

Otonom sualtı aracı yörünge izleme kontrol algoritmalarının analizleri

Analyses of autonomous underwater vehicle trajectory tracking control algorithms

İrem Nur ORUÇ¹ , Umut TİLKİ^{1*} 

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
iremnorcc@gmail.com, umuttilki@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 21.09.2021
Kabul Tarihi/Accepted: 20.05.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 25.03.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.57142
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, bir operatör tarafından direk olarak yönlendirilmeden görevlendirildikleri çalışma alanında özerk hareket ederek görevlerini yerine getiren sualtı araçları için parametre bozulmasının varlığı altında yatay düzlemde yörünge izleme problemi ele alınmıştır. Belirlenen bir yörünge için takip edilmesi probleminde, literatürde sıkça kullanılan PD denetleyicinin yanı sıra geriadımalmalı denetleyici, kayan kipli denetleyici ve doğrusal karesel regülatör kullanımı önerilmiş olup, bu denetleyici yapılarının performansları sinüzoidal bir yörünge üzerinde test edilmiştir. Önerilen denetleyicilerin literatürdeki denetleyicilere göre yüksek hassasiyete sahip, parazit önleme ve hızlı tepki vermesi sağlanarak performanslarını gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Son olarak, geriadımalmalı ve kayan kipli denetleyicinin kararlılığını kanıtlamak için Lyapunov'un kararlılık ilkesi kullanılarak sistemin kararlı davranışı simülasyon üzerinde gösterilmiştir. Simülasyon ortamında tüm önerilen denetleyicilerin aynı bozucu etki altında istenilen yörüngeyi takip ettiği doğrulanmıştır. Ayrıca önerilen geriadımalmalı denetleyicisindeki keskin geçişler kayan kipli kontrolcü ile giderilmiş ve sistem üzerinde meydana gelebilecek olası arızaların önüne geçilmiştir.

Anahtar kelimeler: Otonom sualtı araçları, Geriadımalmalı kontrol, Kayan kipli kontrol, Doğrusal karesel regülatör, Oransal türevsel (PD) kontrol.

Abstract

In this study, the horizontal trajectory tracking problem under the presence of parameter distortion is discussed for underwater vehicles that perform their duties autonomously in the work area where they are assigned without being directly guided by an operator. In the problem of following a determined trajectory, in addition to the PD controller, which is frequently used in the literature, the use of a backstepping controller, a sliding mode controller and a linear quadratic regulator has been proposed, and the performances of these controller structures have been tested on a sinusoidal trajectory. It has been ensured that the proposed controllers perform with high sensitivity, anti-interference and fast response compared to the controllers in the literature. Finally, the stable behavior of the system is demonstrated on simulation by using Lyapunov's stability principle to prove the stability of the backstepping and sliding mode controller. It has been verified that all proposed controllers follow the desired trajectory under the same disturbance effect in the simulation environment. In addition, the sharp transitions in the proposed backstop controller are eliminated with the sliding mode controller and possible malfunctions that may occur on the system are prevented.

Keywords: Autonomous underwater vehicles, Modelling, Backstepping control, Sliding mode control, Linear quadratic regulator control, Proportional derivative control.

1 Giriş

İnsansız otonom araçlar, insanların hayat standartlarının yükseltilmesine yardımcı olurken aynı zamanda yüksek risklerin söz konusu olduğu tehlikeli ve/veya ulaşılması güç ortamlarda çalışarak belirlenen görevlerin yerine getirilmesinde aktif rol oynamaktadır.

İnsansız otonom araçlar türünden biri olan ve sualtı çalışmalarında tercih edilen en önemli araçlardan biri otonom sualtı araçlarıdır (OSA). OSA'lar sualtı derinliklerini keşfetmek, araştırma, arama- kurtarma, sualtı güvenliği, sualtı donanım bakım ve onarımı gibi birçok amaç için kullanılmaktadır [1]. Otonom sualtı araçları bahsi geçen çalışma alanlarında görevlerini yerine getirirken, deniz tabanına yakın seyretmek durumunda kalabilmektedir. Bu durum karşısında OSA'lar dip etkisi nedeniyle istenmeyen ve çok hızlı bir şekilde değişiklik gösterebilen hidrodinamik kuvvetler ve momentler etkisi altındadır. Bu nedenle çok amaçlı kullanılan OSA'ların iyi bir hidrodinamik performansla sahip olması gerektiği gibi, çok kısa sürede kendini konumlandırabilmesi ve belirlenen yörüngeyi takip edebilmesi için kritik manevraların gerekli olduğu

durumlarda hızlı ve en az hata ile bu manevraları gerçekleştirmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada otonom insansız sualtı araçlarının yörünge takip kontrol problemlerini çözebilmek için birbirinden farklı dört adet kontrol yöntemi incelenmiştir. İlk olarak kontrol uygulamalarında sıkça kullanılan PD denetleyici kullanılmıştır. Bu denetleyicinin OSA üzerinde uygulamasında, bozucu etkiler altında istenilen yörüngeden sık sık küçük sapmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Ardından sistem dinamiğine eklenmiş bozucu etkiler altında gürbüz performans sağlamasıyla bilinen geriadımalmalı kontrolcü (backstepping control- BSC) [2] ve yüksek hızlı anahtarlama yeteneğine sahip kayan kipli kontrolcü (Sliding Mode Control -SMC) [3] tasarlanmıştır. En son olarak ise Çok Girişli-Çok Çıkışlı (MIMO) sistemlerin denetlemesi problemlerinin çözümünde popüler olarak kullanılan doğrusal karesel regülatör (linear quadratic control-LQR) denetleyici kullanılarak OSA'nın yörünge takibi sağlanmıştır [4]. Yukarıda anılan kontrol yaklaşımları otonom sualtı aracının yörünge takip probleminde uygulanmış, elde edilen sonuçlar yörünge takip performansı, açısız ve doğrusal

*Yazışılan yazar/Corresponding author

hızları, takip hataları ve kontrol girişleri açısından karşılaştırılmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, yatay düzlemde kinematik modele göre yağ haznesi bulunduran OSA'nın yörünge izleme problemi için bulanık kayan kipli denetleyici (Fuzzy Sliding Mode Control-FSMC) tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanan denetleyici, kayan kipli denetleyici (SMC) ve orantılı-integral-türev (Proportional İntegral Derivative-PID) denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde bulanık kayan kipli denetleyici (Fuzzy Sliding Mode Control-FSMC) yüksek hassasiyet, parazit önleme ve hızlı yanıt avantajlarına sahip olduğu gösterilmiştir [5]. Eksik tahrikli otonom sualtı aracının yörünge takibinde görüş hattı (Line of Sight-LOS) aralığı ve açısı kısıtlamalarıyla başa çıkarak için Seçmeli Sayısal Çağrı (Digital Selective Call-DSC) tekniğine dayalı yeni bir hata haritalama işlevi önerilmiştir [6]. Geliştirilen yörünge izleme kontrol şemasının etkinliğini simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir.

Yetersiz harekete geçirilmiş OSA'ların yatay yörünge izleme kontrolü için, birçok çalışma referans olarak kullanılabilir. Yörünge izlemede parametre bozukluğu sorununu çözmek için, denetleyicilerin tasarımında yapay sinir ağı ve bulanık mantık algoritmaları benimsenmiş ve neticesinde tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir [1]. Bilinmeyen bozucular altında OSA'lar için modelden bağımsız yörünge izleme kontrol stratejileri de sunulmaktadır. OSA'ların dinamikleri hakkında herhangi bir bilgiye sahip olmadan Hamilton-Jacobi Isaac (HJI) denklemi tanımlanarak optimize edilmiş bir kontrol problemi ile formüle edilmiş çalışmada optimize edilmiş kontrol probleminin çözümünü öğrenmek için ise pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement Learning-RL) algoritması önerilmiştir [7].

Kayan kipli kontrol (SMC), güçlü gürbüzlüğe sahip özel bir süreksiz kontrol yöntemidir. Elmokadem ve diğ. (2017) yılında yaptıkları çalışmada, hassas yörünge izleme performansına sahip üç kontrolör, kayan kipli kontrol yönteminden türetilmiştir [8]. İlk olarak sonlu zamanlı yakınsama ve yüksek sabit durum izleme hassasiyeti ile bilinen terminal kayan kip kontrolcü (Terminal Sliding Mode Control- TSMC) ve sıfıra yakın sonlu zamanlı kayan kip yakınsama hızını iyileştirmek için hızlı terminal kayan kipli kontrolcü (Fast Terminal Sliding Mode Control- FTSMC) önerilmiştir. Ayrıca yörünge, belirlenen kayma yüzeyine ulaşmadan ya da ulaştıktan sonra hesaplama hataları ve belirsizlik faktörleri nedeniyle yörüngelerin kayması garanti edilemediğinden çözüm sırasında tekillik oluşmuştur. Tekillik problemini çözmek için de tekil olmayan terminal kayan kipli kontrolcü (Non-singular Terminal Sliding Mode Control-NTSMC) önerilmiştir.

Jiang, Guo ve Yu, 2018 yılında yaptıkları çalışmada, eksik tahrikli otonom sualtı aracı için parametre bozulması altında yatay yörünge izleme sorununu ele almıştır [9]. Bu çalışmada önerilen yörünge izleme denetleyicisi, kinematik ve dinamik olmak üzere iki alt denetleyiciden oluşturulmuştur. Kinematik kontrolör, geriadımlama yöntemine göre tasarlanmış ve hıza ait sanal kontrol girişleri elde edilmiştir. İzleme hatasına ait dinamik denklemler elde edildikten sonra izleme hatalarını stabilize etmek ve dinamik kontrolörü tasarlamak için küresel integral kayan kipli denetleyici (Global İntegral Sliding Mode Control-GISMC) benimsenmiştir. Böylece konum hatalarını da stabilize etmeyi başarmıştır. Lyapunov kararlılık teoremi, tüm kapalı döngü kontrol sisteminin kararlılığını sağlamak için kullanılmıştır. Tasarlanan denetleyici karmaşık bir kontrol

yapısına sahip olmasına rağmen iyi bir performans sağlamaktadır.

Yatay düzlemde hareket eden eksik tahrikli OSA'ların düzlemsel yörünge izleme kontrolü üzerine yapılan çalışmada, terminal kayan kipli kontrolcü (terminal sliding mode -TSMC) kullanılmıştır [10]. Denge noktasından uzak bölgedeki terminal kayan kipli kontrol yönteminin yakınsama oranını yükseltmek için, terminal kayan kip kontrolü yaklaşımını genişleterek hızlı, tekil olmayan terminal kayma kip (Fast Nonsingular Terminal Sliding Mode FTSMC) yöntemi önerilmiştir.

Lakhwani ve Adhyaru çalışmalarında ilk olarak, OSA'nın doğrusallaştırılmış modeli üzerinde çalışmayı önermiştir [4]. İkinci olarak, PI (orantılı integral kontrol), PD (Orantılı Türev kontrol) ve LQR (Doğrusal Karesel Regülatör) denetleyicisinin kullanımını yörünge takibi probleminde kullanmışlardır. Üçüncü olarak ise önerilen denetleyicilerin yörünge takip performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan, PI denetleyicisinin PD ve LQR denetleyiciden daha fazla hata verdiği görülmüştür. Bu nedenle OSA'nın derinlik denetimi için PI denetleyicisinin tek başına iyi bir performans sağlamadığı görüşü sunulmuştur. PD ve LQR kontrol yaklaşımları için OSA'nın matematiksel modeline dayalı olarak derinlik kontrol sistemine uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. PD ve LQR denetleyicinin simülasyon sonuçlarından, daha iyi performans elde etmek ve aşımaları azaltmak için PD denetleyicisinin uygun şekilde ayarlanması gerektiği görülmüştür.

