

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEYİR VE KONUMLANDIRMA SİSTEMLERİNDE  
ALGILAYICI TÜMLEŞTİRME**

**Elektrik Müh. Ergin Utku GENÇ**

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Kontrol ve Otomasyon Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Kayhan Gülez**

**İSTANBUL, 2008**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

|                                                                  |      |
|------------------------------------------------------------------|------|
| İÇİNDEKİLER.....                                                 | ii   |
| SİMGE LİSTESİ .....                                              | iv   |
| KISALTMA LİSTESİ .....                                           | v    |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                              | vi   |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                            | vii  |
| ÖNSÖZ .....                                                      | viii |
| ÖZET .....                                                       | ix   |
| ABSTRACT .....                                                   | x    |
| 1. GİRİŞ.....                                                    | 1    |
| 2. SUALTI SEYİR ve KONUMLANDIRMA SİSTEMLERİ.....                 | 4    |
| 2.1 Seyir algılayıcı sistemleri .....                            | 5    |
| 2.1.1 Derinlik algılayıcı.....                                   | 5    |
| 2.1.2 Doppler hız algılayıcısı (DVL).....                        | 7    |
| 2.1.3 Akustik konumlandırma sistemleri .....                     | 9    |
| 2.1.4 Oryantasyon algılayıcıları .....                           | 10   |
| 2.1.5 Ataletsel seyir sistemleri .....                           | 10   |
| 2.1.6 Küresel konumlandırma sistemleri (GPS).....                | 11   |
| 2.2 Seyir Sistemlerinde Algılayıcı Tümlleştirme .....            | 11   |
| 2.2.1 Stokastik Model Tabanlı Durum Kestirimi .....              | 12   |
| 2.2.2 Deterministik Durum Kestirimi.....                         | 13   |
| 2.2.3 Yeryüzü Şekil ve Özelliklerini Kullanarak Seyir.....       | 13   |
| 3. SUALTI ARAÇLARININ MODELLENMESİ.....                          | 14   |
| 3.1 Sualtı Araçlarının Kinematiği .....                          | 14   |
| 3.1.1 Seyir referans sistemleri .....                            | 15   |
| 3.1.2 Vektörel ifadeler.....                                     | 17   |
| 3.1.3 Gövde ve KDA referans sistemleri arasında dönüşümler ..... | 18   |
| 3.1.4 6 SD kinematik denklemler .....                            | 21   |
| 4. KALMAN FİLTRESİ .....                                         | 22   |
| 4.1 Giriş .....                                                  | 22   |
| 4.2 Ayırık Doğrusal Kalman Filtresi .....                        | 23   |
| 4.3 Ayırık Kalman Filtresi Algoritması.....                      | 25   |
| 5. BENZETİM.....                                                 | 29   |
| 5.1 Kabul ve Varsayımlar.....                                    | 29   |

|     |                                                            |    |
|-----|------------------------------------------------------------|----|
| 5.2 | Sistem ve Kalman Filtresi Modelinin Oluşturulması .....    | 29 |
| 5.3 | Benzetim Verilerinin Oluşturulması .....                   | 34 |
| 5.4 | Benzetim Senaryoları .....                                 | 36 |
| 6.  | SONUÇLAR .....                                             | 40 |
|     | KAYNAKLAR.....                                             | 41 |
|     | EKLER .....                                                | 45 |
|     | Ek 1 Simölasyonda kullanılan MATLAB kodu: veri_uret.m..... | 46 |
|     | Ek 2 Simölasyonda kullanılan MATLAB kodu: kalman.m .....   | 48 |
|     | ÖZGEÇMİŞ.....                                              | 53 |

## SİMGE LİSTESİ

|                 |                                            |
|-----------------|--------------------------------------------|
| $R_b^n(\Theta)$ | Rotasyon matrisi                           |
| $T(\Theta)$     | Açısal dönüşüm matrisi                     |
| $u$             | x eksenini boyunca doğrusal hız            |
| $v$             | y eksenini boyunca doğrusal hız            |
| $w$             | z eksenini boyunca doğrusal hız            |
| $p$             | x eksenini etrafında açısal hız            |
| $q$             | y eksenini etrafında açısal hız            |
| $r$             | z eksenini etrafında açısal hız            |
| $\phi$          | Yalpa açısı                                |
| $\theta$        | Baş-kıç vurma açısı                        |
| $\psi$          | Savrulma açısı                             |
| $x_b, y_b, z_b$ | b-sisteminde konum                         |
| $P^e$           | e-sisteminde konum                         |
| $\mathbb{R}^3$  | 3 boyutlu öklid uzayı                      |
| $\mathbb{S}^3$  | 2 boyutlu torus                            |
| $v_O^b$         | doğrusal hız vektörü                       |
| $\omega_{nb}^b$ | Açısal hız vektörü                         |
| $\Theta$        | Euler açıları                              |
| $P^-$           | <i>a priori</i> hata kovaryans matrisi     |
| $P^+$           | <i>a posteriori</i> hata kovaryans matrisi |
| $\hat{x}_k^-$   | <i>a priori</i> durum kestirimi            |
| $\hat{x}_k^+$   | <i>a posteriori</i> durum kestirimi        |
| $A$             | Durum geçiş matrisi                        |
| $H$             | Ölçüm model matrisi                        |
| $w$             | Proses gürültüsü                           |
| $v$             | Ölçüm gürültüsü                            |
| $Q$             | Proses hatası kovaryans matrisi            |
| $R$             | Ölçüm hatası kovaryans matrisi             |

## KISALTMA LİSTESİ

|      |                                                                |
|------|----------------------------------------------------------------|
| AHRS | Attitude Heading Reference System                              |
| AUV  | Autonomous Underwater Vehicle (Otonom Sualtı Aracı)            |
| DOF  | Degree-of-Freedom (Serbestlik Derecesi)                        |
| DVL  | Doppler Velocity Log (Doppler Hız Algılayıcı)                  |
| GPS  | Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)      |
| GSK  | Güdümlü Seyir ve Kontrol                                       |
| IMU  | Inertial Measurement Unit (Ataletsel Ölçüm Birimi)             |
| INS  | Inertial Navigation System (Ataletsel Seyir Sistemi)           |
| KDA  | Kuzey-Doğu-Aşağı                                               |
| LBL  | Long Base Line                                                 |
| MEMS | Micro Electro Mechanical Sensor (Mikro Elektro-Mekanik Sensör) |
| NED  | North-East-Down (Kuzey-Doğu-Aşağı)                             |
| ROV  | Remotely Operated Vehicle (İnsansız Sualtı Aracı)              |
| SBL  | Short Base Line                                                |
| SD   | Serbestlik Derecesi                                            |
| SLAM | Simultaneous Localization And Mapping                          |
| USBL | Ultra-Short Base Line                                          |
| LQE  | Linear Quadratic Estimator                                     |
| LQR  | Linear Quadratic Regulator                                     |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 Bir ROV için GSK sisteminin basitleştirilmiş blok şeması (Fossen, 2002).....                                  | 4  |
| Şekil 2.2 Sualtı derinlik algılayıcı (Paroscientific 8000 serisi) .....                                                 | 7  |
| Şekil 2.3 Doppler hız algılayıcıları.....                                                                               | 8  |
| Şekil 2.4 Doppler hız algılayıcılarının sualtı araçlarında kullanımı.....                                               | 8  |
| Şekil 2.5 Sualtı konumlandırma sistemleri.....                                                                          | 10 |
| Şekil 3.1 Hareket değişkenleri.....                                                                                     | 15 |
| Şekil 3.2 Seyir referans koordinat sistemleri ( <a href="http://www.mathworks.com">http://www.mathworks.com</a> ) ..... | 16 |
| Şekil 4.1 Kalman filtresi çevrimi.....                                                                                  | 26 |
| Şekil 4.2 Kalman filtresi algoritması.....                                                                              | 27 |
| Şekil 5.1 Gevşek-bağlı algılayıcı tümleştirme basitleştirilmiş blok şeması .....                                        | 30 |
| Şekil 5.2 USBL ve DVL devre dışı iken XY konum takibi .....                                                             | 36 |
| Şekil 5.3 USBL ve DVL devre dışı iken X ekseninde konum kestirim hatası.....                                            | 37 |
| Şekil 5.4 USBL ve DVL devre dışı iken Y ekseninde konum kestirim hatası.....                                            | 37 |
| Şekil 5.5 USBL ve DVL devrede iken XY konum takibi .....                                                                | 38 |
| Şekil 5.6 USBL ve DVL devrede iken X ekseninde konum kestirim hatası.....                                               | 38 |
| Şekil 5.7 USBL ve DVL devrede iken Y ekseninde konum kestirim hatası.....                                               | 39 |
| Şekil 5.8 Z ekseninde konum (derinlik) kestirim hatası.....                                                             | 39 |
| Şekil 5.9 Z eksenine konum (derinlik) takibi .....                                                                      | 39 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 Seyir sensörlerinin teknik özelliklerinin karşılaştırılması (Kinsey vd., 2006) ..... | 6  |
| Çizelge 2.2 Farklı fiyat mertebesindeki ataletsel sistemlerin mukayesesi (Cramer, 1997).....     | 11 |
| Çizelge 2.3 Farklı sualtı seyir enstrümanlarının karşılaştırılması .....                         | 12 |
| Çizelge 3.1 Sualtı araçlarının kinematiğinde kullanılan semboller .....                          | 14 |
| Çizelge 4.1 Ayrık kalman filtresi için zaman güncellemesi denklemleri.....                       | 26 |
| Çizelge 4.2 Ayrık kalman filtresi için ölçüm güncellemesi denklemleri .....                      | 26 |
| Çizelge 5.1 Modellenen derinlik algılayıcı parametreleri .....                                   | 34 |
| Çizelge 5.2 Modellenen hareket ve oryantasyon algılayıcının teknik özellikleri.....              | 35 |
| Çizelge 5.3 Modellenen akustik konumlandırma sisteminin teknik özellikleri .....                 | 35 |
| Çizelge 5.4 Modellenen Doppler hız algılayıcının teknik özellikleri.....                         | 36 |

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada, sualtı araçlarının seyir sistemlerinde kullanılan algılayıcılar ve algılayıcı tümleştirme yöntemleri ele alınmıştır. Bu kapsamda, sualtı araçlarının kinematik modelleri ve Kalman filtresinin algılayıcı tümleştirme problemine uygulanması hakkında temel bilgiler verilmiştir. Bu bilgiler ışığında, basit Kalman filtresi kullanılarak durum kestirimi yapan, akustik konumlandırma sistemi, Doppler hız algılayıcı ve derinlik sensörü destekli bir ataletsel seyir sistemi benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmam süresince bana her türlü desteği sunan danışman hocam Sn. Kayhan GÜLEZ' e teşekkürlerimi sunarım.

...Ve tabi ki, yaşadığım, yarattığım her türlü strese rağmen kahrımı çeken, başta kardeşim Ayfer olmak üzere, aileme çok teşekkür ediyorum.

İstanbul, 2008

Ergin Utku GENÇ

## **ÖZET**

Seyir ve konumlandırma sistemlerinde kullanılan algılayıcılar ve algılayıcı tümleştirme yöntemleri konusunda bilgi verilmiştir. Böyle bir uygulamaya örnek olarak, bir sualtı aracının 9 durumlu denklemleri çıkarılmış ve doğrusal ayrık-zamanlı Kalman filtresi oluşturulmuştur. Kalman filtresi algoritması, USBL, DVL ve basınç sensörleri kullanılarak ataletsel seyir sisteminin desteklenmesi amacıyla kullanılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Seyir ve konumlandırma, Algılayıcı tümleştirme, Kalman filtresi

## **ABSTRACT**

Brief information on sensors and sensor fusion algorithms, which are used in navigation and positioning applications, were given. To simulate the concepts, 9-state state equations for an underwater vehicle was determined and applied to linear discrete Kalman filter algorithm. Kalman filter provided a method for aiding an inertial navigation system by a USBL, a DVL and a pressure sensor.

**Keywords:** Navigation and positioning, Sensor fusion, Kalman filter

## 1. GİRİŞ

İnsansız araçlar ve otonom sistemler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, geride bıraktığımız son 10 yılda büyük bir atılım göstermiştir. Özellikle askeri ve bilimsel çevrelerin konuya artan ilgileri, güncel teknolojik gelişmeler ve bunun sonucunda gelen maliyet düşüşleriyle de birleşince bu alandaki çalışmaların sayısı ve niteliği her geçen gün daha da artmaktadır. Özgün sorun ve ihtiyaçları ile bu alana en büyük katkıyı sağlayan araç gruplarından biri de insansız sualtı araçlarıdır.

İnsansız sualtı araçları konusunda gerçekleştirilen bilimsel çalışmaların yoğunlaştığı alan kuşkusuz seyir ve kontrol sistemleridir (Whitcomb, 2000). Bunun en önemli sebebi, geleneksel sualtı seyir algılayıcılarının artık bu cihazlardan beklenen performansı sağlamaya yetmiyor oluşudur (Kinsey vd., 2006; Stutters vd., 2008). Akustik konumlandırma sistemleri, manyetik pusulalar, basınç algılayıcıları gibi geleneksel yöntemlerin, günümüz teknolojisinin getirdiği Doppler sonarları, optik cayro-pusulalar ve ataletsel ölçüm birimleri gibi modern seyir donanımları ile birlikte kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir. Sualtı araçlarının navigasyon yeteneklerinin artması sonucu, bu araçlar için yüksek güncelleme hızı gerektiren kapalı çevrim kontrol algoritmalarının geliştirilmesi mümkün olacaktır. Bunun sonucu olarak da, daha hassas çalışan ve daha dayanıklı kontrol yöntemleri, örneğin, yüksek çözünürlüklü ve hassas oşinografik ölçümlerin, kamera görüntülerinin elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla, birden fazla algılayıcıyı ve seyir yöntemini aynı anda kullanan sistemler üzerinde yürütülen çalışmalar her geçen gün artmaya devam etmektedir. Algılayıcı tümleştirme veya daha genel adıyla veri tümleştirme, sualtı araçlarının navigasyonu konusunda geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir.

Sualtı seyir sistemlerinin özgün problemlerinden bir tanesi, kara ve hava araçlarında rahatlıkla kullanılabilen ve ataletsel navigasyona destek olarak (Wendel vd., 2006;) en çok tercih edilen yöntem olan Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS)' nin, yüksek frekanslı dalgaların suda uzun mesafeler kat edememesi nedeniyle sualtı araç tasarımcıları tarafından ancak kısıtlı uygulamalarda kullanılabilmesidir. McGee vd. (1995), GPS ve ataletsel navigasyon sistemini, yüzeye yakın görev yapan bir AUV' de başarıyla kullanmışlardır. Aynı şekilde Yun vd. (1999) sığ sulara çalışan dolayısıyla sık sık yüzeye çıkıp küresel konum bilgisini güncelleyebilen otonom bir sualtı aracında GPS/INS tümleştirmesini başarıyla gerçekleştirmişlerdir.

Ancak, aracın uzun süre sualtında kalması gerekiyorsa (Zhao ve Gao, 2004) GPS sisteminin yanında ataletsel algılayıcılara destek olacak başka bir sistemin mutlaka bulunması gerekmektedir. Örneğin, (Mandt vd., 2001)' de diferansiyel GPS sistemi, sualtında uzun süre kalınması gerektiği için USBL akustik konumlandırma sistemiyle birlikte kullanılmıştır. Aksi halde, ataletsel sensörler tarafından entegrasyon yoluyla biriktirilen hatalar konum ve hız takibini imkânsız hale getirecektir. USBL ve ataletsel algılayıcıların tümleştirildiği bir başka uygulama da Morgado vd. (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir ve yalnızca akustik sistemin kullanıldığı duruma göre konum kestirim hatasında gözle görülür bir düşüş yakalanmıştır.

Sonar teknolojisindeki gelişmeler sayesinde maliyeti düşen ve yaygınlaşan Doppler sonarları, ya da bir başka deyişle Doppler hız algılayıcıları, deniz/su tabanına yakın irtifada çalışılırken ataletsel seyir sistemlerine büyük destek sağlamaktadırlar. Blain vd. (2003), Doppler, akustik konumlandırma sistemi ve derinlik ölçümlerini ataletsel seyir sistemine destek olarak kullandıkları çalışmalarında çok az işlem gücü isteyen ve tasarımı kolay olan Kalman filtresiyle düşük hata oranlarına ulaşmayı başarmışlardır.

Kalman filtresi, algılayıcı tümleştirme uygulamalarında kullanılan algoritmalarından yalnızca bir tanesidir. Günümüzde, parçacık filtresi algoritmalarından (Gordon vd., 1993) gelişmiş makine öğrenmesi yöntemlerine (Loebis vd., 2007) kadar birçok yöntem sualtı algılayıcı tümleştirme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntemler, stokastik model-tabanlı durum kestirimciler, yeryüzü şekil ve özelliklerini kullanarak seyir yapan yöntemler, yakın zamanda ortaya atılan ve yaygınlaşan eşzamanlı yer belirleme ve haritalama (SLAM) yöntemleri ve son olarak deterministik durum kestirimcileri olarak özetlenebilir.

Bu çalışmada, uluslar arası alanda yoğun ilgi gören ancak ülkemizde, deniz teknoloji ve bilimlerinin gelişme gösterememiş olması sebebiyle, üzerinde çok fazla çalışma ve yayın yapılamayan bir konuya katkı sağlamak hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, sualtı araçlarında kullanılan seyir ve algılayıcı tümleştirme yöntemleri üzerinde literatür taraması yapılmıştır. Sualtı araçlarında kullanılan algılayıcılar, bu algılayıcıları kullanan seyir yöntemleri ve bunların bir arada kullanılmasını mümkün kılan algılayıcı tümleştirme yöntemleri incelenmiştir. Sualtı araçlarının modellenmesi, koordinat referans sistemleri ve Kalman filtresi konusunda temel bilgiler verildikten sonra bir algılayıcı tümleştirme benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetim kapsamında, akustik konumlandırma sistemi (USBL), Doppler hız algılayıcısı ve derinlik algılayıcısı, gevşek-bağlı bir yapıda, ataletsel seyir sistemini destekleme amacıyla kullanılmıştır. Aracın üç boyutlu hareket modeli

kullanılarak doğrusal Kalman filtresiyle gerçekleştirilen benzetimin sonuçları ve analizleri sunulmuştur.

