



**MEKATRONİK SİSTEMLERDE  
ÜÇ BOYUTLU İZ TAKİBİ**

**Mustafa Can BİNGÖL**

**Yüksek Lisans Tezi  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT  
ARALIK-2016**

**T.C**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK SİSTEMLERDE**  
**ÜÇ BOYUTLU İZ TAKİBİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa Can BİNGÖL**

**(141134106)**

**Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği**

**Programı: Mekatronik Mühendisliği**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 12 ARALIK 2016**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 29 ARALIK 2016**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT (F.Ü.)**  
**Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Gonca ÖZMEN KOCA (F.Ü.)**  
**Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü.)**

**ARALIK – 2016**

## ÖNSÖZ

Yapılan tez çalışması sırasında üstün bilgi ve becerisinin yanı sıra alçak gönüllülüğü ile bütün sorunlarımla ilgilenen resmi olarak danışmanım gayri resmi olarak bir danışmandan daha fazlası olan Sayın Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT' a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarımı şekillendiren en büyük etken olan “Üç Boyutlu Hareket Kabiliyetine Sahip Carangiform Türünde Bir Biyomimetik Robot Balığın Tasarımı ve Gerçeklemesi” konulu TUBİTAK 1001 projesinin yürütücüsü Yrd. Doç. Dr. Gonca ÖZMEN KOCA' ya karamsarlığa düştüğümüz anda gösterdiği ışıktan ve ekibi olan bizlere duyduğu güvenden dolayı teşekkür ederim. Yrd. Doç. Dr. Cafer BAL ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa AY' a problemlere ürettikleri sıra dışı çözümlerden dolayı teşekkür ederim. Arş. Gör. Deniz KORKMAZ' a çalışmalarımın büyük bir kısmında bilgi ve tecrübelerinden hiç bıkmadan ve usanmadan yararlanma imkanı sağladığı için ve Seda YETKİN' e yaptığı yardımlardan ve verdiği manevi destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimim süresince aldığım İleri Robotik dersinin hocası Doç. Dr. Ömür AYDOĞMUŞ' a robotik alanında hayal gücümü geliştirdiğinden dolayı teşekkür ederim.

Öğretim Elemanı Yetiştirme Programı (ÖYP) dâhilinde Teknoloji Fakültesinde görev almadan önce lisans öğrenimim ve yüksek lisans öğrenimimin ilk döneminde danışmanım olan Doç. Dr. Oğuz Yakut' a ve lisansüstü eğitim almam konusunda beni bilgilendirerek yüksek lisansa yönlendiren M. Fatih Aydoğdu hocama teşekkür ederim. ÖYP ile bölüme geldikten sonra istediğim alanda çalışmama izin veren dönemin bölüm başkanı Doç. Dr. Ahmet KOCA' ya teşekkür ederim.

Bu lisansüstü çalışması sırasında her türlü maddi ve manevi desteği bana sağlayarak verdiğim bütün kararlarda arkamda bulunan ve benim sahip olduğum en büyük hazine olan ailem ve Feray GENÇER' e teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bu tez çalışması 114E652 numaralı TUBİTAK projesi kapsamında desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ .....                                                                          | II        |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                     | III       |
| ÖZET .....                                                                           | IV        |
| SUMMARY .....                                                                        | V         |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                               | VI        |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                               | IX        |
| SEMBOLLER LİSTESİ .....                                                              | X         |
| KISALTMALAR LİSTESİ .....                                                            | XV        |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                                 | <b>1</b>  |
| 1.1. Tezin Amacı ve Yöntemi .....                                                    | 8         |
| 1.2. Tezin İçeriği .....                                                             | 8         |
| <b>2. ROBOT BALIĞIN MODELİNİN ELDE EDİLMESİ .....</b>                                | <b>9</b>  |
| 2.1. İleri Yüzüş ( Sapma ) Hareketinin Modellenmesi .....                            | 9         |
| 2.2. Kuyruğun Oluşturacağı Hidrodinamik Kuvvetlerin Analizi .....                    | 12        |
| 2.3. Dalma ( Yunuslama ) ve Dönme ( Yuvarlanma ) Hareketlerinin Modellenmesi.....    | 15        |
| 2.4. Hareket Modelinin Su İçerisinde Altı Serbestlik Dereceli Hale Getirilmesi ..... | 16        |
| <b>3. ROBOT KOLUN MODELİNİN ELDE EDİLMESİ.....</b>                                   | <b>22</b> |
| <b>4. MEKATRONİK SİSTEMLERDE ÜÇ BOYUTLU İZ TAKİBİ .....</b>                          | <b>26</b> |
| <b>5. ROBOT BALIĞIN KONTROLÜ.....</b>                                                | <b>32</b> |
| 5.1. Açık Çevrim Kontrol.....                                                        | 32        |
| 5.2. PID Kontrol .....                                                               | 34        |
| 5.3. Kayma Kipli Kontrol .....                                                       | 36        |
| <b>6. ROBOT KOLUN KONTROLÜ .....</b>                                                 | <b>41</b> |
| 6.1. Motor Modeli ve Kontrolü .....                                                  | 41        |
| 6.2. Düz ve Ters Kinematik Denklemler .....                                          | 43        |
| <b>7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....</b>                                             | <b>46</b> |
| 7.1. Robot Balık İçin Sonuçlar .....                                                 | 46        |
| 7.2. Robot Kol İçin Sonuçlar .....                                                   | 55        |
| 7.3. Değerlendirme .....                                                             | 59        |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                | <b>61</b> |
| <b>EKLER .....</b>                                                                   | <b>68</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                | <b>70</b> |

## ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte akıllı Mekatronik Sistemler büyük önem kazanmıştır. Mekatronik sistemlerin büyük bir kısmını robotlar oluşturmaktadır. Robotlar otonom hareket edebilen sistemlerdir ve birçok çeşidi vardır. Bu tezde farklı robotik alanlarda kullanılan robot balık ve robot kol sistemleri için üç boyutlu iz takibi çalışılmıştır.

Belirlenen sistemlerin davranışlarını analiz etmek ve kontrol edebilmek için modellenmesine ihtiyaç vardır. Robot balık sistemi Lagrange Mekaniği kullanılarak *MATLAB/Simulink* ortamında modellenmiştir. Robot kol sistemi ise *SimMechanics* ortamında modellenmiştir. Modellenen robot balık Oransal İntegral Türev Kontrol (PID) ve Kayma Kipli Kontrol (KKK) yöntemleri ile kontrol edilmiştir. Modellenen robot kol ise PID ve düz kinematik denklemlerden yararlanarak kontrol edilmiştir. Ayrıca robot balık konum vektörü yaklaşımından yararlanılarak ve robot kol ters kinematik denklemlerden yararlanılarak üç boyutlu iz takibi işlemi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak farklı Mekatronik Sistemlere üç boyutlu iz takibi işlemi farklı kontrol algoritmaları ile uygulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Üç Boyutlu İz Takibi, Mekatronik Sistemler, Robot Balık, Robot Kol, Oransal İntegral Türev Kontrol, Kayma Kipli Kontrol

## SUMMARY

### Three-Dimensional Trajectory Tracking in Mechatronic Systems

Intelligent Mechatronic Systems have gained great importance with the developing technology. Most of the mechatronic systems consist of robots. Robots have autonomous mobile systems and have many types. In this thesis, robotic fish and robot arm systems used in different robotics fields have been studied.

Modeling has been required to analyze and control the specified systems. The robotic fish system has been modeled using Lagrange Mechanics on *MATLAB/Simulink* environment. The robot arm system has been modeled in *SimMechanics* environment. The modeled robotic fish has been controlled by Proportional Integral Derivative Control (PID) and Sliding Mode Control (SMC). The modeled robot arm has been controlled by using PID and straight kinematic equations. Three dimensional trajectory tracking has been realized for the robotic fish and robotic arm by using the position vector approach and the inverse kinematic equations respectively.

As a result, three dimensional trajectory tracking has been applied to different mechatronic systems with different control algorithms.

**Key Words:** Three Dimensional Trajectory Tracking, Mechatronic Systems, Robotic Fish, Robot Arm, Proportional Integral Derivative Control, Sliding Mode Control

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. 1 Robot kol örneği ( KR6 - R900).....                       | 2  |
| Şekil 1. 2 Modern dörtlü döner örneği (URL-1).....                   | 3  |
| Şekil 1. 3 Robot balık örneği (URL-2) .....                          | 5  |
| Şekil 1. 4 BCF yüzme hareketlerinin sınıflandırılması: .....         | 6  |
| Şekil 1. 5 Tasarlanan ve benzetimi yapılan robot balık.....          | 7  |
| Şekil 1. 6 Yapılan üç boyutlu iz takibi sonucu .....                 | 8  |
| Şekil 2. 1 Robot balığın eklem diyagramı .....                       | 9  |
| Şekil 2. 2 Eklem analizi.....                                        | 10 |
| Şekil 2. 3 Kuyruk yüzgecinin oluşturduğu kuvvetler .....             | 12 |
| Şekil 2. 4 Atak açısının oluşumu .....                               | 14 |
| Şekil 2. 5 Ağırlık merkezi mekanizması .....                         | 15 |
| Şekil 2. 6 Eksen takımları.....                                      | 16 |
| Şekil 2. 7 Ağırlık ve kaldırma merkezi.....                          | 20 |
| Şekil 3. 1 Robot kolun basitleştirilmiş çizimi.....                  | 23 |
| Şekil 3. 2 Robot kol modeli .....                                    | 24 |
| Şekil 3. 3 Eklemler arası bağlantı bloğu.....                        | 25 |
| Şekil 4. 1 Seyir sistemleri blok diyagramı.....                      | 26 |
| Şekil 4. 2 Kapasitif elemanın gerilim grafiği .....                  | 27 |
| Şekil 4. 3 Hedef takip algoritmaları.....                            | 28 |
| Şekil 4. 4 Konum vektörü.....                                        | 30 |
| Şekil 5. 1 Robot balığın matematiksel modelinin blok diyagramı ..... | 32 |
| Şekil 5. 2 Eklemlere uygulanan momentler .....                       | 33 |
| Şekil 5. 3 Robot balığın düz yüzüş hareketi .....                    | 33 |
| Şekil 5. 4 PID kontrol .....                                         | 34 |
| Şekil 5. 5 Frekans eğrisi .....                                      | 36 |
| Şekil 5. 6 Anahtarlama fonksiyonu .....                              | 37 |
| Şekil 5. 7 Kontrol girişinin karakteristiği .....                    | 39 |
| Şekil 5. 8 Robot balığın iz takibi blok şeması .....                 | 40 |
| Şekil 6. 1 Doğru akım motoru modeli .....                            | 42 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6. 2 Robot kolun basitleştirilmiş gösterimi .....                       | 43 |
| Şekil 6. 3 Robot kolun iki boyutlu yaklaşımı .....                            | 44 |
| Şekil 7. 1 Eklemlere uygulanan momentler .....                                | 46 |
| Şekil 7. 2 Uygulanan momentler sonucunda elde edilen hareket.....             | 46 |
| Şekil 7. 3 Oluşan eklem açıları.....                                          | 47 |
| Şekil 7. 4 Oluşan eklem açıları.....                                          | 47 |
| Şekil 7. 5 Uygulanan momentler .....                                          | 47 |
| Şekil 7. 6 Uygulanan momentler sonucunda oluşan hareket.....                  | 48 |
| Şekil 7. 7 Oluşan eklem açıları.....                                          | 48 |
| Şekil 7. 8 Oluşan itme kuvveti .....                                          | 48 |
| Şekil 7. 9 Farklı hız referanslarına göre PID sonuçları .....                 | 49 |
| Şekil 7. 10 Farklı yuvarlanma açısı referanslarına göre PID sonuçları .....   | 49 |
| Şekil 7. 11 Farklı sapma açısı referanslarına göre PID sonuçları.....         | 49 |
| Şekil 7. 12 Farklı yunuslama açısı referanslarına göre PID sonuçları.....     | 49 |
| Şekil 7. 13 Robot Balık sisteminde PID ile yapılan üç boyutlu iz takibi ..... | 50 |
| Şekil 7. 14 Yapılan hareketin XY eksenini iz düşümü.....                      | 50 |
| Şekil 7. 15 Yapılan hareketin XZ eksenini iz düşümü .....                     | 50 |
| Şekil 7. 16 İstenilen takip işlemi için parametre hataları .....              | 51 |
| Şekil 7. 17 Farklı hız referanslarına göre KKK sonuçları .....                | 51 |
| Şekil 7. 18 Farklı yuvarlanma açısı referanslarına göre KKK sonuçları.....    | 51 |
| Şekil 7. 19 Farklı sapma açısı referanslarına göre KKK sonuçları .....        | 52 |
| Şekil 7. 20 Farklı yunuslama açısı referanslarına göre KKK sonuçları .....    | 52 |
| Şekil 7. 21 Robot Balık sisteminde KKK ile yapılan üç boyutlu iz takibi.....  | 52 |
| Şekil 7. 22 Yapılan hareketin XY eksenini iz düşümü.....                      | 53 |
| Şekil 7. 23 Yapılan hareketin XZ eksenini iz düşümü .....                     | 53 |
| Şekil 7. 24 İstenilen takip işlemi için parametre hataları .....              | 53 |
| Şekil 7. 25 Robot balık sisteminde KKK ile yapılan üç boyutlu iz takibi.....  | 54 |
| Şekil 7. 26 Yapılan hareketin XY eksenini iz düşümü.....                      | 54 |
| Şekil 7. 27 Yapılan hareketin XZ eksenini iz düşümü .....                     | 54 |
| Şekil 7. 28 İstenilen takip işlemi için parametre hataları .....              | 55 |
| Şekil 7. 29 Motora uygulanan yük momenti .....                                | 55 |
| Şekil 7. 30 Referans giriş ve sistem sonucu .....                             | 56 |
| Şekil 7. 31 Konum hatası.....                                                 | 56 |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 7. 32 Armatür akımı .....                                | 56 |
| Şekil 7. 33 Kontrol sinyali.....                               | 56 |
| Şekil 7. 34 Verilen iz için yapılan üç boyutlu iz takibi ..... | 57 |
| Şekil 7. 35 Yapılan hareketin XY eksen iz düşümü.....          | 57 |
| Şekil 7. 36 Yapılan hareketin XZ eksen iz düşümü .....         | 57 |
| Şekil 7. 37 İstenilen yörünge için eklem açı hataları.....     | 58 |
| Şekil 7. 38 Verilen iz için yapılan üç boyutlu iz takibi ..... | 58 |
| Şekil 7. 39 Yapılan hareketin XY eksen iz düşümü.....          | 59 |
| Şekil 7. 40 Yapılan hareketin XZ eksen iz düşümü .....         | 59 |
| Şekil 7. 41 İstenilen yörünge için eklem açı hataları.....     | 59 |



## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Tablo 3. 1 Robot kola ait parametreler .....       | 24 |
| Tablo 6. 1 Motor modelinde kullanılan bloklar..... | 42 |



## SEMBOLLER LİSTESİ

|                               |                                                |
|-------------------------------|------------------------------------------------|
| $\theta_i$                    | : Eklem açısı ( rad )                          |
| $m_i$                         | : Eklem kütlesi ( kg )                         |
| $l_i$                         | : Eklem uzunluğu ( m )                         |
| $a_i$                         | : Eklem uzunluğunun yarısı ( m )               |
| $x_i$                         | : X eksenindeki ağırlık merkezi koordinatı     |
| $y_i$                         | : Y eksenindeki ağırlık merkezi koordinatı     |
| $\tau_i$                      | : Ekleme uygulanan moment ( Nm )               |
| $r_{i,i+1}$                   | : X eksenindeki dönme ( rad )                  |
| $t_i$                         | : Z eksenindeki dönme ( rad )                  |
| $A_{i,i+1}$                   | : X eksenindeki öteleme ( m )                  |
| $d_i$                         | : Z eksenindeki öteleme ( m )                  |
| $N$                           | : toplam eklem sayısı                          |
| $I_i$                         | : i. eklem atalet momenti ( kgm <sup>2</sup> ) |
| $L$                           | : Lagrange fonksiyonu                          |
| $\lambda$                     | : Lagrange çarpanı                             |
| $\gamma$                      | : Toplam sınırlandırma sayısı                  |
| $f$                           | : Sınırlandırma değeri                         |
| $M(\theta_i)$                 | : Atalet momenti matrisi                       |
| $C(\theta_i, \dot{\theta}_i)$ | : Coriolis etkisi matrisi                      |

$B(\dot{\theta}_i)$  : Sönüm matrisi

$K(\theta_i)$  : Yay sabiti matrisi

$F_v$  : Kaldırma kuvveti ( N )

$F_J$  : İvme kuvveti ( N )

$F_F$  : İtme Kuvveti ( N )

$F_C$  : Yanal Kuvvet ( N )

$\rho$  : Akışkanın yoğunluğu (  $\text{kg/m}^3$  )

$L$  : Kuyruk yüzgecinin uzunluğunu ( m )

$U$  : Akışkanın akış hızını (  $\text{m/s}^2$  )

$a$  : Atak açısı ( rad )

$\dot{x}$  : Sistemin hızı (  $\text{m/s}^2$  )

$S_u$  : Islak yüzey (  $\text{m}^2$  )

$C_D$  : Şekil katsayısı

$U_m$  : Akış sabiti

$u_f$  : y eksenine göre kuyruk yüzgeci merkezindeki hız (  $\text{m/s}^2$  )

$T_{ui}$  : i. Motora uygulanan moment işareti ( Nm )

$A$  : 1. motorun uyguladığı moment değerinin genliği

$B$  : 2. motorun uyguladığı moment değerinin genliği

$C$  : 3. motorun uyguladığı moment değerinin genliği

$f$  : Uygulanan moment değerinin frekansı ( Hz )

$\Delta$  : Faz farkı

|            |                                                                                      |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $m_x$      | : X eksenini boyunca kayan cisimlerin kütlesi ( kg )                                 |
| $m_y$      | : Y eksenini boyunca kayan cisimlerin kütlesi ( kg )                                 |
| $h_x$      | : X eksenlerindeki kütlelerin bulundukları eksenlere uzaklığını ( m )                |
| $h_y$      | : Y eksenlerindeki kütlelerin bulundukları eksenlere uzaklığını ( m )                |
| $l_x$      | : X eksenindeki kütlelerin denge anındaki ağırlık merkezine olan uzaklıklarını ( m ) |
| $l_y$      | : Y eksenindeki kütlelerin denge anındaki ağırlık merkezine olan uzaklıklarını ( m ) |
| $\theta$   | : Yunuslama açısı ( rad )                                                            |
| $\phi$     | : Yuvarlanma açısı ( rad )                                                           |
| $\psi$     | : Sapma açısı ( rad )                                                                |
| $g$        | : Yer çekimi ivmesi ( m/s <sup>2</sup> )                                             |
| $v$        | :Gövde eksenine göre hızlar                                                          |
| $\eta$     | : Dünya eksenine göre konumlar                                                       |
| $J$        | : Jacobian matrisi                                                                   |
| $\Theta$   | : Oryantasyon konumları                                                              |
| $R$        | : Dönme matrisi                                                                      |
| $T_\Theta$ | : Öteleme matrisi                                                                    |
| $S_i$      | : Asimetrik matris                                                                   |
| $f_b^\eta$ | : Kaldırma kuvveti vektörü                                                           |
| $f_g^\eta$ | : Yer çekimi kuvveti vektörü                                                         |
| $\tau_f$   | : Moment matrisi                                                                     |

$\alpha_i$  : X ekseninde dönme ( rad )

$t$  : Zaman ( s )

$e(t)$  : Hata vektörü

$r_d$  : Üç boyutlu iz

$r$  : Sistem konumu

$\zeta$  : Sistemin skaler hızı ( m/s )

$u$  : Kontrol sinyali

$K_p$  : Oransal kontrol parametresi

$K_i$  : İntegral kontrol parametresi

$K_d$  : Türev kontrol parametresi

$G_c$  : PID kontrol transfer fonksiyonu

$G_p$  : Sistem transfer fonksiyonu

$S(x)$  : Anahtarlama fonksiyonu

$u_c$  : Düzenleyici sinyal

$u_{eq}$  : Eşdeğer kontrol sinyali

$V(x)$  : Lyapunov fonksiyonu

$\text{sgn}$  : İşaret fonksiyonu

$i_c$  : Armatür akımı ( A )

$L_i$  : Armatür indüktansı ( H )

$R_e$  : Armatür direnci (  $\Omega$  )

$K_e$  : Gerilim katsayısı

$\omega$  : Dönüş hızı ( rad/s )

$K_m$  : Moment katsayısı

$J_a$  : Rotor ataleti ( kgm<sup>2</sup> )

$T_L$  : Yük momenti ( Nm )

$T_f$  : Sürtünme momenti ( Nm )

$P$  : Tutucu uç konumu

## KISALTMALAR LİSTESİ

|            |                                                             |
|------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>MPC</b> | : Model Öngörülü Kontrol                                    |
| <b>PID</b> | : Oransal İntegral Türev Kontrol                            |
| <b>P</b>   | : Oransal Kontrol                                           |
| <b>PD</b>  | : Oransal Türev Kontrol                                     |
| <b>MPF</b> | : Orta ve/veya Çift Yüzgeçleri ile Hareket                  |
| <b>BCF</b> | : Vücutlarının ve/veya Kuyruklarının Kıvrılması ile Hareket |
| <b>CPG</b> | : Merkezi Örüntü Üretici                                    |
| <b>PI</b>  | : Oransal İntegral Kontrol                                  |
| <b>LQR</b> | : Doğrusal Quadratik Regülatör                              |
| <b>SD</b>  | : Serbestlik Derecesi                                       |
| <b>KKK</b> | : Kayma Kipli Kontrol                                       |
| <b>VSS</b> | : Değişken Yapılı Sistem                                    |
| <b>VSC</b> | : Değişken Yapılı Kontrol                                   |

## 1. GİRİŞ

Mekatronik Mühendisliği, makine, yazılım, elektronik, kontrol ve malzeme gibi birçok mühendislik alanından yararlanan ve temelinde bu mühendislik disiplinlerinin uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlamak amacı ile kurulmuş bir sistem mühendisliğidir. Bu mühendislik alanının ortaya çıkarmış olduğu, hem gerektiğinde çevresini algılayan hem de gerektiğinde çevresini değiştirebilen, akıllı cihazlara mekatronik sistemler denir. Mekatronik sistemler birkaç benzetimle akılda canlandırılmaya çalışılırsa bu örnekler; endüstriyel robot kolları, uzay kapsülleri ve füzeler olabilir. Bu sistemlerin birçoğu üç boyutlu hareket edebilen, çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Üç boyutta hareket edebilen mekatronik sistemler daha ayrıntılı inceleyecek olursak: üç boyutta patika takibi yapan mekatronik sistemler ve üç boyutta iz takibi yapan mekatronik sistemler olarak ikiye ayrılır.

Üç boyutlu patika takibi, verilen yörüngenin zaman olgusundan bağımsız olarak minimum sürede takip edilmesi işlemi iken üç boyutlu iz takibi ise verilen zamana bağımlı yörüngenin istenilen sürede minimum hata ile takibi işlemidir (Alessandretti vd., 2013; Y. Li vd., 2015). Üç boyutlu iz takibi yapan mekatronik sistemler daha yakından incelenebilmesi için bu sistemler, havada bulunan üç boyutlu iz takibi yapan sistemler ve su da bulunan üç boyutlu iz takibi yapan sistemler olarak iki gruba ayrılabilir.

Otonom veya önceden programlanmış olarak işlem yapan sistemler olan robotlar mekatronik sistem denilince ilk akla gelen cihazlardır. Temel olarak bilimsel ve endüstriyel olarak ikiye ayrılırlar. Bilimsel robotlar araştırma ve geliştirme amaçlı kullanılırken endüstriyel robotlar üretim amaçlı kullanılırlar. Endüstriyel robotların önemli bir kısmını robot kollar oluşturur. Bu cihazlar insan kolunun biyomekaniğinden ilham alarak oluşturulan mekanik sistemlerdir. Şekil 1.1’de KR6-R900 robot kol örneği verilmiştir.