OSA'ların dinamik modellerindeki hidrodinamik katsayıları doğru bir şekilde belirlemek zor olduğundan, OSA'lara ait yörüngesinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi zordur. Kang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada OSA'ların model tabanlı yörünge tahminini desteklemek için hibrit bir hidrodinamik katsayı tanımlama yöntemi önerilmiştir [11]. İlk olarak, yön kararlılığını ölçmek için bazı lineer hidrodinamik katsayılar düzlemsel hareket mekanizma (Planar Motion Mechanism-PMM) testi ile tanımlanır. Daha sonra, PMM testi ile tanımlanmamış manevra karakteristiklerini doğrudan tahmin etmek için kalan hidrodinamik katsayılar serbest çalışma model testi (Free running model test) ile tanımlanır. Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini ve etkinliğini doğrulamak için, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) sayısal çözüm yöntemleri kullanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemim uygulanabilirliğini ve etkinliğini doğrulamak için, simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntem dayalı OSA'nın yörünge tahmininin doğru olduğunu dolayısıyla sualtı aracının istenildiği gibi hareket ettiği gösterilmiştir.

Bu çalışmanın 2. bölümünde ilk olarak 3 serbestlik dereceli sualtı aracına ait matematiksel modelin çıkarımı verilmektedir. 3. kısımda, oransal türevsel kontrolcü (PD), geriadımlamalı kontrol (BSC), kayan kipli kontrol (SMC), doğrusal karesel regülatör (LQR) kontrolcü tasarımları gösterilmektedir. Bu denetleyicilerin kullanılması ile elde edilen simülasyon sonuçları 4. bölümde verilmiştir. 5. kısımda ise elde edilen sonuçlar tartışılmış ve yakın gelecekte yapılması planlanan çalışmalardan bahsedilmektedir.

2 Otonom sualtı araçlarının modellenmesi

İyi bir kontrolör tasarlamak için, sualtı aracının kinematik ve dinamik denklemini içeren uygun bir matematiksel modeli elde etmek gereklidir. Bir otonom sualtı aracının matematiksel

modeli, aşağıda verilen bazı varsayımlarla Newton-Euler metoduna dayalı olarak elde edilmiştir [1]:

- Otonom sualtı araç yapısı rijit ve simetriktrir,
- Koordinat merkezi olarak aracın ağırlık merkezi kabul edilmiştir,
- Otonom sualtı aracına ait dümenler rijittir,
- Aracın sualtı akıntılarında ve sualtındaki yoğunluk değişiminden araç hareketinin etkilemediği kabul edilmiştir.

6 serbestlik dereceli sualtı aracının hareketinin modellenmesinde, temel olarak iki farklı hidrodinamik eksen çerçevesine ihtiyaç olduğu görülmektedir [12],[13].

Dünya eksen çerçevesi: Sualtı aracının açısal konumlarını tanımlamak için dünyanın referans elipsoidine göre tanımlanan bir eksen kümesidir. Genellikle x eksen kuzey, y eksen doğu ve z eksen dünya yüzeyinden aşağı olarak tanımlanır.

Gövde sabit eksen çerçevesi: Sualtı aracına sabitlenmiş eksen takımınıdır. Sualtı aracıyla birlikte hareket eden bu eksen kümesine göre hareket denklemleri çözülmektedir. Bu çalışmada kullanılan gövde sabitli eksen takımında x- eksen aracın ağırlık merkezinden aracın burnuna doğru, y- eksen aracın ağırlık merkezinden sağına doğru, z - eksen ise aracın altına doğru olacak şekilde kabul edilmiştir. Bir su altı aracının eksenlerdeki 6 serbestlik hareketinin tanımı Tablo 1'de gösterilmiştir [12],[13].

Tablo 1. Sualtı aracına ait eksenlerdeki hareket tanımı.
Table 1. Definition of motion in axes of underwater vehicle.

Derece	Tanım	Kuvvet Moment	Doğrusal Açısal Hız	Konum-Euler Açılı
1	X yönünde hareket (surge)	X	u	x
2	Y yönünde hareket (sway)	Y	v	y
3	Z yönünde hareket (heave)	Z	w	z
4	X yönünde dönme (roll)	K	p	ϕ
5	Y yönünde dönme (pitch)	M	q	θ
6	Z yönünde dönme (yaw)	N	r	ψ

2.1 Kinematik modelleme

Aracın hareketine neden olan torklardan bağımsız olarak robotun hareketini hareket değişkenlerine bağlı olarak inceleyen modele kinematik modelleme ismi verilmektedir. Hareket denklemleri gövde sabitli eksen takımında çözümlendikten sonra kuzey-doğu-aşağı (NED) koordinat sistemine dönüştürülerek elde edilir. Koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm ile sağ el kuralına göre belirlenen rotasyon matrisine göre yapılır. Burada x-y-z eksenlere göre tanımlanan rotasyon matrisi Denklem (1) de verilmiştir [13].

$$R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R_{x,\varphi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$R = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\varphi)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta \cos\varphi & -\cos\psi \sin\theta \cos\varphi & \sin\psi \cos\varphi & \cos\psi \sin\theta \sin\varphi & -\cos\psi \cos\theta \sin\varphi & \sin\psi \sin\varphi \\ \sin\psi \cos\theta \cos\varphi & -\sin\psi \sin\theta \cos\varphi & \cos\psi \cos\varphi & \sin\psi \sin\theta \sin\varphi & -\sin\psi \cos\theta \sin\varphi & \cos\psi \sin\varphi \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Bu çalışmada kullanılacak olan 3 serbestlik dereceli otonom sualtı aracına ait basitleştirilmiş kinematik model Denklem (2)'de gösterilmiştir [14].

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi ;$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi ;$$

$$\dot{\psi} = r$$

Burada, x ve y, kuzey-doğu-aşağı (NED) koordinat sisteminde OSA'nın konum koordinatlarını gösterir; ψ sapma açısını, r ise açısal hızı gösterir. u ve v sırasıyla dalgalanma ve salınım hızlarını ifade eder.

2.2 Dinamik modelleme

Dinamik modelleme, sualtı aracına uygulanan kuvvet ve torklar ile sualtı aracının hareketi arasındaki ilişkidir. Sualtı aracına ait genel dinamik model Denklem (3)'de gösterilmiştir [14].

$$M(v)\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau$$

$$\dot{\eta} = R(n)v$$

Burada η , yere sabitlenmiş çerçevedeki aracın konum ve durum vektörünü; v aracın hızlarını temsil eder. R dönüşüm matrisini; C(v) merkezkaç ve Coriolis terimlerini; D(v) sönüm matrisini; g(η) geri yüklem kuvveti ve tork vektörünü ifade etmektedir. Son olarak τ , araca uygulanan giriş tork vektörünü göstermektedir.

Bu çalışmada kullanılan 3 serbestlik dereceli otonom sualtı aracına ait basitleştirilmiş dinamik model Denklem (4)'te gösterilmiştir [13].

$$\dot{u} = M_1(X_u u + a_{23}vr + \tau_u)$$

$$\dot{v} = M_2(Y_v v + a_{13}ur)$$

$$\dot{r} = M_3(N_r r + a_{12}uv + \tau_r)$$

Burada, M_i (i=1, 2 ve 3) OSA'nın genelleştirilmiş kütlelerini belirtir; X_u , Y_v ve N_r hidrodinamik sönümlemenin lineer katsayılarını ifade eder. X_{uv} , Y_{vr} ve N_{r} ikincil hidrodinamik katsayılarını göstermektedir. Mevcut kontrol girişleri, dalgalanma torku τ_u ve sapma torku τ_r dir. Diğer katsayılar ise $M_1 = 1/m - X_{\dot{u}}$, $M_2 = 1/m - Y_{\dot{v}}$, $M_3 = 1/I_z - N_{\dot{r}}$, $a_{12} = Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}}$, $a_{13} = X_{\dot{u}} - m$, $a_{23} = m - Y_{\dot{v}}$ olarak bulunmaktadır.

3 Denetleyici tasarımı

Otonom sualtı aracı, özellikle sığ ve kısıtlı çalışma alanlarında seyir esnasında ya da taban etkisinden dolayı sık sık bozucu kuvvetlere maruz kalmakta ve bunun neticesinde yörünge takibinde sapmalar meydana gelmektedir. Dolayısıyla, aracın belirlenen yörüngeden sapmadan seyrine devam edebilmesi için gürbüz bir denetleyiciye sahip olması gerekmektedir.

Bu bölüme, otonom araçların yörünge takip problemini çözmek için literatürde sıkça kullanılan oransal türevsel denetleyici (Proportional Derivative-PD) tasarımı ile başlanmıştır. Daha sonra ise uygulanan kontrol yaklaşımları sırasıyla geriadımlamalı denetleyici (BSC), kayan kipli denetleyici (SMC), ve son olarak doğrusal karesel regülatör denetleyici (LQR) tasarımlarından oluşmaktadır.

Tüm uygulanan kontrol yaklaşımlarında, 3 serbestlik dereceli otonom sualtı aracının kinematik ve dinamik denklemleri adil bir karşılaştırma yapılabilmesi adına aynı şartlar altında kullanılmıştır.

Otonom sualtı aracının takip etmesi istenilen dairesel referans yörüngeye ait matematiksel ifade denklem (5)'te tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} x_{ref} &= 10 \sin(0.1t) \\ y_{ref} &= 10 \cos(0.1t) \end{aligned} \quad (5)$$

Otonom sualtı aracına uygulanan kontrol yöntemlerin gerçekte uygulanacak sualtı araçları için daha gerçekçi bir yaklaşım sağlamak amacıyla sualtında karşılaşılabilecek tüm bozucu etkileri barındıran bozucu etki girişleri denklem (6)'da tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} d_1 &= 0.15 \cos(t) \\ d_2 &= 0.15 \sin(t) \end{aligned} \quad (6)$$

Denklem (2) ve (4) ile verilen 3 serbestlik dereceli OSA modeli ele alınarak, istenen koordinatlardaki zamanla değişen konumları gerçek koordinat değerlerinden çıkararak x ve y yönlerindeki konum izleme hataları verilmektedir.

$$\begin{aligned} x_e &= x - x_{ref} \\ y_e &= y - y_{ref} \end{aligned} \quad (7)$$

Denklem (1)'de tanımlanan koordinat dönüşüm matrisi tekil değildir. Bundan dolayı Denklem (7)'de ifade edilen izleme hataları eşdeğerdir. Konum hatalarının zamana göre türevleri alınarak ve Denklem (2) kullanılarak, elde edilen konum hatası dinamikleri Denklem (8)'de gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{x}_{ref} \\ \dot{y}_{ref} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Otonom sualtı aracına ait hız izleme hataları Denklem (9)'da gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} e_u &= u - u_{ref} \\ e_v &= v - v_{ref} \end{aligned} \quad (9)$$

Hız izleme hatalarının zamana göre türevi alınarak ve denklem (4)'te verilen sualtı aracına ait basitleştirilmiş dinamik model kullanılarak elde edilen hız izleme hatasının dinamiği ise Denklem (10)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{e}_u &= M_1(X_u u + a_{26}vr + \tau_u) - \dot{u}_{ref} \\ \dot{e}_v &= M_2(Y_v v + a_{16}vr) - \dot{v}_{ref} \end{aligned} \quad (10)$$

3.1 PD denetleyici

Bu bölümde literatürde yaygın olarak kullanılan geleneksel bir PD denetleyici sualtı araç sistemine eklenmiştir. PD denetleyiciye ait transfer fonksiyonu denklem 11'de gösterilmektedir.

$$T_{pd} = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Burada, K_p sistemin hızlı cevap vermesini sağlayan oransal denetleyici katsayısıyken, K_d sistemin daha hızlı dengeye gelmesini sağlayan türevsel denetleyici katsayısıdır [15]. T_{pd} denetleyiciye ait transfer fonksiyonu, $e(t)$ ise sistem hatasını ifade etmektedir.

