

Kayan Kipli Kontrol (KKK) Yöntemleriyle Haptik-Teleoperasyon Sisteminin Kontrolü

Tayfun ABUT^{1*}, Servet SOYGÜDER²

¹ Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Muş, Türkiye, ORCID: 0000-0003-4646-3345

² Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Ankara, Türkiye, ORCID:
0000-0002-8191-6891

Sorumlu yazar: tayfunabut@gmail.com

Geliş Tarihi:15.04.2022

Kabul tarihi:27.05.2022

Özet

Haptik-Teleoperasyon sistemleri, insan-robot etkileşiminde önemli rol oynayan sistemlerdir. Bu sistemlerin kontrolünde temel amaç iki yönlü kesintisiz etkileşim elde etmektir. Fakat bu kesintisiz etkileşim hedefini olumsuz yönde etkileyen problemler vardır. Bunlardan biri sistemi oluşturan robotların dinamik belirsizlikleridir ve bu problem sistemlerin performansını önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada bu belirsizliklerin üstesinden gelmek için Kayan Kipli Kontrol (KKK) yöntemi tercih edilmiştir. Ancak bilindiği üzere KKK yöntemiyle birlikte kullanılan işaret (signum) fonksiyonu çatlama probleminin neden olmaktadır. Bu çalışmada çatlama probleminin de giderilmesi için saturasyon ve quasi tabanlı KKK yöntemleri önerilmiş ve uygulanmıştır. Sistemin iki yönlü kontrolü, önerilen yöntemler kullanılarak benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Performans kriterleri (Ortalama Karese Hata (MSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE)) kullanılarak sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar halinde verilmiş, karşılaştırılmış ve irdelemiştir.

Anahtar Kelimeler: İnsan-Robot Etkileşimi, Haptik-Teleoperasyon, Dinamik Belirsizlik, Kayan Kipli Kontrol (KKK) Yöntemi, Çatlama Problemi

Control of Haptic-Teleoperation System with Sliding Mode Control (SMC) Methods

Abstract

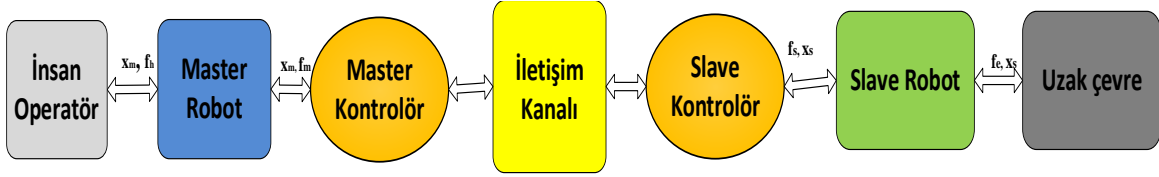
Haptic-Teleoperation systems are systems that play an important role in human-robot interaction. The main purpose of these systems is bilateral continuous interaction. But there are problems that negatively affect this goal of continuous interaction. One of them is the dynamic uncertainties of the robots that compose the system, and this problem significantly affects the performance of the systems. In this study, the Sliding Mode Control (SMC) method was preferred to overcome these uncertainties. However, as it is known, sign function used in the SMC method causes the problem of chattering. In this study, saturation and quasi-based SMC methods are proposed and applied in order to eliminate the chattering problem. In this study, saturation and quasi-based SMC methods have been proposed and applied to eliminate the crackling problem. The bilateral control of the system was carried out in the simulation environment using the proposed methods. Numerical results were obtained using the performance criteria (Mean Squared Error (MSE) and Mean Absolute Error (MAE)). The obtained results are given in graphs and tables, compared, and analyzed.

Keywords: Human-Robot Interaction (HRI), Haptic-Teleoperation, Uncertain Dynamic, Sliding Mode Control (SMC) Method, Chattering Problem

1. GİRİŞ

İnsan-Robot Etkileşimi (IRE) çok geniş bir kullanım sahasının olması nedeniyle yoğun şekilde araştırılmakta ve geliştirilmektedir [1-5]. Bu etkileşime aracılık eden teknolojilerden biride haptik-teleoperasyon sistemleridir. Kesintisiz etkileşim hedefi olan bu sistemlerin çeşitli problemleri bulunmaktadır. Master ve slave robotların doğrusal olmayan yapıları ve dinamik belirsizlikleri iki yönlü haptik-teleoperasyon sistemlerinin performanslarını olumsuz yönde etkilemektedir. Literatürde bu problemin giderilmesi için çeşitli yöntemler bilim insanları tarafından önerilmiş, uygulanmış ve ayrıca yeni yöntemler araştırılmaktadır [6-7]. Literatürde Mahya vd. [8], tarafından bilinmeyen sabit zaman gecikmeli ve iki kullanıcı teleoperasyon sistemi için kayan kipli kontrol önerilmiştir. Doğrusal olmayan master-slave sistemler için modelden bağımsız bir kartezyen tabanlı ikinci dereceden Kayan kipli PD kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem hız ölçümlerine dayanmamakta ve kuvvet yörüngelerinin sınırlı takibi ile konum yörüngelerinin çok hızlı yakınsamasına ulaşmakta ve sistem hakkında daha az bilgi ile yüksek derecede şeffaflık sağlamıştır [9]. Master ve slave robotların doğrusal olmayan modellerini içeren uyarlanabilir teleoperasyon sisteminin kontrolü için Ryu ve Kwon çevrenin ve insanın belirsiz parametrelerini dahil etmemişlerdir ve tam şeffaflık elde etmişlerdir [10]. Lee ve Chung, slave ve çevre dinamik belirsizlikler olan haptik-teleoperasyon sistemleri için adaptif bir kontrol yöntemi tasarlamıştır [11]. Chopra ve diğerleri master ve slave robotların pozisyonlarının ve hızlarının

