Hesaplanmış Tork Kontrolü Yöntemiyle Haptik Teleoperasyon
Haptic Teleoperation with Computed Torque Control Method

Ammar URGAN, Janset DAŞDEMİR

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
{ammar, janset}@yildiz.edu.tr

Özetçe

Bu çalışma, RRR tipinde bir robot manipülatörünün (Geomagic Touch Phantom Omni^{TM}), istenen referans sinyalini takip etmesini sağlayan kontrolör yapısının tasarımını içermektedir. Tasarlanan kontrol mekanizması, hesaplanmış tork kontrol yöntemi olarak bilinen doğrusal olmayan bir kontrol mekanizmasıdır. Haptik cihazın özelliğinden faydalanılarak sert temas durumunun operatör tarafından hissedilmesi için bir kuvvet kontrolcüsü tasarlanmıştır. Sistem üzerinden harici tork veya harici kuvvet ölçümlerine direkt olarak erişilemediği için kontrolör konum-konum metodu benzeri bir yöntem ile tasarlanmıştır. Çalışma sırasında veriler, veri aktarım ünitesi kullanılmadan, PhanTorque kütüphanesi yardımıyla MATLAB/Simulink^{TM} ortamına gerçek zamanlı olarak aktarılmıştır. Yapılan kararlılık analizleri sonucunda sistem hata dinamiğinin küresel asimptotik kararlı olduğu ve kapalı çevrim sistemi içerisindeki tüm sinyallerin sınırlı olduğu gösterilmiştir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği ve performansı deneysel sonuçlar ile desteklenmiştir.

Abstract

This study involves the design of a controller structure that enables an RRR type robot manipulator (Geomagic Touch Phantom Omni^{TM}) to follow a desired reference signal. The designed control mechanism is a nonlinear control mechanism known as the computed torque control method. A force controller is designed for the operator to feel the hard contact situation by utilizing the feature of the haptic device. Since external torque or external force measurements are not directly accessible through the system, the controller is designed with a method similar to the position-position method. During the study, the data was transferred to MATLAB/Simulink^{TM} environment in real time with the help of PhanTorque library without using a data acquisition unit. As a result of the stability analysis, it is shown that the system error dynamics is globally asymptotically stable and all signals in the closed loop system are bounded. The applicability and performance of the proposed methods are supported by experimental results.

1. Giriş

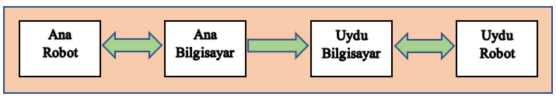
Robot manipülatörler endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan, doğrusal olmayan bileşenler içeren ve dinamikleri zaman içinde değişebilen sistemlerdir [1]. Üç boyutta istenen yörüngelerin takibini gerçekleştirmek endüstriyel robotların ana hedeflerinden biridir. Bu bağlamda, hızlı ve hassas hareket kontrol mekanizmaları tasarlamak için robot dinamik ve kinematik modelleri gereklidir [1, 2]. Bir kinematik model, robot için belirli bir uç-efektör yörüngesiyle ilişkili eklem hareketlerinin hesaplanmasını mümkün kılar. Hedeflenen robot hareketlerini gerçekleştirmek için, eklem aktüatörlerine uygulanması gereken kontrol girdilerinin hesaplanmasında dinamik bir model kullanılır. Doğru modeller özellikle model tabanlı kontrol yapılarının tasarım ve simülasyon çalışmaları için gereklidir [3].

Tam bilinen model ya üretici tarafından sağlanır ya da kullanıcı tarafından uygulanan sistem kestirimi yöntemleri ile elde edilir. Tam bilinen model varsa geri besleme ile doğrusallaştırma metodu uygulanabilir. Hesaplanmış tork kontrol yöntemi robot manipülatör sistemleri için etkili bir kontrol stratejisidir ve doğrusal olmayan sistemler için geliştirilen geri besleme ile doğrusallaştırma yönteminin özel bir uygulaması olarak düşünülebilir. Söz konusu yöntem, manipülatör yapısının tam bilinen dinamik modelini kullanarak robot dinamiğinin doğrusallaştırılmasına ve böylece bilinen doğrusal kontrol stratejileri yardımıyla her bir eklem hareketinin ayrı ayrı kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır [2]. Yapılan çalışmalarda, hesaplanmış tork kontrol yönteminin 2 eksenli [4] ve 4 eksenli [5] robotların yörünge takibi probleminde başarılı olduğu simülasyon çalışmaları ile gösterilmiştir. Bu çalışmada da kullanılan Phantom Omni^{TM} haptik cihazı üzerinde yapılan çalışmalarda hem benzer bir yaklaşım olan ters dinamik kontrolü ile hem de hesaplanmış tork kontrolü ile bu tür kontrol yöntemlerinin başarısı gösterilmiştir [6, 7].

