

Robot kolları için doğrusal süzgeç tabanlı çıkış geri beslemeli kontrolör tasarımında uyarlamalı yöntem yaklaşımı

An adaptive method approach in designing a linear filter based output feedback controller for robot manipulators

Bayram Melih YILMAZ^{1*} , Enver TATLICIOĞLU² 

¹Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Sivas, Türkiye.

melih@sivas.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.

etatlicioglu@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 25.04.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 13.10.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.00723

Kabul Tarihi/Accepted: 29.11.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada modeli belirsizlikler içeren, pozisyon ölçümleri mevcut olup, hız ölçümleri olmayan robot kolları için takip problemi ele alınmıştır. Ölçül(e)meyen hız bilgisinin telafi edilebilmesi için pozisyon bilgisi tabanlı olarak süzgeçleme tekniği yaklaşımdan yararlanılmaktadır. Model belirsizlikleri için uyarlamalı sinir ağlarından yararlanılarak kontrolörün hız ölçümlerine olan bağımlılığını ortadan kaldırmak için doğrusal süzgeç tabanlı bir kontrolör tasarlanmıştır. Kapalı çevrim sistemin kararlılığı Lyapunov yöntemiyle garanti edilmiştir. Sunulan kontrolörün performansını göstermek için iki serbestlik dereceli robot kolu modeli kullanılarak sayısal benzetim sonuçları uyarlamalı bulanık mantık yöntemi ile karşılaştırılmaları olarak oluşturulmuştur.

Anahtar kelimeler: Çıkış geri beslemeli kontrol, Süzgeç tabanlı kontrol, Uyarlamalı sinir ağları, Uyarlamalı bulanık mantık, Lyapunov yöntemleri, Robot kolları.

Abstract

This study addresses the tracking problem for robot arms with parametric uncertainties in the model, position measurements available, and no velocity measurements. A filtering technique based on position information is used to compensate for the unmeasured velocity information. A linear filter-based controller is designed to eliminate the controller's dependence on velocity measurements by utilizing adaptive neural networks for model uncertainties. The stability of the closed-loop system is guaranteed by the Lyapunov method. To demonstrate the performance of the proposed controller, numerical simulation results are generated using a two-degree-of-freedom robot arm model and compared comparatively with adaptive fuzzy logic method.

Keywords: Output feedback control, Filter based control, Adaptive neural networks, Adaptive fuzzy logic, Lyapunov methods, Robot manipulators.

1 Giriş

Robotların endüstrideki kullanımlarının artması başarımlarının artırılması konusundaki çalışmalara önem kazandırmıştır [1]-[5]. Robot modelleri iyi tanımlanmış çok girişli/çok çıkışlı doğrusal olmayan modellerdir. Modelleri iyi tanımlanmış olmasına rağmen modeli tamamlamak için gereken parametreler çoğu zaman tam olarak bilinmemektedir. Bu tür parametrik belirsizlikler içeren sistemlerin kontrolünde sıkça tercih edilen yöntemlerden biri gürbüz kontrol yöntemidir. Model parametrelerinin bastırılarak telafi edilmesi için tasarlanan gürbüz kontrolörlerden bazıları [6],[7]'de verilmiştir. Kontrol sistemlerinin gürbüzlüğünün artırılabilmesi için çok sayıda tüm durum geri beslemeli kontrolör bilimsel yazına kazandırılmıştır [8]. Modeldeki belirsizlikler için gürbüzlüğün sağlanmasının yanı sıra robot kollarında hız sensörünün maliyetinin yüksek olması, sistemin karmaşıklığını artırması gibi sebeplerden kullanıl(a)maması durumu için alternatif çözüm yöntemleri sunulmuştur. Bu yöntemlerden en yaygın olanı gözlemci tasarımlarıdır. Bu yöntemde hız bilgisi, konum bilgisi kullanılarak çeşitli hesaplama yöntemleriyle kestirilir. Gözlemcilerin bir kısmı hız bilgisinin kestirilmesi için model bilgisine ihtiyaç duyar. Modeli parametrik belirsizlikler içeren sistemler için bu tarz yöntemlerin kullanılması mümkün olmayabilmektedir. Bu

yöntemlerin sunulduğu çalışmaların bazılarında [9]-[12]'de yer verilmiştir. Bilimsel yazında model bilgisinin mevcut olmadığı durumlarda kullanılabilen gözlemciler de mevcuttur. Bu tarz yöntemlerde bilinmeyen model gürbüz yöntemlerle telafi edilerek hız bilgisi kestirilmektedir. Bu çalışmalardan bazıları [13]-[17]'de verilmiştir. Diğer bir yaklaşım ise parametrik model belirsizliklerinin uyarlamalı yöntemlerle telafi edildiği gözlemci tasarımlarıdır. Bu tarz yöntemlerin kullanılabilmesi için regresör matrisinin oluşturulması gerekmektedir ve sistemin serbestlik derecesi arttıkça bu matrisin çıkarılması zorlaşmaktadır. Bunun yanında her farklı sistem için regresör matrisinin tekrar oluşturulması gerekmektedir. Model belirsizlikleri ile uyarlamalı yöntemlerle mücadele eden gözlemci tasarımlarından bazıları [18]-[21]'te sunulmuştur. Gözlemci kullanılarak tasarlanan diğer bir çalışma ise [22]'de sunulmuştur. Model belirsizlikleri ile mücadele etmek için sinir ağları yapısından yararlanılmıştır. Diğer bir gözlemleyici tabanlı çalışma ise [23]'te sunulan, model belirsizlikleri için sinir ağlarını kullanan geri adımlamalı kontrol çalışmasıdır. Hız ölçümlerinin olmadığı diğer bir çalışma ise [24]'te verilen gözlemleyici tabanlı tasarımda hata toleransı kontrolü çalışılmıştır. Benzer şekilde [25]'te hız bilgisine sahip olmayan bir sistem için gözlemleyici tabanlı hata toleranslı kontrolör tasarlanmıştır. Çıkış geri beslemeli kontrol sistemlerindeki diğer bir yaklaşım ise süzgeç tabanlı yöntemlerdir. Bu

*Yazışılan yazar/Corresponding author

yöntemlerde sistemin kontrol edilebilmesi için ölçülen ya da kestirilen hız bilgisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Modeli belirsizlikler içeren sistemler için gürbüz kontrolörlerin geliştirilmesinde hız bilgisi eksikliğini karşılamak için kullanılırlar. Bu tarz yöntemler için bilimsel yazında bulunan çalışmalardan bazıları [26]-[28]'de verilmiştir. Diğer yandan model belirsizliklerine sahip robot kollarının model bilgisinin bir kısmının sinir ağları yardımıyla uyarlamalı olarak kestirilmesi ile başarımın artırıldığı çalışmalar [29]-[31]'de verilmiştir. Benzer bir yöntem olan uyarlamalı bulanık mantık stratejisi de model belirsizlikleri ile mücadelede kullanılmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları [32],[33]'de verilmiştir.