Şekil 1. 1 Robot kol örneği ( KR6 - R900)

Robot kolların analizi düz ve ters kinematik diye adlandırılan iki kısımdan oluşur. Düz kinematik, verilen açı değerlerinden robot kolun tutucu ucunun nerede olduğunu tahmin etmemize yarayan analiz yöntemi iken; ters kinematik, robot kolun tutucu ucunun olduğu yerden eklem açılarının elde edilmesi için kullanılan bir analiz yöntemidir. Bing ve Xiang benzetimini gerçekleştirdikleri robot kola görüntü işleme ile bir hedef bulduktan sonra bu robot kolunun ters kinematik denklemlerinden yararlanarak o hedefe doğru üç boyutlu iz takibi hareketinin gerçekleşmesini sağlamışlardır (Bing ve Xiang, 2008). Buna benzer başka bir çalışmada, fırlatılan bir top güveye benzetilerek nereye düşeceği hesaplanmış ve bu hesaplanan rotada robot kolunun hareketi için ters kinematik denklemlerden yararlanılmıştır (Lin ve Shie, 2011). Diğer bir çalışmada belirlenen bir robot kola Jacobian matrisinden yararlanarak üç boyutlu iz üretilen bir kullanıcı ara yüzü tasarlanmış ve tasarlanan bu ara yüz sayesinde robotun benzetim ortamında iz takibi yaptığı gösterilmiştir (Pacheco vd., 2010). Ayrıca NIMS3D adlı bir delta robota Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control - MPC) uygulanarak üç boyutlu iz takibinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır (Borgstrom vd., 2009). Bir diğer ekip ise cerrahi bir robotun dikiş atabilmesi için bir üç boyutlu iz tasarlayıp, o izin takibini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada geri besleme girişi olarak sisteme işlenen görüntü verilmiştir (Nageotte vd., 2006).

Havada üç boyutlu iz takibi yapan mekatronik sistemlerin başında uçaklar ve helikopterler gelir. Fakat bu vasıtaların üzerinde çalışma ve üretim tarihi düşünüldüğünde

popülerliğini son yıllarda yitirdiği gözlemlenmiştir. Bunların yerine son yıllarda daha göz önünde olan dörtlönerler denilen cihazlar üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Dörtlönerler uçuş terminolojisinde Quadroter olarak yer alırlar. 1920-1930’lu yıllara dayanan tarihçesindeki ilk örnekler zayıf performanslarından dolayı beğenilmemiş ve birçok Quadroter projesi o günün teknolojik şartlarının yetersizliğinden dolayı raflara kaldırılmıştır. İlerleyen zamanlarda gelişen teknoloji ile eskiden çizilmiş bulunan mekanik tasarımların birleşmesi sonucu günümüzde dörtlönerler sadece uçabilir hale gelmekle kalmamış bunun yanı sıra insansızlaştırılarak daha modernize hale getirilmiştir. Şekil 1.2’de dörtlöner örneği verilmiştir.



Şekil 1. 2 Modern dörtlöner örneği (URL-1)

Dörtlönerler serbest dört rotora bağlanmış pervane yardımı ile irtifa kazanan cihazlardır. Bu tasarımın kazandırdığı en büyük avantaj bulunduğu yerden yükselebilmek özelliği iken en büyük dezavantajı ise hızının diğer hava araçlarına kıyasla daha düşük olmasıdır. Bu dört rotor, sistemin irtifa kazanabilmesinin yanı sıra yönelimini ve yönetimini sağlarlar.

Yapılan literatür araştırması sonucunda son on yılda bu cihazlarla ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde Djikstra algoritması ile bulunan minimum maliyetli bir rotanın MPC ile takibi gerçekleştirilmiştir (Singhal ve Sujit, 2015). Bir diğer çalışmada çalışılacak sistem olan dörtlönerin matematiksel modeli elde edildikten sonra geri beslemeli kontrolör tasarlanmıştır. Bu geri besleme, odyometri, görsel algoritmalar ve kalman filtresi yaklaşımı olarak üç farklı yöntemle yapılmıştır. Tasarlanan kontrolör ve geri besleme yöntemleri sayesinde sistem istenilen üç boyutlu iz takibini gerçekleştirmiştir (Santana vd., 2014). Bir diğer çalışmada ise dörtlöner filosunun da her bir dörtlöner Lyapunov kararlılık analizinden yararlanılarak tasarlanan Oransal İntegral Türev Kontrol

(Proportional Integrative Derivative Control - PID) ve Oransal Kontrol (Proportional Control - P) ile kontrol edilmiştir. Bu kontrolörler ile sistem istenilen davranış olan üç boyutlu iz takibini gerçekleştirmiştir (Cichella vd., 2012). Son olarak çekilen görüntüler ile yörüngesini üreten ve bu üretilen yörüngeyi minimum hata ile takip eden bir dörtlü döner sistem gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen dörtlü döner sistem Oransal Türev Kontrol (Proportional Derivative Control - PD) ile kontrol edilmiştir (Mellinger ve Kumar, 2011). Bu çalışmalara benzer olarak düşük maliyetli bir oyuncak helikoptere tasarlanan kalkış hareketinin yaptırılması da örnek verilebilir (Chingozha vd., 2013).

Havada üç boyutlu iz takibi yapan bir başka sistem ise sabit mıknatıslı adım motorunun sargıları üzerine bırakılan metal küttedir. Bu sistemde PD kontrolör tasarlanmış ve tasarlanan bu kontrolör sayesinde kütleyle üç boyutlu iz takibi özeliği kazandırılmıştır (Z. Li ve Wang, 2007). Bir diğçer çalışmada ise aynı sistem tasarlanmış ve diğçer çalışmadan farklı olarak yapay sinir ağı ile sistem kontrol edilerek üç boyutlu iz takibi yapılmıştır (Zheng Li, 2009). Diğçer bir sistemde bakterilerden ilham alınarak tasarlanan doğrusal olmayan sistem belirli varsayımlarla doğrusallaştırılmış ve P kontrolör ile iz takibi yapması sağlanmışır (Xu vd., 2015).

Alessandretti vd. yaptıkları çalışmada daha önce mobil robotlar üzerine MPC kullanılarak iki boyutta yapılan iz takibi işlemini, hava taşıtı ile üç boyutlu iz takibi olarak gerçekleştirmiştir (Alessandretti vd., 2013).

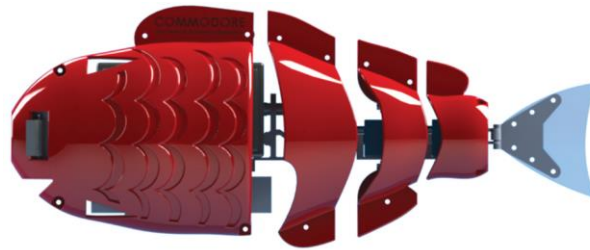
Su altı mühendislik sistemlerinin büyük bir kısmını kaplayan denizaltılar, ister su yüzeyinde isterse su altında bağımsız olarak hareket edebilen ve askeri olarak stratejik bir öneme sahip olan sistemlerdir. Bu sistemler su altında hidrodinamik etkilerden dolayı su yüzeyine kıyasla daha kısıtlı hareket yeteneğine sahiptirler. Bu hareket kısıtlamasına rağmen enerji tasarrufu sağlamak amacıyla eksik tahrikli denizaltına benzeyen bir sistem tasarlanmışır (Y. Li vd., 2015). Tasarlanan denizaltına benzer modele uygun kontrolör olan P kontrol parametreleri Lyapunov kararlılık analizi ile elde edilmiştir. Kontrolör sayesinde sistem üç boyutlu iz takibini gerçekleştirmiştir.

Su altı sistemlerinin bir diğçeri olan torpidoların icadında helikopterlerden ilham alındığı düşünülür. Bu sistemler 1200'lü yıllarda çalışılmaya başlanmış ve günümüze kadar gelmiştir. Yapılan bir detaylı araştırmada bu sistemler incelenmiştir (Lee vd., 2008).

Bu çalışmada bahsi geçen sistem modellenerek benzetimi gerçekleştirilmiş ve sisteme gözlemci tasarımı yapılarak sistemin üç boyutlu iz takibi performansına göre bu iki sonuç karşılaştırılmıştır. Diğer bir çalışmada ise eksik tahrikli bir torpido modellenerek P kontrolör ile üç boyutlu iz takibi işlemi gerçekleştirilmiştir (Bechlioulis ve Kyriakopoulos, 2013).

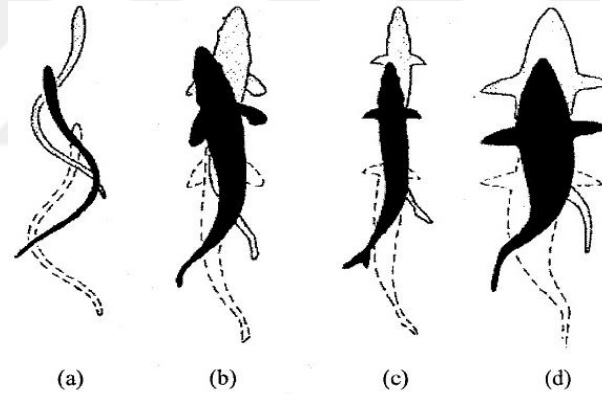
Herhangi bir cerrahi işlemde kullanılan iğnelere cerrahi iğneler denir. Bu iğnelerin hepsi paslanmaz çelikten üretilmiş olup içerlerinde %12 krom metali ihtiva ederler. Yapılan araştırmada bu iğnelerin yumuşak doku içerisindeki hareketi su altı cihazlara benzetilmiş ve modellenmiştir. Doğrusal olmayan dinamik modeli elde edilen iğne üç boyutlu iz takibi işlemini gerçekleştirmiştir (Secoli, 2013). Bu çalışmaya benzer diğer bir çalışmada damar içerisine yerleştirilen mikro robotun Newton yasaları kullanılarak matematiksel modeli elde edilmiş ve MPC uygulanarak üç boyutlu iz takibi işlemi yapılmıştır (Belharet vd., 2010).

Robot balıklar üç boyutlu hareket eden su altı sistemlerindendir. Bu sistemler doğada bulunan gerçek balıklardan ilham alarak onun hareketlerini taklit etmeye çalıştıklarından dolayı Biyomimetik Biliminin bir kısmını oluştururlar. Biyomimetik, doğadaki organizmalardan esinlenerek bu organizmaların davranışlarına benzer davranışlar sergileyen sistemlerin oluşturabilmesi için gerekli olan incelemelerin, benzetim ve üretim aşamalarından her hangi birini veya bir kaçını yapan ve insanların problemlerini çözmeyi amaçlayan bilim dalıdır. Doğadan ilham aldığından dolayı çok geniş bir yelpazede çalışma alanı vardır ve balıklar da bu çalışma alanlarından biridir (Tan vd., 2005; Yu vd., 2004; Yu vd., 2003). Şekil 1.3’de robot balık örneği verilmiştir.



Şekil 1. 3 Robot balık örneği (URL-2)

Balıkların hızlı, anında manevra yapabilen ve enerji verimini üst düzeyde kullanan üstün yüzüş kabiliyetleri olduğundan dolayı bu canlılar günümüze kadar incelenmiş ve üretilmeye çalışılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucu balıkların yüzüş hareketlerine göre iki farklı yüzüş şekli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu yüzüş şekillerinden ilki, orta ve/veya çift yüzgeçlerinin hareketi ( Median and/or Paired Fin - MPF ) ile tahrik olanlardır ve diğeri ise vücutlarının ve/veya kuyruklarının kıvrılması ( Body and/or Caudal Fin - BCF ) ile tahrik olanlardır. İlk yüzüş şekli olan MPF’de dönüş kabiliyeti gelişmiş iken hız kabiliyeti kısıtlıdır, ikinci yüzüş şekli olan BCF’de balık daha hızlı hareket edebilirken dönüş kabiliyeti daha kısıtlıdır. MPF yüzüş şeklinde yüzgeç ve kuyruk hareketinden oluşan dalgalanmalara göre; Amiiiform, Gymnotiform, Balistiform, Rajiform, Diodontiform, Tetraodontiform ve Labriform olarak sınıflandırılırlar. BCF yüzüş şeklinde yüzgeç ve kuyruk hareketinden oluşan dalgalanmalara göre; Anguilliform, Subcarangiform, Carangiform ve Thunniform olarak sınıflandırılırlar (Wang, 2009). Bu yüzüş biçimleri Şekil 1.4’te verilmiştir.

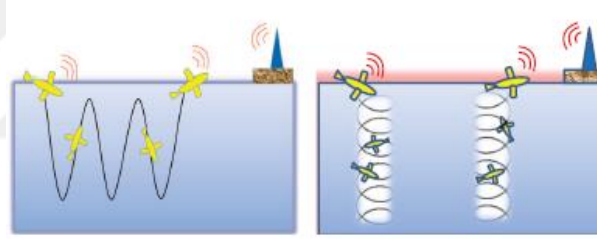


Şekil 1. 4 BCF yüzme hareketlerinin sınıflandırılması:

(a) Anguilliform (b) Subcarangiform (c) Carangiform (d) Thunniform

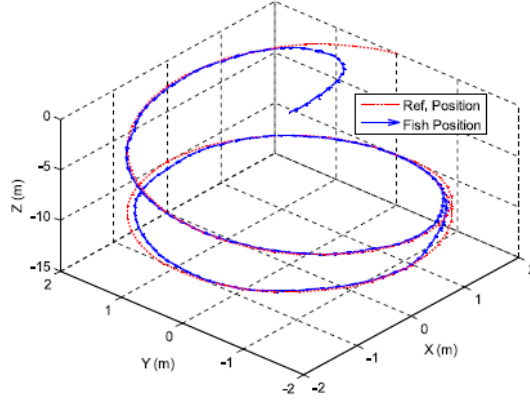
Yapılan araştırmalarda tasarlanan robot balıkların birçoğu Carangiform türündendir (Zhang vd., 2016; Lee vd., 2008; Zhou vd., 2008; Yu vd., 2011). 2009 yılında karada ve denizde yaşayabilen canlılardan esinlenerek geliştirilen çok eklemli bir robot balığın Lagrange yöntemi ile iki boyutlu dinamik modeli türetilmiştir ve Merkezi Örüntü Üretici (Central Pattern Generator – CPG) yöntemi ile hareket planlamasının benzetimi yapılarak kuvvet, moment, hız ve konum analizleri gerçekleştirilmiştir (Ding vd., 2009). Benzer yöntem kullanılarak yapılan başka bir çalışmada çok eklemli bir robot balığın Lagrange yöntemi ile üç boyutlu dinamik modeli oluşturulmuş ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu

robot balık prototipi ile benzetim çalışmaları karşılaştırılarak dinamik modelin doğruluğu test edilmiştir. Ayrıca, robot balık CPG yöntemi ile üretilen momentler ile tahrik edilmiştir (Yu vd., 2011). Bir diğer çalışmada robot balığın basitleştirilmiş dinamik modeli elde edilerek, benzetim ortamında robot balığın hızı, frekansı ve enine hareket sinyali ait parametrelerin değişimi incelenmiştir (Jinghu ve Cao, 2009). Başka bir çalışmada çok eklemlili bir robot balığın dinamik modeli türetilerek doğrusal olmayan kontrolü benzetim ortamında sınanmıştır (Zhang ve Chen, 2009). 2008 yılında yapılan bir çalışmada ise üç serbestlik dereceli, tek kuyruk tahrikli bir balık modeli Lagrange denklemleri kullanılarak üretilmiştir (Zhou vd., 2008). Yine aynı yılda dört serbestlik dereceli bir balık modeli üzerine Lagrange yöntemi kullanılarak dinamik modeli elde edilmiştir. Elde edilen bu denkleme yılan balığının geri yüzüş tekniği enine hareket sinyali denklemi elde edilerek uygulaması yapılmıştır (Zhou vd., 2008). Diğer bir çalışmada daha az enerji sarfıyatı için süzülen robotik balık tasarlanmış ve bu balığın yörünge iz takibi  $H_\infty$  ile kontrol edilmiştir (Zhang vd., 2016; Zhang vd. 2016). Sistemin görselleştirilmiş hali Şekil 1.5’te verilmiştir.



Şekil 1. 5 Tasarlanan ve benzetimi yapılan robot balık

Robot balık sistemlerinde göze çarpan araştırmada robot balığı modelleyip ve iz takibi yapılmıştır. Sistemin modeli Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Kontrol tarafı ise üç parçada incelenmiştir ve bu bölümler; skaler hız kontrolü, Oransal İntegral Kontrol (Proportional Integrative Control - PI) ile kontrol edilmiştir, oryantasyon (sapma açısı) kontrolü ve durağanlığının (yunuslama ve yuvarlanma açıları) kontrolü, Doğrusal Quadratik Regülatör ( Linear Quadratic Regulator – LQR ) ile sağlanmıştır. (Suebsaiprom ve Lin, 2015). Bu çalışmanın sonuçlarından biri Şekil 1.6’da verilmiştir.



Şekil 1. 6 Yapılan üç boyutlu iz takibi sonucu

Bu tez çalışmasında, literatürde yapılan araştırmalar ışığında, üstün hareket kabiliyetinden dolayı robot balığın ve endüstriyel alanda çok sık kullanıldığı için de robot kolun modelleri oluşturularak farklı kontrol algoritmaları ile üç boyutlu iz takibi benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir.

### 1.1. Tezin Amacı ve Yöntemi

Bu yüksek lisans çalışmasında, bazı mekatronik sistemlerde üç boyutlu iz takibi için farklı kontrol algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle konu ile ilgili detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Mekatronik sistemlerden biri olan robot balığın ve robot kolun modeli elde edilmiştir. Bu modeller kullanılarak, farklı kontrol algoritmalarıyla üç boyutlu iz takibi yapılmıştır.

### 1.2. Tezin İçeriği

Bu tez çalışması toplamda yedi bölüm olarak düzenlenmiştir. Tezin amaç ve yöntemine uygun olarak;

**Bölüm 2’de** robot balığın matematiksel modeli elde edilmiştir.

**Bölüm 3’de** robot kol modellenmiştir.

**Bölüm 4’de** mekatronik sistemlerde üç boyutlu iz takibi tanıtılmıştır.

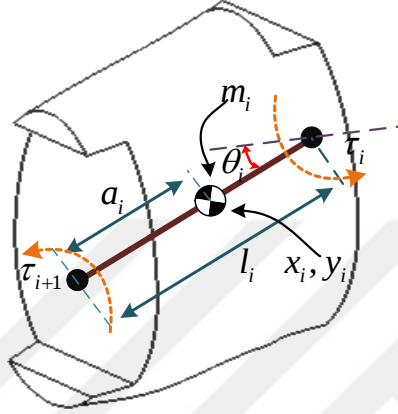
**Bölüm 5’te** robot balığın değişik algoritmalar ile kontrolü yapılmıştır.

**Bölüm 6’da** robot kolun kontrolü yapılmıştır.

**Bölüm 7’de** sonuçlar verilmiş ve değerlendirilmiştir.



Burada,  $i$  eklem numarası olmak üzere;  $m_i$  ve  $l_i$  eklem ağırlığını ve uzunluğunu ve  $x_i$  ve  $y_i$  eklemlerin ağırlık merkezlerinin düzlem üzerindeki konumlarını simgelemektedir.  $\theta_1$  ana gövdenin açısını,  $\theta_2, \theta_3, \theta_4$  aktif olan eklem açılarını ve  $\theta_5$  pasif olan kuyruk eklem açısını simgeler. Son dört eklem açısı bir önceki eklem açısı referans alınarak bulunmuştur. Eklemler Şekil 2.2’de daha yakından incelenmiştir.



Şekil 2.2 Eklem analizi

Burada,  $a_i$  eklem uzunluğunun yarısını ve  $\tau_i$  eklem uygulanan moment değerini simgelemektedir. Eklemler homojen olarak kabul edildiğinden dolayı ağırlık merkezi eklemlerin orta noktasında bulunmaktadır. Eklemlerin ağırlık merkezlerinin bulunabilmesi için Denklem (2.1)’de verilen dönüşüm matrisi kullanılmıştır.

$${}^0T_N = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} \cos(t_i) & -\sin(t_i)\cos(r_{i,i+1}) & \sin(t_i)\sin(r_{i,i+1}) & A_{i,i+1}\cos(t_i) \\ \sin(t_i) & \cos(t_i)\cos(r_{i,i+1}) & -\cos(t_i)\sin(r_{i,i+1}) & A_{i,i+1}\sin(t_i) \\ 0 & \sin(r_{i,i+1}) & \cos(r_{i,i+1}) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Bu denklemde,  $r_{i,i+1}$  ve  $t_i$  eksenler arası dönüşüm işlemi yaparken sırası ile x ve z eksenlerindeki dönmeleri simgeler.  $A_{i,i+1}$  ile  $d_i$  eksenler arası dönüşüm işlemi yaparken sırası ile x ve z eksenlerindeki ötelemeleri ve  $N$  toplam eklem sayısını simgeler. Bu denklemin en sağ kolonundaki yukarıdan aşağıya doğru ilk üç parametre o eklem ağırlık merkezinin sırası ile x, y ve z eksenindeki konumlarını üretmektedir. Bu konumlar Denklem (2.2) ile Denklem (2.11) arasında verilmiştir.

$$x_1 = a_1 \cos(\theta_1) \quad (2.2)$$

$$y_1 = a_1 \sin(\theta_1) \quad (2.3)$$

$$x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.4)$$

$$y_2 = l_1 \sin(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.5)$$

$$x_3 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.6)$$

$$y_3 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.7)$$

$$x_4 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (2.8)$$

$$y_4 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (2.9)$$

$$x_5 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_5 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \quad (2.10)$$

$$y_5 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_5 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \quad (2.11)$$

Sistemin kinetik enerjisinin bulunabilmesi için eklemlerin ağırlık merkezlerinin konumların türevlerini alarak hızları elde edilmiştir. Sonrasında bu hızlar Denklem (2.12)'de yerine konulmuştur.

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i ((\dot{x}_i)^2 + (\dot{y}_i)^2) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} I_i (\dot{\theta}_i)^2 \quad (2.12)$$

Burada,  $I_i$  eklematalet momentidir. Kinetik enerji ifadesi sistemin potansiyel enerjisi olmadığından dolayı Lagrange fonksiyonuna eşittir. Sistemin potansiyel enerji ihtiva etmemesinin nedeni eklemlerin gövde eksenine göre yerleştirilmesinden dolayıdır. Bu durumdan daha ayrıntılı şekilde bölüm 2.4'te bahsedilecektir. Bulunan Lagrange Fonksiyonu Denklem (2.13)'te yerine konulduğunda robot balığın ileri yüzüş modeli olan Denklem (2.14) elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} - \sum_{i=1}^{\gamma} \lambda_i \left( \frac{\partial f_i}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0 \quad (2.13)$$

Burada,  $L$  Lagrange fonksiyonu olup sistemin net enerjisi olan kinetik enerjisine eşittir.  $q$  ve  $k$  sistemin parametresini ve parametrelerinin indekslerini simgeler.  $\lambda, \gamma$  ve  $f$  sırası ile

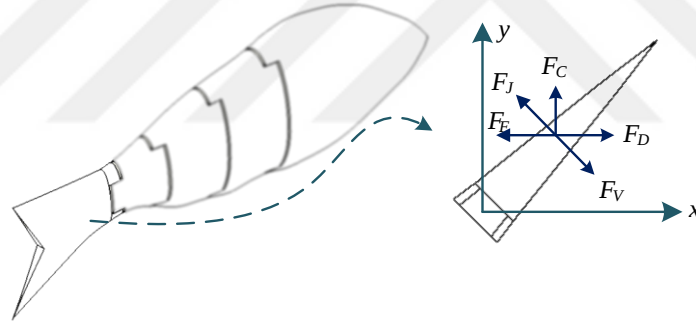
Lagrange çarpanı, sistemin etkisinde oluğu toplam sınırlandırma sayısını ve sınırlandırmaları gösterir.

$$M(\theta_i)\ddot{\theta} + C(\theta_i, \dot{\theta}_i)\dot{\theta}_i + B(\dot{\theta}_i) + K(\theta_i) = \tau_i \quad (2.14)$$

Burada,  $\theta_i = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T$ ,  $M(\theta_i)$  atalet momenti matrisi,  $C(\theta_i, \dot{\theta}_i)$  coriolis etkisi matrisi,  $B(\dot{\theta}_i)$  sönüm matrisi,  $K(\theta_i)$  yay sabiti matrisi ve  $\tau_i$  uygulanan momentleri içeren matristir. Bölüm 2. 2’de  $\tau_i$  matrisi verilmiştir.

## 2.2.Kuyruğun Oluşturacağı Hidrodinamik Kuvvetlerin Analizi

Bu kısımda ileri yüzüş modelinin girişi olacak olan momentlerin hesaplanabilmesi için kuyruğun üzerindeki kuvvetler incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda Şekil 2.3’de görüldüğü gibi beş adet kuvvetin kuyruk yüzgeci tarafından üretilmiş olduğu görülmüştür.



