

Gürbüz Bir Tutma Kuvveti Denetleyicisi

Eray A. Baran, Asif Sabanovic

Mekatronik Mühendisliği
Sabancı Üniversitesi, İstanbul
eraybaran@su.sabanciuniv.edu
asif@sabanciuniv.edu

Özetçe

Bu çalışmada iki yönlü eyleyiciler kullanılarak tutma işlemini gerçekleştirecek bir yapının modellenmesi ve denetim benzetimleri yapılmıştır. Tutulacak objeye ait parametrelerinin önceden bilindiği varsayımından yola çıkılmıştır. Objeye uygulanacak kuvvet referansının ve hareket esnasındaki pozisyon referansının takibi esas alınarak yapılan modellemeye göre kuvvet ve pozisyonu beraber denetleyen denetleyici tasarlanmıştır.

Abstract

This paper includes modeling and simulation of a new grasping control structure using bilateral actuators. A priori knowledge of parameters for the object is assumed to be existing. The controller is designed by considering accurate tracking of the force and position according to the proposed model.

1. Giriş

Gelişen teknolojiyle birlikte, ameliyat robotları ve buna paralel olarak da kuvvet denetimine ve dokunsal geri beslemeye duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Gerek ameliyat robotlarının gerekse farklı amaçlara hitap eden (humanoidler gibi) köle robotların dokunmaya dayalı işleri gerçekleştirebilmeleri için öncelikle en basit kavrama eylemi olan tutma işlemini gerçekleştirebiliyor olmaları gerekir. Tutma (grasping) işlemi iki veya daha fazla sayıda eyleyicinin bir objeye belirli bir kuvveti uygulayıp söz konusu cisim hareket ettirebilmesini içerir. Bir referans değerindeki kuvvetin sürekli bir şekilde cisme etki etmesi cismin hareket esnasında düşmemesi için önemlidir. Bu bağlamda bazı araştırmacılar tutma kuvvetini denetleyebilmek için kısmi kayma sensörleri kullanmışlardır [1]. Bir takım araştırmacılar ise ticari kullanımda olan kuvvet sensörlerini kullanarak parmak benzeri yapılarıdaki tutma kuvvetini denetlemişlerdir [2]. Tutma kuvvetinin denetimi dokunma geri beslemesiyle birleştirilerek tedavi ya da egzersiz amaçlı olarak da kullanılabilir [3], [4]. Bunlardan başka, çok yönlü denetleyici sistemler kullanılarak iki yönlü tutma denetimi de bazı araştırmacıların üzerinde çalışmış olduğu bir durumdur [5]. Bir başka örnek olarak çok parmaklı yapıların gürbüz kuvvet ve pozisyon kontrolüyle uyarlanır tutma denetimi yapılabilir [6]. Bu çalışmada bir çift robotun beraber ve iki yönlü (bilateral) çalışmasıyla bir tutma işlemini gerçekleştirmesi analiz edilmiştir. Tutulacak objenin yay sabiti ve akıcı sürtünme katsayısının önceden bilindiği varsayılmaktadır. Fikrinsel olarak kuvvet ve pozisyon denetimi için her iki robot için de

ortak olan ivme bilgisinin kullanımından faydalanılmıştır. Makale şu şekilde düzenlenmiştir; sistem modellenmesi ile kuvvet ve pozisyonun beraber denetimi Bölüm-2'de ele alınmıştır. Bölüm-3'te analizi yapılan sistemin benzetim sonuçlarını sunulmuştur. Bölüm 4'te tartışmalar ve sonuçlar ifade edilmiş ve son olarak Bölüm-5'te de teşekkürler sunulmaktadır.

2. Problem Formülasyonu

Takip eden bölümlerdeki analizler, tutma eyleminin birbiriyle özdeş ve zıt yönlü yerleştirilmiş doğrusal motorlar tarafından gerçekleştirildiğini varsaymaktadır. Söz konusu motorlar bir boyutlu hareket serbestisine sahiptir.