serbest hareket halinde senkronizasyonunu sağlamak için zaman gecikmeli bir teleoperatör için adaptif bir kontrolör önermiştir [12]. Endüstriyel robotların hareketini gerçek zamanlı ve sanal ortamda değişken zaman gecikmesi varlığında kontrol etmeye çalışmıştır. Sistemin kararlılığını Lyapunov kararlılık analizi ile gerçekleştirilmiştir [13-14]. Zhao ve diğerleri genişletilmiş durum gözlemcilerine dayalı iki yönlü bir teleoperasyon sisteminde toplu sistem belirsizlikleriyle başa çıkmak için integral kayan kipli kontrol yöntemini önermiş ve deneysel ortamda uygulamışlardır [15]. Vafaei ve Yazdanpanah bilinmeyen sabit zaman gecikmesi ve belirsizlikler altında iki yönlü teleoperasyon için terminal kayan kipli empedans kontrolünü önermiştir [16]. Abadi ve diğerleri bilinmeyen değişken zaman gecikmesi altında, bozucu etkiler ve durum gözlemcileri aracılığıyla çatırdama problemleri için iki yönlü teleoperasyon sisteminin kayan kipli kontrol yöntemini önermiştir [17]. Al-Wais ve diğerleri değişken zaman gecikmeli doğrusal olmayan teleoperasyon sisteminin senkronizasyon problemi için sağlam H-sonsuz maliyet fonksiyonlu integral kayan kipli kontrolü gerçekleştirmiştir [18]. Yukarıda da görüldüğü gibi literatürde kullanılan yöntemlerde biride kayan kipli kontrol metodudur. Bu metodun dinamik belirsizliklere duyarlı olması ve sağlamlığı literatürde sıklıkla kullanılmasına neden olmaktadır. Ancak yöntemin dezavantajı ise çatırdama problemdir. Bu problemin temeli kullanılan sistemlerin kinematik ve dinamik parametrelerinin bilinmemesinden veya yanlış olarak bilinmesinden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda kullanılan kontrol yöntemlerinin türü de oldukça performansı etkilediği yukarıda yapılan araştırmada gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ilk olarak master ve slave robotların dinamik modelleri elde edilmiştir. İkinci olarak bu sistemlerin dinamik belirsizlik probleminin üstesinden gelmek için Kayan Kipli Kontrol (KKK) yöntemi önerilmiş ve kullanılmıştır. Literatürde de bilinen KKK yönteminin en önemli problemi çatırdamadır. Bu çalışmanın ikinci amacı yöntemin çatırdama probleminin üstesinden gelinmesidir. Bu çalışmada çatırdama probleminin de giderilmesi için saturasyon ve quasi tabanlı KKK yöntemleri önerilmiş ve uygulanmıştır. Sistemin iki yönlü kontrolü, önerilen yöntemler kullanılarak benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Performans kriterleri (Ortalama Karese Hata (MSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE)) kullanılarak sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar halinde verilmiş, karşılaştırılmış ve irdelenmiştir. Şekil 1’de iki yönlü (bilateral) haptik-teleoperasyon sisteminin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1. Haptik-teleoperasyon sisteminin iki yönlü (bilateral) kontrol blok diyagramı

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Sistemin Modellenmesi

Lagrange-Euler yöntemi kullanılarak sistemin dinamik model denklemlerinin elde edilmiştir. Sistem tek serbestlik derecelidir. Sistemi oluşturan master ve slave robotların dinamik denklemleri 1 ve 2 nolu denklemlerde verilmiştir.

$$I_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = \tau_m + \tau_i \quad (1)$$

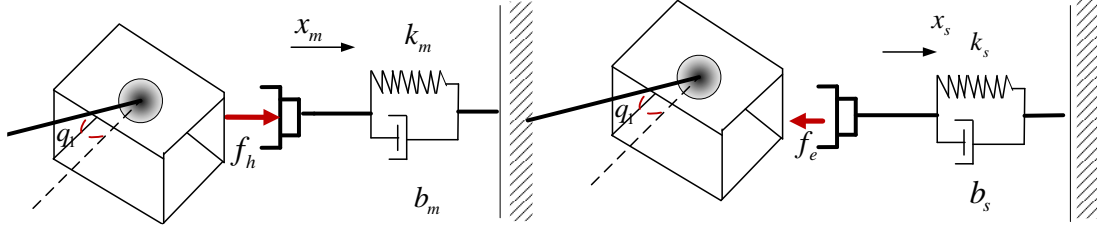
$$I_s \ddot{\theta}_s + b_s \dot{\theta}_s = \tau_s - \tau_\zeta \quad (2)$$

Konum, hız ve tork ifadeleri sırasıyla θ_i , $\dot{\theta}_i$ ve τ_i ile gösterilmiştir. $i \in \{m, s\}$ indisleri sırasıyla master ve slave robotları temsil etmektedir. I_m ve I_s kütlelesel atalet momentlerini, b_m ve b_s ise robotların sönüm katsayılarını göstermektedir. τ_m , τ_s sırasıyla master ve slave robotlara etki eden torku, τ_i ve τ_ζ ise kullanıcı tarafından uygulanan ve çevreden sisteme etki eden tork ifadesinin temsil etmektedir. Aşağıda verilen 3 ve 4 nolu denklemler insan ve çevrede meydana gelen tork ifadelerini göstermektedir.

$$\tau_i = J_m^T f_i, \quad f_i = k_m (x_m - x_r) + b_m (\dot{x}_m - \dot{x}_r) \quad (3)$$

$$\tau_{\zeta} = J_s^T f_{\zeta}, f_{\zeta} = k_s (x_s - x_{\zeta}) + b_s (\dot{x}_s - \dot{x}_{\zeta}) \quad (4)$$

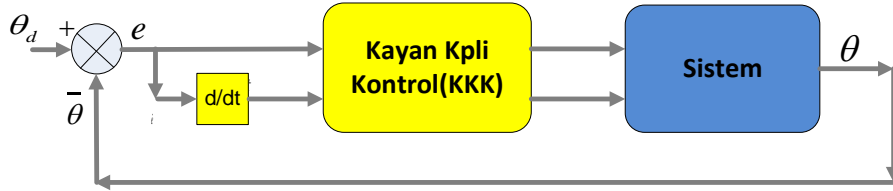
Master ve slave robotların jakobiyen matrisi sırasıyla J_m ve J_s , operatör ve slave robot çevre etkileşime girdiğinde etkileşim sonucu ortaya çıkan kuvvetleri sırasıyla f_e ve f_h , b_m , b_s , k_m , k_s ise yay ve sönüm sabitleri 3 ve 4 nolu denklemlerde verilmiştir. Şekil 2’de tek serbestlik dereceli haptik-teleoperasyon sisteminin benzetim modeli verilmiştir.