Bu çalışmada modeli belirsizlikler içeren robot kolu için sadece pozisyon ölçümlerine dayanan (hız ölçümlerine ihtiyaç duyulmayan) yenilikçi bir kontrolör tasarlanmıştır. Sunulan kontrolör için Lyapunov yöntemi kullanılarak kapalı çevrim sistemin kararlılığı garanti edilmiştir [30]. Tasarlanan kontrolörün performansını test etmek için uyarlamalı bulanık mantık yapısından yararlanılarak karşılaştırmalı sayısal benzetim çalışmaları yapılmıştır.

2 Robot modeli ve özellikleri

n serbestlik dereceli ve tam tahrikli olan dönel eklemli robot kolunun matematiksel ifadesi aşağıdaki yapıda verilebilir [6]

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_d\dot{q} = \tau \quad (1)$$

$q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t) \in \mathbb{R}^n$ sırasıyla, eklem pozisyonunu, hızını ve ivmesini ifade ederken $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı ve simetrik eylemsizlik matrisini, $V_m(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ merkezci koriyolis matrisini, $G(q) \in \mathbb{R}^n$ yerçekimi vektörünü, $F_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sabit, köşegen ve artı tanımlı viskoz sürtünme matrisini ve $\tau(t) \in \mathbb{R}^n$ tork giriş vektörünü göstermektedir. Standart varsayım olarak çalışmanın devamı için Denklem (1)'deki ifadenin sol tarafındaki dinamik model terimlerinin birinci dereceden türevlenebilir olduğu varsayılakta ve dinamik model terimleri aşağıdaki özellikleri sağlamaktadır.

Özellik 1: Yukarıdaki dinamiklerin elde edilmesinin doğrudan bir sonucu olarak eylemsizlik matrisi aşağıdaki eşitsizliği sağlar [6].

$$m_1 \|\eta\|^2 \leq \eta^T M \eta \leq m_2 \|\eta\|^2 \quad \forall \eta \in \mathbb{R}^n \quad (2)$$

Burada, m_1 ve m_2 artı sabitleri göstermektedir.

Özellik 2: Eylemsizlik ve merkezci koriyolis matrisleri, $\dot{M}(q)$ eylemsizlik matrisinin zamana göre türevini ifade edecek şekilde aşağıdaki ilişkiyi sağlarlar [36]

$$\eta^T \left(\frac{1}{2} \dot{M}(q) - V_m(q, \dot{q}) \right) \eta = 0 \quad \forall \eta \in \mathbb{R}^n \quad (3)$$

Özellik 3: Merkezci koriyolis matrisi aşağıdaki değişim özelliğinden yararlanılarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir [37].

$$V_m(q, v)\eta = V_m(q, \eta)v \quad \forall \eta, v \in \mathbb{R}^n \quad (4)$$

Özellik 4: Merkezci koriyolis ve viskoz sürtünme matrislerinin normları için aşağıdaki eşitsizlik yazılabilir [6].

$$\|V_m(q, \eta)\|_{i\infty} \leq \zeta_{c1} \|\eta\| \quad \forall \eta \in \mathbb{R}^n, \quad (5)$$

$$\|F_d\|_{i\infty} \leq \zeta_f \quad (6)$$

ζ_{c1} ve ζ_f artı sabitleri temsil ederken $\|\cdot\|_{i\infty}$ ifadesi matrisin indirgenmiş sonsuz normunu göstermektedir.

Özellik 5: Denklem (1)'de verilen terimler için aşağıdaki eşitsizlikler yazılabilir [27]

$$\|M(\eta) - M(v)\|_{i\infty} \leq \zeta_{m1} \|\eta - v\| \quad (7)$$

$$\|M^{-1}(\xi) - M^{-1}(v)\|_{i\infty} \leq \zeta_{m2} \|\eta - v\| \quad (8)$$

$$\|V_m(\xi, \eta) - V_m(v, \xi)\|_{i\infty} \leq \zeta_{c2} \|\xi\| \|\eta - v\| \quad (9)$$

$$\|G(\eta) - G(v)\| \leq \zeta_g \|\eta - v\| \quad \forall \xi, \eta, v, \in \mathbb{R}^n \quad (10)$$

$\zeta_{m1}, \zeta_{m2}, \zeta_{c2}, \zeta_g \in \mathbb{R}$ bilinen artı sabitleridir.

2.1 Kontrolör tasarımı ve hata sisteminin oluşturulması

Kontrol tasarımının temel amacı, Denklem (1)'de matematiksel modeli verilen robot kolunun model bilgisinin belirsizlikler içerdiği ve sadece eklem pozisyon ölçümlerinin olduğu (eklem hız ölçümlerinin olmadığı) kısıtları altında eklem pozisyonlarının hedeflenen eklem pozisyonlarını olabildiğince yakından takip etmesidir.