Şekil 2.3 Kuyruk yüzgecinin oluşturduğu kuvvetler

Bu kuvvetlerden  $F_V$  ve  $F_J$  kaldırma ve ivmelenmeyi sağlayan kuvvetler olup x ve y eksenlerindeki bileşkeleri  $F_F$  ve  $F_C$ ’yi oluştururlar. Temel kuvvetler olan  $F_V$  ve  $F_J$  Denklem (2.15) ve (2.16)’da sırası ile verilmiştir.

$$F_V = \pi\rho LC^2\dot{U}\sin(a) + \pi\rho LC^2U\dot{a}\cos(a) \quad (2.15)$$

$$F_J = 2\pi\rho LC U^2 \sin(a)\cos(a) \quad (2.16)$$

Bu denklemlerde,  $\rho, L, C, U$  ve  $a$  sırası ile akışkanın yoğunluğu, kuyruk yüzgecinin uzunluğunu, kuyruk yüzgecinin kalınlığının yarısı, akışkanın akış hızını ve atak açısını simgelemesi için kullanılmıştır. Bu temel iki kuvvetin x eksenine iz düşümü itme

kuvveti olan  $F_F$  kuvvetini oluşturur ve Denklem (2.17)'de verilmiştir. Ayrıca yanal kuvvet olan bu temel iki kuvvetin y eksenine üzerine iz düşümü  $F_C$  kuvvetini oluşturur ve Denklem (2.18)'de verilmiştir

$$F_F = (F_J - F_V) \sin\left(\sum_{i=1}^N \theta_i\right) \quad (2.17)$$

$$F_C = (F_V - F_J) \cos\left(\sum_{i=1}^N \theta_i\right) \quad (2.18)$$

$F_F$  kuvveti sistemi x eksenine boyunca tahrik eden kuvvettir. Bu kuvvet sayesinde sistem eksen boyunca ivme kazanır ve hareket eder.  $F_C$  kuvveti ise sisteme z ekseninde dönme etkisi yapar fakat genelde pozitif ve negatif alternansının toplamı sıfıra yakın olduğundan dolayı hesaba katılmaz. Diğer bir kuvvet sürüklenme kuvveti olup Denklem (2.19)'da verilmiştir.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \dot{x}^2 S_u \quad (2.19)$$

Burada,  $\dot{x}$  sistemin hızı,  $S_u$  ıslak yüzey ve  $C_D$  şekil katsayısıdır. Bu kısım bölüm 2. 4'te daha ayrıntılı anlatılacaktır.

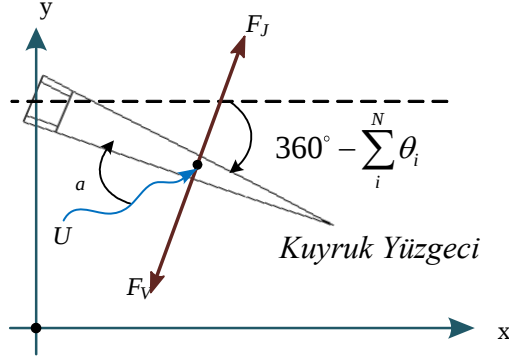
Kuvvetlerin oluşabilmesi için akış hızının hesaplanması gerekir. Akış hızı Denklem (2.20)'de verilmiştir.

$$U = \sqrt{U_m^2 + u_f^2} \quad (2.20)$$

Bu denklemde,  $U_m$  akış sabiti ve  $u_f$  y eksenine göre kuyruk yüzgeci merkezinin hızıdır ve Denklem (2.21)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} u_f = & l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ & + l_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ & + l_5 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4 + \dot{\theta}_5) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Akış hızının hesaplanması yanı sıra atak açısının hesaplanması gerekir. Atak açısını, Vo ve ekibi Şekil 2.4'teki gibi görselleştirmişlerdir (Vo vd., 2012).



Şekil 2.4 Atak açısının oluşumu

Gerekli olan kuvvetler bulunduğundan sonra ileri yüzüş modelinin girişi olan moment matrisinin  $\tau_i = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5]^T$  olduğunu varsayarsak, bu matrisin elemanları Denklem (2.22)-(2.26) ile verilmiştir.

$$\tau_1 = F_C l_1 \cos(\theta_1) - F_F l_1 \sin(\theta_1) \quad (2.22)$$

$$\tau_2 = F_C l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_F l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + T_{u1} \quad (2.23)$$

$$\tau_3 = F_C a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - F_F a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + T_{u2} \quad (2.24)$$

$$\tau_4 = F_C l_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - F_F l_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + T_{u3} \quad (2.25)$$

$$\tau_5 = F_C a_5 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) - F_F a_5 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \quad (2.26)$$

Bu denklemlerde,  $T_{u1}$ ,  $T_{u2}$  ve  $T_{u3}$  sırası aktif eklemler olan ikinci, üçüncü ve dördüncü motorlara uygulanan moment değerleridir. Bu denklemler benzetimde Denklem (2.27), Denklem (2.28) ve Denklem (2.29)'da verilmiştir.

$$T_{u1} = A \sin(2\pi f t \pm \Delta_1) \quad (2.27)$$

$$T_{u2} = B \sin(2\pi f t \pm \Delta_2) \quad (2.28)$$

$$T_{u3} = C \sin(2\pi f t \pm \Delta_3) \quad (2.29)$$

Bu denklemlerde,  $A, B$  ve  $C$  motorların uyguladığı moment değerlerinin genliğini,  $f$  uygulanan moment değerinin frekansını ve  $\Delta_1, \Delta_2$  ve  $\Delta_3$  uygulanan moment sinyallerinin faz farkı değerlerini simgeler.



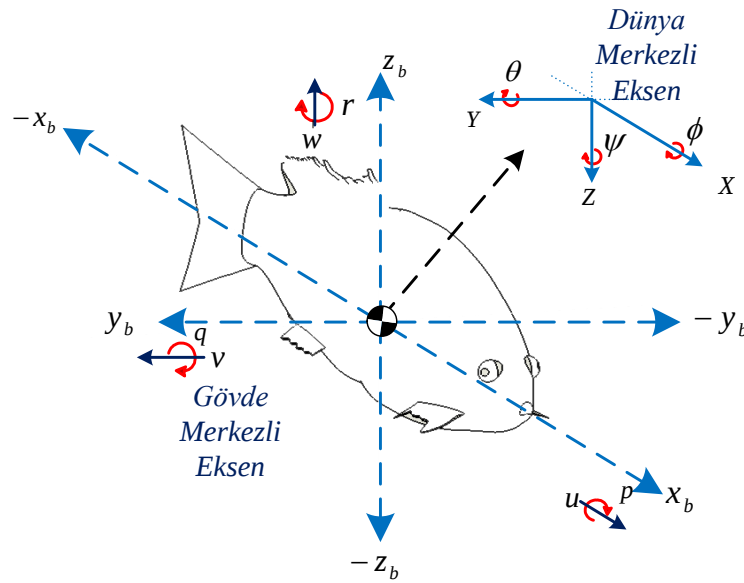
$$\tau_x = g((l_x \sin(\phi) \sin(\theta) - h_x \sin(\phi) \cos(\theta))m_x + (l_y \cos(\phi) - h_y \sin(\phi) \cos(\theta))m_y) \quad (2.30)$$

$$\tau_y = g((l_x \cos(\theta) - h_x \sin(\theta))m_x + (h_y \sin(\theta))m_y) \quad (2.31)$$

Bu denklemlerde,  $\phi$  dalma açısını,  $\theta$  dönme açısını ve  $g$  yer çekimi ivmesini simgeler.  $\tau_x$  ve  $\tau_y$  sırası ile x ve y eksenlerindeki moment ifadelerinin denklemlerdir. Bu moment ifadeleri ayrıntılı incelenecek olursa doğrusal olmadığı görülmektedir. Bu moment ifadelerinde bulunan  $l_x$  veya  $l_y$  değerlerinden biri sabit tutulup diğeri değiştirilirse, bu kütlelerden  $m_x$  dalma hareketi ve  $m_y$  dönme hareketi için gerekli momenti sağladığı görülür.

#### 2.4.Hareket Modelinin Su İçerisinde Altı Serbestlik Dereceli Hale Getirilmesi

Bir mobil sistemin altı serbestlik dereceli (SD) konum ve hız analizinin doğru şekilde yapılabilmesi için eksen takımlarının doğru olarak saptanması ve bu eksenler arası dönüşümün doğru olarak yapılması gerekir. Modellenen sistemde iki adet eksen takımı bulunmaktadır. Bu eksen takımlarından birincisi ağırlık merkezini orijin olarak kabul eden gövde eksen takımıdır. Eksen takımlarından ikincisi dünya merkezinin Kuzey – Doğu – Aşağı (North – East – Down, NED) yönlerini referans alan eksen takımıdır. Bu eksen takımlarından gövde eksen takımı  $x_b, y_b$  ve  $z_b$  ile dünya eksen takımı  $X, Y$  ve  $Z$  sembolleri ile Şekil 2.6’da görselleştirilmiştir.



Şekil 2.6 Eksen takımları

Bu eksen takımındaki hız ve konumları inceleyecek olursak;  $v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$  büyüklükleri gövde eksenine göre hızları ve sırası ile yuvarlanma, yunuslama ve sapma açılarını  $(\phi, \theta, \psi)$  içeren  $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$  vektörü dünya merkezli eksene göre konumları simgeler. Bu eksen takımları arasındaki dinamik ilişki Denklem (2.32)'de verilmiştir.

$$\dot{\eta} = J(\Theta)v \quad (2.32)$$

Burada,  $J$  dönüşümün yapıldığı Jacobian matrisini simgeler ve Denklem (2.33)'de verilmiştir.  $\Theta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$  dünya merkezli eksene göre pozisyonunu simgeler.

$$J(\Theta) = \begin{bmatrix} R(\Theta) & 0 \\ 0 & T_{\Theta}(\Theta) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Burada,  $R$  ve  $T_{\Theta}$  sırası ile dönme ve öteleme matrisidir ve Denklem (2.34) ve (2.35)'de verilmiştir.

$$R(\Theta) = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & -s(\psi)c(\phi) + c(\psi)s(\theta)s(\phi) & s(\psi)s(\phi) + c(\psi)c(\phi)s(\theta) \\ s(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\phi) + s(\phi)s(\psi)s(\theta) & -c(\psi)s(\phi) + s(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$T_{\Theta}(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & s(\phi)t(\theta) & c(\phi)t(\theta) \\ 0 & c(\phi) & -s(\phi) \\ 0 & s(\phi)/c(\theta) & c(\phi)/c(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Bu denklemlerde  $s()$ ,  $c()$  ve  $t()$  sırası ile  $\sin()$ ,  $\cos()$  ve  $\tan()$  fonksiyonlarını simgelerler.

Genel olarak bir akışkanın içinde hareket eden cismin matematiksel modeli Denklem (2.36)'da verilmiştir. Bu denklem temel olarak cismin şekline bağlı ve akışkanın özelliğine bağlı olan faktörler olmak üzere iki farklı etkenin birleşmesinden oluşmuştur.

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau_f \quad (2.36)$$

Bu denklemde,  $M$ , cismin şekline bağlı kütle ve atalet momenti matrisi olan  $M_{RB}$  ile akışkanın kütle matrisi olan  $M_A$ 'nın toplamına eşittir. Bu matrisler Denklem (2.37) ile (2.38)'de verilmiştir.  $C$ , cismin hareketine bağlı Coriolis matrisi olan  $C_{RB}$  ile akışkanın hidrodinamik etkisi olan  $C_A$ 'nın toplamına eşittir. Bu matrisler Denklem (2.41) ile

(2.42)'de verilmiştir.  $D$ , cismin hareketine bağlı doğrusal olamayan sürtünme matrisi olan  $D_{NL}$  ile doğrusal sürtünme olan etkisi olan  $D_L$  'nın toplamına eşittir. Bu matrisler Denklem (2.43) ile (2.44)'de verilmiştir.  $g$  akışkan içerisinde bulunan cisme etki eden statik etki matrisidir ve Denklem (2.45)'de verilmiştir.  $\tau_f$  sistemi tahrik edecek olan kuvvet ve momentleri içeren matris olup Denklem (2.47)'de verilmiştir (Fossen, 1994; Fossen, 2011).

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_G) \\ mS_i(r_G) & I_0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}_x} & X_{\dot{v}_y} & X_{\dot{w}_z} & X_{\dot{p}_x} & X_{\dot{q}_y} & X_{\dot{r}_z} \\ Y_{\dot{u}_x} & Y_{\dot{v}_y} & Y_{\dot{w}_z} & Y_{\dot{p}_x} & Y_{\dot{q}_y} & Y_{\dot{r}_z} \\ Z_{\dot{u}_x} & Z_{\dot{v}_y} & Z_{\dot{w}_z} & Z_{\dot{p}_x} & Z_{\dot{q}_y} & Z_{\dot{r}_z} \\ K_{\dot{u}_x} & K_{\dot{v}_y} & K_{\dot{w}_z} & K_{\dot{p}_x} & K_{\dot{q}_y} & K_{\dot{r}_z} \\ M_{\dot{u}_x} & M_{\dot{v}_y} & M_{\dot{w}_z} & M_{\dot{p}_x} & M_{\dot{q}_y} & M_{\dot{r}_z} \\ N_{\dot{u}_x} & N_{\dot{v}_y} & N_{\dot{w}_z} & N_{\dot{p}_x} & N_{\dot{q}_y} & N_{\dot{r}_z} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Burada,  $m$  cismin toplam kütleini,  $I_0$  cismin ataletini ve  $r_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$  ağırlık merkezini simgeler.  $S_i()$  Denklem (2.39)'da verilmiş ve trigonometrik işlem yükünden kurtulmamızı sağlayan asimetrik matrisi simgeler.  $M_A$  katsayı matrisi olup örnek bir değerin hesaplanması Denklem (2.40)'da verilmiştir.

$$S_i(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ \lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Burada,  $\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]$  değerlerini içeren simetrik olmayan matristir.

$$X_{\dot{u}_x} \square \frac{\partial X}{\partial u_x} \quad (2.40)$$

Coriolis matrisleri;

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & -S(M_{21}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

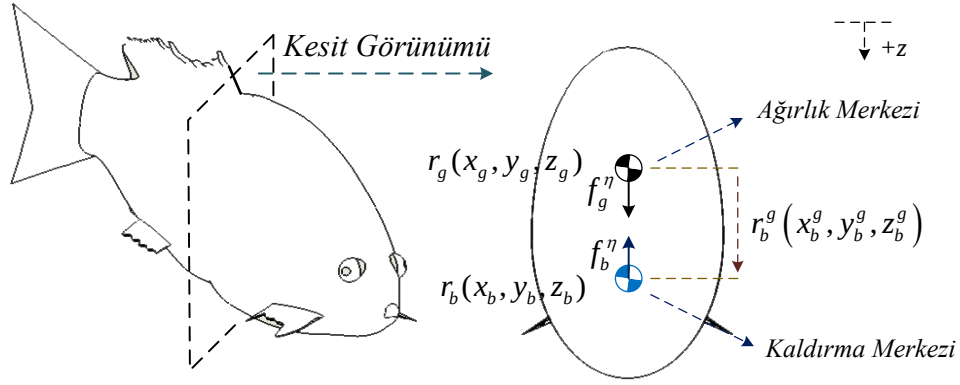
$$C_E = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) \\ -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) & -S(A_{21}v_1 + A_{22}v_2) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Burada,  $v_1 = [u \ v \ w]$  gövde eksenine göre doğrusal hızları ve  $v_2 = [p \ q \ r]$  gövde eksenine göre açısal hızları simgeler. Sürtünme matrisleri;

$$D_L = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & -Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & -N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$D_{NL} = \begin{bmatrix} X_{|u|u} |u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|v} |v| & 0 & 0 & 0 & -Y_{|v|r} |v| \\ 0 & 0 & Z_{|w|w} |w| & 0 & Y_{|w|q} |w| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{|p|p} |p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{|q|w} |q| & 0 & M_{|q|q} |q| & 0 \\ 0 & -N_{|r|v} |r| & 0 & 0 & 0 & N_{|r|r} |r| \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Burada,  $D_L$  ve  $D_{NL}$  diyagonal matrislerdir. Doğrusal sürtünme matrisi cismin şekline ve akışkana bağlıdır. Doğrusal olmayan sürtünme cismin eksenlerindeki hızına bağlıdır. Bu sürtünme kuvveti formülü Denklem (2.19)'da verilmiştir. Bahsi geçen denklemde o eksene göre sistem hızı ve o eksene göre ıslak alan belirlenerek hesaplandıktan sonra yerlerine konulur.  $g(\eta)$  sistemin maruz kaldığı hidrostatik etkiyi gösterir. Balıklarda bu etki kaldırma ile ağırlık merkezi arasında fark olduğundan dolayı meydana gelir. Bu durum Şekil 2.7'de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.7 Ağırlık ve kaldırma merkezi

Burada,  $r_b^g = [x_b^g \ y_b^g \ z_b^g]$  değerlerini içeren matris olup eksenlere göre farklarını simgeler.  $f_b^\eta = -[0 \ 0 \ B]$  ve  $f_g^\eta = [0 \ 0 \ W]$  sırası ile dünya eksenine göre kaldırma ile yer çekimi kuvvetini simgelerler. Bu matrislerde  $B = \rho g \Delta$  ve  $W = mg$  olarak hesaplanır.  $\rho$  ve  $\Delta$  cismin öz kütlesini ve hacmini simgeler. Sistem üzerine etki eden net hidrostatik etki Denklem (2. 45)'de verilmiştir.

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} f_g^c + f_b^c \\ r_b^g x f_g^c + r_b^g x f_b^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (W - B)s(\theta) \\ -(W - B)c(\theta)s(\phi) \\ -(W - B)c(\theta)c(\phi) \\ -(y_g W - y_b B)c(\theta)c(\phi) + (z_g W - z_b B)c(\theta)s(\phi) \\ -(z_g W - z_b B)s(\theta) + (x_g W - x_b B)c(\theta)c(\phi) \\ -(x_g W - x_b B)c(\theta)s(\phi) - (y_g W - y_b B)s(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Burada,  $f_g^c = R_b^\eta(\Theta)^{-1} f_g^\eta$  ve  $f_b^c = R_b^\eta(\Theta)^{-1} f_b^\eta$  eksen dönüşümlerinden gelen kuvvet vektörleridir.

Sistemi tahrik edecek olan  $\tau_f$  matrisi üç adet kuvvet ve üç adet moment değerinden oluşur. Bu kuvvetler sırası ile x, y ve z eksenlerinde ötelemeyi oluşturacak kuvvetlerdir, momentler ise yine aynı eksenlerde dönme olayını gerçekleştirecek kuvvetlerdir. Bu kuvvetler ve momentler Denklem (2.46)'da verilmiştir.

$$\tau_f = \begin{bmatrix} F_F c(\sum_{i=2}^4 \theta_i) \\ 0 \\ 0 \\ \tau_x \\ \tau_y \\ F_F s(\sum_{i=2}^4 \theta_i)(l_1 + l_2 c(\theta_2) + l_3 c(\theta_2 + \theta_3) + l_4 c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Robot balığın hareketlerini taklit edebilecek dinamik model bu kısımdan bahsedilen denklemlerden yararlanarak elde edilmiştir.

### 3. ROBOT KOLUN MODELİNİN ELDE EDİLMESİ

Robot kollar endüstriyel alanda genellikle üretim işlerinin otomatikleşmesine yarayan, insan gücünden bağımsız çalışan makinalardır. Bu robot kolların üretimi yapılmadan önce sistemin modellenip davranışlarının incelenmesi gerekir. Bunun nedeni ise cihazları tahrik edecek motorların analizinin yanı sıra çalışma uzayının belirlenerek ulaşabileceği noktaların bilinmek istenmesidir. Bu hedef doğrultusunda birden fazla çalışma yapılmıştır (Verma ve Deshpande, 2011; Deshpande ve George, 2012; Chaudhary, 2012).

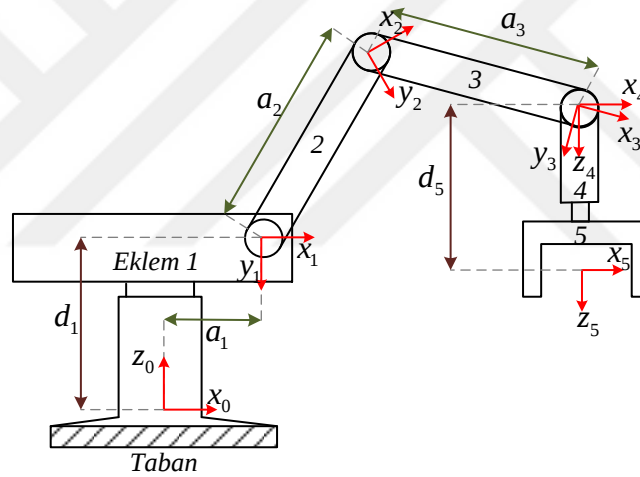
Robot balığının matematiksel modelinin elde edilmesi sırasında kullanılan Lagrange ve Newton gibi yöntemler analitik yöntemler olup robot kolun modelini oluştururken bu yöntemler kullanılmamıştır. Robot kolun modeli *MATLAB* paket programının *SimMechanics* araç kutusu kullanılarak yapılmıştır. *MATLAB* sayısal çözümleme, dinamik sistem benzetimi ve sembolik çözüm yapabilen dördüncü nesil bir programlama dili olup istatistikten mühendisliğe kadar birçok disiplinde kullanılır. *SimMechanics* mekanik sistemlerin tasarlanıp analiz edildiği araç kutusudur. Bu araç kutusu robot kolların tutucu uç pozisyonundan ters sarkaca kadar geniş bir yelpazede model oluşturmak için kullanılmıştır (Fatehi vd., 2012; Tang vd., 2012; Le vd., 2010). *SimMechanics* ilk nesil ve ikinci nesil olmak üzere iki adet alt guruptan oluşmuştur. Bu çalışmada ilk nesil altında bulunan bloklar kullanılmıştır.

İlk nesil grubun içerisinde modeli oluşturmak için kullanılan bloklardan birincisi modelin bulunduğu ortamı ayarlama imkanı sunan Machine Environment bloğudur. Ground bloğu yapılan sistemi dünya koordinat sistemine sabitler. Revolve bloğu eklemler arası sadece dönme hareketini sağlayan bloktur. Bir diğer blok olan Body bloğu eklemleri simgeler ve eklem ağırlık atalet gibi parametreler bu blok içerisinde ayarlanır. Universal bloğu bağladığı eklemler arası iki eksenle dönme hareketini sağlar. Joint Actuator, eklemleri tahrik eden bloktur. Son olarak Joint Sensor, eklemlerin açı, hız ve ivmesinin okunabildiği analiz ve kontrole yarayan bloktur.

Bu çalışmada bölümümüz Robotik Laboratuvarı bünyesinde bulunan SCORBOT-ER V Plus robot kol gelecek yıllarda lisans eğitimi alan dördüncü sınıf öğrencilerinin Robotik dersine yardımcı olabilmesi için modellenmiştir.

Bu robot kol dört eklem ve bir tutucu uçtan oluşmuş toplam ağırlığı 11,5 kg, taşıyabileceği yük kapasitesi 1 kg olan robot koludur. Bu robot kolda toplam 6 adet doğru akım motoru bulunmaktadır. Bu motorların her biri 12V gerilimle çalışan kontrol edilerek servo motor şekline çevrilmiştir. Bu motorların ilk dördü eklemlerde, diğer ikisi tutucu uç kısmındadır. Tutucu uç kısmındaki motor sadece tutacak kısmı kendi eksenini etrafında dönme hareketi kazandırdığından dolayı modellenirken ihmal edilmiştir.

Herhangi bir mekanik sistemin modeli oluşturulmadan önce modeli oluşturulacak sistem daha basit bir gösterimle çizilerek sistem parametreleri belirlenir. Çizilen şekil sayesinde sistem parametreleri daha anlaşılır hale getirilmiş olur. Robot kolun parametrelerinin daha rahat anlaşılabilmesi için Şekil 3.1 çizilmiştir.