Bu çalışmada, PD denetleyici katsayılarını belirlemek için sinüzoidal giriş için sistemin sürekli osilasyon yaptığı kazanç değeri belirlenmiştir. Bu kazanç değerinin %60'ı oransal denetleyici katsayısı ve sönümsüz osilasyonların periyodunun %12.5'i türevsel denetleyici katsayısı olarak seçilmiştir. PD katsayılarını belirledikten sonra dalgalanma torku τ_u ve sapma torku τ_r . Denklem (13)'de verilmiş olan ifadeye göre tasarlanmaktadır.

$$\begin{aligned} F_x &= K_p x_e + K_d \dot{x}_e \\ F_y &= K_p y_e + K_d \dot{y}_e \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tau_u &= \ddot{x}_{ref} + a_{13}K_p x_e + a_{23}K_d \dot{x}_e \\ \tau_r &= \ddot{y}_{ref} + a_{23}K_p y_e + a_{12}K_d \dot{y}_e \end{aligned} \quad (13)$$

PD denetleyiciyle, sistem hataları sifıra yakınlaştırarak, istenilen hız ve konum değerlerinin asimptotik olarak referans değere yakınsaması sağlanmaktadır.

3.2 Geriadımlamalı denetleyici

Geriadımlamalı kontrol yöntemi (backstepping control) Lyapunov'un ikinci metodu olarak da bilinen kararlılık analiz yönteminin bir uyarlamasıdır [16].

Kayan kipli denetleyici yapısını teorik olarak tanımlamak gerekirse; sistemin durum değişkenlerinin (state variables) teker teker ya da gruplar halinde ele alınarak (grup ya da tekil durum değişkeni) Lyapunov'un ikinci kararlılık yönteminin uygulanmasıdır [3],[16].

Referans konumların türevleri alınarak Denklem (14)'te ifade edildiği üzere referans hızlara ulaşılabilir.

$$\begin{aligned} u_{ref} &= \dot{x}_{ref} \cos \psi + \dot{y}_{ref} \sin \psi - k_x e \cos \psi - k_y e \sin \psi \\ v_{ref} &= -\dot{x}_{ref} \sin \psi + \dot{y}_{ref} \cos \psi + k_x e \sin \psi - k_y e \cos \psi \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} u_{ref} \\ v_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ref} + l_x \tanh\left(\frac{-k_x x_e}{l_x}\right) \\ \dot{y}_{ref} + l_y \tanh\left(\frac{-k_y y_e}{l_y}\right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Burada, $k_x, k_y, l_x, l_y > 0$.

İstenilen yörüngeyi takibini sağlamak için Denklem (9)'da tanımlanmış olan hız izleme hatalarının sifıra yakınsaması sağlanmalıdır. Hız izleme hatalarının sifıra yakınsaması

sağlandıktan sonra Denklem (7)'de tanımlanmış olan konum izleme hatalarının da asimptotik olarak sifıra yakınsadığı görülecektir.

Kıscası yörünge takibi için (e_u, e_v) hız izleme hataları (0,0) yakınlarsa, (x_e, y_e) konum izleme hataları da (0,0) yakınsar. Bu varsayımı kanıtlamak için ilk adım referans hızları, hız izleme hatalarına göre yorumlanır ve Denklem (16)'daki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} e_u \\ e_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_e - l_x \tanh\left(\frac{-k_x x_e}{l_x}\right) \\ \dot{y}_e - l_y \tanh\left(\frac{-k_y y_e}{l_y}\right) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}$$

Buradaki, \bar{R} regüler matris olduğundan $\dot{x}_e - l_x \tanh\left(\frac{-k_x x_e}{l_x}\right)$ ve $\dot{y}_e - l_y \tanh\left(\frac{-k_y y_e}{l_y}\right)$ sifıra yakınsadığında asimptotik olarak hız izleme hatalarının da sifıra yakınsaması sağlanır.

Daha sonraki adım ise (x_e, y_e)'nin (0,0)'a yakınsadığını kanıtlamaktır. Bu amaçla, konum izleme hataları grup halinde ele alınarak (17)'deki pozitif tanımlı Lyapunov fonksiyonu seçilmiştir.

$$V_1 = \frac{1}{2} x_e^2 + \frac{1}{2} y_e^2 \quad (17)$$

Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -l_x x_e \tanh\left(\frac{k_x x_e}{l_x}\right) - l_y y_e \tanh\left(\frac{k_y y_e}{l_y}\right) \\ & + [x_e \cos \psi + y_e \sin \psi](e_u) \\ & + [-x_e \sin \psi + y_e \cos \psi](e_v) \end{aligned} \quad (18)$$

Burada, k_x, k_y, l_x, l_y pozitif değerler olduğundan $\dot{V}_1 < 0$ olduğu söylenebilir. Böylece, hem x_e hem de y_e 'nin asimptotik olarak sifıra yakınsadığı sonucuna varılır. Böylelikle, aracın dalgalanma ve salınma hızları Denklem (15)'te verilen istenen hızlara yakınsarsa, konum izleme hatalarının (x_e, y_e)'nin (0, 0)'a asimptotik yakınsaması garanti altına alınır.

Kontrol tasarımına devam etmek için, Denklem (15)'teki istenen hızların zamana göre türevleri alınarak ivme değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{ref} \\ \dot{v}_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \psi & \cos \psi \\ -\cos \psi & -\sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ref} + l_x \tanh\left(\frac{-k_x x_e}{l_x}\right) \\ \dot{y}_{ref} + l_y \tanh\left(\frac{-k_y y_e}{l_y}\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ref} + k_x \dot{x}_e \operatorname{sech}^2\left(\frac{-k_x x_e}{l_x}\right) \\ \dot{y}_{ref} + k_y \dot{y}_e \operatorname{sech}^2\left(\frac{-k_y y_e}{l_y}\right) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Ayrıca, istenen salınım hızının zamana göre ikinci türevi ise (20)'deki gibi elde edilir.

$$\ddot{v}_{ref} = \Gamma - u_{ref} \dot{r} \quad (20)$$

Burada, Γ değeri Denklem (21)'deki gibi tanımlanmaktadır [2].

$$\begin{aligned} \Gamma = & -\ddot{x}_{ref} \sin \psi + \ddot{y}_{ref} \cos \psi \\ & - \dot{x}_{ref} r \cos \psi \\ & - \dot{y}_{ref} r \sin \psi - \dot{u}_{ref} r \\ & + \Gamma_1 r \cos \psi + \Gamma_2 r \sin \psi + \dot{\Gamma}_1 \sin \psi \\ & - \dot{\Gamma}_2 \cos \psi \end{aligned} \quad (21)$$

$$\Gamma_1 = k_x \dot{x}_e \operatorname{sech}^2\left(\frac{-k_x x_e}{l_x}\right)$$

$$\Gamma_2 = k_y \dot{y}_e \operatorname{sech}^2\left(\frac{-k_y y_e}{l_y}\right)$$

3 serbestlik dereceli (3-DOF) otonom sualtı aracının yörünge takibi için dalgalanma torku τ_u ve sapma torku τ_r şu şekilde seçilir:

$$\begin{aligned} \tau_u = & -X_u u - a_{23} v r \\ & + \frac{1}{M_1} (\dot{u}_{ref} - k_u e_u \\ & - [x_e \cos \psi + y_e \sin \psi]) \\ \tau_r = & -N_r r - a_{12} u v + \\ & \frac{1}{b} (-M_2 (Y_v v + a_{13} \dot{u}_{ref} r)) + \frac{1}{b} (\Gamma - k_r \dot{e}_v - k_v e_v) \end{aligned} \quad (22)$$

Denklemdaki b ifadesinin tanımı (23)'te gösterilmektedir.

$$b = M_3 (M_2 a_{13} u + u_{ref}) \quad (23)$$

Daha önce konum izleme hata değişkenleri için grup halinde Lyapunov'un ikinci kararlılık yönteminin uygulanmıştır. Şimdi ise hız izleme hataları için teker teker Lyapunov'un ikinci kararlılık yöntemi aşağıdaki gibi uygulanır.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_u^2 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -l_x x_e \tanh\left(\frac{k_x x_e}{l_x}\right) - l_y y_e \tanh\left(\frac{k_y y_e}{l_y}\right) - k_u e_u^2 \\ & + M_1 e_u + [-x_e \sin \psi + y_e \cos \psi](e_v) \end{aligned}$$

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} e_v^2 \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -l_x x_e \tanh\left(\frac{k_x x_e}{l_x}\right) - l_y y_e \tanh\left(\frac{k_y y_e}{l_y}\right) - k_u e_u^2 \\ & + M_1 e_u - k_v e_v^2 + M_2 e_v \end{aligned}$$

Burada, $k_x, k_y, l_x, l_y > 0$ olduğundan $\dot{V}_2, \dot{V}_3 < 0$ olduğu söylenebilir. Böylece, hem e_u hem de e_v 'nin asimptotik olarak sifıra yakınsadığı sonucuna varılır. Böylelikle, hız izleme hatalarını sifıra yakınsayarak konum izleme hatalarını asimptotik olarak sifıra çeker ve aracın istenilen yörüngeyi takip etmesi sağlanmış olur.

3.3 SMC denetleyici

Bu bölümün temel amacı, OSA'nın istenilen yörüngeyi takip etmesi için SMC'ye dayalı tasarlanan kontrol yapısının ayrıntılı bir şekilde sunulmasıdır. SMC denetleyicisini teorik olarak tanımlamak gerekirse; takip edilmes istenen yörünge daha önce tanımlanmış olan kayma yüzeyinde tutulur, bu sayede sistem belirsizliklerinden ve parametrik hatalardan bağımsız hale gelmiş olur. 3 serbestlik dereceli otonom sualtı araç sisteminin daha önce tanımlanmış kayma yüzeylerinde tutabilmesi için anahtarlamalı kontrol yasası kullanılır. Tanımlanmış kayma yüzeyindeki hareketlerin durumu ise Lyapunov kararlılık teoremi ile belirlenir [17].

3 serbestlik dereceli otonom sualtı aracın yörünge takibinde kayan mod denetleyicisini tasarlamak için kayma yüzeyleri S_1 ve S_2 dalgalanma ve salınım hızı hataları açısından (26)'daki gibi seçilmiştir.

Burada kontrol katsayıları $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 > 0$ koşulunu sağlamalıdır. (4) ve (10) denklemlerini kullanarak, (26)'da belirlediğimiz kayma yüzeyleri ve kayma yüzeylerinin zamana göre türevleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$S_1 = e_u + \lambda_1 \int_0^t e_u(\tau) dt \quad (26)$$

$$S_2 = \dot{e}_v + \lambda_3 e_v + \lambda_2 \int_0^t e_v(\tau) dt$$

$$\dot{s}_1 = M_1(X_u u + a_{23}vr + \tau_u) - \dot{u}_{ref} + \lambda_1 e_u \quad (27)$$

$$\dot{s}_2 = M_2(Y_v \dot{v} + a_{13} \dot{u}r + a_{13} u M_3(N_r r + a_{12}vu + \tau_r)) - \dot{v}_{ref} + \lambda_3 \dot{e}_v + \lambda_2 e_v \quad (28)$$

Önerilen kayma yüzeylerinin sonlu zamanlı olarak sifıra yakınsamasını sağlamak için aşağıdaki dinamikler uygulanır.

