

Zaman Gecikmeli İnsan-Makine Etkileşimli Teleoperasyon Sisteminin Kontrolü

Tayfun ABUT^{1*}, Servet SOYGÜDER²

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

²Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ

*tayfunabut@gmail.com

(Geliş/Received:12.09.2017; Kabul/Accepted: 29.11.2017)

Özet

Teleoperasyon kullanıcı tarafından robotların veya nesnelerin hareket ettirilmesi ve karşılıklı etkileşime geçilmesi olarak tanımlanmaktadır. Teleoperasyon sistemlerinde genellikle iletişim gecikmeleri meydana gelmektedir ve bu gecikmeler sistemlerin performansını etkilemektedir. Bu çalışmada iki yönlü iki kanallı teleoperasyon sisteminde meydana gelen değişken zaman gecikmesi probleminin telafisi için modifiye edilmiş dalga değişkenleri (wave variables) yöntemi kullanılmıştır. İki yönlü iki kanallı teleoperasyon sisteminde konum ve kuvvet kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ana (master) robot olarak Phantom Omni haptik ve bağımlı (slave) robot olarak sanal ortamda tasarlanan üç boyutlu sanal robot kullanılmıştır. Kullanıcıya görsel geri besleme sağlamak için bir görsel arayüz tasarlanmıştır. Sonuç olarak yapılan bu çalışmada değişken zaman gecikmesi varlığında iki yönlü iki kanallı konum ve kuvvet kontrolü gerçekleştirilmiş, benzetim ve gerçek zamanlı uygulamalar yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Teleoperasyon, Modifiye Edilmiş Dalga Değişken yöntemi, İki Yönlü İki-Kanallı kontrol, Sanal Robot

Control of Time Delayed Human-Machine Interaction Teleoperation System

Abstract

Teleoperation is defined as the movement of the robots or objects by the user and the mutual interaction. In teleoperation systems, communication delays often occur and these delays affect the performance of the systems. In this study, the modified wave variable method was used to compensate for the variable time delay problem that occurs in the bilateral two-channel teleoperation system. Position and force control has been realized in a bilateral two-channel teleoperation system. In this study, Phantom Omni haptic as a master robot and three-dimensional virtual robot designed as a slave robot in a virtual environment were used. A visual interface has designed to provide for the user visual feedback. As a result of this study, bilateral two-channel position and force control was realized in the presence of variable time delay, real time applications were made and results were obtained.

Keywords: Teleoperation, Modified Wave Variables Method, Bilateral Two-Channel Control, Virtual Robot

1. Giriş

İnsan Makina Etkileşimi (Human-Machine Interaction) disiplinler arası bir alan olup, insanlar ile makineler arasındaki bağlantıya odaklı, yazılım, donanım ve insan olaylarının incelenmesini hedeflemektedir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte insan-makina etkileşimi artmakta ve akıllı teknolojiler yaşamımızın her alanına hızla nüfuz etmektedir. İnsan-Makina iletişiminin kullanıldığı bazı alanlar, insan-bilgisayar etkileşimi, insan-robot-etkileşimi,

robotik, yapay zekâ, insansı robotlar ve ekzoskeleton kontrol şeklinde sıralanabilir[1]. Teleoperasyon çalışmalarının ise geniş bir çalışma yelpazesi olması dolayısıyla araştırmacıların ilgi alanı olması geçmişten günümüze sürdürmektedir. Savunma sanayi, robotik cerrahi, medikal sanayi, nükleer çalışmalar ve simülatörler v.b [2-8] çalışma alanlarından bazılarıdır. Teleoperasyon sistemlerinin ilke olarak bir insan operatörünün

uzak bir çevreyle etkileşime girmesini, tanımlaması ve fiziksel olarak etkileşime girmesini sağlayan bir çift robot setidir. Böyle bir sistemde, arzu edilen manipülasyon veya görev, insan tarafından kontrol edilen bir ana robotun hareketini izleyen bağımlı robot tarafından aynı ortam veya uzaktan gerçekleştirilir. Ana(master) ve bağımlı(slave) robotu operatöre saydam olması gereken bir iletişim kanalı vasıtasıyla bağlanır; yani, uzaktaki konumdaki ortamı en iyi şekilde hissetmesi gerekir. Teleoperasyon çalışmalarının bazı uygulamalarında haptik cihazlar kullanılarak uzaktan kontrolü yapılmaktadır. Bu genellikle, uzaktaki bağımlı(slave) bilgisini (örneğin konum, hız ve kuvvet) ana robota iletişim kanalı aracılığıyla elde edilir. Bu iletişim kanalında çeşitli problemler yaşanmaktadır.



