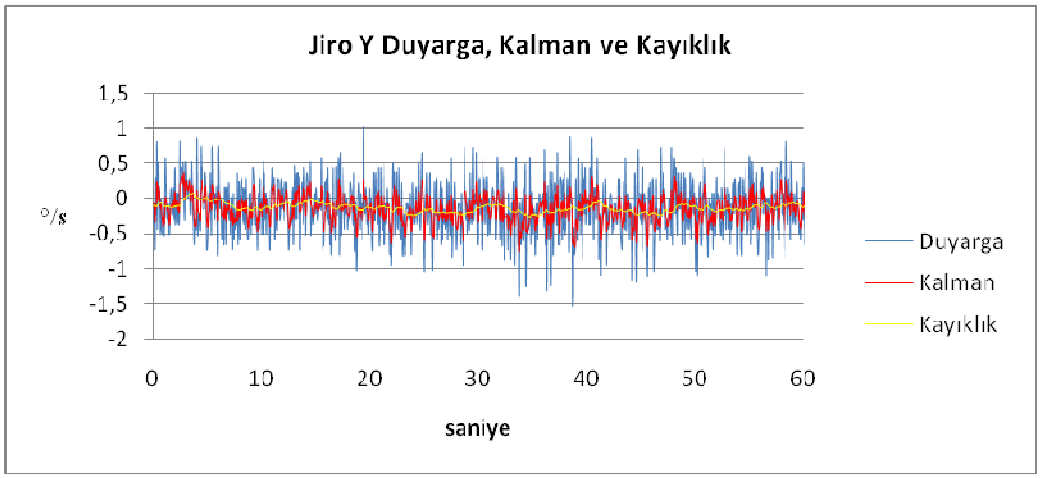
Şekil 4.5: İvme Y duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları



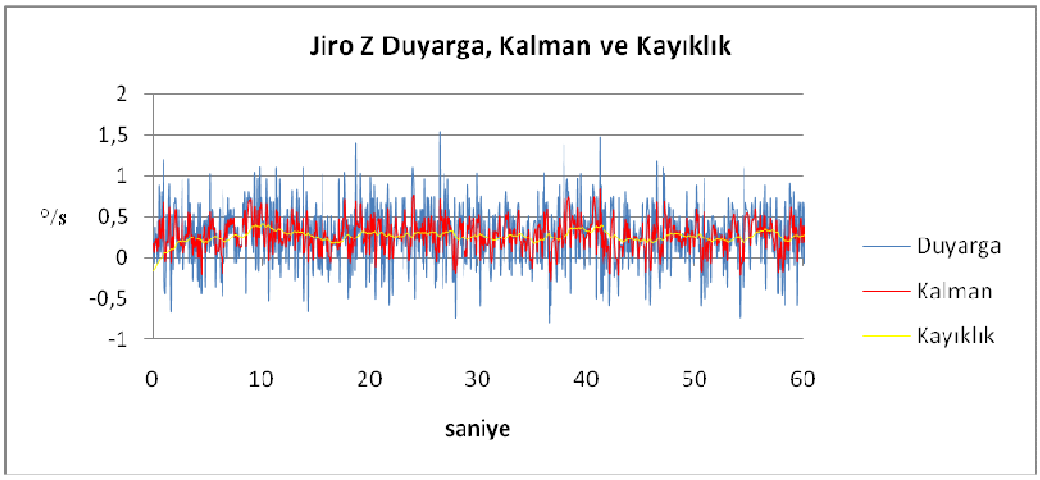
Şekil 4.6: İvme Z duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları



