

Bir Otonom Sualtı Aracı Manipülatör Sisteminin Yörünge Takip Kontrolü

Trajectory Tracking Control of an Autonomous Underwater Vehicle Manipulator System

Ozan Korkmaz¹, S. Kemal İder², M. Kemal Özgören²

¹Dr., TÜBİTAK SAGE
ozan.korkmaz@tubitak.gov.tr

²Prof. Dr., ODTÜ, Makina Mühendisliği Bölümü
kider@metu.edu.tr, ozgoren@metu.edu.tr

Özet

Bu makalede, otonom bir sualtı aracı manipülatör (SAM) sistemi; hidrostatik kuvvetler, eklenmiş kütle, dinamik kaldırma, sürüklenme ve yanıl kuvvetlerin oluşturduğu hidrodinamik kuvvetler dikkate alınarak modellenmiştir. Hidrodinamik kuvvetler hesaplanırken uzuvların birbiri üzerindeki gölgeleme etkileri de dikkate alınmıştır. Sistem hareket denklemleri, sualtı aracının eyletici dinamiği de dahil edilerek Newton-Euler formülasyonu kullanımıyla türetilmiş ve sistemin uç işlemcisinin yörünge takibi için ters dinamik kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Benzetim sonuçları kontrol yönteminin etkin olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sualtı Aracı Manipülatör (SAM) sistemi, modelleme, yörünge takip kontrolü.

Abstract

In this paper, an autonomous underwater vehicle manipulator system (UVMS) is modeled considering hydrostatic forces and hydrodynamic effects such as added mass, lift, drag and side forces. The shadowing effects of the links on each other are also taken into account when computing the hydrodynamic forces. The system equations of motion are then derived using Newton-Euler formulation including the thruster dynamics. Next, an inverse dynamics control algorithm is applied for the end-effector trajectory tracking of the UVMS. Simulation results illustrate the effectiveness of the control method.

Keywords: Underwater vehicle manipulator system (UVMS), modeling, trajectory tracking control.

1. Giriş

Sualtı aracı manipülatör sistemleri, sualtı keşif ve gözetleme, liman ve kritik alan güvenliği, mayın tani, teşhis ve imha, boru hattı kaynak incelenmesi, kablo gömülmesi gibi işlemlerin

birçoğunda kullanımının yanı sıra kıyılarda ve nehirlerde biyoçeşitlilik çalışmaları ve bu alanlarda çevre kirliliğinin olup olmadığının saptanması için de kullanılmaktadır.

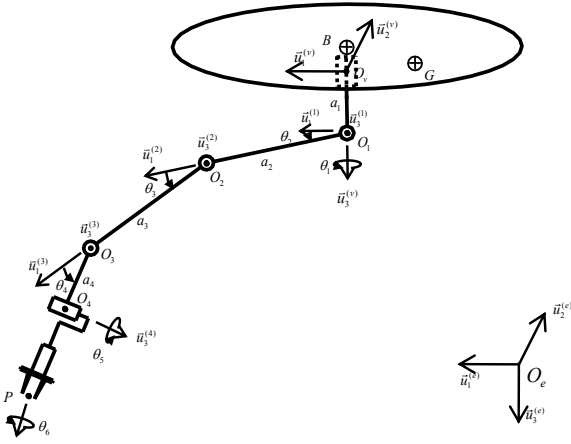
Sualtı ortamında yapılan çalışmalar göreceli olarak daha zorlu olmaktadır. Hem ortamın farklılığı ve değişkenliği hem de bozucu etkilere daha açık oluşu yukarıda bahsedilen çalışmaların gerçekleştirilmesi için sistemin tüm bu etkileri içine alacak şekilde modellenmesini ve kontrol sistemlerine uyarlanmasını gerektirmektedir. Bu bozucu etkilerin başında sürüklenme, kalkma gibi hidrodinamik kuvvetlerin yanı sıra kaldırma kuvveti gibi hidrostatik kuvvetler yer almaktadır. Diğer yandan bu kuvvetlerin etkisi altındaki ortam, araştırmacıları daha gerçekçi sistem modelleri ve kontrol yöntemleri geliştirmeye zorlamaktadır. Yazındaki bazı çalışmalarda uyarlamalı, gürbüz, kayan kipli, bulanık mantık kontrol yöntemleri sunulmuştur [1–11].

Bu makalede ise 12 serbestlik dereceli bir SAM sistemi modellenmiş ve yörünge takip kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Sistem, sistemi oluşturan sualtı aracı ve manipülatör uzuvları ayrı ayrı askıda olmamasına rağmen kendisi askıda kalacak şekilde tasarlanmıştır. Sferoid şekle sahip olan sualtı aracı ile manipülatörün ikinci ve üçüncü uzuvları üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvetler, bu uzuvların birbiri üzerindeki gölgeleme etkileriyle birlikte dikkate alınmıştır. Daha küçük olan diğer uzuvlardaki bu etkiler ihmal edilmiştir. Sualtı aracının eyletici dinamiği kontrol sistem tasarımına dahil edilmiştir. Yörünge takip kontrol algoritması manipülatörün uç işlemcisi ve sualtı aracına ayrı görevler tanımlama yoluyla uygulanmıştır. Bu görevler, aracın bulunduğu ilk konumda sabit tutulması ve uç işlemcinin önceden tanımlı yörüngeyi yüksek hassasiyetle takip etmesidir.

