

Received: 16.12.2020

Accepted: 31.12.2020

Haptik-Teleoperasyon Sistemleri için PID ve SMC Kontrol Yöntemlerinin Tasarımı ve Bilgisayar Simülasyonu

Tayfun ABUT^{1,2*}, Servet SOYGÜDER³

¹Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 49100, Muş, Türkiye

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23100, Elazığ, Türkiye

³Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06100, Ankara, Türkiye

Özet

Haptik-Teleoperasyon sistemleri, insan-robot etkileşiminde kullanılan teknolojilerden biridir. Bu sistemlerin temel hedefi iki yönlü kesintisiz etkileşimdir. Bu hedef ancak sorunsuz çalışan iki yönlü kontrol ile mümkündür. Bu çalışmada sistemin kendinden veya çevreden kaynaklanacak tüm belirsizliklerin üstesinden gelmesi için PID ve Kayan Kipli Kontrol(Sliding Mode Control-SMC) yöntemleri tasarlanmış ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sistemin hareket denklemleri elde edilmiştir. SMC yönteminde kullanılan signum işaret fonksiyonunun çarptırma problemine neden olduğu bilindiğinden bu problemin giderilmesi için saturasyon fonksiyonu önerilmiş ve uygulanmıştır. Sonuç olarak haptik-teleoperasyon sistemleri için iki yönlü kontrol benzetim ortamında gerçekleştirilmiş, sonuçlar grafikler ve tablolar halinde verilmiştir. Performans kriterleri (RMSE ve MAE) kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmış ve irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnsan-Robot Etkileşimi, Haptik-Teleoperasyon Sistemleri, Kayan Kipli Kontrol (SMC) ve PID

Design and Computer Simulation of PID and SMC Control Methods for a Haptic-Teleoperation Systems

Tayfun ABUT^{1,2*}, Servet SOYGÜDER³

¹ Mus Alparslan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 49100, Mus, Turkey

²Fırat University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 23100, Elazığ, Turkey

³Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, 06100, Ankara, Turkey

Abstract

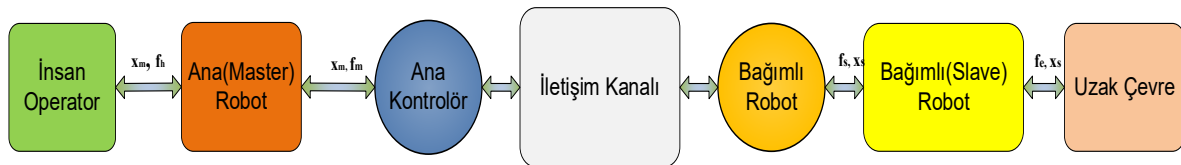
Haptic-Teleoperation systems are one of the systems used in human-robot interaction. This goal is only possible with smoothly running bilateral control. In this study, PID and Sliding Mode Control (SMC) methods were designed and simulated to overcome all uncertainties caused by the system itself or the environment. First of all, the equation of motions of the system has been obtained. Since the signum function used in the SMC method is known to cause the cracking problem, the saturation function has been proposed and applied to overcome this problem. As a result, bilateral control for master and slave haptic - teleoperation systems has been realized in a simulation environment and the results are given in graphics and tables. The results were compared and analyzed using performance criteria (RMSE and MAE).

Keywords: Human-Robot Interaction (HRI), Haptic-Teleoperation Systems, Sliding Mode Control (SMC) and PID