Kontrol hedefini matematiksel olarak ifade edebilmek için, eklem pozisyonlarının takip hatası $e(t) \in \mathbb{R}^n$ aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$e \triangleq q_d - q \quad (11)$$

Burada, $q_d(t) \in \mathbb{R}^n$ referans eklem pozisyonlarını göstermektedir. Eklem hız ölçümlerinin mevcut olmamasından dolayı süzgeç tabanlı bir yöntemden yararlanılmaktadır. Hız ölçümleri yerine aşağıdaki şekilde tanımlanan $e_f(t) \in \mathbb{R}^n$ yardımcı işaretten yararlanılacaktır.

$$e_f \triangleq p - ke \quad (12)$$

Burada, $k \in \mathbb{R}$ sabit, artı kontrol kazancı olup $p(t) \in \mathbb{R}$ aşağıdaki şekilde güncellenen ve verilen başlangıç koşulunu sağlayan yardımcı değişkendir.

$$\dot{p} \triangleq -(k+1)p + (k^2+1)e \quad p(0) = ke(0) \quad (13)$$

Denklem (12)'in türevi alınıp Denklem (13)'ten yararlanılarak aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

Burada, $z(t) \in \mathbb{R}$ ifadesi aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\dot{e}_f \triangleq -kz - e_f + e \quad (14)$$

$$z \triangleq \dot{e} + e + e_f. \quad (15)$$

$z(t)$ 'nin dinamiklerine ulaşılabilmesi için Denklem (15)'in zamana göre birinci türevi alınıp sol taraftan eylemsizlik matrisi ile çarpıldığında Denklem (1)'in yardımıyla aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

$$M\dot{z} = N - \tau - (k-1)Mz - V_m z \quad (16)$$

Burada, $N(q, \dot{q}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d) \in \mathbb{R}^n$ aşağıdaki şekilde tanımlanır

$$N \triangleq M(q)\ddot{q}_d + V_m(q, \dot{q})(\dot{q}_d + e + e_f) + G(q) + F_d\dot{q} - 2M(q)e_f. \quad (17)$$

N fonksiyonunun hedeflenen formda yazılmış hali olan $N_d(x_d) \in \mathbb{R}^n$, $q \rightarrow q_d$, $\dot{q} \rightarrow \dot{q}_d$ olacak şekilde aşağıdaki yapıda tanımlanabilir.

$$N_d \triangleq M(q_d)\ddot{q}_d + V_m(q_d, \dot{q}_d)(\dot{q}_d) + G(q_d) + F_d \dot{q} \quad (18)$$

Burada, $x_d(t) \triangleq [q_d^T, \dot{q}_d^T, \ddot{q}_d^T]^T \in \mathbb{R}^{3n}$ olarak tanımlanmaktadır. N ile hedeflenen formu olan N_d arasındaki fark aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\tilde{N} \triangleq N - N_d \quad (19)$$

Denklem (19)'da verilen ifade için ortalama değer teoreminden yararlanılarak aşağıdaki şekilde bir üst sınır yazılabilir [34].

$$\|\tilde{N}\| \leq \rho(\|x\|)\|x\| \quad (20)$$

Burada, $x(t) \triangleq [e^T, e_f^T, z^T]^T \in \mathbb{R}^{3n}$ olarak tanımlanırken, $\rho(\|x\|) \in \mathbb{R}$ bilinen artı tanımlı bir fonksiyondur.

Önerme 1: Sinir ağırları yapısının evrensel yaklaşım özelliğinden yararlanılarak Denklem (18)'deki hedeflenen yörünge tabanlı dinamikler aşağıdaki şekilde yazılabilir [39].

$$N_d \triangleq w^T \sigma + \varepsilon \quad (21)$$

Burada, $w(t) \in \mathbb{R}^{3n \times n}$ sabit ağırlık matrisini, $\sigma(x_d) \in \mathbb{R}^{3n}$ aktivasyon fonksiyonunu, $\varepsilon(x_d) \in \mathbb{R}^n$ fonksiyonel yaklaşım hatasını ifade etmektedir. $\bar{\varepsilon}$ ise ifadesi $\|\varepsilon(x_d)\| < \bar{\varepsilon}$ koşulunu sağlayan artı bir sabittir.

Denklem (17)-(19) ve (21)'den yararlanılarak Denklem (16) aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$$M\dot{z} = w^T \sigma + \varepsilon + \tilde{N} - \tau - (k-1)Mz - V_m z. \quad (22)$$

Kontrol tork girişi aşağıdaki şekilde tasarlanmıştır.

$$\tau = \hat{w}^T \sigma + e - ke_f \quad (23)$$

Burada, $\hat{w}(t) \in \mathbb{R}^{3n \times n}$ kestirilen ağırlık matrisinin değerini ifade etmektedir ve aşağıda verilen güncelleme kuralı ile güncellenmektedir.

$$\dot{\hat{w}} = Proj\{\Gamma_{nn} \sigma z^T\} \quad (24)$$

Burada, $Proj\{\cdot\}$ projeksiyon operatörünü ifade etmektedir ve güncellenen ağırlık matrisinin sınırlı kalması için kullanılmaktadır [33]. $\Gamma_{nn} \in \mathbb{R}^{3n \times 3n}$ artı tanımlı ve simetrik adaptasyon kazanç matrisidir. Denklem (23)'te verilen kontrol tork girişinden yararlanılarak kapalı çevrim hata sistemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$M\dot{z} = w^T \sigma - \hat{w}^T \sigma + \tilde{N} - e + ke_f + \varepsilon - (k-1)Mz - V_m z. \quad (25)$$

2.2 Kararlılık analizi

Bu bölümde, önceki bölümde elde edilen hata dinamiklerinden yararlanılarak Lyapunov tipi kararlılık yöntemleri yardımıyla kapalı çevrim sistemin kararlılığı araştırılacaktır.

Teorem 1: Denklem (23)'te verilen kontrol tork girişi ve Denklem (24)'de verilen güncelleme kuralı kapalı çevrim sistemin sınırlılığını ve takip hatasının kontrol kazançlarıyla ayarlanabilen bir bant içinde kalacağını garanti eder.

İspat: Teoremin doğruluğunu ispatlamak için aşağıdaki Lyapunov aday fonksiyonu $V(t) \in \mathbb{R}$ tanımlanır.

$$V \triangleq \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2} e_f^T e_f + \frac{1}{2} z^T M z + \frac{1}{2} tr\{\tilde{w}^T \Gamma_w^{-1} \tilde{w}\} \quad (26)$$

Burada, $tr\{\cdot\}$ iz operatörünü ve $\tilde{w}(t) \in \mathbb{R}^{3n \times n}$ ağırlık matrisi değeri ile kestirilen ağırlık matrisinin değeri arasındaki farkı ifade etmektedir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\tilde{w} \triangleq w - \hat{w} \quad (27)$$

Projeksiyon algoritması kullanılarak $\|\tilde{w}\|_{i\infty} \leq \bar{w}$ ifadesinin artı sabit olan \bar{w} ile sınırlı olduğu garanti edilir.