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= -k_1 S_1 - W_1 \text{sign}(S_1) \\ \dot{s}_2 &= -k_2 S_2 - W_2 \text{sign}(S_2) \end{aligned} \quad (29)$$

Burada, $W_1, W_2 > 0$. Üç serbestlik dereceli (3-DOF) otonom sualtı aracının yörünge takibi için dalgalanma torku τ_u ve sapma torku τ_r şu şekilde seçilir:

$$\begin{aligned} \tau_u &= \tau_{u,eq} + \tau_{u,sw} \\ \tau_{u,eq} &= -X_u u - a_{23}vr + \frac{1}{M_1}(\dot{u}_{ref} - \lambda_1 e_u) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\tau_{u,sw} = \frac{1}{M_1}(-k_1 S_1 - W_1 \text{sign}(S_1))$$

$$\begin{aligned} \tau_r &= \tau_{r,eq} + \tau_{r,sw} \\ \tau_{r,eq} &= -N_r r - a_{12}uv + \frac{1}{b}(-M_2(Y_v \dot{v} + a_{13} \dot{u}r)) \\ &\quad + \frac{1}{b}(\Gamma - k_r \dot{e}_v - \lambda_2 e_v) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\tau_{r,sw} = \frac{1}{b}(-k_2 S_2 - W_2 \text{sign}(S_2))$$

Buradaki parametreler (21) ve (23) numaralı denklemlerle ifade edilmiştir. Tanımlanmış kayma yüzeyindeki hareketlerin durumu ise Lyapunov kararlılık teoremi ile belirlenir.

$$V = \frac{1}{2} S_1^2 + \frac{1}{2} S_2^2 \quad (32)$$

Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S_1 [M_1(X_u u + a_{23}vr + \tau_u) - \dot{u}_{ref} + \lambda_1 e_u] \\ &\quad + S_2 [M_2(Y_v \dot{v} + a_{13} \dot{u}r + a_{13} u M_3(N_r r \\ &\quad + a_{12}vu + \tau_r)) - \dot{v}_{ref}] + S_2 [\lambda_3 \dot{e}_v \\ &\quad + \lambda_2 e_v] \end{aligned} \quad (33)$$

(20), (30) ve (31) denklemleri kullanarak Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevinin son hali aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S_1 [M_1(X_u u + a_{23}vr + \tau_u) - \dot{u}_{ref} + \lambda_1 e_u] \\ &\quad + S_2 [M_2(Y_v \dot{v} + a_{13} \dot{u}r + a_{13} u M_3 \dot{r}) \\ &\quad - \dot{v}_{ref} + \lambda_3 \dot{e}_v + \lambda_2 e_v] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_1 S_1^2 - W_1 S_1 \text{sign}(S_1) + S_2 [M_2(Y_v \dot{v} + a_{13} \dot{u}r)] \\ &\quad + S_2 [-\Gamma + b(N_r r + a_{12}vu + \tau_r) \\ &\quad + k_r \dot{e}_v + \lambda_2 e_v] \end{aligned} \quad (34)$$

$$\dot{V} = -k_1 S_1^2 - W_1 |S_1| - k_2 S_2^2 - W_2 |S_2|$$

Burada, $k_1, k_2 \geq 0$ ve $W_1, W_2 > 0$ olduğundan $\dot{V} < 0$ yani negatif tanımlı olduğu söylenebilir. Böylece, kayma yüzeylerin sonlu zamanda sifıra ulaşır ve hem e_u hem de e_v 'nin asimptotik olarak sifıra yakınsadığı sonucuna varılabilir. Böylelikle, hız izleme hatalarını sifıra yakınsatarak konum izleme hatalarını asimptotik olarak sifıra yakınsatarak aracın istenilen yörüngeyi takip etmesi sağlanır.

3.4 LQR denetleyici

LQR, durum geribesleme yöntemiyle gürbüz bir denetim sağlayan optimal kontrol tekniklerinden birisidir [18]. LQR kontrolcünün temelinde yatan unsur, minimum performans indeksi ile durum geribesleme kazançlarının belirlenmesidir.

Geribesleme kazancı K ile gösterilmektedir. K geribesleme kazancının hesaplanmasında ise Riccati diferansiyel denkleminin yardımcıyla bulunan P cebirsel değeri kullanılmaktadır.

$$0 = A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q \quad (35)$$

P matrisini elde etmek için Denklem (35)'de ifade edilen Riccati denklemi çözülerek bu değer Denklem (36)'da ifade edilen geribesleme kazancına eklenir:

$$\begin{aligned} u(t) &= -Kx(t) \\ K &= R^{-1}B^T P \end{aligned} \quad (36)$$

Geribesleme kazanç matrisi K, Denklem (36)'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. MATLAB aracılığı ile Cebirsel Riccati Denklemi nümerik olarak çözülebilmektedir. Belirlenmiş olan ağırlık matrisleri Q ve R, sistem matrisi A ve giriş matrisi B bilindiğinde; K geribesleme kazanç matrisi hesaplanabilmektedir.

3 serbestlik dereceli otonom sualtı aracının yörünge takibinde kullanılacak olan doğrusal karesel optimal denetleyicisini tasarlamak için Denklem (4)'te verilen dinamik denklemler $\dot{x} = Ax + Bu$ biçimine getirilmiştir. Sistem matrisi A ve giriş matrisi B aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} & 0 \\ -N_{\dot{v}} & I_2 - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Y_{uv}u & (N_{ur} - 2m)u & 0 \\ N_{uv}u & N_{ur}u & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} Y_{uu}\delta_r u^2 \\ N_{uu}\delta_r u^2 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_r \end{aligned} \quad (37)$$

$$A = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} & 0 \\ -N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_{uv}u & (N_{ur} - 2m)u & 0 \\ N_{uv}u & N_{ur}u & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$B = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} & 0 \\ -N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_{uu\delta_r}u^2 \\ N_{uu\delta_r}u^2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

A ve B matrislerini belirledikten sonra, ağırlık matrisleri Q ve R hesaplanmıştır. Literatürde, Q ve R ağırlık matrislerinin belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Fakat uygulamalarda, bu yöntemlerin kontrol katsayısı için ancak yaklaşık değerler verebildiği bilinmektedir. Bu çalışmada Q, R ağırlık matrisleri deneme yoluyla elde edilmiştir.

K geribesleme kazancı elde edildikten sonra, diğer denetleyicilerden farklı olarak başlangıç dalgalanma hızı 1.54 m/s olan ve sadece salınım üzerine uygulanan LQR denetleyicinin yörünge takibinde kullanılan torklar (39) ve (40) denklemleri ile belirlenir.

$$\tau_u = -X_u u - a_{23}vr + \frac{1}{M_1}(\dot{u}_{ref} - \lambda_1 e_u) \quad (39)$$

$$\tau_r = -N_r r - a_{12}uv + \frac{1}{b}(-M_2(Y_v \dot{v} + a_{13}\dot{u}_{ref}r)) + \frac{1}{b}(\Gamma - K_{lqr2}\dot{e}_v - K_{lqr1}e_v) \quad (40)$$

4 Benzetim sonuçları

Bu çalışmada, ilk olarak otonom sualtı araç sistemine ait doğrusal olmayan matematiksel hareket denklemleri Newton-Euler metodu kullanılarak çıkartılmıştır. Woods Hole Oceanographic Enstitüsünde tarafından geliştirilen REMUS sualtı aracına ait parametre katsayıları kullanılmıştır [19] ve araca sinüzoidal bozucu etki girişleri eklenmiştir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlarda kullanılan parametrelerin tamamı sayısal olarak Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Remus model parametreleri [19].

Table 2. Remus model parameters [19].

Parametreler	Değerler	Birimler
m	30.48	kg
I_z	3.45	kg.m ²
X_u	-8.8065	kg/s
Y_v	-65.5457	kg/s
N_r	-6.7352	kg/s
$X_{\dot{u}}$	-0.93	kg
$Y_{\dot{v}}$	-35.5	kg
$N_{\dot{r}}$	-35.5	kg.m ²
$N_{\dot{v}}$	-3.18	kg
Y_{uv}	-9.64	kg/m.rad
N_{uv}	6.15	kg
N_{ur}	-3.93	kg.m/rad
$Y_{uu\delta_r}$	9.64	kg/m.rad
$N_{uu\delta_r}$	-6.15	kg/rad

Daha sonra bir önceki bölümde ele alınan otonom sualtı aracının yörünge takibinde kullanılacak olan doğrusal olmayan dört adet denetleyici yapısı incelenmiş ve tork denklemlerinin elde ediliş yaklaşımları gösterilmiştir.

Önerilen kontrolörün geçerliliğini doğrulamak için MATLAB R2020b versiyonu kullanılarak nümerik simülasyonlar ile denetleyicilerin performansları karşılaştırılmıştır. Denetleyici performanslarını adil bir şekilde karşılaştırabilmek için aynı OSA modeli ve aynı fiziksel koşullar ele alınmıştır.

Sualtı aracının başlangıç koşulları Tablo 3’te gösterilmiştir. Kontrol yapılarına ait benzetim sonuçları ve analizleri alt başlıklar halinde ilerleyen kısımlarda gösterilmektedir.

Tablo 3. Başlangıç koşulları.

Table 3. Initial conditions.

Parametreler	Değerler	Birimler
x	0	m
y	0	m
ψ	0	rad
u	0 (LQR için 1.54 m/s)	m/s
v	0	m/s
r	0	rad/s

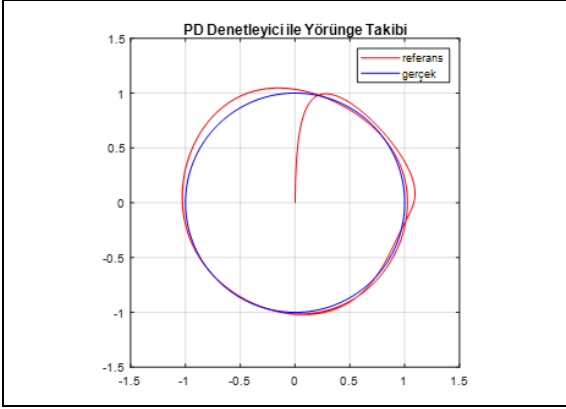
Otonom kontrollü insansız sualtı araç yörünge takip kontrolü için kullanılan kontrol yöntemleri girdiler ile çıktılar arasında ilişki elde etmeye dayanmaktadır. Girdiler sualtı araç için itki kuvvetleri olarak tanımlanabilir. İtki kuvvetleri düzlemsel olarak ileri ve yatay yönde olacak şekilde aracı istenilen referansa ulaştırarak, belirlenen yörüngeyi takip etmesini sağlayacak şekilde tasarlanmış hesaplamalı tork kontrolü biçiminde elde edilmiştir. Dolayısıyla sistemin çıkışı hesaplanan tork değerlerinin otonom sualtı aracına ait dinamik denklemlere uygulanması neticesinde 2 boyutlu konum ve hız değerleridir.

Bu çalışmada önerilen denetleyici yapıları simülasyon ortamına MATLAB R2020b versiyonu kullanılarak aktarılmıştır. İlk Tablo 3’teki başlangıç koşulları ve takip edilmesi istenen referans yörünge Denklem (5)’teki gibi tanımlanmıştır. Simülasyon süresi ve örnekleme zamanı belirlenerek sabit adımlı adi diferansiyel denklem ode45 diferansiyel denklem çözücü kullanılarak çözülmüştür. Diferansiyel denklem çözümünü sonucunda aracın konumu her adımda güncellenerek sisteme ait konum hataları x ve y yönlerinde elde edilir. Elde edilen konum hatalarının zamana göre türevleri alınarak ve Denklem (2) kullanılarak, elde edilen konum hatası dinamikleri çıkarılır. Daha sonra Otonom sualtı aracına ait hız izleme hataları Denklem (9) kullanarak elde edilir ve zamana göre türevleri alınır. Bir sonraki aşamada ise denetleyici yardımıyla dalgalanma torku τ_u ve sapma torku τ_r hesaplanmaktadır. En son aşamada, kullanılan denetleyici yardımıyla, sistem hataları sıfıra yaklaştırılır istenilen hız ve konum değerlerinin asimptotik olarak referans değere yakınsaması sağlanır.