Şekil 2. Tek serbestlik dereceli haptik-teleoperasyon sisteminin benzetim modeli

2.2. Kontrolör Tasarımı

Haptik-teleoperasyon sistemlerinin kontrolü için Kayan Kipli Kontrol (KKK) yöntemleri önerilmiş ve uygulanmıştır. Önerilen bu kontrolörler ile dinamik belirsizliklerden kaynaklanan açısal pozisyon ve kuvvet hataları minimize edilmeye çalışılmaktadır. Değişken yapıli kontrol yöntemlerinin biri olan KKK yönteminin belirsizliklere ve bozucu etkilere duysuz olması nedeniyle önerilmiştir [19]. İki aşamadan oluşan yöntemde sistemin değişkenlerinin kayma yüzeyine gitmeye zorlanması ilk aşama, kayma yüzeyinde kalmasının sağlanması ve orijine kaydırılması ikinci aşamayı göstermektedir [20-21]. Yöntemin sürekli bir yapıya sahip olmaması sistemde yüksek genlikli ve frekanslı dalgalanmalar oluşmasına neden olmakta bu sorunlar nedeniyle çatırdama problemini meydana gelmektedir. Çatırdama problemi ise gerçek sistemlerde var olan ve modellenemeyen belirsizliklerden kaynaklanmakta ve sistemlere zarar vermektedir. Bu problemin çözümü için çeşitli yöntemler önerilmiş ve kullanılmıştır. Bu çalışmada klasik signum işaret fonksiyonlu, saturasyon ve quasi tabanlı KKK yöntemleri kullanılmıştır. Şekil 3’te KKK yönteminin genel blok diyagramı gösterilmiştir Bu çalışmada ilk olarak klasik signum işaret fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 3. Kayan kipli kontrol (KKK) yönteminin genel blok diyagramı

θ_d robot tarafından üretilen referans açısal pozisyon ifadesini temsil etmekte θ ise gerçek açısal pozisyon değerini yani sistemin çıkışı ifadesini göstermektedir. Hata ve hata türevi denklemleri 5 ve 6 nolu denklemlerde verilmiştir.

$$e(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \quad (5)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \quad (6)$$

Bu yöntemde hedef, izleme hatası ve türevinin sonlu bir zamanda herhangi bir başlangıç durumundan denge noktasının sıfıra yakınsaması için bir kontrol yasası $u(t)$ belirlemektir. $u(t)$, ayrı ayrı belirlenen, anahtarlama (sürekli) sinyal, $u_{\text{anahtarlama}}(t)$ ve eşdeğer (sürekli) sinyal, $u_{\text{eşdeğer}}(t)$ olmak üzere iki ek sinyalden oluşmaktadır [19]. 7 nolu denklemde $u(t)$ kontrol yasası verilmiştir.

$$u(t) = u_{\text{eşdeğer}}(t) + u_{\text{anahtarlama}}(t) \quad (7)$$

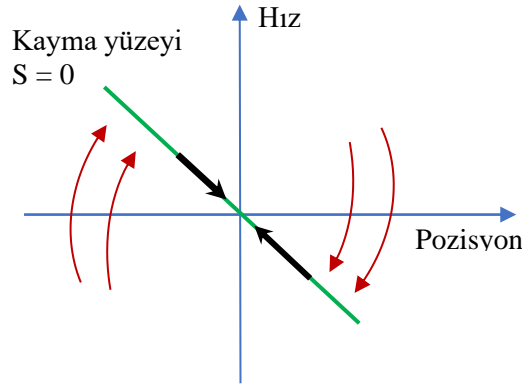
Başlangıç yörüngesi kayma yüzeyinde değilse, anahtarlama kontrolü $u_{\text{anahtarlama}}(t)$ hatayı kayma yüzeyinin orijine doğru zorlar ve buna ulaşma aşaması sağlar. Eşdeğer kontrol, sistem durumunu kayan yüzeye doğru hareket ettiremeyebilir. Bu nedenle, anahtarlama kontrolü, yapılar arasında sonsuz hızlı değişikliklere izin verdiği için röle benzeri bir fonksiyon temelinde tasarlanmıştır. Eşdeğer kontrol, bir kayan fonksiyonun türevinin sifra eşitlenmesiyle bulunur. Anahtarlama kontrolü doğrudan seçilebilir 8 nolu denklemde kayma yüzeyi denklem gösterilmiştir. Denklem incelendiğinde kayma yüzeyinin hata, hatanın türevi ve λ katsayısına bağlı olduğu görülmektedir. λ pozitif tanımlı bir matrisi göstermektedir. Kontrol sinyalinin verildiği 10 nolu denklem incelendiğinde sinyalin k sabit parametresi ve işaret (signum) fonksiyonuna bağlı olduğu görülmektedir. Kayma yüzeyi (8) eşitliğinin türevi alındığında 9 nolu denklem elde edilmiştir. 11 nolu denklemde işaret fonksiyonu ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Kayma yüzeyi grafiği Şekil 4'te gösterilmiştir.

$$s = \dot{e} - \lambda e \quad (8)$$

$$\dot{s} = \ddot{e} - \lambda \dot{e} \quad (9)$$

$$u_{\text{anahtarlama}} = -k * \text{sign}(s) \quad (10)$$

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} -1 & \text{if } s < 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ 1 & \text{if } s > 0 \end{cases} \quad (11)$$