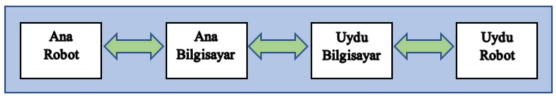
Teleoperasyon sistemleri tehlikeli maddelerin taşınmasında [8], (uzaktan yapılan) cerrahi işlemlerde [9, 10, 11], su altı araçlarında [12], uzay robotlarında [13] ve mobil robotlarda [14] yıllardır kullanılmaktadır. Teleoperasyon sistemleri bilginin akış yönüne bağlı olarak farklı şekilde sınıflandırılabilir. Eğer bilgi ana robottan uydu robota iletiliyor ancak ana robota herhangi bir geri besleme yapılmıyorsa sistem tek yönlü olarak ifade edilebilir (Şekil 1). Eğer ana robot uydu robotun etrafındaki çevresel durumları hissedebiliyorsa bu durumda haberleşme iki yönlüdür (bilateraldir) (Şekil 2). Ana robot ve uydu robot arasındaki iletişim, sistemin davranışını etkileyebilir ve dikkate alınmalıdır [15]. IP haberleşmesinde eğer iletilen bilginin bütünlüğünün korunması gerekiyorsa TCP kullanılmalıdır. Ancak, iletim gecikmeleri sistem performansını olumsuz etkiliyorsa ve müm-

kün olduğunca düşük olması amaçlanıyorsa, UDP kullanılmalıdır [16]. Kuvvet/tork sensörlerinin olmadığı durumlarda genellikle bir pozisyon-pozisyon (PP) kontrol şeması kullanılabilir. Kuvvet/tork sensörlerinin varlığında, bir kuvvet-pozisyon (FP) kontrol şeması kullanılabilir hale gelir. Lawrence, iki taraflı teleoperasyon için uydu robot ve ana robot arasındaki kuvvet ve hız değişimini kullanan 4 kanal (4C) mimarisini önermiştir [17]. FP ve 4C hem kuvvet hem de pozisyon sensörleri kullanmaktadır. Kolay hareket ettirilebilen ana robot ve zor hareket ettirilebilen endüstriyel ölçekli uydu robot teleoperasyonunda PP kararlıdır. Ancak FP ve 4C'nin aksine hem kolay manevra hem de iyi kuvvet yansıması sağlayamaz [18].

Bu çalışmada Hesaplanmış Tork Kontrol yöntemiyle bilateral teleoperasyon işlemi gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan robot manipulatörü tork sensörü içermediği için bilateral teleoperasyon kısmında pozisyon-pozisyon eşlemesi kullanılmıştır. Çalışma sırasında engel ile karşılaşılmadıkça operatörün herhangi bir ağırlık hissetmemesi ve engel ile karşılaşıldığında engelin uyguladığı harici torku hissetmesi hedeflenmiştir.



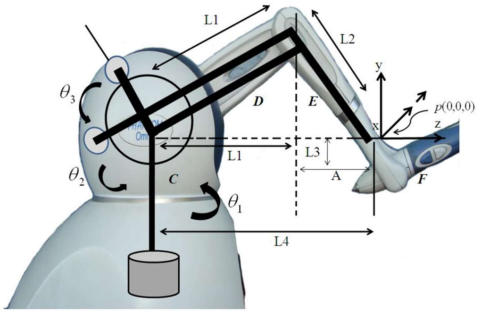
Şekil 1: Tek yönlü teleoperasyon sistemlerinin iletişimi



Şekil 2: Çift yönlü teleoperasyon sistemlerinin iletişimi

2. Robot Manipulatörünün Dinamik Modeli

Haptik cihaza ait eklem çerçeveleri ve model parametreleri Şekil 3'te gösterilmistir.