4.1 PD denetleyici için simülasyon sonuçları

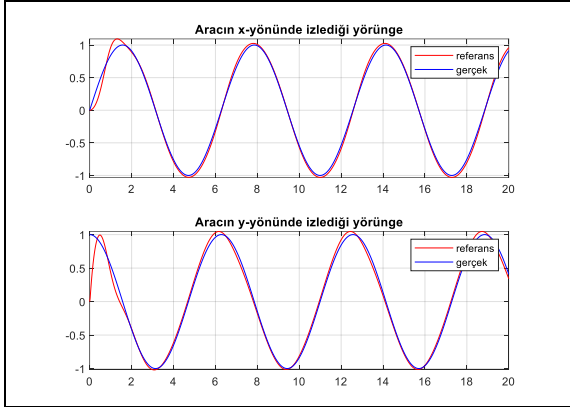
Otonom sualtı araç sistemine ilk olarak PD kontrolcü uygulanmıştır. Denklem (6)’da tanımlanmış olan bozucu etki girişi olmadığı zamanlarda yörünge takibini iyi yapabilen denetleyici, bozucu etki altındaki tepkisi araştırılmıştır. Denklem (6)’da gösterilen bozucu girişler araç modeline eklendiğinde, (0, 0) başlangıç noktasından harekete başlayan aracın yörünge takibi boyunca sık sık küçük sapmalar olduğu Şekil 1’de gözlenmektedir. Şekil 1’de kırmızı renk ile sualtı aracının anlık hareket yörüngesi gösterilirken mavi renk ile sualtı araç sisteminin takip etmesi istenilen referans yörünge gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2’de yörünge takip performansı x ve y eksenleri boyunca ayrı ayrı gösterilmektedir.

Yukarıda bahsedildiği gibi ilk olarak 3 serbestlik dereceli aracın dinamik denklem modeli çıkarılmış ve bilinen dinamik denklemlere göre kontrol girişleri tasarlanmıştır. Bu tasarım yöntemi klasik hesaplamalı tork kontrolü yöntemidir.



Şekil 1. PD denetleyici ile yörünge takibi.

Figure 1. Trajectory tracking with PD controller.



Şekil 2. PD denetleyiciyle x-y eksenleri boyunca takip.

Figure 2. Trajectory tracking with PD controller along x-y axis.

Bu yöntemle göre dinamik denklemlerde bozulma meydana geldiğinde yörünge takip performansında da bozulmalar meydana gelir. Araç sistemindeki kontrol girişleri ise tork olarak oluşturulmaktadır. PD denetleyici katsayılarının hesaplanmasında Cohen-Coon yöntemi, Yuwana- Seborg yöntemi, Ziegler-Nichols yöntemi gibi yöntemler literatürde bulunmakta olup aynı zamanda karmaşıklığı önlemek ve daha hızlı sonuç almak adına deneme yanılma yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu çalışmada referans yörünge sinüzoidal bir giriştir. Dolayısıyla Ziegler-Nichols yönteminde kullanılan basamak girişten farklı olarak sistemin frekans tepkisi düşünülmüştür. Doğrusal kararlı bir sistem için sinüzoidal bir girişe karşılık sinüzoidal çıkış elde edilir. Çıkış ve giriş aynı frekansta fakat aralarında bir faz farkı bulunmaktadır. Sistemin frekans tepkisi düşünüldüğünde, genlik ve faz grafiğinin Nyquist düzleminde (-1, 0) noktasını kestiği kazanç değeri kritik değerdir. Çünkü bu noktada sistem sönümsüz bir osilasyon üretecektir. Sistemin Nyquist düzleminde bu kritik noktadan geçmesini sağlayacak kazanç değerinin %60'ı oransal denetleyici katsayısı ve sönümsüz osilasyonların periyodunun %12.5'i türevsel denetleyici katsayısı olarak seçilmiştir [20, 21]. Sualtı aracın hareketini hem x yönünde hem de y yönünde kontrol edebilmek için iki farklı PD denetleyici (PD_x ve PD_y) kullanılmış olup, bu denetleyiciler için yukarıda belirtildiği

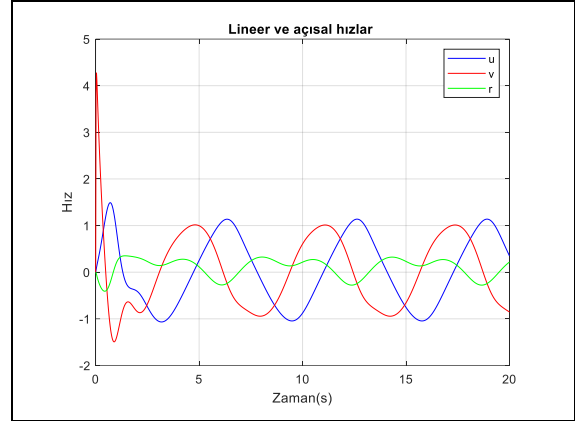
şekilde hesaplanan denetleyici katsayıları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. PD denetleyici katsayıları.

Table 4. PD controller parameters.

Denetleyici Tipi	K_p	K_d
x-yönü (PD_x)	120	30
y-yönü (PD_y)	480	100

PD denetleyicisine ait lineer-açısal hız grafiği Şekil 3'te görülmektedir. Burada x ve y yönündeki doğrusal hızlar sırasıyla u ve v ile gösterilirken açısal hız r ile belirtilmiştir.



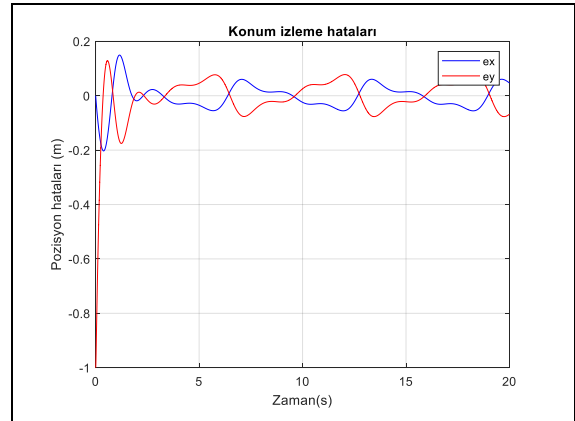
Şekil 3. PD lineer açısal hız grafiği.

Figure 3. PD linear angular velocity graphics.

PD denetleyicisine ait konum izleme ve hız izleme hataları Şekil 4 ve 5'te gösterilmektedir. Bu grafiklere bakıldığında x-y yönündeki konum ve hız hatalarının yaklaşık olarak ilk 5 sn. içerisinde azalarak sıfır seviyesine yaklaştığı görülmektedir. Fakat hem x yönündeki hem de y yönündeki konum ve hız izleme hatalarında dış bozucu etkilerden kaynaklanan dalgalanmalar simülasyon boyunca devam etmektedir.

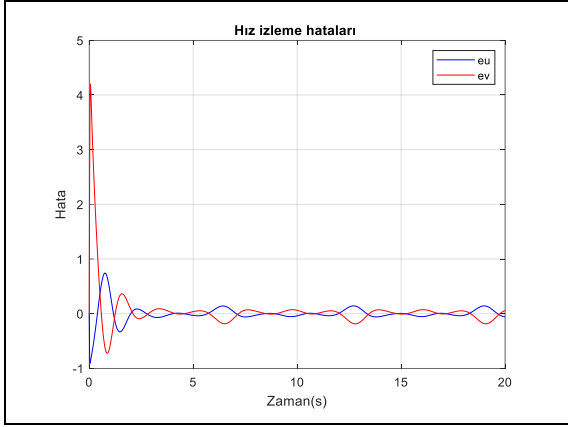
Bu durum denetleyicinin dış bozuculara karşı gürbüz bir tepki gösteremediğini, hassas takipler için önerilen denetleyicinin yeterli performans sağlayamayacağını göstermektedir.

PD denetleyicisine ait kontrol girişleri Şekil 6'da görüldüğü üzere, başlangıç anında hata miktarlarının yüksek olmasından kaynaklı olarak, yüksek torklar üreterek, sualtı aracının referans yörüngeye doğru hızlı bir şekilde hareket ederek, hata miktarlarını azaltacak şekilde davranış göstermektedir.



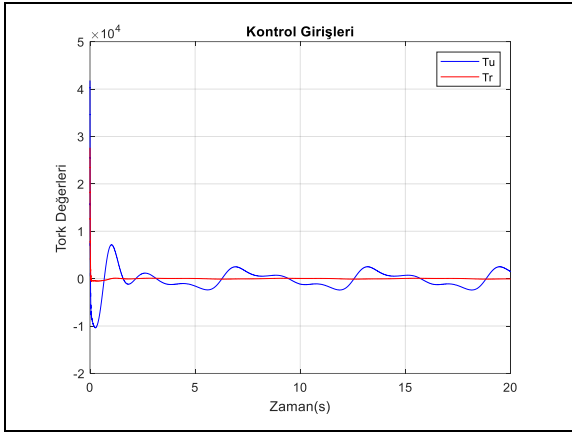
Şekil 4. PD denetleyici için konum izleme hataları.

Figure 4. Position tracking errors for PD controller.



Şekil 5. PD denetleyici için hız izleme hataları.

Figure 5. Velocity tracking errors for PD controller.

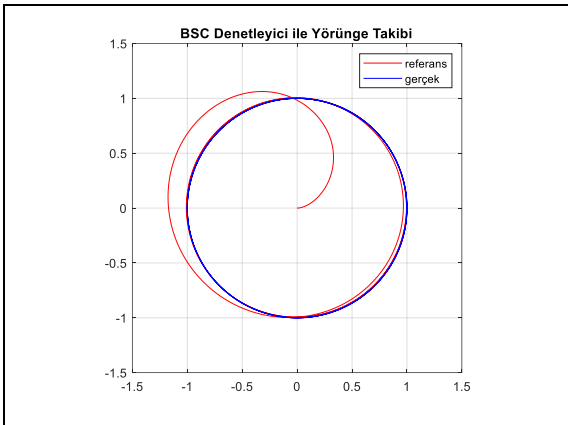


Şekil 6. PD kontrol girişleri.

Figure 6. PD control inputs.

4.2 BSC sonuçları

Geriadımlamalı kontrolcüsüne ait sonuçlarda ilk olarak sistemin iki boyutlu düzlemde zamana bağlı olarak verilen yörüngede takip performansı Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. BSC denetleyici ile yörünge takibi.

Figure 7. Trajectory tracking with BSC controller.

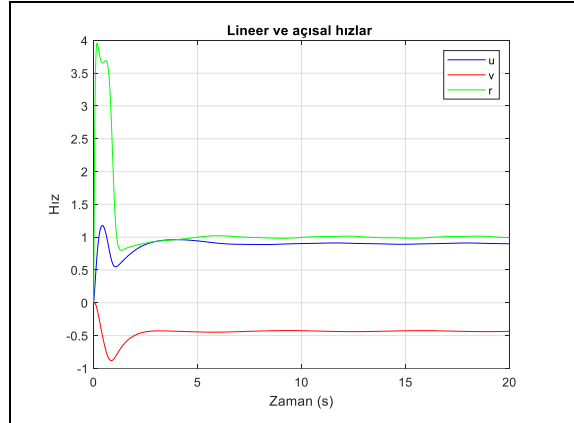
Şekil 7'de kırmızı renk ile sualtı aracının anlık değişimlerini, mavi renk ile sualtı araç sisteminin takip etmesi istenilen yörünge gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde araç sistemine daha önce tanımlanmış bozucu etkilerin eklenmesine rağmen

takip etmesi istenilen yörüngeyi PD denetleyiciye göre daha başarılı ve gürbüz bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Bu denetleyiciye ait x ve y yönündeki takip performansı ise Şekil 8'de görülmektedir. Bu denetleyicinin x ve y yönlerinde gösterdiği izleme performansı PD denetleyiciye göre daha hassas olduğu grafik incelendiğinde görülmektedir. BSC denetleyicisine ait lineer ve açısal hızlar ise Şekil 9'da verilmektedir. PD denetleyicisi ile karşılaştırıldığında burada hız değerlerinde daha az bir dalgalanmanın olduğu görülmektedir.