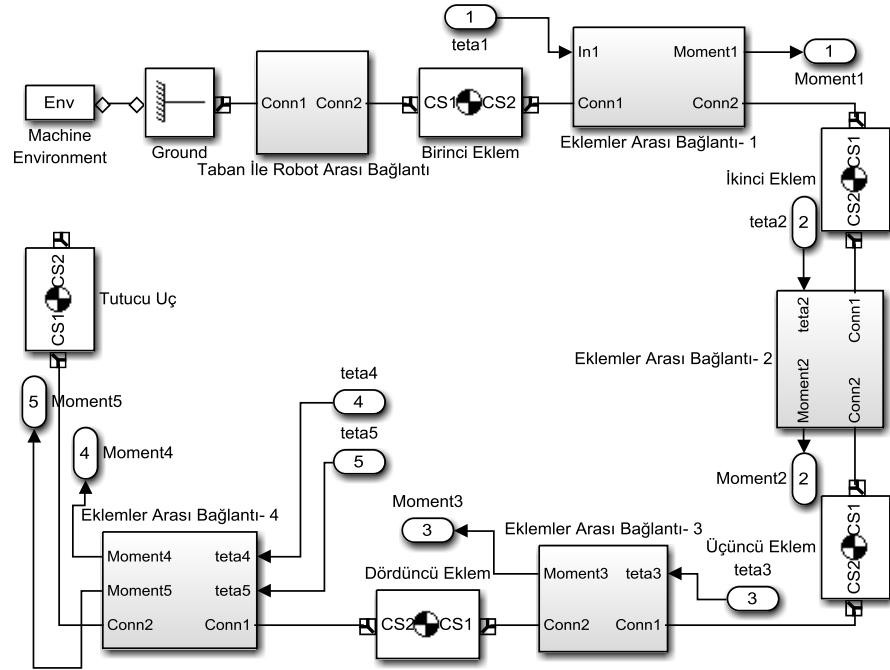
Şekil 3. 1 Robot kolun basitleştirilmiş çizimi

Bu şekilde, her bir eklem üzerine eksen takımları yerleştirilmiştir. Bu eksen takımlarının arasındaki uzaklık x eksenine göre ise  $a_i$  olarak, z eksenine göre ise  $d_i$  olarak adlandırılmıştır. Robot kola ait parametreler Tablo (3.1)'de verilmiştir (Kumar ve Chand, 2015).

Tablo 3. 1 Robot kola ait parametreler

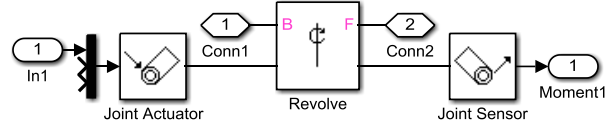
| Eklemler Numarası | $\alpha_i$ (rad) | $a_i$ (mm) | $d_i$ (mm) | Çalışma Aralığı (°) |
|-------------------|------------------|------------|------------|---------------------|
| 1                 | $\pi/2$          | 16         | 364        | -155 ile 155        |
| 2                 | 0                | 220        | 0          | -35 ile 130         |
| 3                 | 0                | 220        | 0          | -130 ile 130        |
| 4                 | $\pi/2$          | 0          | 0          | -130 ile 130        |
| 5                 | 0                | 0          | 145.125    | -570 ile 570        |

Bu tabloda;  $\alpha_i$  ilgili eksen takımının x ekseninde yaptığı açığı verir. Elde edilen bu veriler body bloklarının parametreleri olarak girilmiştir. Akabinde eklemler arası hareketi oluşturacak oynar mekanizmalar eklenerek Şekil 3.2’de bulunan robot kol modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3. 2 Robot kol modeli

Bu modelde eklemler arası bağlantı yazılan blokların açık hali Şekil 3.3’de verilmiştir. Bu bloklar eklemlerin bir birine göre nasıl hareket edeceğini tanımlayan bloklardır.



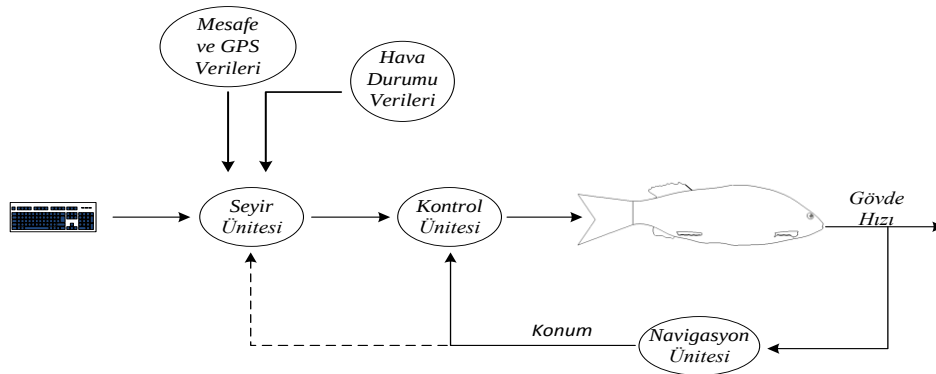
Şekil 3. 3 Eklemler arası bağlantı bloğu

Bu şekilde; eklemleri tahrik eden Joint Actuator, eklemlerde sadece dönme hareketi olduğunu tanımlayan Revolve ve eklemlerini almamızı sağlayan Joint Sensor bloğu bulunmaktadır. Eklemleri motordan aldığımız açıya götürüp, eklemlerin oluşturacağı moment değeri motora geri verilerek, motor konumunun, akımının ve geriliminin kontrolü yapılmıştır. Bu konu bölüm 6.1’de ayrıntılı anlatılacaktır. Kontrol edilmiş tam model EK-1’ de verilmiştir.

#### 4. MEKATRONİK SİSTEMLERDE ÜÇ BOYUTLU İZ TAKİBİ

Seyir sistemleri, herhangi bir sistemin uzayda veya düzlemde istenilen konumları takip etme veya o konumda sabit kalma işlemini gerçekleştirmesine yarayan yönlendirme sistemleridir. Shneydor bu yönlendirme sürecini bir cismin bir noktaya doğrudan yönlendirilmesi işlemi olarak tanımlar (Shneydor, 1998). Yönlendirme süreci boyunca sistemin kontrol edilmesi gerekeceğinden, bu işlem doğrudan sistemin hareket edebilme ve kontrol edilebilme yetisine bağlıdır. Örneğin bir sürat teknesi su üzerindeki düzlem referans alındığında, o düzlemde zamana bağlı hızlı bir şekilde değişen koordinatları takip edebilir fakat bir balıkçı teknesi aynı rotayı hareket edebilme kabiliyeti düşük olduğu için takip edemez. Bu sebepten dolayı her hangi bir sistemin istenilen bir hareketi gerçekleştirebilmesi o sistemin fiziksel özelliklerine bağlıdır ve istenilen hareket bu fiziksel özellikler göz önüne alarak hesaplanmalıdır.

Bir sistemin istenen rotadaki hareketini sağlamak için o sisteme giriş ve çıkışlarının belirlenmesi gerekir. Eğer yapılacak sistem bir birey tarafından kontrol edilecekse sistemin girişi klavye veya yönetim kolu olabilir. Eğer sistem otonom olarak hareket edecekse sisteme uygun mikro işlemci tabanlı bir kontrolör oluşturulması gerekir. Bu durum Şekil 4.1’de görselleştirilmiştir.

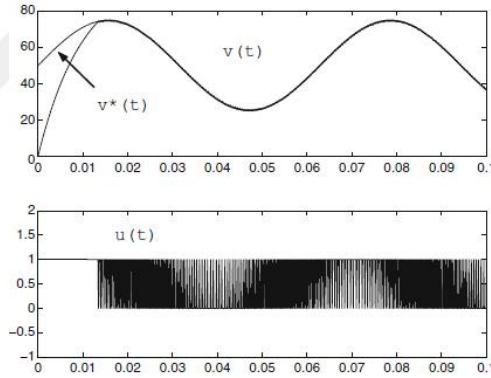


Şekil 4. 1 Seyir sistemleri blok diyagramı

Otonom bir sistemden düzlemde veya uzayda istenecek olan hareketler sınıflandırılırsa, bu sınıflar aşağıda belirtildiği gibi üç grupta olur.

- Ayarlanan Nokta Stabilizasyonu: Sistemin belirlenen bir nokta üzerinde sürekli olarak kalması işlemidir. Örnek olarak bir zeplin istenilen enlem, boylam ve irtifa da bulunması verilebilir.
- Patika Takibi: Daha önceden belirlenmiş zamandan bağımsız bir rotanın takibi işlemidir. Bu patika istenirse daha önceden belirlenmiş engellerden kurtulmak için veya istenirse doğrudan hedefe ulaşmak için tasarlanabilir.
- İz Takibi: Zamana bağlı bir yörüngenin belirlenen kısıtlar dahilinde bir sistem tarafından takibi işlemidir. Zaman sınırlandırması olduğundan dolayı verilen yörüngenin sistemin fiziksel özellikleri ile uygulanabilir olması gerekir.

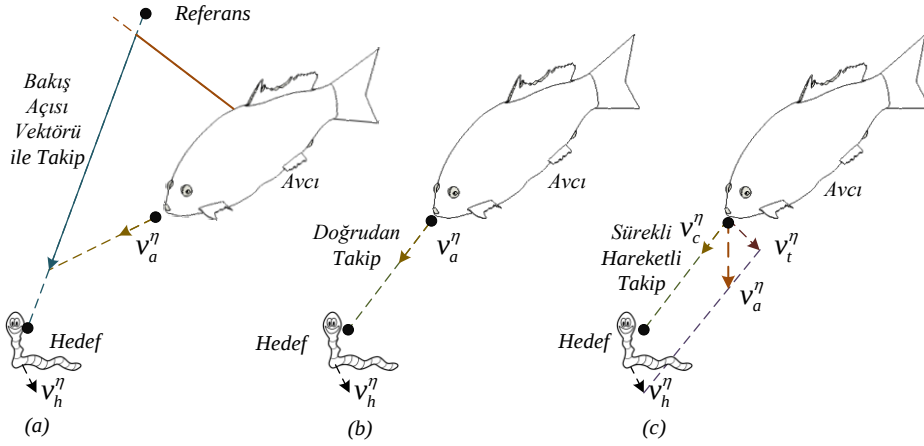
İz takibi elektrik devrelerinden mekanik sistemlere kadar geniş bir yelpazede uygulanır, mekanik sistemlere örnek olarak deniz araçları verilebilir (Encarnacao ve Pascoal, 2001). Elektrik devrelerine örnek ise bir RC devresindeki kapasitif elemanın gerilimine iz takibi yönteminin uygulanması verilebilir. Bu devreye ait sonuçlar Şekil 4.2’de verilmiştir (Sira-Ramirez, 2000).



Şekil 4. 2 Kapasitif elemanın gerilim grafiği

Bu şekilde;  $u(t)$ ,  $v(t)$  ve  $v^*(t)$  sırası ile kontrol sinyalini, kapasitif elemanın gerilimini ve izlenecek olan izi simgeler.

Mekanik sistemlerde takip kontrol sistemleri genel olarak hedef izi takibi ve iz takibi yapılabilmesi için tasarlanır. Hedef izi takibi yapacak sistemlerde hedefin ve avcının hareketine göre uygulanan takip algoritmaları farklılık gösterir.



Şekil 4. 3 Hedef takip algoritmaları

(a) Bakış açısı vektörü ile takip (b) Doğrudan takip (c) Sürekli hareketli takip

Bu şekilde;  $v_a^\eta$ ,  $v_h^\eta$ ,  $v_t^\eta$  ve  $v_c^\eta$  sırası ile avcının, hedefin, hedef hızının iz düşümünü ve avcının hedefe göre hızını simgeler. Bakış açısı vektörü ile takip; referans, avcı ve av olmak üzere üç noktadan oluşan ve hedefin bakış açısı vektörü üzerinde hareket ettiği takip algoritmasıdır. Bu sistemler genel olarak yerden havaya atılan füze sistemlerinde kullanılır. Bu füze sistemlerinde referans yerde bulunan üs üzerindeki radarlar olarak alınır. Referans noktası kullanılarak fırlatıcı hedefe göre konumlandırılır ve takip işlemi yaptırılır. Doğrudan takip; avcı ve avın olmak üzere iki noktanın aynı doğru üzerinde bulunduğu takip sistemleridir. Doğrudan takip sistemleri doğadaki av ile avcı arasındaki ilişki olan avcının görüş açısındaki avı avlaması prensibi ile tasarlanmıştır. Bu yüzden avcı hedefe kilitlenerek aradaki mesafeyi azaltacak hıza ulaşmaya çalışır. Örnek olarak havadan yeryüzündeki hedefleri imha etmek için atılan füzeler verilebilir. Sürekli hareketli takip; doğrudan takip sistemleri gibi av ve avcı olmak üzere iki noktadan oluşur fakat doğrudan takip sistemleri gibi av ve avcı sürekli aynı görüş vektörü üzerinde değildir. Bu yüzden avcı sürekli olarak avın oryantasyonuna göre kendini güncellemek zorundadır. Havadan havaya atılan füzeler buna örnek verilebilir veya uzun yıllar boyunca deniz araçlarının çarpışmadan kurtulabilmek için bu algoritmayı kullanması da diğer bir örnek olarak verilebilir (Breivik ve Fossen, 2009).

Mekanik sistemler de takip kontrol sistemlerinin diğçer bir amacı olan o sistemin istenilen iz takibini yapılabilmesi için tasarlanır. İz takibi literatürde istenilen yörünge olan  $r_d(t) \in \mathbb{R}^m$  yörüngesini minimum hata ile sistemin konum denklemi olan  $r(t) \in \mathbb{R}^m$  yörüngesinin takip etmesi işlemidir ve Denklem (4.1)'de verilmiştir (Ortega vd., 1998).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = \|r_d(t) - r(t)\| \cong 0 \quad (4.1)$$

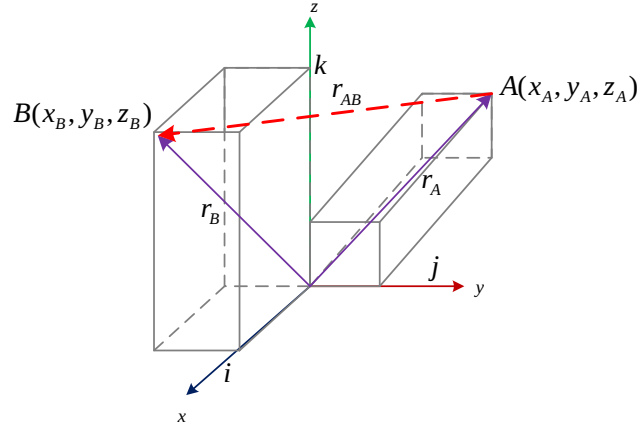
Burada;  $e(t) \in \mathbb{R}^m$  olmak üzere hatayı simgelemek için kullanılmıştır. İz takibinin amacı zamana bağılı bu fonksiyonu sifıra yakınl ştırmak veya kabul edilebilir bir hata değerine yakınl ştırmaktır.

Takip edilecek üç boyutlu iz, sistemin fiziksel özelliklerine uygun olmalıdır aksi halde sistem istenilen davranış olan iz takibini ger ekle tirmeyecektir. İz  retimi için çeşitli yollar mevcuttur. Bunlardan bazıları konum, hız ve ivme izlerinin bir alçak geçiren filtre ile üretilmesi veya optimizasyon metotları kullanarak üretimi veya fiziksel sistemin yeterli modeli oluşturularak zaman bölgesinde denenmesi ile iz üretimidir. Bu çalışmada kullanılan izler model benzetimi üzerine denenmesi ile oluşturulan izlerdir.

Yapılan ilk çalışmada kullanılacak robot balığın altı serbestlik derecesine sahip olduğu daha önceki kısımda anlatılmıştır. Sistemin istenilen üç boyutlu izi takip edebilmesi için bir birinden bağımsız olan altı değişkenin kontrol edilmesi gerekir. Bu sebepten dolayı belirlenen sistem için hata matrisinin Denklem (4.2)'deki gibi olması gerekir.

$$e(t) = \begin{bmatrix} x_d(t) - x(t) \\ y_d(t) - y(t) \\ z_d(t) - z(t) \\ \phi_d(t) - \phi(t) \\ \theta_d(t) - \theta(t) \\ \psi_d(t) - \psi(t) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Bu matriste sol sütün  $r_d(t)$  ile simgelenen istenilen rotayı ifade ederken sağ sütün sistemin konumu olan  $r(t)$ 'yi simgeler. Tanımlanan  $e(t)$  matrisi doğru olmasına karşın sistemin doğrusal hızları bir doğrudan kontrol edilemeyeceği için bu yöntem kullanılamaz. Bu yöntem yerine uzaydaki iki noktanın birbirine göre göreceli tanımı olan konum vektörü kullanılmıştır. Konum vektörü  ekil 4.4'de g rselle tirilmi tir.



Şekil 4. 4 Konum vektörü

Bu şekilde;  $\vec{r}_A = x_A \mathbf{i} + y_A \mathbf{j} + z_A \mathbf{k}$  ve  $\vec{r}_B = x_B \mathbf{i} + y_B \mathbf{j} + z_B \mathbf{k}$  olarak kabul edilirse  $\vec{r}_{AB} = (x_A - x_B) \mathbf{i} + (y_A - y_B) \mathbf{j} + (z_A - z_B) \mathbf{k}$  olarak bulunur. Bu bileşke vektör aynı zamanda  $\vec{r}_{AB} = M(\alpha, \beta, \gamma)$  olarak gösterilir. Bu denklemde  $M, \alpha, \beta$  ve  $\gamma$  sırası ile vektörün şiddetini, x eksenine yaptığı açığı, y eksenine yaptığı açığı ve z eksenine yaptığı açığı simgeler. İz takibi bu forma göre yapılacaktır. Konum vektörü bu şekilde bulunduğuna göre  $e(t)$  matrisi yeniden düzenlenirse Denklem (4.3)'teki gibi bulunur.

$$e(t) = \begin{bmatrix} \zeta_d(t) - \zeta(t) \\ \phi_d(t) - \phi(t) \\ \theta_d(t) - \theta(t) \\ \psi_d(t) - \psi(t) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Bu denklemde;  $\zeta_d$  sistemden istenen skaler hızı simgelerken,  $\zeta$  sistemin skaler hızını gösterir. Oryantasyon açıları ve skaler hızın formülasyonu Denklem (4.4)-(4.6) ile verilmiştir.

$$\theta_d = -\tan^{-1} \left( \frac{(Z_d - Z)}{\sqrt{(X_d - X)^2 + (Y_d - Y)^2}} \right) \quad (4.4)$$

$$\psi_d = \tan^{-1} \left( \frac{(Y_d - Y)}{(X_d - X)} \right) \quad (4.5)$$

$$\zeta_d = \xi \sqrt{(X_d - X)^2 + (Y_d - Y)^2 + (Z_d - Z)^2} \quad (4.6)$$

Bu denklemlerde;  $X_d, Y_d, Z_d$  ve  $\xi$  sırası ile tasarlanan üç boyutlu izdeki zamana bağlı x, y ve z eksenlerindeki konumları ve skaler hız normalizasyon katsayısını simgeler. Takip edilecek izlerde x ekseninde dönme olmadığından dolayı  $\phi_d$  sıfır olarak kabul edilmiştir.



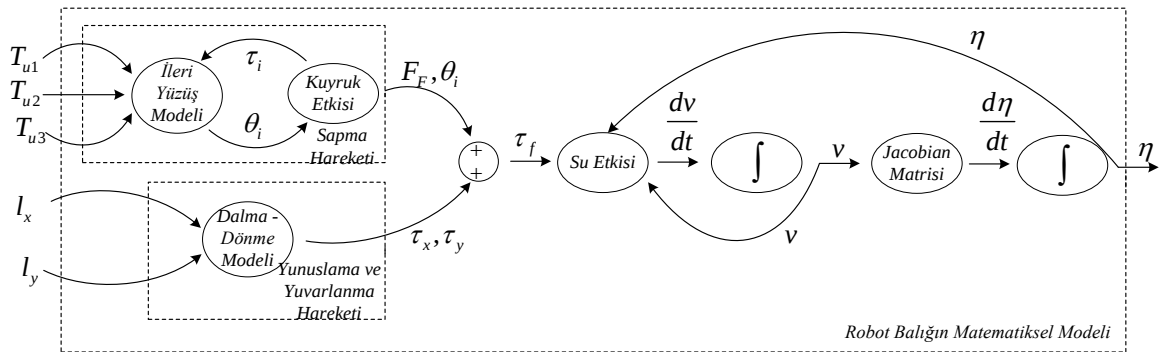
## 5. ROBOT BALIĞIN KONTROLÜ

Kontrol, dinamik olarak uygulanan bir veya birden fazla girişe sahip sistemlerin zaman veya frekans özellikleri göz önüne alınarak istenilen davranışı sergilemesi için tasarlanan algoritmalarlardır. Tasarlanan algoritmalar dâhilinde arzu edilen çıkış ile sistem çıkışının farkını yorumlayıp, sisteme giriş olarak veren kısım ise kontrolör olarak adlandırılır. Herhangi bir sistemde kontrolör olarak insan kullanılıyorsa bu sisteme manuel kontrollü sistem, eğer mikroişlemci veya mikro denetleyici tabanlı sayısal bir cihaz kullanılıyorsa bu sisteme otomatik kontrollü sistem adı verilir. Otomatik kontrol sistemlerinin ilk örneklerinden birisi şamandıra sistemleridir. Yıllar ilerledikçe otomatik kontrol sistemleri de gelişmiştir. Bu kontrol sistemlerine örnek olarak CD okuyucularında bulunan fırçasız doğru akım motorunun kontrolü verilebilir.

Kontrol edilen sistemlerde istenilen tepki referans girişi olarak verilir. Eğer referans girişi herhangi bir işleme tabi tutulmadan doğrudan sisteme veriliyorsa bu tür sistemlere açık çevrim kontrollü sistemler denir. Eğer referans girişi sistemin cevabından çıkarıldıktan sonra kontrolöre daha sonra da kontrolör çıkışı sisteme uygulanıyorsa bu tür sistemlere kapalı çevrim kontrollü sistemler denir.

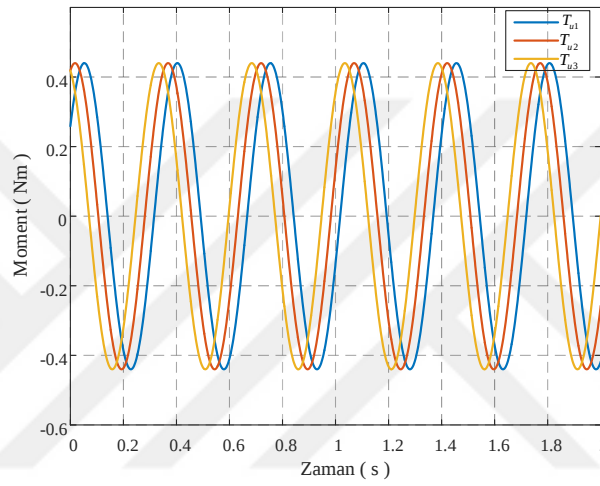
### 5.1. Açık Çevrim Kontrol

Geri besleme değeri olmadan doğrudan sisteme referans girişi uygulanarak yapılan kontroldür. Örnek olarak Şekil 5.1’de verilen robot balığın matematiksel modeli açık çevrim kontrol edilebilir.



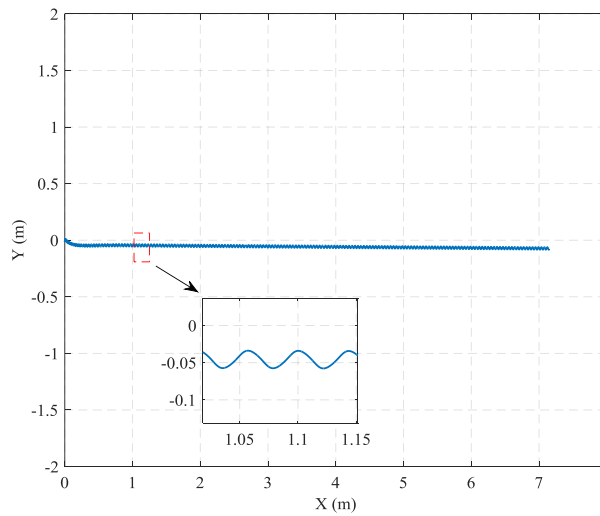
Şekil 5. 1 Robot balığın matematiksel modelinin blok diyagramı

Matematiksel modele giriş olarak eklemlere uygulanan moment değerleri ve oryantasyon kütlelerinin konumları verilerek istenilen hareketi yapması istenebilir. Mesela bir balığın hareketi için dinamik denklemlerden ziyade balığın hareketini taklit eden  $y_{ehs}(x,t)$  (enine hareket sinyali) denklemlerinden yararlanılabilir (Korkmaz vd., 2012; Bal vd., 2016). Bu denklem incelendiğinde beş parçadan oluşan bir robot balığın düz yüzebilmesi için kaba olarak bir doğru açığı beş eşit parçaya bölüp iki, üç ve dördüncü eklemlere denk gelecek olan değerler bulunur. Bulunan bu açı değerleri eklemlere uygulanan momentlerin faz farkları olarak Şekil 5.2'deki gibi uygulanmıştır.



