



Ortam Şartlarının Bir Haptik-Teleoperasyon Sisteminin İki-Yönlü Kontrolü Üzerindeki Etkisi

Tayfun ABUT¹, Servet SOYGÜDER²

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

² Endüstri Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye

✉: tayfunabut@gmail.com,  ¹ 0000-0003-4646-3345,  ² 0000-0002-8191-6891

Geliş (Received): 13.05.2020

Düzeltilme (Revision): 21.05.2020

Kabul (Accepted): 25.05.2020

ÖZ

Haptik-teleoperasyon sistemleri oldukça zorlu ortamlarda görev yapmakta bundan dolayı bu sistemlerin kontrolünde birçok problemlerle karşılaşmaktadır. Hız ve kuvvet kontrolü doğrusal davranışlar göstermeyen ve zamanla değişen ortam şartları nedeniyle bu sistemlerin kontrolü için zorlu problemlerden biridir. Bu çalışmada gerçek şartlara yakın bir şekilde sistemin kontrolü için hem işlem ve ölçüm hem de ortam gürültüsü eklenerek haptik-teleoperasyon sisteminin iki yönlü kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tek serbestlik dereceli ana(master) ve bağımlı(slave) robotlardan oluşan sistemin hareket denklemleri elde edilmiştir. Sisteme filtreli ve filtresiz bir şekilde PID kontrol yöntemi uygulanarak performansı kriterlere göre incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar incelenmiş ve irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Haptik-Teleoperasyon, Hareket Denklemleri, Ortam Şartları, PID

Effect of Environment Conditions on Bilateral Control of a Haptic-Teleoperation System

ABSTRACT

Haptic-teleoperation systems work in very tough environments, so many problems are encountered in the control of these systems. Speed and force control are challenging problems for the control of these systems due to the time-varying environmental conditions that do not display linear behavior. In this study, bilateral control of the haptic-teleoperation system was performed by adding both process and measurement and environmental noise to control the system close to real conditions. The equations of motion of the system consisting of a single degree of freedom (master) and slave robots have been obtained. PID control method was applied to the system with and without filter, and its performance was examined according to criteria. The results obtained as a result of the studies conducted were examined and investigated.

Keywords: Haptic-Teleoperation, Equation of Motion, Environment Conditions, PID

GİRİŞ

Teleoperasyon sistemleri geçmişten günümüze birçok uygulama alanına sahip olduğundan dolayı aktif bir şekilde araştırılmaktadır [1-4]. Standart bir teleoperasyon sisteminde ana(master) tarafından üretilen pozisyon ya da hız gibi referans sinyallerine karşılık bağımlı(slave) tarafından etkileşimden dolayı ortaya çıkan kuvvet veya tork bilgisinin iletilmesi için kararlı kontrol yöntemleri kullanılması oldukça önemlidir. Literatürde bu robotların parametre belirsizliği problemini çözmek ve ortam şartlarından daha az etkilenmesi için çeşitli kontrol yöntemleri önerilmiş ve uygulanmıştır. Bu yöntemlerden biride adaptif yöntemlerdir. Jiang and Praly tarafından adaptif bir kontrolör tasarımı ile dinamik belirsizliklerin üstesinden gelmeye çalışılmıştır [5]. Hung ve diğerleri ana(master) ve bağımlı(slave) robotların tam olarak bilinmediği teleoperasyon sistemi için nonlinear kontrol yöntemi önermiştir [6]. Cheah ve diğerleri yörünge takibi için bir yeni adaptif Jakobiyan kontrolör

önermiştir [7]. Wu ve diğerleri küçük kazanç teoremi ve geri beslemeli yöntemlerinin kombine bir şekilde adaptif bir tasarım önermiştir. Asimptotik kararlı bir sonuç elde etmiştir [8]. Hosseini-Suny ve diğerleri teleoperasyon sistemlerinin kararlılığı sağlamak için yeni bir model referans tabanlı kontrol(MRAC) yöntemi önermiş ve performansı incelemiştir [9]. Nuno ve diğerleri doğrusal olmayan tele operatörler için adaptif bir kontrolör önermiş simülasyon ortamında gerçekleştirmiştir [10]. Abut ve Soygüder, teleoperasyon sistemlerinin problemlerinden biri parametre belirsizliğinin telafi etmek için adaptif hesaplanmış tork kontrol yöntemini kullanmıştır ve Lyapunov yöntemi ile kararlılığı incelemiştir[11]. Mellah ve diğerleri bulanık mantık üyelik fonksiyonlarını ayarlamak için iki adaptif kural oluşturmuştur. Bu kurullarla iki yönlü teleoperasyon sistemine uygulamıştır [12]. Yang ve diğerleri kinematik ve dinamik belirsizlikleri olan bir teleoperasyon sisteminin izleme kontrolü için adaptif bir yaklaşım kullanmıştır. Bu yaklaşımda sistemin