Şekil 3: Phantom Omni^{TM} haptik cihazının kinematiği [19]

Euler-Lagrange yöntemi ile Phantom Omni^{TM} haptik cihazının dinamik modeli aşağıdaki formda yazılabilir [22].

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta) = \tau \quad (1)$$

burada $M = M^T \in R^{3x3}$ atalet matrisini, $C \in R^{3x3}$ koriyolis ve merkezcil kuvvetler matrisini, $N \in R^{3x1}$ yerçekimi matrisini, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \in R^{3x1}$ eklem pozisyonlarını ve $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T \in R^{3x1}$ eklemlere etki eden torkları ifade etmektedir.

Eşitlik (1)'de verilen dinamik model aşağıdaki özellikleri sağlamaktadır.

Özellik 1 [20] Simetrik, pozitif tanımlı Atalet Matrisi $M(\theta)$

$$\mu_1 \, I \leq M(\theta) \leq \mu_2 \, I \quad (2)$$

şeklinde verilen eşitsizliği sağlar. Burada μ_1 ve μ_2 skalerdir. $\mu_1 \, I \leq M(\theta), (M(\theta) - \mu_1 \, I)$'nın pozitif tanımlı olduğu anlamına gelir.

Özellik 2 [21] Koriyolis/Merkezcil Kuvvetler Matrisi C,

$$C\left(\theta,\dot{\theta}\right)\dot{\zeta} = C\left(\theta,\dot{\zeta}\right)\dot{\theta} \quad \forall\dot{\theta},\dot{\zeta} \in R^n \quad (3)$$

eşitliğinde tanımlanan değişim özelliğine sahiptir

Özellik 3 [20] Eylemsizlik matrisi ve Koriyolis/Merkezcil Kuvvetler Matrisi arasında

$$S = \frac{1}{2}\dot{M}(\theta) - C\left(\theta,\dot{\theta}\right) \quad (4)$$

şeklinde tanımlanan çarpık simetri ilişkisi vardır. Burada $\dot{M}(\theta)$ eylemsizlik matrisinin türevidir.

Özellik 4 [20] Yerçekimi Kuvvetleri matrisi N,

$$N(\theta) \leq \mu_3 \quad (5)$$

eşitsizliği ile sınırlandırılabilir. Burada μ_3 bir skalerdir.

Eşitlik (1)'de verilen dinamik modele ait atalet matrisi

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

olarak ifade edilebilir. Elemanları ise

$$\begin{aligned} m_{1,1} &= k_1 + k_2 cos2\theta_2 + k_3 cos2\theta_3 + k_4 cos\theta_2 sin\theta_3 \\ m_{1,2} &= k_5 sin(\theta_2) \\ m_{1,2} &= k_5 sin(\theta_2) \\ m_{1,3} &= 0 \\ m_{2,1} &= k_5 sin(\theta_2) \\ m_{2,2} &= k_6 \\ m_{2,3} &= -0.5 k_4 sin(\theta_2 - \theta_3) \\ m_{3,1} &= 0 \\ m_{3,2} &= -0.5 k_4 sin(\theta_2 - \theta_3) \\ m_{3,3} &= k_7 \end{aligned}$$

şeklindedir. Koriyolis ve Merkezcil kuvvetler matrisi

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & c_{2,3} \\ c_{3,1} & c_{3,2} & c_{3,3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