2.1 Sistem Modellemesi

2.1.1. Bozucu Etki Gözlemleyicisi ile Gürbüz İvme Kontrolü

Bozucu Etki Gözlemleyicisi (Disturbance Observer) bir hareket kontrol sistemine etki eden bozucu etkenleri gürbüz bir şekilde devre dışı bırakan bir denetleme yapısıdır [7]. Bu yapı temel olarak hareket kontrol sisteminin akım ve hız değerlerini kullanarak bozucu kuvvetin kestirimine ve sisteme geri beslemesine dayanır. Motor dinamiği aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\ddot{\theta} = K_t I_a^{ref} - \tau_{dis} \quad (1)$$

Burada J , K_t , I_a^{ref} , τ_{dis} ve $\ddot{\theta}$ döner/doğrusal bir motor için sırasıyla eylemsizlik momenti/kütlesi, motor moment/kuvvet sabiti, armatür akımı, bozucu moment/kuvvet ve açısal/doğrusal ivme olarak tanımlanır. Bozucu moment en genel haliyle; motor moment sabitinin nominal değerinden sapma miktarının $(K_t - K_{tn})$, eylemsizlik momentinin nominal değerinden sapma miktarlarının $(J_n - J)$, etkileşim momentlerinin (τ_{int}) , tepki momentinin (τ_{ext}) , akıcı sürtünmenin $(D\dot{\theta})$ ve Coulomb Sürtünmesi'nin (F) bir toplamı olarak kabul edilebilir.

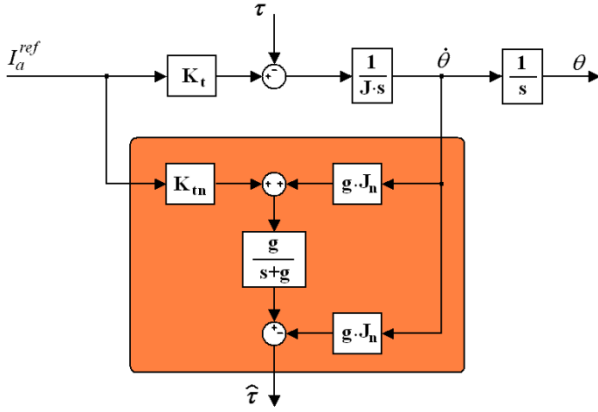
$$\tau_{dis} = (K_t - K_{tn}) + (J_n - J) + \tau_{int} + \tau_{ext} + D\dot{\theta} + F \quad (2)$$

Bozucu moment kestirimi bir alçak geçiren süzgeç vasıtasıyla yapılabilir:

$$\hat{\tau}_{dis} = (K_t I_a^{ref} - J\ddot{\theta}) \left(\frac{g}{s+g} \right) \quad (3)$$

$$\hat{\tau}_{dis} = \left\{ (K_t I_a^{ref} - J\ddot{\theta}) \left(\frac{g}{s+g} \right) - J\ddot{\theta} g \right\}$$

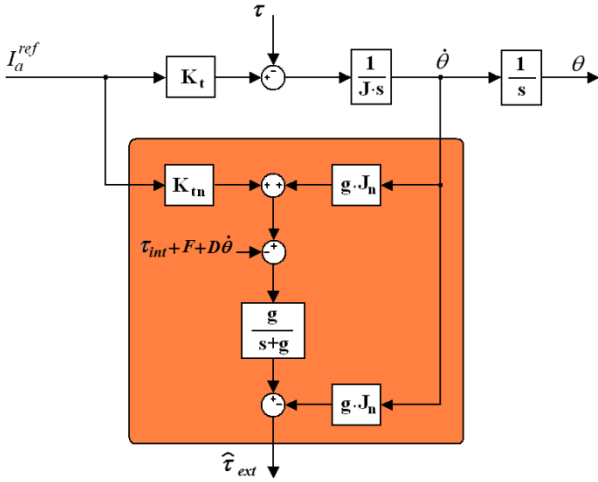
Bozucu Etki Gözlemleyicisi'nin yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Bozucu Etki Gözlemleyicisi.

2.1.2. Tepki Kuvveti Gözlemleyicisiyle Kuvvet Ölçümü

Bir önceki bölümde (2) numaralı denklemle kestirimi yapılan momentin sisteme geri beslenmesiyle motorun gürbüz hale gelmesi sağlanmıştı. Söz konusu kestirim motora dışarıdan etki eden momentlerle (τ_{ext}) beraber motorun iç dinamiğinden kaynaklı momentleri de içerir. Motora ait (yer çekimi, akıcı sürtünme vb. gibi) iç dinamiklerden kaynaklı momentlerin bilinmesi durumunda bu momentler Bozucu Etki Gözlemleyicisinden çıkarılabilir. Bu çıkarma işleminin ardından Bozucu Etki Gözlemleyicisi'nin çıktısı olarak verdiği değer sisteme dışarıdan etki eden kuvvetlerin toplamı olacaktır. Böyle bir yöntem kullanılarak gerçek sistemlerde gürültü problemi yaşatan ve yüksek maliyetli kuvvet sensörlerini kullanmadan kuvvet kestirimi yapmak mümkün olmaktadır [8]. Tepki Kuvveti Gözlemleyicisi'nin modeli Şekil 2'de gösterilmiştir.