## 2. SUALTI SEYİR ve KONUMLANDIRMA SİSTEMLERİ

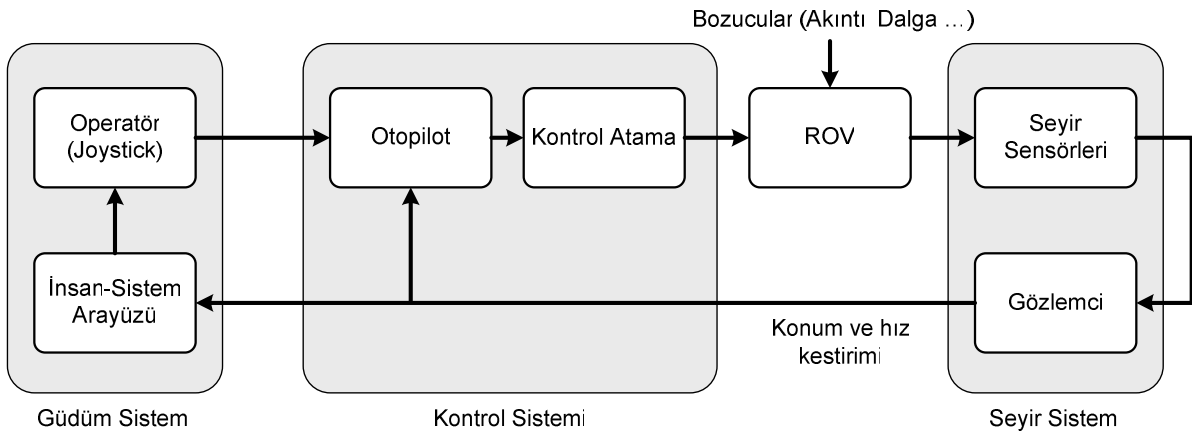
Bu bölümde, öncelikle sualtı araçları için seyir ve konumlandırma problemlerinin tanımı yapılmış ardından sualtı araçlarında kullanılan seyir ve konumlandırma sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Seyir sistemleri incelenirken öncelikle algılayıcılar ve bu tek algılayıcı türünü kullanan seyir yöntemleri ele alınmıştır. Ardından, farklı algılayıcıların ve seyir yöntemlerinin tümleştirilerek kullanılmasını sağlayan yöntemler tanıtılmıştır.

Sistemler ve otonom araçlar literatüründe, seyir, ya da diğer adıyla navigasyon, aşağıdaki iki tanımdan birini karşılamak amacıyla kullanılmaktadır (Farrell ve Barth, 1999):

- Konumun ve hızın bilinen bir referans noktasına göre doğrulukla belirlenmesi
- Bir noktadan diğerine ulaşabilmek için gereken manevraların planlanması ve gerçekleştirilmesi

Görülmektedir ki, ikinci tanımın gerçekleştirilebilmesi için navigasyonun birinci tanımında belirtilen hedeflerin yerine getirilmesi gerekmektedir. Bu tez metninde, seyir sistemlerinin yukarıda verilen birinci tanımı esas alınacaktır. İkinci tanımın gerçekleşmesi için gereken güdüm, rota ve yörünge planlama konularına değinilmeyecektir.

Güdüm, seyir ve kontrol (GSK) probleminin bir sistem yaklaşımı olarak ele alınması Şekil 2.1’ de gösterilmiştir. GSK probleminin amacı, kontrol edilen sistemin yer değiştirme hareketini gerçekleştirebilmesi için gereken bir dizi görevi yerine getirmesini sağlamaktır.



Şekil 2.1 Bir ROV için GSK sisteminin basitleştirilmiş blok şeması (Fossen, 2002)

Bir aracın seyir sistemi tasarlanırken, aracın özel ihtiyaçlarına göre, farklı sensör ve seyir yöntemlerinden biri kullanılabileceği gibi tüm bu yöntemlerin bir kombinasyonu da uygulanabilir. Kullanılacak sensör ve navigasyon tekniklerinin seçimi, büyük oranda ihtiyaç

duyulan hassasiyet, seyir ve diğer sensörlerin güncellenme hızı, sensör maliyeti, güç, derinlik, mesafe ve kurulum-kalibrasyon için gereken zaman gibi faktörlere bağlıdır.

## 2.1 Seyir algılayıcı sistemleri

**Gerilmeye Duyarlı Algılayıcılar:** Bu sensörler, basınç ölçmek amacıyla, elastik bir basınç diyaframı üzerine bir Wheatstone köprüsü şeklinde yerleştirilmiş ve elektriksel direnci gerilmeye bağlı olarak doğrusal olarak değişen malzemeler kullanılmaktadırlar. En sık kullanılan algılama elemanları bazı metal alaşımları (ör. %60 Bakır ve %40 Nikel içeren Constantan) ve silikon kristalleridir.

Gerilmeye duyarlı basınç sensörleri %0,1' e yaklaşan doğruluklarda üretilebilmektedirler. Ayrıca %0,01 oranında çözünürlük sağlamaktadırlar. Yüksek doğruluğa ulaşabilmek için kalibrasyon ve algılayıcının bulunduğu termal şartlara bağlı kazanç değişimleri ve kaymalara karşı kompanzasyon gereklidir.

Çizelge 2.1' den görülebileceği gibi derinlik, irtifa, baş-kıç vurma ve yalpa açıları gibi değişkenler aracın dört serbestlik derecesinde (4DOF) doğrudan sistemin durumu (konum ve hız) hakkında bilgi veren yüksek güncelleme hızına sahip algılayıcılar tarafından ölçülebilmektedir. Ancak XY yatay düzleminde bu tarz bir doğrudan ölçümü gerçekleştirebilen algılayıcıların yokluğu bu serbestlik derecelerinde navigasyonu karmaşık bir problem haline getirmektedir. Sualtı araçlarının seyir sistemleri alanındaki önemli boşluklardan birisi de budur. Doppler ve ataletsel ölçüm sistemlerindeki gelişmeler sayesinde XY konum takibinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir.

### 2.1.1 Derinlik algılayıcı

Sualtı araçlarında derinlik tespiti amacıyla basınç algılayıcıları kullanılmaktadır. Bu sensörler, derinlik bilgisini, maruz kaldıkları deniz suyu basıncını standart denklemler (Fofonoff ve Millard, 1983) vasıtasıyla işleyerek elde ederler. Günümüzde, sualtı sistemlerinde en sık kullanılan basınç sensör teknolojileri:

- Gerilmeye duyarlı (strain-gauge) algılayıcılar ve
- Kuvars kristalli algılayıcılardır.

**Gerilmeye Duyarlı Algılayıcılar:** Bu sensörler, basınç ölçmek amacıyla, elastik bir basınç diyaframı üzerine bir Wheatstone köprüsü şeklinde yerleştirilmiş ve elektriksel direnci gerilmeye bağlı olarak doğrusal olarak değişen malzemeler kullanılmaktadırlar. En sık

kullanılan algılama elemanları bazı metal alaşımları (ör. %60 Bakır ve %40 Nikel içeren Constantan) ve silikon kristalleridir.

Gerilmeye duyarlı basınç sensörleri %0,1' e yaklaşan doğruluklarda üretilebilmektedirler. Ayrıca %0,01 oranında çözünürlük sağlamaktadırlar. Yüksek doğruluğa ulaşabilmek için kalibrasyon ve algılayıcının bulunduğu termal şartlara bağlı kazanç değişimleri ve kaymalara karşı kompanzasyon gereklidir.

Çizelge 2.1 Seyir sensörlerinin teknik özelliklerinin karşılaştırılması (Kinsey vd., 2006)

|                           | Enstrüman                           | Değişken                         | Güncelleme Hızı               | Doğruluk           | Menzil              | Hata Birikimi    |
|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| Araç Üzerindeki Sensörler | Akustik İrtifa Ölçer                | Z – İrtifa                       | Değişken: 0.1 – 10Hz arasında | 0.01 – 1.0 m       | Frekansa bağlı      | -                |
|                           | Basınç Sensörü                      | Z - Derinlik                     | Orta: 1Hz                     | %0.1 - %1          | Okyanus derinliği   | -                |
|                           | Meyil ölçer                         | Yalpa ve baş-kıç vurma           | Hızlı: 1 - 10Hz               | 0.1° – 1°          | + / - 45°           | -                |
|                           | Manyetik Pusula                     | Savrulma - Yön                   | Hızlı : 1 – 10Hz              | 1° – 10°           | 360°                | -                |
|                           | Cayroskop (Mekanik)                 | Savrulma - Yön                   | Hızlı : 1 – 10Hz              | 0.1°               | 360°                | 10° / saat       |
|                           | Cayroskop (Lazer ve fiber-optik)    | Savrulma - Yön                   | Hızlı: 1 – 1600Hz             | 0.1° - 0.01°       | 360°                | 0,1 - 10° / saat |
|                           | Cayroskop (kuzey arayan)            | Yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma | Hızlı: 1- 100Hz               | 0.1° - 0.01°       | 360°                | -                |
|                           | Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU)        | $\ddot{x}, \omega, \dot{\omega}$ | Hızlı: 1 – 1000Hz             | 0.01m              | değişken            | değişken         |
|                           | Doppler hız algılayıcı (DVL)        | $\dot{x}_{body}$                 | Hızlı: 1 – 5Hz                | %0.3 ve daha az    | Değişken: 18 – 100m | -                |
| Harici Sensörler          | USBL                                | x,y,z konumu                     | 0.5 – 2.0 Hz                  | Menzilin %0.2'si   | 1 – 10000m          | -                |
|                           | 12 kHz LBL                          | x,y,z konumu                     | Değişken: 0.1 – 1.0Hz         | 0.1 – 10m          | 5-10 km             | -                |
|                           | 300 kHz LBL                         | x,y,z konumu                     | Değişken: 1.0 – 10Hz          | + / - 0.007m       | 100m                | -                |
|                           | Küresel konumlandırma sistemi (GPS) | x,y,z konumu                     | Hızlı: 1- 10Hz                | 0.1 – 10m (havada) | Suda: 0m            | -                |

Kuvars Kristalli Algılayıcılar: Bu algılayıcılar, sualtı ortamı basıncına maruz kalan kuvars kristallerinin rezonasyon frekansının değişiklik göstermesi prensibinden yararlanmaktadırlar.

Kuvars kristali kullanan basınç algılayıcıları %0,01 oranında doğruluğa ve %0,0001 oranında hassasiyete ulaşabilirler. Tıpkı gerilmeye duyarlı algılayıcılar gibi, yüksek doğruluğa ulaşabilmeleri için kalibrasyon ve algılayıcının bulunduğu termal şartlara bağlı kazanç değişimleri ve kaymalara karşı kompanzasyon şarttır.

Her iki tip basınç algılayıcısı da doğruluk oranlarını arttırmak amacıyla yapılarında sıcaklık algılayıcısı bulundurmaktadır. Sıcaklık algılayıcısı hata kompanzasyonunda kullanılır.



Şekil 2.2 Sualtı derinlik algılayıcı (Paroscientific 8000 serisi)

### 2.1.2 Doppler hız algılayıcısı (DVL)

Doppler hız algılayıcısı, Doppler prensibinden yararlanarak deniz tabanına göre hız vektörü üretebilen bir sonardır. Yüksek frekanslı ve çok-demetli (multi-beam) sonar teknolojisindeki gelişmeler, bu algılayıcıların doğruluklarının artmasını ve maliyetlerinin düşmesini sağlamıştır.

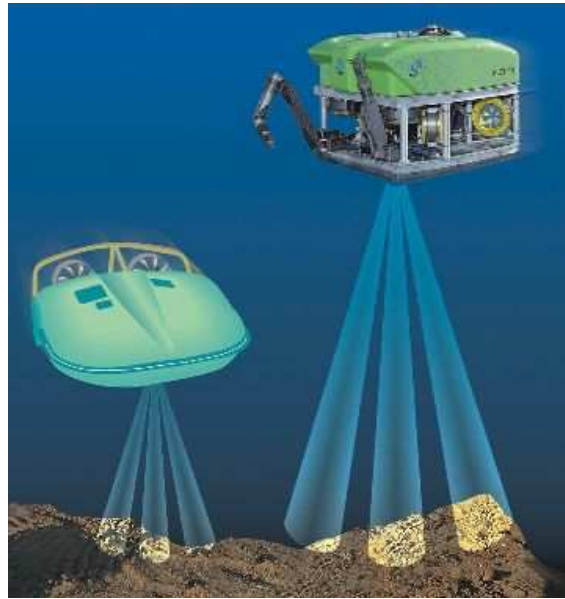


Şekil 2.3 Doppler hız algılayıcıları

(solda: SonTek Argonaut DVL, sağda: Teledyne Workhorse DVL)

Günümüzde sıklıkla kullanılan Doppler hız algılayıcıları, %0,2 – 0,4 ve daha yüksek hassasiyette hız bilgisini saniyede birkaç kere (tipik olarak 5Hz) üretebilmektedirler. Yüksek frekanslı ses dalgaları sualtında çok uzun mesafelere iletilememektedir. Sualtı akustiğinin getirdiği bu kısıtlama nedeniyle Doppler hız algılayıcıları, tipik olarak deniz tabanından en fazla 100 metre yüksekliğe kadar kullanılabilmektedir. Temel çalışma prensipleri şu şekildedir:

Cihazın transdüser ünitesi, her biri cihazın dikey eksenine yaklaşık 30°' lik açıyla yerleştirilmiş bakan dört transdüserden oluşmaktadır. Üç serbestlik dereceli hız kestirimi için en az üç adet transdüser ihtiyac duyulmaktadır, genelde dört adet kullanılmaktadır.



Şekil 2.4 Doppler hız algılayıcılarının sualtı araçlarında kullanımı

Algılayıcı, dört transdüserden gönderilen sinyal demetlerini kullanarak 4x1 boyutunda bir hız matrisi oluşturur. Bu matris transdüserlerin hizalanmalarına göre farklı eksenlerde hız bilgilerinden oluşmaktadır. Algılayıcı bilgisayar bu hızları elektronik olarak işleyerek cihaz ekseninde bir hız vektörü oluşturur. Cihazın x, y ve z eksenlerindeki hız bilgisinden oluşan bu matris, aracın hız durum bilgisini doğrudan ölçülebilmesini sağlar.

$$v_{DVL}(t) = T \times v_{demet}(t) \quad (2.1)$$

$T$  matrisi transdüser eksenlerinde elde edilen hızların, araç koordinat sistemine doğrusal dönüşümünü sağlayan bir dönüşüm matrisidir. Aşağıdaki hız vektöründe görülen  $e(t)$  hız hatasının en küçük kareler ölçümüdür.

$$v_{DVL}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Son olarak cihaz (araç) ekseninde ölçülen hız değerlerinin seyir koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, sualtı aracı üzerinde bulunan oryantasyon algılayıcıları kullanılabileceği gibi hizalama hatalarının en aza indirilmesi ve entegrasyonun kolaylaştırılması amacıyla birçok Doppler hız algılayıcısı kendi üzerinde oryantasyon (pusula, yalpa ve baş-kıç vurma algılayıcıları) bulundurmaktadır. Bu sayede, doğrudan seyir koordinat sisteminde üç eksenli hız bilgisi elde edilebilmektedir. Aşağıdaki denklemde görülen  $R(t)$  matrisi, oryantasyon algılayıcılarından okundan değerlere göre anlık olarak oluşturulan rotasyon matrisidir.

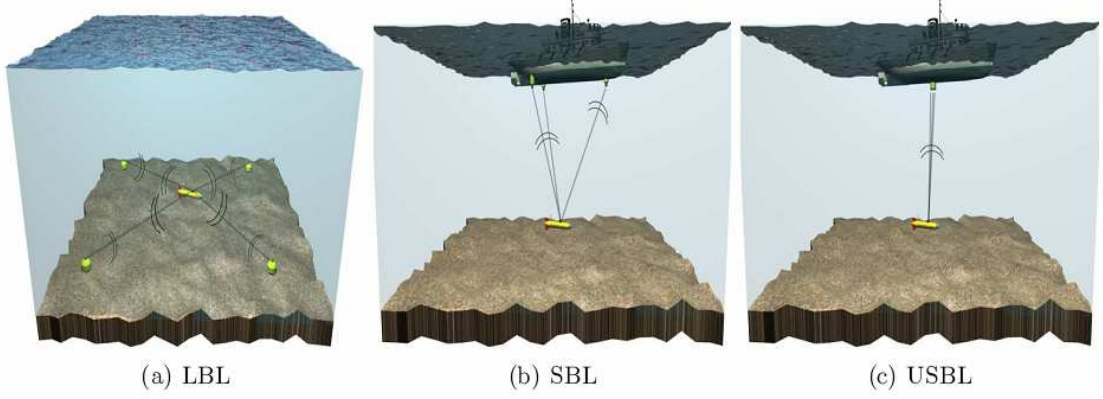
$$v_{seyir}(t) = \begin{bmatrix} R(t)_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \times v_{DVL}(t) \quad (2.3)$$

### 2.1.3 Akustik konumlandırma sistemleri

USBL, SBL, LBL gibi farklı alt gruplara ayrılan akustik konumlandırma sistemlerinin tümünde temel çalışma prensibi akustik alıcı-verici, akustik yansıtıcı cihazlara ve yansıyan sinyallerin faz farkının tespitine yarayan sinyal işleme sistemlerine dayanmaktadır.