gibi yazılabilir. Elemanları ise

$$c_{1,1} = -k_2\dot{\theta}_2 \sin(2\theta_2) - k_3\dot{\theta}_3 \sin(2\theta_3)$$
$$- 0.5k_4\dot{\theta}_2 \sin(\theta_2)\sin(\theta_3) + 0.5k_4\dot{\theta}_3 \cos(\theta_2)\cos(\theta_3)$$
$$c_{1,2} = -k_2\dot{\theta}_1 \sin(2\theta_2) - 0.5k_4\dot{\theta}_1 \sin(\theta_2)\sin(\theta_3)$$
$$+ k_5\dot{\theta}_2 \cos(\theta_2)$$
$$c_{1,3} = -k_3\dot{\theta}_1 \sin(2\theta_3) - 0.5k_4\dot{\theta}_1 \cos(\theta_2)\cos(\theta_3)$$
$$c_{2,1} = k_2\dot{\theta}_1 \sin(2\theta_2) + 0.5k_4\dot{\theta}_1 \sin(\theta_2)\sin(\theta_3)$$
$$c_{2,2} = 0$$
$$c_{2,3} = 0.5k_4\dot{\theta}_3 \cos(\theta_2 - \theta_3)$$
$$c_{3,1} = k_3\dot{\theta}_1 \sin(2\theta_3) + 0.5k_4\dot{\theta}_1 \cos(\theta_2)\cos(\theta_3)$$
$$c_{3,2} = -0.5k_4\dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_3)$$
$$c_{3,3} = 0$$

şeklindedir. Yerçekimi matrisi ise

$$N = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \tag{8}$$

gibi ifade edilebilir. Elemanları ise

$$n_1 = 0$$
$$n_2 = k_8 \cos(\theta_2) + k_{10}(\theta_2 - 0.5\pi)$$
$$n_3 = k_9 \sin(\theta_3)$$

şekilde tanımlanabilir. Denklemlerde kullanılan değişkenlerin değerleri ise aşağıdaki gibidir[22].

$$k_1 = 1.798x10^{-3}$$
$$k_2 = 0.864x10^{-3}$$
$$k_3 = 0.486x10^{-3}$$
$$k_4 = 2.766x10^{-3}$$
$$k_5 = 0.308x10^{-3}$$
$$k_6 = 2.526x10^{-3}$$
$$k_7 = 0.652x10^{-3}$$
$$k_8 = 164.158x10^{-3}$$
$$k_9 = 94.050x10^{-3}$$
$$k_{10} = 117.294x10^{-3}$$

3. Pozisyon Kontrolcüsü Tasarımı

Sistemin dinamik denklemi (9) numaralı eşitlikteki gibi yeniden yazılabilir.

$$\tau = \hat{M}(\theta)\ddot{\theta} + \hat{C}\left(\theta, \dot{\theta}\right)\dot{\theta} + \hat{N}(\theta) \tag{9}$$

Burada $\hat{M},\ \hat{C}\ ve\ \hat{N}$ kestirim matrislerini, $\theta, \dot{\theta},\ \ddot{\theta}$ ise sırasıyla sistem pozisyon, hız ve ivme değerlerini ifade etmektedir. Kontrol sisteminde kullanılmak üzere hata ve hata dinamikleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$e = \theta_d - \theta \tag{10}$$
$$\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \tag{11}$$
$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} \tag{12}$$

Eşitlik (1), $\ddot{\theta}$ değişkenine bağlı olarak yeniden düzenlendiğinde

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(\theta)\left(\tau - C\left(\theta, \dot{\theta}\right)\dot{\theta} - N(\theta)\right) \tag{13}$$

denklemi elde edilir. Buna göre kontrol giriş sinyali, τ, eşitlik (14)'deki gibi tasarlanır.

$$\tau = \hat{M}(\theta)u + \hat{C}\left(\theta, \dot{\theta}\right)\dot{\theta} + \hat{N}(\theta) \tag{14}$$

Eşitlik (14), eşitlik (13)'te yerine yazılırsa

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(\theta)\left(\hat{M}(\theta)u + \hat{C}\left(\theta, \dot{\theta}\right)\dot{\theta} + \hat{N}(\theta)\right)$$
$$-M^{-1}(\theta)\left(C\left(\theta, \dot{\theta}\right)\dot{\theta} + N(\theta)\right) \tag{15}$$

denklemi elde edilir. Kestirim matrislerinin gerçek matrislere eşit olduğu varsayımı yapıldığında (15) numaralı eşitlik, (16) numaralı eşitliğe dönüşür.