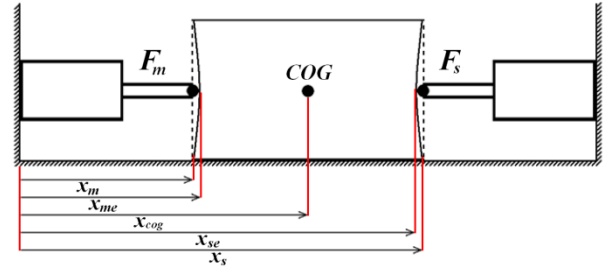


Şekil 2: Tepki Kuvveti Gözlemleyicisi.

2.1.3. Tutucu Kuvvet Denetiminin Modellenmesi

Takip eden analizde, önceden de bahsedildiği şekilde özdeş iki doğrusal motor tarafından tutulup hareket ettirilen bir objenin kuvvet ve pozisyonunun ivme bilgisi kullanılarak beraber

modellenmesi yapılmaktadır. Sistemin görselleme amaçlı bir çizimi Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3: Tutucu Sistem Çizimi.

Bu şekilde verilen bir sistemde en genel haliyle motorlardan birisi efendi (master), ötekisi ise köle (slave) motor olarak düşünülebilir. Buna ilaveten tek serbestlik dereceli motorların tek serbestlik dereceli birer robot gibi davrandığını varsayarsak tutma problemine robotlardaki iki yönlü kontrol problemi şeklinde yaklaşıp çözüm bulunabilir. Burada F_m ve F_s sırasıyla efendi ve köle robotların tutulan objeye uyguladıkları kuvvetlerdir. Benzeri birçok çalışmadan farklı olarak bu çalışmada kuvvet referansının herhangi bir direk ölçüme dayanması gerekmemektedir. Bu durum, kuvvet sensörü kullanılmıyorsa Tepki Kuvveti Gözlemleyicisi [8] kullanımı sayesinde mümkün kılınabilir. Öte yandan, sistemdeki x_m ve x_s kontak sağlanmış objenin deforme olmamış halindeki efendi ve köle robot pozisyonlarını; x_{me} ve x_{se} obje sıkıştırıldığı zamanki efendi ve köle robot pozisyonlarını ve x_{COG} ise objenin ağırlık merkezinin pozisyonunu temsil etmektedir. Tutma işlemi esnasında sıkıştırılan kısmın eylemsizliği çok küçük olduğu için hesaplamalarda dışarıda bırakılabilir. Devam eden analiz boyunca efendi ve köle robotların tutulacak objeyle temaslarının önceden sağlanmış olduğu ve tutulacak objenin yay sabiti ve akıcı sürtünme katsayısının önceden bilindiği varsayılmıştır. Tutulacak objeyle ilk temasın nasıl yapıldığı bu çalışmanın içeriğinin dışında ayrı bir araştırma konusudur. Bütün bu yaklaşımlardan sonra, efendi ve köle robotların objeye uyguladıkları kuvvetler aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\begin{aligned} F_m &= K_e(x_m - x_{me}) + D_e(\dot{x}_m - \dot{x}_{me}) \\ F_s &= -K_e(x_s - x_{se}) - D_e(\dot{x}_s - \dot{x}_{se}) \end{aligned} \quad (4)$$

Objeye üzerindeki toplam tutma kuvveti (F_{grasp}) efendi ve köle robotların uyguladıkları kuvvetlerin toplamı olacaktır:

$$F_{grasp} = F_m + F_s$$

$$F_{grasp} = K_e(x_m - x_{me}) + D_e(\dot{x}_m - \dot{x}_{me}) - K_e(x_s - x_{se}) - D_e(\dot{x}_s - \dot{x}_{se}) \quad (5)$$

Bir koordinat dönüşümü yaparak yukarıdaki denklemi, objenin efendi robot tarafındaki deformasyonu ve köle robot tarafındaki deformasyonu şeklinde yazabiliriz:

$$\begin{aligned} q_m &= x_m - x_{me} \\ q_s &= x_s - x_{se} \end{aligned} \quad (6)$$

$$F_{grasp} = K_e(q_m - q_s) + D_e(\dot{q}_m - \dot{q}_s) \quad (7)$$

Buradan hareketle tutma kuvvetindeki hata (ε_{grasp}) tutma kuvveti ile tutma kuvveti referansı (F_{grasp}^{ref}) arasındaki fark şeklinde tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{grasp} &= F_{grasp} - F_{grasp}^{ref} \\ \varepsilon_{grasp} &= K_e(q_m - q_s) + D_e(\dot{q}_m - \dot{q}_s) - F_{grasp}^{ref} \end{aligned} \quad (8)$$