Denklem (26)'da verilen ifade aşağıdaki şekilde alttan ve üstten sınırlandırılabilir.

$$\frac{1}{2} \min\{1, m_1\} \|x\|^2 \leq V \leq \frac{1}{2} \max\{1, m_2\} \|x\|^2 + \frac{\bar{w}^2 \lambda_{\max}\{\Gamma_w^{-1}\}}{2}. \quad (28)$$

Denklem (26)'deki ifadenin türevi alındığında aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

$$\dot{V} \triangleq e^T \dot{e} + e_f^T \dot{e}_f + \frac{1}{2} z^T \dot{M} z + z^T \dot{z} + tr\{\tilde{w}^T \Gamma_{nn}^{-1} \dot{\tilde{w}}\}. \quad (29)$$

Denklemler (14), (16), (24), (25) ifadeleri Denklem (29)'da yerine yazıldıktan sonra Denklem (3)'ten yararlanılarak ortak terimler sadeleştirildiğinde aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

$$\dot{V} \triangleq -e^T e - e_f^T e_f + z^T (w^T \sigma - \hat{w}^T \sigma) + z^T \tilde{N} - k_1 z^T M z - tr\{\tilde{w}^T \Gamma_{nn}^{-1} \dot{\tilde{w}}\} + z^T \varepsilon \quad (30)$$

Burada, $k = k_1 + 1$ olarak kullanılmıştır. Denklem (2)'de verilen ifadeden yararlanılarak Denklem (30)'da verilen ifade için aşağıdaki şekilde bir üst sınır yazılabilir.

$$\dot{V} \leq -e^T e - e_f^T e_f - m_1 k_1 \|z\|^2 + z^T \tilde{N} + z^T \varepsilon \quad (31)$$

Burada, $tr\{\tilde{w}^T \Gamma_{nn}^{-1} \dot{\tilde{w}}\} = z^T \tilde{w}^T \sigma$ eşitliğinden yararlanılmıştır. $k_1 = \frac{1}{m_1} (1 + k_2 + \delta)$ olarak seçilip, Denklem (20)'den yararlanılarak aşağıdaki ifadeye ulaşılabilir. Burada, δ artı sabittir.

$$\dot{V} \leq -e^T e - e_f^T e_f - \|z\|^2 + \rho \|x\| \|z\| - k_2 \|z\|^2 + z^T \varepsilon - \delta \|z\|^2. \quad (32)$$

[36]'deki doğrusal olmayan sönümleme bileşeninden yararlanılarak aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

$$\rho \|x\| \|z\| - k_2 \|z\|^2 \leq \frac{\rho^2}{4k_2} \|x\|^2. \quad (33)$$

Denklem (33)'ten yararlanılarak Denklem (32)'de verilen ifadenin sağ tarafı için aşağıdaki şekilde bir üst sınır yazılabilir.

$$\dot{V} \leq -\|x\|^2 + \frac{\rho^2}{4k_2} \|x\|^2 + z^T \varepsilon - \delta \|z\|^2 \quad (34)$$

$\bar{\varepsilon} \|z\| \leq \frac{\bar{\varepsilon}^2}{4\delta} + \delta \|z\|^2$ ifadesinden yararlanılarak Denklem (34)'te verilen ifade için aşağıdaki şekilde bir üst sınır yazılabilir.

$$\dot{V} \leq -\left(1 - \frac{\rho^2}{4k_2}\right) \|x\|^2 + \frac{\bar{\varepsilon}^2}{4\delta} \quad (35)$$

Burada; $k_2 > \frac{\rho^2}{4}$ için $\beta \triangleq \left(1 - \frac{\rho^2}{4k_2}\right)$ ifadesi $0 < \beta < 1$ olur. Denklem (35) aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$$\dot{V} \leq -\beta \|x\|^2 + \frac{\bar{\varepsilon}^2}{4\delta}. \quad (36)$$

Denklem (28) ve Denklem (36) yapılarından yararlanılarak, $V(t) \in \mathcal{L}_\infty$ gösterilebilir ve böylece $e(t)$ ve $z(t)$ 'nin sınırlı olduğu kanıtlanabilir. Standart sinyal takip argümanları kullanılarak kapalı döngü kontrol sistemi altında tüm işaretlerin sınırlı olduğu gösterilebilir. Kontrolör kazançları ile ayarlanabilen $e(t)$ ve $z(t)$ işaretleri, Denklem (28) ve Denklem (36) ifadelerinin sağ tarafındaki sabit sınırlara bağlı olarak tek biçimli yarı küresel nihai bir bandın içinde kalacağı garanti edilir. Böylece hedeflenen eklem pozisyonu vektörünün pratik olarak takip edileceği garanti edilir.

3 Benzetim sonuçları

Sunulan kontrolörün performansının gösterilmesi için iki serbestlik dereceli düzlemsel bir robot kolu modeli kullanarak sayısal benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Denklem (1)'de verilen dinamik model aşağıdaki ifadelerle birlikte kullanılmıştır [1],

$$M = \begin{bmatrix} p_1 + 2p_3c_2 & p_2 + p_3c_2 \\ p_2 + p_3c_2 & p_2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$V_m = \begin{bmatrix} -p_3s_2\dot{q}_2 & -p_3s_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ -p_3s_2\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$F_d = \begin{bmatrix} p_4 & 0 \\ 0 & p_5 \end{bmatrix} \quad (39)$$

Burada, $s_2 = \sin(q_2)$, $c_2 = \cos(q_2)$, $c_{12} = \cos(q_1 + q_2)$, $p_1 = 3.473$, $p_2 = 0.193$, $p_3 = 0.242$, $p_4 = 5.3$, $p_5 = 1.1$ olarak alınmıştır. Sayısal benzetim çalışmaları gerçekleştirilirken Denklem (1)'de verilen dinamik model sadece robot kolunun hareketlerinin benzetimi amacıyla kullanılmıştır ve giriş torkunun bir parçası olarak kullanılmamıştır. Yerçekimi etkisini ifade eden $G(q)$ robot kolunun yatay konumda hareket etmesinden dolayı ihmal edilmiştir. Hedeflenen eklem pozisyonu vektörü aşağıdaki şekilde seçilmiştir

$$q_d = \begin{bmatrix} 0.7 \sin(t)(1 - \exp(-0.3t^3)) \\ 1.2 \sin(t)(1 - \exp(-0.3t^3)) \end{bmatrix} [rad] \quad (40)$$