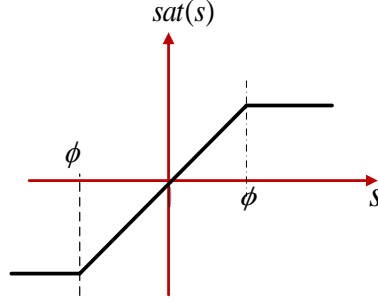


Şekil 4. Kayma yüzeyi grafiği

Yöntemin kullanımı sonucu meydana gelen olan çatırdama problemini azaltmak için çeşitli, fonksiyonlar önerilmektedir. Bu çalışmada ilk olarak problemi yok etmek veya azaltmak için saturasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Saturasyon fonksiyonu kullanılarak elde edilen kontrol sinyali 12 nolu denklemde verilmiştir. Sınır tabakanın kalınlığı (ϕ) 13 nolu denklemde verilmiştir. Saturasyon fonksiyonuna ait grafik Şekil 5'te gösterilmiştir.

$$u_{\text{anahtarlama}} = k * \text{sat}(s) \quad (12)$$

$$sat(s/\phi) = \begin{cases} \frac{s}{\phi} & \text{if } \left| \frac{s}{\phi} \right| \leq 1 \\ sign(s/\phi) & \text{if } \left| \frac{s}{\phi} \right| > 1 \end{cases} \quad (13)$$



Şekil 5. Saturasyon fonksiyonu

Bu çalışmada dinamik belirsizlik probleminin üstesinden gelmek için önerilen KKK yönteminin çatırdama probleminin üstesinden gelmesi için son olarak quasi tabanlı kayan kipli kontrol yöntemi önerilmiştir. Literatürde önerilen ve uygulanan yöntemlerden biridir [22-26]. Kullanılan anahtarlama fonksiyonu ve kontrol sinyali denklemi sırasıyla 14 ve 15 nolu denklemlerde verilmiştir.

$$sign(s) \cong \frac{s}{|s| + \varepsilon} \quad (14)$$

$$u = k * \frac{s}{|s| + \varepsilon} \quad (15)$$

Lyapunov fonksiyonuna göre kararlılık analizi yapabilmek için seçilen fonksiyon ifadesi denklem 16'da verilmiştir. Bu ifadenin türevinin sıfırdan küçük olması gerekmektedir. Bu sebepten \dot{s} negatif olmalıdır (denklem 17).

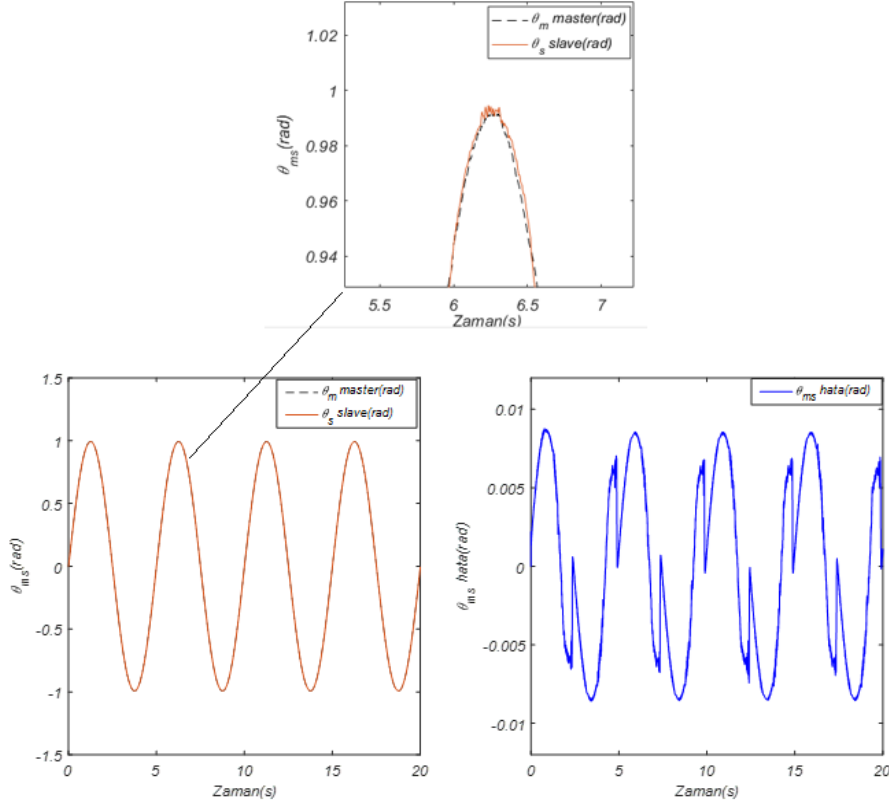
$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (16)$$

$$\dot{V} = \dot{s}s < 0 \quad (17)$$

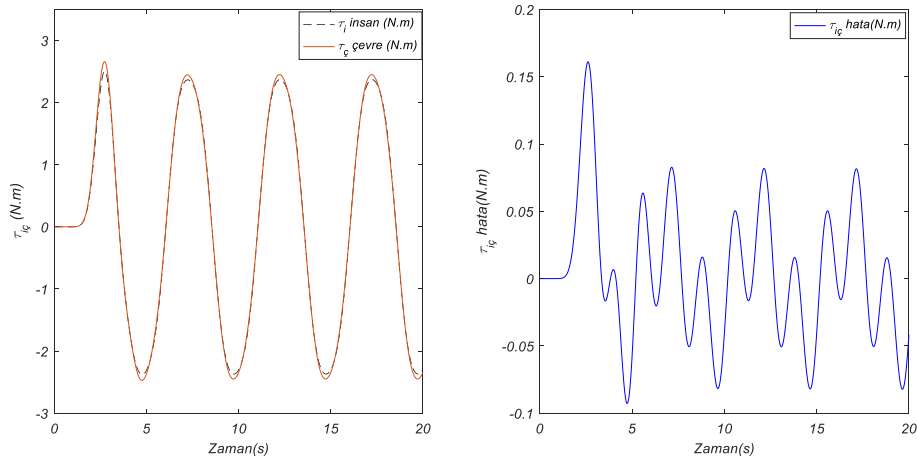
3. BULGULAR

3.1. Benzetim Sonuçları

Sistemin dinamik denklemleri kullanılarak benzetim (simülasyon) ortamında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kontrol değişkenleri pozisyon ve tork parametreleridir. Sistem kontrolünde üç farklı KKK yöntemi önerilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyon çalışma süresi 20 saniye olarak tercih edilmiştir. Master ve slave robotların parametreleri $m_m=m_s=0.038kg$, $b_s=b_m=0.0024 Ns/m$, $l_m=l_s=0.1525 m$ ve $I_m=I_s=0.01 kg-m^2$ şeklinde alınmıştır. İnsan ve çevre modellerinde kullanılan yay katsayıları $k_h=k_e=10 N/m$ ve sönüm katsayıları $b_h=b_e=2 Ns/m$ 'dir. İnsan ve çevre tork modellerinde başlangıç şartı $z_0=0$ olarak seçilmiştir. Şekil 6'da sinüs girişi ve işaret (signum) fonksiyonu kullanımı sonucu elde edilen açıl pozisyon ve pozisyon hata grafikleri gösterilmiştir. Şekil 7'de değişken bir giriş olan sinüs girişi ve işaret (signum) fonksiyonu kullanımı sonucu insan ve çevre tarafında meydana gelen tork ve tork hata grafikleri gösterilmiştir.