*Corresponding Author, e-mail: tayfunabut@gmail.com

1. Giriş

Haptik-Teleoperasyon sistemleri geçmişten günümüze sıklıkla araştırılan ve geliştirilen İnsan-Robot Etkileşimini (Human-Robot Interaction (HRI)) sağlayan teknoloji türlerindedir[1-4]. Bu sistemlerin temel hedefi iki yönlü kesintisiz etkileşim sağlamaktır. Ancak bu sistemlerin çeşitli problemleri mevcuttur. Bunlardan biri sistemleri oluşturan ana(master) ve bağımlı(slave) robotların doğrusal olmayan yapıları nedeniyle tam olarak modellenememesi sistemlerin iki yönlü kontrolünde büyük problemlere neden olmakla birlikte sistemin kararlılık ve şeffaflık performansını önemli derecede etkilemektedir. Bu problemin giderilmesi için literatürde çeşitli araştırmalar yapılmış, yöntemler önerilmiş ve araştırılmaya devam edilmektedir. Bunlardan birinde (Moreau ve ark. 2012) pnömatik servo sistemlerinden oluşan iki yönlü teleoperasyon sistemi için kayan kipli kontrol tasarlamıştır[5]. (Liu ve Tavakoli, 2011) belirsiz doğrusal olmayan teleoperasyon sistemlerinin kontrolü için adaptif ters dinamik model kullanılarak dört kanallı kontrolünü hedeflemiştir[6]. (Zaad ve Salcudean, 1996) çevre modelinde parametrik belirsizlikleri azaltmak çevre ve bağımlı dinamik parametrelerini birleştirerek bir adaptif kontrolör tasarlamıştır[7]. (Lee ve Chung, 1998) bağımlı ve çevre dinamikleri ve parametrik belirsizlikler ile haptik-teleoperasyon sistemleri için uyarlamalı kontrol şeması tasarlamıştır[8]. (Liu ve Tavakoli, 2012) doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik belirsizlikleri olan teleoperasyon sistemleri için bir adaptif kontrolör önermiş ve Lypunov fonksiyonu ile kararlılığını incelemişlerdir. Ayrıca dış güçlere maruz kalan teleoperasyon sistemlerinde pozisyon izleme sorununu ele almışlardır[9]. (Li ve ark. 2018) belirsiz parametreler ve iletişim gecikmesi varlığında teleoperasyon sisteminin görev uzayında iki yönlü adaptif senkronize kontrolünü simülasyon ortamında gerçekleştirmiştir[10]. (Xu ve ark. 2019) zaman gecikmesi ve parametre belirsizliği ile uzaktan pilotlu sistem için tahmine dayalı uyarlamalı kayan kipli kontrol yöntemini önermiştir[11]. (Abut ve Soyguder, 2017) yaptıkları çalışmada tüm belirsizlikler ile başa çıkmak için uyarlamalı hesaplanmış tork yöntemini kullanmıştır[12]. (Liu ve ark., 2012) simülasyon ortamında modellenemeyen bir dinamiğe sahip, bilinmeyen ve doğrusal olmayan sistemler için gözlemci tabanlı adaptif bulanık mantık yaklaşımını ele almışlardır[13]. (Yang ve ark., 2013) ağa bağlı doğrusal olmayan iki yönlü teleoperasyon sistemi için uyarlanabilir bulanık sonlu zaman koordinasyon kontrolü gerçekleştirmiştir[14]. Bu çalışmada öncelikle ana(master) ve bağımlı(slave) robotların hareket denklemleri elde edilmiştir. Bu sistemlerde meydana gelebilecek tüm belirsizliklerinin üstesinden gelmek için PID ve Kayan Kipli Kontrol(Sliding Mode Control-SMC) yöntemleri önerilmiş ve uygulanmıştır. Ancak literatürde yapılan çalışmalardan da bilindiği üzere SMC yönteminin çatırdama problemi bu yöntemin en büyük dezavantajıdır. Bu çalışmada saturasyon fonksiyonu kullanılarak problemin giderilmesi hedeflenmiştir. Sonuç olarak temel hedef olan tüm belirsizlik problemleri giderilmeye çalışılmış elde edilen veriler grafiksel ve tablolar halinde verilmiştir. Elde edilen sonuçlar performans kriterleri RMSE(Root Mean Squared Error=Kök Ortalama Kare Hata) ve MAE(Mean Absolute Error=Ortalama Mutlak Hata) kullanılarak karşılaştırılmış ve irdelenmiştir. Şekil 1 'de sistemin genel blok şeması verilmiştir.



Şekil 1. Sistemin genel blok şeması

2. Sistemin Hareket Denklemleri

Lagrange-Euler yöntemi kullanılarak sistemin hareket denklemleri elde edilmiştir. Ana(master) ve bağımlı(slave) robotlarımız tek serbestlik derecelidir ve robotların hareket denklemleri aşağıda verilmiştir.