parametrelerini tahmin etmek için ve sistemi kontrol etmek için adaptif bulanık mantık kontrol yöntemini kullanmıştır [13]. García-Valdovinos ve diğerleri sabit zaman gecikmesi varlığında gözlemci tabanlı kayan kipli empedans kontrol yöntemi önermiş ve tek serbestlik dereceli teleoperasyon sistemine uygulamış ve sonuçlarını irdelenmiştir [14]. Soygüder ve Abut zaman gecikmesi problemi bulunan bir teleoperasyon sistemini gerçek zamanlı dalga değişken yöntemi kullanarak telafi etmeye ve kontrol etmeye çalışmıştır [15]. Hız ve kuvvet kontrolü doğrusal davranışlar göstermeyen ve zamanla değişen ortam şartları nedeniyle bu sistemlerin kontrolü için zorlu problemlerden biridir. Bu çalışmada gerçek şartlara yakın bir şekilde sistemin kontrolü için hem işlem ve ölçüm hem de ortam gürültüsü eklenerek haptik-teleoperasyon sisteminin iki yönlü kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tek serbestlik dereceli ana(master) ve bağımlı(slave) robotlardan oluşan sistemin hareket denklemleri elde edilmiştir. Sisteme filtreli ve filtreli bir şekilde PID kontrol yöntemi kullanılarak performansı kriterlere göre incelenmiştir. Ortalama karesel hata (Mean Square Error (MSE)) ve Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error (MAE)) performans kriterleri kullanılarak yöntemin hata sonuçları tablolar halinde verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar incelenmiş ve irdelenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Sistemin Hareket Denklemleri

Haptik-teleoperasyon robotik sisteminin Lagrange-Euler yöntemi kullanılarak elde edilen hareket denklemleri aşağıda verilmiştir.

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

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

$q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ ve τ_i sırasıyla konum, hız, ivme ve tork ifadelerini temsil etmektedirler. $i \in \{m, s\}$ indisleri sırasıyla ana ve bağımlı robotları temsil etmektedir. I_m ve I_s atalet momentlerini b_m ve b_s ise robotların sönüm katsayılarını göstermektedir. τ_m ve τ_s sırasıyla ana ve bağımlı robotlara etki eden tork ifadelerini, τ_h ve τ_e ise insan ve çevreye etki eden torkları temsil etmektedir. $\tau_e = J_s^T f_e, \tau_h = J_m^T f_h$

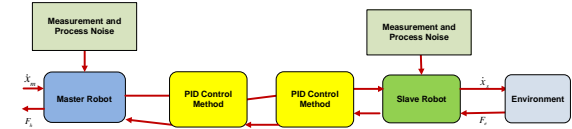
$$f_e = k_e (\Delta_e) + b_e \dot{\Delta}_e, \Delta_e = z_r - z \quad (3)$$

$$f_h = k_h (\Delta_h) + b_h \dot{\Delta}_h, \Delta_h = z_m - z_s \quad (4)$$

f_e ve f_h kuvvetleri sırasıyla sanal duvar ile etkileşimden ve yay-damper ile modellemesinden ortaya çıkan çevre ve insan kuvvetini temsil etmektedir. Sönüm katsayıları b_e ve b_h , yay sabitleri ise k_e ve k_h ile

temsil edilmektedir. z_r robotun referans konumunu z ise gerçek konumunu göstermektedir. Benzer şekilde z_m ana robotun referans konumunu, z_s ise bağımlı robotun konumunu ifade etmektedir. Ana ve bağımlı robotların jacobiyen matrisleri denklem 5'de verilmiştir.