Şekil 8. BSC ile x-y eksenleri boyunca takip

Figure 8. Trajectory tracking with BSC along x-y axis.

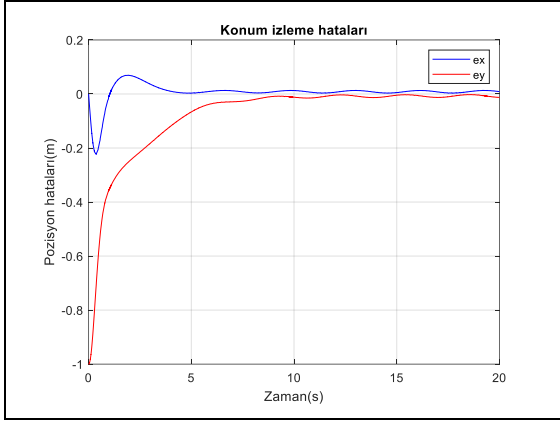


Şekil 9. BSC lineer ve açısal hız.

Figure 9. BSC linear angular velocity.

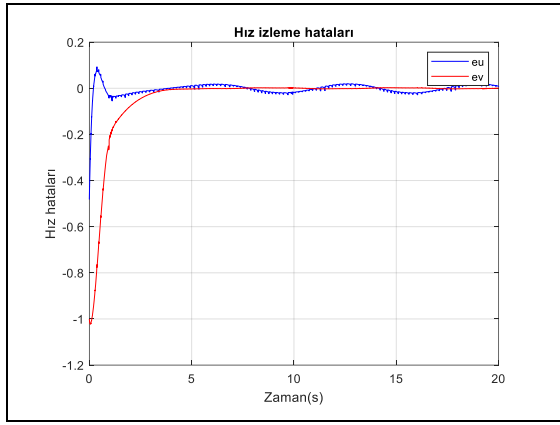
Geriadımlamalı denetleyicinin sualtı aracının dönüşlerde yaşadığı büyük bozulmalardan meydana gelen konum izleme hatalarını ve hız izleme hatalarını 5 sn.'den sonra çok hızlı bir şekilde sıfıra çekebildiği konum ve hız hata grafiklerinde sırasıyla Şekil 10, Şekil 11'de görülmektedir. Bir önceki PD tipi denetleyicide özellikle y-yönünde simülasyon boyunca devam eden dış bozulmalardan kaynaklı titreşimler, geriadımlamalı denetleyici de ortadan kalktığı görülmektedir.

BSC denetleyicisine ait kontrol girişlerine bakıldığında dalgalanma ve sapma torklarında keskin geçişlerin olduğu görülmektedir. Yanal eksen boyunca hız izleme hatasını hızlı bir şekilde azaltmak için daha büyük kontrol girdilerinin üretildiği Şekil 12'de gözlenmektedir.



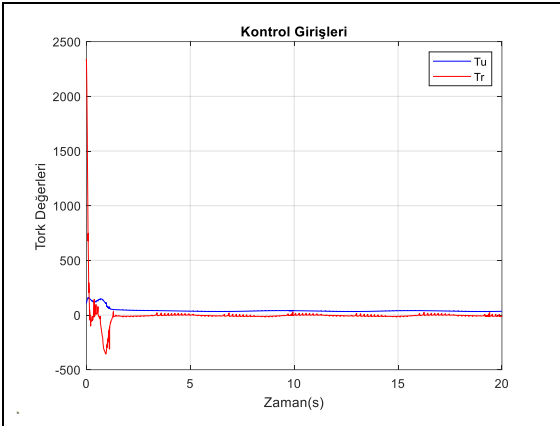
Şekil 10. BSC konum izleme hataları.

Figure 10. BSC position tracking errors.



Şekil 11. BSC hız izleme hataları.

Figure 11. BSC velocity tracking errors.



Şekil 12. BSC kontrol girişleri.

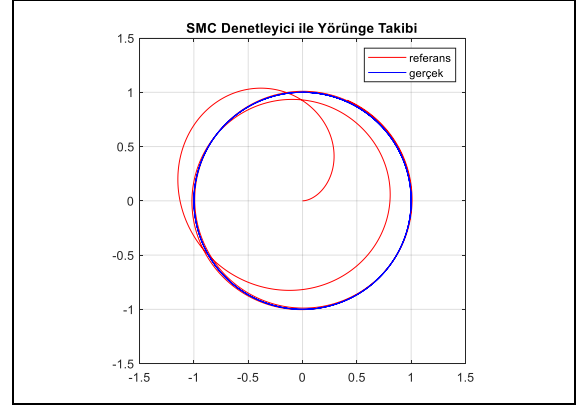
Figure 12. BSC control inputs.

4.3 SMC sonuçları

Sualtı aracının izlemesi gereken rota ve sualtı aracının SMC denetleyicisini kullanarak izlediği iki boyutlu yörünge takip performansı Şekil 13'te verilmiştir. Burada kırmızı renk ile sualtı aracının izlediği yol gösterirken mavi ile aracın takip etmesi istenilen yörünge belirtilmektedir.

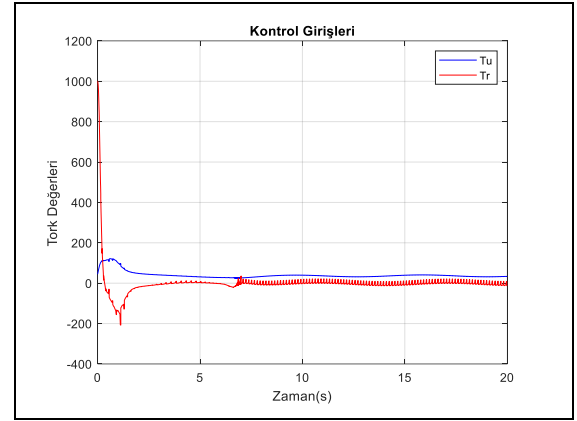
Uygulanan denetleyici, Denklem 26'da tanımlanmış olan S_1 ve S_2 kayma yüzeylerini yaklaşık olarak 7. Sn.'de sifra zorlayarak

sistemin anahtarlama yapmasına neden olur. Bu sonucun kontrol girişleri cinsinden cevabı Şekil 14'te görülmektedir.



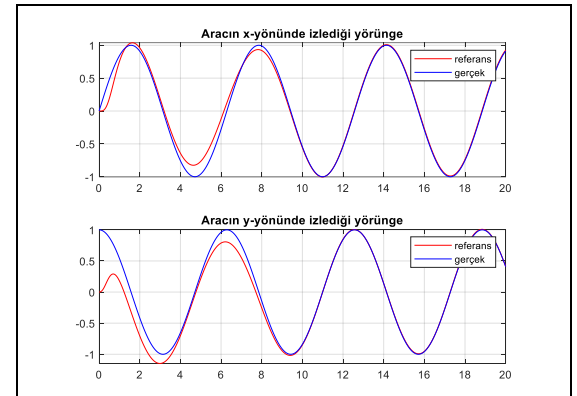
Şekil 13. SMC denetleyici ile yörünge takibi.

Figure 13. Trajectory tracking with SMC controller.



Şekil 14. SMC kontrol girişleri.

Figure 14. SMC control inputs.

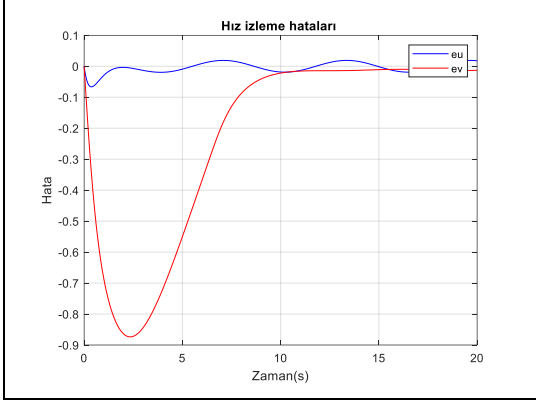


Şekil 15. SMC ile x-y eksenleri boyunca takip

Figure 15. Trajectory tracking with SMC along x-y axis.

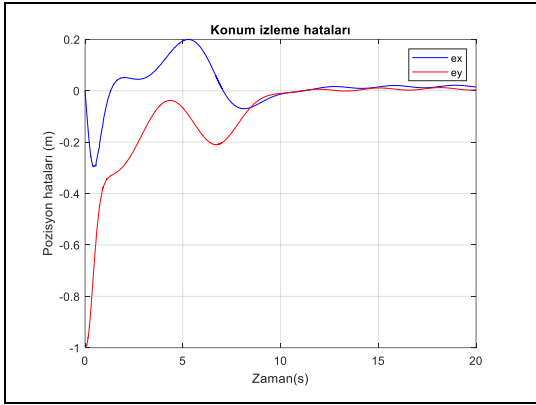
Bu denetleyici ile başlangıç anında üretilen tork miktarları bir miktar düşmüş, fakat gürbüz ve hassas takip performansı sağlanmasından dolayı anahtarlama kaynaklı keskin geçişler (chattering problemi) ortaya çıkmıştır. Bu denetleyicinin x ve y yönlerindeki konum takip performansı Şekil 15'te ayrı ayrı gösterilmiştir. Burada elde edilen sonuçlar incelenecek olursa, sistem tepkisi referans yörüngeyi yakaladıktan sonra dış bozucu etkilerden kaynaklı yörünge takibinde herhangi bir bozulmanın olmadığı görülmektedir.

Kontrol girişlerinden görüldüğü gibi yaklaşık olarak 7. Sn.'de anahtarlama gerçekleşmiş, buna bağlı olarak hız izleme hatası e_v 'nin hızlı bir şekilde sifıra yakınsadığı Şekil 16'da görülmektedir. Konum izleme hataları Şekil 17'de verilmiştir. Konum izleme hatalarına baktığımızda anahtarlamadan başlamasından sonra yaklaşık 3-3.5 sn. sonra konum hatalarının sifır değerine yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 16. SMC hız izleme hataları.

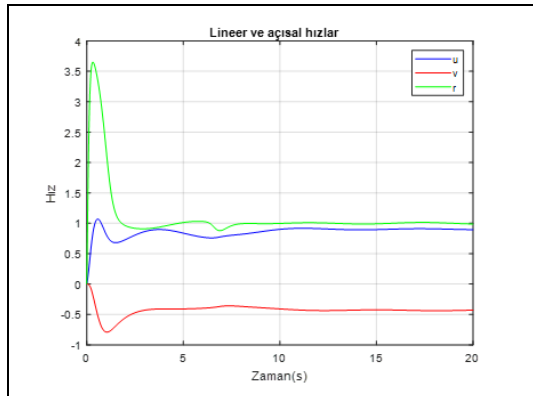
Figure 16. SMC velocity tracking errors.



Şekil 17. SMC konum izleme hataları.

Figure 17. SMC position tracking errors.

Hız ve konum izleme hataları sifıra yakınsamasından sonra, yaklaşık 10 sn. sonunda istenen dalgalanma ve salınım hızlarının izlendiği anlama gelmektedir ve SMC denetleyicisine ait lineer-açısal hız grafiği Şekil 18'de verilmektedir.



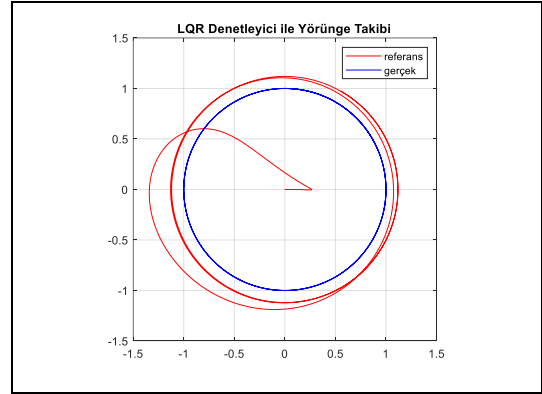
Şekil 18. SMC lineer açısal hız.