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

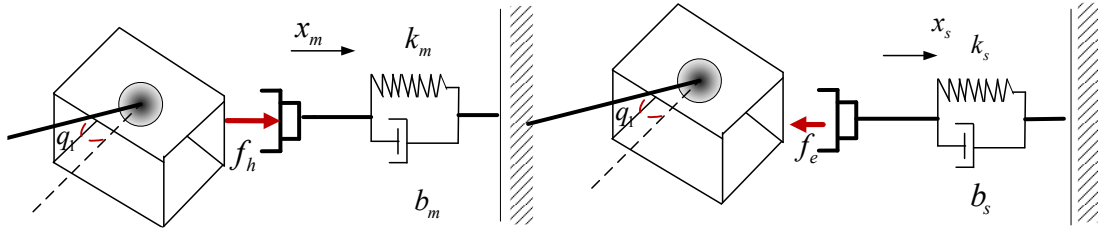
$$I_s \ddot{\theta}_s + b_s \dot{\theta}_s = \tau_e \quad (2)$$

$\theta_i, \dot{\theta}_i$ ve τ_i sırasıyla konum, hız ve tork ifadelerini göstermektedir. $i \in \{m, s\}$ indisleri sırasıyla ana ve bağımlı robotları göstermektedir. I_m ve I_s atalet momentlerini b_m ve b_s ise robotların sönüm katsayılarını göstermektedir. τ_m, τ_s sırasıyla ana ve bağımlı robotu tahrik etmek için gereken tork ifadelerini, τ_h ve τ_e ise kullanıcı tarafından uygulanan ve çevreden sisteme etki eden tork ifadelerini göstermektedir.

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

$$\tau_e = J_s^T f_e, f_e = k_s(x_s - x_e) + b_s(\dot{x}_s - \dot{x}_e) \quad (4)$$

Burada J_m ve J_s sırasıyla ana ve bağımlı robotların jakobiyen matrislerini, f_e ve f_h ise ortaya çıkan kuvvetleri, b_m, b_s, k_m, k_s ise operatör ve bağımlı robotun etkileşime girdiği çevrenin yay ve sönüm sabitlerini göstermektedir. Şekil 2'de haptik-teleoperasyon sisteminin benzetim modeli gösterilmiştir.



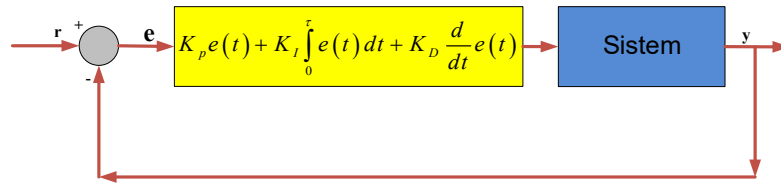
Şekil 2. Haptik-teleoperasyon sisteminin benzetim modeli

3. Kontrolör Tasarımı

Haptik-teleoperasyon sisteminin iki yönlü kontrolünde PID ve Kayan Kipli Kontrol (Sliding Mode Control (SMC)) yöntemleri kullanılmıştır. Sisteme uygulanan bu kontrolörler ile tüm belirsizliklerden kaynaklanan problemlerin ve pozisyon hatasının minimize edilmesi hedeflenmiştir.

3.1. PID Kontrol Yöntemi

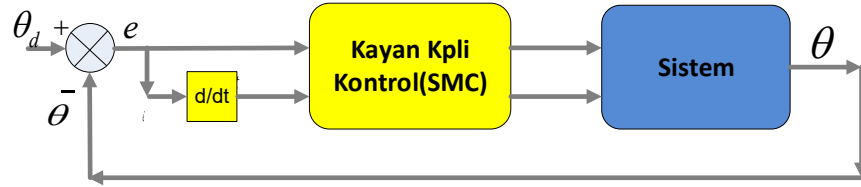
PID(Proportional-Integral-Derivative(oransal-integral-türevsel)) kontrol yöntemi birçok uygulamada kullanılan bir yöntemdir ancak günümüzde hala sistemlerin kontrolünde aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Yöntemde u kontrolör çıkışı, K_p oransal kazanç K_i integral kazanç, K_d türevsel kazanç ve e hata sinyali olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada kontrol katsayılarını Ziegler-Nichols yönteminin kapalı çevrim kontrol tipi kullanılarak elde edilmiştir[15-16]. Şekil 3'te PID kontrol yönteminin blok şeması verilmiştir.