2. Sistem Tanıtımı

Ele alınan SAM sistemi 6 serbestlik derecesine sahip sualtı aracı ile 6 serbestlik dereceli silindirik uzuvlardan oluşan 6R seri

manipülâtörden oluşmaktadır ve Şekil-1’de gösterilmiştir. Sualtı aracı her üç eksene göre simetrik olup yayvan sferoid şekle sahiptir. Sualtı aracı ve manipülâtör uzuvları, ayrı ayrı askıda olmamasına rağmen kendisi askıda kalacak şekilde tasarlanmış olan sistem, başlangıçta hareketsizdir. Sualtı aracı ve uzuvların birim vektörleri, Denavit-Hartenberg işaret sistemine göre tanımlanmıştır. Manipülâtörün taban eksen takımı, araç gövdesine ait eksen takımı ile çakışık olacak şekilde seçilmiştir. Ataletsel eksen takımı ise, araç başlangıç konumunda iken aracınki ile aynı yönü gösterecek şekilde ortogonal ve sağ el kuralına uygun birim vektörlerden oluşmaktadır. B noktası, statik kaldırma kuvvetinin uygulandığı basınç merkezini, G noktası, yerçekiminin uygulandığı ağırlık merkezini, $O_1, O_2, v.s.$ noktaları araç ve uzuvların eksen takımlarının orijinlerini ve P noktası ise uç işleminin uygulama noktasını belirtmektedir.



Şekil 1: Sualtı Aracı Manipülâtör Sistemi

3. Sistem Dinamiği

3.1. Sualtı Aracı Dinamiği

Çalışmada ele alınan 6 serbestlik dereceli sualtı aracının konumu aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$\bar{\zeta} = [\bar{\zeta}_L^T \quad \bar{\zeta}_A^T]^T = [x_v \quad y_v \quad z_v \quad \phi_1 \quad \phi_2 \quad \phi_3]^T \quad (1)$$

Burada $\bar{\zeta}$ sualtı aracının Euler açıları ve manipülâtör taban noktasının (O_v) konumunu içeren ve seçilmiş olan ataletsel eksen takımına göre tanımlanmış genelleştirilmiş koordinatlar vektörüdür. Aracın genelleştirilmiş hız vektörü ise

$$\bar{\eta} = [\bar{\eta}_L^T \quad \bar{\eta}_A^T]^T = [u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Burada u, v ve w, O_v noktasının hız bileşenleri; p, q ve r ise aracın kendi eksen takımında tanımlanmış açısal hız bileşenleridir. Aracın hareket denklemleri Newton-Euler formülasyonu kullanılarak aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$\begin{aligned} \hat{M}_v \dot{\bar{\eta}} + \bar{Q}_v &= \bar{\tau}_v \\ \bar{\tau}_v &= \hat{A}_v \bar{F}_{mv} + \hat{B}_v \bar{T}_v + \bar{F}_{hsv} + \bar{F}_{hdv} \end{aligned} \quad (3a,b)$$

Bu denklemlerde, $\hat{M}_v \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ sualtı aracının genelleştirilmiş kütle matrisini, $\bar{Q}_v \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ hızla bağlı değişkenlerin oluşturduğu vektörü, $\bar{F}_{mv} \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ manipülâtör tarafından araca uygulanan tepki kuvvet ve momentlerini içeren vektörü, $\bar{F}_{hsv} \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ ve $\bar{F}_{hdv} \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ araca uygulanan hidrostatik ve hidrodinamik kuvvet ve momentleri içeren vektörleri, $\bar{T}_v \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ ise kontrol kuvvet ve momentleri vektörünü tanımlar.

3.2. Manipülâtör Dinamiği

Ele alınan 6 serbestlik dereceli uzaysal manipülâtörün eklem değişkenlerini içeren vektörü $\bar{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_6]^T$ olarak tanımlanabilir ve hareket denklemleri Newton-Euler formülasyonu kullanılarak aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \hat{M}_{m\theta} \ddot{\bar{\theta}} + \hat{M}_{m\eta} \dot{\bar{\eta}} + \bar{Q}_m &= \bar{\tau}_m \\ \bar{\tau}_m &= \hat{A}_m \bar{F}_{vm} + \hat{B}_m \bar{T}_m + \bar{F}_{hsm} + \bar{F}_{hdm} \end{aligned} \quad (4a,b)$$

Bu denklemlerde, $\hat{M}_{m\theta} \in \mathcal{R}^{36 \times 36}$ ve $\hat{M}_{m\eta} \in \mathcal{R}^{36 \times 36}$ manipülâtörün genelleştirilmiş kütle matrislerini, $\bar{Q}_m \in \mathcal{R}^{36 \times 1}$ hızla bağlı değişkenleri içeren vektörü, $\bar{F}_{vm} \in \mathcal{R}^{30 \times 1}$ araç tarafından uzuvlara uygulanan tepki kuvvetlerini içeren vektörü, $\bar{F}_{hsm} \in \mathcal{R}^{36 \times 1}$ ve $\bar{F}_{hdm} \in \mathcal{R}^{36 \times 1}$ hidrostatik ve hidrodinamik kuvvet vektörlerini ve $\bar{T}_m \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ ise kontrol kuvvetleri vektörünü tanımlar.

3.3. Hidrostatik ve Hidrodinamik Kuvvetler

3.3.1. Hidrostatik Kuvvetler

Sistem üzerinde etkili olan hidrostatik kuvvetler yerçekimi ve statik kaldırma kuvvetleridir. Bu kuvvetler sistemdeki herhangi bir cisim için aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$\bar{f}_{hs_i}^{(i)} = \bar{f}_{w_i}^{(i)} + \bar{f}_{b_i}^{(i)} \quad (5)$$

Burada,

$$\begin{aligned} \bar{f}_{w_i}^{(i)} &= \hat{C}^{(i,e)} [0 \quad 0 \quad m_i g]^T \\ \bar{f}_{b_i}^{(i)} &= \hat{C}^{(i,e)} [0 \quad 0 \quad -\rho v_i g]^T \end{aligned} \quad (6a,b)$$