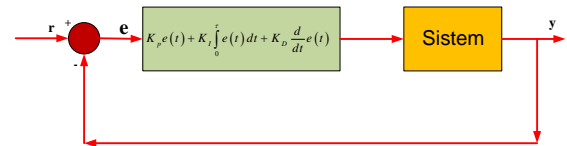
$$J_{m,s} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 \\ l_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$



Şekil 1. Sistemin iki yönlü kontrolü için önerilen yöntemin genel görünümü

Sistemin Kontrolör Tasarımı

Sistemler için iyi bir matematiksel model oluşturulursa da yine de her zaman birtakım problemler meydana gelmektedir ve tam bir matematiksel model etmek zordur. Bu belirsizlikler kontrol yöntemlerinin performansını ciddi şekilde etkilemektedir. Bu çalışmada PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrol yöntemi gürültülü ve gürültüsüz ortamda kullanılarak performansı incelenmiştir. Bu yöntem literatürde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [16-19]. Bu yöntemin tercih edilmesinin en büyük nedeni literatürdeki diğer yöntemlere göre parametrelerinin kolay bir şekilde ayarlanmasıdır. PID kontrol yönteminin blok diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. PID geri beslemeli kontrol yönteminin blok diyagramı

Kontrolör çıkışı u , oransal kazanç K_p , integral kazanç K_i , türevsel kazanç K_d ve hata sinyali e olarak gösterilmektedir. PID kontrol parametrelerinin elde edilmesinde 2. dereceden kapalı çevrim Ziegler-Nichols yöntemi kullanılmıştır [20]. Ziegler-Nichols yöntemi ile kazanç parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan parametre tablosu aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. Ziegler-Nichols Tablosu

Kontrol tipi	K_P	K_I	K_D
P	$0.5 * K_{cr}$	∞	0
PI	$0.4 * K_{cr}$	$0.8 * P_{cr}$	0
PID	$0.6 * K_{cr}$	$0.5 * P_{cr}$	$0.125 * P_{cr}$

Simülasyon sonuçları

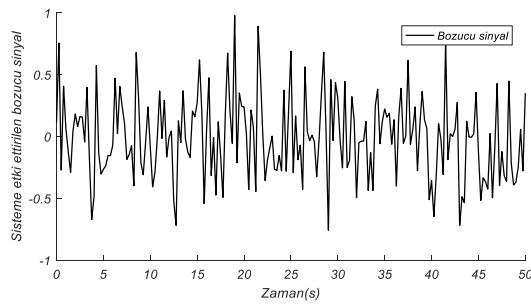
Bu kısımda sistem için elde edilen hareket denklemleri kullanılarak sistemin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin ana ve bağımlı robot olmak üzere tek serbestlik dereceli robotlardan oluşmaktadır. Elde edilen

denklemleri çalışır hale getirilmiş ve ayrıca bu çalışmada gerçek şartlara yakın bir şekilde sistemin kontrolü için hem işlem ve ölçüm hem de ortam gürültüsü eklenerek haptik-teleoperasyon sistemin iki yönlü kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin çalışma süresi 50 saniyedir. ana ve bağımlı robotların fiziksel parametreleri $m_m=m_s=0.038kg$, $l_m=l_s=0.1525m$ ve $I_m=I_s=0.01 kg\cdot m^2$ şeklinde alınmıştır. İnsan ve çevre modellerinin yay katsayıları $k_h=k_e=10 N/m$ ve sönüm katsayıları b_h and $b_e=2 Ns/m$ 'dir. Ayrıca insan ve çevre tork değerleri elde edilirken başlangıç şartı yani $z_0=0$ alınmıştır. Ortalama karesel hata (Mean Square Error (MSE)) ve Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error (MAE)) performans kriterleri kullanılarak yöntemin sonuçları tablolar halinde verilmiş ve irdelenmiştir.

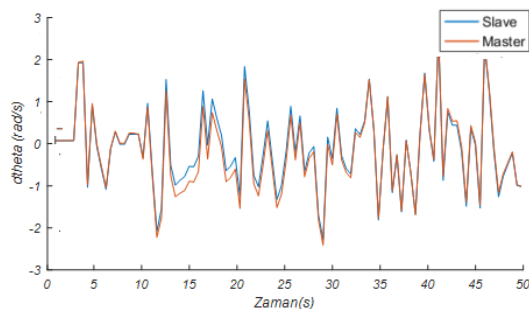
$$MSE = \frac{1}{N} \left(\sum_j^N y_{m_j} - y_{s_j} \right)^2 \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \left(\sum_j^N |y_{m_j} - y_{s_j}| \right) \quad (7)$$