$$\ddot{\theta} = u \tag{16}$$

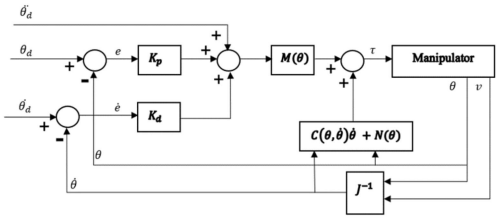
Kontrol sinyali u denklem (17)'deki gibi seçildiğinde

$$u = \ddot{\theta}_d + K_d\dot{e} + K_p e \tag{17}$$

ve denklem (12),(16) ve (17) kullanıldığında hata dinamiği aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + K_d\dot{e} + K_p e = \ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = 0 \tag{18}$$

Doğrusal sistem teorisinden bilindiği üzere $(K_p > 0,\ K_d > 0)$ şartı sağlandığında hata dinamiğinin asimptotik olarak kararlı olduğu, dolayısıyla hata sinyalinin sıfıra yakınsayacağı garanti edilmiş olur. e ve $\dot{e}$'ın sınırlı olması, $\ddot{e}$'ı denklem (18)'e göre sınırlı kılar. Referans yörünge sinyali ve türevleri sınırlı olduğundan, gerçek yörünge ve türevleri de denklem (10), (11) ve (12)'ye göre sınırlıdır. (14) numaralı denkleminin sağ tarafındaki tüm sinyaller sınırlıdır ve bu da kontrol sinyalini sınırlı hale getirir. Kontrol şeması Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4: Pozisyon Kontrolcüsünün Kontrol Şeması

4. Kuvvet Kontrolcüsü Tasarımı

Bilateral teleoperasyon sırasında kullanılmak üzere ana ve uydu robotlar için hata, hatanın türevi ve hatanın ikinci türevi tanımlanmıştır.

$$e_a = \theta_u - \theta_a \tag{19}$$
$$\dot{e}_a = \dot{\theta}_u - \dot{\theta}_a \tag{20}$$
$$\ddot{e}_a = \ddot{\theta}_u - \ddot{\theta}_a \tag{21}$$
$$e_u = \theta_a - \theta_u \tag{22}$$
$$\dot{e}_u = \dot{\theta}_a - \dot{\theta}_u \tag{23}$$
$$\ddot{e}_u = \ddot{\theta}_a - \ddot{\theta}_u \tag{24}$$

Bu denklemlerde alt indis a, ana robotu, alt indis u ise uydu robotu belirtmektedir. Haberleşme sırasında yaşanması muhtemel zaman gecikmelerinin etkisini en aza indirgemek için ana robottan uydu robota pozisyon, hız ve ivme bilgileri gönderilirken uydu robottan ana robota pozisyon hatası, hız hatası ve ivme hatası gönderilmektedir. Uydu robota ait kontrol sinyali indislere bağlı kalarak aşağıdaki şekilde tekrar düzenlenebilir.

$$\tau_u = \hat{M}(\theta_u)(\theta_a + K_d \dot{e_u} + K_p e_u) + \hat{C}\left(\theta_u, \dot{\theta}_u\right)\dot{\theta}_u + \hat{N}(\theta_u) \tag{25}$$

Ana robot için kontrol sinyali tasarlanırken hata sinyaline ilişkin bir eşik değeri belirlenmiştir. Bu değere göre uygulanacak tork sinyali ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\tau_a = \begin{cases} 0, & abs\,|e_a| < \epsilon \\ \hat{M}(\theta_a)(\theta_u + K_d \dot{e_a} + K_p e_a) + & \\ \hat{C}\left(\theta_a, \dot{\theta}_a\right)\dot{\theta}_a + \hat{N}(\theta_a), & abs\,|e_a| \geq \epsilon \end{cases} \tag{26}$$