Sistemdeki her bir cisim üzerine etkiyen ve kendi eksen takımında tanımlanan toplam hidrostatik kuvvet ve moment vektörü aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\bar{F}_{hs_i}^{(i)} = \begin{bmatrix} \bar{f}_{w_i}^{(i)} + \bar{f}_{b_i}^{(i)} \\ \tilde{r}_{G_i} \bar{f}_{w_i}^{(i)} + \tilde{r}_{B_i} \bar{f}_{b_i}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Denklemler-6 ve Denklemler-7’de, $\hat{C}^{(i,e)}$ ataletsel eksen takımında tanımlanan koordinatları i cismine ait eksen takımında tanımlananlara dönüştüren dönüşüm matrisini, ρ deniz suyu özkütlesi, v_i i cisim tarafından süpürülen hacmi, m_i i cisminin kütlesi-

ni, g yerçekimi ivmesini ve $\tilde{\mathbf{F}}_{G_i}, \tilde{\mathbf{F}}_{B_i}$ sırasıyla ağırlık merkezi ve basınç merkezlerinin gövde referans çerçevesinde tanımlanan konum vektörlerinin eksi bakışımı çapraz çarpım matrisleridir.

3.3.2. Hidrodinamik Kuvvetler

Hidrodinamik kuvvetler ise eklenmiş kütle kuvvetleri $\bar{\mathbf{F}}_A^{(i)}$ ile dinamik kaldırma, sürüklenme ve yanal kuvvetlerinin toplamından $\bar{\mathbf{F}}_D^{(i)}$ oluşmaktadır.

$$\bar{\mathbf{F}}_{hd}^{(i)} = \bar{\mathbf{F}}_A^{(i)} + \bar{\mathbf{F}}_D^{(i)} \quad (8)$$

Eklenmiş Kütle Kuvveti

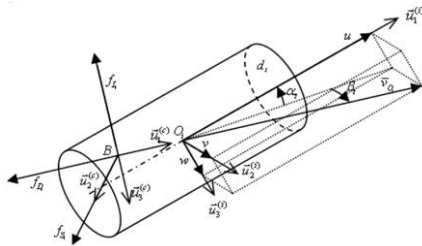
Bir gövde üzerine etkiyen eklenmiş kütle kuvveti gövde referans çerçevesinde aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\bar{\mathbf{F}}_A^{(i)} = -\hat{\mathbf{M}}_{A_i} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_{G_i}^{(i)} \\ \bar{\boldsymbol{\alpha}}_i^{(i)} \end{bmatrix} - \bar{\mathbf{C}}_{A_i} \quad (9)$$

Denklemler-9'da $\bar{\mathbf{a}}_{G_i}^{(i)}$ ve $\bar{\boldsymbol{\alpha}}_i^{(i)}$ sırasıyla gövdenin ağırlık merkezi ivmelerini ve gövdenin açılma ivmesini, $\hat{\mathbf{M}}_{A_i} \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ eklenmiş kütle matrisini ve $\bar{\mathbf{C}}_{A_i} \in \mathfrak{R}^{6 \times 1}$ eklenmiş kütle kaynaklı hızla bağlı değişkenleri içeren vektörü göstermektedir. Bu matrisler yayvan sferoid olan sualtı aracı ve silindirik uzuvlar için [12-13] yardımıyla hesaplanabilir.

Dinamik Kaldırma, Sürüklenme ve Yanal Kuvvetleri

Sualtında bir gövdenin maruz kaldığı dinamik kaldırma, sürüklenme ve yanal kuvvetleri Şekil-2'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2: Hidrodinamik Kuvvetler

Bu kuvvetlerin doğrultuları, akıntı eksen takımını oluşturmaktadır. Akıntı eksen takımında tanımlı kuvvetler vektörel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\bar{\mathbf{f}}_{d_i}^{(e)} = \begin{bmatrix} -f_{D_i} & f_{S_i} & -f_{L_i} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

Bu kuvvetlerin sistem dinamik denklemlerine dahil edilebilmesi için akıntı eksen takımında tanımlı kuvvet vektörünün gövde eksen takımında tanımlı vektöre dönüştürülmesi ihtiyacı doğmaktadır. Bu ise aşağıdaki dönüşüm matrisi yardımıyla sağlanabilmektedir.

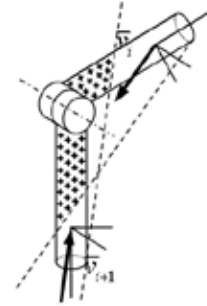
$$\hat{\mathbf{C}}^{(e,i)} = \begin{bmatrix} c\alpha_i c\beta_i & s\beta_i & s\alpha_i c\beta_i \\ -c\alpha_i s\beta_i & c\beta_i & -s\alpha_i s\beta_i \\ -s\alpha_i & 0 & c\alpha_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

Burada $c(\cdot)=\cos(\cdot)$, $s(\cdot)=\sin(\cdot)$ and α_i, β_i sırasıyla hücum ve kayma açılarını göstermektedir.

Bu kuvvetler tarafından uygulanan momentler ise akıntı eksen takımına göre tanımlanmış yuvarlanma, yunuslama ve yalpalama moment bileşenlerinden oluşmaktadır ve bu vektör aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$\bar{\mathbf{m}}_{d_i}^{(e)} = \begin{bmatrix} m_{r_i} & m_{p_i} & m_{y_i} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

Hidrodinamik kuvvet ve momentlerin elde edilmesi için gereken katsayılar literatürde yer alan tipik kaynaklar kullanılarak hesaplanmıştır ve [11]'de detaylı olarak verilmiştir. Manipülatör uzuvlarının üzerindeki gölgeleme etkileri, uzuvların önceden tanımlı görevleri yerine getirmek üzere hareket ettiği sırada bağlı hız vektörlerinin birbirleri üzerine yönlendirildiği durumda hidrodinamik kuvvetlerin etkisinin azalması nedeniyle. Şekil-3'te gösterildiği gibi gölgelenen alan altında kalan bölge, toplam hidrodinamik kuvvete katkı sağlayamamaktadır.