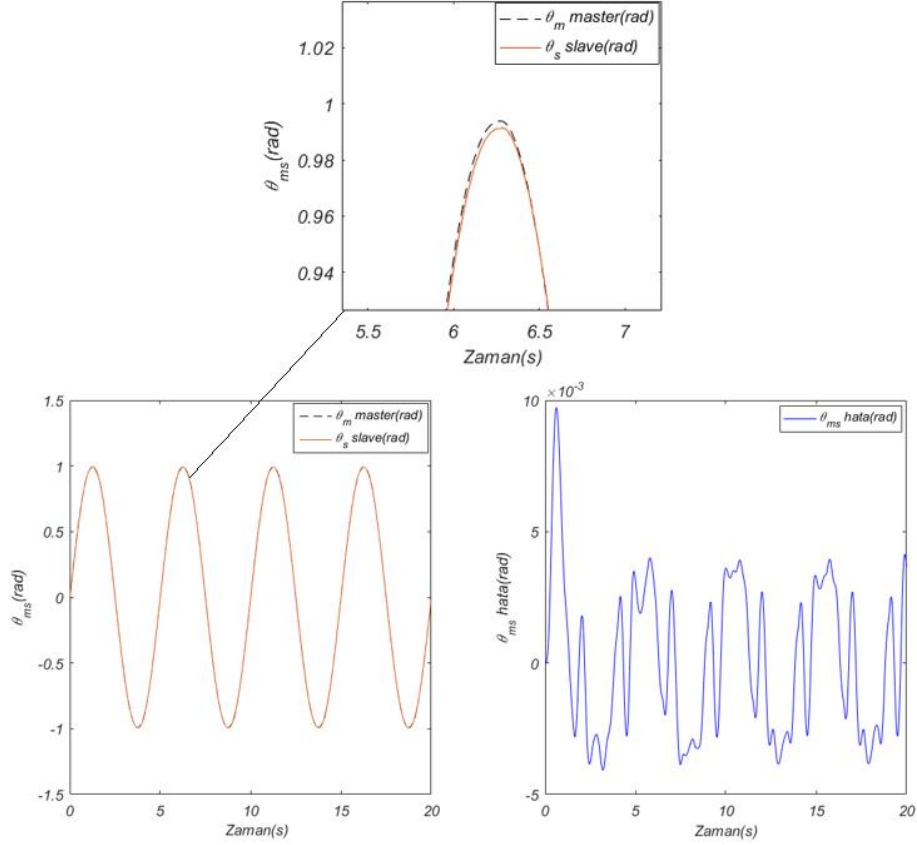


Şekil 6. Açısal pozisyon ve pozisyon hata grafikleri (işaret (signum))

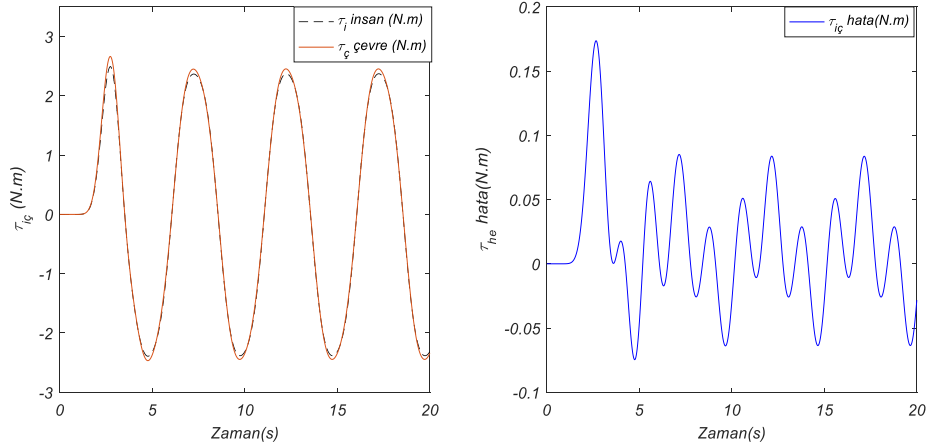


Şekil 7. İnsan ve çevre tarafında meydana gelen tork ve tork hata grafikleri (işaret (signum))

Şekil 6 incelendiğinde master robot tarafında üretilen açısal pozisyonun, slave robot tarafından yaklaşık $\pm 8 \times 10^{-3}$ radyan hata ile takip edildiği görülmektedir. Şekil 6'da yakınlaştırılan açısal pozisyon hata grafiği incelendiğinde çatırdama probleminin meydana geldiğini görülmekte ayrıca elde edilen sonucun çok iyi yakınsamadığı görülmektedir. İnsan ve çevre tork grafiklerinin verildiği Şekil 7 incelendiğinde slave robot tarafından iletilen çevre tork değerinin master robot tarafında yaklaşık ± 0.1 Nm hata oranıyla takip edildiği görülmektedir. Şekil 6 ve 7 incelendiğinde çatırdama problemi meydana geldiğinden gerçek zamanlı uygulamalarda yöntemin kullanılmayacağı görülmektedir. Şekil 8'de sinüs girişi ve saturasyon fonksiyonu kullanımı sonucu elde edilen açısal pozisyon ve pozisyon hata grafikleri gösterilmiştir. Şekil 9'da sinüs girişi ve işaret (signum) fonksiyonu kullanımı sonucu insan ve çevre tarafında meydana gelen tork ve tork hata grafikleri gösterilmiştir.