Şekil 1. Phantom Omni Haptik robot ve dönme eksenleri[7]

Bu problemler iletişim kanalından gönderilen sinyaller, sabit veya değişken gecikmeye maruz kalabilmekte ve bu gecikme sebebiyle iki yönlü teleoperasyon sistemlerinde kararlılık ve saydamlık sağlanamamaktadır [9]. Literatürde kararlılık problemini çözmek üzere Sheridan ve Ferrell'in çalışmalarından [10] bu yana birçok yöntem geliştirilmiştir. Anderson ve Spong tarafından geliştirilen pasiflik (passivity) tabanlı scattering transformation yöntemi [11-13] ile Niemeyer ve Slotine tarafından önerilen scattering tabanlı dalga değişkenleri (wave variables) yaklaşımı [14-15] bu problemin çözümü için ilk önerilen yöntemlerdir. Niemeyer ve Slotine'in önerdiği dalga değişkenleri (wave variables) teorisinde [16] iletişim kanalının giriş ve çıkışındaki güç akışı, giriş ve çıkış dalgaları olarak yeniden tanımlanmıştır. Dalga değişkenleri, hız ve kuvvet (güç) sinyallerine

dalga dönüşümü (wave transformation) uygulanarak elde edilmektedir.

Scattering teorisindeki sonucun aynısına dalga teorisine de ulaşılmıştır. Dalga değişkenleri tekniğinde dalga taşıyıcıların değişmesiyle kesişim (junction) ve bitiş (termination) noktalarında dalga yansımaları (wave reflections) gözlemlenmektedir. Dalga dönüşümünün karakteristik empedansının geri kalan sisteme eşlenmesiyle dalga yansımaları yok edilebilmektedir. Sistemin kararlılığı pasiflik teorisine kanıtlanmış ancak sistemin performansı yeterli düzeyde olmadığından performans geliştirme çalışmaları devam etmiştir. Yazarlar scattering dönüşümü yöntemini zamanla değişen gecikme için yeniden düzenlemiş ve iletişim bloğuna zamanla değişen bir kazanç parametresi ekleyerek sistem pasifliğini garanti etmişlerdir [17-18].

Bu çalışmada, ana-bağımlı robottan oluşan teleoperasyon sisteminin konum ve kuvvet kontrolü hedeflenmiştir. Bu hedefle değişken zaman gecikmesi varlığında teleoperasyon sisteminin dalga değişken yöntemi kullanılarak kontrol edilmiştir. Ana robot tarafından kontrol edilen bağımlı robotun hareketlerinin görsel olarak geri besleme sağlaması için bir görsel arayüz tasarlanmıştır. İlk olarak robotun CAD modeli bir katı modelleme programında çizilmiş ve üç boyutlu model oluşturulmuştur (Şekil 3). Matlab paket program yazılımı kullanılarak görsel arayüz oluşturulmuştur. Bu çalışmada değişken zaman gecikmeli iki yönlü iki kanallı teleoperasyon sisteminin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Robotların ilk üç eksenleri kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak verilmiş ve irdelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu sistemin hareketi hakkında ileriye dönük faydalı bilgiler elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada ana ve bağımlı robotların dinamik modelleri elde edilmiş ve kuvvet grafikleri elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan robot parametre değerleri laboratuvarımızda kullanılan 6 serbestlik dereceli endüstriyel robotun fabrika üretim boyutlarından elde edilmiştir. Tablo 2'de sanal robotun fiziksel parametreleri gösterilmiştir

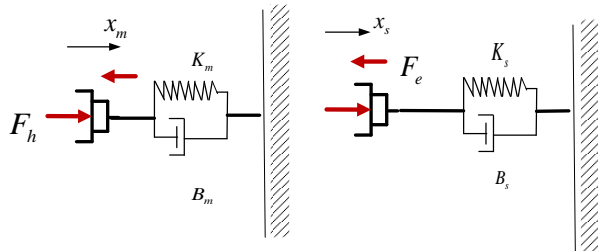
2. Ana(Master) ve Bağımlı (Slave) Robotun Dinamik Denklemleri

Sistemin dinamik denklemlerinin elde edilmesinde Lagrange-Euler yöntemi kullanılmıştır[20]. Sistemin ilk üç ekseninin denklemleri kullanılarak robotun benzetimi gerçekleştirilmiştir. Ana ve bağımlı robotların hareket denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

$$M_{qm}(q_m) \begin{bmatrix} \ddot{q}_m \\ \ddot{q}_m \end{bmatrix} + C_{qm}(q_m, \dot{q}_m) \begin{bmatrix} \dot{q}_m \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} + N_{qm} \begin{bmatrix} \dot{q}_m \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} = \tau_m + \tau_e \quad (1)$$

$$M_{qs}(q_s) \begin{bmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{q}_s \end{bmatrix} + C_{qs}(q_s, \dot{q}_s) \begin{bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{q}_s \end{bmatrix} + N_{qs} \begin{bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{q}_s \end{bmatrix} = \tau_s + \tau_e \quad (2)$$