Şekil 4.7: Jiro X duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları



Şekil 4.8: Jiro Y duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları



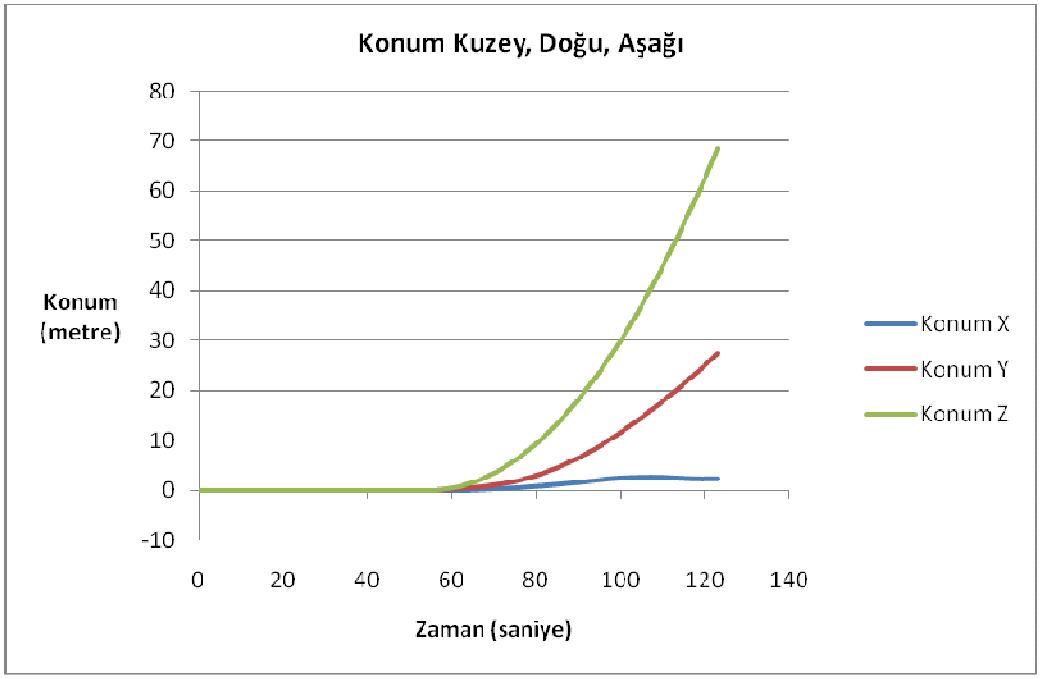
Şekil 4.9: Jiro Z duyarga, Kalman ve kayan ortalamalı kayıklık çıktıları

4.2 Test Sonuçları

Bu bölümde hata iteratif Analitik EDSD algoritması ve hata algoritması ile Analitik EDSD algoritmasının test çalışma sonuçları gösterilecektir.

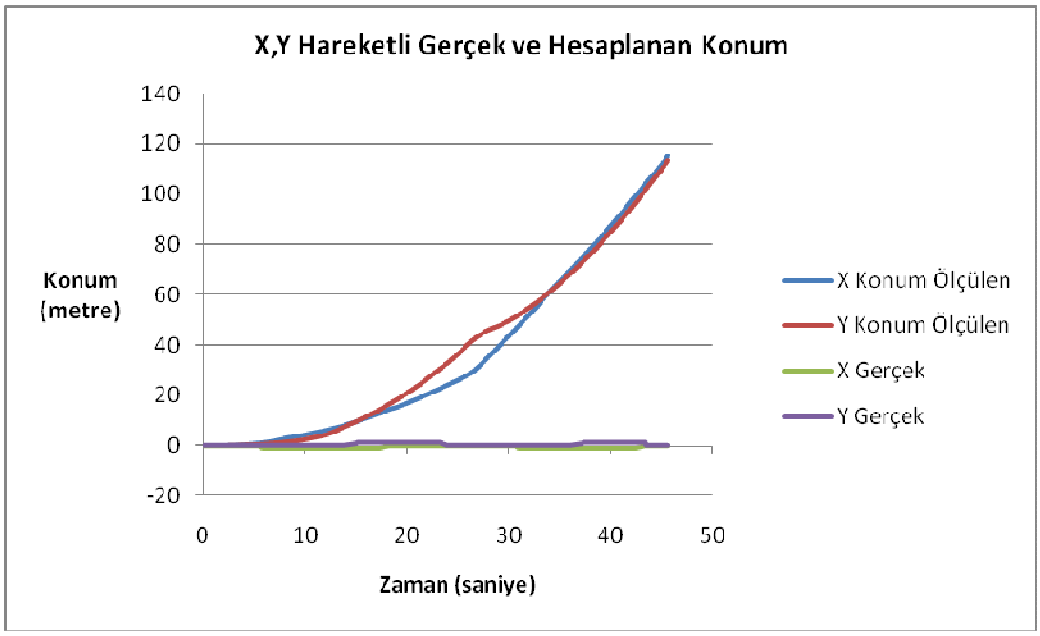
4.2.1 İteratif analitik EDSD test sonuçları