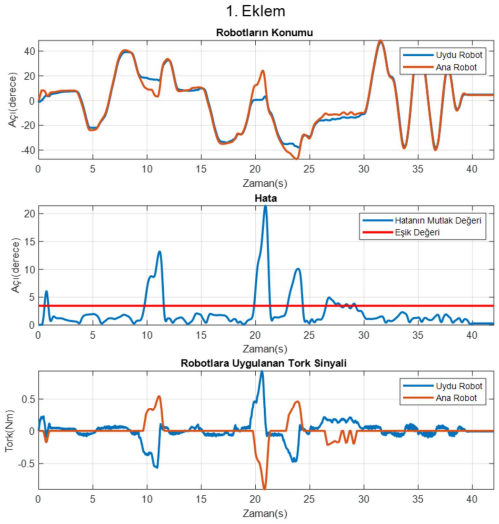
5. Deneysel Sonuçlar

Deney sırasında ana-uydu konfigürasyonu için 2 robot ve 2 bilgisayar kullanılmıştır. Bilgisayarlar arasında UDP haberleşme protokolü kullanılmıştır. Çalışmada iletişim yapısı iki yönlü olarak tasarlanmıştır. Ana robot deney sırasında referans yörüngeyi oluşturmaktan sorumludur ve kendisine uygulanan kuvvet geri bildirimini operatöre hissettirir. Ana bilgisayar, bu referans yörüngeyi iletmekten ve uydu bilgisayardan gelen bilgilere dayanarak ana robota kontrol girişini uygulamaktan sorumludur. Uydu bilgisayar yörüngeyi alır ve gerekli tüm hesaplamaları yaptıktan sonra kontrol girişini uydu robota gönderir. Uydu bilgisayar ayrıca uydu robotun gerekli bilgilerini ana bilgisayara gönderir.

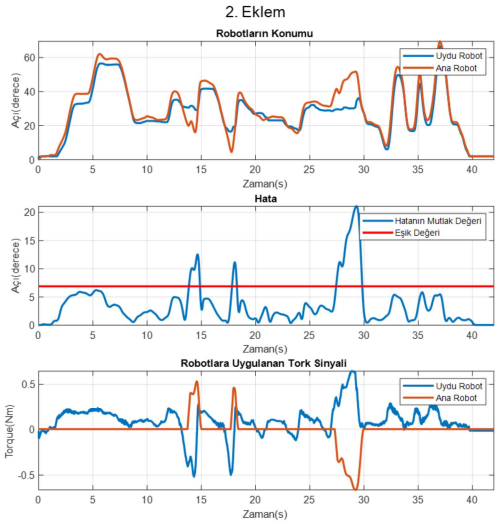
Bilgisayar ve robot çiftleri arasındaki iletişim hızı 1600 Hz olarak seçilmiştir. İletişim MATLAB/Simulink^{TM} platformunda kullanılan PhanTorque kütüphanesi ile sağlanmıştır [23]. Bu platform, manipülatöre tork komutları göndermemize ve eklem açısal pozisyonu, kartezyen pozisyonu ve kartezyen hızı almamıza olanak tanır. Eklem açısal hızı, kartezyen hız ve jacobian matrisi ile hesaplanır. Simulink üzerindeki bu s-fonksiyonu tabanlı platform bir donanım olarak değil simülasyon modeli olarak algılanmaktadır. Simülasyon olarak çalışan sistemlerde iki adım arasında sabit bir süre değil, gerekli hesaplamaların yapılması için gereken süre vardır. Aynı şekilde simülasyonun tamamlanması da simülasyon süresi ile değil hesaplamaların tamamlanması ile ilgilidir. Ancak döngüde donanım (Hardware in loop) sistemlerinde zamanın hem simülasyon hem de donanım için aynı hızda ve eşit adımlarla akması gerekir. Bu sorunu çözmek için Simulink^{TM} üzerindeki Real-Time Desktop uygulaması kullanılmıştır.

Deneysel çalışma önerilen kontrol yönteminin başarısını göstermiştir. Her bir eklem için robotların pozisyonunu (üstte), hata sinyalini ve kırmızı çizgilerle belirlenmiş hata eşiğini (ortada) ve eklemlere uygulanan tork sinyallerini (altta) içeren grafikler sırasıyla şekil 5, 6 ve 7'de yer almaktadır. Eklemler için hata değerlerinin eşik değerinden büyük olma durumuna ayrı ayrı bakılmıştır. Bu nedenle karşılaşılan engeller için üretilen tork sinyalleri tüm eklemleri değil, sadece ilgili eklemi etkilemektedir. Engelle karşılaşma durumunu göstermek amacıyla uydu robotun hareketi fiziksel olarak kısıtlanmıştır.