$M(q)$, pozitif tanımlı simetrik bir matris olup aynı zamanda sistemin atalet matrislerini de içermektedir. Matrisin sabitlerini m , L , J temsil etmekte sistemin değişkenleri yalnızca q 'dır. $C(q)$ sistemin Coriolis matrisini temsil etmekte Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerini içermektedir. Burada $N(\theta)$ ise ağırlık kuvvetlerinden ve sistemin her bir eklemine etki eden sürtünme kuvvetlerini içermektedir. τ_m, τ_s sırasıyla gerçek ve sanal değerini temsil etmektedir. $\tau_h = J_m^T F_h$ ve $\tau_e = J_s^T F_e$ şeklinde alındı. İnsan operatör ile çevre arasında ilişki bir sanal duvar arasındaki ilişki kütle-yay-damper sistemi ile modellenmiştir. Şekil 1'de Phantom Omni Haptik robot ve dönme eksenleri gösterildi[21-22]. Tablo 1'de Phantom Omni haptik robotun fiziksel parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 2. Ana ve bağımlı robotların çevre ile etkileşim modeli[23]

Tablo 1. Phantom Omni haptik robotun fiziksel parametreleri

Tanımlama&Sembol	Değer&Birim
Ağırlık	~1,47 g
Boyutlar	~168W*203D mm
Atalet (I)	~45 g
Konum kararlılığı (θ)	~0.055 mm
Maksimum uygulanabilir kuvvet (Fmax)	3.3 N
Kuvvet geribesleme (F)	x, y, z
Konum ölçümü	x,y,z Pitch, roll, yaw
Arayüz	Paralel port
Destekleyen Platform	Intel tabanlı-PCs
Kuvvet geribesleme (F)	~1,47 g

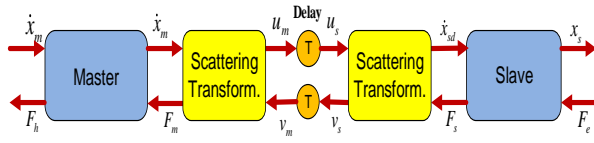
$$F_h = K_m(x_m - x_{md}) + B_m(\dot{x}_m - \dot{x}_{md})(a) \quad (3)$$

$$F_e = K_s(x_s - x_m) + B_s(\dot{x}_s - \dot{x}_m)(b)$$

Burada a ve b nolu denklemlerde B_m , B_s , K_m , K_s sabitleri sırasıyla operatör ve çevre etkileşime girdiğinde sönüm ve yay sabitini temsil etmektedir. x_m , x_{md} ve x_s sırasıyla ana robotun konumunu, ana robotun istenen konumunu ve bağımlı robotun konumunu temsil etmektedir. F_e ve F_h ise ortaya çıkan kuvvetleri temsil etmektedir. Şekil 2'de kullanılan ana ve bağımlı robotun çevre ile etkileşim modeli gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen model benzetim ortamında deneysel çalışmalar öncesinde kullanılmıştır. Ayrıca bağımlı robotun çevre ile etkileşim modeli deneysel çalışma sırasında kullanılmıştır.

3. Dalga Değişkenleri (Wave Variables) Yöntemi ve Kontrol Tasarımı

Scattering teorisi geliştirilerek dalga değişkenleri (wave variables) yöntemini bulmuştur[15]. Şekil 3'de standart zaman gecikmeli iki yönlü teleoperasyon sistemi için scattering dönüşümü gösterilmiştir.



Şekil 3. Standart zaman gecikmeli iki yönlü teleoperasyon sistemi için scattering dönüşümü[17]

Dalga değişkenleri iletişim kanalının her iki tarafındaki giriş ve çıkışları güç akışını, giriş ve çıkış dalgaları olarak temsil edilmektedir. Dalga dönüşümü, güç sinyalleri olan hız ve kuvvet sinyallerine iletişim kanalına girmeden önce uygulanır ve bu sinyaller dalga değişkenlerine dönüştürülür. Dalga değişkenleri standart güç değişkenlerinden aşağıdaki dönüşümlerle hesaplanabilir;

$$u_s = \frac{1}{\sqrt{2b}} (b\dot{x}_{sd} + F_s); \quad (4)$$

$$u_m = \frac{1}{\sqrt{2b}} (b\dot{x}_m + F_m); \quad (5)$$

$$v_s = \frac{1}{\sqrt{2b}} (b\dot{x}_{sd} - F_s); \quad (6)$$

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{2b}} (b\dot{x}_m - F_m); \quad (7)$$

Burada b pozitif sabit bir sayıyı ya da simetrik pozitif bir matris olan karakteristik dalga empedansını göstermektedir. \dot{x}_m ve \dot{x}_s sırasıyla ana ve bağımlı robotların hızlarını, F_h ve F_m ise sırasıyla insan operatör tarafından uygulanan kuvvet ve uzak çevre tarafından uygulanan kuvveti göstermektedir. F_m ve F_s sırasıyla ana ve bağımlı robotların kontrol kuvvetlerini ifade etmektedir. \dot{x}_{sd} Scattering dönüşümünde bağımlı robottan elde edilen hız ifadesini temsil etmektedir. u ve v ile dalga değişkenleri gösterilmektedir.