USBL, SBL, LBL yöntemleri arasındaki fark, akustik alıcıların birbirine olan uzaklıklarıdır. LBL (Long Baseline) sisteminde transdüserler deniz tabanına aralarında mesafe bırakarak yerleştirilirken USBL (Ultra Short Baseline)' de transdüserler tek bir yapı içinde birbirine çok

yakın olacak şekilde bulunurlar. Sonuçta, LBL sistemi daha hassas bir ölçüm yapma olanağı sağlasa da, USBL kolay kurulumu ve taşınabilirliği sayesinde öne çıkmaktadır. USBL sisteminin sağladığı çözünürlük çoğu uygulama için yeterlidir. Bu üç sualtı konumlandırma sistemleri Şekil 17’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Sualtı konumlandırma sistemleri

#### 2.1.4 Oryantasyon algılayıcıları

Oryantasyon algılayıcıları yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma serbestlik derecelerinde doğrudan oryantasyon durum bilgisi veren algılayıcılardır. Bu amaçla farklı teknolojilerde üretilmiş sistemler, yapılarında fiber-optik ve lazer cayroskop ya da MEMS oryantasyon sensörleri bulundurabilirler. Ancak bu bileşenler yalnızca araç koordinat sisteminde ölçüm yapılabilmesini sağlarlar. Yeryüzü koordinat sistemine dönüşüm yapılabilmesi için bu sistemler yapılarında iki veya üç eksenli manyetometreler de bulundururlar. Ayrıca sistemin çalışma süresince kararlı ölçüm ve hesaplama yapabilmesi için yine bu üç serbestlik derecesinde açısal hızölçerlere de sahiptirler.

#### 2.1.5 Ataletsel seyir sistemleri

Ataletsel seyir sistemleri, araç üzerinde yerleşik çalışarak, harici sensörlere gerek duymadan gelişmiş seyir yetenekleri vaat eden sistemlerdir. Temel olarak üç eksenle yerleştirilmiş doğrusal ivme ve açısal hızölçerleri entegre ederek hız ve konum takibi yapılmasını sağlarlar. Ancak çalışma prensipleri, algılayıcı kaynaklı hata ve gürültülerin zamanla artmasına (drift) sebep olmaktadır. Bu sebeple ataletsel ölçüm sistemleri uzun süreli kullanımlarda tatmin edici sonuçlara ulaşmak amacıyla diğer seyir enstrümanlarıyla (USBL, DVL, GPS vb.) birlikte kullanılırlar. Özellikle buz altında ve orta su derinliklerinde yürütülen sualtı çalışmalarında en güvenilir sonuçları veren algılayıcı sistemleridir.

Yüksek hassasiyet ve güncelleme hızı sağlayabilen yapıdaki ataletsel seyir sistemleri yüksek maliyetleri, güç tüketimleri ve nispeten büyük ebatları nedeniyle günümüze kadar sualtı araçlarında yaygın kullanım alanı bulamamışlar da, bu alandaki gelişmeler ve maliyetlerin düşmesi neticesinde her geçen daha fazla sualtı navigasyonu problemine uygulanmaktadırlar. Çizelge 2.2’ de ataletsel seyir sistemlerinin doğruluk oranları ve maliyet ilişkisi incelenebilir. Ataletsel seyir sistemlerinin çalışma prensibi olan hareket denklemleri ile ilgili detaylı bilgi “Sualtı Araçlarının Modellenmesi” bölümünde verilmiştir.

Çizelge 2.2 Farklı fiyat mertebesindeki ataletsel sistemlerin mukayesesi (Cramer, 1997).

| Zaman aralığı | Yüksek maliyet | Orta maliyet    | Düşük maliyet    |
|---------------|----------------|-----------------|------------------|
| Konum         |                |                 |                  |
| 1 saat        | 0,3 - 0,5 km   | 1 - 3 km        | 200 -300 km      |
| 1 dakika      | 0,3 - 0,5 m    | 0,5 - 3 m       | 30 -50 m         |
| 1 saniye      | 0,01- 0,02 m   | 0,03- 1 m       | 0,3- 0,5 m       |
| Oryantasyon   |                |                 |                  |
| 1 saat        | 3 – 8 mdeg     | 0,01 – 0,05 deg | 1 – 3 deg        |
| 1 dakika      | 0,3 - 0,5 mdeg | 4 -5 mdeg       | 0,2 - 0,3 mdeg   |
| 1 saniye      | < 0,3 mdeg     | 0,3 – 0,5 mdeg  | 0,01 – 0,03 mdeg |

### 2.1.6 Küresel konumlandırma sistemleri (GPS)

Küresel konumlandırma sistemleri, 3 boyutlu navigasyonda eşsiz bazı imkânlar sunsa da çalışması için gereken uydu radyo frekansları, sualtı sistemlerde doğrudan kullanılmalarını zorlaştırmaktadır. Çünkü radyo frekanslarının sualtında iletim menzili çok düşüktür. Ancak GPS dolaylı yollardan da olsa sualtı araçlarının navigasyon sistemlerinde kullanılmaktadırlar. Böyle bir uygulamaya örnek olarak belirli aralıklarla su yüzeyine çıkarak küresel konumunu GPS aracılığıyla tespit eden otonom sualtı araçları verilebilir (Wendel vd., 2006).

### 2.2 Seyir Sistemlerinde Algılayıcı Tümlleştirme

Bu bölümde sualtı araçlarının seyir sistemlerinde kullanılmakta olan durum kestirimi yöntemleri ele alınacaktır. Durum kestirimi yapan yöntemler bir önceki bölümde anlatılan algılayıcılardan elde edilen ölçümlerden veya bu algılayıcılara özgü seyir yöntemlerinden yararlanıyor da olsalar, sistemin kinematik veya dinamik model üzerine kurulmalarıyla farklılık göstermektedirler. Günümüze kadar bu alanda üzerinde en çok çalışılan yöntem basit Kalman filtresi ve onun türevleri olmuştur. Kalman filtresi ve türevleri stokastik model-tabanlı durum kestirimcileri grubunun üyesi olarak düşünülebilirler. Optimal kestirim hakkında daha detaylı bilgi için (Gelb, 1974)’ e başvurulabilir.

Çizelge 2.3 Farklı sualtı seyir enstrümanlarının karşılaştırılması

|                                                       | <b>Avantajları</b>                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>Dezavantajları</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Akustik Konumlandırma Sistemleri (USBL, SBL, LBL ...) | Bir başlangıç referans değerine gereksinimleri yoktur. Sabit bir referans noktasına göre ölçüm yaparlar.<br>Bu sistemlerde beyaz gürültü görülür, yani ardışık ölçümlerdeki gürültülerin birbiri üzerinde etkisi yoktur. Sonuçta uzun vadeli hata birikimi (drift) görülmez. | Farklı su karakteristiklerinden kaynaklanan ses hızındaki farklılıklar, zamanlaman hataları nedeniyle, diğer sistemlere göre, gürültü/hata oranı yüksek hassasiyeti düşüktür.<br>Kurulum, konum takibi yapılacak araçtan başka unsurları da içerir. (ör. LBL' de deniz tabanına transponder yerleştirilmesi zor ve maliyetli bir işlemdir.) |
| Ataletsel Seyir Sistemleri (INS, IMU, AHRS ...)       | Kısa vadeli hassasiyet ve doğrulukları çok yüksektir. Hassasiyet seviyesinden feragat edilirse çok ucuza temin edilebilirler.                                                                                                                                                | Sensör yapılarından, yerleşimden ve dış etkilerden kaynaklanan tüm gürültüler ölçümlere birikimli olarak etki ederler (drift). Bu nedenle uzun vadeli hata oranları çok yüksektir.                                                                                                                                                          |
| Doppler Hız Algılayıcı (DVL)                          | Kısa vadeli hassasiyet ve doğrulukları çok yüksektir. Uzun vadeli kullanımda ataletsel sensörlere göre hataya daha az duyarlıdır.                                                                                                                                            | Ataletsel sistemlere göre daha iyi sonuç verseler de yine de uzun süreli hassasiyet gerektiren uygulamalarda drift etkisi göz ardı edilemez.                                                                                                                                                                                                |

### 2.2.1 Stokastik Model Tabanlı Durum Kestirimi

Başta Kalman filtresi ve genişletilmiş Kalman filtresi olmak üzere stokastik kestirimciler sualtı uygulamalarında en çok kullanılan yöntem olma özelliğini bugün de sürdürmektedirler. Yakın döneme kadar stokastik kestirimcilerin neredeyse tamamı kinematik modeller üzerine kurulmuş uygulamalardı. Stokastik kestirimciler, genel olarak araç üzerindeki algılayıcılardan mümkün olduğunca çok faydalanarak kestirim yapma amacıyla kullanılmaktadırlar (Blain vd., 2003; Yun vd., 1999).

Stokastik yöntemler, sistemin dinamik modeline nadiren başvurumaktadırlar. Aracın hidro dinamik sabitlerini, boyutlarını ve kontrol girişlerini modele dahil eden bir uygulama Jakuba ve Yoerger (2003) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Kalman filtresi doğrusal olmayan modeller üzerinde çalışmamaktadır. Ancak genişletilmiş Kalman filtresi de, modeli doğrusallaştırma yöntemine başvurduğu için yaklaştırma hatasından muzdariptir. Bu soruna çözüm olması amacıyla geliştirilen unscented Kalman

filtresi (Julier ve Uhlmann, 1997) ve Parçacık filtresi (Arulampalam vd., 2002) yöntemleri durum kestiriminin dağılımına nümerik olarak yakınlaştırmayı hedeflemektedirler.

### 2.2.2 Deterministik Durum Kestirimi

Deterministik kestirimciler, kesin (stokastik olmayan) proses ve ölçüm modellerini ve mutlak asimptotik kararlı durum kestirimcilerini geliştirmeyi hedeflemektedirler. Stokastik modellerin aksine sistemin doğrusal olmayan dinamiklerini modelin içine tamamen dahil etmektedirler.

Deterministik, doğrusal olmayan model-tabanlı bir konum ve hız kestirimcisinin analizi ve uygulanması hakkında detaylı bilgiye (Kinsey, 2006)' dan ulaşılabilir. Burada, tasarlanan gözlemci, sistemin nonlineer dinamiklerini, araca etkiyen kuvvet ve momentlerini içeren model üzerinde çalışmaktadır ve algılayıcılardan gelen bağımsız verileri kullanarak konum ve hız kestirimi yapmaktadır.

Jouffroy ve Nguyen (2004), yukarıda anlatılan yöntemlerin aksine, difüzyon tabanlı yörünge kestirimi için sistemin kinematik modelini kullanmaktadır. Bir ROV üzerinde gerçekleştirilen deneyler bu yöntemin oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.

Deterministik modellerin önemli bir eksiği, henüz optimum kazançların analitik yollarla seçilmesini sağlayan yöntemlerin bulunmayışıdır. Bu nedenle sezgisel yöntemlere başvurulmaktadır.

### 2.2.3 Yeryüzü Şekil ve Özelliklerini Kullanarak Seyir

Bu yöntemi kullanan seyir sistemleri, bilimsel algılayıcılardan elde edilen gerçek zamanlı ölçümleri ve içinde bulunduğu bölgeye ait bir yeryüzü haritasını kullanarak çalışmaktadırlar. Harita, topografik, manyetik veya yerçekimsel verilerden oluşabilir. Dolayısıyla, geleneksel seyir algılayıcıları yerine bilimsel sensörleri kullanarak seyrederekler.

Haritaların, önceden hazır bulunması çok nadirdir bu nedenle bu yöntemler genellikle o anda algılayıcılardan elde ettikleri verilerle oluşturdukları anlık haritaları kullanmak durumundadırlar.

Yer şekillerine bağlı seyreden sistemler genelde ultrasonik mesafe ölçerleri kullansalar da optik algılama yöntemlerinin denendiği uygulamalar da mevcuttur (Tena Ruiz vd., 2001). Bu sistemler algılayıcılarının menzilleriyle kısıtlıdır. Bu mesafe ölçerler için 10-100m aralığındayken, optik sistemler için 10m' den dahi küçüktür.

### 3. SUALTI ARAÇLARININ MODELLENMESİ

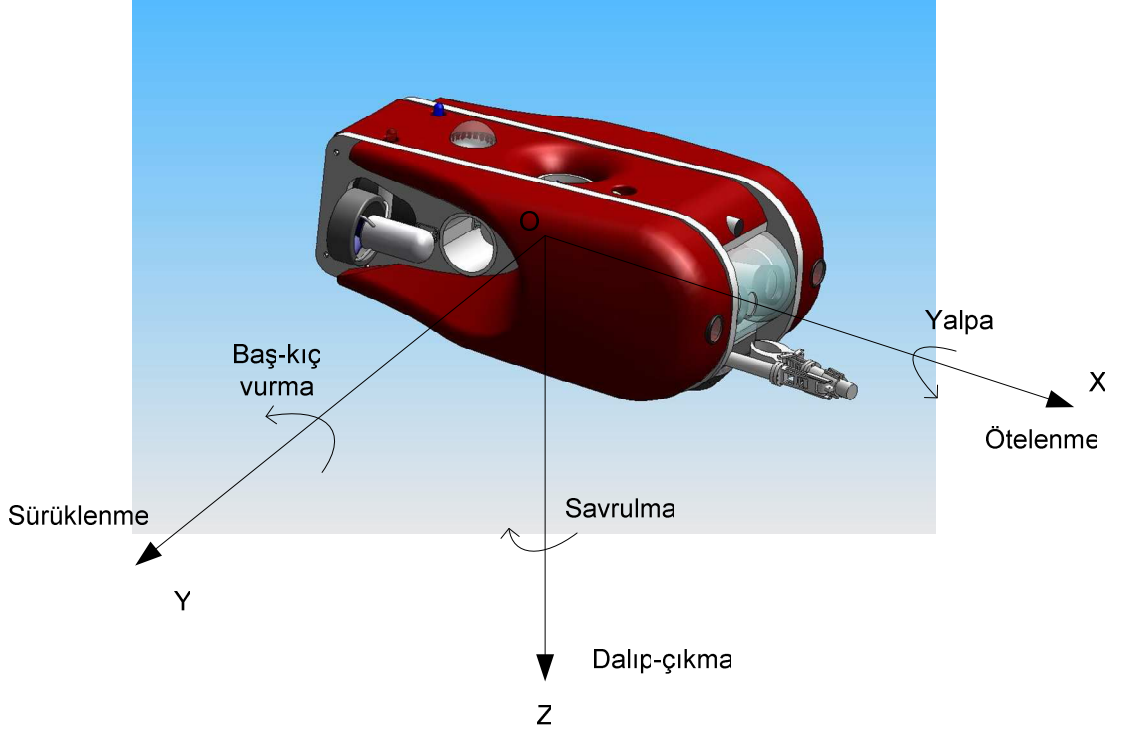
#### 3.1 Sualtı Araçlarının Kinematığı

Dinamik bilimi, kinematik ve kinetik olmak üzere iki ana daldan oluşmaktadır. Kinematik, hareketin yalnızca geometrik sonuçlarıyla ilgilenirken, kinetik, harekete neden olan kuvvetleri ele almaktadır. Bu çalışmada benzetimi gerçekleştirilen doğrusal Kalman filtresinin gerçekleşmesi için sistemin basit bir kinematik modeli yeterlidir. Günümüze kadar, Kalman filtresiyle gerçekleştirilen seyir uygulamaları da genelde sistemlerin kinematik modelleri üzerine kurulmuştur. Bir anlamda, Kalman filtresini seyir uygulamalarında cazip hale getiren özellik de budur. Kalman filtresi, sistemin basit ve hatalı modellenmesine rağmen tatmin edici sonuçlar verebilmektedir. Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, bu tez metninde dinamiğin yalnızca kinematik dalı üzerinde durulmuş ve sualtı araçlarının kinematik modelleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 Sualtı araçlarının kinematığında kullanılan semboller

| Serbestlik derecesi | Açıklama                                     | Doğrusal ve açısal hızlar | Konumlar ve euler açıları |
|---------------------|----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1                   | $x$ yönünde hareketler (ötelenme)            | $u$                       | $x$                       |
| 2                   | $y$ yönünde hareketler (sürüklenme)          | $v$                       | $y$                       |
| 3                   | $z$ yönünde hareketler (dalıp-çıkma)         | $w$                       | $z$                       |
| 4                   | $x$ eksen etrafında rotasyon (yalpa)         | $p$                       | $\phi$                    |
| 5                   | $y$ eksen etrafında rotasyon (baş-kıç vurma) | $q$                       | $\theta$                  |
| 6                   | $z$ eksen etrafında rotasyon (savrulma)      | $r$                       | $\psi$                    |

6 serbestlik dereceli (SD) hareket gerçekleştiren deniz araçları için, konum ve oryantasyonun belirlenmesi için 6 bağımsız koordinat gerekmektedir. Çizelge 3.1’ de verilen ilk üç koordinat ve bunların zamana bağlı türevleri,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerindeki konumlara ve konum değiştirme hareketlerine tekabül etmektedir. Son üç koordinat ve bunların zamana bağlı türevleri ise oryantasyonu ve rotasyonel hareketleri tanımlamakta kullanılmaktadır. Deniz ve sualtı araçları için altı farklı hareket değişkeni, genelde sırasıyla *ötelenme*, *sürüklenme*, *dalıp-çıkma*, *yalpa*, *baş-kıç vurma* ve *savrulma* olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.1).