Öte yandan, verilen sistemde kuvvet ile birlikte pozisyon denetimi yapılması da öngörüldüğü için denetlenecek bir hedef pozisyon belirlenmelidir. Tutulacak objenin ağırlık merkezi (q_{cog}) denetlenecek pozisyon olarak belirlenip pozisyon hatası (ε_{cog}), mevcut pozisyon ile pozisyon referansı (q_{cog}^{ref}) arasındaki fark olarak tanımlanabilir:

$$q_{cog} = (q_m + q_s)/2 \quad (9)$$

$$\varepsilon_{cog} = q_{cog} - q_{cog}^{ref} \quad (10)$$

2.2 Kuvvet ve Pozisyonun Beraber Denetimi

Tanımlanan sistem için denetleyici tasarlarken öncelikli amaç kuvvetin ve pozisyonun beraber denetlenebilirliğidir. Bu bağlamda Bozucu Etki Gözlemleyicisi'ne sahip motorların ivme referansı verilerek denetlenmesi kilit rol oynayacaktır. Çünkü ivme ile kuvvet birbirlerine bir oran dahilinde (kütle ya da eylemsizlik momenti) bağlı iken aynı zamanda ivmenin iki kere tümlevi pozisyonu vermektedir. Takip eden bölümdeki analiz bu temel etrafında yapılmıştır. Bu amaçla sistemdeki pozisyon ve kuvvet hataları ivme değişkenine bağlı olacak şekilde tanımlanmaktadır. Bir önceki kısımda pozisyon hatası birinci dereceden verilmiş olduğundan değiştirilip ikinci dereceden olacak şekilde tanımlanabilir. Son durumda pozisyon ve kuvvet hataları sırasıyla:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cog} &= C(q_{cog} - q_{cog}^{ref}) + (\dot{q}_{cog} - \dot{q}_{cog}^{ref}) \\ \varepsilon_{grasp} &= K_e(q_m - q_s) + D_e(\dot{q}_m - \dot{q}_s) - F_{grasp}^{ref} \end{aligned} \quad (11)$$

Şeklinde verilebilir. Burada C herhangi bir sabittir. Yukarıda verilen (11) numaralı denklem yeniden düzenlenerek efendi ve köle robot pozisyonlarını içeren bir hata vektörü olarak değiştirilebilir:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \varepsilon_{cog} \\ \varepsilon_{grasp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \left\{ \frac{(q_m + q_s) - q_{cog}^{ref}}{2} + \left\{ \frac{(\dot{q}_m + \dot{q}_s) - \dot{q}_{cog}^{ref}}{2} \right\} \right. \\ \left. K_e(q_m - q_s) + D_e(\dot{q}_m - \dot{q}_s) - F_{grasp}^{ref} \right\} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Verilen bu hata vektörünün birinci dereceden dinamiği yazılarak hataların istenen değerlere çekilmesi mümkün kılınabilir:

$$\dot{\sigma} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{cog} \\ \dot{\varepsilon}_{grasp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \left\{ \frac{(\dot{q}_m + \dot{q}_s) - \dot{q}_{cog}^{ref}}{2} + \left\{ \frac{(\ddot{q}_m + \ddot{q}_s) - \ddot{q}_{cog}^{ref}}{2} \right\} \right. \\ \left. K_e(\dot{q}_m - \dot{q}_s) + D_e(\ddot{q}_m - \ddot{q}_s) - \dot{F}_{grasp}^{ref} \right\} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Hata dinamiği aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir:

$$\dot{\sigma} = \begin{bmatrix} C \left\{ \frac{(\dot{q}_m + \dot{q}_s) - \dot{q}_{cog}^{ref}}{2} - \dot{q}_{cog}^{ref} \right\} - \dot{q}_{cog}^{ref} \\ K_e(\dot{q}_m - \dot{q}_s) - \dot{F}_{grasp}^{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ D_e & -D_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_m \\ \dot{q}_s \end{bmatrix} \quad (14)$$

Yukarıda verilen (14) numaralı denklemin sağ tarafındaki kısmı denetleyici girdileri cinsinden yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_{cog} \\ \dot{q}_{grasp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ D_e & -D_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_m \\ \dot{q}_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