Bir sistemin pasiflik bağlamında incelenmesi için önce sisteme giren gücün tanımlanması gerekmektedir. P_m güç, sisteme giren giriş vektörü (x) ve sistemden çıkan çıkış vektörü (y) nin skaler çarpımı olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımlamalara göre aşağıdaki denklemi sağlayan bir sistem pasiftir. Yani sistemdeki güç ya

depolanmış ya da harcanmıştır. Bu sonuca bakılarak t anına kadar bir sistem tarafından üretilen toplam enerji ilk depolanan enerjiyle sınırlıdır denebilir, yani enerji dönüşümü negatif ilk enerjiyle sınırlıdır:

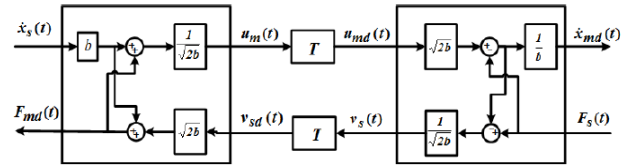
$$\int_0^t P_m(t) dt = \int_0^t x^T y d\tau \geq E_{store}(t) - E_{store}(0) \quad (8)$$

Tablo 2. Bağımlı robotun fiziksel parametreleri

Eksen	Uzuv uzunluğu (mm)	Hız (°/s)	Çalışma aralığı (°s)
1	100	200	360
2	352	200	200
3	360	260	280
4	445	360	400
5	60	360	240
6	30	450	800
Toplam kütle		98 kg	

$E_{store}(t)$ zamanla depolanan enerji, $E_{store}(0)$ ise ilk depolanan enerji göstermektedir. Herhangi bir anda iletişim bloğu içerisinde güç girişi aşağıdaki formülle ifade edilir;

$$P_m(t) = \dot{x}_{md}(t)F_m(t) - \dot{x}_{sd}(t)F_s(t) \quad (9)$$



Şekil 4. Dalga değişken dönüşümü [19]

Şekil 4'de dalga değişken dönüşümü gösterilmiştir. İletişim kanalı boyunca T kadar sabit zaman gecikmesine göre, gidiş ve dönüş gecikmeli olarak iletilen sinyaller şu şekilde elde edilir.

$$u_s(t) = u_{md}(t) = u_m(t-T) \quad (10)$$

$$v_m(t) = v_{sd}(t) = v_s(t-T) \quad (11)$$

Alise ve arkadaşları [26] ,Munir ve Book [27] tarafından verilen ölçeklendirme matrislerini genişletmişlerdir ve A_w , B_w , C_w ve D_w için gerekli ve yeterli şartları aşağıdaki gibi özetlemiştir.

- 1) Ölçeklendirme matrisi A_w tekil olmayan;
- 2) $B_w = \frac{1}{2}(I + S_w)A_w^{-T}$ (S_w herhangi bir simetrik matristir)
- 3) $C_w = QA_w$ (Q ortogonal simetrik matristir.)
- 4) $D_w = \frac{1}{2}Q(I - S_w)A_w^{-T}$

Yukarıdaki dört koşulun sağlanması için ölçeklendirme matrislerini tanımlayarak, Chopra ve ark. [29] tanımlanan ölçeklendirme matrislerinin standart çok-serbestlik dereceli sistemlerde dalga tabanlı sistemin pasifliğini sağlam bir şekilde garanti edebildiğini kanıtlamıştır.

$$u_s(t) = u_m(t - T_1(t)) \quad (21)$$

$$v_m(t) = v_s(t - T_2(t)) \quad (22)$$

T_1 ve T_2 sırasıyla ana ve bağımlı robotların, ileri ve geri yol zamanla değişen zaman gecikmesidir (11). Zamanla değişen gecikme sıklığı sınırlı olduğu varsayılır; İletişim hattında depolanan toplam enerji 24 nolu denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{dT_i}{d\tau} < 1; i = 1, 2 \quad (23)$$

$$E = \frac{1}{2} \left[\int_{t-T_1(t)}^t u_m^T(\tau) u_m(\tau) d\tau + \int_{t-T_2(t)}^t v_s^T(\tau) v_s(\tau) d\tau - \int_0^{t-T_1(t)} \frac{T_1'(\sigma)}{1-T_1'(\sigma)} u_m^T(\sigma) u_m(\sigma) - \int_0^{t-T_2(t)} \frac{T_2'(\sigma)}{1-T_2'(\sigma)} v_s^T(\sigma) v_s(\sigma) d\sigma \right] \quad (24)$$

$$\sigma = \tau - T_i(\tau) = g_i(\tau) \text{ ve } T_i(\sigma) = \frac{dT_i}{d\tau} \Big|_{\tau=g_i^{-1}(\sigma)} \quad (25)$$

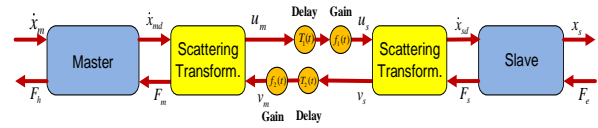
Denklem 25'te, değişken zaman gecikmeli teleoperasyon sisteminin pasiflik özelliğinin garanti olmadığını göstermektedir [32].