Şekil 5. 2 Eklemlere uygulanan momentler

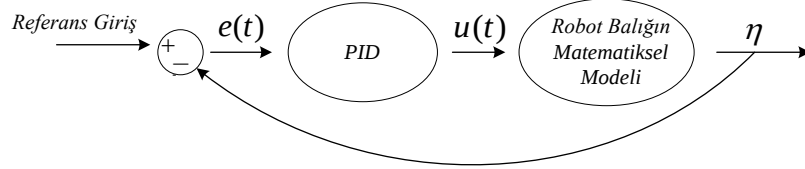
Uygulanan bu momentler sonrası sistemin davranışı Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5. 3 Robot balığın düz yüzüş hareketi

## 5.2.PID Kontrol

Sistemin çıkışından alınan veriler yorumlanarak kontrolöre girişi olarak uygulanan sistemlere kapalı çevrim kontrol sistemleri denir. PID kontrol kapalı çevrim kontrol algoritmalarından bir tanesidir. Bu kontrol algoritmasında referans giriş ile sistem çıkışının farkı alındıktan sonra kontrolör bu farkı minimize etmeye çalışır.



Şekil 5. 4 PID kontrol

PID kontrolör, oransal, türev ve integral olmak üzere üç katsayıdan oluşur. PID kontrolün matematiksel ifadesi Denklem (5.1)'de verilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.1)$$

Bu denklemde;  $u(t)$  kontrol sinyalini simgeler.  $K_p, K_i$  ve  $K_d$  sırası ile oransal, türev ve integral kat sayılarını simgeler. Zaman ekseninde olan Denklem (5.1) s bölgesinde çevrilirse Denklem (5.2) elde edilir.

$$G_c(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (5.2)$$

Bu denklemde;  $G_c(s)$  kontrolörün transfer fonksiyonun simgeler.

PID kontrolör parametrelerini ayarlamamanın birden fazla yöntemi vardır. Bunlardan birincisi istenen referans modelden yararlanarak ayarlamaktır. Örnek olarak Denklem (5.3) sistemin transfer fonksiyonu olarak verilmiş olsun.

$$G_p(s) = \frac{A}{s^2 + Bs + C} \quad (5.3)$$

Verilen bu sistemin baskın kutuplarını sönüm faktörü  $\zeta$ , doğal frekansı  $\omega_n$  olan ve kalıcı durum basamak hatası olmayacak şekilde kontrol edilmesi isteniyor olsun. İstenilen bu durumun transfer fonksiyonu Denklem (5.4)'te verilmiştir.

$$G_r(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (5.4)$$

Sistemin transfer fonksiyonu ile kontrolörün transfer fonksiyonu çarpılıp referans sistemin transfer fonksiyonuna eşitlenerek kontrolörün parametreleri bulunabilir.

$$G_c(s) * G_p(s) = G_r(s) \quad (5.5)$$

Bu işlem yapıldığı zaman denklemlerinin derecelerinin birbirini tutmadıkları görünür. Böyle bir durumda referans sistemine, sistemin köklerinden uzak bir noktada kutup atanır. Bu şekilde denklemlerin dereceleri eşitlenerek uygun parametreler ayarlanmış olur.

$$G_c(s) * G_p(s) = G_r(s) * \frac{1}{(1/M s + 1)} \quad (5.6)$$

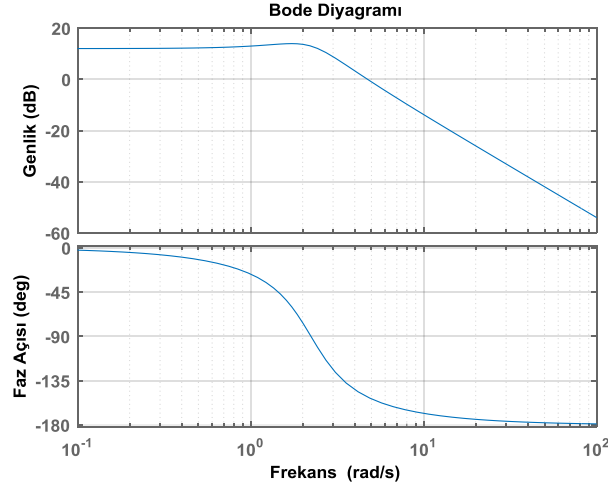
Burada;  $M$  sistemin kutuplarından uzakta sistemin dinamiğine etkisi ihmal edilebilecek katsayıdır.

Her hangi bir sistemi PID kontrolör ile kontrol edebilmenin diğer bir yolu frekans eğrilerinden yararlanmaktır. Sistemin frekans cevabı, sisteme bağımsız olarak uygulanan sinüzoidal işaretin frekansını değiştirerek elde edilir. Örnek olarak transfer fonksiyonu

$$G_p(s) = \frac{20}{s^2 + 2s + 5} \text{ olan bir sistemin frekans analiz yöntemlerinden biri olan Bode}$$

diyagramı Şekil 5.5'te verilmiştir. Verilen diyagramda faz geçiş frekansında eğri ile eksen arasında kalan kısma kazanç payı, kazanç geçiş frekansında frekans eğrisi ile eksen arasında kalan kısma faz payı denir. Denklem (5.2)'deki katsayılar faz payı ve kazanç payından yararlanarak da bulunabilir.

Bir diğer ve bu çalışmada kullanılan PID katsayılarını ayarlama yöntemi ise deneme yanılma yöntemidir. Bu çalışmada bu yöntemin kullanılmasının amacı sistemin mükemmel derece doğrusal olmayan sistem olmasıdır. Bundan dolayı literatürde sıkça kullanılan doğrusal kontrolörler olan PID kontrol ve türevlerinin katsayıları deneme yanılma yöntemi ile bulunmuştur. Bu katsayılar ayarlanırken katsayıların etkileri göz önüne alınarak ayarlanmıştır.



Şekil 5. 5 Frekans eğrisi

Oransal katsayı sistemin kazancına doğrudan etki eder. Bazı durumlarda bu doğrudan etki sistemin kalıcı durum hatasını azaltabilir. Fakat tek başına oransal kontrol sistemin tipini değiştiremeyeceğinden dolayı kalıcı durum hatasını düzeltemeyebilir. Örnek olarak tip 0 bir sistemin basamak hatasını hiçbir zaman sıfıra yaklaştıramaz. Oransal kontrolör sistemin cevap hızını arttırmasının yanı sıra maksimum aşma değerini arttırır. Bu durum ise sistemi gürültülü bir şekilde kontrol edilmesi durumunu ortaya çıkarır.

İntegral kontrolörler, sistemin derecesini bir basamak arttırarak kalıcı durum hatasını düzeltmek için kullanılabilirler. Orijin üzerine bir kutup eklediklerinden dolayı sistemin cevap hızını azaltırlar ve bu durum ise sistemi yavaşlatır ve geçici durumu etkiler.

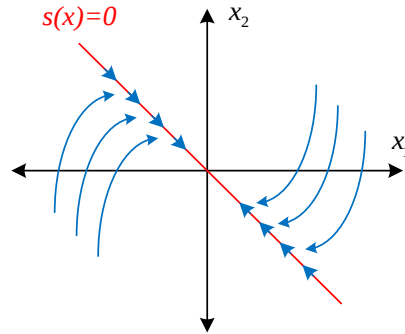
Türev kontrolörler, hata değişmeden önce sisteme kontrol sinyali uygulayarak hata oluşmadan giderme işlemi yapar. Sadece hatanın değişimi sırasında etkilidir. Bu yüzden bu kontrolör tek başına kullanılmaz. Bu kontrolörün gürültü hassasiyeti çok yüksek olduğundan pratikte pek fazla kullanılmaz. Bu bilgiler ışığında sistemde kullanılacak PID ve benzeri kontrolörlerin parametreleri belirlenmiştir.

### 5.3.Kayma Kipli Kontrol

Herhangi bir sistemin kontrol edilmesi istendiğinde, sistemin matematiksel modelinin eksik elde edilmesi, sistem parametrelerinin tam saptanamaması veya ortaya çıkması tahmin edilemeyecek her hangi bir etkenin göz ardı edilerek oluşturulduğundan dolayı sıkıntılar yaşanması muhtemeldir. Kayma Kipli Kontrol (KKK) bu sıkıntıları bertaraf ederek sistemi güçlü bir şekilde kontrol edecek kontrol algoritmasıdır (Shtessel, 2014).

KKK Sovyet Birliğinde 1960'lı yıllarda yapılan Değişken Yapılı Sistem (Variable Structure Systems – VSS) çalışmalarının evrim geçirmesi sonucu oluşmuştur (Spurgeon, 2014). VSS, konum ve hız gibi değişkenlerinin birbirine göre değiştiği sistemlerdir. Bu tür sistemlerin kontrol edilebilmesi için Değişken Yapılı Kontrol (Variable Structure Control – VSC) algoritmaları bulunmuştur. VSC'lerin ilk örnekleri röle ve aç-kapat kontrol yapıları olmuştur. Bunlar sistem dinamiğinden bağımsız anahtarlama fonksiyonlarıdır. Sistemde kaç adet giriş varsa o kadar kontrol edecek anahtar veya röle vardır. Daha sonra VSC'ler yerlerini KKK'ya bırakmışlardır. KKK elektrik motorlarından dört kol mekanizmasına kadar farklı mühendislik alanlarındaki sistemleri kontrol etmek için kullanılmıştır (Akpolat, 1999; Koca, 2010; Yeroglu ve Kavuran, 2014).

KKK de sistem değişkenlerinin eğrilerinin oluşturduğu faz yörüngelerinde denge noktasından geçen teğet doğrusu üzerine anahtarlama fonksiyonu yardımı ile değişkenleri ulaştırıp, değişkenlerin bu eğri üzerinde kaymasını sağlayan algoritmadır. Bu yüzden anahtarlama fonksiyonu büyük bir önem teşkil eder. Anahtarlama fonksiyonu kontrolün performans ve gürbüzlüğünü doğrudan etkiler. Anahtarlama fonksiyonun derecesi sistemin derecesinden bağımsız ve sistemin derecesinden az bir dereceye sahip olmalıdır (Hung, vd., 1993; Fadali, 2005).



Şekil 5. 6 Anahtarlama fonksiyonu

Bu şekilde,  $s(x)$  anahtarlama fonksiyonu ve  $x_1$  ve  $x_2$  durum değişkenlerini ifade eder. Temel olarak anahtarlama fonksiyonları sınıflandırılacak olunursa; bu sınıflar doğrusal olmayan anahtarlama fonksiyonları ve doğrusal anahtarlama fonksiyonları olur. Doğrusal olmayan anahtarlama fonksiyonları birden fazla ayarlanabilir parametreye sahip olduğundan doğrusal olmayan sistemlerin dinamik özelliklerine göre ayarlanabilirken doğrusal anahtarlama fonksiyonları az ayarlanabilir parametreye sahip olduğundan sisteme

göre ayarlanamayabilir. Doğrusal olmayan anahtarlama fonksiyonunu elde edilmesi zor iken doğrusal anahtarlama fonksiyonunun elde edilmesi kolaydır.  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  ve  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  olduğu varsayılırsa  $S(x) = Sx$  şeklinde bir anahtarlama fonksiyonunda  $S \in \mathbb{R}^{m \times n}$  olur.  $m$  adet girişi olan sistemde  $2^m - 1$  tane kayma yüzeyi vardır.

KKK de çıkış sinyali Denklem (5.7)'de verilmiştir.

$$u(t) = u_c(t) + u_{eq}(t) \quad (5.7)$$

Burada;  $u_c$  düzeltici sinyal olup değişkenlerin kayma yüzeyine ulaşmalarını ve  $u_{eq}$  eşdeğer sinyal olup ulaşılan kayma yüzeyinde sistemin kalmasını sağlar. Örnek olarak bir sistemin dinamik modeli Denklem (5.8)'deki gibi verilmiş olsun.

$$\dot{x}(t) = A_n x(t) + b_n u(t) \quad (5.8)$$

Bu denklemde;  $A_n$  ve  $b_n$  katsayı matrislerini ayrıca  $x$  ve  $u$  durum değişkenlerini ve kontrol sinyalini ifade etmektedir. Sistemden arzu edilen çıkış ise  $x_d$  olarak kabul edilsin. Bu durumda oluşacak hata vektörü Denklem (5.9)'de verilmiştir.

$$e = x - x_d = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = [e \quad \dot{e}]^T \quad (5.9)$$

Bu hata vektörünü sıfıra yaklaştıracak  $1/\lambda$  zaman sabitli anahtarlama fonksiyonu Denklem (5.10)'da verilmiştir.

$$S = \lambda e + \dot{e} = C e \quad (5.10)$$

Bu denklemde;  $C$  katsayı matrisidir. Bu şekilde hata ve hatanın değişiminden yararlanarak sistem önce kayma eksenine yaklaştırmış sonra da bu eksen üzerinde hareketi sağlanmış olunur. Kontrol edilebilir kararlı bir sistemde Lyapunov fonksiyonu pozitif tanımlı iken bu fonksiyonun birinci türevi negatif tanımlıdır. Bu denklemlerin kararlılığını incelemek için pozitif tanımlı  $V(x) = \frac{1}{2} S(x)^T S(x)$  Lyapunov fonksiyonu kullanılmıştır. Bu ifadenin birinci türevi Denklem (5.11)'de verilmiştir.

$$\dot{V}(x) = S(x)^T \frac{\partial S(x)}{\partial x} [A_n x(t) + b_n u(t)] \quad (5.11)$$

$\dot{V}(x) < 0$  olmak şartı ile bu ifade karardır ve bu ifadeyi kayma eksenine götürecek  $u_c$  ifadesi Denklem (5.12)'de verilmiştir (Utkin, 1993).

$$u_c(t) = -U \operatorname{sgn}(S) \quad (5.12)$$

Burada;  $U$  model hakkında kestirmesi güç olan durumları ve bozucu girişleri yok edecek uygun katsayıyı ifade eder. Anahtarlama fonksiyonuna teğet geçecek doğruyu bulmak için fonksiyonun türevi alınıp Denklem (5.8) ve (5.9)'da yerine yazılırsa Denklem (5.13) elde edilir.

$$u_{eq}(t) = (Cb_n)^{-1} C(\dot{x}_d - A_n \dot{x}) \quad (5.13)$$

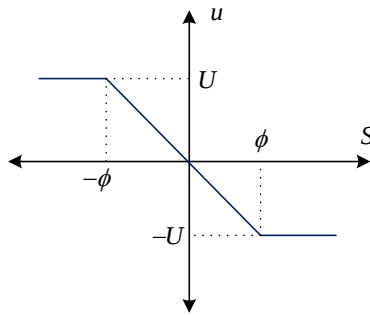
$u_c(t)$  fonksiyon ani geçişlere sahip olduğundan dolayı kontrol sırasında pek arzu edilmeyen frekanslarda çıkışlara sebep olur. Bu sebepten dolayı bu fonksiyon Denklem (5.14)'deki gibi kullanılmıştır.

$$u_c(t) = -U \operatorname{sat}(S) \quad (5.14)$$

Burada;  $\operatorname{sat}()$  fonksiyonu Denklem (5.15)'de verilmiştir.

$$\operatorname{sat}(S) = \begin{cases} |S| \leq \phi \rightarrow S/\phi \\ |S| \geq \phi \rightarrow \operatorname{sgn}(S) \end{cases} \quad (5.15)$$

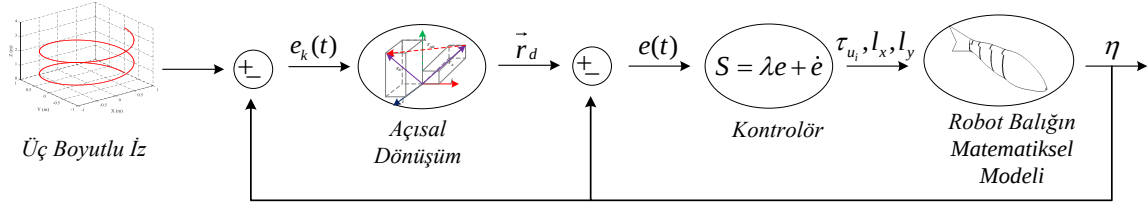
Bu denklemde;  $\phi$  değeri kontrol girişine ait bir kat sayı olup Şekil 5.7'de görselleştirilmiştir.



Şekil 5. 7 Kontrol girişinin karakteristiği

Robot balığın dinamik modelinin durum uzay modeli ile ifade edilmesi zor olacağından dolayı KKK'nın sadece anahtarlama fonksiyonu olan denklem (5.10)

kullanılmıştır. Anahtarlama fonksiyonunun parametreleri deneme yanılma yöntemi ile bulunmuştur.



Şekil 5. 8 Robot balığın iz takibi blok şeması

Bu şekilde;  $e_k(t)$  konum hatalarını ifade eder. Elde edilen  $\eta$  vektörünün istenilen iz ile farkı alınarak elde edilir. Daha sonra bu elde edilen farktan yararlanarak arzu edilen açı ve hız değerleri üretilir. Üretilen bu değerler ile  $\eta$  vektörünün farkı alınarak hata vektörü olan  $e(t)$  elde edilir. Bu hata vektörü kontrolör yardımı ile eklemlere uygulanacak olan momentleri ve oryantasyon kütlelerinin pozisyonlarını hesaplar ve sisteme gönderir. Sistem bu dinamik girişlere cevap olarak istenilen konumu üretir.

## 6. ROBOT KOLUN KONTROLÜ

### 6.1. Motor Modeli ve Kontrolü

Motorlar, herhangi bir sistemi harekete geçiren ya da hareket eden bir sistemin yönelimini sağlayan mekanik veya elektromekanik cihazlardır. Bu cihazları temel olarak sistemin hareketini yönlendiren ve sistemi tahrik eden olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Sistemin hareketini yönlendiren motorlara örnek olarak füzelerde bulunan gövde motorları verilebilir. Sistemi tahrik eden motorlar ise tükettikleri enerji çeşidine göre iki alt sınıfa ayrılabilir. Bu alt sınıflar arabalar vb. yerlerde kullandığımız petrol türevleri ile çalışan motorlar ve elektrik ile çalışan motorlardır. Bu motorların ortak özellikleri ise endüstriyel devrimden günümüze kadar çalışılmış ve içinde bulunduğumuz zamanda bile çalışılıyor olmasıdır (Steinmetz, 1902; Koca, 2005; Karthika vd., 2016).

Elektrikle çalışan motorlar alternatif akım motorları ve doğru akım motorları olarak ikiye ayrılırlar ve bu motorları daha fazla sınıflandırmak mümkündür. Modeli oluşturulan robot kolda eklem hareketlerinin gerçekleştirilebilmesi için sabit mıknatıslı doğru akım motoru bulunmaktadır. Doğru akım motorunun elektriksel modeli Denklem (6.1)'de verilmiştir (Sen vd., 2016).

$$\dot{i}_c(t) = -\frac{(i_c(t)R_e + K_e\omega(t) - u(t))}{L_i} \quad (6.1)$$

Bu denklemde;  $i_c$  armatür akımını,  $L_i$  armatür indüktansını,  $R_e$  armatür direncini,  $K_e$  gerilim katsayısını,  $\omega$  dönüş hızını ve  $u$  armatüre uygulanan gerilimi ifade eder. Doğru akım motorlarında oluşan manyetik alan ile mekanik bir dönüş elde edildiği için mekanik kısımda modellenmelidir. Mekanik kısmın modeli Denklem (6.2)'de verilmiştir.

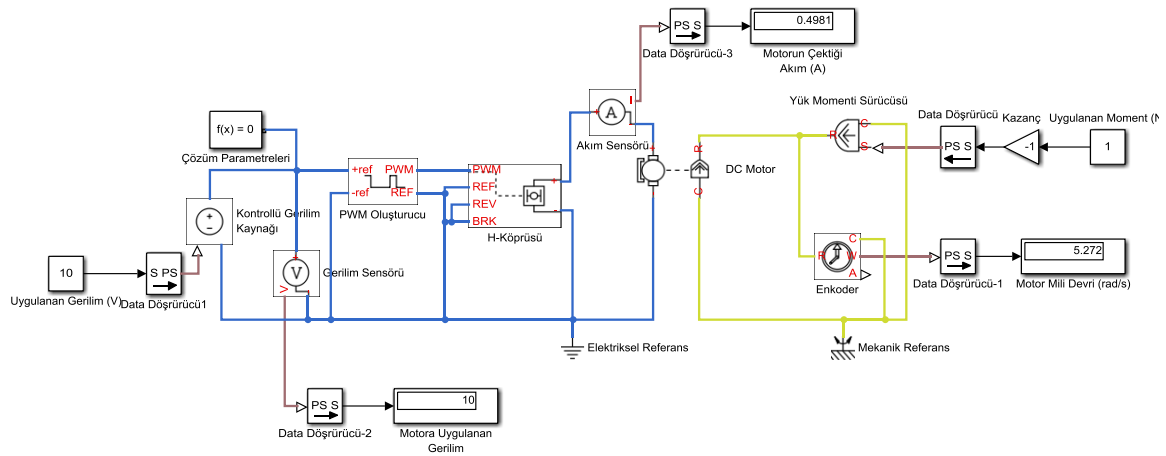
$$\dot{\omega}(t) = \frac{(K_m i(t) - T_L - T_f)}{J_a} \quad (6.2)$$

Burada;  $K_m$  moment katsayısını,  $J_a$  rotor ataletini,  $T_L$  yük momentini ve  $T_f$  sürtünme momentini simgeler. Bu iki denklemi kullanarak bir doğru akım motorunu modellemek mümkündür fakat bu çalışmada robot kol oluşumu sırasında kullanılan *MATLAB Simulink* ortamında bulunan motor bloğu bu çalışmada kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan motor, sürücü ve sensör modelleri *Simspace* araç kutusu içeridedir ve kullanılan bloklar tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6. 1 Motor modelinde kullanılan bloklar

| Kullanılan Blok                       |
|---------------------------------------|
| Kontrollü Gerilim Kaynağı             |
| Gerilim Sensörü                       |
| Darbe-Genişlik Modülasyonu Oluşturucu |
| H Köprü Motor Sürücüsü                |
| DC Motor                              |
| Akım Sensörü                          |
| Yük Momenti Sürücüsü                  |
| Enkoder                               |
| Çözüm Parametreleri                   |
| Elektriksel Referans                  |
| Mekanik Referans                      |
| Simulink-PS Dönüştürücü               |
| PS -Simulink Dönüştürücü              |



Şekil 6. 1 Doğru akım motoru modeli

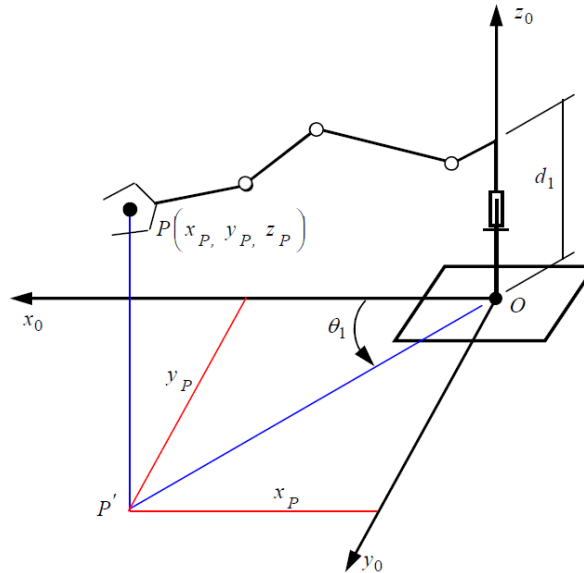
Bu şekilde; mavi bağlantı elemanları motorun elektriksel kısmını simgelerken, yeşil kısım mekanik kısmını oluşturur. Oluşturulan bu doğru akım motoruna konum kontrolü yapılabilmesi için motor mili devrinin integrali alınarak konum elde edildi. Elde edilen bu

konum ve hız verisi ile referans giriş çıkarılarak hata sinyali elde edildikten sonra PID kontrolörle kontrol edilmiştir. Kontrol edilmiş model EK-2’de verilmiştir.