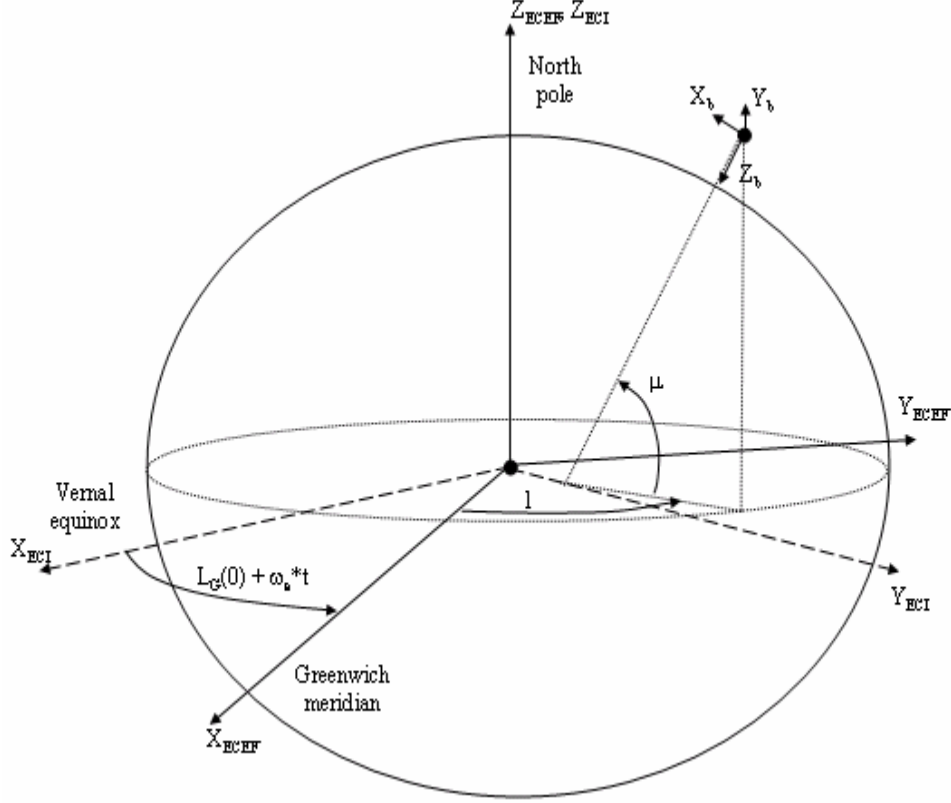
Şekil 3.1 Hareket değişkenleri

### 3.1.1 Seyir referans sistemleri

Deniz araçlarının 6SD hareketleri analiz edilirken, iki adet Yeryüzü merkezli koordinat sistemi tanımlanır. Bunlara ilaveten, araç hareketlerini tanımlamak için bazı coğrafi referans sistemlerine de gerek duyulmaktadır.

#### Yeryüzü Merkezli Referans Sistemleri

**YMARS (i-sistemi):** Yeryüzü merkezli ataletsel referans sistemi (YMARS), karasal seyirde kullanılan ataletsel bir referans sistemidir. Newton' un hareket yasalarının geçerli olduğu ivmesiz bir referans sistemi olarak tanımlandığı için bu adı almaktadır. YMARS koordinat sistemi  $x_i y_i z_i$  'nin orijini Yeryüzünün merkeziyle çakışmaktadır.



Şekil 3.2 Seyir referans koordinat sistemleri (<http://www.mathworks.com>)

**YMYRSR (*e*-sistemi):** Yeryüzü merkezli Yeryüzüne sabitlenmiş referans sistemi  $x_e y_e z_e$  'nin de orijini Yeryüzünün merkezindedir ancak eksenler uzayda sabit duran *i*-sistemi' nin aksine  $z_e$  eksenini etrafında dönmektedir. Açısal hızı,  $\omega_e = 7.2921 \cdot 10^{-5} \text{ rad} / \text{s}$  ' dir. Görece yavaş hızlarda hareket etmekte olan, Yeryüzünün dönüşü ihmal edilebilir ve *e*-sisteminin ataletsel olduğu kabul edilebilir. *e*-sistemi, farklı kıtalar arasında seyreden deniz araçlarının küresel güdüm, seyir ve kontrolleri için gereklidir.

### Coğrafi Referans Sistemleri

**KDA (*n*-sistemi):** Kuzey-Doğu-Aşağı koordinat sistemi,  $x_n y_n z_n$ , Yeryüzünün referans elipsoidine göre tanımlanır. Günlük yaşamımızda kullandığımız koordinat sistemidir. Dünya yüzeyinde, araçla birlikte hareket eden bir teğet düzlem olarak düşünülebilir. Bu sistemde  $x$  eksenini gerçek Kuzeye,  $y$  eksenini Doğuya ve  $z$  eksenini dik olarak Dünya yüzeyine bakmaktadır. *n*-sistemi' nin, *e*-sistemine göre konumu  $l$  (boylam) ve  $\mu$  (enlem) açılarıyla belirlenir.

Yerel bir bölgede görev yapan deniz araçları için, bu referans sistemi kullanılmaktadır. Genellikle, düz Yeryüzü seyri olarak adlandırılan bu uygulamada *n*-sisteminin ataletsel olduğu ve Newton' ın yasalarının geçerli olduğu kabul edilmektedir.

**Gövdeye Sabitlenmiş ( $b$ -sistemi):** Gövdeye sabitlenmiş  $x_b y_b z_b$  sistemi, araca sabitlenmiş hareketli bir koordinat sistemidir. Aracın konumu ve oryantasyonu, ataletsel referans sistemine göre (deniz araçları için  $e$ - veya  $n$ -sistemi) tanımlanır. Araca ait doğrusal ve açısal hızlar ise  $b$ -sisteminde tanımlanır. Orijini, aracın simetri düzlemi üzerindeki ağırlık merkeziyle çakışacak şekilde seçilir. Deniz araçları için  $x_b, y_b$  ve  $z_b$  gövde eksenleri, temel atalet eksenleriyle çakışacak şekilde seçilir:

- $x_b$  - boyuna eksen (kıçtan baş yönüne doğru)
- $y_b$  - enlemesine eksen (iskeleden sancak yönüne doğru)
- $z_b$  - dikey eksen (yukarıdan aşağıya doğru)

### 3.1.2 Vektörel ifadeler

Deniz araçlarının bir referans sisteminde çözümlenmiş doğrusal ve açısal hızları için aşağıdaki notasyon kullanılacaktır:

$v_O^n = O$  noktasının  $n$ -sisteminde tanımlanmış doğrusal hızı

$\omega_{eb}^n = b$ -sisteminin,  $e$ -sistemine göre  $n$ -sisteminde tanımlanmış açısal hızı

Çizelge 3.1' de Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME, 1950) tarafından tanımlandığı şekliyle verilen semboller vektörel formda aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

|                             |                                                                               |                           |                                                                                  |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| e-sistemine göre konum:     | $\mathbf{P}^e = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$   | Enlem ve boylam:          | $\psi = \begin{bmatrix} l \\ \mu \end{bmatrix} \in \mathbb{S}^2$                 |
| $n$ -sistemi konumu:        | $\mathbf{P}^n = \begin{bmatrix} n \\ e \\ d \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$   | Euler açıları:            | $\Theta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \in \mathbb{S}^3$ |
| $b$ -sistemi doğrusal hızı: | $\mathbf{v}_O^b = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$ | $b$ -sistemi açısal hızı: | $\omega_{nb}^b = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$     |

Yukarıdaki ifadelerde  $\mathbb{R}^3$ , 3 boyutlu öklid uzayını ve  $\mathbb{S}^2$  ise,  $[0, 2\pi]$  aralığında tanımlı iki açı olduğu anlamına gelen, 2 boyutlu bir torusu belirtmektedir. 3 boyutlu durumda  $\mathbb{S}^3$  ifadesi

kullanılmıştır. Sonuçta, 6SD hareket gerçekleştiren bir deniz aracının genel hareketi aşağıdaki vektörlerle ifade edilmektedir (Fossen, 1991):

$$\begin{aligned} \eta &= \begin{bmatrix} P^e \\ \Theta \end{bmatrix} \\ \nu &= \begin{bmatrix} v_o^b \\ \omega_{nb}^b \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemlerde,  $\eta \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{S}^3$  pozisyon ve oryantasyon vektörlerini göstermektedir. Pozisyon vektörü  $P^e \in \mathbb{R}^3$ , e-sisteminde tanımlanmıştır.  $\Theta \in \mathbb{S}^3$ , Euler açılarını gösteren oryantasyon vektörüdür.  $\nu \in \mathbb{R}^6$ , b-sisteminde tanımlı doğrusal ve açısal hızları gösteren vektördür.

Düz Yeryüzü seyri gibi birçok uygulamada,  $P^n \in \mathbb{R}^3$  konum vektörü,  $P^e \in \mathbb{R}^3$  yerine KDA referans sisteminde tanımlanır. Oryantasyon, Euler açıları ( $\Theta$ ) cinsinden veya  $q \in \mathbb{R}^4$  quaterniyonları cinsinden tanımlanır. Bu tez metninde, oryantasyon tanımlama amacıyla Euler açıları kullanılmıştır, bu nedenle kinematik denklemleri Euler açıları üzerinden türetilenektir. Bunun sebebi, sualtı aracının tasarım özelliği olarak Euler açılarının tekillik bölgesinden etkilenmemesidir.

### 3.1.3 Gövde ve KDA referans sistemleri arasında dönüşümler

b-sistemi ve n-sistemi arasındaki rotasyon matrisi  $R$ ,  $R_b^n$  olarak gösterilmektedir. Örneğin b-sisteminde tanımlı bir vektörün n-sistemine dönüşümü için:

$$\nu^n = R_b^n \nu^b \quad (3.2)$$

eşitliği kullanılır.  $R$  rotasyon matrisi, Üçüncü mertebeden özel ortogonal matrisler kümesinin ( $SO(3)$ ) bir üyesi olduğu için aşağıdaki özelliklere haizdir:

$$\begin{aligned} RR^T &= R^T R = I, \\ \det R &= 1, \\ R^{-1} &= R^T \end{aligned} \quad (3.3)$$

$R'$  nin ortogonal olması, ters yönde dönüşüm matrisinin,  $R$  matrisinin transpozisine eşit olması sonucunu doğurmaktadır.

Euler' in rotasyon teoremi uyarınca, iki katı cismin veya A ve B gibi iki referans sisteminin bağıl oryantasyonları,  $B'$  nin,  $A'$  daki basit rotasyonları şeklinde ifade edilebilir. Bu şu anlama gelmektedir:

$v_o^b$ , b-sisteminde,  $v_o^n$ , n-sisteminde tanımlı iki vektör olsun. Bu durumda  $v_o^n$  vektörü,  $v_o^b$  vektörü, rotasyon eksenine paralel birim vektör  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$ ,  $|\lambda| = 1$  ve  $\beta$  açısı cinsinden ifade edilebilir. Bu rotasyon:

$$\begin{aligned} v_o^n &= R_n^b v_o^b, \\ R_b^n &:= R_{\lambda, \beta} \end{aligned} \quad (3.4)$$

olarak tanımlanır. Burada,  $R_{\lambda, \beta}$ ,  $\lambda$  eksenini etrafında  $\beta$  açısı kadar bir rotasyona tekabül etmektedir:

$$R_{\lambda, \beta} = I_{3 \times 3} + \sin \beta S(\lambda) + (1 - \cos \beta) S^2(\lambda) \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklem matris elemanları için ayrı ayrı yazılırsa:

$$\begin{aligned} R_{11} &= (1 - \cos \beta) \lambda_1^2 + \cos \beta \\ R_{22} &= (1 - \cos \beta) \lambda_2^2 + \cos \beta \\ R_{33} &= (1 - \cos \beta) \lambda_3^2 + \cos \beta \\ R_{12} &= (1 - \cos \beta) \lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3 \sin \beta \\ R_{21} &= (1 - \cos \beta) \lambda_2 \lambda_1 + \lambda_3 \sin \beta \\ R_{23} &= (1 - \cos \beta) \lambda_2 \lambda_3 - \lambda_1 \sin \beta \\ R_{32} &= (1 - \cos \beta) \lambda_3 \lambda_2 + \lambda_1 \sin \beta \\ R_{31} &= (1 - \cos \beta) \lambda_3 \lambda_1 - \lambda_2 \sin \beta \\ R_{13} &= (1 - \cos \beta) \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \sin \beta \end{aligned} \quad (3.6)$$

elde edilir.

### Euler Açıları Dönüşümü

Yukarıdaki sonuçlar ışığında, b-sisteminde tanımlı  $v_o^b$  vektörünü bulmak için artık yalpa ( $\phi$ ), baş-kıç vurma ( $\theta$ ) ve savrulma ( $\psi$ ) Euler açılarından faydalanabiliriz.  $R_n^b(\Theta): \mathbb{S}^3 \rightarrow SO(3)$ , argümanı  $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$  olan Euler rotasyon matrisi olara kabul edilirse:

$$v_o^n = R_b^n(\Theta) v_o^b \quad (3.7)$$

olarak bulunur.

### Temel Rotasyonlar

$R_{\lambda, \beta}$  ' de sırasıyla x, y ve z eksenlerine tekabül eden  $\lambda = [1, 0, 0]^T$ ,  $\lambda = [0, 1, 0]^T$  ve  $\lambda = [0, 0, 1]^T$  alınarak ve  $\beta$  ' ya sırayla  $\phi, \theta, \psi$  değerleri verilerek temel rotasyon matrisleri (tek eksenli rotasyonlar) elde edilebilir:

$$\begin{aligned}
R_{x,\phi} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}, \\
R_{y,\theta} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \\
R_{z,\psi} &= \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},
\end{aligned} \tag{3.8}$$

### Doğrusal Hız Dönüşümleri

$R_n^b(\Theta)$ ' yi, *zyx-geleneği*' ne uygun olarak  $z$ ,  $y$  ve  $x$  eksenleri etrafında üç temel rotasyon olarak tanımlayabiliriz. Bu durumda:

$$R_n^b(\Theta) := R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} \tag{3.9}$$

elde edilir. Ters dönüşüm içinse:

$$R_n^b(\Theta)^{-1} = R_n^b(\Theta) = R_{x,\phi}^T R_{y,\theta}^T R_{z,\psi}^T \tag{3.10}$$

eşitliği kullanılabilir. Rotasyon matrisinin açık şekilde gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$R_n^b(\Theta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\psi)\cos(\phi) + \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) & \sin(\psi)\sin(\phi) + \cos(\psi)\cos(\phi)\sin(\theta) \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\phi) + \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) & -\cos(\psi)\sin(\phi) + \sin(\theta)\sin(\psi)\cos(\phi) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

### Açısal Hız Dönüşümleri

$b$ -sistemi açısal hız vektörü  $\omega_{nb}^b = [p, q, r]^T$  ve Euler açısal hız vektörü  $\dot{\Theta} = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ ,  $T_\Theta(\Theta)$  dönüşüm matrisi vasıtasıyla aşağıdaki şekilde ilişkilendirilebilirler:

$$\dot{\Theta} = T_\Theta(\Theta) \omega_{nb}^b \tag{3.12}$$

Gövdenin açısal hız vektörü  $\omega_{nb}^b = [p, q, r]^T$  entegre edilerek doğrudan gerçek açısal koordinatlar elde edilemez. Dönüşüm matris birçok yoldan türetilir. Örneğin:

$$\omega_{nb}^b = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x,\phi}^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x,\phi}^T R_{y,\theta}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} := T_\Theta^{-1}(\Theta) \dot{\Theta} \tag{3.13}$$

Buradan da dönüşüm matrisi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$T_{\Theta}^{-1}(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \cos(\theta) \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \Rightarrow T_{\Theta}(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) / \cos(\theta) & \cos(\phi) / \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

### 3.1.4 6 SD kinematik denklemler

Sualtı araçları için 6 serbestlik dereceli kinematik denklemleri vektörel biçimde aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v$$

$$\begin{bmatrix} \dot{P}^n \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b^n(\Theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_{\Theta}(\Theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_o^b \\ \omega_{nb}^b \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Kinematik denklemleri bileşen formunda aşağıdaki şekilde de yazılabilir (Fossen, 2002):

$$\begin{aligned} \dot{n} &= u \cos \psi \cos \theta + v(\cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi) + w(\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta) \\ \dot{e} &= u \sin \psi \cos \theta + v(\cos \psi \cos \phi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi) + w(\sin \theta \sin \psi \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \\ \dot{d} &= -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \cos \phi \\ \dot{\phi} &= p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= q \frac{\sin \phi}{\cos \theta} + r \frac{\cos \phi}{\cos \theta}, \quad \theta \neq \pm 90^\circ \end{aligned} \quad (3.16)$$

## 4. KALMAN FİLTRESİ

### 4.1 Giriş

Kalman Filtresi, dinamik bir sistemin durum vektörü kestirimini gerçekleştirmek amacıyla bir dizi eksik ve/veya gürültülü ölçümden faydalanan bir veri işleme algoritmasıdır. İkinci dereceden doğrusal kestirim (LQE) yapmaktadır. İkinci dereceden doğrusal regülâtörle (LQR) birlikte kullanıldıklarında, kontrol mühendisliğinin en sık karşılaşılan problemlerinden biri olan ikinci dereceden doğrusal gauss problemlerin çözümlenmesinde kullanılırlar (Kalman, 1960; Kalman ve Bucy 1973; Brown vd., 1992; Welch ve Bishop 1995; Simon, 2001).

Özyinelemeli bir filtre olduğu için, daha önceki durum kestirimlerini ve ölçümleri depolamayı gerektirmez. Buna karşılık yığın (batch) yöntemiyle çalışan diğer algoritmalar, daha önceki durum kestirimlerine ve ölçüm değerlerine de ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle, kalman filtresinin, üzerinde çalıştığı işlemci platformu üzerindeki yükü oldukça azdır. Günümüzde sıklıkla kullanılıyor olmasının temel nedenlerinden biri bu özelliğidir.

Kalman Filtresi pratik başarısının yanında teorik olarak da caziptir, çünkü optimal çalıştığı ispatlanabilen bir algoritmadır. Bu özeliği de hem endüstride hem de akademide sıklıkla tercih edilmesinin bir diğer sebebidir.