3.1. Modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi

Şekil 6'da gösterilen blok diyagram, değişken zaman gecikmeli adaptif kazanç parametresi eklenmiş dalga değişkenli yöntem için [30] 'de tanımlanan modifikasyonu göstermektedir.

$$u_s(t) = f_1(t) u_m(t - T_1(t)) \quad (27)$$

$$v_m(t) = f_2(t) v_s(t - T_2(t)) \quad (28)$$



Şekil 6. Zaman gecikmesi kazanç parametresi $f_i(t)$ eklenmiş iletişim kanalı [30-31]

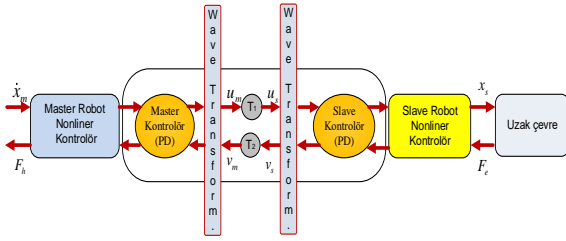
Depolanan toplam enerji yeni denklemler kullanılarak yeniden yazıldığında;

$$E = \frac{1}{2} \left[\int_{t-T_1(t)}^t u_m^T(\tau) u_m(\tau) d\tau + \int_{t-T_2(t)}^t v_s^T(\tau) v_s(\tau) d\tau - \int_0^{t-T_1(t)} \frac{1-T_1'(\sigma) - f_1^2}{1-T_1'(\sigma)} u_m^T(\sigma) u_m(\sigma) d\sigma - \int_0^{t-T_2(t)} \frac{1-T_2'(\sigma) - f_2^2}{1-T_2'(\sigma)} v_s^T(\sigma) v_s(\sigma) d\sigma \right] \quad (29)$$

f_i Denklem 29'da gösterilen toplam depolanmış enerji denklemi içerisinde $f_i^2 = 1 - T_i'$ şeklinde alınır, denklem 25 'de gösterilen terimler ortadan kalkar ve sistem pasif olarak elde edilir. Aşağıdaki f_i için koşul sağlanırsa sistem pasif olarak kabul edilir.

$$f_i^2 < 1 - \frac{dT_i}{dt}; i = 1, 2 \quad (30)$$

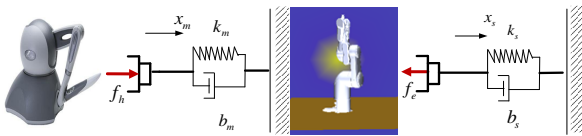
Değişken zaman gecikmelerine karşı kendini adapte eden bu kazanç parametresi [32], adaptif kazanç parametresi diye adlandırılır. Dede ve Tosunoğlu modifiye dalga değişken konusunda birtakım çalışmalar yapmıştır [33-35]. Şekil 7'de Ana ve Bağımlı robottan oluşan kontrol blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 7. Ana ve Bağımlı robottan oluşan kontrol blok diyagramı

4. Deneysel çalışmalar

Bu çalışmada Phantom Omni [19] haptik robot kullanılmıştır. PHANTOM Omni elektromekanik haptik cihaz 6 serbestlik dereceli olup birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. MATLAB Real-Time Workshop™ Toolbox ile kullanılan bir Quanser Q8 USB veri toplama yönetim kurulu ve WinCon™ / RTXTM gerçek zamanlı kontrol sistemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların süresi 10 saniye seçilmiştir. Öncelikle robotun kurulumu gerçekleştirildi ve daha sonra data toplama kartı bir araya getirildi. Gerekli bağlantılar gerçekleştirildikten sonra ana robot ile referans konum üretilirken sanal bağımlı robot bu konumu takip etmeye çalışmaktadır. Ana robot tarafından oluşturulan konum sanal bağımlı robotun dinamiği üzerinden bağımlı robot kontrol edildi. Şekil 8 'de ana ve bağımlı robotun çevre ile etkileşim modeli gösterilmiştir.