Şekil 3: Gölgeleme Etkisi

Sonuç olarak, bir cisim üzerine etkiyen dinamik kaldırma, sürüklenme, yanal kuvvet ve moment vektörü Denklem-10 ve Denklem-12 kullanılarak ve Denklem-11 ile gerekli dönüşümler uygulandıktan sonra gövde referans çerçevesinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\bar{\mathbf{F}}_D^{(i)} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{f}}_{d_i}^{(i)} \\ \bar{\mathbf{m}}_{d_i}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.4. Eyletici Dinamiği

Sualtı araçları genel olarak elektrik motorları tarafından eyletilmektedir. Elektrik motorundan elde edilen tork ile pervanelerin itki kuvveti oluşturması sağlanmaktadır. Eğer pervane verimi ν , adımı ρ , pervanelerin yer aldığı koruyucunun kesit alanı A olarak gösterilir ve sabit kabul edilirse, pervanenin açılma hızı Ω ile itki kuvveti F_{th} ve motor torku τ arasındaki ilişkiler aşağıdaki biçimde ifade edilebilir [14].

$$\begin{aligned} \dot{\Omega} + \alpha\Omega|\Omega| &= \beta\tau \\ F_{th} &= C_t\Omega|\Omega| \end{aligned} \quad (14a,b)$$

Bu çalışmada sualtı aracının 6 adet eyletici bulunmektedir. Dolayısıyla, $\bar{\mathbf{T}}_V$ ile itki kuvvetleri arasında aşağıdaki ilişki kurulabilir.

$$\bar{\mathbf{T}}_v = \hat{\boldsymbol{\mu}} \bar{\mathbf{F}}_{th} \quad (15)$$

Burada, $\bar{\mathbf{F}}_{th} \in \mathfrak{R}^{6 \times 1}$ itki kuvvetleri vektörünü ve $\hat{\boldsymbol{\mu}} \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ ise eyletici konfigürasyonu matrisini ifade eder.

3.5. Sistemin Hareket Denklemleri

Denklem-3 ve Denklem-4 birlikte yazıldığında SAM sisteminin dinamik denklemi aşağıdaki biçimi almış olur.

$$[\hat{\mathbf{M}}\bar{\boldsymbol{\alpha}} - \hat{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{F}}_r] + [\bar{\mathbf{Q}} - \bar{\mathbf{F}}_{hs} - \bar{\mathbf{F}}_{hd}] = \hat{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{T}} \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{D}} \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{\alpha}} \\ \bar{\mathbf{F}}_r \end{bmatrix} + \bar{\mathbf{P}} = \hat{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{T}} \quad (17)$$

Denklem-16'de yer alan tepki kuvvetleri vektörü $\bar{\mathbf{F}}_r$ yok edildiğinde sistemin dinamik denklemi aşağıdaki son biçimini almış olur [11].

$$\hat{\mathbf{M}}^* \bar{\boldsymbol{\alpha}} + \bar{\mathbf{Q}}^* = \hat{\mathbf{B}}^* \bar{\mathbf{T}} \quad (18)$$

Bu durumda bilinmeyen sayısı yalnızca ivmelerden oluşacak biçimde, 12'ye düşürülmüş olur. Bu bilinmeyenler aşağıdaki denklem kullanılarak genelleştirilmiş kontrol kuvvetleri vektörü $\bar{\mathbf{T}}$ 'nin zamana bağlı fonksiyonu, girdi oluşturacak şekilde sağlandığında hesaplanabilir.

$$\bar{\boldsymbol{\alpha}} = \hat{\mathbf{M}}^{*-1} [\hat{\mathbf{B}}^* \bar{\mathbf{T}} - \bar{\mathbf{Q}}^*] \quad (19)$$

4. Yörünge Takip Kontrolü

Sistem için kullanılan kontrol yöntemi girdiler ile çıktılar arasında ilişki elde etmeye dayanmaktadır. Girdiler, manipülatör için eklem torkları ve sualtı aracı için itki kuvvetleri olarak tanımlanabilir. Kontrol sisteminin amacı, sualtı aracı ve uç işlemcisi ataletsel referans çerçevesinde tanımlı, arzu edilen hareketlere yeterli ölçüde yaklaşmaktır. Dolayısıyla çıktılar, araç ve manipülatörün uç işlemcisinin konum değişkenleri olarak alınabilir.

Denklem-18'deki ara değişken $\bar{\boldsymbol{\alpha}}$ ters kinematik denklemler kullanılarak yok edildiğinde sistemi eyleten kuvvet ve torklar $\bar{\mathbf{T}}$ ile konum değişkenleri $\bar{\boldsymbol{\xi}}$ arasındaki ilişki aşağıdaki biçimde elde edilir:

$$\hat{\mathbf{M}}^{**} \ddot{\bar{\boldsymbol{\xi}}} + \bar{\mathbf{Q}}^{**} = \hat{\mathbf{B}}^* \bar{\mathbf{T}} \quad (20)$$

Denklem-20'de,

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{M}}^{**} &= \hat{\mathbf{M}}^* \hat{\mathbf{J}}_{sys}^{-1} \\ \bar{\mathbf{Q}}^{**} &= \bar{\mathbf{Q}}^* - \hat{\mathbf{M}}^* \hat{\mathbf{J}}_{sys}^{-1} \hat{\mathbf{J}}_{b,sys} \end{aligned} \quad (21a,b)$$

Burada, $\hat{\mathbf{J}}_{sys}$ sistemin Jakobiyan matrisi ve $\bar{\mathbf{J}}_{b,sys}$ ise sistemin bias vektörüdür. Dolayısıyla, torkları hesaplamak için gereken ters dinamik kontrol yasası aşağıdaki biçimde elde edilmiş olur.