İteratif EDSD algoritması uygulanmadan önce jiroskop ve ivmeölçer kayıklık konfigürasyonları yapılmıştır. Sadece ilk durum kayıklıkları hesaba katılarak hareketsiz durumda seyrüsefer çerçevesinde zamanla hesaplanan konum bilgileri **Şekil 4.10**'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10: İteratif EDSD hareketsiz ölçüm

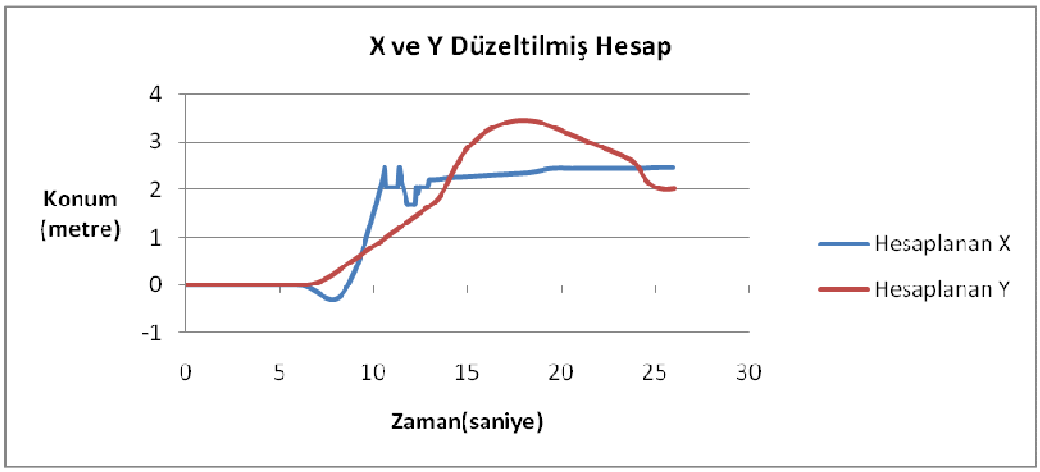
İteratif ölçüm hareketli konum ile ilgili grafik **Şekil 4.11**'te gösterilmiştir.



Şekil 4.11: İteratif EDSD hareketli ölçüm

4.2.2 Sezgisel hata ile iteratif analitik EDSD test sonuçları

Uygulanan sezgisel hata algoritmaları ile 1 m^2'lik bir alanda önce pozitif x yönünde daha sonra pozitif y yönünde ve daha sonra negatif x yönünde ve nihai olarak da negatif y yönünde, alan çevresinde yapılan sefer sonucu hata düzeltme algoritması çıktısı **Şekil 4.12**'de verilmiştir. Hareket başlangıcında ve kare hareket alanının bitişinde yaklaşık 5sn beklenmiştir. Testte kayıklık ilk durum belirlenmesinden sonra sürekli bir pencere aralığı olarak görülmüş ve kayıklık gelen veri ile güncellenmiştir. Belirlenen eşiğin altındaki ivme ve jiroskop verileri yok sayılmış, sadece kayıklığın güncellenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 4.12: Sezgisel hata düzeltme ile seyrüsefer testi (2 boyut)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Eylemsizliğe Dayalı Seyrüsefer dizgesi sonuçları başarı ile alındı. Test ortamında yapay girdi değerleri ile algoritma test edildi ve doğru olarak çalıştığı görüldü. Gerçek zaman testlerinde, sistemin başarısız sonuçlar verdiği gözlemlendi. Kalman filtresi sistem girdilerine göre tek boyutlu 6 duyarga değeri için tasarlandı. Kalman filtresinin sistem modellemede tüm değişkenleri dâhil edilerek daha başarılı bir sonuç vermesi mümkündür. ADIS16350 otomatik verev ve dikeylik ayarlama özellikleri başlangıç durumu olarak atandı ve bu ilk ayarlamaların doğru olduğu kabul edildi. Konum ve doğrultudaki hatalar zamanla duyargaların sıcaklık değerlerinden kaynaklanan hata payları çok hızlı büyüdüğünden sıcaklığın kayıklık değerlerine etkisi sistem modellenmesinde dikkate alınmadı.