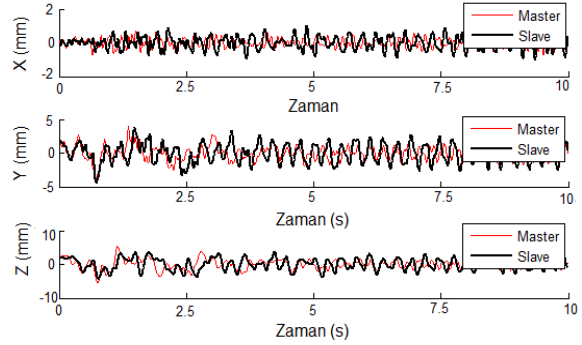
Şekil 8. Ana ve Bağımlı robotun çevre ile etkileşim modeli

$$J_m = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 (l_2 \sin \theta_3 + l_1 \cos \theta_2) & l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 & -l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 \\ 0 & l_1 \cos \theta_2 & l_2 \sin \theta_3 \\ -l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - l_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 & l_1 \sin \theta_2 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$J_s = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 - l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_3) & -\cos \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_1 \sin \theta_2) & -l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 \\ -\sin \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 - l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_3) & -\sin \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_1 \sin \theta_2) & l_2 \sin \theta_1 \\ 0 & l_2 \cos \theta_2 - l_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 & l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \quad (32)$$

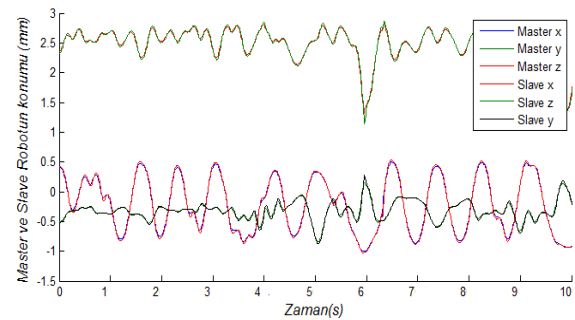
Şekil 9. Ana ve bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında kontrolsüz grafiği

gösterilmiştir. Ortalama 0.01-0.3 saniye aralığında değişen zaman gecikmesi olduğu görülmektedir. Denklem 31 ve 32'de ana ve bağımlı robotun jakobiyen matrisleri gösterilmiştir.



Şekil 9. Ana ve Bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında kontrolsüz grafiği

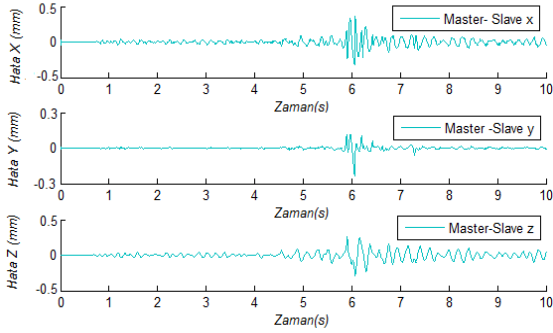
Bu çalışmada kuvvet gerçekleştirme kısmı sanal duvar ile robot arasında yay-damper sistemi tasarlanarak kuvvet geribildirimi gerçekleştirildi. Robotlar ile farklı yörüngelerde teleoperasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'da ana ve Bağımlı robotun zaman gecikmesi modifiye edilmiş varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak konum takibi gösterilmiştir. Şekil 11'de ana ve bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak elde edilen hata grafiği gösterilmiştir.



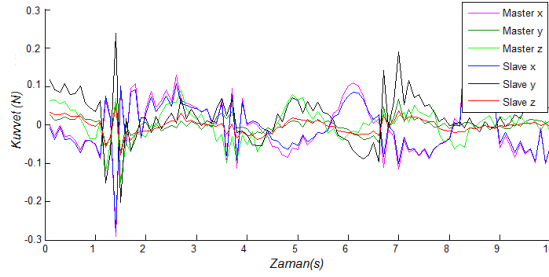
Şekil 10. Ana ve Bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak konum takibi

Şekil 12'de ana ve bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak elde edilen kuvvet grafiği gösterilmiştir. Şekil 13'de ana ve bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye

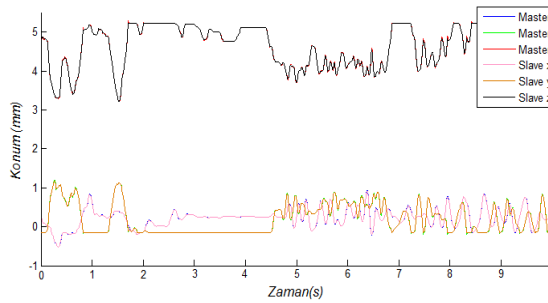
edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak konum takibi grafiği gösterilmiştir.



Şekil 11. Ana ve Bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak hata grafiği



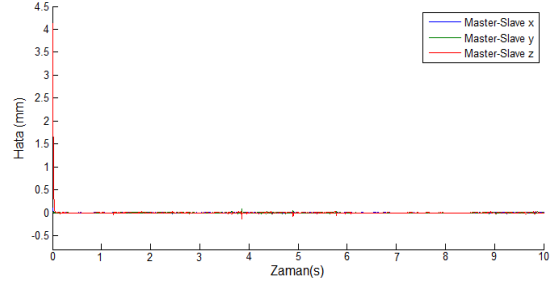
Şekil 12. Ana ve Bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak kuvvet takibi grafiği