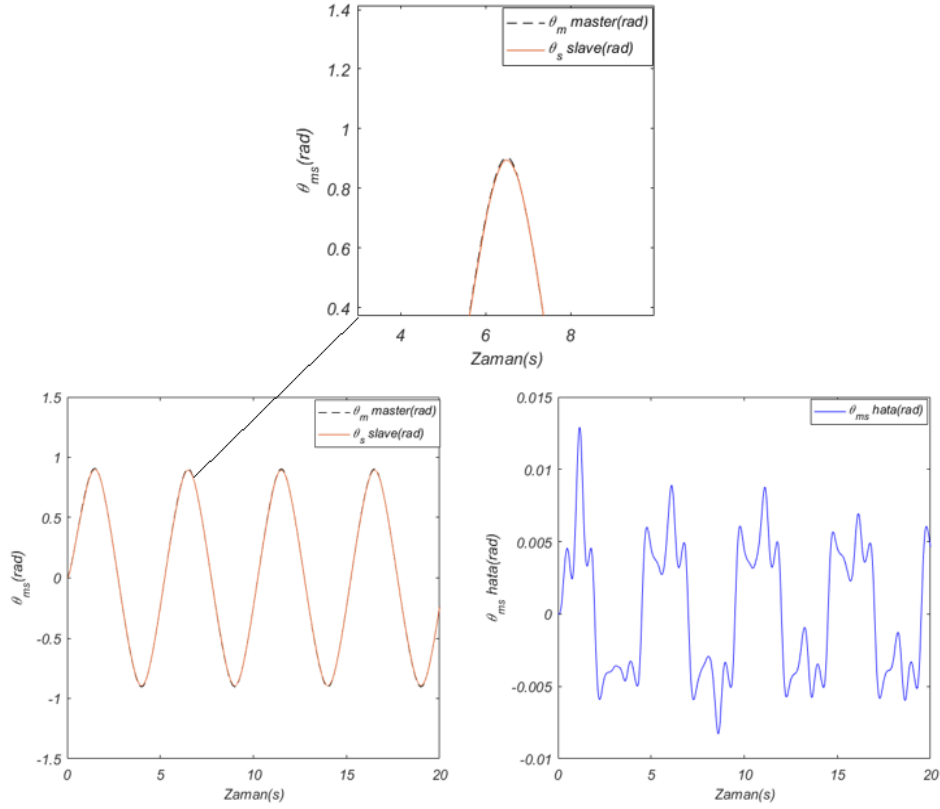


Şekil 8. Açısal pozisyon ve pozisyon hata grafikleri (saturasyon)

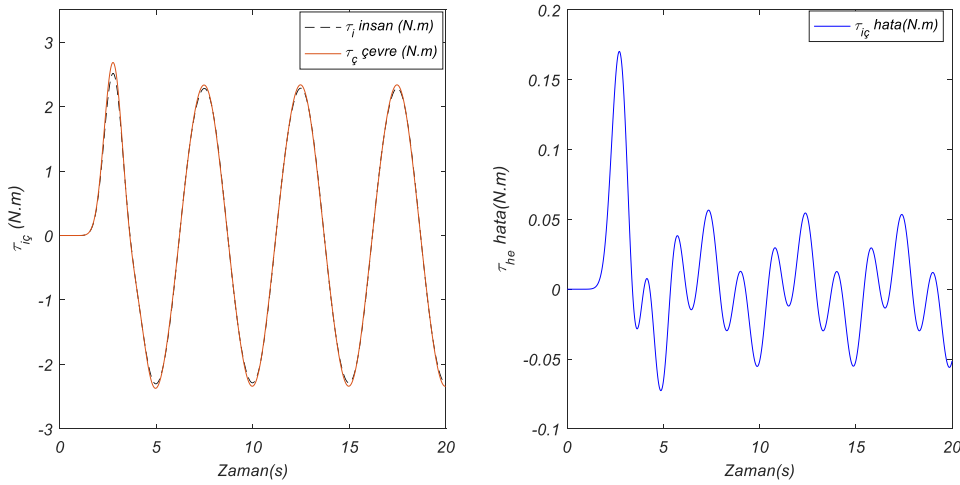


Şekil 9. İnsan ve çevre tarafında meydana gelen tork ve tork hata grafikleri (saturasyon)

Master robot tarafında üretilen açısal pozisyonun, slave robot tarafından yaklaşık $\pm 4 \times 10^{-3}$ radyan hata takip edildiği Şekil 8'de görülmektedir. Şekil 8'de yakınlaştırılan açısal pozisyon hata grafiği incelendiğinde çatırdama probleminin giderildiği ayrıca elde edilen sonucun yakınsandığı görülmektedir. İnsan ve çevre tork grafiklerinin verildiği Şekil 9 incelendiğinde slave robot tarafından iletilen çevre tork değerinin master robot tarafında yaklaşık $\pm 8 \times 10^{-2}$ Nm hata oranıyla takip edildiği görülmektedir. Şekil 10'da sinüs girişi ve quasi tabanlı KKK kullanımı sonucu elde edilen açısal pozisyon ve pozisyon hata grafikleri gösterilmiştir. Şekil 11'de sinüs girişi ve quasi tabanlı KKK kullanımı sonucu insan ve çevre tarafında meydana gelen tork ve tork hata grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 10. Açısal pozisyon ve pozisyon hata grafikleri (quasi tabanlı KKK)



Şekil 11. İnsan ve çevre tarafında meydana gelen tork ve tork hata grafikleri (quasi tabanlı KKK)

Şekil 10'da görüldüğü üzere master robot tarafında üretilen açısal pozisyon, slave robot tarafından yaklaşık $1 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$ radyan hata ile takip edildiği görülmüştür. Şekil 10'da yaklaşıtırılan açısal pozisyon hata grafiği incelendiğinde çatırdama probleminin ortadan kaldırıldığı ayrıca elde edilen sonucun yakınsandığı görülmektedir. İnsan ve çevre tork grafiklerinin verildiği Şekil 11 incelendiğinde slave robot tarafından iletilen çevre tork değerinin master robot tarafında yaklaşık $0.18 \sim 0.1$ Nm hata oranıyla takip edildiği görülmektedir. Performans kriterleri Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error (MSE)) ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error (MAE)) 17 ve 18 nolu denklemlerde verilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N p_{m_i} - p_{s_i} \right)^2 \quad (17)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |p_{m_i} - p_{s_i}| \right) \quad (18)$$

Master robotun i . değeri y_{mi} , slave robotun i . değeri y_{si} ile gösterilmektedir. z ise açı veya torqu (θ & τ) temsil etmektedir. $z=1,2,3,4 \dots N$ 'dir. Tablo 1'de sistemin eklem açılarının MSE ve MAE hata kriterlerine ve üç farklı KKK yönteminin sonuçlarının kıyaslama tablosu verilmiştir.