## 6.2. Düz ve Ters Kinematik Denklemler

Düz ve ters kinematik denklemler, robot kolların konum analizlerinin yapılabilmesi için kullanılan denklemlerdir. Düz kinematik denklem diğer bir tabir ile ileri yön kinematiği, eklem açılarından robot kolun tutucu ucunun pozisyonunun tayin edilmesi için kullanılır. Bu denklemlerde eklem parametreleri belirlenir, eklem parametreleri Tablo (3.1)’de verilmiştir. Daha sonra belirlenen bu eklem parametreleri Denklem (2.1)’de verilen dönüşüm matrisinde yerlerine konularak tutucu uç pozisyonu belirlenmiş olur (Wa Hamzah, 2015).

Ters kinematik denklem diğer bir adı ile geri yön kinematiği, tutucu uç pozisyonu verilen robot kolun eklem açılarının bulunması için kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde iki adet çözüm vardır. Çözümlerden birincisi düz kinematik denklemlerin çözümleri yapılarak bulunabilirken, diğeri Geometri bilimi kullanılarak yapılabilir. Bu çalışmada literatürde bulunan Şekil 6.2 kullanılarak geometri yöntemleri ile ters kinematik analiz yapılmıştır (Predescu, 2013).



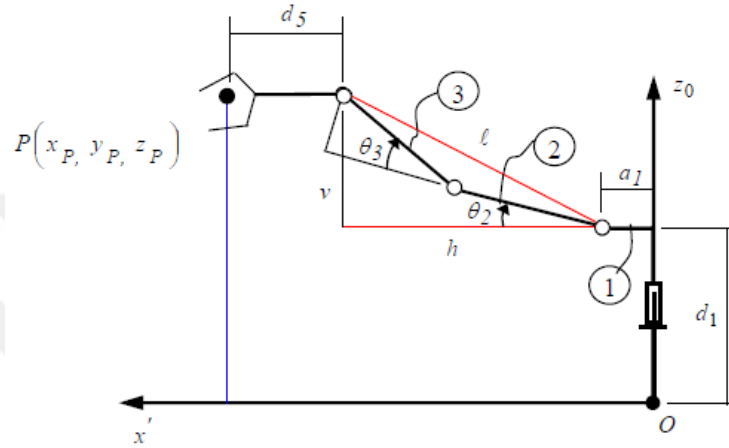
Şekil 6. 2 Robot kolun basitleştirilmiş gösterimi

Bu şekilde;  $P(x_p, y_p, z_p)$  robot kolun tutucunun O merkezli eksen takımına göre sırası ile x, y ve z eksenlerine göre konumlarını simgeler.  $P'$ , P noktasının  $x_0, y_0$  düzlemine göre

iz düşüm noktasını ifade eder.  $d_1$  ilk eklemin uzunluğunu ve  $\theta_1$  birinci eklemin dönüş miktarını gösterir.  $\theta_1$  Denklem (6.3)'de verilmiştir.

$$\theta_1 = \tan^{-1}(y_p, x_p) \quad (6.3)$$

Bu denklemde;  $\theta_1$  bulunduktan sonra robot kol iki boyutlu bir mekanizma haline gelir ve Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6. 3 Robot kolun iki boyutlu yaklaşımı

Burada;  $\theta_2$  ve  $\theta_3$  sırası ile ikinci ve üçüncü eklemin açı değerleridir. Bu açı değerleri aşağıdaki işlem basamakları takip edilerek bulunur.

$$h = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} - a_1 - d_5 \quad (6.4)$$

$$v = z_p - d_1 \quad (6.5)$$

$$l^2 = h^2 + v^2 \quad (6.6)$$

$$l^2 = a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3 \cos(\theta_3) \quad (6.7)$$

Denklem (6.6) ile (6.7) kullanılarak,  $\theta_3$  Denklem (6.8)'de ki gibi bulunur.

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left( \frac{h^2 + v^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \right) \quad (6.8)$$

$\theta_3$  bulunduktan sonra  $\theta_2$  Denklem (6.9)'deki gibi bulunur.

$$\theta_2 = \tan^{-1}(v, h) - \tan^{-1} [a_3 \sin(\theta_3), a_2 + a_3 \cos(\theta_3)] \quad (6.9)$$

Son eklemin açısı olan  $\theta_4$  ise bunlara bağlı olarak Denklem (6.10) kullanılarak elde edilir.

$$\theta_4 = \frac{\pi}{2} - \theta_3 - \theta_2 \quad (6.10)$$

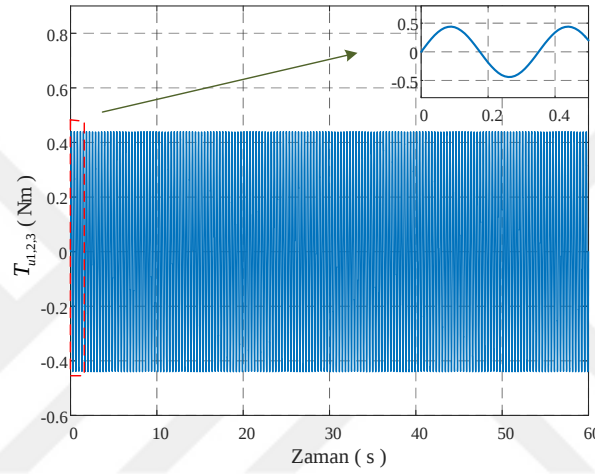
Robot kolun ileri yön ve geri yön analizi yukarıda anlatılan yöntemler ile yapılmıştır.



## 7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

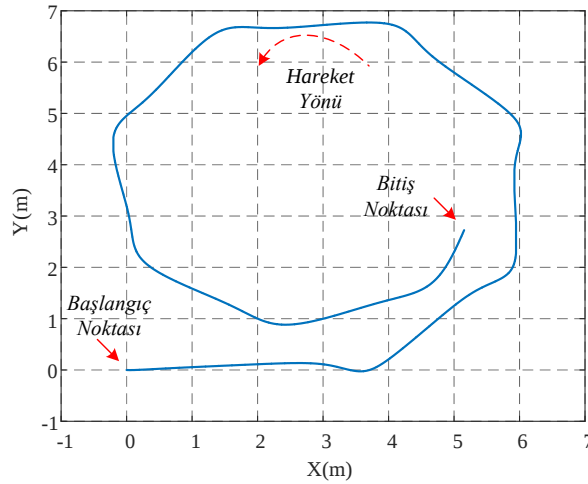
### 7.1.Robot Balık İçin Sonuçlar

Robot balığın açık çevrim kontrol çerçevesinde eklem momentlerine 60 saniye boyunca  $0.44\sin(5.7\pi t)$  işareti Şekil 7.1'deki gibi uygulandığında Şekil 7.2, 7.3 ve 7.4'te bulunan sonuçlar elde edilir.



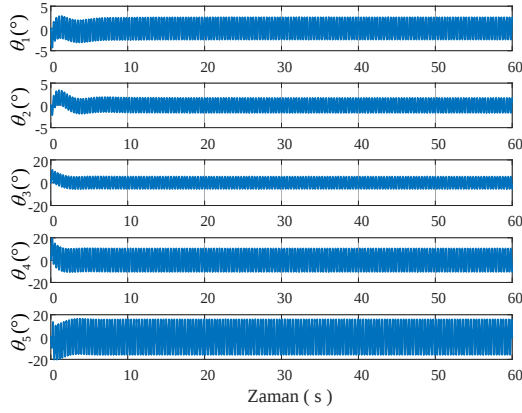
Şekil 7. 1 Eklemlere uygulanan momentler

Bu şekilde, eklemlere uygulanan moment işareti verilmiştir. Bu işarete 0.44 N değeri genliği simgelerken bu değer piyasada bulunan RC servo motor kataloglarından alınmıştır (URL-3).

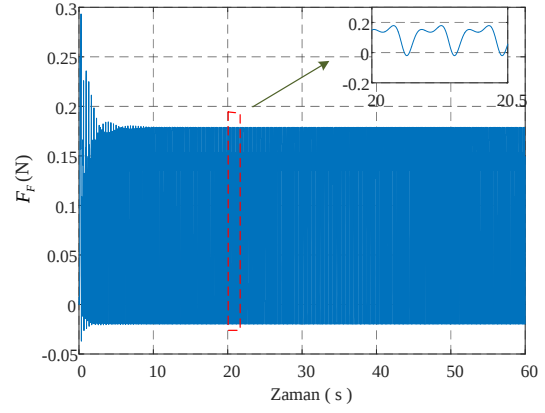


Şekil 7. 2 Uygulanan momentler sonucunda elde edilen hareket

Burada, eklemlere pozitif bölgede başlayan bir moment sinyali uygulandığında sistemin yapmış olduğu davranış verilmiştir.



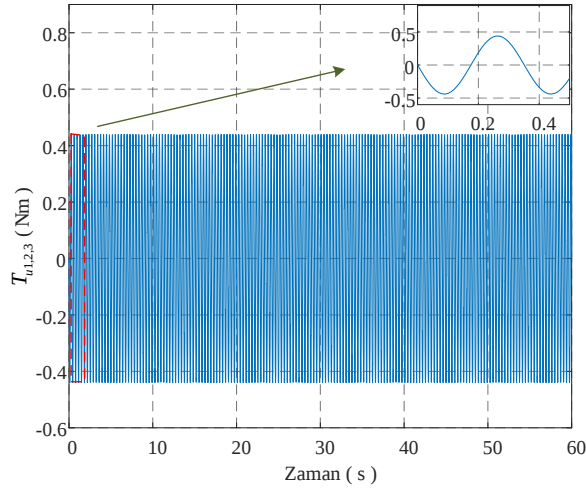
Şekil 7. 3 Oluşan eklem açıları



Şekil 7. 4 Oluşan eklem açıları

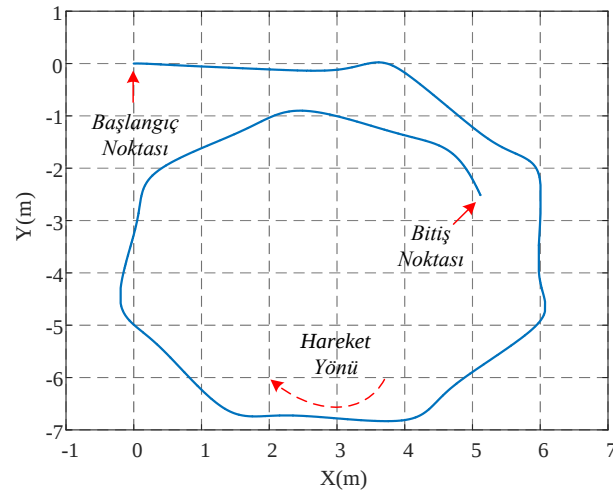
Bu şekillerde, uygulanan moment sonrası eklem açıları ve kuyruk sayesinde oluşan itme kuvveti verilmiştir.

Robot balığın açık çevrim kontrol çerçevesinde eklem momentlerine 60 saniye boyunca  $0.44\sin(5.7\pi t + \pi)$  işareti Şekil 7.5'deki gibi uygulandığında Şekil 7.6, 7.7 ve 7.8'de bulunan sonuçlar elde edilir.



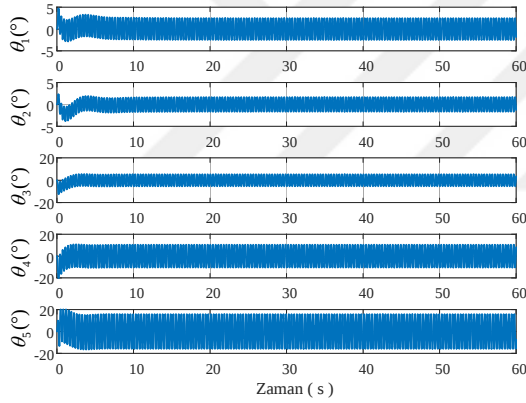
Şekil 7. 5 Uygulanan momentler

Bu şekilde, eklemlere uygulanan moment işareti verilmiştir. Bu moment işaretinin bir önceki moment işaretinden farkı negatif bölgede başlamasıdır.

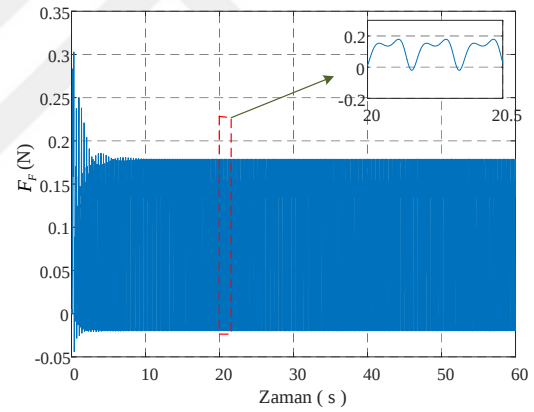


Şekil 7. 6 Uygulanan momentler sonucunda oluşan hareket

Burada, eklemlere negatif bölgede başlayan bir moment sinyali uygulandığında sistemin yapmış olduğu davranış verilmiştir.



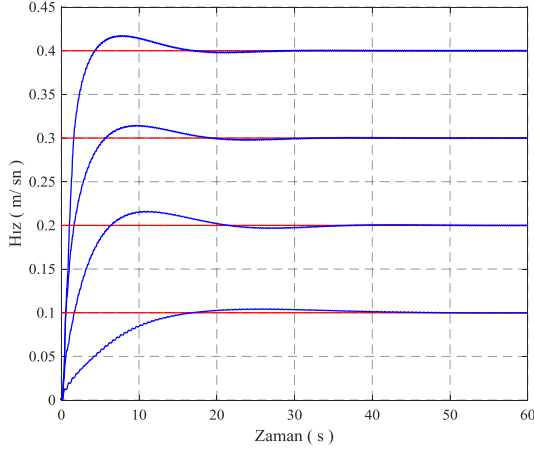
Şekil 7. 7 Oluşan eklem açıları



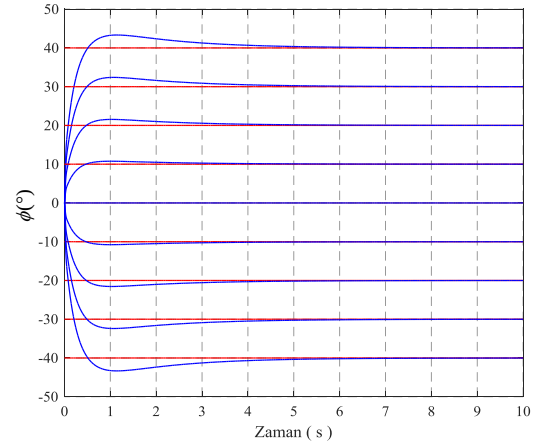
Şekil 7. 8 Oluşan itme kuvveti

Bu şekillerde, uygulanan moment sonrası eklem açıları ve kuyruk sayesinde oluşan itme kuvveti verilmiştir.

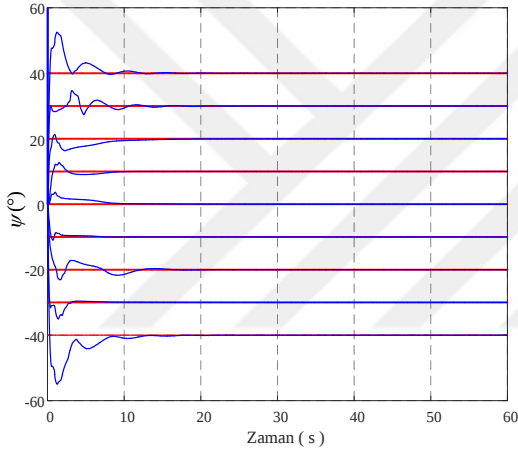
Robot balık sistemine kapalı çevrim kontrol algoritmalarından PID ve KKK uygulanmıştır. Algoritmaların birincisine ait sonuçlar aşağıdaki Şekil 7.9 ile 7.12 arasında verilmiştir. Açılara ait sonuçlar elde edilirken kontrol edilmek istenen parametre hariç diğer açı değişkenleri sıfır olarak kabul edilmiştir.



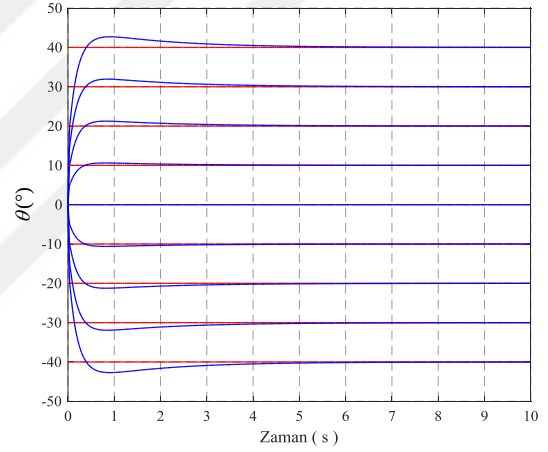
Şekil 7. 9 Farklı hız referanslarına göre PID sonuçları



Şekil 7. 10 Farklı yuvarlanma açısı referanslarına göre PID sonuçları



Şekil 7. 11 Farklı sapma açısı referanslarına göre PID sonuçları



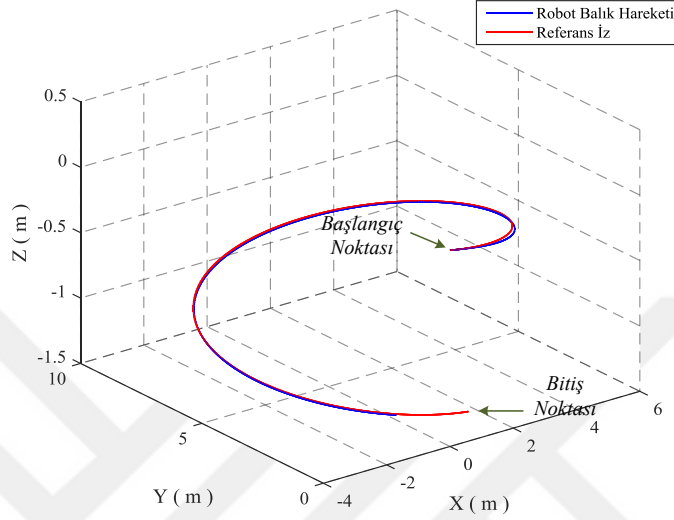
Şekil 7. 12 Farklı yunuslama açısı referanslarına göre PID sonuçları

Bu grafiklerde; kırmızı referansı, mavi ise sistem çıkışını simgelemektedir. Kontrol edilen robot balık sisteminin hız kontrolü oryantasyon açılarının sıfır olarak kabul edilerek yapılmış olup sonuç Şekil 7.9'dadır. Bu şekilde görüldüğü üzere sistem referansı işaretine 10 ile 20 saniye süreleri arasında ulaşmıştır. Şekil 7.10'da yuvarlanma açısı kontrolü yapılmıştır. Şekil 7.11'da sapma açısı kontrolü yapılmıştır. Şekil 7.12'da yunuslama açısı kontrolü yapılmıştır. Yapılan bu kontrollerde sistem istenilen davranış olan referans işarete ulaşmıştır. Bu sayede bu aşamadan sonra verilmiş olunan iz takibi işlemleri elde edilen model kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Denklem (7.1)'de verilen rota için PID kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 7.13 ile 7.16 arasında verilmiştir.

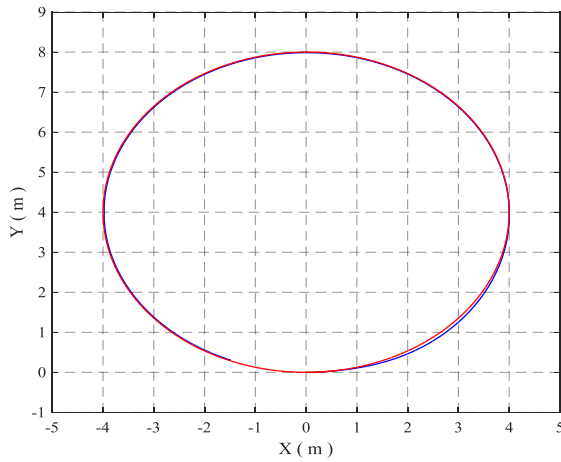
$$r_d(t) = \begin{cases} x_d(t) = 4\sin(0.032\pi t) \\ y_d(t) = 4 + 4\sin(0.032\pi t - 0.5\pi) \\ z_d(t) = -0.02t \end{cases} \quad (7.1)$$

Denklem (7.1)'de verilen üç boyutlu iz için sistem cevabı Şekil 7.13'de verilmiştir.

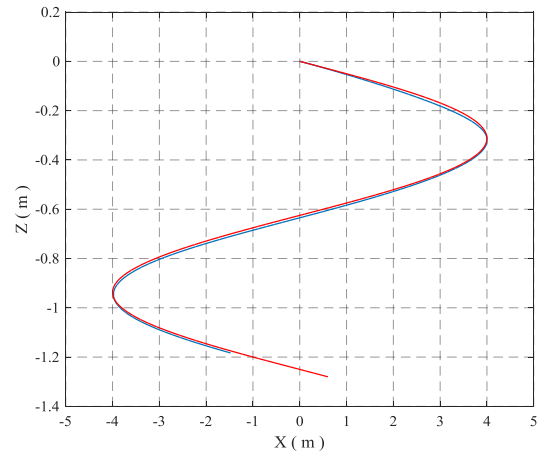


Şekil 7. 13 Robot Balık sisteminde PID ile yapılan üç boyutlu iz takibi

Bu şekilde, sistem verilen referans eğrisini minimum hata ile takip etmiştir. Bu takip işlemi Şekil 7.14 ve 7.15'te işlemini eksen bazlı incelenmiştir.

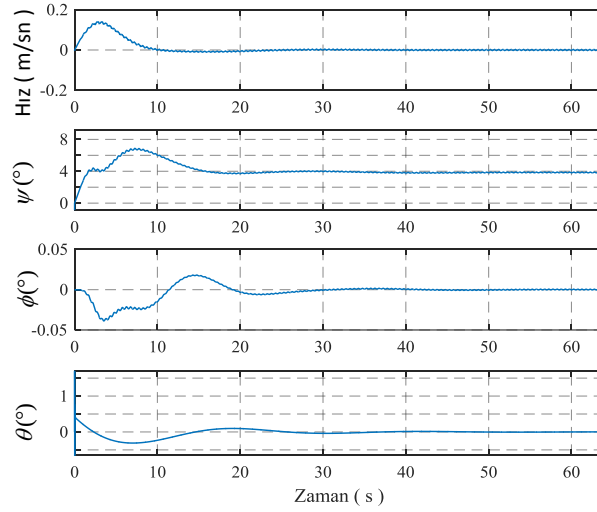


Şekil 7. 14 Yapılan hareketin XY eksen iz düşümü



Şekil 7. 15 Yapılan hareketin XZ eksen iz düşümü

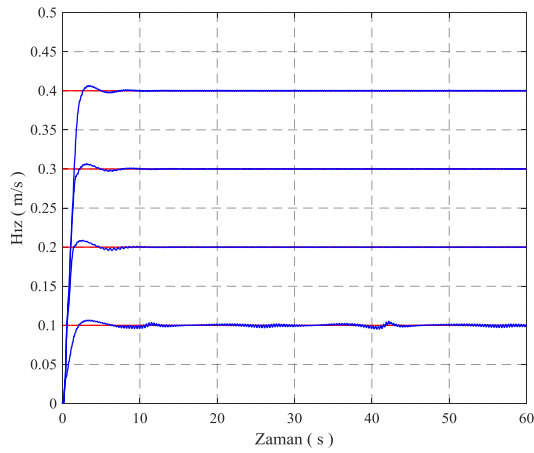
Bu şekillerde, X eksenine göre Y ve Z eksenindeki hareketler verilmiştir. Bu hareket için açı ve hız hataları Şekil 7.16'da verilmiştir.



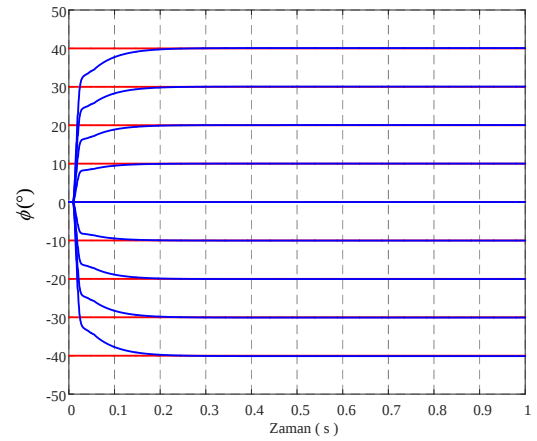
Şekil 7. 16 İstenilen takip işlemi için parametre hataları

Burada, hız ve oryantasyon açısı hataları verilmiştir. Bu hatalarının verilme nedeni Bölüm 4’te anlatılmış olan konum vektörünün genlik ve açı tanımından dolayıdır.