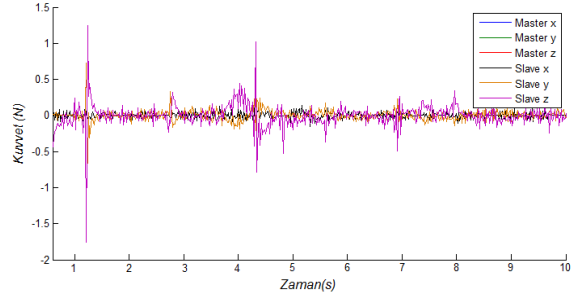
Şekil 13. Ana ve Bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak konum takibi grafiği

Şekil 14'te ana ve bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak elde edilen hata grafiği gösterilmiştir. Şekil 15'de ana ve bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak elde edilen kuvvet grafiği gösterilmiştir. Şekil 12 ve Şekil 15'de verilen kuvvet grafiklerinde bağımlı

robotun etkileşimi sonucu elde edilen kuvvetin master tarafına iletiminde zaman gecikmesinin telafisinin büyük ölçüde giderildiği görülmüştür.



Şekil 14. Ana ve Bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak hata grafiği



Şekil 15. Ana ve Bağımlı robotun zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemi kullanılarak kuvvet takibi grafiği

Şekil 10 ve 13 'de konum grafiklerinde ana robot tarafından verilen konumunu bağımlı robot tarafından takip edildiği görülmüş olup Şekil 11 ve 14 'de elde edilen hata grafikleri konum takibinin başarılı olduğunu göstermektedir. Hata oranının sıfıra yakın seyrettiği grafiklerde görülmüştür.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada iki yönlü teleoperasyon çalışmalarında zaman gecikmesi problemini gidermek amacıyla dalga değişken(wave variables) metodu kullanılmıştır. Bu yöntem klasik dalga değişken yönteminden farklı olarak, sisteme adaptif kazanç parametresi eklenmiş yöntem kullanılmıştır. Ayrıca konum kontrolünde PI denetleyicisine ek olarak hesaplanmış tork kontrol (CTC) yöntemi kullanılmıştır. Phantom Omni haptik robot ile sanal 6-serbestlik dereceli robot arasında iki

yönlü iki kanallı teleoperasyon çalışması yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda gerçek ana robot–sanal robot teleoperasyon ile referans konum ve kuvvet değerleri büyük ölçüde takip ettiği grafiklerde gösterilmiştir. Uygulanan kontrol algoritmalarının sistem üzerinde başarılı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak hedeflenen iki yönlü iki kanallı teleoperasyon çalışmalarında zaman gecikmesi problemi, kullanılan yöntem ile kompanze edilmiş, sanal ortam oluşturulmuş ve teleoperasyon ile iki yönlü hareket kontrolü gerçekleştirilerek sistemin gerçek ortamda ki uygulamaları yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda ise robot parametreleri optimize edilerek ve farklı kontrol yöntemleri ile performans karşılaştırmaları yapılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) 2015, MF.13.15 'nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

6. Kaynaklar

1. <https://www.tubitak.gov.tr/sites/default/files/1003-it-rome-2017-1.pdf>
2. Vertut, J., Coiffent, P.:(1985) Teleoperation and Robotics. Evolution and Development. Kopan Page. London.
3. Desbats P, Geffard F, Piolain G and Coudray A (2006). Force-feedback teleoperation of an industrial robot in a nuclear spent fuel reprocessing plant. *Industrial Robot: An Int Jnl*, Vol 33, No 3, pp 178 - 186 ISSN: 0143-991X.
4. Gang Song and Shuxiang Guo. (2006) Development of a novel tele-rehabilitation system. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 785 - 789, December .
5. Abut, T., & Soygüder, S. (2015) Motion control in virtual reality based teleoperation system. *In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 16- 19 May 23th (pp. 2682-2685). IEEE.*
6. M.C. Cavusoglu,(2000) “Telesurgery and Surgical Simulation: Design Modeling, and Evaluation of Haptic Interfaces to Real and Virtual Surgical Environments,” Ph.D. Dissertation, UC at Berkeley, Berkeley, California.
7. Tayfun Abut, Servet Soygüder, (2017) "Real-time control of bilateral teleoperation system with adaptive computed torque method", *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 44 Issue: 3, pp.299-311, doi: 10.1108/IR-09-2016-0245
8. Kyihwan Park, Byunghoon Bae, Taeoh Koo,(2004) “A haptic device for PC video game application”, *Mechatronics*, Cilt 14, Sayı 2, Mart , 227-235
9. Hokayem, P. F., Spong, M. W., (2006) , Bilateral Teleoperation: An Historical Survey, *Automatica*, 42, pp: 2035-2057.
10. Sheridan, T. B., Ferrell, W. R., (1963), Remote Manipulative Control with Transmission Delay, *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 4, 25-29
11. Anderson, R. J., Spong, M. W., (1988), Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, *IEEE Conference on Decision and Control*, pp: 167-173.
12. Anderson, R. J., Spong, M. W., (1989a), Asymptotic Stability for Force Reflecting Teleoperators with Time Delay, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp: 1618-1625.
13. Anderson, R. J., Spong, M. W., (1989b), Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34, 5, 494-501.
14. Niemeyer, G., Slotine, J. J. E., (1991a), Stable Adaptive Teleoperation, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 16, 1, 152-162.
15. Niemeyer, G., Slotine, J. J. E., (1997a) , Using Wave Variables for System Analysis and Robot Control, *Int. Conf. Robotics and Automation*, Albuquerque, NM, 1619–1625.
16. Niemeyer, G., Slotine, J. J. E., (1991b), Transient Shaping in Force Reflecting Teleoperation, *IEEE International Conference on Advanced Robotics*, pp: 261-266.
17. Lozano, R., Chopra, N., Spong, M., (2002), Passivation of Force Reflecting Bilateral Teleoperators with Time Varying Delay, *Mechatronics 02*, Entschede, The Netherlands, (2002), pp: 24-29.
18. Chopra, N., Spong, S., Hirche, S., Buss, M., (2003), Bilateral Teleoperation Over the Internet: The Time Varying Delay Problem, *The American Control Conference*, pp: 155-160.
19. Unel M., Sabanovic A. (2010) Zamansal Gecikme Telafili İki Yönlü Kontrol Sistemleri (Bilateral Control Systems with Time Delay Compensation) 106M533-TUBİTAK-NSF .
20. Hazewinkel, M. (Ed.) (2001), “Lagrange equations (in mechanics)”, *Encyclopedia of Mathematics*, Springer, ISBN 978-1-55608-010-4.