Daha hassas ve kaliteli duyargaların kullanımı ve bir referans konum ölçer işbirliği ile çok daha başarılı sonuçlar almak mümkün. Eklenen sistem ölçüm birimine göre Kalman filtresi modellemesi, geribeslemeli olarak çalışabilecek şekilde güncellenebilir. Bu eklemelerdeki parametreler, seyrüsefer yapılacak uzay ve seçilecek ek referans duyarga sistemi ile değişimler gösterir. Optimum koşullara göre belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

Analog Devices, 2007. ADIS16350 Inertial Sensor Data Sheet, *www.analog.com*. (son tarih: 15/12/2008)

Biezad, D. J., 1999. Integrated Navigation and Guidance Systems, QED Educational Services, American Institute of Aeronautics and Austronautics, Inc., Reston, Ohio.

Bar-Itzhack, I. Y. ve Berman, N., 1988. Control Theoretic Approach to Inertial Navigation Systems, Journal of Guidance, **11**, No. 3, pp. 237- 245.

Bror, T. ve Karlsson, V., 2003. Structure of an Inertial Navigation System, *Thesis for the degree of Bachelor of Science in Electrical enginering /Mechatronics,* FH-Darmstadt, University of Applied Science.

Chatfield A. B., 1997. Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation **174**, Progress in Austronautics and Aeronautics, Cambridge, Massachusetts.

Friedland, B., 1974. Analysis Strapdown navigation Using Quaternions, IEEE Transaction on Aerospace and Electronic systems, Vol. **14**, No. 5, pp.764-767

Jamshaid, A. ve Fang, J., 2000. Alignment of Strapdown Inertial Navigation System A Literature Survey Spanned Over The Last 14 Years, *Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, Beijing.

Kumar, N. V., 2004. Integration of Inertial Navigation system and Global Positioning System Using Kalman Filtering, *Msc Thesis*, Departmant of Aerospace Engineering, Indian Institute of Techonolgy, Bombay.

Panzieri, S., Pascucci, F. ve Ulivi, G. 2002. An Outdoor Navigation System using GPS and Inertial Platform, *IEEE ASME Transactions on Mechatronics*, **7**, No.2.

Parnian, N., 2008. Integration of Local Positioning System & Strapdown Inertial Navigation System for Hand-Held Tool Tracking, *Phd Thesis* , Waterloo, Ontario, Canada.

Schmidt, G. T., 1978. Strapdown Inertial Systems - Theory and Applications, AGARD Lecture Series, **95**.

Syed, Z. F., Aggarwal, P., Goodall, C., Niu, X. ve El-Sheimy, N., 2007. A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems, *Measurements Science and Technology,* **18**, pp. 1897-1907.

Titterton, D. H. ve Weston, J. L., 2004. Strapdown Inertial Navigation Technology, **207**, Pual Zarchan, MIT Lincoln Laboratory Lexington, Massachusetts.

Welsc, W. ve Bishop, G. 2001**.** An Introduction to the Kalman Filter, *Research Sheet,* Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, USA.

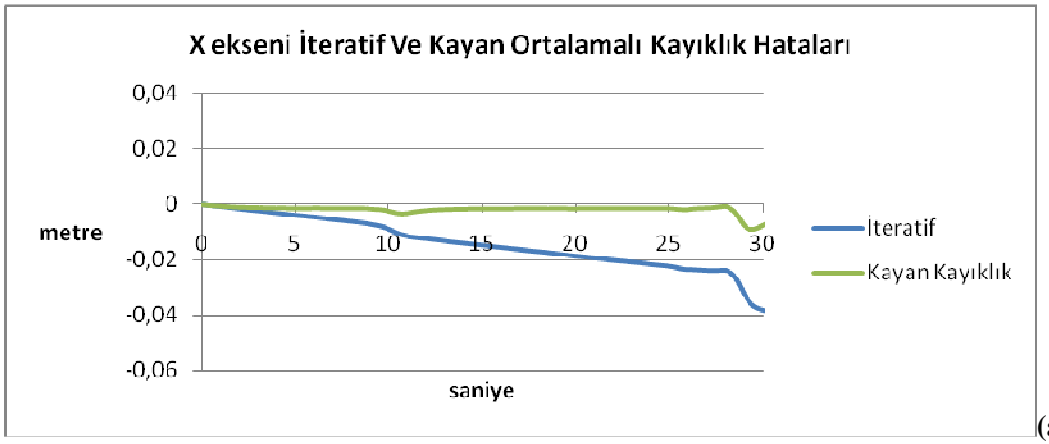
Woodman, O.J., 2007**,** An introduction to inertial navigation, *Technical Report,* Computer Labaratory, University of Cambridge, United Kingdom.