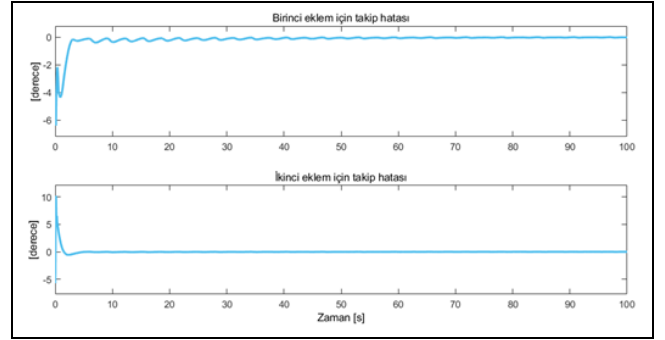
Deneme yanılma yoluyla belirlenen kontrol kazancı $k = 12.1$ olarak ayarlanmıştır. Aktivasyon fonksiyon olarak $\tanh(\cdot)$ fonksiyonu kullanılmış ve $\Gamma_{nm} = \text{diag}\{35 \times 10^3, 25 \times 10^{-1}, 31 \times 10^{-1}, 8 \times 10^3, 42 \times 10^2, 21 \times 10^2\}$ olarak ayarlanmıştır. Robot kolu başlangıçta hareketsiz durumdaki konumu $q(0) = [0.1 \ 0.1]^T rad$ olarak ayarlanmıştır. Benzetim sonuçlarının gerçekçi ve uygulanabilir olması açısından kontrol tork girişi değerleri $\pm 10 [Nm]$ 'de sature edilmiştir.

Benzetim sonuçları Şekiller 1-3'te sunulmuştur. Şekil 1'de eklem pozisyonları ve hedeflenen eklem pozisyonları verilirken Şekil 2'de eklem pozisyonlarının takip hataları verilmiştir. Şekil 3'te kontrol giriş torkları sunulmuştur. Şekil 2'deki eklem takip hatalarına bakıldığında hedeflenen yörüngenin pratik tabininin sağlandığı görülmektedir.



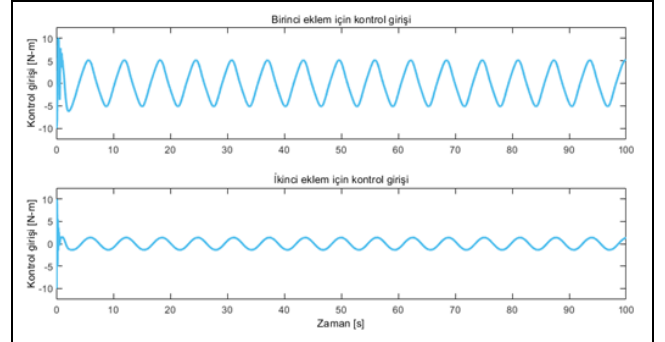
Şekil 1. Eklem pozisyonları $q(t)$ ve hedeflenen eklem pozisyonları $q_d(t)$. (YSA).

Figure 1. Joint position $q(t)$ and desired joint position $q_d(t)$.



Şekil 2. Eklem pozisyonu takip hatası $e(t)$. (YSA).

Figure 2. Joint position tracking error $e(t)$.



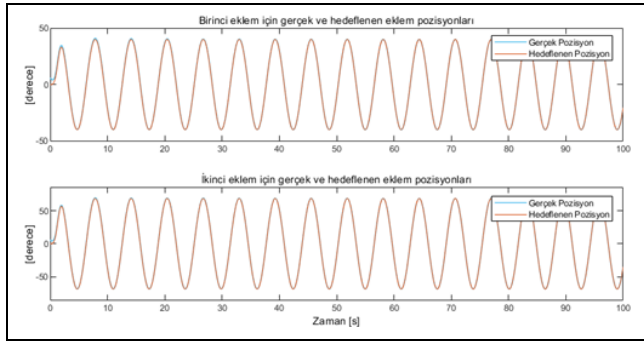
Şekil 3. Eklemlerin tork giriş değerleri $\tau(t)$. (YSA).

Figure 3. The torque input value of joints $\tau(t)$.

Yukarıdaki sonuçlara ek olarak Denklem (20)'de verilen Kontrolördeki uyarlamalı sinir ağı bileşeni yerine uyarlamalı bulanık mantık yapısı $\hat{w}_f^T \varphi(x_d)$ ve güncelleme kuralı $\hat{w}_f = \text{Proj}\{\Gamma_f \varphi z^T\}$ olacak şekilde kullanılarak başarımları kıyaslanmıştır. Bu noktada dikkat edilmelidir ki bulanık mantık yöntemi kullanılarak yapılan kapalı çevrim sistemin kararlılık analizi Bölüm 4'te verilen kararlılık analizi adımları izlendiğinde benzer sonuca ulaşılmaktadır. Burada, $\hat{w}_f(t) \in \mathbb{R}^{3K \times n}$ kestirilen kontrol temsili değeri vektörünü, $\varphi(x_d) \in \mathbb{R}^{3K}$ üyelik değerleri vektörünü ve $\Gamma_f \in \mathbb{R}^{3K \times 3K}$ artı tanımlı ve simetrik adaptasyon kazancını temsil etmektedir. Burada, $K \triangleq \sum_{i=1}^n N_i$ ve N_i kural sayısını göstermektedir. Üyelik fonksiyonu olarak çalışma [37]'te verilen, üçüncü dereceden bir fonksiyon olan bir boyutlu üyelik fonksiyonu merkezler ve açıklıklar sabit alınarak kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonlarının merkezleri sabit olup x_{d1} ve x_{d2} için sırasıyla $\{0.8, 0.9\}$ ve $\{0.7, 0.8\}$ açıklıklar ise her iki giriş için de sabit, 0.7 olarak seçilmiştir.