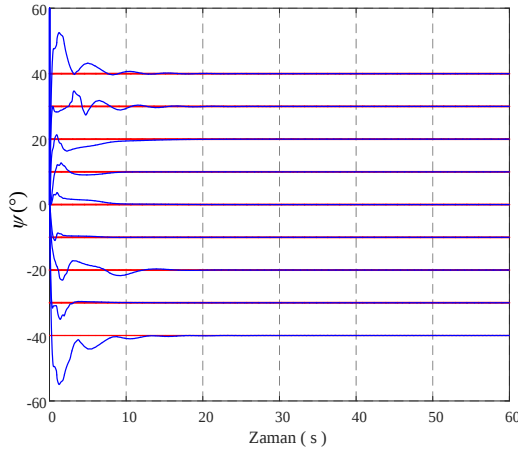
Robot balık sistemine kapalı çevrim kontrol algoritmalarından diğer bir uygulanan algoritma ise KKK’ dür. Bu algoritmaya ait sonuçlar aşağıdaki Şekil 7.17 ile 7.20 arasında verilmiştir. Açılara ait sonuçlar elde edilirken kontrol edilmek istenen parametre hariç diğer açı değişkenleri sıfır olarak kabul edilmiştir.



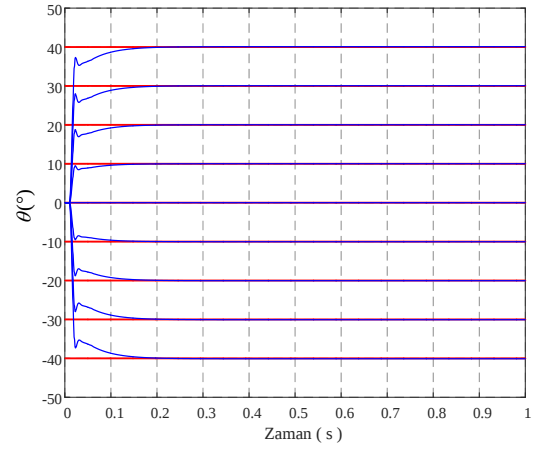
Şekil 7. 17 Farklı hız referanslarına göre KKK sonuçları



Şekil 7. 18 Farklı yuvarlanma açısı referanslarına göre KKK sonuçları



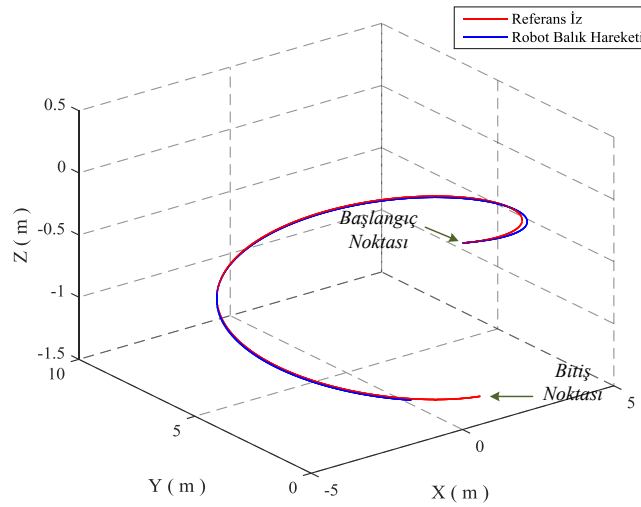
Şekil 7. 19 Farklı sapma açısı referanslarına göre KKK sonuçları



Şekil 7. 20 Farklı yunuslama açısı referanslarına göre KKK sonuçları

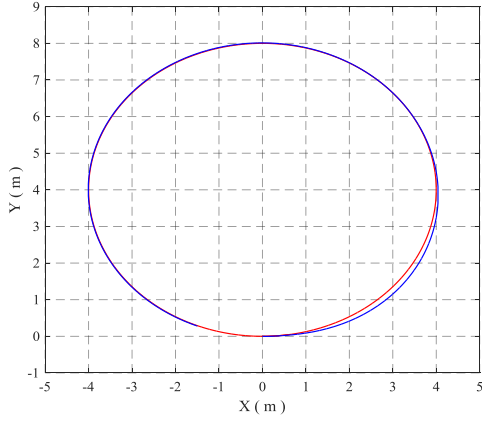
Bu grafiklerde; kırmızı referansı, mavi ise sistem çıkışını simgelemektedir. Kontrol edilen robot balık sisteminin hız kontrolü oryantasyon açılarının sıfır olarak kabul edilerek yapılmış olup sonuç Şekil 7.17'dedir. Bu şekilde görüldüğü üzere sistem referansı işaretine 0 ile 10 saniye süreleri arasında ulaşmıştır. Şekil 7.18'de yuvarlanma açısı kontrolü yapılmıştır. Şekil 7.19'da sapma açısı kontrolü yapılmıştır. Şekil 7.20'de yunuslama açısı kontrolü yapılmıştır. Yapılan bu kontrollerde sistem istenilen davranış olan referans işarete ulaşmıştır. Bu sayede bu aşamadan sonra verilmiş olunan iz takibi işlemleri elde edilen model kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Denklem (7.1)'de verilen rota için KKK kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 7.21 ile 7.24 arasında verilmiştir.

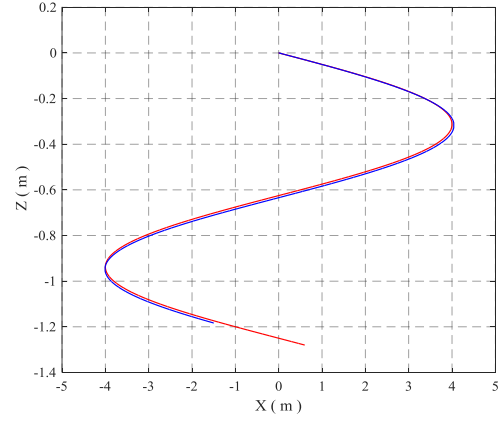


Şekil 7. 21 Robot Balık sisteminde KKK ile yapılan üç boyutlu iz takibi

Bu şekilde, sistem verilen referans eğrisini minimum hata ile takip etmiştir. Bu takip işlemi Şekil 7.22 ve 7.23’de işlemini eksen bazlı incelenmiştir.

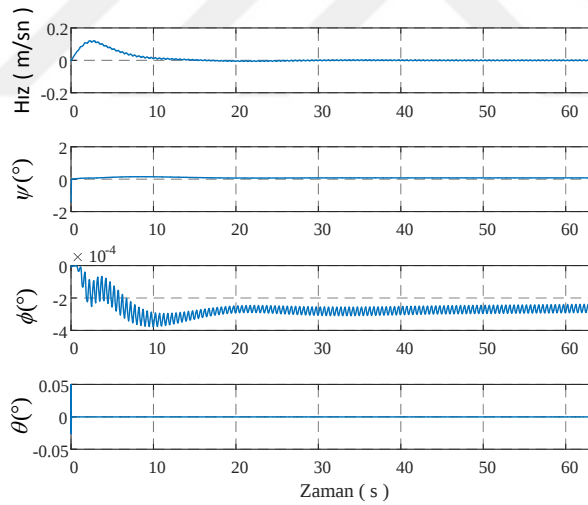


Şekil 7. 22 Yapılan hareketin XY eksen iz düşümü



Şekil 7. 23 Yapılan hareketin XZ eksen iz düşümü

Bu şekillerde, X eksenine göre Y ve Z eksenindeki hareketler verilmiştir. Bu hareket için açı ve hız hataları Şekil 7.24’de verilmiştir.



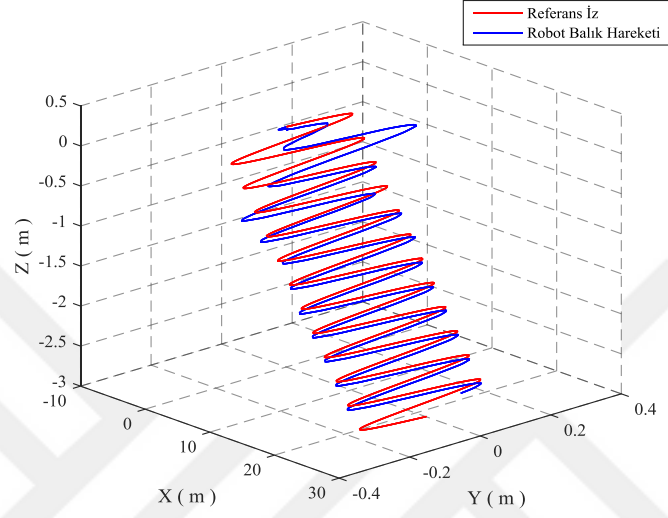
Şekil 7. 24 İstenilen takip işlemi için parametre hataları

Burada, hız ve oryantasyon açısı hataları verilmiştir. Zamanla hataların sıfıra yakınsadığı görülmektedir. Bu sayede verilen izin minimum hata ine takip edildiği anlaşılmaktadır.

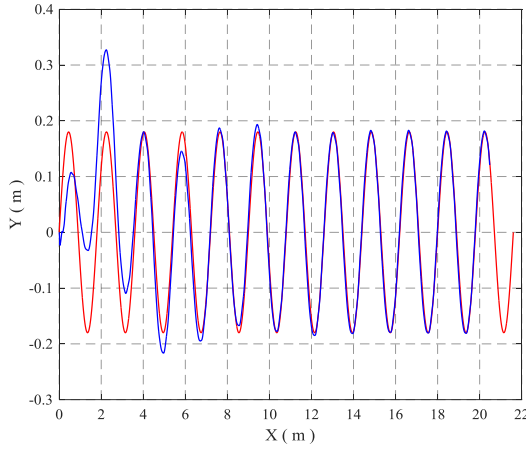
Denklem (7.2)’de verilen sistemin ulaşabileceği hızdan daha hızlı rota için KKK kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 7.25 ile 7.28 arasında verilmiştir.

$$r_d(t) = \begin{cases} x_d(t) = 0.36t \\ y_d(t) = 0.18\sin(0.4\pi t) \\ z_d(t) = -0.05t \end{cases} \quad (7.2)$$

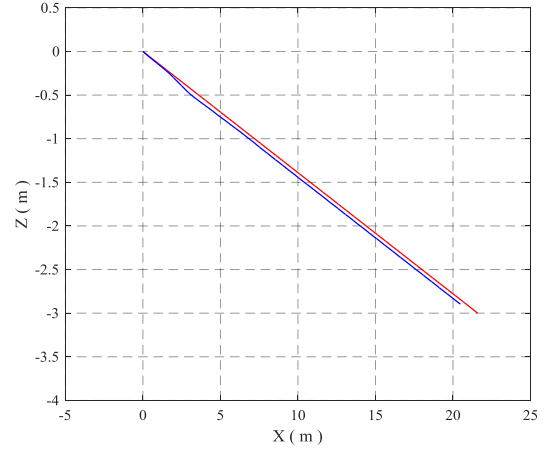
Bu şekillerde, X eksenine göre Y ve Z eksenindeki hareketler verilmiştir. Bu hareket için açı ve hız hataları Şekil 7.28’de verilmiştir.



Şekil 7. 25 Robot balık sisteminde KKK ile yapılan üç boyutlu iz takibi

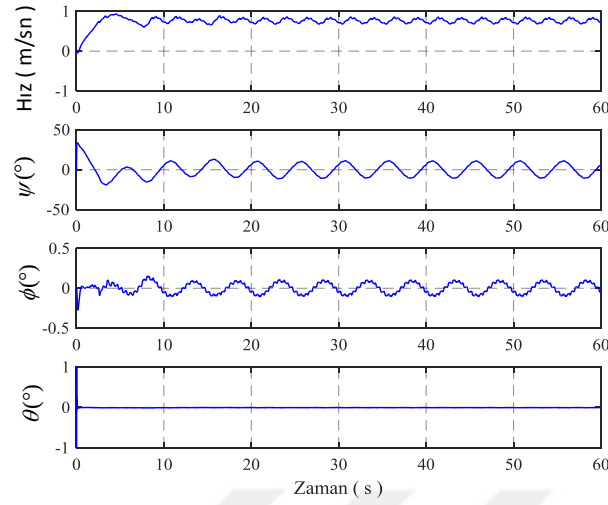


Şekil 7. 26 Yapılan hareketin XY eksen iz düşümü



Şekil 7. 27 Yapılan hareketin XZ eksen iz düşümü

Bu şekilde, sistem verilen referans eğrisini kalıcı bir durum hatası ile takip etmiştir. Bu hatanın nedeni sistemin ulaşabileceğinden daha hızlı bir rota üretilip sisteme verilmesidir. Bu takip işlemi Şekil 7.26 ve 7.27 de işlemini eksen bazlı incelenmiştir.

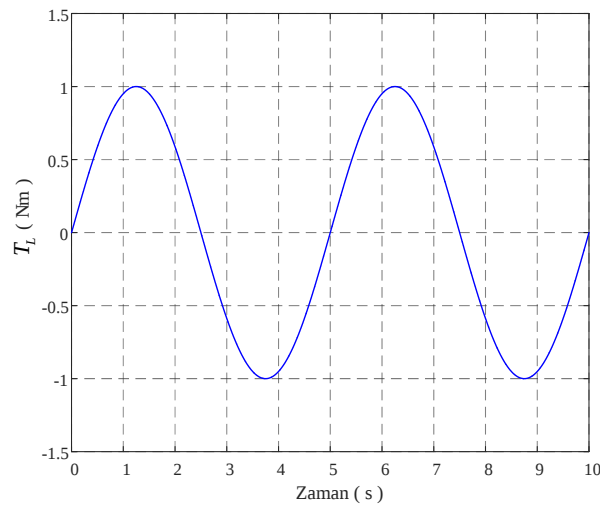


Şekil 7. 28 İstenilen takip işlemi için parametre hataları

Burada, hız ve oryantasyon açısı hataları verilmiştir. Zamanla oryantasyon hataların sıfıra yakınsadığı ve hız hatasının kalıcı durum hatasına dönüştüğü görülmektedir. Bu sayede verilen izin sistem tarafından belirli bir gecikme ile takip edilmiştir.

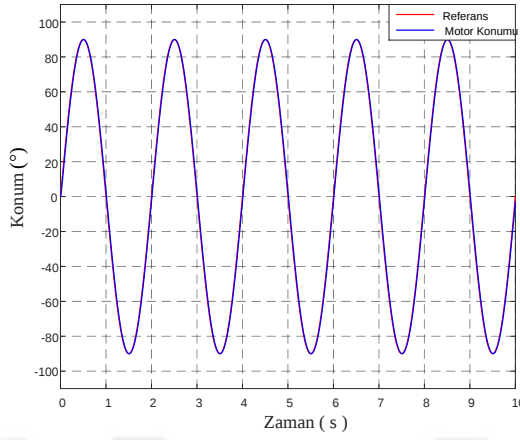
## 7.2.Robot Kol İçin Sonuçlar

Robot kolu gerçekleştirmek için modellenen motorun performansı değişken yük momentleri ve değişken referans girişlerle test edilmiştir ve uygulanan yük momenti Şekil 7.29’ da ve sonuçlar Şekil 7.30 ile 7.33 arasında verilmiştir.

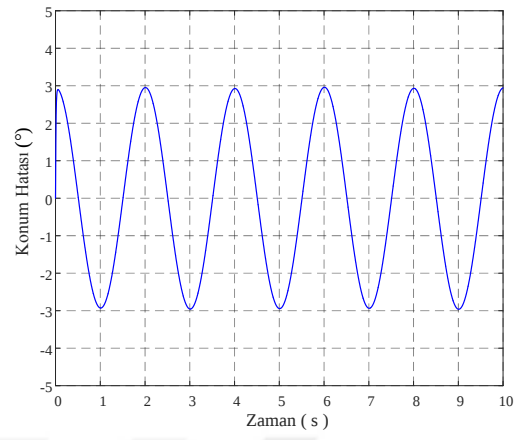


Şekil 7. 29 Motora uygulanan yük momenti

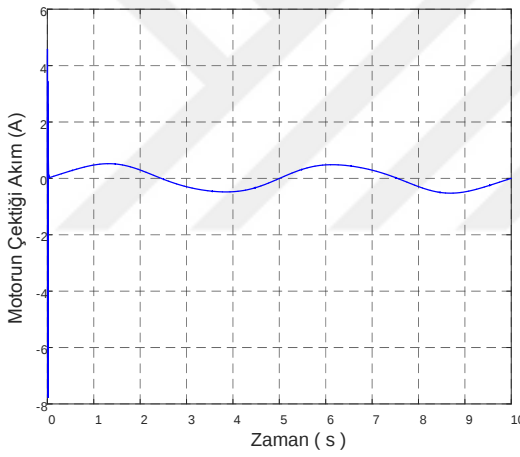
Bu şekildeki uygulanan bir moment sonrası motorun davranışı Şekil 7.30 ile 7.33 arasında verilmiştir.



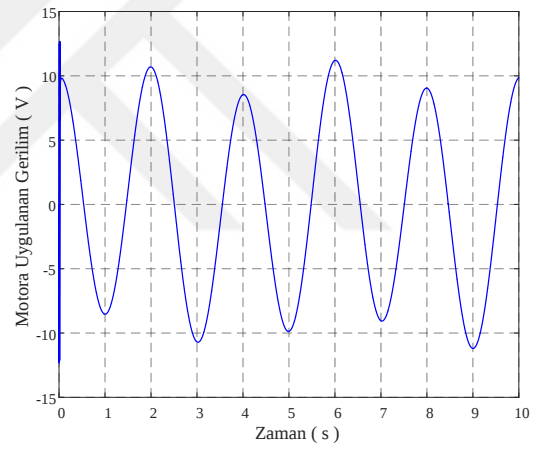
Şekil 7. 30 Referans giriş ve sistem sonucu



Şekil 7. 31 Konum hatası



Şekil 7. 32 Armatür akımı



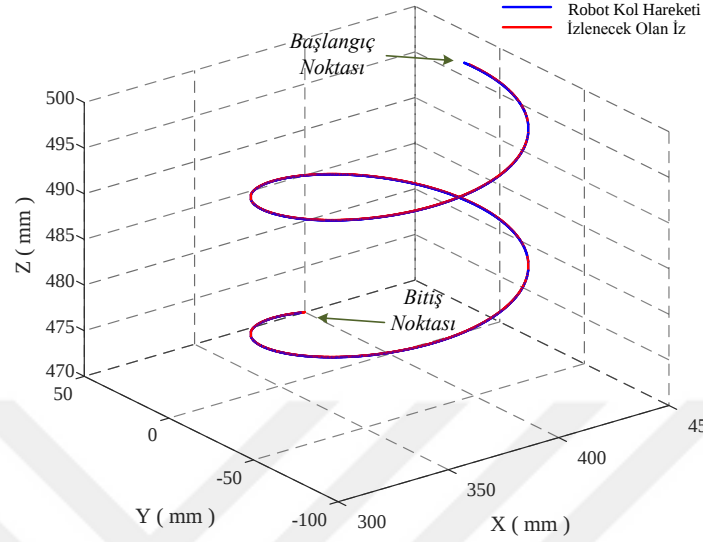
Şekil 7. 33 Kontrol sinyali

Bu şekillerde, motordan istenen referansa değişken yük momentleri altında ulaşabildiği ve yük altında ulaşılan referans işareti için motorun çektiği akım ve motora uygulanan gerilim işaretleri gösterilmiştir.

Denklem (7.3)'de verilen rota için sonuçlar Şekil 7.34 ile 7.37 arasında verilmiştir.

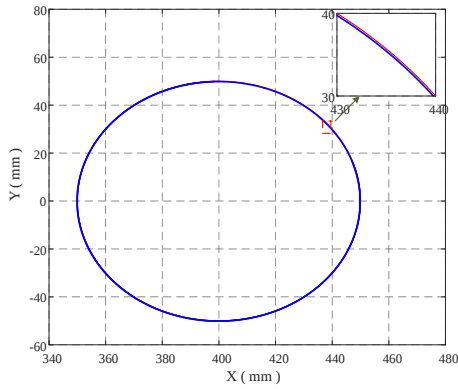
$$r_d(t) = \begin{cases} x_d(t) = (400 + 50\sin(0.4\pi t)) / 1000 \\ y_d(t) = (50\sin(0.4\pi t + 0.5\pi)) / 1000 \\ z_d(t) = (500 - 3t) / 1000 \end{cases} \quad (7.3)$$

Denklem (7.3)'de verilen üç boyutlu iz için sistem cevabı Şekil 7.34'de verilmiştir.

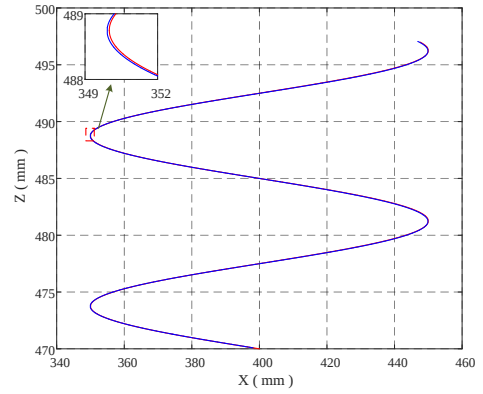


Şekil 7. 34 Verilen iz için yapılan üç boyutlu iz takibi

Bu şekilde, sistem verilen referans eğrisini minimum hata ile takip etmiştir. Bu takip işlemi Şekil 7.35 ve 7.36'da işlemini eksen bazlı incelenmiştir.

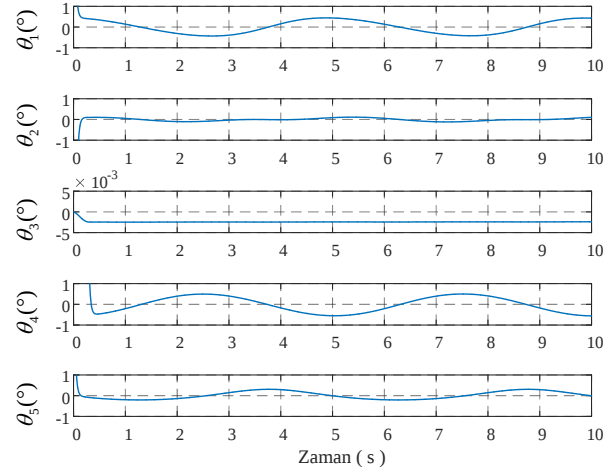


Şekil 7. 35 Yapılan hareketin XY eksen iz düşümü



Şekil 7. 36 Yapılan hareketin XZ eksen iz düşümü

Bu şekillerde, X eksenine göre Y ve Z eksenindeki hareketler verilmiştir. Bu hareket için eklemlerdeki açı hataları Şekil 7.37'de verilmiştir.

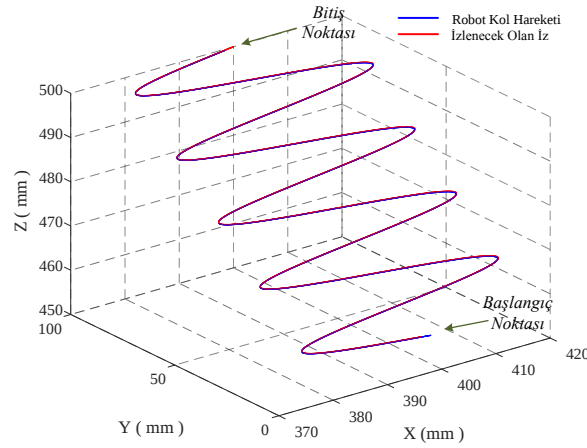


Şekil 7. 37 İstenilen yörünge için eklem aç ı hataları

Burada, eklemlerin konum hataları verilmiştir. Zamanla bu hatalar sıfıra yakınsadığından dolayı verilen izin sıfıra yakın bir hata ile takip edildiği anlaşılr.