Figure 18. SMC linear angular velocity.

4.4 LQR sonuçları

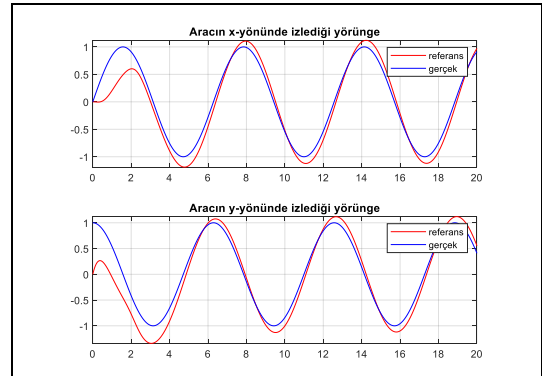
İlk olarak sualtı araç modeline A, B, Q, R matrisleri girilerek MATLAB aracılığıyla Cebirsel Riccati Denklemi nümerik olarak algoritmik olarak çözülerek K kazanç matrisi $K = [-2.7306 \quad -1.0423 \quad 1.000]$ biçiminde elde edilmiştir. Buradan elde edilen K kazanç değerleri sualtı araç modeline uygulanmaktadır.

Şekil 19'da kırmızı renk ile sualtı aracının anlık değişimleri mavi renk ile sualtı araç sistemine verilen referans yörünge gösterilmiştir. Şekil 19'da görüldüğü gibi araç referans yörüngeyi belirli bir mesafeden takip edebilmektedir. Yapısal olarak dairesel bir yörünge takip etmesine rağmen referans yörüngeyi daha yüksek bir değerinde daire izlemektedir. Dolayısıyla konum izleme hatası, bu denetleyici için sabit bir değerde kalmakta, sifıra yakınsayamamaktadır. Bu durum x ve y boyunca izlenen sinüzoidal yörüngelerin gösterildiği Şekil 20'deki grafikte de gözükmektedir. Bir önceki şekilde dairesel yörüngeyi yarıçapından dolayı ortaya çıkan problem burada sinüzoidal yörüngelerin genlik değerlerindeki farklılık ve yörüngeler arası faz farkı olarak gözükmektedir.



Şekil 19. LQR denetleyici ile yörünge takibi.

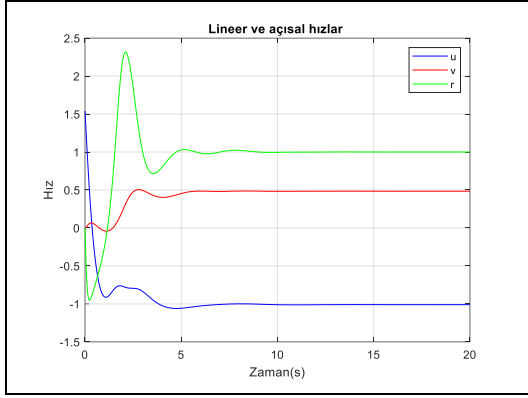
Figure 19. Trajectory tracking with LQR controller.



Şekil 20. LQR ile x-y eksenleri boyunca takip

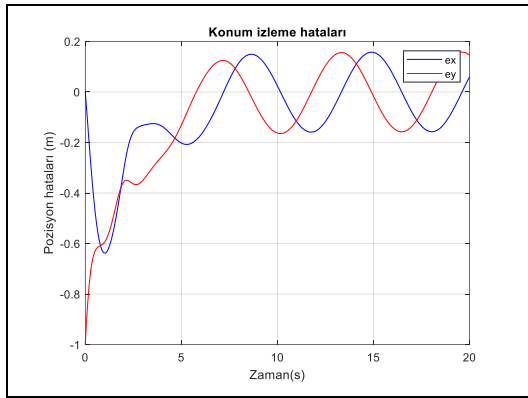
Figure 20. Trajectory tracking with LQR along x-y axis.

Diğer denetleyici performansları ile karşılaştırıldığında LQR denetleyicinin yörünge takibinde tatmin edici bir performans sergileyemediği Şekil 19 ve 20'ye bakarak söylenebilir. LQR denetleyicinin yörünge takip performansı özellikle BSC ve SMC denetleyicilerin altında kalmıştır. Bu denetleyicinin kullanılması ile ortaya çıkan lineer ve açısal hızlar Şekil 21'de gösterilmektedir.



Şekil 21. LQR linear açısal hız.

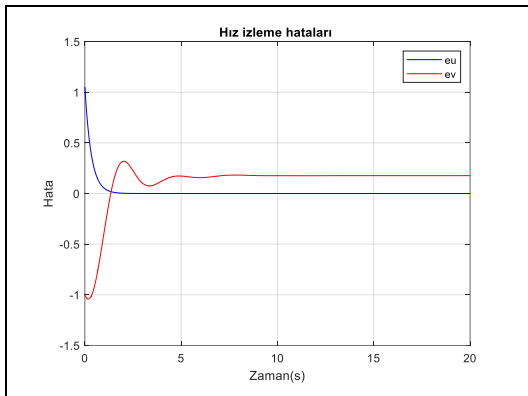
Figure 21. SMC linear angular velocity.



Şekil 22. LQR konum izleme hataları.

Figure 22. LQR position tracking errors.

Yörünge takibi için sualıtı araç sistemine verilen referans yörüngeyi tatmin edici bir performans ile takip edemeyen LQR denetleyicisine ait konum ve hız izleme hataları sıfıra yakınsayamadığı Şekil 22 ile Şekil 23'te verilen grafiklerde gösterilmektedir.

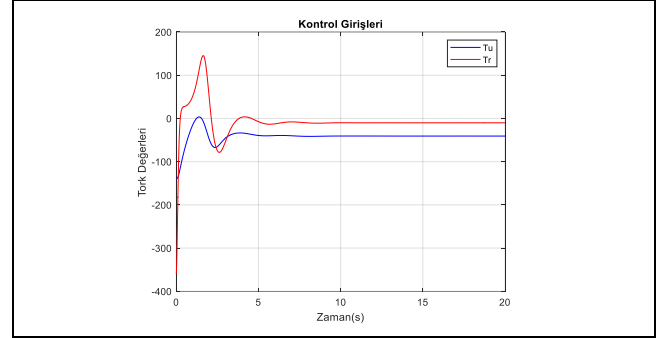


Şekil 23. LQR hız izleme hataları.

Figure 23. LQR velocity tracking errors.

Bu denetleyiciye ait kontrol girişleri ise Şekil 24'te görülmektedir. X ve y eksenindeki, konum hatası ve hız hatasını sıfıra çekebilecek, dolayısıyla aracın konumunu istenen yörüngeye yaklaştırabilecek tork değerlerinin üretilmediği gözükmektedir. Sinüzoidal bir yörüngede zamanla konumun değişimi söz konusu iken tork değerleri belirli bir zamandan

sonra sabit kalmış, böylece sualıtı aracı referans yörüngeyi dışında sabit yarıçaplı dairesel bir yörüngeyi takip etmiştir.



Şekil 24. LQR kontrol girişleri.

Figure 24. LQR control inputs.

Sonuçlar incelendiğinde başlangıçta aracın bulunduğu konum (0, 0) ile referans yörünge arasındaki konum hatası en yüksek seviyededir. Denetleyiciler bu hata girişi için yüksek miktarda tork üretmektedir. Bundan dolayı araç ilk anda referans yörüngeye doğru ani değişim göstermektedir. Zamanla referans yörüngeyi yakalayarak takip işlemini gerçekleştirmektedir. İki boyutlu düzlemde zamana bağlı olarak verilen referans yörüngeye oturması için gereken süreler Tablo 5'te verilmiştir.

Denetleyici yapılarını sadece grafiksel anlamda değil, sayısal değer olarak da karşılaştırabilmek adına denetleyiciye ait kontrol girişlerinin RMS değerleri, anlık olarak konum hatalarının zamanla değişimi ve hız izleme hatalarının RMS değerleri ile lineer ve açısal hızlara ait RMS değerler sırasıyla Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8 ve Tablo 9'da gösterilmiştir. Bu tablolarda simülasyonun başlangıcında anlık hata değerlerinin yüksek olduğu, buna bağlı olarak kontrol girişlerinin tork değerlerinin de yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek torklar neticesinde OSA daha hızlı hareket sağlamış ve zamanla konum ve hız hata değerleri azalma eğilimi göstermiştir.

Tablo 5. Referans yörüngeye oturması için gereken süre.

Table 5 Time required to settle in reference trajectory.

Denetleyiciler	Referans yörüngeye oturması için gereken süre (sn.)
PD	10
BSC	5
SMC	8
LQR	-

Tablo 6. Kontrol girişleri için RMS değerleri.

Table 6. RMS values for control inputs.

		Kontrol Girişleri için RMS Değerler		
		5. sn.	10. sn.	20. sn.
PD	τ_u	496.5952	366.4214	32.3628
	τ_r	698.2866	344.0266	163.2267
BSC	τ_u	78.8637	62.5809	51.1065
	τ_r	370.8702	224.6766	125.1403
SMC	τ_u	60.8992	46.7619	40.9751
	τ_r	208.0733	104.3465	51.7324
LQR	τ_u	44.1591	42.3718	41.5871
	τ_r	3.3471	3.5026	6.8189

Tablo 7. Verilen zamanlara ait anlık konum izleme hataları.

Table 7. Position tracking errors for given time instants.

		Konum izleme hatalarının anlık değerleri		
		5. sn.	10. sn.	20. sn.
PD	x_e	-0.0350	-0.0242	0.0468
	y_e	0.0459	0.0254	-0.0680
BSC	x_e	0.0034	0.0128	0.0088
	y_e	-0.0665	-0.0118	-0.0127
SMC	x_e	0.1936	-0.0135	0.0142
	y_e	-0.0671	-0.0105	0.0033
LQR	x_e	-0.2023	0.0235	0.0603
	y_e	-0.1308	-0.1628	0.1454

Tablo 8. Hız izleme hataları için RMS değerler.

Table 8. RMS values for velocity tracking errors.

		Hız izleme hataları için RMS değerler		
		5. sn.	10. sn.	20. sn.
PD	e_u	0.0069	0.0023	0.0025
	e_v	0.2089	0.1024	0.0465
BSC	e_u	0.0475	0.0412	0.0421
	e_v	0.7071	0.7674	0.7975
SMC	e_u	0.0202	0.0080	0.0039
	e_v	0.6984	0.4451	0.2291
LQR	e_u	0.0732	0.0367	0.0183
	e_v	0.0614	0.0552	0.1155

Tablo 9. Lineer açısal hızları için RMS değerler.

Table 9. RMS values for linear angular velocity.

		Lineer-açısal hızlar için RMS Değerler		
		5. sn.	10. sn.	20. sn.
PD	u	0.1985	0.0572	0.0481
	v	0.0662	0.0813	0.0159
	r	0.1549	0.1153	0.0946
BSC	u	0.8577	0.8787	0.8909
	v	0.4962	0.4657	0.4494
	r	1.3991	1.1996	1.1008
SMC	u	0.8135	0.8154	0.8593
	v	0.4791	0.4325	0.4318
	r	1.4174	1.2007	1.1006
LQR	u	0.7443	0.8784	0.9436
	v	0.2743	0.3781	0.4308
	r	0.7519	0.8779	0.9385

4.5 Karakök ortalama hatası (RMSE)

Denetleyicileri yörünge izleme performansları açısından karşılaştırırken karşılaştırmanın nümerik bir değer üzerinden yapılmasını ve en iyi regresyon denetleyicisinin seçilmesini sağlamak amacıyla benzetim sonuçları ile birlikte karakök ortalama hatası (RMSE) kullanılmıştır.