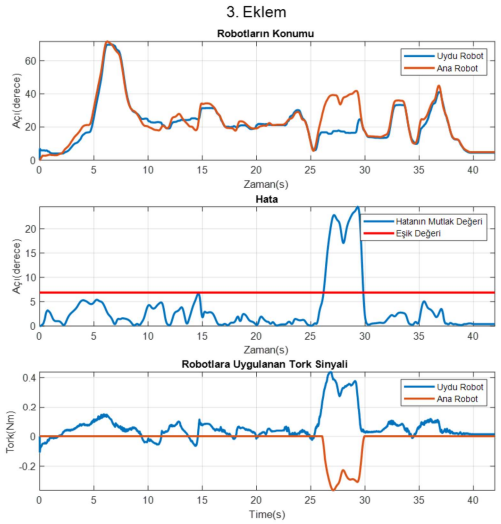
Kuvvet kontrolcüsü tasarımında eşik değerinin seçimi sırasında iki durum arasında dengeli bir seçim yapılması gerekmektedir. Eşik değerinin artırılması daha kolay manevra yapmamızı sağlar ancak engelleri daha geç hissetmemize sebep olur. Eşik değerinin düşürülmesi ise engelleri daha çabuk hissetmemizi sağlar ancak engelle karşılaşılmadığında kolay manevra kabiliyetimizi azaltır. Bu sebeple dengeli bir seçim için konum kontrolcüsünün başarısı dikkate alınmıştır. Tasarlanan konum kontrolcüsü hatayı yaklaşık [2, 6, 6] derece ile sınırlandırabildiği için eşik değeri yaklaşık [3, 7, 7] derece olarak seçilmiştir.



Şekil 5: Birinci eklem için bilateral teleoperasyon sonuçları



Şekil 6: İkinci eklem için bilateral teleoperasyon sonuçları



Şekil 7: Üçüncü eklem için bilateral teleoperasyon sonuçları

Şekil 5'ten de görüleceği üzere uydu robotun birinci eklemi herhangi bir engel olmadığında (yaklaşık 0-9, 12-18, 30-45 saniye aralıklarında) ana robotu takip edebilmektedir. Ancak bir engelle karşılaşıldığında (yaklaşık olarak 9-12, 18-30 saniye aralıklarında) uydu robot ana robotu takip etmekte zorlanmaya başladığından uydu robota uygulanan kontrol girişi artmakta ve ana robota bir kontrol girişi uygulanarak olası bir engelin varlığı hakkında operatore kuvvet geribildirimi verilmektedir. İkinci eklem için engel ile karşılaşılan süreler yaklaşık 14-15, 17-18 ve 27-30 saniye aralıklarına denk gelmektedir (Şekil 6). Üçüncü eklem için ise 25-30 saniyeleri arasında bir engel ile karşılaşılmıştır (Şekil 7). İkinci ve üçüncü eklemde de kontrolcü birinci eklemdekine benzer tepkiler vermiştir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada hesaplanmış tork kontrolü metodu kullanılarak RRR tipindeki robot manipulatörüne yönelik haptik teleoperasyon sistemi tasarlanmıştır. Yapılan kararlılık analizine göre hata dinamiğinin asipmtotik kararlı oldugu ve hata sinyalinin sıfıra yakınsadığı gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde takip görevinin başarıyla gerçekleştiği durumlarda operatöre herhangi bir kuvvet geri bildirimi uygulanmadığı, engelle karşılaşıldığında ise operatöre kuvvet geri bildiriminin uygulandığı görülebilmektedir.

Çalışma sırasında veri toplama kartı kullanılmadığı için doğrudan bilgisayarın işlemcisi üzerinde çalışan bu modelde işlemci kaynaklı gecikmeler yaşanabilmektedir. Ayrıca haberleşme API tabanlı istek ve yanıtlar üzerinden ilerlediği için bu da gecikmelere neden olabilmektedir. Gerçek zamanlı iletişimin daha güvenilir olması için API tabanlı kütüphane yerine parametrelerin kayıt adresleri bulunup kullanılarak seri haberleşme kullanılmalıdır. Ayrıca veri toplama kartı kullanımı veya belirli işlemci çekirdeklerinin bu işlem için atanması da gerçek zamanlı iletişimi daha güvenilir bir seviyeye getirebilir.