(15) numaralı denklemde verilen efendi ve köle robotlarının ivmelerini çarpan matrisin determinantı sıfırdan farklı olduğundan tanımlanan dönüşüm tersi alınabilen bir dönüşümdür. Sistem üzerinde aşağıdaki şekilde eşdeğer (equivalent) ivmeler tanımlanabilir:

$$\ddot{q}_{eq}^{cog} = \ddot{q}_{cog}^{ref} - C \left\{ \frac{(\dot{q}_m + \dot{q}_s) - \dot{q}_{cog}^{ref}}{2} - \dot{q}_{cog}^{ref} \right\} \quad (16-a)$$

$$\ddot{q}_{eq}^{grasp} = \dot{F}_{grasp}^{ref} - K_e(\dot{q}_m - \dot{q}_s) \quad (16-b)$$

Bu tanımlamaların ardından pozisyon ve kuvvet için birinci dereceden hata denklemi aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\dot{\varepsilon}_{cog} = \ddot{q}_{cog}^{des} - \ddot{q}_{eq}^{cog} + p_{cog} \quad (17-a)$$

$$\dot{\varepsilon}_{grasp} = \ddot{q}_{grasp}^{des} - \ddot{q}_{eq}^{grasp} + p_{grasp} \quad (17-b)$$

Burada p_{cog} ve p_{grasp} Bozucu Etki Gözetleyicisi'nin bozucu etmeni kestirimindeki pozisyon ve kuvvet hatalarını temsil etmektedir. Verilen sistemin asimptotik kararlılığa sahip olması için aşağıdaki şekilde bir hata dinamiğini barındırması gerekmektedir:

$$\dot{\varepsilon}_{cog} = -k_{cog} \varepsilon_{cog} \quad (18-a)$$

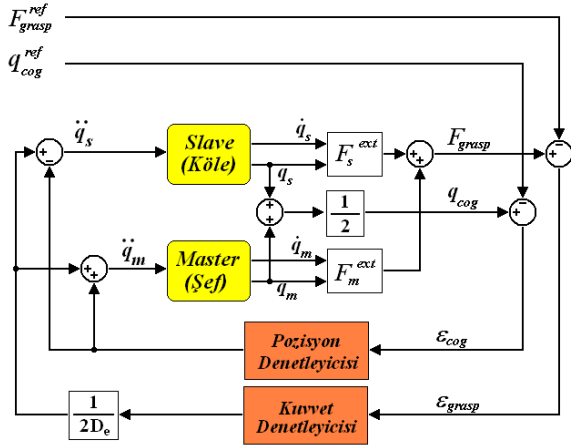
$$\dot{\varepsilon}_{grasp} = -k_{grasp} \varepsilon_{grasp} \quad (18-b)$$

Bu bağlamda (17) numaralı denklemler tekrardan düzenlenerek sistemin denetleyici denklemleri elde edilir [9]:

$$\ddot{q}_{cog}^{des} = \ddot{q}_{eq}^{cog} - p_{cog} - k_{cog} \varepsilon_{cog} \quad (19-a)$$

$$\ddot{q}_{grasp}^{des} = \ddot{q}_{eq}^{grasp} - p_{grasp} - k_{grasp} \varepsilon_{grasp} \quad (19-b)$$

Denetleme sisteminin çizimi Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4: Denetleme Sistemi Çizimi

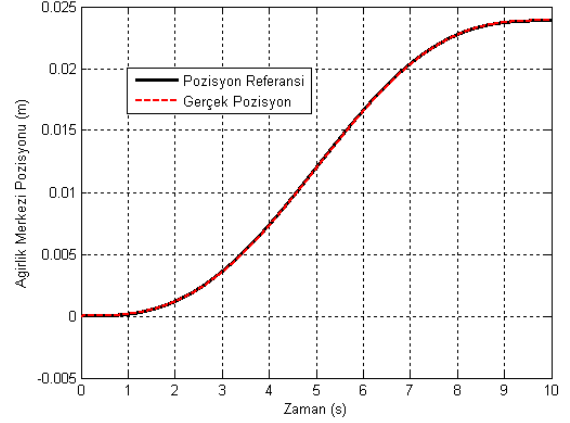
3. Benzetim Sonuçları

Söz konusu sistem MATLAB Simulink ortamında kurulup benzetimleri yapılmıştır. Benzetimler esnasında her iki robota da düşük genlikli rasgele bozucu gürültü eklenmiştir. Benzetimlerde kullanılan parametreler Tablo 1’de sunulmuştur.