Durum kestirimi yapan bir algoritmanın aşağıdaki iki gereksinimi karşılaması beklenir:

- Durum kestiriminin beklenen değerinin, gerçek durumun beklenen değeriyle aynı olması beklenir: Bu, durum kestiriminin ve gerçek durumun ortalama değerlerinin aynı olması anlamına gelmektedir.
- Kestirimin hata varyansının mümkün olduğunca küçük olması beklenir: Hata varyansının küçük olması, gerçek durumun başarıyla tahmin edildiğinin göstergesidir.

Kalman Filtresi, yukarıdaki her iki kriteri de karşılayan kestirim algoritmasıdır. Ancak bunu gerçekleştirirken bazı varsayımlara ihtiyaç duymaktadır. Kalman filtresi,

- Proses ve ölçüm gürültülerinin ortalama değerlerinin sıfıra eşit olduğunu,
- Proses ve ölçüm gürültülerinin birbirinden bağımsız rasgele değişkenler olduklarını kabul eder.

Bu bölümde, kısaca değinilen özellikler, bir sonraki bölümde, Ayrık Kalman Filtresi' nin denklemleri türetilirken detaylı olarak incelenmiştir. Kalman filtresi hakkında daha detaylı bilgi için (Grewall ve Andrews, 2001; Haykin, 2001 )' ye başvurulabilir.

## 4.2 Ayırık Doğrusal Kalman Filtresi

Aşağıda ayırık zamanlı bir prosesin doğrusal stokastik fark ve ölçüm durum denklemleri verilmiştir.

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

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

Ayırık doğrusal Kalman filtresi,  $z \in \mathbb{R}^m$  ölçümlerinden faydalanarak sistemin  $x \in \mathbb{R}^n$  durumunun tahmini amacıyla kullanılmaktadır.

$w_k$  ve  $v_k$  rassal değişkenleri sırasıyla proses ve ölçüm gürültülerini temsil etmektedirler ve birbirinden bağımsız, beyaz ve normal olasılık dağılımına sahip (Gauss) gürültüler oldukları varsayılmaktadır.

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (4.3)$$

$$p(v) \sim N(0, R) \quad (4.4)$$

Pratikte proses gürültüsünün kovaryans matrisi ( $Q$ ) ve ölçüm gürültüsünün kovaryans matrisi ( $R$ ) her adımda veya ölçümde farklılık gösterebilmektedir. Ancak burada sabit oldukları varsayımında bulunulmuştur.

(4.1) numaralı fark denkleminde görülen  $n \times n$  boyutundaki  $A$  matrisi, sistemin bir önceki ( $k-1$ ) adımındaki durumunu şu anki ( $k$ ) durumuyla ilişkilendirmektedir.  $n \times l$  boyutundaki  $B$  matrisi ise sistemin  $u \in \mathbb{R}^l$  isteğe bağlı giriş vektörünü, durum vektörüyle ilişkilendirmektedir. (4.2) numaralı ölçme denkleminde görülen  $m \times n$  boyutundaki  $H$  matrisi sistemin durum vektörünü,  $z_k$  çıkış vektörüyle ilişkilendirmektedir. Bu bölümde  $H$  matrisinin her adımda sabit olduğu kabul edilmiştir. Ancak, birçok uygulamada, örneğin algılayıcı tümleştirme, o an için mevcut bulunan ölçüm verilerine göre her adımda dinamik olarak güncellenerek kullanılmaktadır.

$\hat{x}_k^- \in \mathbb{R}^n$  kestirimi, sistemin  $k$  anına kadarki bilgisini kullanarak gerçekleştirilir ve *a priori* adını alır.  $\hat{x}_k^+ \in \mathbb{R}^n$  kestirimi ise  $k$  anındaki  $z_k$  ölçümünden de faydalanır ve *a posteriori* olarak adlandırılır. Türk Dil Kurumu *a priori* ve *a posteriori* terimleri için sırasıyla *önsel* ve *sonsal* Türkçe karşılıklarını önerse de uluslararası literatürde sıklıkla kullanıldığı için bu metinde kelimeler Latince orijinal halleriyle kullanılmıştır. *A priori* ve *a posteriori* kestirim hataları sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$e_k^- = x_k - \hat{x}_k^-$$

$$e_k^+ = x_k - \hat{x}_k^+$$

Bu durumda *a priori* kestirim hatasının kovaryansı

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (4.5)$$

Ve *a posteriori* kestirim hatasının kovaryansı

$$P_k^+ = E[e_k^+ e_k^{+T}] \quad (4.6)$$

halini alır. Kalman filtresi denklemleri türetilirken, öncelikle olarak *a posteriori* durum kestirimi  $\hat{x}_k^+$  i hesaplayan bir denklem elde edilir. Bu denklem, *a priori* kestirim  $\hat{x}_k^-$  ve gerçek bir  $z_k$  ölçümü ile  $H\hat{x}_k^-$  ölçüm tahmininin ağırlıklandırılmış farklarının doğrusal kombinasyonu olarak ifade edilir. (4.7)

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4.7)$$

(4.7) denklemiindeki  $(z_k - H\hat{x}_k^-)$  farkı, ölçüm *inovasyonu* (yenileşim) veya *artık hatası* (residual) olarak adlandırılır. Ölçüm inovasyonu, gerçek  $z_k$  ölçümü ile  $H\hat{x}_k^-$  ölçüm tahminini arasındaki uyumsuzluğu yansıtır. Artık hatasının sıfır olması, iki değer birbirine aynı olduğu anlamına gelir.

(4.7) denklemiindeki  $n \times m$  boyutundaki  $K$  matrisi, *a posteriori* hata kovaryansını (4.6) küçültmek amacıyla *kazanç*, diğer bir adla *kaynaştırma faktörü*, olarak seçilir. Bu minimizasyonu gerçekleştirebilmek için öncelikle (4.7) denklemi, yukarıda  $e_k^+$  nin tanımlandığı denklemde yerine yazılır. Daha sonra, elde edilen yeni  $e_k^+$  denklemi, (4.6) numaralı denklemdeki yerine yazılarak, beklenen değerler hesaplanır. Sonuç matrisinin izinin  $K'$  ya göre türevi alınır ve bulunan sonuç sıfıra eşitlenir. Eşitlik,  $K'$  ya göre çözüldüğünde aşağıda verilen denklem elde edilir. Bu denklem biçimi, (4.6)' da verilen *a posteriori* kestirim hatasının kovaryansını minimize eden farklı  $K'$  lerden yalnız bir tanesidir.

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$= \frac{P_k^- H^T}{H P_k^- H^T + R} \quad (4.8)$$

(4.8) denklemi incelendiğinde görülebilir ki; ölçüm hatasının kovaryansı,  $R$ , sıfıra yaklaştıkça, kazanç matrisi  $K$ , ölçüm inovasyonunu daha fazla ağırlıklandırmaktadır:

$$\lim_{R_k \rightarrow 0} K_k = H^{-1}$$

Diğer yandan, *a priori* kestirim hatasının kovaryansı,  $P_k^-$ , sıfıra yaklaştıkça,  $K$  kazancı ölçüm inovasyonunu daha az ağırlıklandırmaktadır:

$$\lim_{P_k^- \rightarrow 0} K_k = 0$$

$K$  kazancı tarafından gerçekleştirilen ağırlıklandırma yukarıda denklemlerle ifade edilmiştir. Aslında gerçekleştirilen işlemi şu şekilde düşünmek mümkündür:

- Ölçüm hatasının kovaryansı  $R$  sıfıra yaklaştıkça, algoritma, her adımda gerçek ölçüm  $z_k$  'ya daha fazla, tahmini ölçüm  $H\hat{x}_k^-$  ' ye daha az güvenmekte,
- *A priori* kestirim hatasının kovaryansı,  $P_k^-$ , sıfıra yaklaştıkça,  $z_k$  ' ya daha az,  $H\hat{x}_k^-$  ' ye ise daha fazla güvenmektedir.

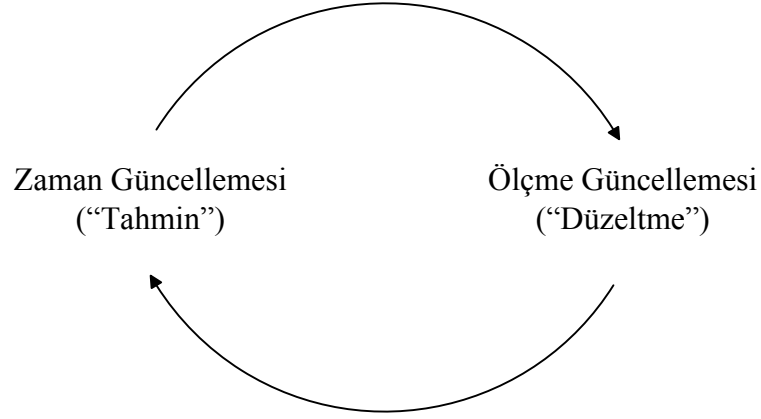
#### 4.3 Ayırık Kalman Filtresi Algoritması

Kalman filtresi, bir proste, geri beslemenin bir biçimini kullanarak, kestirim yapmaktadır: filtre bir  $k$  anı için prosesin durum kestirimini yapar ve gürültülü ölçümler biçiminde geri besleme alır. Dolayısıyla, Kalman filtresi eşitliklerini iki ana grupta toplayabiliriz. Bunlar:

- Zaman güncellemesi denklemleri ve
- Ölçüm güncellemesi denklemleridir.

Zaman güncellemesi denklemleri, şu anki durum ve hata kovaryansı kestirimlerini zamanda bir adım ileri taşıyarak, bir sonraki adım için *a priori* kestirimlerini elde etmekle sorumludurlar. Ölçüm güncellemesi denklemleri ise yeni ölçümleri *a priori* kestirimlere geri besleyerek, daha gelişmiş *a posteriori* kestirimler elde etmektedirler.

Bu anlamda, zaman güncellemesi denklemleri *tahmin*, ölçme güncellemesi denklemleri ise *düzeltilme* denklemleri olarak düşünülebilir. Gerçekten de, kestirim algoritması bir bütün olarak, nümerik problemlerin çözümünde kullanılan bir *tahmin-düzeltilme* algoritması olarak çalışmaktadır. Şekil 4.1 bu çevrimi göstermektedir.



Şekil 4.1 Kalman filtresi çevrimi

Zaman güncellemesi ve ölçüm güncellemesi için kullanılan denklemler sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’ de görülmektedir.

Çizelge 4.1 Ayırık kalman filtresi için zaman güncellemesi denklemleri

|                                           |       |
|-------------------------------------------|-------|
| $\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$ |       |
| $P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$                 | (4.9) |

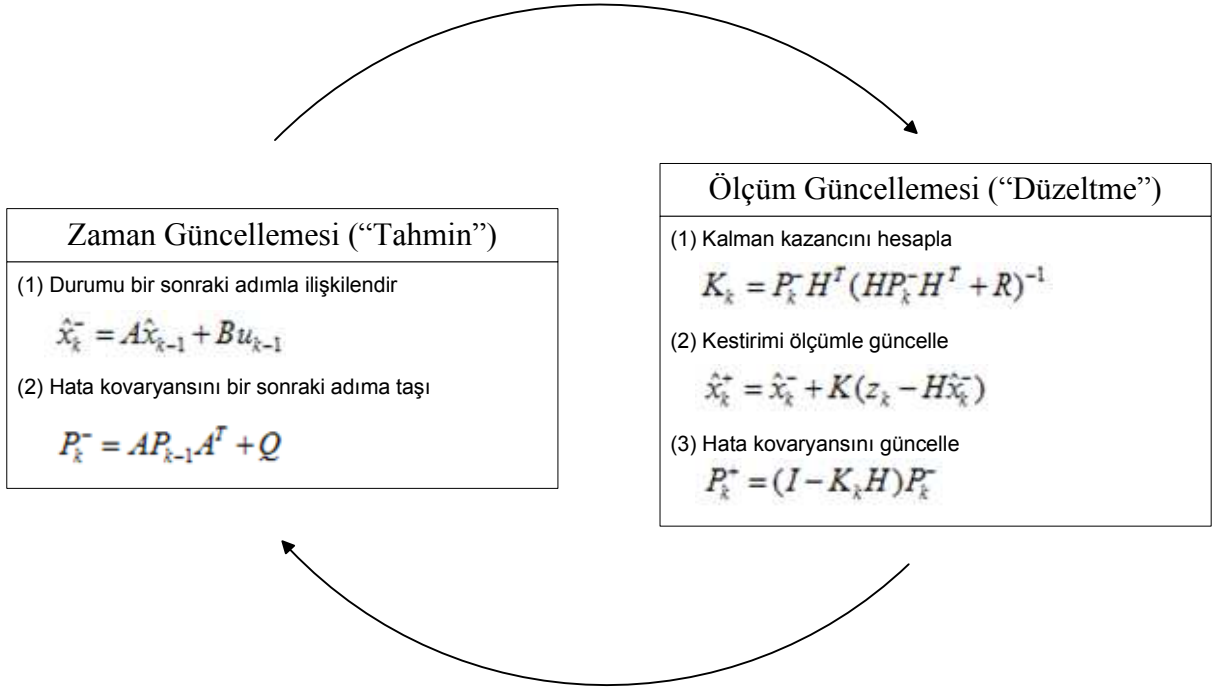
Çizelge 4.1’ de görüldüğü gibi denklemler, durum ve kovaryans kestirimlerini  $k-1$  adımında  $k$  adımına taşımaktadır.  $A$  ve  $B$  (4.1),  $Q$  ise (4.3) denklemlerinden gelmektedir.

Çizelge 4.2 Ayırık kalman filtresi için ölçüm güncellemesi denklemleri

|                                                     |        |
|-----------------------------------------------------|--------|
| $K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$             | (4.10) |
| $\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-)$ | (4.11) |
| $P_k^+ = (I - K_k H)P_k^-$                          | (4.12) |

Ölçüm güncellemesi sırasında ilk adım  $K_k$ , Kalman kazancının hesaplanmasıdır. Bir sonraki adım, ölçümlerin gerçekleştirilerek  $z_k$ 'nin elde edilmesi ve ölçümün (4.12)'de görüldüğü gibi etki ettirilerek *a posteriori* durum kestiriminin bulunmasıdır. Son adım (4.13) denklemi kullanılarak *a posteriori* hata kovaryansının bulunmasıdır.

Her bir zaman ve ölçüm güncellemesi çiftinden sonra, algoritma yinelenir ve bir önceki *a posteriori* kestirimler kullanılarak yeni *a priori* kestirimler elde edilir. Özyinelemeli yapı, Kalman filtresinin sık kullanılmasının başlıca sebeplerinden biridir. Bu özellik Kalman filtresinin gerçekleşmesini, önceki verilerin tümünü doğrudan kullanarak çalışan Wiener filtresine göre daha kolay hale getirmektedir.



Şekil 4.2 Kalman filtresi algoritması

Ölçme hatasının kovaryansını ölçmek pratikte mümkündür. Bu nedenle, Kalman filtresi gerçekleşirken, ölçüm hatasının kovaryansı  $R$  filtrenin çalışmaya başlamasından önce ölçülerek ölçme hatasının varyansı belirlenebilir.

Ancak proses gürültüsünün kovaryansı,  $Q$ 'nin belirlenmesi daha zordur. Çünkü kestirimini yaptığımız prosesi doğrudan gözlemlememiz mümkün değildir. Eğer  $Q$  doğru seçilebilir ve

sisteme doğru miktarda belirsizlik verilebilirse, çok basit bir proses modeliyle bile yeterince iyi sonuçlar elde edilebilir.

$Q$  ve  $R'$  nin sabit olduğu durumlarda, hem hata kovaryansı  $P_k$  hem de Kalman kazancı  $K_k$  kısa sürede stabil hale gelip sabitlenecektir. Böyle bir durumda, bu parametreler filtrenin off-line çalıştırılması ile önceden hesaplanabilir.  $P_k$  ayrıca, Grewal (1993) tarafından önerilen yöntemle, kararlı hal değeri hesaplanarak da kullanılabilir.

## 5. BENZETİM

Önceki bölümlerde anlatılanlar doğrultusunda, bir ROV için sualtı seyir ve konumlandırma sistemi benzetimi gerçekleştirilmiştir. Sistem, hareket-oryantasyon algılayıcısı, derinlik algılayıcısı, USBL akustik konumlandırma sistemi ve Doppler hız algılayıcısından elde edilen ölçümlerin tümleştirilmesini sağlamaktadır. Algılayıcılardan elde edilen veriler, doğrusal ayrık zamanlı bir Kalman filtresi kullanılarak gevşek-bağlı mimariyle tümleştirilmiştir.

Takip eden bölümlerde, ilk olarak, benzetimin gerçekleştirilmesine olanak sağlayan kabul ve varsayımlar ele alınmıştır. Ardından benzetimi gerçekleştirilen ROV için, Kalman filtresinin temelini oluşturan, 3 boyutlu hareket denklemlerinden oluşan sistem modeli elde edilmiştir. Benzetimde kullanılan verilerin oluşturulması hakkında bilgi verildikten sonra, son olarak, benzetim sonuçları analiz edilmiştir.

### 5.1 Kabul ve Varsayımlar

Benzetim gerçekleştirilirken iki adet koordinat referans sistemi kullanılmıştır. Bunlar gövdeye sabit referans sistemi (b-sistemi) ve navigasyon referans sistemleridir (n-sistemi). b-sisteminden, n-sistemine yapılan dönüşümlerde hareket-oryantasyon algılayıcıdan elde edilen Euler açılarının doğrudan kullanıldığı varsayılmıştır. Dolayısıyla yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma açılarındaki durum bilgileri ideal kabul edilip Kalman filtresi modeline dahil edilmemiştir.

Akustik konumlandırma sistemi ve n-sistemi' nin orijinlerinin çakışık olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla, akustik konumlandırma sistemi, doğrudan n-sisteminde orijine göre deplasman vektörü üretmektedir.