Şekil 3. PID kontrol yönteminin blok şeması

3.2. Kayan Kipli Kontrol (SMC) Yöntemi

Değişken yapıli kontrol yönteminin özel halinden biri olan Kayan Kipli Kontrol(SMC) yöntemi sistemlerin belirsizliği ve bozucu etkilere karşı duyarsız olması sebebiyle bu çalışmada tercih edilmiştir. Yöntem temelde iki tasarım aşamasından oluşmaktadır. İlk aşamada sistem değişkenleri kayma veya anahtarlama yüzeyine gitmeye zorlanır ve ikinci aşamada ise kayma yüzeyinde kalması sağlanır ve orijine kaydırılır[17-20]. Yöntemin doğası gereği sürekli bir yapıya sahip değildir ve bu sistemde çatırdama problemine sebep olmaktadır. Bu problem yöntemin en büyük dezavantajıdır. Bu çalışmada klasik signum işaret fonksiyonu yerine saturasyon fonksiyonu önerilmiş ve uygulanmıştır. Şekil 4'te Kayan Kipli Kontrol(SMC) yönteminin blok şeması verilmiştir.



Şekil 4. Kayan Kipli Kontrol (SMC) yönteminin blok şeması

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

θ_d istenen referans açı değerini temsil etmekte θ ise gerçek referans açı değerini göstermektedir. 5 nolu denklemin türevi alındığında 6 nolu denklem elde edildi.

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

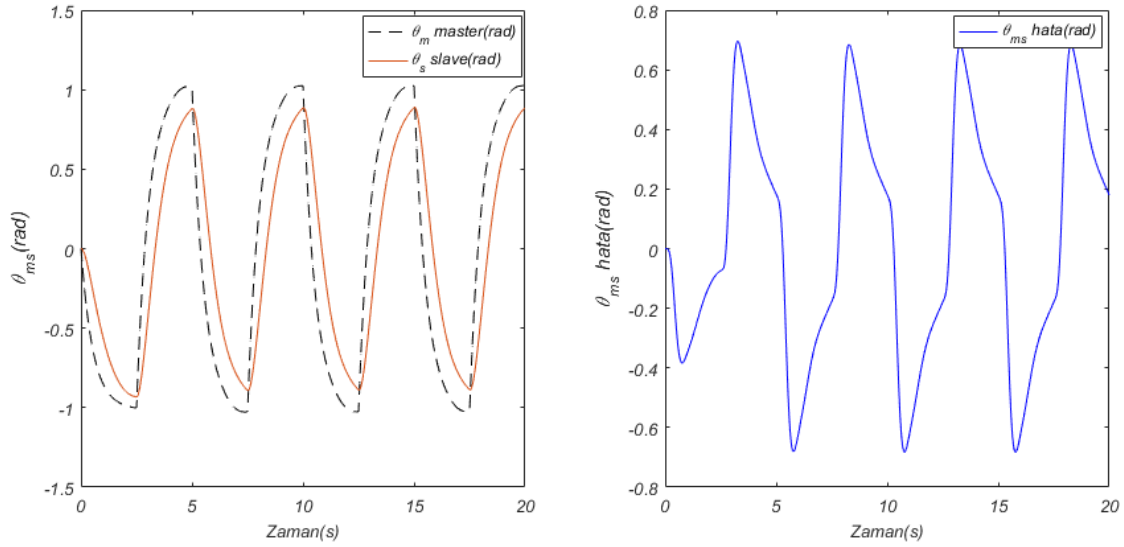
7 nolu denklemde kayma yüzeyine ait denklem verilmiştir. Denklemde görüldüğü üzere kayma yüzeyi hata ve hatanın türevine ayrıca λ katsayısına bağlıdır. λ pozitif tanımlı bir matrisi göstermektedir. 9 nolu denklemde kontrol sinyaline ait denklem verilmiştir. 9 nolu denklemde verilen kontrol sinyali, sabit bir parametre olan k ve anahtarlama fonksiyonu işlevi görev signum işaret fonksiyonuna bağlı olduğu görülmektedir.