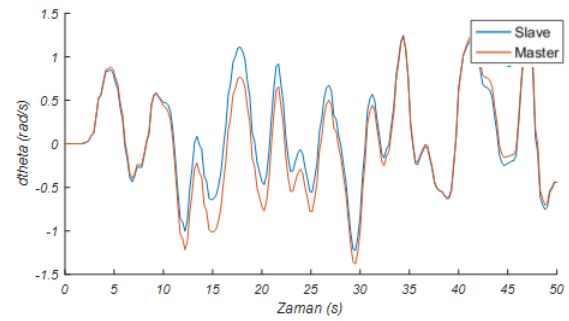
y_{mj} ana robotun j . değeri y_{sj} ise bağımlı robotun j . değerini göstermektedir. y ise açı veya tork(θ & τ) ifadesini temsil etmektedir. $j=1,2,3,4,\dots,N$ 'dir. İşlem, ölçüm ve ortama etki ettirilen bozucu sinyal grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Ana ve bağımlı robotların gürültülü yani filtresiz olarak elde edilen açısal hız grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Ana ve bağımlı robotların gürültüsüz yani filtreli olarak elde edilen açısal hız grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7'de filtreli ve filtresiz insan ve çevre kuvvet grafikleri verilmiştir. Sistemin filtreli grafiklerini elde etmek için 2. Dereceden alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Tablo 2' de yukarıda formülleri verilen kriterlere göre açısal hız hata değerleri verilmiştir.



Şekil 3. İşlem, ölçüm ve ortama etki ettirilen bozucu sinyal grafiği



Şekil 4. Ana ve bağımlı robotların filtresiz açısal hız grafiği

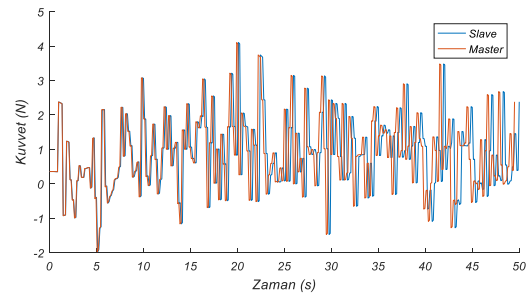


Şekil 5. Ana ve bağımlı robotların filtreli açısal hız grafiği

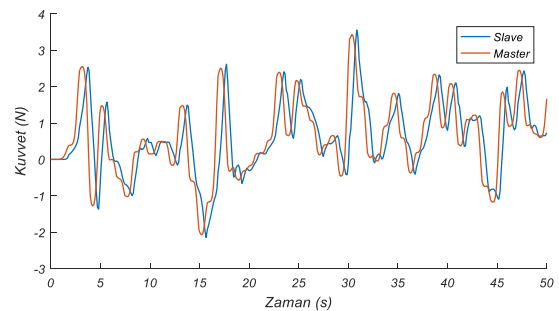
Tablo 2. MSE ve MAE kriterlerine göre hız hata değerleri

Kriter	Filtresiz	Filtreli
MSE	0.0170	0.0126
MAE	0.0883	0.0540

Tablo 2'de verilen sonuçlar göz önüne alındığında filtreli açısal hız cevabının hata değeri MSE kriterine göre 0,0126'dır. MSE kriteri göre 0,0170 değeri ise filtresiz açısal hız hata değeridir. Yukarıda verilen tabloya göre açısal hızın MAE kriterine göre filtreli hata değeri 0.0540, filtresiz değeri ise 0.0883'tür.



Şekil 6. Ana ve bağımlı robotların filtresiz kuvvet grafiği



Şekil 7. Ana ve bağımlı robotların filtreli kuvvet grafiği

Tablo 3'de verilen sonuçlar göz önüne alındığında filtreli insan ve çevre kuvvetlerinin cevapları hata değeri MSE kriterine göre 0,0260'dır. MSE kriteri göre 0,0480 değeri ise filtresiz kuvvet hata değeridir. Aşağıda verilen tabloya göre kuvvetlerin MAE kriterine göre filtreli hata değeri 0.0723, filtresiz değeri ise 0.0631'dir.