### 5.2 Sistem ve Kalman Filtresi Modelinin Oluşturulması

Kalman filtresine esas oluşturan sistem modelinin durum vektörü aşağıda verilmiştir:

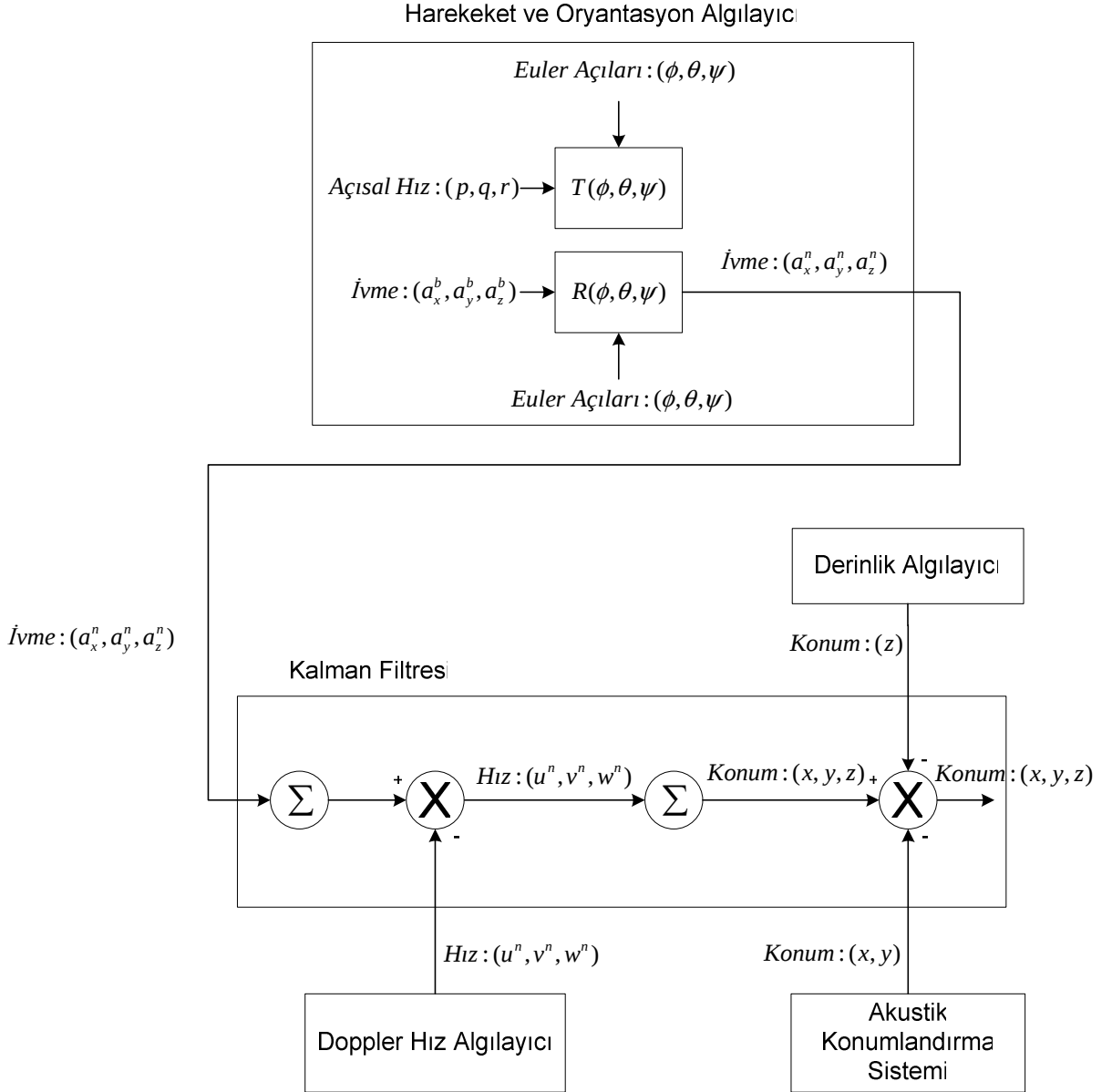
$$X = \begin{bmatrix} x & y & z & u^n & v^n & w^n & a_x^n & a_y^n & a_z^n \end{bmatrix}^T \quad (5.1)$$

Durum vektörünü oluşturan değişkenler, sırasıyla:

- $x, y, z$ , navigasyon referans sisteminde  $x, y$  ve  $z$  eksenleri boyunca kat edilen mesafe bileşenleri (m),
- $u^n, v^n, w^n$ , navigasyon referans sisteminde hız bileşenleri (m/s),

- $a_x^n, a_y^n, a_z^n$ , navigasyon referans sisteminde ivme bileşenleridir ( $m/s^2$ ).

Algılayıcılar gevşek-bağlı sistem mimarisi kullanılarak tümleştirildiği için ataletsel algılayıcının açısal hız ve oryantasyon verileri Kalman filtresinin durum vektörüne dahil edilmemiştir. Kalman filtresi, hareket ve oryantasyon algılayıcı tarafından işlenmiş ve oryantasyon bilgisi (Euler açıları) kullanılarak seyir referans sistemine aktarılmış ivme bilgilerini doğrudan kullanmaktadır.



Şekil 5.1 Gevşek-bağlı algılayıcı tümleştirme basitleştirilmiş blok şeması

Mimarinin gevşek-bağlı tümleştirme olarak seçilmesi, Kalman filtresi tarafından kullanılan sistem modelinin üç boyutlu hareket denklemleri olarak yazılabilmesini sağlamıştır. Denklem (5.2)' de, kullanılan hareket denklemlerinin vektörel bileşenler halinde ifadesi görülebilir:

$$P_k = P_{k-1} + v_{k-1}T + \frac{1}{2}a_{k-1}T^2$$

$$v_k = v_{k-1} + a_{k-1}T$$
(5.2)

Yukarıdaki denklemde,  $P$ ,  $v$  ve  $a$  sırasıyla konum, hız ve ivme değişkenleridir. Sistem ayrık zamanlı olduğu için  $T$  değişkeni örnekleme zamanıdır. Buradan yola çıkarak Kalman filtresinin kullanacağı sistem modeli aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

$$x_k = Ax_{k-1} + w_{k-1}$$

$$z_k = H_k x_k + v_k$$
(5.3)

Burada,  $A$ , durum geçiş matrisi,  $H_k$  ise sistemin ölçüm matrisidir. Amacımız, yalnızca pozisyon ve hız kestirimi yapmak olduğu için sistem modeline kontrol girişlerinin ve kontrol girişi atama matrislerinin de dâhil edilmesine gerek yoktur. Dolayısıyla, durum denklemlerine kontrol-giriş matrisi ( $B$ ) ve giriş vektörü ( $u$ ) eklenmemiştir ( $B = 0, u = 0$ ). Proses ve ölçme gürültüleri sırasıyla  $w$  ve  $v$  değişkenleriyle gösterilmiştir.

Sistemin durum denklemlerinde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta  $H_k$  ölçüm matrisinin, durum geçiş matrisi  $A$ 'nın aksine sabit olmaması, her zaman adımında değişiklik göstermesidir. Kalman filtresi kullanan algılayıcı tümleştirmeye uygulamalarının temelini bu yapı oluşturmaktadır. Filtre her zaman adımında, o an için mevcut olan algılayıcı ölçümlerini kullanabilmek adına uygun bir ölçüm atama matrisi kullanmaktadır. Bu sayede farklı güncelleme hızına sahip algılayıcıların bir arada kullanılması veya eksik ölçüm verilerinin kompanze edilmesi sağlanmış olur.

Bu bilgiler ışığında, sistem modelini oluşturan matrisler aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Durum geçiş matrisi sabit ve sistemin bir önceki adımdaki ( $k-1$ ) durumunu şu anki durumuna ilişkilendiren hareket denklemlerini içerecek şekilde seçilmiştir. Sistemin rnekleme zamanı,  $dt$ , 100Hz olarak seçilmiştir. Derinlik (1kHz) ve hareket-oryantasyon algılayıcıları (200Hz) her zaman adımında yeni ölçüm sağlayabilecek hızdadırlar. Bu nedenle, Kalman filtresinin her döngüsünde an azından ivme ve dikey ekseninde konum ölçüm verilerine sahip olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla ilk ölçüm atama matrisi,  $H_1$ , bu durumda, sadece ivme ve dikey konum lmnn yapılabildiği adımlarda kullanılacak şekilde seçilmiştir:

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

İkinci lm atama matrisi,  $H_2$ , ivme ve dikey konum lmnn yanında Doppler hız algılayıcıdan gelen üç eksenli hız bilgisini de içerecek şekilde seçilmiştir. Üretici firmanın verdiği bilgiler ışığında, simülasyonlarda, bu algılayıcının güncelleme frekansı 0.5Hz olarak alınmıştır:

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$H_3$  matrisi akustik konumlandırma sisteminden gelen yatay ( $x$  ve  $y$ ) eksenindeki konum bilgisinin kestirim düzeltme adımlarında kullanılmasını sağlar. Bunun haricinde, ivme ve dikey konum (derinlik algılayıcısı) lmleri yine mevcuttur. Akustik sistemin frekansı simülasyonlarda 0.1Hz olarak kabul edilmiştir. Akustik sistem, dikey ekseninde de konum bilgisi üretmektedir ancak derinlik algılayıcısına göre doğruluğu ve frekansı çok düşük olduğu için bu lmden yararlanılmamaktadır:

$$H_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Son olarak sistemin hem akustik konum hem de Doppler hız algılayıcısından gelen akustik hız verilerine sahip olduğu zaman adımlarında kullanılmak üzere  $H_4$  matrisi üretilmiştir. Bu matris tüm algılayıcılardan gelen ölçümlerin güncel olduğunu kabul eder ve Kalman filtresi düzeltme denklemlerinde bu yeni ölçümlerin tümünün kullanılmasını sağlar:

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Yukarıda sıralanan ölçüm atama matrisleri, filtrenin çalışması esnasında algılayıcılardan gelen verilere göre çevrimiçi de oluşturulabilirler. Ancak performans kaybına neden olabilecek bu yöntem yerine ilk çalışma öncesinde çevrim dışı tanımlanması daha uygun olacaktır. Aslında Kalman filtresinde tanımlı ve zamanla değişmeyen tüm matrislerin ve değişkenlerin çevrim dışı hesaplanarak performans artışı sağlanması yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir.

Durum vektörü ve atama matrisleri tanımlanmasından sonraki adım proses ve ölçüm hataları için kovaryans matrislerinin ( $Q$  ve  $R$  matrisleri) Kalman filtresine tanıtılması gerekmektedir. Bu süreç, çoğu zaman filtrenin çevrim dışı çalıştırılması ve arzu edilen sistem cevabına göre deneme-yanılma yöntemiyle  $Q$  ve  $R$  matrislerinin tespit edilmesiyle aşılr (Welch ve Bishop, 2006). Ancak, benzetim verileri oluşturulurken kullanılan algılayıcı gürültü parametreleri, ölçüm gürültüsünün kovaryans matrisi,  $R'$  nin oluşturulmasında kullanılabilir. Sistemin ideal modellendiği varsayımıyla da  $Q$ , proses hatası kovaryans matrisi, çok küçük seçilebilir.

Son olarak, başlangıç durum vektörü değerleri girilerek Kalman filtresi çalışmaya hazır hale getirilebilir. Benzetimlerde sistemin başlangıç durumu:

$$x_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (5.4)$$

olarak alınmıştır.

### 5.3 Benzetim Verilerinin Oluşturulması

Benzetim verilerinin oluşturulması amacıyla üretilen MATLAB kodu (veri\_uret.m) Ek 1' de verilmiştir.

Benzetim süresinin seçilmesinden sonra, öncelikle, benzetimi gerçekleştirecek hareket için b-sisteminde ivme bilgileri girilmiştir. Daha sonra aracın takip etmesi istenen rotayı oluşturmak için n-sisteminde yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma Euler açıları kullanılarak daha önce girilen ivme bilgileri n-sisteme dönüştürülmüştür. İleri kinematik kullanılarak, ivme bilgisinden önce hız ardından da konum bilgileri elde edilmiştir. Bu noktaya kadar oluşturulan veriler, gürültüsüz ideal sinyallerden oluşmaktadırlar. Benzetim sonuçlarının analiz edilmesinde referans olarak kullanıldıkları gibi gürültülü veriler de bu değişkenlere gürültü eklenmesi ile oluşturulmaktadır. Modellenen algılayıcıların doğruluk, çözünürlük ve gürültü gibi karakterleri firmalar tarafından sağlanan dokümanlardan temin edilmiştir.

#### *Derinlik algılayıcı*

Benzetimlerde, Paroscientific firmasının 8000 serisi derinlik algılayıcılarının teknik özellikleri kullanılmıştır.

Çizelge 5.1 Modellenen derinlik algılayıcı parametreleri

|                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| <b>Güncelleme frekansı</b> | 100Hz             |
| <b>Doğruluk</b>            | Tam ölçekte %0,01 |

#### *Hareket-Oryantasyon Algılayıcı*

Hareket ve oryantasyon algılayıcı olarak, Microstrain firmasının 3DM-GX2 ürünü modellenmiştir. “Kabul ve Varsayımlar” bölümünde de belirtildiği gibi oryantasyon ölçümleri ideal ve gürültüsüz olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla algılayıcının sadece ivme ölçer hataları modellenmiştir.

Çizelge 5.2 Modellenen hareket ve oryantasyon algılayıcının teknik özellikleri

|                                      |                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Orientation range (pitch, roll, yaw) | 360° about all axes                                                                                                                                                          |
| Accelerometer range                  | accelerometers: $\pm 5\ g$ standard<br>$\pm 10\ g$ and $\pm 2\ g$ also available                                                                                             |
| Accelerometer bias stability         | $\pm 0.010\ g$ for $\pm 10\ g$ range<br>$\pm 0.005\ g$ for $\pm 5\ g$ range<br>$\pm 0.003\ g$ for $\pm 2\ g$ range                                                           |
| Accelerometer nonlinearity           | 0.2%                                                                                                                                                                         |
| Gyro range                           | gyros: $\pm 300^\circ/\text{sec}$ standard, $\pm 1200^\circ/\text{sec}$ , $\pm 600^\circ/\text{sec}$ , $\pm 150^\circ/\text{sec}$ , $\pm 75^\circ/\text{sec}$ also available |
| Gyro bias stability                  | $\pm 0.2^\circ/\text{sec}$ for $\pm 300^\circ/\text{sec}$                                                                                                                    |
| Gyro nonlinearity                    | 0.2%                                                                                                                                                                         |
| Magnetometer range                   | $\pm 1.2$ Gauss                                                                                                                                                              |
| Magnetometer nonlinearity            | 0.4%                                                                                                                                                                         |
| Magnetometer bias stability          | 0.01 Gauss                                                                                                                                                                   |
| A/D resolution                       | 16 bits                                                                                                                                                                      |
| Orientation Accuracy                 | $\pm 0.5^\circ$ typical for static test conditions<br>$\pm 2.0^\circ$ typical for dynamic (cyclic) test conditions<br>& for arbitrary orientation angles                     |
| Orientation resolution               | $<0.1^\circ$ minimum                                                                                                                                                         |
| Repeatability                        | $0.20^\circ$                                                                                                                                                                 |
| Output modes                         | acceleration and angular rate, delta Angle and delta Velocity, Euler angles, rotation matrix                                                                                 |

### Akustik Konumlandırma Sistemi

Modellemeye esas olarak Tritech firmasının MicronNav USBL akustik konumlandırma sistemi seçilmiştir. Ürüne ait teknik özellikler Çizelge 5.3’ de verilmiştir.

Çizelge 5.3 Modellenen akustik konumlandırma sisteminin teknik özellikleri

|                        |                                                                                                                                                                                |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Positioning Technology | Spread Spectrum Acoustic Ultra Short Baseline (USBL) Range/Bearing Tracking System. 20-28 kHz band. (Magnetic Compass and Pitch/Roll Sensor built into transducer as standard) |
| Tracking Range         | 1000m (3,280ft)                                                                                                                                                                |
| Range Accuracy         | +/- 0.2 meters typical (7.87 inches)                                                                                                                                           |
| Bearing Accuracy       | +/-3 degrees                                                                                                                                                                   |
| Position Update Rate   | 0.5 Seconds – 10 Seconds                                                                                                                                                       |

### Doppler Hız Algılayıcı

Teledyne firmasının Explorer DVL cihazı modelleme esas alınmıştır. Cihaza ait teknik özellikler Çizelge 5.4’ te verilmiştir.