Denetleyicilere ait RMSE değeri hesaplanırken aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Analiz boyunca belirli örnekleme zamanı ile konum izleme hataları alınır,
- Örnekleme anlarında ortaya çıkan hata miktarlarının kareleri alınır ve bu değerler toplanır,
- Bu toplam alınan örnek sayısına bölünür,
- Elde edilen bölümün karakökü alınır.

RMS hata değeri yukarıda bahsedildiği şekilde örnekleme zamanı 100 alınarak hesaplanmıştır. Referans yörünge için

denetleyicilere ait karakök ortalama hata (RMSE) değerleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Denetleyicilere ait RMS hata değerleri.

Table 10. RMS error values for controllers.

Referans Yörünge		
Denetleyiciler	X konum izleme hatası RMSE değeri	Y konum izleme hatası RMSE değeri
PD denetleyici	0.0446	0.1189
BSC denetleyici	6.3913e-04	0.1056
SMC denetleyici	0.0077	0.1091
LQR denetleyici	0.1961	0.2048

Dairesel olarak gösterilen referans yörüngeye ait RMS hata değerleri incelendiğinde SMC ve BSC denetleyicisinin daha fazla hassasiyete sahip olduğu görülmektedir. RMS hata değeri simülasyon boyunca referans yörüngeden aracın anlık konum değerleri çıkarılarak hesaplandığı için kayan kipli ve geriadımlamalı denetleyici yapılarının daha hızlı tepkiler verebildiği ve istenilen referans yörüngeyi daha az hata oranı ile takip ettiği söylenebilir. Otonom sualtı aracının yörünge takibi için literatürde kullanılan denetleyici çalışmalarının benzetim sonuçlarına göre daha iyi sonuç veren SMC ve BSC denetleyicisi olduğu RMSE değerleri ile kanıtlanmıştır.

5 Tartışma

Bu çalışmada, otonom bir sualtı aracının altı serbestlik dereceli matematiksel modeli Newton-Euler yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Daha sonra, OSA'ların yörünge takip problemi ele alınmıştır. Bu problemi çözmek için birbirinden farklı dört denetleyici tasarlanmıştır. Denetleyici performansları geçici rejim ve kalıcı durum açısından karşılaştırılarak ele alınmıştır. Bunlara ilave olarak manevra kabiliyetinin hassasiyetini ölçebilmek adına sisteme yapay dış bozucu kuvvetler eklenerek yörünge takip performansının gürbüzlüğü test edilmiştir. Denetleyicilerin ürettiği kontrol giriş torqları da birbirleri ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak PD denetleyici modeli oluşturulmuştur. Elde edilen benzetim sonuçlarında sistem hatalarını sıfıra yakınlaştırarak, istenilen hız ve konum değerlerinin asimptotik olarak yakınsaması sağlanmaktadır. Ancak bozucu etkiler eklendiğinde sıklıkla küçük sapmalar meydana geldiği görülmüştür. Bir sonraki denetleyici olarak geriadımlamalı denetleyici modeli oluşturulmuştur. Geriadımlamalı denetleyicisine ait benzetim sonuçları bakıldığında kontrolcünün yörüngeye eklenen bozulmalara karşı gürbüz şekilde performans sağlamış ve iki boyutlu düzlemde elde edilen sonuçlarda bunu desteklemiştir. Eksenlerdeki hata oranlarının diğer denetleyici yapılarından daha az olduğu ayrıca daha hızlı tepki vererek istenilen yörüngeyi kısa sürede yakalayabildiği kanıtlanmıştır. Bu kontrolcü yapısını geliştirilerek ileriki çalışmalarda kullanılabileceği elde edilen benzetim sonuçları ile ortaya koyulmuştur. Bir diğer denetleyici olarak kayan kipli denetleyici algoritması oluşturulmuştur. Elde edilen benzetim sonuçları incelendiğinde kayan kipli kontrolcü istenilen yörüngeyi başarılı ve gürbüz şekilde takip ettiği görülmüştür. Ancak geriadımlamalı kontrolcüye göre daha geç yörüngeyi takip ettiği söylenebilir. Ayrıca kontrol girişlerindeki keskin geçişlerin daha fazla olduğu söylenebilir. Son olarak önerilen denetleyici yapısı ile Doğrusal Karesel Kontrolcü modeli oluşturulmuştur. Q ve R ağırlık matrisleri deneme yanılma yöntemi ile elde edilmektedir. Daha sonra elde edilen ağırlık matrisleri kullanılarak K kazanç matrisi hata fonksiyonunu

minimize edecek şekilde MATLAB aracılığı ile hesaplanarak sistem modeline uygulanmıştır. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere istenilen ve gerçek yörüngeler birbirine yakınsamasına rağmen istenilen diğer denetleyici yapılarının gösterdiği performans bu denetleyici ile elde edilememiştir. Ayrıca Q ve R 'nin seçimin sistem cevabını çok fazla etkilediği gözlemlenmektedir.

Otonom sistemlerin birçok alanda kullanımının artması ile daha fazla hassasiyete sahip, daha hızlı tepkiler verebilen ve daha az hata oranına sahip denetleyicilerin tercih edileceği açıktır. İleriki çalışmalarda, SMC ve BSC denetleyici katsayılarının deneme yanılma yöntemi ile değil LQR tabanlı bir yaklaşım ile bulunması hedeflenerek daha başarılı denetleyici tasarımının gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

6 Discussion

In this study, a six-degrees-of-freedom mathematical model of an autonomous underwater vehicle is developed using the Newton-Euler method. Then, the trajectory tracking problem of AUVs is discussed. To solve this problem, four different controllers are designed. Controller performances are discussed in terms of transient and steady state. In addition to these, in order to measure the sensitivity of maneuverability, artificial external disturbance forces were added to the system and the robustness of the trajectory tracking performance was tested. The control input torques produced by the controllers were also compared with each other.

First, the PD controller model was created. In the simulation results obtained, the system errors are brought closer to zero, and the desired velocity and position values are provided to converge asymptotically. However, it was observed that small deviations occur frequently when disturbing effects are added. As the next controller, a backstepping controller model was created. When the simulation results of the backstepping controller are examined, it provides a robust performance against the distortions added to the trajectory of the controller, and the results obtained in the two-dimensional plane support this. It has been proven that the error rates in the axes are less than other controller structures, and that it can reach the desired trajectory in a short time by responding faster. It has been demonstrated by the obtained simulation results that this controller structure can be developed and used in future studies.

As another controller, the sliding mode controller algorithm has been created. As another controller, the sliding mode controller algorithm has been created. When the obtained simulation results are examined, it is seen that the sliding mode controller follows the desired trajectory successfully and robustly. However, it can be said that it follows the trajectory later than the backstepping controller. Also, it can be said that the sharp transitions in the control inputs are more. Finally, the Linear Quadratic Regulator model was created with the proposed controller structure. Q and R weight matrices are obtained by trial and error method. Then, using the obtained weight matrices, the K gain matrix was calculated by MATLAB in a way that minimizes the error function and applied to the system model. As can be seen from the results, although the desired and real trajectories converge, the performance of other desired controller structures could not be achieved with this controller. In addition, it is observed that Q and R affect the system response of the selection very much.

With the increasing usage of autonomous systems in many areas, it is clear that controllers with greater sensitivity, faster responses and less error rate will be preferred. In future studies, it is planned to realize a more successful controller design by aiming to find the SMC and BSC controller coefficients with an LQR-based approach, not by trial-and-error method.

7 Yazar katkı beyanı

Bu çalışma İrem Nur ORUÇ'un Yüksek Lisans Tez çalışmasının bir kısmını oluşturmaktadır. Literatür taraması, nümerik simülasyonlar ve sonuçların analizi bu yazar tarafından yapılmıştır. Orijinal taslak da bu yazar tarafından hazırlanmıştır. Çalışmanın kavramsallaştırılması ve süpervizyonu Umut TİLKİ tarafından yapılmıştır. Kontrolörün metodolojisi, doğrulanması, sonuçların analizi, orijinal taslağın yazılması, düzenlenmesi ve gözden geçirilmesi bu yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Sunulan çalışmada etik kurul alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] Kumar N, Rani M. "An efficient hybrid approach for trajectory tracking control of autonomous underwater vehicles". *Applied Ocean Research*, 95, 1-10, 2020.
- [2] Elmokadem T, Zribi M, Youcef-Toumi K. "Trajectory tracking sliding mode control of underactuated AUVs". *Nonlinear Dynamics*, 84(2), 1079-1091, 2016.
- [3] Zhang H, Zhang Y, Xu Y, Zhou J, Guo Y. "Research on backstepping tracking control of deep-diving AUV based on biological inspiration". *IEEE 2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Hefei, China, 22-24 August 2020.
- [4] Lakhwani, DA, Adhyaru, DM. "Performance comparison of PD, PI and LQR controller of autonomous under water vehicle". *IEEE 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUICONe)*, Gujarat, India, 28-30 November 2013.
- [5] Meng F, Liu A, Jing S, Zu Y. "FSM trajectory tracking controllers of OB-AUV in the horizontal plane". *IEEE 2021 International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR)*, Nagoya, Japan, 4-6 March 2021.
- [6] Li J, Du J, Zhu G, Lewis FL. "Simple adaptive trajectory tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles under LOS range and angle constraints". *IET Control Theory & Applications*, 14(2), 283-290, 2020.
- [7] Duan K, Fong S, Chen CP. "Reinforcement learning based model-free optimized trajectory tracking strategy design for an AUV". *Neurocomputing*, 469, 289-297, 2022.
- [8] Elmokadem T, Zribi M, Youcef-Toumi K. "Terminal sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated Autonomous Underwater Vehicles". *Ocean Engineering*, 129, 613-625, 2017.
- [9] Jiang Y, Guo C, Yu H. "Horizontal trajectory tracking control for an underactuated AUV adopted global integral sliding mode control". *IEEE 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Shenyang, China, 9-11 June 2018.

- [10] Qiao L, Zhang W. "Fast trajectory tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles". *IEEE 2018 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)*, Wuhan, China, 1-3 December 2018.
- [11] Kang S, Yu J, Zhang J, Hu F. "Research on the trajectory prediction of a twin screw AUV based on an accurate dynamic model". *IEEE 2021 6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*, Dalian, China, 15-17 July 2021.
- [12] Fossen TI. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. PhD Thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway, 1999.
- [13] Fossen TI. *Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. 1st ed. Trondheim, Norway, Marine Cybernetics, 2002.
- [14] Healey AJ, Good MR. "The NPS AUVII Autonomous Underwater Vehicle Testbed: Design and Experimental Verification". *American Society of Naval Engineers*, 104(3), 191-202, 1992.
- [15] Yu C, Xiang X, Niu Z. "3D trajectory tracking for underactuated AUV using guidance-based PD controller". *IEEE 2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*, Chengdu, China, 27-29 July 2016.
- [16] Krstic M, Kokotovic PV, Kanellakopoulos I. *Nonlinear and Adaptive Control Design*. 1st ed. USA, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [17] Edwards C, Spurgeon S. *Sliding Mode Control: Theory and Applications*. 1st ed. USA, Crc Press, 1998.
- [18] Da Silva GRG, Bazanella AS, Lorenzini C, Campestrini L. "Data-driven LQR control design". *IEEE Control Systems Letters*, 3(1), 180-185, 2018.
- [19] Stokey RP, Roup A, von Alt C, Allen B, Forrester N, Austin T, Goldsborough R, Purcell M, Jaffre F, Packard G, Kukulya, A. "Development of the REMUS 600 autonomous underwater vehicle". *IEEE 2005 Proceedings of OCEANS MTS/IEEE*, Washington, DC, USA, 17-23 September 2005.
- [20] Lin JM, Lin CH. "A novel fuel cell system design by using Ziegler-Nichols-based intelligent fuzzy controller". *IEEE 2013 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Tianjin, China, 14-17 July 2013.
- [21] Gökçen G, Murat F. "PID parameters tuning methods: application to second-order system and evaluation with comparison". *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 30(2), 355-362, 2015.