$$\bar{\mathbf{T}} = \hat{\mathbf{B}}^{*-1} [\hat{\mathbf{M}}^{**} \ddot{\bar{\boldsymbol{\xi}}} + \bar{\mathbf{Q}}^{**}] \quad (22)$$

Denklem-22 ile ifade edilen kontrol yasası lineerleştirici etkisiyle Denklem-20'yi aşağıdaki yalın biçimine dönüştürür:

$$\ddot{\bar{\boldsymbol{\xi}}} = \bar{\mathbf{u}} \quad (23)$$

Denklem-23 temel alınarak, aşağıdaki PD kontrol yasası, sisteme istenen şekilde eyletmek için etkin bir biçimde kullanılabilir.

$$\bar{\mathbf{u}} = \ddot{\bar{\boldsymbol{\xi}}}^d + \hat{\mathbf{K}}_v \left(\dot{\bar{\boldsymbol{\xi}}}^d - \dot{\bar{\boldsymbol{\xi}}} \right) + \hat{\mathbf{K}}_p \left(\bar{\boldsymbol{\xi}}^d - \bar{\boldsymbol{\xi}} \right) \quad (24)$$

Burada, $\hat{\mathbf{K}}_v$ ve $\hat{\mathbf{K}}_p$ köşegen hız ve konum geribesleme matrisleridir. Bu matrisler, çeşitli kutup yerleştirme teknikleri kullanılarak elde edilebilir.

5. Benzetim Sonuçları

Benzetimlerde yerçekimi ivmesi m/s^2 ve deniz suyunun öz kütlesi $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$ olarak alınmıştır. Şekil-1'de gösterilen SAM sisteminin kütle ve geometrik özelliklerine ilişkin değerler Tablo-1'de verilmiştir.

Sualtı aracının birinci ve ikinci eyleticileri x eksenini boyunca öteleme ve y eksenini etrafında dönme hareketlerini, üçüncü ve dördüncü eyleticileri y eksenini yönünde öteleme ve z eksenini etrafında dönme hareketlerini ve beşinci ve altıncı eyleticileri z eksenini boyunca öteleme ve x eksenini etrafında dönme hareketlerini sağlayacak şekilde konumlandırılmıştır.

Tablo 1: Kütle ve geometrik özellikleri

	Kütle (kg)	Atalet Momenti (kgm ²)	Boyutlar (m)
Araç	60.0	$I_{xx} = 15.4$ $I_{yy} = I_{zz} = 12.23$	$l_v = 2.000$ $w = h = 0.250$
Uzuv-1	1.7	$I_{xx} = I_{yy} = 0.0355$ $I_{zz} = 0.0003$	$l_1 = 0.50$ $r_1 = 0.02$
Uzuv-2	3.0	$I_{xx} = 0.0006$ $I_{yy} = I_{zz} = 0.206$	$l_2 = 0.90$ $r_2 = 0.02$
Uzuv-3	4.0	$I_{xx} = 0.0008$ $I_{yy} = I_{zz} = 0.488$	$l_3 = 1.20$ $r_3 = 0.02$
Uzuv-4	0.8	$I_{xx} = I_{yy} = 0.001$ $I_{zz} = 0.0001$	$l_4 = 0.25$ $r_4 = 0.02$
Uzuv-5	0.5	$I_{xx} = I_{yy} = 0.00711$ $I_{zz} = 0.00041$	$l_5 = 0.15$ $r_5 = 0.02$
Uzuv-6	0.3	$I_{xx} = I_{yy} = 0.0003$ $I_{zz} = 0.00006$	$l_6 = 0.10$ $r_1 = 0.02$

Durum çalışmasında, SAM sisteminin uç işlemcisinin önceden tanımlanmış bir yörüngeyi takip ederken sualtı aracının ise mümkün olduğunca ilk konumunda kalmaya çalışması istenmiştir. Uç işlemcisinin önceden tanımlanmış dairesel yörüngesi aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\zeta_{ee_1}^d = \begin{bmatrix} x_{ee_0}^d + R \cos(\beta - 1) \\ y_{ee_0}^d + R \sin \beta \\ z_{ee_0}^d \end{bmatrix} \text{ m} \quad (25)$$

Burada $\beta = \pi \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) \right]$. T hareketin periyodunu tanımlamaktadır ve $T=2$ s. olarak alınmıştır. R ise takip edilecek dairesel yörünge için çapı olup $R=0.30$ m. olarak alınmıştır.

Uç işlemcinin önceden tanımlanmış açısal hareketi aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

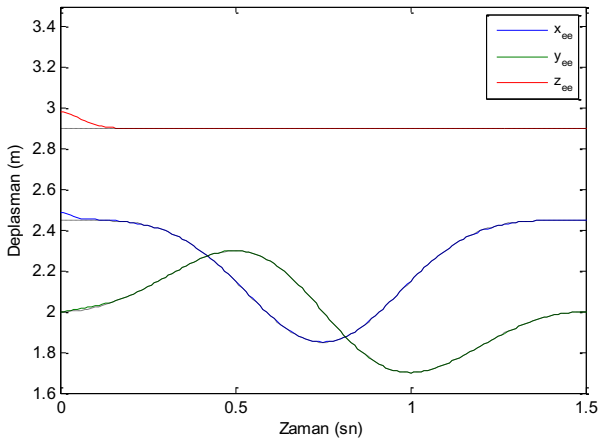
$$\psi_i^d = \begin{cases} \psi_{i_0} + \frac{\Delta\psi_i}{T} \left[t - \frac{T}{2\pi} \sin\frac{2\pi t}{T} \right] & 0 \leq t \leq T \\ \left[\psi_{i_0} + \Delta\psi_i \right] & t > T \end{cases} \quad (26)$$

Burada $\{\Delta\psi_i : i = 1, 2, 3\}$ Euler açılarındaki değişimleri göstermektedir ve $\Delta\psi_1 = -60^\circ$, $\Delta\psi_2 = 0^\circ$, $\Delta\psi_3 = 0^\circ$ olarak alınmıştır.