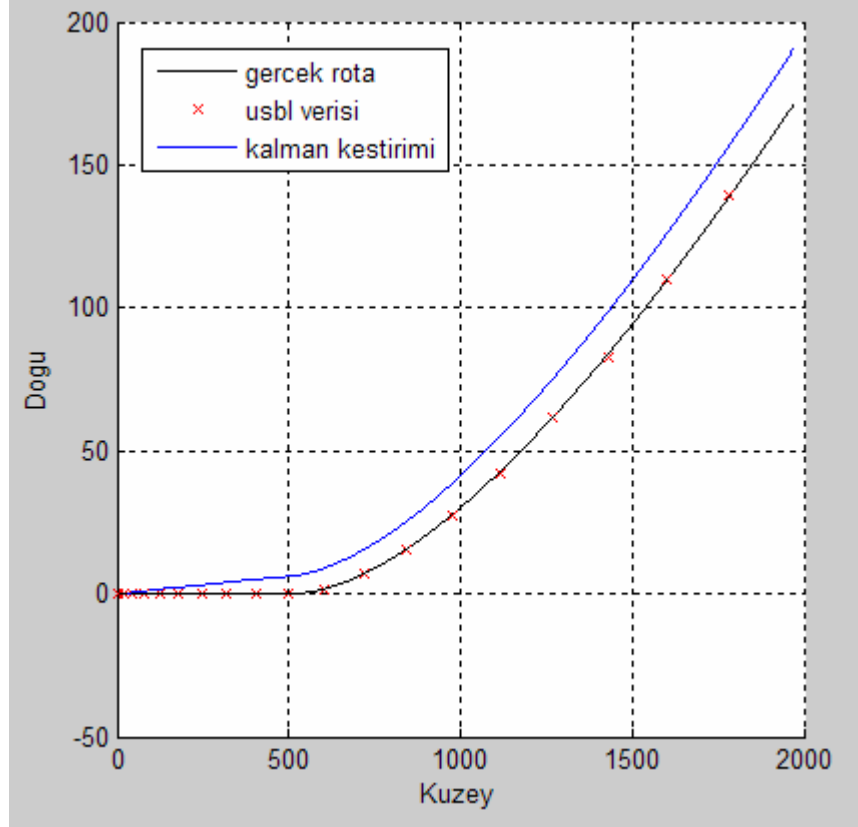
Çizelge 5.4 Modellenen Doppler hız algılayıcının teknik özellikleri

|                                |                                          |
|--------------------------------|------------------------------------------|
| Velocity Range <sup>2</sup>    | $\pm 5\text{m/s}$                        |
| Long Term Accuracy             | $\pm 0.4\% \pm 0.2\text{cm/s}$           |
| Precision <sup>3</sup> @ 1 m/s | $\pm 1.2\text{cm/s}$                     |
| Resolution                     | 0.1cm/s (default), 0.01mm/s (selectable) |
| Ping Rate                      | 7Hz Typical                              |

#### 5.4 Benzetim Senaryoları

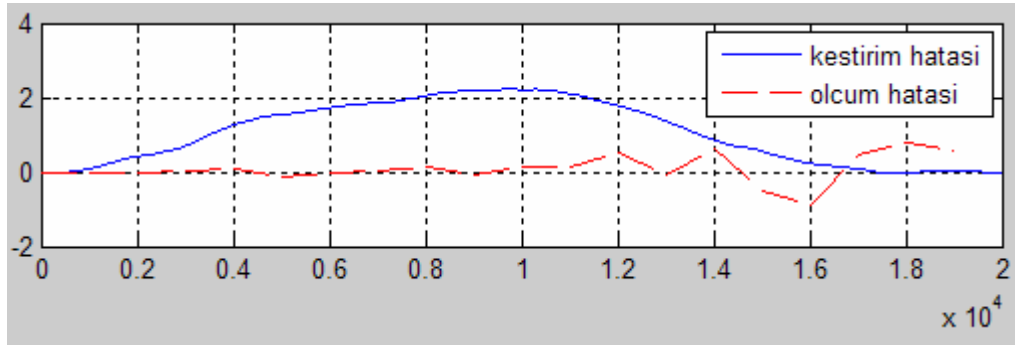
##### USBL ve DVL Devre Dışı İken XY Konum Takibi

Şekil 5.2’ de USBL ve DVL sisteminden ölçüm verisinin alınmadığı senaryo sonucunda oluşan XY konum takibi grafiği verilmiştir.

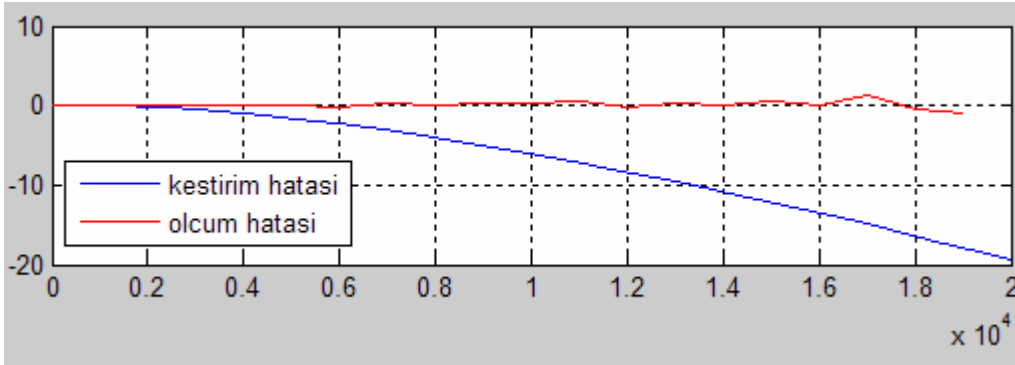


Şekil 5.2 USBL ve DVL devre dışı iken XY konum takibi

Sistemin XY düzleminde destekleyici algılayıcılar ve sistemler olmadan, ivmeölçerlerden kaynaklanan hatanın zamanla birikmesi sonucu konum kestirim hatasının zamanla arttığı açıkça görülmektedir. X ve Y eksenleri için konum kestirim hatalarının, ölçüm hatalarına göre daha fazla olduğu, sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’ de görülmektedir.



Şekil 5.3 USBL ve DVL devre dışı iken X ekseninde konum kestirim hatası

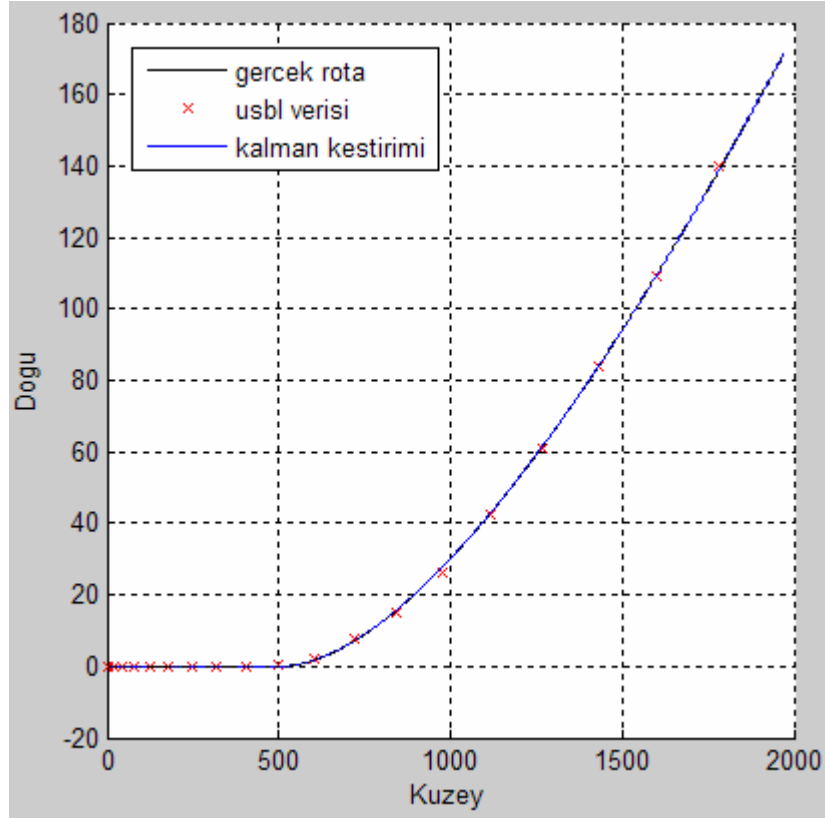


Şekil 5.4 USBL ve DVL devre dışı iken Y ekseninde konum kestirim hatası

#### ***USBL ve DVL Devrede İken XY Konum Takibi***

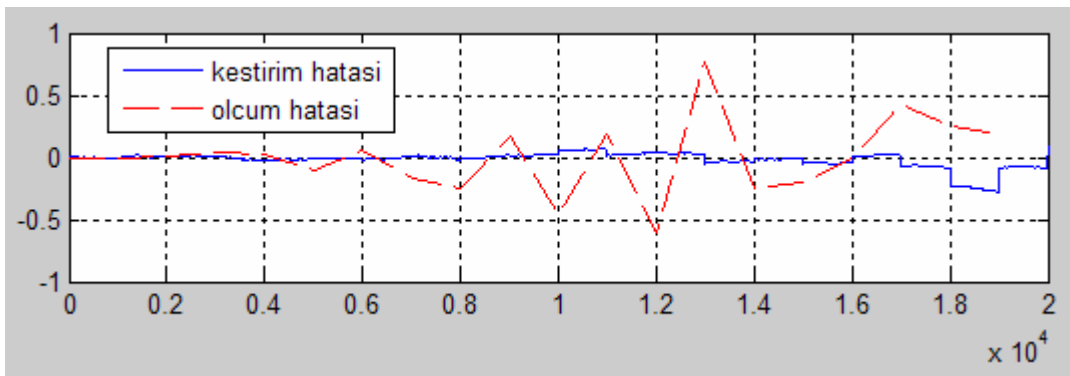
İkinci benzetim senaryosunda tüm değişkenler (proses ve ölçüm kovaryans matrisleri) sabit tutularak, USBL ve DVL sistemleri devreye alınmıştır.

Şekil 5.5' te açıkça görülmektedir ki, USBL ve DVL' den gelen veriler Kalman filtresi tarafından ağırlıklandırılarak sisteme etki ettirilmiş ve ataletsel algılayıcının desteklenmesi sonucunda, entegrasyondan kaynaklanan hata birikimi elimine edilmiştir. Böylece XY düzleminde uzun süreli görevlerde dahi konum kestirim hatasının sabit tutulması sağlanmıştır.

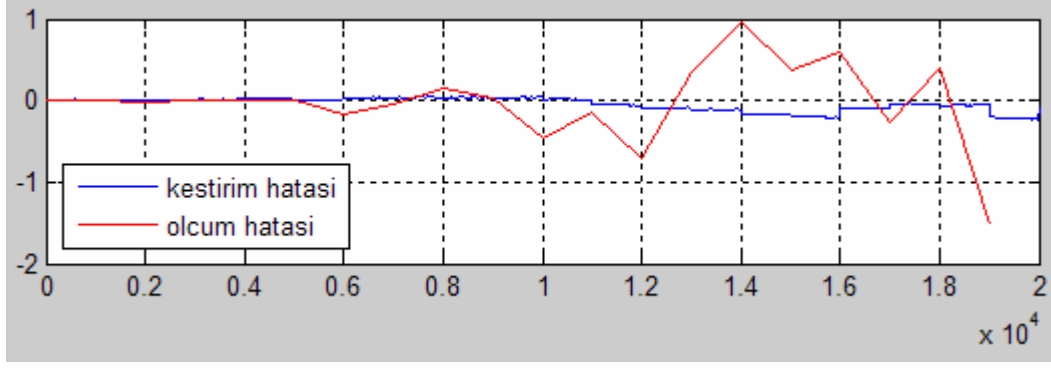


Şekil 5.5 USBL ve DVL devrede iken XY konum takibi

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 sırasıyla, X ve Y eksenlerindeki kestirim hatasının zamanla değişimini göstermektedir. Grafiklerden anlaşılmaktadır ki, algılayıcı tümleştirme uzun vadede hata birikiminin önüne geçerken aynı zamanda anlık ölçüm hatlarından etkilenmeyen adet alçak-geçiren bir filtre görevi görmektedir.



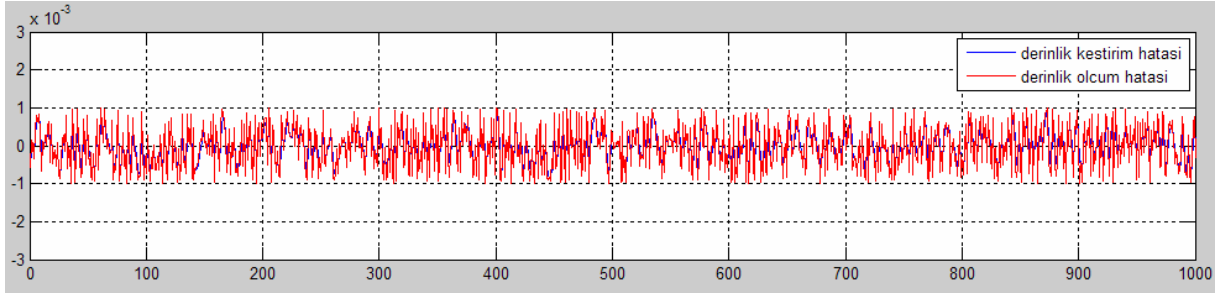
Şekil 5.6 USBL ve DVL devrede iken X ekseninde konum kestirim hatası



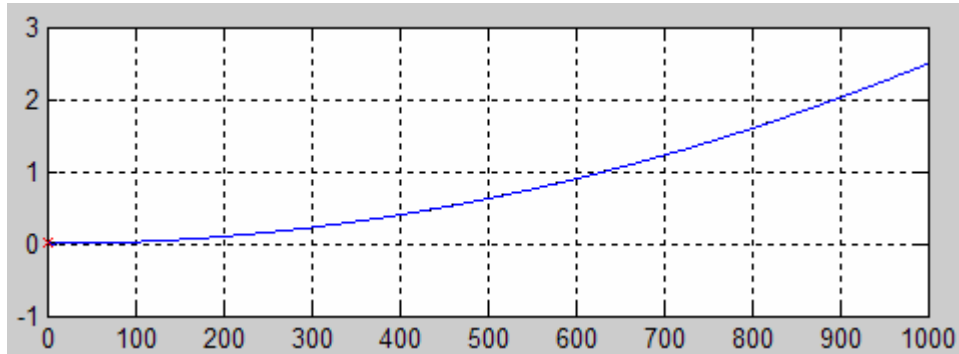
Şekil 5.7 USBL ve DVL devrede iken Y ekseninde konum kestirim hatası

### ***Z Ekseninde Konum (Derinlik) Takibi***

Derinlik algılayıcıları yüksek güncelleme frekansları ve hassas-doğru ölçümleri sayesinde sualtı araçlarının Z eksen konum takibinin doğrudan çözümüdürler. Şekillerde ataletsel sistemin, basınç sensörüyle tümleştirilmesinin Z ekseninde ne kadar başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Bu ekseninde hız kestirimi için DVL ve ivme ölçerlerden faydalanılmaktadır.



Şekil 5.8 Z ekseninde konum (derinlik) kestirim hatası



Şekil 5.9 Z eksenine konum (derinlik) takibi

## 6. SONUÇLAR

Bir sualtı aracının 9 durumlu denklemleri çıkarılmış ve doğrusal ayrık-zamanlı Kalman filtresi oluşturulmuştur. Kalman filtresi algoritması, USBL, DVL ve basınç sensörleri kullanılarak ataletsel seyir sisteminin desteklenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Benzetimi yapılan bu algılayıcı tümleştirme işlemi göstermiştir ki, basit doğrusal ve kinematik bir sistem modeli bile algılayıcı tümleştirme uygulamalarında, Kalman filtresinin tatmin edici sonuçlar vermesi için yeterlidir.

Basınç sensörü, başlı başına aracın Z eksenindeki konum takibini gerçekleştirecek kapasitededir. Bu ekseninde dikey hız takibi yapılması için DVL ve ivmeölçerler tümleştirilebilir.

USBL ve DVL' den elde edilen XY konum ve XY hız bilgileri, ivmeölçerlerin entegrasyonu sonucunda zamanla oluşan hata birikmesinin önüne geçmek için kullanılabilir. Kalman filtresi kullanan tümleştirme algoritması XY konumun kestiriminde de tatmin edici sonuçlar vermiştir.

Elde edilen sonuçların, daha da iyileştirilebilmesi için farklı yöntemler (ör. gelişmiş kalman filtresi ve doğrusal olmayan sistem modeli gibi) denenebilir. Ancak yapılan benzetimler göstermiştir ki, basit Kalman filtresi, çok yüksek doğruluk gerektirmeyen uygulamalarda, kolay gerçekleştirilmesi ve kolay ince ayar yapılabilmesi nedeniyle daha uzun süre tercih edilen algılayıcı tümleştirme yöntemi olma özelliğini sürdürecektir.

## KAYNAKLAR

- Alcocer, A., Oliveira, P. ve Pascoal, A., (2007), Study and implementation of an EKF GIB-based underwater positioning system. *Control Engineering Practice*, 15(6), 689-701.
- An, P.E. vd., (1997), Asynchronous data fusion for AUV navigation via heuristic fuzzyfiltering techniques. *OCEANS'97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, 1.
- Arulampalam, M.S. vd., (2002), A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-GaussianBayesian tracking. *Signal Processing, IEEE Transactions on [see also Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE Transactions on]*, 50(2), 174-188.
- Bellingham, J.G. vd., (1992), Hyperbolic Acoustic Navigation for Underwater Vehicles: Implementation and Demonstration. *Proceedings of the AUV'92 Conference*.
- Blain, M., Lemieux, S. ve Houde, R., (2003), Implementation of a ROV navigation system using acoustic/Doppler sensors and Kalman filtering. *OCEANS 2003. Proceedings*, 3.
- Brown, R.G., Hwang, P.Y.C. ve Brown, R.G., (1992), Introduction to random signals and applied Kalman filtering.
- Cramer, M., (1997), GPS/INS Integration. *Photogrammetric Week*, 97, 3-12.
- Farrell, J. ve Barth, M., (1999), *The Global Positioning System and Inertial Navigation*, McGraw-Hill Professional.
- Fauske, K.M., Gustafsson, F. ve Hegrenaes, O., (2007), Estimation of AUV dynamics for sensor fusion. *Information Fusion, 2007 10th International Conference on*, 1-6.
- Fofonoff, N.P. ve Millard Jr, R.C., (1983), Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *Documentos técnicos de la Unesco sobre ciencias del mar*. 44.
- Fossen, T.I., (1994), *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Wiley.
- Fossen, T.I., (2002), *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*, Marine Cybernetics.
- Fryxell, D. vd., (1996), Navigation, guidance and control of AUVs: An application to the MARIUS vehicle. *Control Engineering Practice*, 4(3), 401-409.
- Gaiffe, T. ve President, I., *From High Technology to Solutions: The Experience of iXSea*.
- Gelb, A., (1974), *Applied Optimal Estimation*, MIT Press.
- Grewal, M. ve Andrews, A., *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*,
- Haykin, S.S., (2001), *Kalman Filtering and Neural Networks*, Wiley Chichester.
- Healey, A.J., An, E.P. ve Marco, D.B., On Line Compensation of Heading Sensor Bias for Low Cost AUVs,
- Heckman, D. ve Abbott, R., (1973), An acoustic navigation technique. *OCEANS*, 5.