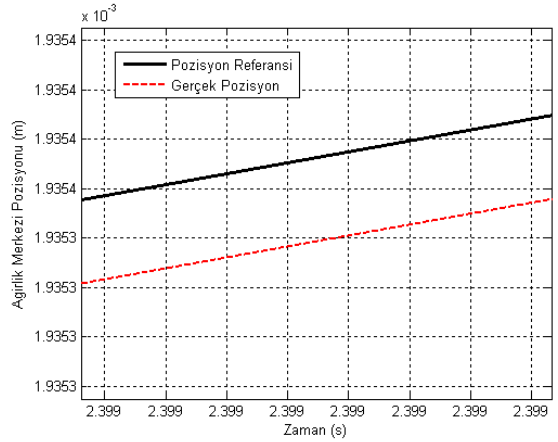
Parametre	Tanımı	Değeri
K_t	Motor kuvvet sabiti	4.3 N/A
m	Doğrusal şaft ve hareketli parçaların kütleleri toplamı	0.3 kg
b	Akıcı sürtünme katsayısı	0.1 Ns/m
g	Bozucu Etki Gözlemleyicisi’nin filtreleme frekansı	500
K_e	Tutulan objenin esneklik katsayısı	10000 N/m
D_e	Tutulan objenin akıcı sürtünme katsayısı	100 Ns/m
C	Sistem dinamiğindeki pozisyon hatasının hız hatasına oranı	10
k_1	Orantısal pozisyon denetleyicisi katsayısı	50
k_2	Orantısal kuvvet denetleyicisi katsayısı	50

Tablo 1: Benzetim parametreleri

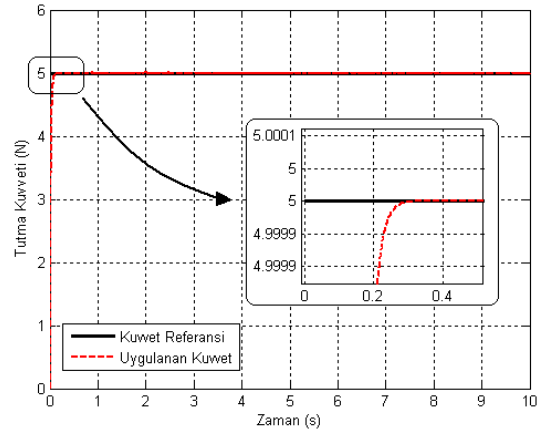
İlk olarak sistemin kuvvet referansı olarak 5N büyüklüğünde bir basamak fonksiyonu kullanılmış ve bu kuvveti sağlayarak istenen pozisyon referansını takip edip edemediğine bakılmıştır. Pozisyon ve kuvvet takiplerini içeren benzetim sonuçları sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 7’te verilmiştir. Şekil 6 kendisinden önce verilen grafiğin yakınlaştırılmış halini göstermektedir.



Şekil 5: Ağırlık Merkezinin Referans Pozisyonunu Takibi (Kuvvet Referansı: Basamak Fonksiyonu)

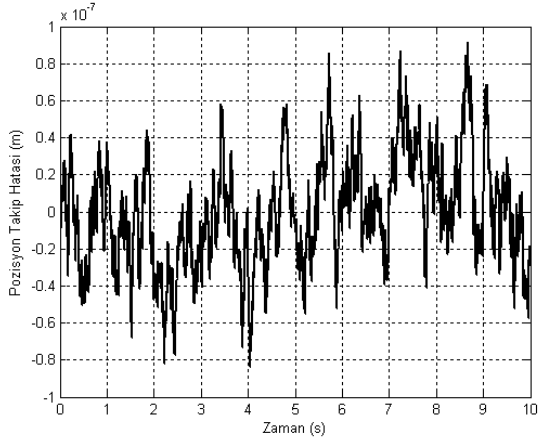


Şekil 6: Referans Pozisyon Takibi (Yakınlaştırılmış) (Kuvvet Referansı: Basamak Fonksiyonu)

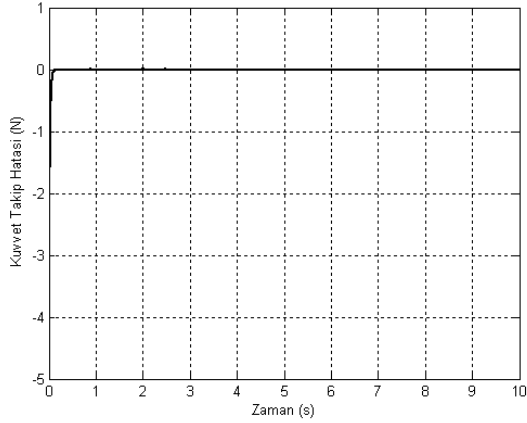


Şekil 7: Obje Üzerindeki Referans Kuvvetin Takibi (Kuvvet Referansı: Basamak Fonksiyonu)

Şekil 8 ve Şekil 9’de sırasıyla pozisyon ve kuvvet takip hatalarının grafikleri verilmiştir.