$$s = \dot{e} \quad (7)$$

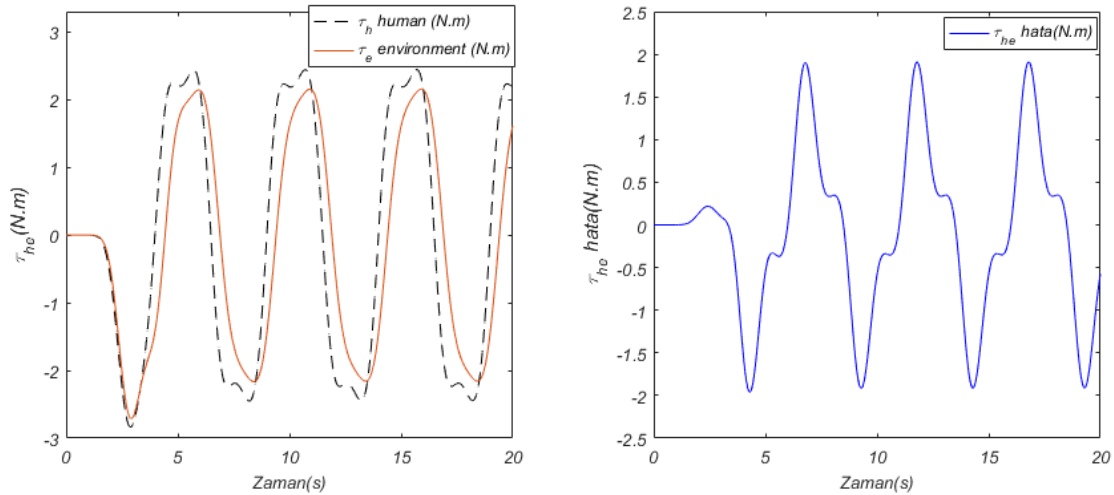
$$\dot{s} = \ddot{e} \quad (8)$$

$$u = k * \text{sign}(s) \quad (9)$$

Signum işaret fonksiyonu 10 nolu denklemde verildiği gibi tanımlanmaktadır. Şekil 5'te kayma yüzeyi grafiği verilmiştir. Yöntemin en büyük dezavantajı olan çatırdama problemini azaltmak veya ortadan kaldırmak için saturasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

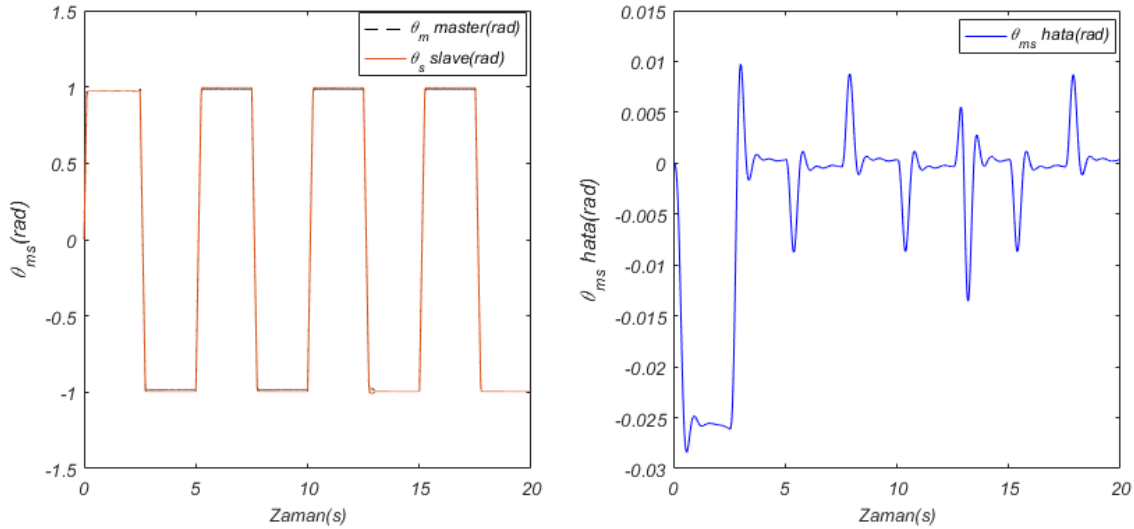


Şekil 7. PID kontrol yöntemi kullanılarak elde edilen açısal pozisyon ve hata grafiği