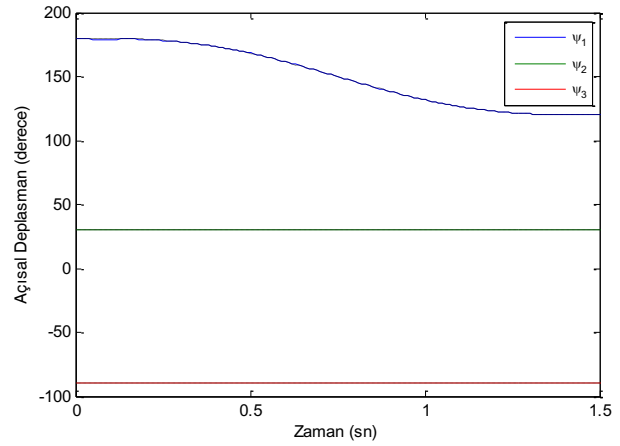
Benzetim için MATLAB/Simulink® programı ve zaman adımı 2 ms olan sabit adımlı ode3 tipi çözücü kullanılmıştır. Diyagonal olarak alınan geri besleme matrislerinin elemanları, kritik sönümlü bir geçiş davranışı sağlamak üzere, aşağıda gösterilen biçimde seçilmişlerdir.

$$K_{vjj} = 2\omega_j, K_{pjj} = \omega_j^2; j = 1, \dots, 12 \quad (27)$$

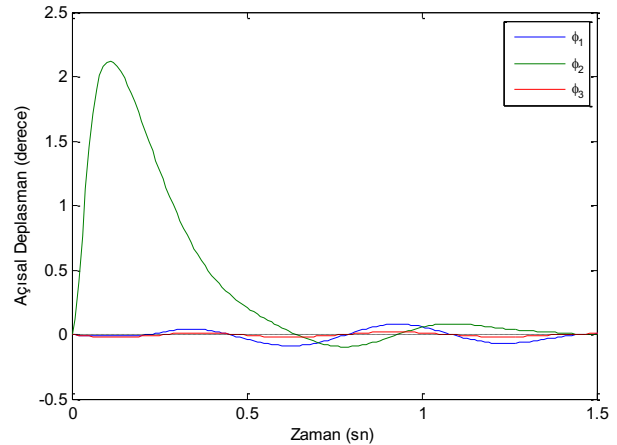
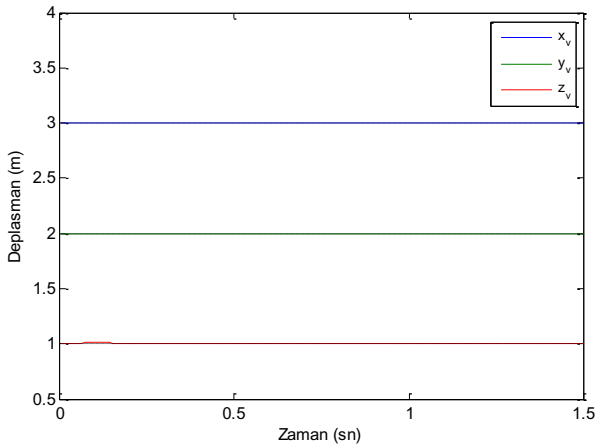
Burada ω_j simgesi, j indisi için seçilen kapalı çevrim doğal frekansını göstermektedir. Benzetim sonucunda elde edilen, sualtı aracı ve manipülator alt sistemleri için konum cevapları sırasıyla Şekil-4 ve Şekil-5'te ve doğrusal ve açısal konum hataları sırasıyla Şekil-6 ve Şekil-7'de verilmiştir. Ayrıca Şekil-8 sistemin istenen yörüngeleri takip edebilmesi için gereken eyaletici kuvvet ve torklarını göstermektedir.

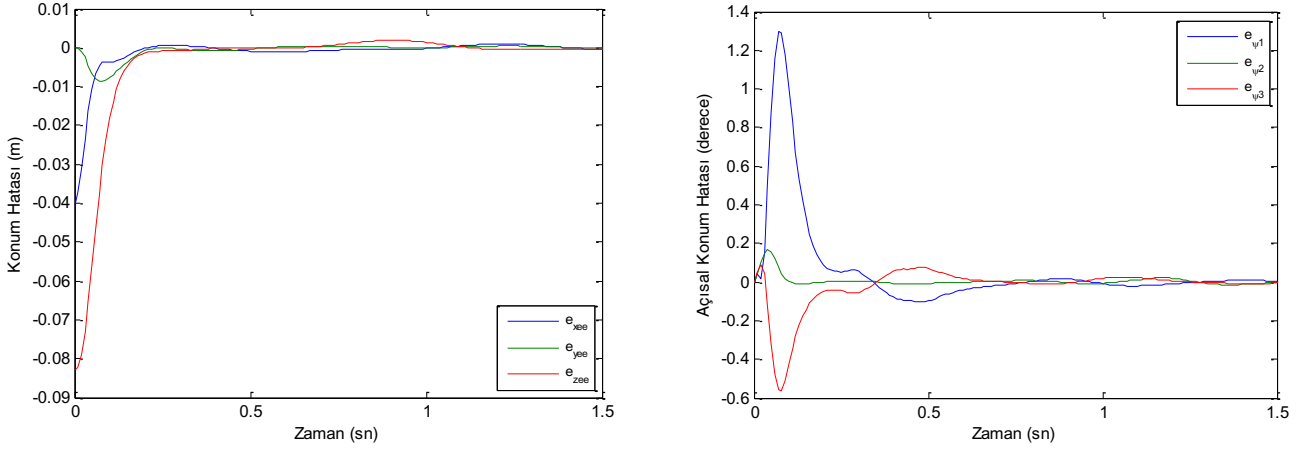


Şekil 4: Manipülatorün Konum Cevapları (--- İstenen, — Cevap)