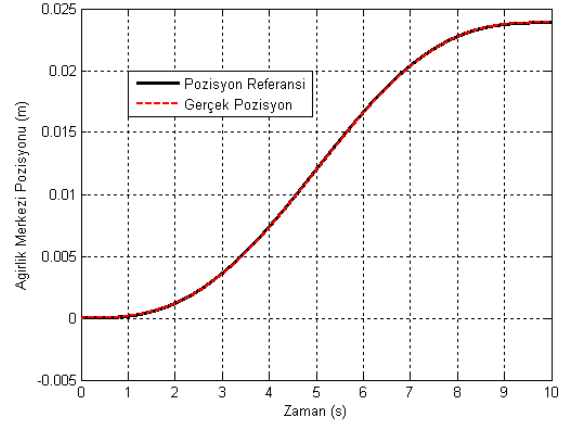


Şekil 8: Pozisyon Takip Hatası
(Kuvvet Referansı: Basamak Fonksiyonu)

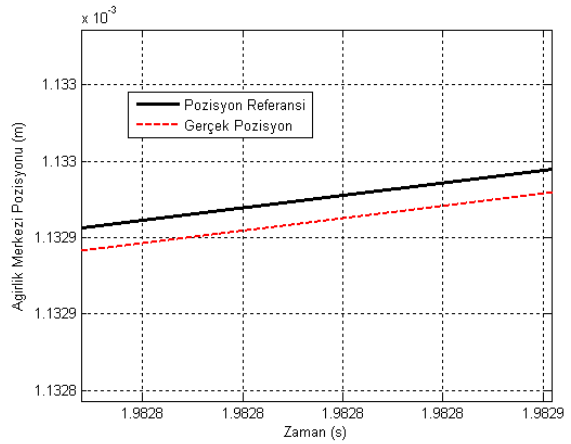


Şekil 9: Kuvvet Takip Hatası
(Kuvvet Referansı: Basamak Fonksiyonu)

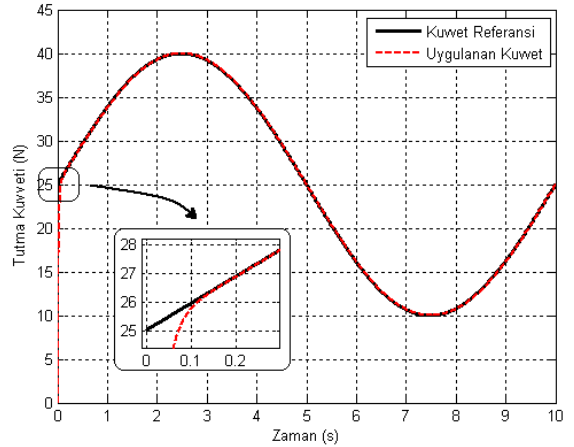
Bunlardan ayrıca kuvvet referansı olarak 15N ile 25N arasında 5N genliğinde sinüs fonksiyonu kullanılıp benzetimler yapılmıştır. Burada amaç sistemin değişken kuvvet referanslarıyla birlikte istenilen pozisyon referansını takip edip edemediğini görmektir. Söz konusu benzetimler için pozisyon ve kuvvet takiplerini içeren sonuçlar sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 12’de verilmiştir. Şekil 11 kendisinden önce verilen grafiğin yakınlaştırılmış halini göstermektedir.



Şekil 10: Ağırlık Merkezinin Referans Pozisyonunu Takibi
(Kuvvet Referansı: Sinüs Fonksiyonu)

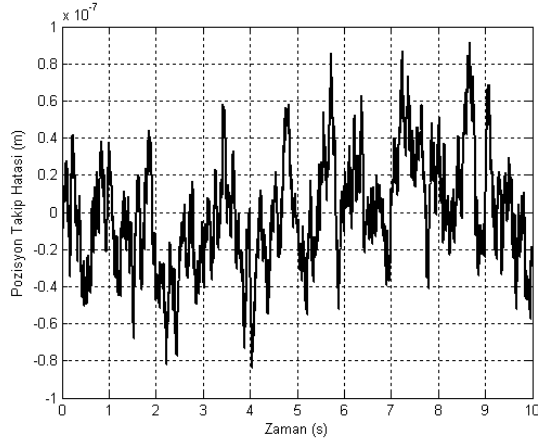


Şekil 11: Referans Pozisyon Takibi (Yakınlaştırılmış)
(Kuvvet Referansı: Sinüs Fonksiyonu)