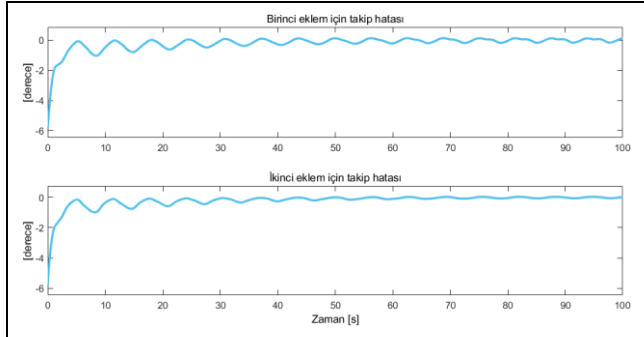
Uyarlamalı sinir ağlarıyla tasarlanmış kontrol sistemi ile uyarlamalı bulanık mantık tabanlı olarak tasarlanmış olan kontrol sisteminin kıyaslanabilmesi için hatalarının normlarının karelerinin integralleri aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Başlangıç koşulları ve hedeflenen pozisyon vektörü iki kontrolör için aynı seçilmiş, kazançlar deneme yanılma yoluyla $k = 840.5$ ve $\Gamma_f = \text{diag}\{125 \times 10^3, 25 \times 10^2, 31 \times 10^2, 8 \times 10^2, 12 \times 10^4, 21 \times 10^1, 124 \times 10^3, 20 \times 10^2, 30 \times 10^2, 2 \times 10^2, 9 \times 10^4, 17 \times 10^1\}$ olarak ayarlanmış ve kural sayısı $N_1 = N_2 = 2$ olarak seçilmiştir.

Uyarlamalı bulanık mantık yapısı için benzetim sonuçları Şekiller 4-6'da sunulmuştur. Şekil 4'te eklem pozisyonları ve hedeflenen eklem pozisyonları sunulurken Şekil 5'te eklem pozisyonlarının takip hataları verilmiştir. Şekil 6'da ise kontrol tork girişleri sunulmuştur.



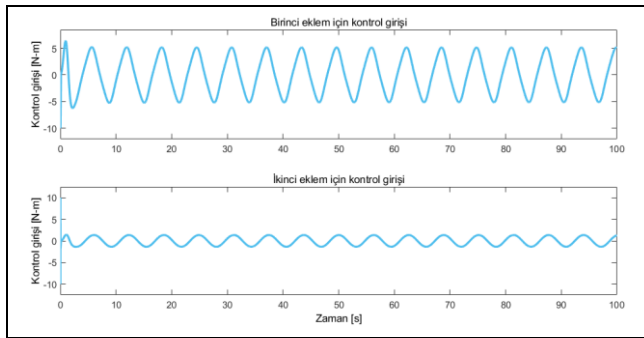
Şekil 4. Eklem pozisyonları $q(t)$ ve hedeflenen eklem pozisyonları $q_d(t)$. (BM).

Figure 4. Joint position $q(t)$ and desired joint position $q_d(t)$.



Şekil 5. Eklem pozisyonu takip hatası $e(t)$. (BM).

Figure 5. Joint position tracking error $e(t)$.



Şekil 6. Eklemlerin tork giriş değerleri $\tau(t)$. (BM)

Figure 6. The torque input value of joints $\tau(t)$.

Şekil 4'teki eklem takip hatalarına bakıldığında hedeflenen yörüngeye pratik takibinin sağlandığı görülmektedir. Yapay

sinir ağları tabanlı kontrolör için hatanın normunun karesinin integrali ile kontrol tork girişinin normunun karesinin integrali Tablo 1'in ilk satırında verilirken bulanık mantık tabanlı kontrolör için sonuçlar ikinci satırda verilmiştir.

Tablo 1. Yapay sinir ağları ve bulanık mantık yapısı için başarımların karşılaştırılması.

Table 1. Comparison of performance results for neural networks and fuzzy logic structure.

Kontrol tork girişleri	$\int e(\vartheta) ^2 d\vartheta$	$\int \tau(\vartheta) ^2 d\vartheta$
$\tau = \hat{w}_{nn}^T \sigma + e - ke_f$ (Sinir ağları tabanlı kontrolör)	0.01593	1.646×10^3
$\tau = \hat{w}_f^T \varphi + e - ke_f$ (bulanık mantık tabanlı kontrolör)	0.01593	1.876×10^7

Tablo 1'e yakından bakıldığında hataların eşit olduğu görülürken torklara bakıldığında yapay sinir ağları tabanlı kontrolörün torkunun bulanık mantık tabanlı kontrolöre göre daha az olduğu görülmektedir. Tablo 2 ve Tablo 3'te sırasıyla sinir ağları ve bulanık mantık yapılarında kullanılan kontrol kazançları farklı değerler için incelenmiştir. Kazanç değerleri seçilirken hata değerlerinin büyük değişiklikler göstermediği bölgelerdeki kazançlar kullanılmıştır. Kontrol kazançlarının seçimindeki ikincil amaç ise sinir ağları yapısı ile bulanık mantık yapısının toplam hata değerlerinin birbirine eşitlenmesidir. Tablo 4'te ise sinir ağları yapısında hız bilgisinin ölçülmediği ve ölçüldüğü durumlar için toplam hata miktarı eşitlenerek toplam tork miktarları kıyaslanmıştır. Tablo 4'e bakıldığında toplam hata miktarları aynı iken hız bilgisinin olmadığı durumda (hız ölçümünün olmamasının doğal bir sonucu olarak) toplam tork miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Hız ölçümlerine sahip olan kontrolör ile hız ölçümlerine sahip olmayan kontrolörün kullanıldığı durumlarda toplam hata ve toplam tork anlamında yakın sonuçlar elde edilmesi tasarlanan kontrolörün uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Sinir ağları yapısı için farklı kontrol kazanç değerlerinin karşılaştırılması.

Table 2. Comparison of different control gains for neural network based controllers.