Kaynakça

[1] M. Vukobratovic and V. Potkonjak, "Dynamics of manipulation robots Theory and application," *Springer-Verlag*, 1982.

[2] K. S. Fu and R. C. Gonzalez, "C. SG Lee, Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence," *McGraw-Hill*, 1987.

[3] L. Sciavicco and B. Siciliano, "Modelling and control of robot manipulators," *Springer Science & Business Media*, 2001.

[4] A. N. Sharkawy and P. Koustoumpardis, "Dynamics and computed-torque control of a 2-DOF manipulator: Mathematical analysis," *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 28, no. 12, pp. 201-212, 2019.

[5] T. Q. Nguyen, V. T. Phan, D. T. Vo, V. H. Trinh, H. V. Nguyen, M. S. Tran, and D. T. Tran, "Kinematics, dynamics and control design for a 4-DOF robotic manipulator," in *2021 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, 2021, pp. 138-144.

[6] T. Sansanayuth, I. Nilkhamhang, and K. Tungpimolrat, "Teleoperation with inverse dynamics control for Phantom Omni haptic device," in *2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, 2012, pp. 2121-2126.

[7] A. Urgan and J. Daşdemir, "Hesaplanmış Tork Kontrolü Yöntemi ile RRR Tipi Robot Manipülatörünün Yörünge Kontrolü," in *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO 2022)*, Kasım 2022.

[8] W. Wei and Y. Kui, "Teleoperated manipulator for leak detection of sealed radioactive sources," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. Proceedings. ICRA'04, vol. 2, pp. 1682-1687.

[9] J. W. Hills and J. F. Jensen, "Telepresence technology in medicine: Principles and applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 3, pp. 569-580, 1998.

[10] R. Taylor and D. Stoianovici, "Medical robotics in computer-integrated surgery," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 5, pp. 765-781, 2003.

[11] M. Tavakoli, R. V. Patel, and M. Moallem, "Haptic interaction in robot-assisted endoscopic surgery: A sensorized end-effector," *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 1, no. 2, pp. 53-63, 2005.

[12] J. Funda and R. P. Paul, "A symbolic teleoperator interface for time-delayed underwater robot manipulation," in *OCEANS 91 Proceedings*, 1991, pp. 1526-1533.

[13] W. K. Yoon, T. Goshozono, H. Kawabe, M. Kinami, Y. Tsumaki, M. Uchiyama, et al., "Model-based space robot teleoperation of ETS-VII manipulator," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 20, no. 3, pp. 602-612, 2004.

[14] D. Lee, O. Martinez-Palafox, and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation of a wheeled mobile robot over delayed communication network," in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*, pp. 3298-3303.

[15] S. Avila-Becerril, G. Espinosa-Pérez, E. Panteley, and R. Ortega, "Consensus control of flexible-joint robots," *International Journal of Control*, vol. 88, no. 6, pp. 1201-1208, 2015.

[16] E. Nuno Ortega and L. Basañez Villaluenga, "Haptic guidance with force feedback to assist teleoperation systems via high-speed networks," in *37th International Symposium on Robotics (ISR)*, VDI Verlag, 2006.

[17] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 3, pp. 624-637, 1993.

[18] I. Aliaga, A. Rubio, and E. Sanchez, "Experimental quantitative comparison of different control architectures for master-slave teleoperation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 2-11, 2004.

[19] A. J. Silva, O. A. D. Ramirez, V. P. Vega, and J. P. O. Oliver, "Phantom Omni haptic device: Kinematic and manipulability," in *2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*, 2009, pp. 193-198.

[20] F. L. Lewis, D. M. Dawson, and C. T. Abdallah, "Robot manipulator control: Theory and practice," *CRC Press*, 2003.

[21] S. Nicosia and P. Tomei, "Robot control by using only joint position measurements," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 35, no. 9, pp. 1058-1061, 1990.

[22] A. Nygaard, "High-level control system for remote controlled surgical robots," Master of Science Thesis, *Norwegian University of Science and Technology*, 2008.

[23] C. I. Aldana, E. Nuño, L. Basañez, and E. Romero, "Operational space consensus of multiple heterogeneous robots without velocity measurements," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 351, no. 3, pp. 1517-1539, 2014.