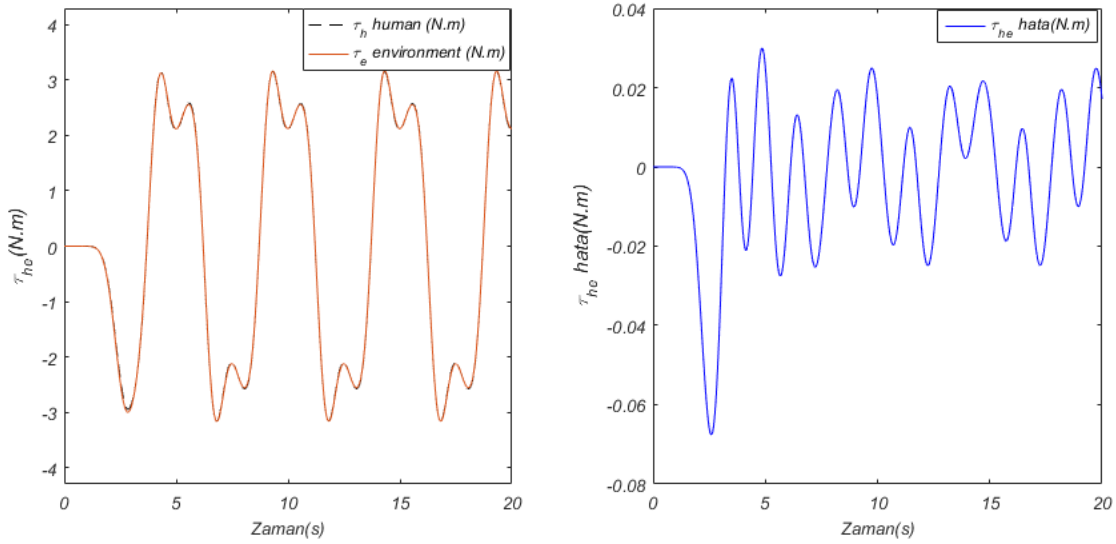


Şekil 8. PID kontrol yöntemi kullanılarak elde edilen insan ve çevre tork tepkisi ve hata grafiği

Şekil 7’de ana robot tarafından üretilen açısal pozisyon, bağımlı robot tarafından yaklaşık 0.7~ - 0.7 radyan hata ile takip ettiği görülmektedir. Ancak açısal pozisyon grafiğinde de görüldüğü üzere sonuçlar yakınsamamaktadır. Şekil 8’de görüldüğü üzere değişken ortam şartlarında elde edilen insan ve çevre tork grafikleri gözlemlendiğinde bağımlı robot tarafında etkileşim sonucu meydana gelen çevre tork değerini ana robot tarafına yaklaşık +2~ -2 N.m hata ile iletildiği görülmüştür. Şekil 7 ve 8 gözlemlendiğinde PID kontrol yöntemi istenen performansı göstermemiştir. Şekil 9’da değişken bir giriş olan kare girişi, SMC kontrol yöntemi ve saturasyon fonksiyonu kullanılarak elde edilen açısal pozisyon ve pozisyon hata sonucu grafikleri verilmiştir. Şekil 10’da aynı giriş ve yöntem kullanılarak elde edilen insan ve çevre tarafında oluşan tork ve tork hata sonucu grafikleri verilmiştir. Şekil 9’da ana robot tarafından üretilen açısal pozisyon, bağımlı robot tarafından yaklaşık $1 \cdot 10^{-2}$ ~ $-2.8 \cdot 10^{-2}$ radyan hata ile takip ettiği görülmektedir ve açısal pozisyon takibinin iyi bir şekilde yakınsadığı ve yöntemin büyük problemi olan çatırdama probleminin giderildiği görülmektedir. Şekil 10’da görüldüğü üzere değişken ortam şartlarında elde edilen insan ve çevre tork grafikleri gözlemlendiğinde bağımlı robot tarafında etkileşim sonucu meydana gelen çevre tork değerini ana robot tarafına yaklaşık +0.03~ -0.07 N.m hata ile iletildiği görülmüştür.



Şekil 9. SMC kontrol yöntemi kullanılarak elde edilen açısal pozisyon ve hata grafiği



Şekil 10. SMC kontrol yöntemi kullanılarak elde edilen insan ve çevre tork tepkisi ve hata grafiği

Şekil 9 ve 10 gözlemlendiğinde SMC kontrol yöntemi ile istenen performans elde edilmiştir. Yöntemlerin performansı iki performans kriteri kullanılarak karşılatılmıştır. Bu kriterler 13 ve 14 nolu denklemlerde verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_j^N y_{m_j} - y_{s_j} \right)^2} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \left(\sum_j^N |y_{m_j} - y_{s_j}| \right) \quad (14)$$

y_{mj} ana(master) robotun j . değeri y_{sj} ise bağımlı(slave) robotun j . değerini göstermektedir. y ise açı veya tork(θ & τ) ifadelerini göstermektedir. $j=1,2,3,4\dots N$ 'dir. Tablo 1'de haptik-teleoperasyon sisteminde kullanılan yöntemlerin RMSE ve MAE performans kriterlerine göre açısal pozisyon sonuçlarının kıyaslama tablosu verilmiştir.