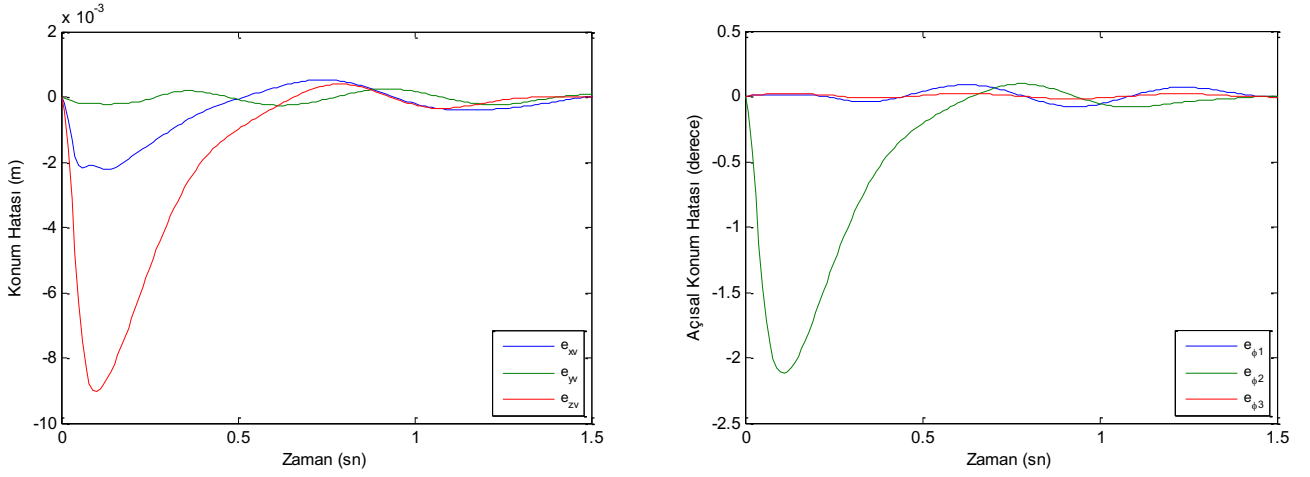


Şekil 5: Sualtı Aracı Konum Cevapları (--- İstenen, — Cevap)

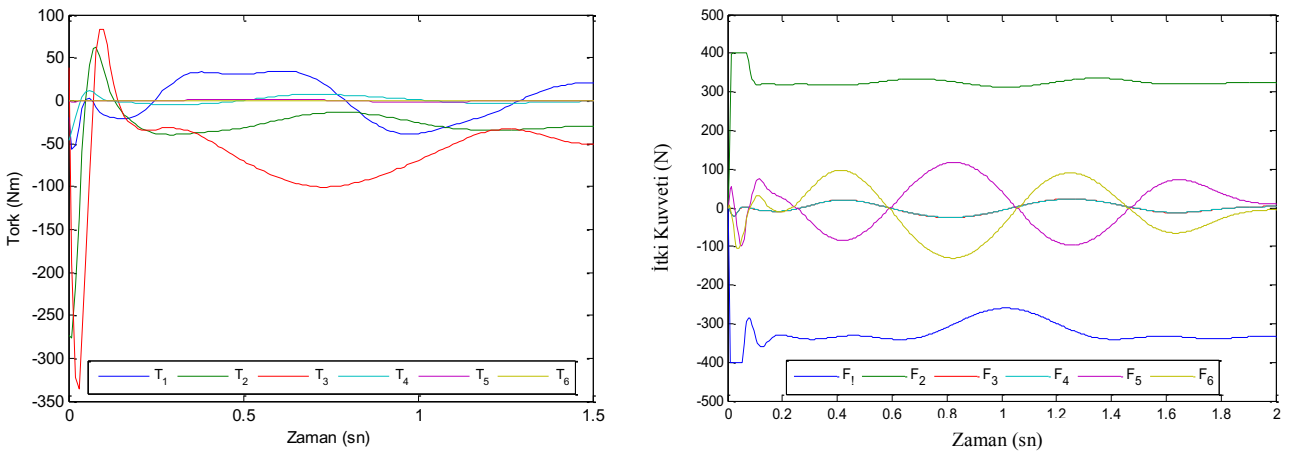




Şekil 6: Manipülâtörün Konum Hataları



Şekil 7: Sualtı Aracı Konum Hataları



Şekil 8: Sistem Eyletici Kuvvet/Torkları

6. Sonuç

Bu çalışmada geliştirilen kontrol yasası, itki kuvvetlerinde faz gecikmesi yaratan sualtı aracı eyletici etkilerine rağmen iyi bir yörünge takip özelliği göstermiştir. Eğer geribesleme matrislerinin değeri artırılırsa, takip hataları azalmakta ve kontrolcü bant genişliği artmaktadır. Fakat bu değerler istenildiği kadar yüksek seçilememektedir çünkü gerçek zamanlı hesaplama gereksinimleri bu değerler üzerine bir üst sınır çekmektedir. Diğer yandan kapalı çevrim doğal frekansları belli değerlerin altında alınmamalıdır. Çünkü öyle yapılırsa salınımlar artmakta ve istenen hareketlerden sapmalar gözlenmektedir. Dolayısıyla kontrol torkları da oldukça büyümektedir.