Tablo 3. MSE ve MAE kriterlerine göre hata değerleri

Kriter	Filtresiz	Filtreli
MSE	0.0480	0.0260
MAE	0.0723	0.0631

Genel olarak performans kriterlerine göre elde edilen hata değerleri kabul edilebilir seviyededir. Simülasyon sonuçlarında ana robot tarafında üretilen referans konum bilgilerinin bağımlı robot tarafından büyük ölçüde takip edildiği görülmektedir. Ayrıca bağımlı robot tarafında sistemin etkileşime girmesi sonucu elde edilen tork değerlerinin ana tarafına başarılı bir şekilde iletiildiği gözükmeğmektedir. Performans tablolarına göre sistemin ortam şartlarına, ölçüm ve işlem bozucularına rağmen başarılı bir şekilde iki yönlü kontrol edildiği görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada değişen ortam şartlarına rağmen iki yönlü haptik-teleoperasyon sisteminin kontrolü incelenmiştir. 1-serbestlik dereceli ana ve bağımlı robotlar arasında iki yönlü teleoperasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Hız ve kuvvet kontrolü sonuçları grafiksel olarak verilmiştir. Ayrıca hız ve kuvvet hata verileri iki farklı performans kriteri olan ortalama karesel hata (Mean Square Error (MSE)) ve Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error (MAE)) kullanılarak yöntemin sonuçları tablolar halinde verilmiş ve irdelenmiştir. Simülasyon çalışmaları sonucunda ana ve bağımlı robotlar arasında istenen hız ve kuvvet değerlerinin büyük ölçüde takip edildiği tablo ve grafiklerde gösterilmiştir. Performans sonuçlarının iki yönlü kontrol de kabul edilebilir hata oranlarına sahip olduğu gözlemlenmiş dolayısıyla başarılı olduğu görülmüştür. Gelecek çalışmalarda önerilen yöntemin gerçek zamanlı çalışmaları yapılacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 2211/C Yurtiçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Katsura S., Iida W., Ohnishi K. Medical mechatronics An application to haptic forceps, *Annual Reviews in Control*, 29:2 237-245, 2005.
- [2] Lee D., Franchi A., Son H.I., Ha C., Bulthoff H. H., Giordano P. R. Semiautonomous haptic teleoperation control architecture of multiple unmanned aerial vehicles, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 2013.
- [3] Abut T., Soyguder S. Haptic industrial robot control and bilateral teleoperation by using a virtual visual interface, *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. IEEE, 2018.
- [4] Mazerolle S., Breguet J. M., Steinecker A., Agnus J., Perez R., Michler J. Nanomanipulation in a scanning electron microscope, *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 2-3 371- 382, 2005.
- [5] Jiang Z. P., Pralv L. Design of robust adaptive controllers for nonlinear systems with dynamic uncertainties, *Automatica*, 34:7 825-840, 1998.
- [6] Hung N.V.O., Narikivo T., Tuan. H. D. Nonlinear adaptive control of master-slave system in teleoperation, *Control Engineering Practice*, 11:1 1-10, 2003.
- [7] Cheah C.C., Liu C., Slotine J.J.E. Adaptive tracking control for robots with unknown kinematic and dynamic properties, *The International Journal of Robotics Research*, 25:3 283-296, 2006.
- [8] Wu Z., Xie X., Shi P. Robust adaptive output-feedback control for nonlinear systems with output unmodeled dynamics, *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, 18:11 1162-1187, 2008.
- [9] Hosseini-Sunv K., Momeni H., Janabi-Sharifi F. Model reference adaptive control design for a teleoperation system with output prediction, *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 59:3-4 319-339, 2010.
- [10] Nuño E., Ortega R., Basañez L. An adaptive controller for nonlinear teleoperators, *Automatica*, 46:1 155-159, 2010.
- [11] 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.
- [12] Rabah M., Guermah S., Toumii R. Adaptive control of bilateral teleoperation system with compensatory neural-fuzzy controllers, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15:4 1949-1959, 2017.
- [13] Yang L., Chen Y., Liu Z., Chen K., Zhang Z. Adaptive Fuzzy Control for Teleoperation System with Uncertain Kinematics and Dynamics, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 17:5 1158-1166, 2019.
- [14] García-Valdovinos L. G., Parra-Vega V., Arteaga M. A. Observer-based sliding mode impedance control of bilateral teleoperation under constant unknown time delay, *Robotics and Autonomous Systems*, 55(8), 609-617, 2007.
- [15] Soyguder S., Abut T. Haptic industrial robot control with variable time, *Industrial Robot: An International Journal*, 43:4 390-402, 2016.
- [16] Abut T., Soyguder S. Real-time control and application with self-tuning PID-type fuzzy adaptive controller of an inverted pendulum, *Ind. Robot*, 46:1 159-170, 2019.
- [17] Hüseyinoğlu M., Abut T. Dynamic Model and Control of 2-Dof Robotic Arm, *European Journal of Technique*, 8:2 141-150, 2018.
- [18] Abut T., Soyguder S. Interface Design and Performance Analysis for a Haptic Robot, *Mus Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6:2 553-560, 2018.
- [19] Abut T., Soyguder S. Tek Serbestlik Dereceli Bir Teleoperasyon Sisteminde Kontrol Yöntemlerinin Performans Karşılaştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31:2 507-517, 2019
- [20] Ziegler J.B., Nichols N.B. The classic original paper: Optimum settings for automatic controllers, *ASME Transactions*, 64. 759-768, 1942.