21. Abut, Tayfun, Servet Soygüder, and Hasan Alli. (2014)"Altı Serbestlik Dereceli Haptik Robotun Performans Analizi." Otomatik Türk Milli Komitesi (TOK) *Ulusal Toplantısı Kocaeli Üniversitesi 11-13 Eylül, Kocaeli*. DOI: 10.13140/RG.2.1.1254.1284
22. Abut, T.,Soyguder, S. ve Alli, H., (2015) Gerçek Zamanlı Altı Serbestlik Dereceli Haptik Bir Robot İle Sanal Robotun Teleoperasyonu , *Uluslararası katımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu / TrC-IFTToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms / UMTS2015 / TrISToMM , 14-17 / 06 / 2015 İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi - Haziran, İZMİR*.
23. Abut T., (2015), Altı Serbestlik Dereceli Haptik Robot ile Teleoperasyon ve Sistem Dinamiği, Yüksek lisan Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
24. D.N.Tuong, M.Seeger, J.Peters (2004)'Computed Torque Control with Nonparametric Regression Models' Proceedings of the 2008 American Control Conference (ACC) .
25. Munir, S., & Book, W. J. (2001), Wave-based teleoperation with prediction Proceedings of the American control conference, 2001 (Vol. 6, pp. 4605–4611) IEEE.
26. Alise, M., Roberts, R. G., Repperger, D. W., Moore, C. A., & Tosunoglu, S. (2009). On extending the wave variable method to multiple-DOF teleoperation systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14(1), 55–63.
27. Munir, S., & Book, W. J. (2002). Internet-based teleoperation using wave variables with prediction. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 7(2), 124–133.
28. Niemeyer, G., & Slotine, J. J. (1997). Designing force reflecting teleoperators with large time delays to appear as virtual tools. *Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation*, 1997 (Vol. 3, pp. 2212–2218). IEEE.
29. Chopra, N., Spong, M. W., Ortega, R., & Barabanov, N. E. (2006). On tracking performance in bilateral teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(4),861–866.
30. N. Chopra, M.W. Spong, S. Hirche, and M. Buss, (2003)"Bilateral Teleoperation over the Internet: the Time Varying Delay Problem," *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 1, pp. 155-160.
31. LOZANO, Regelio; CHOPRA, Nikhil; SPONG, Mark W. (2002)Passivation of force reflecting bilateral teleoperators with time varying delay. In: *Proceedings of the 8. Mechatronics Forum*. p. 954-962.
32. Soyguder, S. and Abut, T. (2016), "Haptic industrial robot control with variable time", *Industrial Robot: AnInternational Journal*, Vol. 43 No. 4, pp. 390-402.
33. Dede, M. I. C., Tosunoglu, S., and Repperger, D.,(2004) "A Study on Multiple Degree-of-Freedom Force Reflecting Teleoperation with Constant and Variable Time Delays," In *ASME Southeastern Region XI Technical Journal*, Volume 4, April .
34. M.I.C. Dede, and S. Tosunoglu, (2006)"Development of a Real-Time Force-Reflecting Teleoperation System Based on Matlab© Simulations," in *Proceedings of the 19th Florida Conference on Recent Advances in Robotics*, Miami, Florida, May 25-26.
35. Dede, M. I. C., and Tosunoglu, S.,(2007) "Control of Teleoperation Systems Experiencing Communication Losses," *International Journal of Advanced Robotic Systems*.