Tablo 1. Açısal pozisyon (θ_{ms}) hata performans kıyaslama tablosu

Yöntemler (KKK)	MSE	MAE
U_{sign}	0.000083	0.0058
U_{sat}	0.000052	0.0025
U_{quasi}	0.000011	0.0032

Açısal pozisyon (θ_{ms}) hata performans kıyaslama tablosu (Tablo 1) incelendiğinde MSE performans kriteri ve signum fonksiyonu kullanılarak elde edilen hata değeri 0.000083 radyandır. Saturasyon fonksiyonu kullanılarak elde edilen hata değeri 0.000052 radyandır. MSE kriterine ve quasi tabanlı KKK yöntemi kullanılarak elde edilen hata değeri 0.000011 radyandır. Performans kıyaslama tablosunda verilen MAE performans kriteri ve signum fonksiyonu kullanılarak elde edilen açısal pozisyon (θ_{ms}) hata değeri 0.0058 radyandır. Saturasyon fonksiyonu kullanılarak elde edilen hata değeri 0.0025 radyandır. MAE kriterine ve quasi tabanlı KKK yöntemi kullanılarak elde edilen hata değeri 0.0032 radyandır. Tablo 1'de verilen performans kıyaslama tablosuna göre önerilen ve uygulanan kontrol yöntemleri arasında en iyi hata (en düşük hata değeri) performansı quasi tabanlı KKK yöntemi ve MSE kriteri kullanılarak elde edilmiş değeri 0.000011 radyandır. En kötü hata (en yüksek hata değeri) performansı signum fonksiyonu tabanlı KKK yöntemi ve MSE kriteri kullanılarak elde edilmiş ve değeri 0.000083 radyandır. MAE kriterine ve signum fonksiyonu tabanlı KKK yöntemi kullanılarak elde edilen hata değeri 0.000083 radyandır. Tablo 2'de sistemin eklem açılarının MSE ve MAE hata kriterlerine ve üç farklı (signum, saturasyon ve quasi tabanlı) KKK yönteminin sonuçlarının kıyaslama tablosu gösterilmiştir.

Tablo 2. İnsan ve çevre torqu ($\tau_{i,c}$) hata değerlerinin performans kıyaslama tablosu

Yöntemler (KKK)	MSE	MAE
U_{sign}	0.0042	0.0381
U_{sat}	0.0024	0.0355
U_{quasi}	0.0014	0.0225

İnsan ve çevre ($\tau_{i,c}$) torqu değerlerini performans hata kıyaslama tablosu (Tablo 2) incelendiğinde MSE performans kriteri ve signum fonksiyonu kullanılarak elde edilen torqu hata değeri 0.0042 Nm'dir. Saturasyon fonksiyonu kullanılarak elde edilen torqu hata değeri 0.0024 Nm'dir. MSE kriterine ve quasi tabanlı KKK yöntemi kullanılarak elde edilen hata değeri 0.0014 Nm'dir. Performans kıyaslama tablosunda verilen MAE performans kriteri ve signum fonksiyonu kullanılarak elde edilen torqu hata değeri 0.0381 Nm'dir. Saturasyon fonksiyonu kullanılarak elde edilen torqu hata değeri 0.0355 Nm'dir. MAE kriteri ve quasi tabanlı KKK yöntemi kullanılarak elde edilen torqu hata değeri 0.0225 Nm'dir. Genel olarak torqu değeri için quasi tabanlı KKK yöntemi her iki kritere göre hata değerleri incelendiğinde üstün performans gösterdiği görülmektedir. Yöntemin dinamik belirsizliğine karşı duyarsızlığı haptik-teleoperasyon sisteminin dinamik belirsizlik problemini çözmüştür. Yöntemin dezavantajı olan çatırdama problemi meydana gelmiş (işaret (sign) fonksiyonu kullanımında) bu problem ise saturasyon ve quasi tabanlı KKK yöntemleri kullanılarak giderilmiştir. Şekil 6-11, Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilen açısal pozisyon ve torqu hata performans sonuçları incelendiğinde haptik-teleoperasyon sisteminin iki yönlü kontrolü için kabul edilebilir seviyelerde hatalar gözlemlenmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada haptik-teleoperasyon robotik sistemlerinin pozisyon ve kuvvet izleme performanslarını etkileyen dinamik belirsizlik problemi incelenmiştir. Teleoperasyon sistemlerinde istenen mükemmel kararlılık ve şeffaflık için parametre belirsizliğinin giderilmesi için Kayan kipli kontrol (KKK) yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin (klasik KKK yöntemi) uygulanması sonucu çatırdama problemi ortaya çıkmıştır. Bu problemin giderilmesi için ise saturasyon ve quazi tabanlı KKK yöntemleri kullanılmıştır ve sistemin problemi giderilmiştir. Tablo 1’de verilen performans kıyaslama tablosuna göre önerilen ve uygulanan kontrol yöntemleri arasında en iyi hata (en düşük hata değeri) performansı quazi tabanlı KKK yöntemi ve MSE kriteri kullanılarak elde edilmiş değeri 0.000011 radyandır. MSE kriterine (Tablo 2) ve quazi tabanlı KKK yöntemi kullanılarak elde edilen hata değeri 0.0014 Nm olduğu görülmektedir. Önerilen yöntemler arasından quazi tabanlı KKK yöntemi üstün performans göstermiştir. İki yönlü konum ve kuvvet kontrolü benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen tablolar (MSE ve MAE kriterleri kullanılarak) ve grafiksel sonuçlar hedeflenen konum ve torkun tatmin edici bir şekilde takip edildiği gösterilmiştir. Yöntemler gelecekte gerçek zamanlı olarak laboratuvar ortamında uygulanabilir.