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

Kontrol Yöntemleri	RMSE	MAE
PID	0.3995	0.3507
SMC(sat)	0.00093	0.0045

Tablo 1’de verilen sonuçlara göre açısal pozisyon(θ_{ms}) için PID kontrol yöntemi ve RMSE performans kriterine göre elde edilen hata değeri 0.3995 radyandır. Aynı kritere göre SMC kontrol yöntemi kullanılarak elde edilen hata değeri 0.00093 radyandır. Tablo 1’de verilen PID kontrol yöntemi ve diğer bir kriter olan MAE kriterine göre elde edilen açısal pozisyon(θ_{ms}) hata değeri 0.3507 radyandır. Aynı kritere ve SMC kontrol yöntemine göre elde edilen hata değeri 0.0045 radyandır. Uygulanan kontrol yöntemleri ve performans kriterleri arasından yapılan kıyaslamaya göre en iyi açısal pozisyon hata performansı SMC yöntemi ve MAE kriteri kullanılarak elde edilmiş ve değeri 0.0045 radyandır. Benzer şekilde yapılan kıyaslamaya göre en kötü açısal pozisyon hata performansı RMSE kriterine aittir ve değeri 0.3995 radyandır. Tablo 2’de ise haptik-teleoperasyon sisteminin etkileşimi sonucu elde edilen insan ve çevre tork değerlerinin benzer şekilde RMSE ve MAE kriterine göre yani PID ve SMC yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlarının kıyaslama tablosu verilmiştir.

Tablo 2. İnsan ve çevre tork(τ_{he}) performans tablosu

Kontrol Yöntemleri	RMSE	MAE
PID	0.9855	0.7470
SMC(sat)	0.0187	0.0141

Tablo 2’de verilen sonuçlara göre insan ve çevre etkileşim sonucu elde edilen τ_{he} için PID kontrol yöntemi ve RMSE performans kriterine göre elde edilen hata değeri 0.9855 N.m’dir. Aynı kritere göre SMC kontrol yöntemi kullanılarak elde edilen hata değeri 0.0187 N.m’dir. Tablo 2’de verilen PID kontrol yöntemi ve diğer bir kriter olan MAE kriterine göre elde edilen τ_{he} tork hata değeri 0.7470 N.m’dir Aynı kritere ve SMC kontrol yöntemine göre elde edilen hata değeri 0.0141 N.m’dir. Uygulanan kontrol yöntemleri ve performans kriterleri arasından yapılan kıyaslamaya göre en iyi insan-çevre tork hata performansı SMC yöntemi ve MAE kriteri kullanılarak elde edilmiş ve değeri 0.0141 N.m’dir. Benzer şekilde yapılan kıyaslamaya göre en kötü tork hata performansı PID kontrol yöntemi ve RMSE kriterine aittir ve değeri 0.9855 N.m’dir. Genel olarak açısal pozisyon ve tork değerleri için SMC kontrol yöntemi ve her iki performans kriteri kullanılarak elde edilen hata değerlerine bakıldığında üstün performans göstermiştir. Görüldüğü üzere yöntemin tüm belirsizliklere karşı duyarsızlığı sayesinde haptik-teleoperasyon sisteminin iki yönlü kontrolünde iyi bir performans göstermiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada haptik-teleoperasyon sistemlerinin temel hedefi olan iki yönlü sorunsuz kontrolü için kontrol tasarımı ve bilgisayar simülasyonu gerçekleştirilmiştir. PID ve Kayan Kipli Kontrol(SMC) yöntemleri önerilmiştir. Önerilen SMC yönteminin sisteme uygulanması sonucu yöntemin dezavantajı olan çatırdama problemi meydana gelmiştir. Bu problem saturasyon fonksiyonu kullanılarak giderilmiştir. Yöntemlerin uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar grafiksel ve sayısal olarak verilmiştir. Son olarak, tasarlanan kontrolörler RMSE ve MAE performans kriterleri kullanılarak birbirleriyle karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlar incelediğinde haptik-teleoperasyon sisteminin iki yönlü kontrolü için SMC yöntemi ile kabul edilebilir seviyede hatalar elde edilmiştir. Gelecekte önerilen yöntemler gerçek zamanlı olarak laboratuvar ortamında uygulanabilir.