Kontrol kazanç değeri	$\int e(\vartheta) ^2 d\vartheta$	$\int \tau(\vartheta) ^2 d\vartheta$
$k = 10$	0.02538	1.693×10^3
$k = 12.1$	0.01593	1.646×10^3
$k = 13$	0.01322	1.660×10^3
$k = 14$	0.01289	1.687×10^3

Tablo 3. Bulanık mantık yapısı için farklı kontrol kazanç değerlerinin karşılaştırılması.

Table 3. Comparison of different control gains for fuzzy logic based controllers.

Kontrol kazanç değeri	$\int e(\vartheta) ^2 d\vartheta$	$\int \tau(\vartheta) ^2 d\vartheta$
$k = 830$	0.01607	1.826×10^7
$k = 840.5$	0.01593	1.876×10^7
$k = 850$	0.01579	1.928×10^7
$k = 860$	0.01566	1.981×10^7

Tablo 4. Sinir ağları yapısı için hız bilgisinin ölçüldüğü ve ölçülmediği durumların karşılaştırılması.

Table 4. Comparison of situations where velocity information is measured and not measured for neural network based controllers.

Hız ölçümü	$\int e(\theta) ^2 d\theta$	$\int \tau(\theta) ^2 d\theta$
Ölçülüyor	0.01593	1.472×10^3
Ölçülüyor	0.01593	1.646×10^3

4 Sonuçlar

Bu çalışmada model bilgisinde parametrik belirsizlikler olan robot kolunun sadece konum bilgisinin ölçülebildiği kısıt altında hedeflenen pozisyonun takip edilmesi problemi ele alınmıştır. Hız ölçümlerine olan ihtiyacı azaltmak için konum bilgisinden yararlanarak hız bilgisinin olmaması durumunu telafi eden bir süzgeçleme tekniği kullanılmıştır. Model belirsizliklerinin kestirilmesi için ise uyarlamalı sinir ağlarından yararlanılmıştır. Tasarlanan kapalı çevrim kontrol sisteminin kararlılığı Lyapunov tipi argümanlar aracılığıyla ispatlanmıştır. Önerilen kontrol stratejisinin uygulanabilirliği sayısal benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. Benzetim çalışmaları uyarlamalı bulanık mantık yapısı kullanılarak da oluşturulup uyarlamalı sinir ağları kullanılarak oluşturulan benzetim sonuçları ile kıyaslanmıştır. Çalışma [35]'den farklı olarak model belirsizliklerini gürbüz yöntemlerle bastırmak yerine model belirsizlikleri uyarlamalı yöntemlerle telafi edilmiş, çalışma [28]'den farklı olarak ise her farklı sistem için tekrar oluşturulması gereken regresör matrisine ihtiyaç duymayan ve yüksek serbestlik derecelerine sahip olan sistemlere daha kolay uygulanabilen uyarlamalı bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Yapay sinir ağları ve bulanık mantık yapıları Tablo 1'e bakılarak sistemin toplam hatası ve toplam tork girişi anlamında kıyaslandığında uyarlamalı sinir ağları yapısının başarımı daha fazla arttırdığı görülmektedir. Sunulan kontrol algoritmasının sonraki çalışmalarda mobil robotlar için tasarlanması planlanmaktadır [42].

5 Conclusions

In this study, the problem of tracking a desired position for a robotic arm with parametric uncertainties in the model and under the constraint of only being able to measure the position information has been addressed. A filtering technique that compensates for the lack of velocity information by utilizing position information has been used to reduce the need for velocity measurements. Adaptive neural networks have been utilized to estimate the model uncertainties. The stability of the designed closed-loop control system has been proven through Lyapunov-type arguments. The applicability of the proposed control strategy has been demonstrated through numerical simulation results. Simulation studies have been compared with those generated using an adaptive fuzzy logic structure and those generated using adaptive neural networks. Unlike the study in [35], the model uncertainties have been compensated for using adaptive methods instead of suppressing them with robust methods, and unlike the study in [28], an adaptive fuzzy logic method that does not require a regressor matrix that needs to be reconstructed for each different system and is easier to apply to systems with high degrees of freedom has been used. When artificial neural networks and fuzzy logic structures are compared in terms of the total error and total torque input of the system, the adaptive neural network

structure is seen to achieve higher performance, as shown in Table 1. The presented control algorithm is planned to be designed for mobile robots in future works [42].

6 Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122E193 No.lu Proje kapsamında ve 2219 Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

7 Yazar katkı beyanı

Çalışmada tasarımın yapılması, konseptin detaylandırılması, bilimsel yazının taranması, yazım ve eleştirel inceleme başlıklarında Bayram Melih YILMAZ tarafından katkı sunulurken, fikrin oluşturulması, içeriğin incelenmesi-düzenlenmesi ve metodoloji başlıklarında Enver TATLİCIOĞLU tarafından katkı sunulmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Bu çalışmada etik kurul izni alınmasını gerektirecek bir içerik yoktur".

"Hazırlanan içerikte herhangi bir çıkar ilişkisi bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

- [1] Kelek MM, Yüksel O, Fidan U, Özer T. "Yük hücreli temelli iki tekerlekli denge robotunun PID kontrolör kullanılarak gerçek zamanlı kontrolü". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(5), 597-603, 2021.
- [2] Karaman B, Taşkın S. "Otonom fotovoltaiik panel yüzey temizleme robotu geliştirilmesi ve temizleme aralığının enerji verimliliği üzerine analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 234-239. 2022.
- [3] Bayrak A. "Sliding mode based Self-Tuning PID controller for second order systems". *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(3), 866-872, 2017.
- [4] Uzuner S, Akkuş N, Toz M. "5-DOF serial robot manipulator design, application and inverse kinematic solution through analytical method and simple search technique". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 392-401, 2020.
- [5] Bıdıklı B. "A self-tuning PID control method for multi-input-multi-output nonlinear systems". *Electrica*, 18(2), 218-226, 2018.
- [6] Lewis FL, Dawson DM, Abdallah CT. *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. 2nd ed. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2003.
- [7] Özbay U, Şahin HT, Zergeroğlu E. "Robust tracking control of kinematically redundant robot manipulators subject to multiple self-motion criteria". *Robotica*, 26(6), 711-728, 2008.
- [8] Islam S, Liu XP "Robust sliding mode control for robot manipulators". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(6), 2444-2453, 2010.
- [9] Berghuis H, Nijmeijer H. "A passivity approach to controller-observer design for robots". *IEEE Transactions on robotics and automation*, 9(6), 740-754, 1993.
- [10] Burkov IV. "Asymptotic stabilization on nonlinear Lagrangian Systems without measuring velocities". *In Proceedings International Symposium on Active Control in Mechanical Engineering*. Lyon, France, 22-23 October 1993.