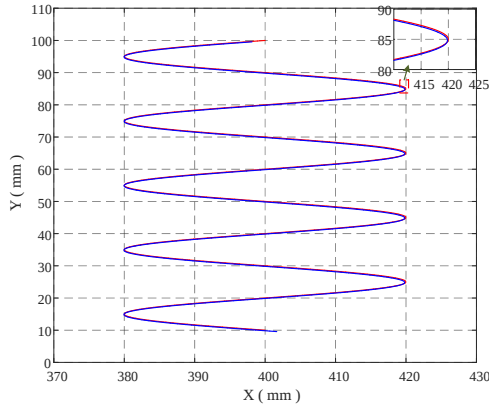
Denklem (7.4)'de verilen rota için sonuçlar Şekil 7.38 ile 7.41 arasında verilmiştir.

$$r_d(t) = \begin{cases} x_d(t) = (400 + 20\sin(\pi t)) / 1000 \\ y_d(t) = (10t) / 1000 \\ z_d(t) = (450 - 5t) / 1000 \end{cases} \quad (7.4)$$

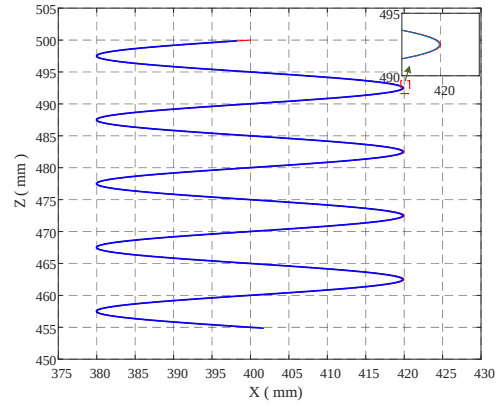


Şekil 7. 38 Verilen iz için yapılan üç boyutlu iz takibi

Bu şekilde, sistem verilen referans eğrisini minimum hata ile takip etmiştir. Bu takip işlemi Şekil 7.39 ve 7.40'da işlemini eksen bazlı incelenmiştir.

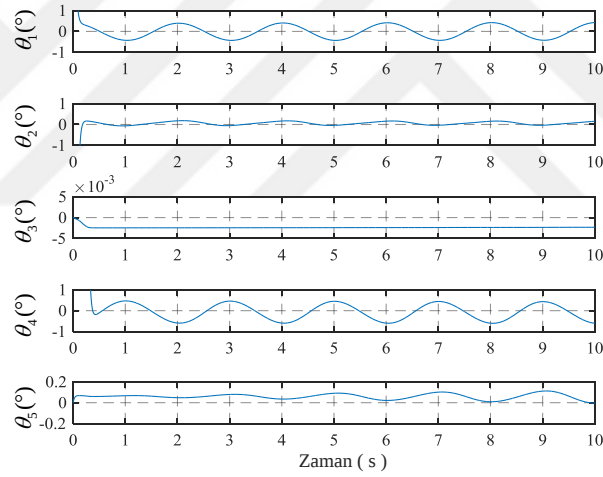


Şekil 7. 39 Yapılan hareketin XY eksen iz düşümü



Şekil 7. 40 Yapılan hareketin XZ eksen iz düşümü

Bu şekillerde, X eksenine göre Y ve Z eksenindeki hareketler verilmiştir. Bu hareket için eklemlerdeki açı hataları Şekil 7.41’de verilmiştir.



Şekil 7. 41 İstenilen yörünge için eklem açı hataları

Burada, eklemlerin konum hataları verilmiştir. Zamanla bu hatalar sifira yakınsadığından dolayı verilen izin sifira yakın bir hata ile takip edildiği anlaşılmaktadır.

### 7.3.Değerlendirme

Bu tez çalışmasında üç boyutlu iz takibi konusunda yapılan çalışmalar incelenmiş ve incelenen çalışmalardan ilham alınarak sistemler belirlenmiştir. Belirlenen sistemler hem benzetim ortamında çalışılması daha makul olacağından dolayı hem de kontrol yapılarının belirlenmesi ve hesaplanabilmesi için modellemesine karar verilmiştir. Robot balık sistemi

Lagrange Mekaniği kullanılarak *Simulink* ve robot kol sistemi *SimMechanics* ortamından yararlanılarak modellenmiştir.

Modellenen robot balık sisteminin hızı, sapma açısı, yuvarlanma ve yunuslama açıları PID ve KKK'ün anahtarlama fonksiyonu ile kontrol edilmiştir. Bu kontrol yöntemi parametreleri deneme yanılma yöntemi ile saptanmıştır. Kontrol edilen bu parametreler sayesinde sistemin şu anda bulunduğu nokta ile olması gereken nokta arasındaki fark minimize edilerek üç boyutlu iz takibi gerçekleştirilmiştir.

Robot kol sisteminin temel parçası olan eklemlerde bulunan doğru akım motorları *Simspace* araç kutusu kullanılarak modellenmiştir. Bu araç kutusuna bulunan doğru akım motorunun miline enkoder bağlanılarak motor milinin hızı ölçülmüş ve bu hızın integrali alınarak konum verisi elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler ile arzu edilen konum arasındaki farkı azaltacak iki adet PID tasarlanmıştır. Motorlar modellendikten sonra daha önceden modellenen robot kol sistemine entegre edilmiştir. İstenilen yörüngenin ters kinematik denklemlerde işleme girmesi sonucu oluşan açılar kontrol edilen motorlara verilmiştir. Motorların konum çıkışları ise robot kol mekanizmasına ve düz kinematik denklemlere verilerek, sırası ile moment ve konum bilgisi elde edilmiştir.

Her hangi bir sisteme iz takibi işlemi yaptırılabilmesi için sisteme uygun izin üretilmesi gerekir. Bu çalışmada iz üretim yöntemlerinden olan model üzerine deneme yöntemi kullanılmıştır. Denklem (7.2) hariç diğer izler verilen sistemlere uygun iken bahsi geçen denklemde ki iz sistem için hızlıdır. Bu sayede sistemin fiziksel davranışları hakkında bilgi sahibi olunarak modelin sınırları belirlenmiş olur.

İleride yapılacak çalışmalarda, bu kontrol algoritmalarının optimizasyon yöntemleri ile en uygun değerleri belirlenmeye ve farklı kontrol algoritmaları ile bu sistemler kontrol edilerek bu sistemlerin iz takibi performansı geliştirilmeye çalışılacaktır. Ayrıca farklı yöntemler kullanılarak farklı izler üretilip, kontrolörlerin bu yeni izler üzerindeki performansı incelenecektir.

## KAYNAKLAR

- Akpolat, Z H.** 1999. "Application of Fuzzy-Sliding Mode Control and Electronic Load Emulation to the Robust Control of Motor Drives". Phd. Thesis
- Alessandretti, a., a.P. Aguiar, ve C.N. Jones.** 2013. "Trajectory-tracking and path-following controllers for constrained underactuated vehicles using Model Predictive Control". *Control Conference (ECC), 2013 European*, 1371–76.
- Bal, Cafer, Deniz Korkmaz, Gonca Ozmen Koca, Mustafa Ay, ve Zuhtu Hakan Akpolat.** 2016. "Link Length Optimization of A Biomimetic Robotic Fish Based on Big Bang - Big Crunch Algorithm", 189–93. doi:10.1109/MMAR.2016.7575131.
- Bechlioulis, C P, ve K J Kyriakopoulos.** 2013. "Robust Prescribed Performance tracking control for unknown underactuated torpedo-like AUVs", 4388–93.
- Belharet, Karim, David Folio, ve Antoine Ferreira.** 2010. "3D MRI-based predictive control of a ferromagnetic microrobot navigating in blood vessels". *2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, sayı i: 808–13. doi:10.1109/BIOROB.2010.5628063.
- Bing, Wei, ve Luo Xiang.** 2008. "A Simulation Research on 3D Visual Servoing Robot Tracking and Grasping a Moving Object". *Practice*, sayı 50775037: 2–4.
- Borgstrom, Per Henrik, Nils Peter Borgstrom, Michael J Stealey, Brett L Jordan, Guarav S Sukhatme, Maxim A Batalin, ve William J Kaiser.** 2009. "Design and Implementation of NIMS3D, a 3-D Cabled Robot for Actuated Sensing Applications". *IEEE Transactions On Robotics* 25 (2): 325–39. doi:10.1109/TRO.2009.2012339.
- Breivik, M, ve T.I. Fossen.** 2009. "Guidance laws for autonomous underwater vehicles". *Underwater vehicles*, sayı Wernli 2000: 51–76. doi:10.5772/107.
- Chaudhary, Himanshu.** 2012. "Trajectory tracking control of scorb-er v plus robot manipulator based on kinematical approach" 4 (3): 1174–82.

- Chingozha, Tinashe, Otis Nyandoro, ve Ayushi Malani.** 2013. “Low cost controller for small scale helicopter”. *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 439–44. doi:10.1109/ICIEA.2013.6566409.
- Cichella, Venanzio, Isaac Kaminer, Enric Xargay, Vladimir Dobrokhodov, Naira Hovakimyan, a. Pedro Aguiar, ve Antonio M. Pascoal.** 2012. “A Lyapunov-based approach for Time-Coordinated 3D Path-Following of multiple quadrotors”. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 1776–81. doi:10.1109/CDC.2012.6425933.
- Deshpande, Vivek A, ve P. M. George.** 2012. “Analytical Solution for Inverse Kinematics of SCORBOT- ER-Vplus Robot”. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2 (3): 478–81.
- Ding, Rui, Junzhi Yu, Qinghai Yang, Min Tan, ve Jianwei Zhang.** 2009. “CPG-based dynamics modeling and simulation for a biomimetic amphibious robot”. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2009*, 1657–62. doi:10.1109/ROBIO.2009.5420415.
- Encarnacao, P., ve a. Pascoal.** 2001. “Combined trajectory tracking and path following: an application to the coordinated control of autonomous marine craft”. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.01CH37228)* 1 (December): 964–69. doi:10.1109/.2001.980234.
- Fadali, M. S.** 2005. “Sliding Mode Control”, Lecture Notes
- Fatehi, M. H., A. R. Vali, M. Eghtesad, ve A. A. Fatehi.** 2012. “Modeling and control of 3-PRS parallel robot and simulation based on SimMechanics in MATLAB”. *Proceedings - 2011 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation, ICCIA 2011*, 785–90. doi:10.1109/ICCIAutom.2011.6356760.
- Fossen, Thor I.** 1994. “Guidance and Control of Ocean Vehicles”. *Automatica*. doi:10.1016/0005-1098(96)82331-4.
- Fossen, Thor I.** 2011. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. doi:10.1002/9781119994138.

- Hongan Wang.** 2009. *Design and Implementation of a Biomimetic Robotic Fish.*
- Hung, J Y, W Gao, ve J C Hung.** 1993. “Variable structure control: a survey”. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 40 (1): 2–22. doi:10.1109/41.184817.
- Jinghu, Yu, ve Yi Cao.** 2009. “Analysis of relationship between efficiency and motion parameters of robotic fish”. *2009 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IHMSC 2009* 1: 401–4. doi:10.1109/IHMSC.2009.108.
- Karthika, P, Ameen Basha M, P Ayyappan, C K Sidharthan, ve V R Rajakumar.** 2016. “PV Based Speed Control of Dc Motor Using Interleaved Boost Converter With Sic MOSFET and Fuzzy Logic Controller”, 1826–30.
- Koca, Gonca Ozmen.** 2005. “Kayma Kipli Kontrol ve Bulanık Mantık Kullanarak Elektrikli Araçların Hız Kontrolü”. Master Thesis.
- Koca, Gonca Ozmen.** 2010. “Dört Kol Mekanizmalı Mekatronik Bir Sistemin Akıllı Yöntemlerle Kontrolü”.
- Korkmaz, D., U. Budak, C. Bal, G. Ozmen Koca, ve Z. H. Akpolat.** 2012. “Modeling and implementation of a biomimetic robotic fish”. *SPEEDAM 2012 - 21st International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion* 9: 1187–92. doi:10.1109/SPEEDAM.2012.6264510.
- Kumar, Rahul R, ve Praneel Chand.** 2015. “Inverse Kinematics Solution for Trajectory Tracking using Artificial Neural Networks for SCORBOT ER-4u”, 364–69. doi:10.1109/ICARA.2015.7081175.
- Lauder, George V, ve Peter G A Madden.** 2006. “Learning from fish: Kinematics and experimental hydrodynamics for roboticists”. *International Journal of Automation and Computing* 3 (4): 325–35. doi:10.1007/s11633-006-0325-0.
- Le, Tien Dung, Hee J. Kang, ve Young Shick Ro.** 2010. “Robot manipulator modeling in Matlab-Simmechanics with PD control and online gravity compensation”. *2010 International Forum on Strategic Technology, IFOST 2010*, sayı 1: 446–49. doi:10.1109/IFOST.2010.5668085.

- Lee, P M, B H Jun, ve Y K Lim.** 2008. "Review on underwater navigation system based on range measurements from one reference". *Oceans 2008 - Mts/Ieee Kobe Techno-Ocean, Vols 1-3* 0: 999–1003. doi:10.1109/OCEANSKOB.2008.4531072.
- Li, Ye, Cong Wei, Qi Wu, Pengyun Chen, Yanqing Jiang, ve Yiming Li.** 2015. "Study of 3 dimension trajectory tracking of underactuated autonomous underwater vehicle". *Ocean Engineering* 105: 270–74. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.06.034.
- Li, Zheng, ve Qunjing Wang.** 2007. "Modeling and Control of a Permanent Magnet Spherical Stepper Motor", 1574–79.
- Lin, Kevin, ve Mon-Chau Shie.** 2011. "Biologically inspired 3D trajectory prediction system using a moth flight-to-light tracking model". *2011 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, 66–71. doi:10.1109/ICSIPA.2011.6144076.
- Mellinger, Daniel, ve Vijay Kumar.** 2011. "Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors". *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2520–25. doi:10.1109/ICRA.2011.5980409.
- Nageotte, Florent, Philippe Zanne, Christophe Doignon, ve Michel Mathelin.** 2006. "Visual Servoing-Based Endoscopic Path Following for Robot-Assisted Laparoscopic Surgery". *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2364–69. doi:10.1109/IROS.2006.282647.
- Ortega, Romeo, Loria Antonio, Per Johan Nicklasson, ve Hebertt Sira-Ramirez.** 1998. *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems*.
- Pacheco, Rafael Renan, Marcelo S. Hounsell, Roberto S.U. Rosso Jr., ve Andre B. Leal.** 2010. "Smooth Trajectory Tracking Interpolation on a Robot Simulator". *2010 Latin American Robotics Symposium and Intelligent Robotics Meeting*, 13–18. doi:10.1109/LARS.2010.31.
- Predescu, L. ; Predescu, M;** 2013. "Planning the trajectory of the scorbot-er vii robot", say1 October: 483–88.

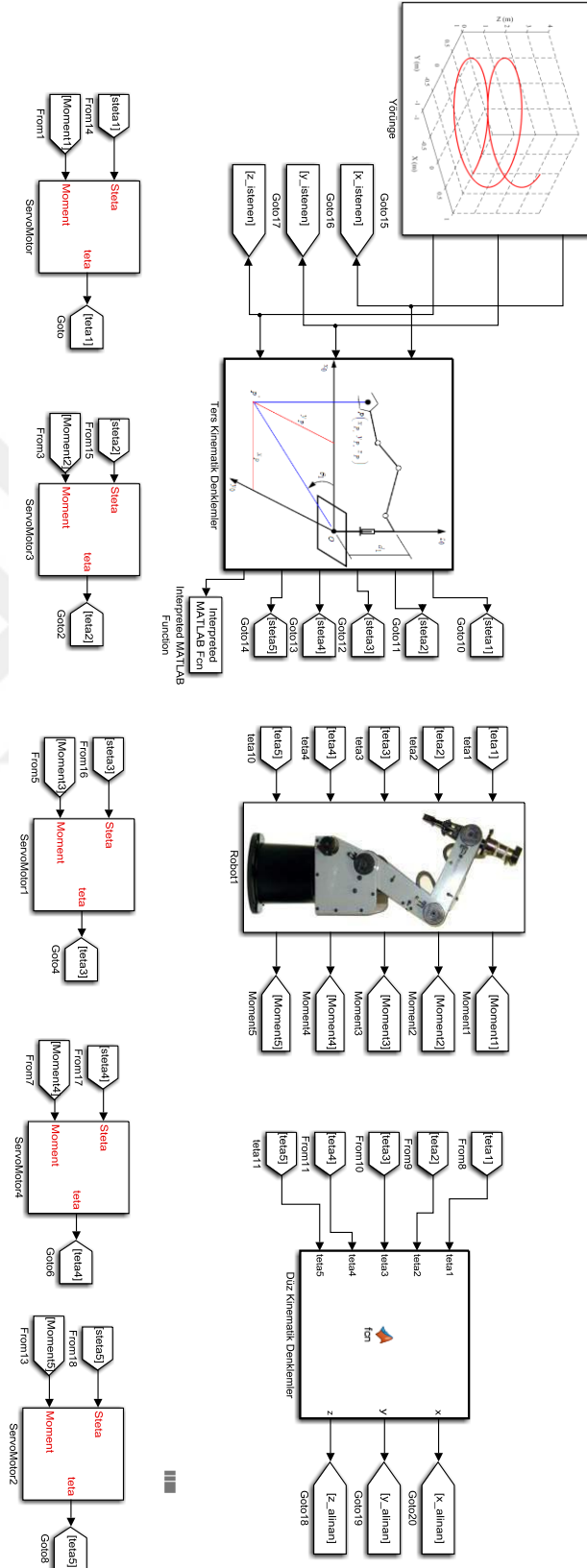
- Santana, Lucas Vago, Alexandre Santos Brandao, Mario Sarcinelli-Filho, ve Ricardo Carelli.** 2014. “A Trajectory Tracking and 3D Positioning Controller for the AR . Drone Quadrotor”. *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 118–23. doi:10.1109/ICUAS.2014.6842321.
- Secoli, Riccardo.** 2013. “Closed-loop 3D Motion Modeling and Control of a Steerable Needle for Soft Tissue Surgery”, sayı 3: 5811–16.
- Sen, Zhang, G U Wanli, H U Yunfeng, D U Juan, ve Chen Hong.** 2016. “Angular Speed Control of Brushed DC Motor Using Nonlinear Method: Design and Experiment”, 1045–50.
- Shneydor, NA.** 1998. *Missile Guidance and Pursuit: Kinematics, Dynamics and Control*. <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=QUykAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=missile+guidance+and+pursuit+Kinematics+,+Dynamics+and+Control&ots=98shDgoTOE&sig=70FF86XYzcOPLjBW2Gc7aCpaLr4>.
- Shtessel, Yuri.** 2014. *Sliding mode control and observation*. doi:10.1007/978-0-8176-4893-0.
- Singhal, Rahul, ve P B Sujit.** 2015. “3D Trajectory Tracking For a Quadcopter using MPC on a 3D Terrain”, sayı x: 1385–90. doi:10.1109/ICUAS.2015.7152434.
- Sira-Ramirez, Hebertt.** 2000. *Sliding Mode Control, The delta-sigma modulation approach*. doi:10.1007/978-3-319-17257-6.
- Spurgeon, Sarah.** 2014. “Sliding mode control : a tutorial”. *Proc. of the European Control Conference (ECC), 2014*, sayı 1: 2272–77. doi:10.1109/ECC.2014.6862622.
- Steinmetz.** 1902. “American Institute of Electrical Engineers”. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers XIX*. doi:10.1109/T-AIEE.1902.4763974.
- Suebsaiprom, Pichet, ve Chun-Liang Lin.** 2015. “Maneuverability modeling and trajectory tracking for fish robot”. *Control Engineering Practice* 45: 22–36. doi:10.1016/j.conengprac.2015.08.010.
- Tang, Le, Lei Zhang, ve Feifei Ru.** 2012. “Double Inversed Pendulum Based on Kalman Filter”, sayı 1csai: 462–64.

- Utkin, V I.** 1993. "Sliding mode control design principles and applications to electric drives". *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 40 (1): 23–36. doi:10.1109/41.184818.
- Verma, Anurag, ve Vivek A. Deshpande.** 2011. "End-effector position analysis of SCORBOT-ER Vplus robot". *International Journal of Smart Home* 5 (1): 1–6.
- Vo, T Q, H S Kim, ve B R Lee.** 2012. "Smooth gait optimization of a fish robot using the genetic-hill climbing algorithm". *Robotica* 30 (May): 257–78. doi:10.1017/s0263574711000555.
- Wa Hamzah, Rohana Mamat , Siti Ha.** 2015. "Behaviour of Steel Fibre Lightweight Wall Panel under One Way In-Plane Action". *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 4 (4): 1801–8. doi:10.15680/IJRSET.2015.0404001.
- Xu, Tiantian, Gilgueng Hwang, ve Nicolas Andreff.** 2015. "Planar Path Following of 3-D Steering Scaled-Up Helical Microswimmers" 31 (1): 117–27. doi:10.1109/TRO.2014.2380591.
- Yeroglu, Celaledin, ve Gürkan Kavuran.** 2014. "Sliding mode controller design with fractional order differentiation: applications for unstable time delay systems". *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* 22: 1270–86. doi:10.3906/elk-1212-149.
- Yu, J Z, M Wang, Z S Su, M Tan, ve J W Zhang.** 2011. "Dynamic Modeling and Its Application for a CPG-Coupled Robotic Fish". *2011 Ieee International Conference on Robotics and Automation (Icra)*. doi:10.1109/ICRA.2011.5979651.
- Yu, Junzhi, Min Tan, Shuo Wang, ve Erkuai Chen.** 2004. "Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics* 34 (4): 1798–1810. doi:10.1109/TSMCB.2004.831151.
- Yu, Junzhi, Shuo Wang, ve Min Tan.** 2003. "Design of a free-swimming biomimetic robot fish". *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM* 1 (Aim): 95–100. doi:10.1109/AIM.2003.1225078.

- Yu, Junzhi Yu Junzhi, Long Wang Long Wang, ve Min Tan Min Tan.** 2005. “A framework for biomimetic robot fish’s design and its realization”. *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.* 100871: 1593–98. doi:10.1109/ACC.2005.1470195.
- Zhang, Feitian, Osama Ennasr, Elena Litchman, ve Xiaobo Tan.** 2016. “Autonomous Sampling of Water Columns Using Gliding Robotic Fish: Algorithms and Harmful-Algae-Sampling Experiments”. *IEEE Systems Journal* 10 (3): 1271–81. doi:10.1109/JSYST.2015.2458173.
- Zhang, Hong, ve Ling Ling Chen.** 2009. “The research on the nonlinear control of carangiform biomimetic robotic fish”. *2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2009,* 3207–11. doi:10.1109/ICMA.2009.5246220.
- Zheng Li.** 2009. “Robust Control of PM Spherical Stepper Motor Based on Neural Networks”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56 (8): 2945–54. doi:10.1109/TIE.2009.2023639.
- Zhou, Chao, Zhiqiang Cao, Shuo Wang, ve Min Tan.** 2008. “04650657.Pdf”, 22–26.
- Zhou, Chao, Min Tan, Zhiqiang Cao, Shuo Wang, Douglas Creighton, Nong Gu, ve Saeid Nahavandi.** 2008. “Kinematic modeling of a bio-inspired robotic fish”. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 695–99. doi:10.1109/ROBOT.2008.4543286.
- URL-1,** <https://droneflyers.wordpress.com/worlds-cheapest-quadcopter/>
- URL-2,** [http://www.memagazinedigital.org/memagazine/march\\_2015/?pm=2&u1=friend&article\\_id=572923&pg=NaN#pgNaN](http://www.memagazinedigital.org/memagazine/march_2015/?pm=2&u1=friend&article_id=572923&pg=NaN#pgNaN)
- URL-3,** <http://hitecrcd.com/products/servos/waterproof-servos-2/d-845wp-32-bit-monster-torque-waterproof-steel-gear-servo/product>

# EKLER

## EK-1





## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Can Bingöl

mustafacanbingol@gmail.com

Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Mekatronik Mühendisliği Bölümü

ELAZIĞ

*Mustafa Can BİNGÖL*, 23 Nisan 1992 yılında Ankara’da doğmuştur. Ortaöğrenimini Ahmet Kabaklı Anadolu Öğretmen Lisesinde tamamlamıştır. 2010 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümünü bölüm birincisi olarak 2014 yılında tamamlamıştır. 2015 yılının Şubat ayında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atanmıştır. Yabancı dil eğitimini 2015 yılı içerisinde İstanbul Teknik Üniversitesinde almıştır. 2015 yı-



lından itibaren Fırat Üniversitesindeki görevine devam ederken aynı zamanda “Üç Boyutlu Hareket Kabiliyetine Sahip Carangiform Türünde Bir Biyomimetik Robot Balığın Tasarımı ve Gerçeklemesi” konulu 1001 projesinde bursiyer olarak görev almaktadır.