6. Kaynakça

- [1] Zahedi, E., Khosravian, F., Wang, W., Armand, M., Dargahi, J., Zadeh, M. (2019). Toward Skill Transfer via Learning-Based Guidance in Human-Robot Interaction: An Application to Orthopaedic Surgical Drilling Skill. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 1-12. 2.
- [2] Abut, T., Soygüder, S. (2018). Interface Design and Performance Analysis for a Haptic Robot. *Muş Alparslan University Journal of Science*, 6(2), 553-560.
- [3] Yang, G., Lv, H., Zhang, Z., Yang, L., Deng, J., You, S., ... Yang, H. (2020). Keep Healthcare Workers Safe: Application of Teleoperated Robot in Isolation Ward for COVID-19 Prevention and Control. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33(1), 1-4.
- [4] Bhaskar, S., Bradley, S., Sakhamuri, S., Moguilner, S., Chattu, V. K., Pandya, S., ... Banach, M. (2020). Full Title: Designing futuristic telemedicine using artificial intelligence and robotics in the COVID-19 era Short Title: AI and Robotics in COVID-19.
- [5] Moreau, R., Pham, M. T., Tavakoli, M., Le, M. Q., Redarce, T. (2012). Sliding-mode bilateral teleoperation control design for master–slave pneumatic servo systems. *Control Engineering Practice*, 20(6), 584-597.
- [6] Liu, X., Tavakoli, M. (2011). Adaptive inverse dynamics four-channel control of uncertain nonlinear teleoperation systems. *Advanced Robotics*, 25(13-14), 1729-1750.
- [7] Hashtrudi-Zaad, K., Salcudean, S. E. (1996). Adaptive transparent impedance reflecting teleoperation. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation Vol. 2*, pp. 1369-1374. IEEE.
- [8] Lee, H. K., Chung, M. J. (1998). Adaptive controller of a master–slave system for transparent teleoperation. *Journal of Robotic systems*, 15(8), 465-475.
- [9] Liu, X., Tavakoli, M. (2012). Adaptive control of teleoperation systems with linearly and nonlinearly parameterized dynamic uncertainties. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 134(2).
- [10] Li, Y., Yin, Y., Zhang, D. (2018). Adaptive task-space synchronization control of bilateral teleoperation systems with uncertain parameters and communication delays. *IEEE Access*, 6, 5740-5748.
- [11] Xu, H., Fan, Y., Li, Q., Wang, F., Yan, J. (2019). Prediction-Based Adaptive Sliding Mode Control for Remotely Piloted System with Time Delay and Parameter Uncertainty. *IEEE Access*, 7, 86205-86216.
- [12] Abut, T., Soygüder, S. (2017). Real-time control of bilateral teleoperation system with adaptive computed torque method. *Industrial Robot: An International Journal*. Vol. 44 No. 3, pp. 299-311.
- [13] Liu, Y. J., Tong, S., Chen, C. P. (2012). Adaptive fuzzy control via observer design for uncertain nonlinear systems with unmodeled dynamics. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(2), 275-288.
- [14] Yang, Y., Hua, C., Guan, X. (2013). Adaptive fuzzy finite-time coordination control for networked nonlinear bilateral teleoperation system. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22(3), 631-641.
- [15] Ziegler, J. G., Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, 64(11).
- [16] Abut, T., Soygüder, S. (2019). Real-time control and application with self-tuning PID-type fuzzy adaptive controller of an inverted pendulum, *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, Vol. 46 Issue: 1, pp.159-170,
- [17] Utkin, V. (1977). Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic control*, 22(2), 212-222.
- [18] Abut, T., Soygüder, S. (2019). 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)* (pp. 1-7). IEEE.

- [19] Zhao, L., Zhang, H., Yang, Y., Yang, H. (2017). 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
- [20] Tang, J., Huang, F., Chen, Z., Wang, T., Gu, J., Zhu, S. (2019). Disturbance-observer-based sliding mode control design for nonlinear bilateral teleoperation system with four-channel architecture. *IEEE Access*, 7, 72672-72683.