Sonuç olarak, geliştirilen kontrol yarasının yörünge takip özelliğinin, bu çalışmada ele alınan SAM sistemi gibi, gerekli çevrimiçi hesaplamaların yapılmasına izin verecek kadar yavaş hareket eden sistemlerde gerçek zamanlı uygulamalar için oldukça tatmin edici olduğu değerlendirilmektedir.

7. Kaynaklar

- [1] Mahesh H., Yuh J., Lakshmi R., “A coordinated control of an underwater vehicle and robot manipulator”, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 339–370. 1991.
- [2] De Wit C.C., Diaz E.O., Perrier M., “Robust nonlinear control of an underwater vehicle/manipulator system with composite dynamics”, *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, pp. 452–457. 1998.
- [3] Chung, G.B., Eom, K.S., Yi, B.J., Suh, I.H., Oh, S.R., Cho, Y.J., “Disturbance for underwater observer-based robust control robotic systems with passive joints”, *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1775–1780. 2000.
- [4] Cui, Y., Yuh, J., “A unified adaptive force control of underwater vehicle-manipulator systems (UVMS)”, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 1, 553–558. 2003.
- [5] Antonelli G., Chiaverini S., “Adaptive tracking control of underwater vehicle-manipulator systems based on the virtual decomposition approach”, *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, Vol. 20, pp. 594–602. 2004.
- [6] Ishitsuka, M., Sagara, S., Ishii, K., “Dynamics analysis and resolved acceleration control of an autonomous underwater vehicle equipped with a manipulator”, *Int. Symp. Underwater Technology*, 277–281. 2004.
- [7] Dos Santos C.H., Bittencourt G., Guenther R., De Pieri E., “A Fuzzy hybrid singularity avoidance for underwater vehicle-manipulator systems”, *Info. Control Problems in Manufacturing-MCOM*, pp. 209-214. 2006.
- [8] Soylu S., Buckham B.J., Podhorodeski R.P., “Redundancy resolution for UV mobile manipulators”, *Ocean Eng.*, Vol. 37, pp. 325–343. 2010.
- [9] Han J., Park J., Chung W.K., “Robust coordinated motion control of an underwater vehicle-manipulator system with minimizing restoring moments”, *Ocean Engineering*, Vol. 38, pp. 1197–1206. 2011.
- [10] Ismail, Z. H., Dunnigan, M.W., “Tracking control scheme for an underwater vehicle-manipulator system with single and multiple of sub-region and sub-task objectives”, *IET - Control Theory & Applications*, Vol. 5, 721–735. 2011.
- [11] Korkmaz, O., “Modeling and control of underwater vehicle manipulator systems”, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey. 2012.
- [12] Fossen T. I., “Guidance and control of ocean vehicles”, John Wiley & Sons, New York. 1994.
- [13] Imlay, F. H., “The complete expressions for added mass of a rigid body moving in an ideal fluid”, Technical Report DTMB 1528, David Taylor Model Basin, Washington D.C. 1961.
- [14] Yoerger D. R., Cooke J.G., Slotine J.J.E., “The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design”, *IEEE J. of Oceanic Eng.*, Vol. 15, pp. 167-178. 1990.



Dr. Ozan Korkmaz

Ozan Korkmaz, 1982 yılında Ankara’da doğmuştur. Lisans derecesini 2004 yılında Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden, Yüksek Lisans ve Doktora derecelerini ise ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü’nden sırasıyla 2006 ve 2012 yıllarında almıştır. Araştırma görevlisi olarak ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü’nde 2004-2006 yılları arasında görev aldıktan sonra 2006-2010 yılları arasında TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu’nda Bilimsel Programlar Uzman Yardımcısı olarak çalışmıştır. 2010 yılında TÜBİTAK SAGE’de çalışmaya başlamış olup halen Uzman Araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Robotik sistemlerin dinamiği ve kontrolü konularında yayınlanmış çalışmaları bulunmaktadır.



Prof. Dr. Sıtkı Kemal İder

Sıtkı Kemal İder, ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü’nden Ocak 1976’da lisans ve Kasım 1976’da yüksek lisans derecelerini ve 1979 yılında University of Illinois at Chicago Ekonomi Bölümü’nden yüksek lisans derecesini aldıktan sonra bir süre endüstride tasarım mühendisi olarak ve DESİYAB’da teknik uzman olarak görev yapmıştır. Daha sonra 1988 yılında University of Illinois at Chicago Makina Mühendisliği Bölümünde doktora çalışmasını tamamlayarak ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğretim üyesi olarak çalışmaya başlamıştır. 1996 yılında profesör kadrosuna atanmıştır. 2003-2008 yıllarında ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü Başkanlığı görevini yürütmüştür. 2013 yılından itibaren Çankaya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümün’de öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Mekanik sistemlerin dinamiği ve kontrolü konularında SCI dergilerinde yazar veya ortak yazar olarak 34 adet makalesi vardır.



Prof. Dr. M. Kemal Özgören

M. Kemal Özgören, 1948 yılında Çanakkale’de doğmuştur. Lisans ve Y. Lisans derecelerini 1971 ve 1972 yıllarında ODTÜ, Makina Mühendisliği Bölümü’nden almıştır. Doktora derecesini ise, 1976 yılında New York’taki Columbia Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nden almıştır. Dinamik sistemler ve kontrol alanında uzmanlaşmıştır. 1976 yılından beri, ODTÜ, Makina Mühendisliği Bölümü’nde öğretim üyeliği yapmaktadır. Şu anda aynı bölümde profesör olarak bulunmaktadır. Uzaysal mekanik sistemlerin kinematiki ile manipülatörlerin ve çeşitli araçların hareket kontrolü üzerinde araştırmalar yapmaktadır. Değişik zaman aralıklarında iki savunma sanayii kurumunda araştırma danışmanlığı yapmıştır. Şimdiye kadar yazar ya da ortak yazar olduğu 27 makale SCI kapsamındaki dergilerde yayımlanmıştır.