Hunt, M.M. vd., (1974), An Acoustic Navigation System.

Jouffroy, J. ve Nguyen, T.D., (2004), Towards on-line underwater vehicle trajectory estimation using diffusion-based observers. *OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04*, 3.

Jourdan, D., Brown, B. ve Inc, M.S., (1997), Improved navigation system for USBL users. *OCEANS'97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, 1.

Julier, S.J. ve Uhlmann, J.K., (1997), A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems. *Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing, Simul. and Controls*, 3.

Kalman, R.E., (1960), A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35-45.

Kalman, R.E. ve Bucy, R.S., (1973), New results in linear filtering and prediction theory. *Random Processes*.

Kim, K. vd., (2007), Underwater navigation based on the multiple sensor fusion for the deep-sea UUV system, HEMIRE and HENUVY. *OCEANS 2007-Europe*, 1-6.

Kinsey, J.C., ADVANCES IN PRECISION NAVIGATION OF OCEANOGRAPHIC SUBMERSIBLES.

Kinsey, J.C., Eustice, R.M. ve Whitcomb, L.L., A SURVEY OF UNDERWATER VEHICLE NAVIGATION: RECENT ADVANCES AND NEW CHALLENGES.

Lee, P.M. vd., (2004), An integrated navigation system for autonomous underwater vehicles with two range sonars, inertial sensors and Doppler velocity log. *OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04*, 3.

Lee, P.M. vd., (2007), Navigation and Control System of a Deep-sea Unmanned Underwater Vehicle'HEMIRE'. *OCEANS 2006-Asia Pacific*, 1-8.

Lee, P.M. vd., (2004), Improvement on an inertial-Doppler navigation system of underwater vehicles using a complementary range sonar. *Underwater Technology, 2004. UT'04. 2004 International Symposium on*, 133-138.

Leonard, J. vd., Autonomous Underwater Vehicle Navigation.

Loebis, D. vd., (2007), Soft computing techniques in the design of a navigation, guidance and control system for an autonomous underwater vehicle. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADAPTIVE CONTROL AND SIGNAL PROCESSING*, 21(2-3), 205.

Majumder, S., Scheduling, S. ve Durrant-Whyte, H.F., (2001), Multisensor data fusion for underwater navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, 35(2), 97-108.

Mandt, M., Gade, K. ve Jalving, B., (2001), Integrating DGPS-USBL position measurements with inertial navigation in the HUGIN 3000 AUV. *Proceedings of the 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, Russia, May*.

Marco, D.B. ve Healey, A.J., (2001), Command, control, and navigation experimental results with the NPSARIES AUV. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 26(4), 466-476.

McGee, R.B. ve., (1995), An Experimental Study of an Integrated GPS/INS System for Shallow-water AUV Navigation (Sans). *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UNMANNED UNTETHERED SUBMERSIBLE TECHNOLOGY*, 153-167.

Milne, P.H., (1983), *Underwater Acoustic Positioning Systems*, Gulf Publishing Co., Houston, TX.

Morgado, M. vd., (2006), USBL/INS Tightly-Coupled Integration Technique for Underwater Vehicles. *Proceedings Of The 9th International Conference on Information Fusion*.

Nickell, C.L., (2005), Modular Modification of a Buoyant AUV for Low-Speed Operation.

Nicosevici, T. vd., (2004), A review of sensor fusion techniques for underwater vehicle navigation. *OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04*, 3.

Pfuetzenreuter, T., Rauschenbach, T. ve Wernstedt, J., (2006), Multisensor Fusion for Navigation of Underwater Vehicles. *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2006 IEEE International Conference on*, 151-154.

Ribas, D. vd., ICTINEU AUV Takes the Challenge.

Silvestre, M. ve Vasconcelos, J.F., Improving Aiding techniques for USBL Tightly-Coupled Inertial Navigation System.

Silvestre, M. ve Vasconcelos, J.F., USBL/INS INTEGRATION TECHNIQUE FOR UNDERWATER VEHICLES.

Silvestre, M. ve Vasconcelos, J.F., VEHICLE DYNAMICS AIDING TECHNIQUE FOR USBL/INS UNDERWATER NAVIGATION SYSTEM.

Stutters, L. vd., (2008), Navigation Technologies for Autonomous Underwater Vehicles. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 38(4), 581-589.

Ura, T. ve Kim, K., (2004), On-site INS update of an AUV" r2D4" by SSBL based position estimation. *OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04*, 3.

Vickery, K. ve Inc, S., (1998a), Acoustic positioning systems. A practical overview of current systems. *Autonomous Underwater Vehicles, 1998. AUV'98. Proceedings Of The 1998 Workshop on*, 5-17.

Vickery, K. ve Inc, S., (1998b), Acoustic positioning systems. New concepts-the future. *Autonomous Underwater Vehicles, 1998. AUV'98. Proceedings Of The 1998 Workshop on*, 103-110.

Welch, G. ve Bishop, G., (1995), An Introduction to the Kalman Filter. *University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC*.

Wendel, J. vd., (2006), An integrated GPS/MEMS-IMU navigation system for an autonomous helicopter. *Aerospace Science and Technology*, 10(6), 527-533.

Whitcomb, L. vd., (2003), Navigation Upgrades to the National Deep Submergence Facility Vehicles DSV Alvin, Jason 2, and the DSL-120A.

Whitcomb, L.L., (2000), Underwater robotics: out of the research laboratory and into the field. *IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, 1, 709-716.

Whitcomb, L.L. vd., (1999), Combined Doppler/LBL based navigation of underwater vehicles. Proceedings of the 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology.

Yun, X. vd., (1999), Testing and evaluation of an integrated GPS/INS system for smallAUV navigation. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 24(3), 396-404.

Zhao, L. ve Gao, W., (2004), The experimental study on GPS/INS/DVL integration for AUV. *Position Location and Navigation Symposium, 2004. PLANS 2004*, 337-340.

**EKLER**

Ek 1 Simülasyonda kullanılan MATLAB kodu: veri\_uret.m

Ek 2 Simülasyonda kullanılan MATLAB kodu: kalman.m

**Ek 1 Simülasyonda kullanılan MATLAB kodu: veri\_uret.m**

```

clear;
clc;

sure = 100;    % toplam simulasyon suresi (s)

% sistem ve sensorler icin ornekleme zamanlari
dt = 0.01;    % sistem ornekleme zamani
usbl_frek=0.1; % usbl guncelleme zamani
dvl_frek=5;   % dvl icin guncelleme zamani

usbl_pryt = 1/(usbl_frek*dt);
dvl_pryt = 1/(dvl_frek*dt);
adim = sure/dt;

% Durum sensor matrislerine bellekten yer ayir
euler=zeros(adim,3);
ivmeb=zeros(adim,3);
ivme=zeros(adim,3);
hiz=zeros(adim,3);
konum=zeros(adim,3);
ivmeg=zeros(adim,3);
hizg=zeros(adim,3);
konumg=zeros(adim,3);

temp=0;
for i=1:adim
    if (mod(i,100)==0)
        temp=temp+pi/8;
    end
    euler(i,1)=0;
    euler(i,2)=0;
    euler(i,3)=temp;
end

for i=1:15
    ivmeb(i,1)=0.1;
    ivmeb(i,2)=0;
    ivmeb(i,3)=0.05;
end
for i=16:adim
    ivmeb(i,1)=0;
    ivmeb(i,2)=0;
    ivmeb(i,3)=0;
end

for i=1:adim
    ivme(i,:)=(Rzyx(euler(i,:))*ivmeb(1,:))';
end

for i=1:adim

```

```

    if i>1
        hiz(i,1)=hiz((i-1),1)+dt*ivme((i-1),1);
        hiz(i,2)=hiz((i-1),2)+dt*ivme((i-1),2);
        hiz(i,3)=hiz((i-1),3)+dt*ivme((i-1),3);
    else
        hiz(1,1)=0;
        hiz(1,2)=0;
        hiz(1,3)=0;
    end
end
for i=1:adim
    if i>1
        konum(i,1)=konum((i-1),1)+dt*hiz((i-1),1);
        konum(i,2)=konum((i-1),2)+dt*hiz((i-1),2);
        konum(i,3)=konum((i-1),3)+dt*hiz((i-1),3);
    else
        konum(1,1)=0;
        konum(1,2)=0;
        konum(1,3)=0;
    end
end
for i=1:adim
    ivmeg(i,1)=ivme(i,1)+(0.196*rand-0.098); % +/- 0.01 g veya
0.098 m/s2
    ivmeg(i,2)=ivme(i,2)+(0.196*rand-0.098); % 3DM-GX2 @ +/-
10g araligi
    ivmeg(i,3)=ivme(i,3)+(0.196*rand-0.098);
end
for i=1:adim
    hizg(i,1)=hiz(i,1)+(0.04*rand-0.02); % +/- 0.02 m/s
    hizg(i,2)=hiz(i,2)+(0.04*rand-0.02); % Explorer DVL
    hizg(i,3)=hiz(i,3)+(0.04*rand-0.02);
end
for i=1:adim
    konumg(i,1)=konum(i,1)+(konum(i,1)*(2*rand-1)/100); % +/-
10m
    konumg(i,2)=konum(i,2)+(konum(i,1)*(2*rand-1)/100);
    konumg(i,3)=konum(i,3)+(konum(i,3)*(0.002*rand-0.001)); %
+/- %0.01 Paroscientific
end
kalman;

```

**Ek 2 Simülasyonda kullanılan MATLAB kodu: kalman.m**

```

% algilayicilari sisteme dahil et
% 1: bagli, 0:bagli degil
usbl=1;
dvl=1;
der=1;
atal=1;

close all;

A = [1 0 0 dt 0 0 (dt^2)/2 0 0;
     0 1 0 0 dt 0 0 (dt^2)/2 0;
     0 0 1 0 0 dt 0 0 (dt^2)/2;
     0 0 0 1 0 0 dt 0 0;
     0 0 0 0 1 0 0 dt 0;
     0 0 0 0 0 1 0 0 dt;
     0 0 0 0 0 0 1 0 0;
     0 0 0 0 0 0 0 1 0;
     0 0 0 0 0 0 0 0 1]; % durum gecis matrisi

H1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 der 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 atal 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 atal 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 atal]; % ivme, derinlik bilgisi mevcut

H2 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 der 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 dvl 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 dvl 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 dvl 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 atal 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 atal 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 atal]; % dvl, ivme, derinlik bilgisi
mevcut

H3 = [usbl 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 usbl 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 der 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 atal 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 atal 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 atal]; % usbl, ivme, derinlik bilgisi
mevcut

H4 = [usbl 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 usbl 0 0 0 0 0 0 0;

```

```

    0 0 der 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 dvl 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 dvl 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 dvl 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 atal 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 atal 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 atal]; % usbl, dvl, ivme, derinlik
bilgisi mevcut

% hata kovaryansina 0'dan farkli bir ilk deger ver
P = 1*eye(9);

% Proses ve olcum kovaryans matrislerini tanımla
% Q buyurse olcumler onemli, R buyurse olcumler onemsiz
Q= 1*eye(9);
R = [1000 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 1000 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0.01 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0.1 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0.1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0.1 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0.001 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0.001 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0.001];

% Durum vektörü için başlangıç değerleri tanımla
x = [0 0 0 0 0 0 0 0 0]';

% Oluşturulan ölçüm verilerini z matrisinde birleştir
z = [konumg';hizg';ivmeg'];

% Durum kestirim vektörüne bellekte yer ayır (performans için)
xsapka=zeros(9,adim);

for i=1:adim

    % Mevcut ölçüm verisine göre H matrisi seç
    usbl =
    (sqrt(sqrt(konum(i,1)^2*konum(i,2)^2)^2*konum(i,3)^2)<2000); %
    Menzil dışındaysa usbl ölçümü yapma: 2km
    if (mod(i,usbl_pryt)==0)
        if (mod(i,dvl_pryt)==0)
            H=H4;
            fprintf('%d te usbl ve dvl var\n',i);
        else
            H=H3;
            fprintf('%d te usbl var\n',i);
        end
    elseif (mod(i,dvl_pryt)==0)
        H=H2;
        fprintf('%d te dvl var\n',i);
    else

```

```

        H=H1;
        %fprintf('%d te ivme, derinlik\n',i);
    end

    % Zaman Güncellemesi (Tahmin)
    % Durum vektörü ve kovaryans tahmini:
    x = A * x;
    P = A * P * A' + Q;
    % Olcum Güncellemesi (Düzeltilme)
    % Kalman kazancını hesapla:
    K = P*H'*inv(H*P*H'+R);
    % Gözlem sonrası düzeltme:
    x = x + K*(z(:,i)-H*x);
    P = P - K*H*P;
    xsapka(:,i)=x;
end

konum_kestirim_varyansi = var((konum(1:adim,:)-
xsapka(1:3,1:adim)'))
max_konum__kest_hatasi=max(abs((konum(1:adim,:)-
xsapka(1:3,1:adim)'))))
konum_olcum_varyansi = var((konum(1:adim,:)-konumg(1:adim,:)))
max_konum_olcum_hatasi=max(abs((konum(1:adim,:)-
konumg(1:adim,:))))

yatay = (1:adim);
usbl_yatay = (1:usbl_pryt:adim);
dvl_yatay = (1:dvl_pryt:adim);

%% 3-boyutlu konum grafigini ciz
figure();
plot3(...
    konum(1:adim,1),konum(1:adim,2),konum(1:adim,3),'k-',...

    konumg(1:usbl_pryt:adim,1),konumg(1:usbl_pryt:adim,2),konumg(1
:usbl_pryt:adim,3),'rX',...
    xsapka(1,1:adim),xsapka(2,1:adim),xsapka(3,1:adim),'b-'...
);
xlabel('Kuzey');ylabel('Dogu');zlabel('Derinlik');
grid on;

%% konum x bileseninin grafigini ciz
figure();
subplot(6,1,1),
plot(...
    yatay,konum(1:adim,1),'k-',...
    yatay,xsapka(1,1:adim),'b-',...
    usbl_yatay,konumg(1:usbl_pryt:adim,1),'rX'...
);
grid on;
%% konum x bileseninin hata grafigini ciz
subplot(6,1,2),

```

```

plot(...
    yatay, (konum(1:adim,1)-xsapka(1,1:adim)'), 'b-', ...
    usbl_yatay, (konum(1:usbl_pryt:adim,1)-
konumg(1:usbl_pryt:adim,1)), 'r--' ...
);
grid on;
%% konum y bileseninin grafigini ciz
subplot(6,1,3),
plot(yatay, konum(1:adim,2), 'k-', yatay, xsapka(2,1:adim), 'b-
', usbl_yatay, konumg(1:usbl_pryt:adim,2), 'rX');
grid on;
%% konum y bileseninin hata grafigini ciz
subplot(6,1,4),
plot(yatay, (konum(1:adim,2)-xsapka(2,1:adim)'), 'b-
', usbl_yatay, (konum(1:usbl_pryt:adim,2)-
konumg(1:usbl_pryt:adim,2)), 'r-');
grid on;
%% konum z bileseninin grafigini ciz
subplot(6,1,5),
plot(yatay, konum(1:adim,3), 'k-', yatay, xsapka(3,1:adim), 'b-
', usbl_yatay, konumg(1:usbl_pryt:adim,3), 'rX');
grid on;
%% konum z bileseninin hata grafigini ciz
subplot(6,1,6),
plot(yatay, (konum(1:adim,3)-xsapka(3,1:adim)'), 'b-
', yatay, (konum(1:adim,3)-konumg(1:adim,3)), 'r-');
grid on;

% hiz grafiklerini cizdir
figure();
subplot(6,1,1),
plot(yatay, hiz(1:adim,1), 'k-', yatay, xsapka(4,1:adim), 'b-
', yatay, hizg(1:adim,1), 'rX');
grid on;
subplot(6,1,2),
plot(yatay, (hiz(1:adim,1)-xsapka(4,1:adim)'), 'b-
', yatay, (hiz(1:adim,1)-hizg(1:adim,1)), 'r-');
grid on;
subplot(6,1,3),
plot(yatay, hiz(1:adim,2), 'k-', yatay, xsapka(5,1:adim), 'b-
', yatay, hizg(1:adim,2), 'rX');
grid on;
subplot(6,1,4),
plot(yatay, (hiz(1:adim,2)-xsapka(5,1:adim)'), 'b-
', yatay, (hiz(1:adim,2)-hizg(1:adim,2)), 'r-');
grid on;
subplot(6,1,5),
plot(yatay, hiz(1:adim,3), 'k-', yatay, xsapka(6,1:adim), 'b-
', yatay, hizg(1:adim,3), 'rX');
grid on;
subplot(6,1,6),

```

```
plot(yatay, (hiz(1:adim,3)-xsapka(6,1:adim)'), 'b-'  
, yatay, (hiz(1:adim,3)-hizg(1:adim,3)), 'r-');  
grid on;
```

**ÖZGEÇMİŞ****Doğum tarihi** 30.01.1982**Doğum yeri** Edirne**Lise** 1997–2000 Edirne Süleyman Demirel Fen Lisesi**Lisans** 2000–2005 Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fak.  
Elektrik Mühendisliği Bölümü**Yüksek Lisans** 2005- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Kontrol ve Otomasyon Yüksek Lisans Programı**Çalıştığı kurum(lar)**2006-Devam ed. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi  
Enerji Enstitüsü  
Araştırmacı