- [11] Arimoto, S. "A class of linear velocity observers for nonlinear mechanical systems". In *Proceedings of 1st Asian Control Conference*, Tokyo, Japan, 27-30 July 1994.
- [12] Ortega R, Loria A, Kelly R. "A semiglobally stable output feedback PI/sup 2/D regulator for robot manipulators". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(8), 1432-1436, 1995.
- [13] Abdessameud A, Khelifi MF. "A variable structure observer for the control of robot manipulators". *International Journal Applied Mathematics Computer Science*, 16(2), 189-196, 2006.
- [14] De Wit CC, Slotine JJ. "Sliding observers for robot manipulators". *Automatica*, 27(5), 859-864, 1991.
- [15] Deniz M, Bayrak A, Tatlicioğlu E, Zergeroğlu E. "A model-free continuous velocity observer formulation with self-tuning for mechatronic systems". *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 140(5), 1-6, 2018.
- [16] Bidikli B, Tatlicioğlu E, Zergeroğlu E. "A self-tuning velocity observer formulation for a class of nonlinear systems". *IEEE 55th Conference on Decision and Control*, Las Vegas, VN, USA, 12-14 December, 2016.
- [17] Romero JG, Moreno JA, Aguilar ÁAM. "An adaptive speed observer for a class of nonlinear mechanical systems: Theory and experiments". *Automatica*, 130, 1-8, 2021.
- [18] Farza M, M'saad M, Menard T, Ltaief A, Maatoug T. "Adaptive observer design for a class of nonlinear systems. Application to speed sensorless induction motor". *Automatica*, 90, 239-247, 2018.
- [19] Erlic M, Lu WS. "A reduced-order adaptive velocity observer for manipulator control". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(2), 293-303, 1995.
- [20] Dixon WE. "Adaptive regulation of amplitude limited robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(3), 488-493, 2007.
- [21] Berghuis H, Nijmeijer H. "Robust control of robots via linear estimated state feedback". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(10), 2159-2162, 1994.
- [22] Yang Z, Peng J, Liu Y. "Adaptive neural network force tracking impedance control for uncertain robotic manipulator based on nonlinear velocity observer". *Neurocomputing*, 331, 263-280, 2019.
- [23] Ma H, Ren H, Zhou Q, Li H, Wang Z. "Observer-Based Neural Control of N-Link Flexible-Joint Robots". *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 35(4), 5295-5305, 2024.
- [24] Lu C, Ma H, Pan Y, Zhou Q, Li H. "Observer-Based finite-time fault-tolerant control for nonstrict-feedback nonlinear systems with multiple uncertainties". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 53(8), 4912-4921, 2023.
- [25] Ma L, Zong G, Zhao X, Huo X. "Observed-based adaptive finite-time tracking control for a class of nonstrict-feedback nonlinear systems with input saturation". *Journal of the Franklin Institute*, 357(16), 11518-11544, 2020.
- [26] Qu Z, Dawson DM, Dorsey JF, Duffie JD. "Robust estimation and control of robotic manipulators". *Robotica*, 13(3), 223-231, 1995.
- [27] Yuan J, Stepanenko Y. "Robust control of robotic manipulators without velocity feedback". *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1(3), 203-213, 1991.
- [28] Zergeroğlu E, Dixon W, Haste D, Dawson D. "A composite adaptive output feedback tracking controller for robotic manipulators". *Robotica*, 17(6), 591-600, 1999.
- [29] Lewis FL. "Nonlinear network structures for feedback control". *Asian Journal of Control*, 1(4), 205-228, 1999.
- [30] Kim YH, Lewis F, Dawson DM. "Intelligent optimal control of robotic manipulators using neural networks". *Automatica*, 36(9), 1355-1364, 2000.
- [31] Cobanoglu N, Yilmaz BM, Tatlicioğlu E, Zergeroğlu E. "Repetitive control of robotic manipulators in operational space: A neural network-based approach". *International Journal of Robotics and Automation*, 37(3), 302-309, 2022.
- [32] Yilmaz BM, Tatlicioğlu E, Savran A, Alci M. "Adaptive fuzzy logic with self-tuned membership functions based repetitive learning control of robotic manipulators". *Applied Soft Computing*, 104, 1-12, 2021.
- [33] Sun W, Su SF, Xia J, Nguyen VT. "Adaptive fuzzy tracking control of flexible-joint robots with full-state constraints". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 49(11), 2201-2209, 2018.
- [34] Şahan G. "Stability analysis by a nonlinear upper bound on the derivative of Lyapunov function". *European Journal of Control*, 56, 118-123, 2020.
- [35] Zergeroğlu E, Dawson DM, de Queiroz MS, Krstic M. "On global output feedback tracking control of robot manipulators". *IEEE Conference on Decision and Control*, Sydney, Australia, 12-15 December.
- [36] Tomei P. "Adaptive PD controller for robot manipulators". *IEEE Transactions Robotics and Automation*, 7(4), 565-570, 1991.
- [37] Nicosia S, Tomei P. "Robot control by using only joint position measurements". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(9), 1058-1061, 1990.
- [38] Khalil HK. *Nonlinear Systems*. 3th ed. Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall, 2002.
- [39] Wang LX and Mendel JM, "Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning". *IEEE Tr. on Neural Networks*, 3(5), 807-814, 1992.
- [40] Kokotovic PV, "The joy of feedback: nonlinear and adaptive". *IEEE Control System Magazine*, 12, 7-17, 1992.
- [41] Commuri S, Lewis FL, "Adaptive-fuzzy logic control of robot manipulators". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, USA, 22-28 April 1996.
- [42] Oruç, İN, Tilki U, "Otonom sualtı aracı yörünge izleme kontrol algoritmalarının analizleri". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(2), 131-145, 2023.