KAYNAKÇA

1. Lv, H., Kong, D., Pang, G., Wang, B., Yu, Z., Pang, Z., Yang, G. GuLiM: A Hybrid Motion Mapping Technique for Teleoperation of Medical Assistive Robot in Combating the COVID-19 Pandemic. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 4 (1), 106-117, 2022.
2. Abut, T, Soyguder, S. Haptik-Teleoperasyon Sistemleri için PID ve SMC Kontrol Yöntemlerinin Tasarımı ve Bilgisayar Simülasyonu. *Journal of New Results in Engineering and Natural Sciences*, (12), 12-21,2020.
3. Abut, T, Soyguder, S. Motion control in virtual reality based teleoperation system. In 2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE, 2682-2685,2015.
4. Bhaskar, S., Bradley, S., Sakhamuri, S., Moguilner, S., Chattu, V. K., Pandya, S., Starr, S., Ray, D., Banach, M. Designing futuristic telemedicine using artificial intelligence and robotics in the COVID-19 era. *Frontiers in public health*, 8, 708, 2020.
5. Abut, T., Soyguder, S. Sabit Zaman Gecikmeli Tek Serbestlik Dereceli Bir Haptik-Teleoperasyon Sisteminin Kontrolü. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33.1,133-140, 2021.
6. Liu, Y. C., Khong, M. H., Adaptive control for nonlinear teleoperators with uncertain kinematics and dynamics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5), 2550-2562, 2015.
7. Abut, T.,Soyguder, S. Optimal adaptive computed torque control for haptic-teleoperation system with uncertain dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 236(4), 800-817, 2022.
8. Mahya, S., Farokh, A. S., Talebi, H. A., Towhidkhan, F. A sliding-mode controller for dual-user teleoperation with unknown constant time delays. *Robotica*, 31(4), 589-598, 2013.
9. Garcia-Valdovinos, L. G., Lopez-Segovia, A., Jimenez-Hernandez, H., Santacruz-Reyes, H., Garcia-Zarco, L. A. Transparent higher order sliding mode control for nonlinear master-slave systems without velocity measurement. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(4), 28, 2015.
10. Ryu, J. H., Kwon, D. S. A novel adaptive bilateral control scheme using similar closed-loop dynamic characteristics of master/slave manipulators. *Journal of Robotic Systems*, 18(9), 533-543, 2001.
11. Lee, H. K., Chung, M. J. Adaptive controller of a master-slave system for transparent teleoperation. *Journal of Robotic systems*, 15(8), 465-475, 1998.
12. Chopra, N., Spong, M. W., Lozano, R. Synchronization of bilateral teleoperators with time delay. *Automatica*, 44(8), 2142-2148, 2008.
13. Soyguder, S., Abut, T. Haptic industrial robot control with variable time delayed bilateral teleoperation. *Industrial Robot: An International Journal*, 43(4), 390-402. 2016.
14. Abut, T., Soyguder, S. Real-time control of bilateral teleoperation system with adaptive computed torque method. *Industrial Robot: An International Journal*. 44(3), 299-311, 2017.
15. Zhao, L., Zhang, H., Yang, Y., Yang, H. Integral sliding mode control of a bilateral teleoperation system based on extended state observers. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(5), 2118-2125, 2017.
16. Vafaei, A., Yazdanpanah, M. J. Terminal sliding mode impedance control for bilateral teleoperation under unknown constant time delay and uncertainties. In 2013 European Control Conference (ECC), IEEE, 3748-3753, 2013.
17. Abadi, A. S. S., Hosseinabadi, P. A., Mekhilef, S., Ordys, A. Chattering-free fixed-time sliding mode control for bilateral teleoperation under unknown time-varying delay via disturbance and state observers. *Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems*, 2(4), e52. 2020.
18. Al-Wais, S., Khoo, S., Lee, T. H., Shanmugam, L., Nahavandi, S. Robust H_{∞} cost guaranteed integral sliding mode control for the synchronization problem of nonlinear tele-operation system with variable time-delay. *ISA transactions*, 72, 25-36, 2018.

19. Utkin, V. Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic control*, 22(2), 212-222, 1977.
20. Abut, T., Soyguder, S. Sliding Mode Control of the Haptic-Teleoperation System Based on a Real and Virtual Robot. In *2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, IEEE, 1-7, 2019.
21. Abut, T. Position Controller Design and Implementation of Ball and Beam System with SMC and PD Control Methods. *Energy Engineering and Control Systems*, 6(2), 120-126, 2020.
22. Milosavljevic, D. General conditions for existence of a quasi-sliding mode on the switching hyperplane in discrete variable structure systems. *Autom. Remote Control*, 46, 307-314, 1985.
23. Corradini, M. L., Leo, T., Orlando, G. Robust stabilization of a mobile robot violating the nonholonomic constraint via quasi-sliding modes. In *Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251)*, IEEE, 6, 3935-3939, 1999.
24. Huang, C. F., Liao, T. L., Chen, C. Y., Yan, J. J. The design of quasi-sliding mode control for a permanent magnet synchronous motor with unmatched uncertainties. *Computers & Mathematics with Applications*, 64(5), 1036-1043, 2012.
25. Perić, S. L., Antić, D. S., Milovanović, M. B., Mitić, D. B., Milojković, M. T., Nikolić, S. S. Quasi-sliding mode control with orthogonal endocrine neural network-based estimator applied in anti-lock braking system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(2), 754-764, 2015.
26. Cui, Y., Xu, L., Ji, J., Shi, R., Wang, Z. Quasi-sliding mode control for discrete-time uncertain systems with time-varying delay and stochastic disturbance. *International Journal of Control*, 95(1), 249-258, 2022.