EKLER

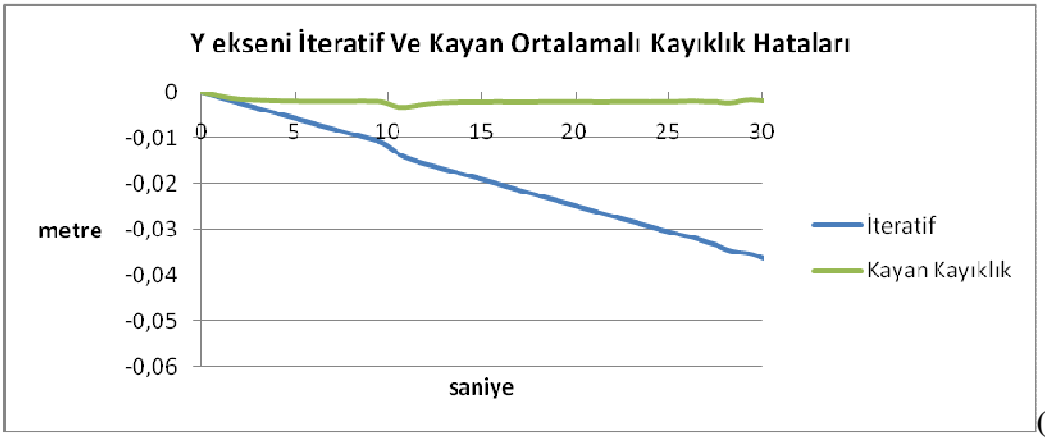
Ek A.1: Duyarga hatalarının karşılaştırılması

EK A.1

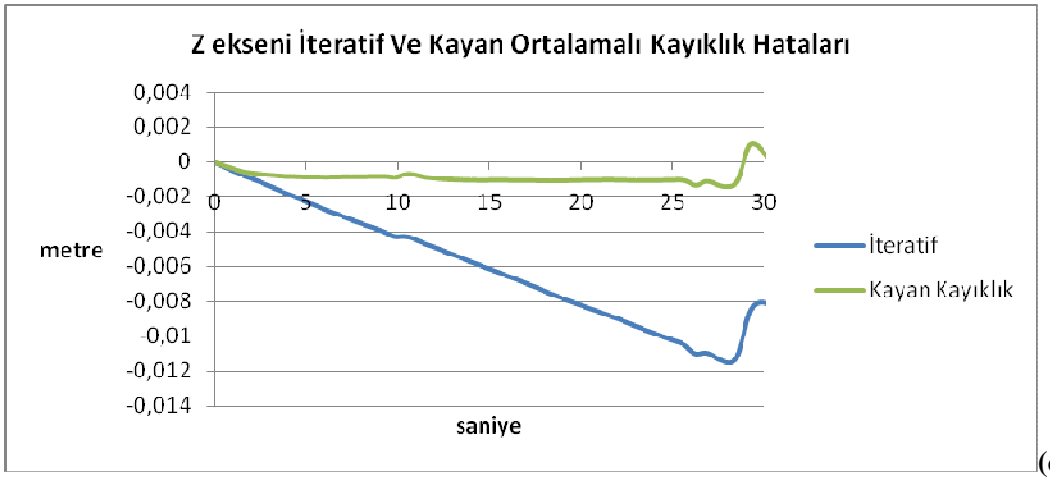
Tek eksende iteratif hareketsiz konumda iteratif EDSD ve Kalman filtresi çıkışının kayan ortalamalı kayıklık ile karşılaştırılması aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil A.1: Tek boyutta iteratif ve kayan ortalamalı kayıklık hataları

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Meriç Yücel

Doğum Yeri ve Tarihi: Adana, 6 Ocak 1982

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü (2001- 2005)