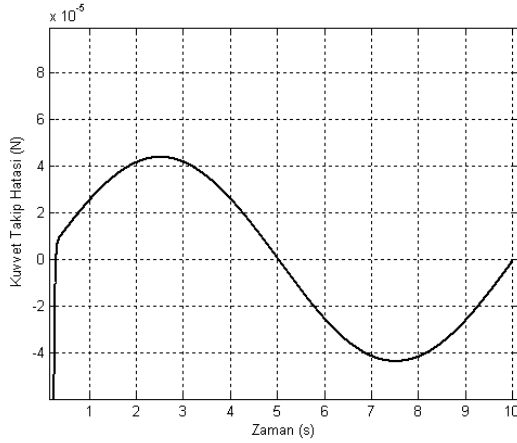


Şekil 12: Objeye Üzerindeki Referans Kuvvetin Takibi
(Kuvvet Referansı: Sinüs Fonksiyonu)

Şekil 13 ve Şekil 14’te sırasıyla pozisyon ve kuvvet takip hatalarının grafikleri verilmiştir.



Şekil 13: Pozisyon Takip Hatası
(Kuvvet Referansı: Sinüs Fonksiyonu)



Şekil 14: Kuvvet Takip Hatası
(Kuvvet Referansı: Sinüs Fonksiyonu)

4. Tartışma ve Sonuçlar

Şekil 6 ve Şekil 7'deki yakınlaştırılmış grafiklerden anlaşılacağı üzere denetleyici yapı sabit bir kuvvet referansını ilk 0.2 saniyeden sonra neredeyse sıfır hata ile takip edebiliyor. Bu, tutulan bir objenin bir kuvvet uygulandıktan sonra çok çeşitli manevralar altında bile düşmeden kalabileceğini göstermektedir. Şekil 8 ve Şekil 9'deki hata grafikleri incelendiğinde, pozisyon hatasının rasgele gürültüye eşit olduğu gözükmemektedir. Bu gürültü önceden belirtilmiş olan, robotlara kullanıcı tarafından kasten eklenen gürültüden kaynaklanmaktadır. Bu gürültüye rağmen gözlenen mikron seviyesinde bir hata, tutma denetleyicisinin pozisyon hassasiyetinin çok ileri düzeyde olduğunu göstermektedir. Şekil 10 ve Şekil 12'de verilen grafiklerde ise sistemin değişken kuvvet referansını bile gayet iyi bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Söz konusu denetleyicinin son bir avantajı da tepki momenti gözlemleyicisi kullanımına uygun olması ve pratik kullanımda kuvvet sensörü gerektirmemesidir.

Sonuç olarak bu çalışma, özdeş iki eyleyici içeren bir obje tutma yapısının analizini ve pozisyon ve kuvvet denetimini beraber yapacak denetleyici tasarımını içermektedir. Teorik açıdan gelecek çalışmalar denetleyici için kullanılan ivme boyutunda denetim fikrinin çoklu efenđi ve köleler içerecek şekilde genişletilmesi şeklinde düşünülmüştür.

5. Destek

Bu çalışma kısmen SanTez 00183.STZ.2007-2 numaralı projeden, Tübitak 108M520 numaralı projeden ve Tübitak Bideb tarafından desteklenmiştir.

6. Referanslar

- [1] Y. Koda, T. Maeno, "Grasping Force Control in Master Slave System with Partial Slip Sensor", *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 9-15, 2006, Beijing, China.
- [2] E. Ottawiano, M. Toti, M. Ceccarelli, "Grasp Force Control in Two Finger Grippers with Pneumatic Actuation", *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, San Francisco, CA April 2000
- [3] L. Jiang, M. R. Cutkosky, J. Ruutinen, R. Raisamo, "Using Haptic Feedback to Improve Grasp Force Control in Multiple Sclerosis Patients", *IEEE Transactions on Robotics*, vol 25, no. 3, June 2009
- [4] S. Katsura, K. Ohnishi, "A Realization of Haptic Training System by Multilateral Control" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol 53, no. 6, December 2006.
- [5] R. Kubo, T. Shimono, K. Ohnishi, "Flexible Controller Design of Bilateral Grasping System Based on a Multilateral Control Scheme" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol 56, no:1, January 2009.
- [6] T. Takahashi, T. Tsuboi, T. Kishida, Y. Kawanami, S. Shimizu, M. Iribe, T. Fukushima, M. Fujita, "Adaptive Grasping by Multi Fingered Hand with Tactile Sensor Based on Robust Force and Position Control" *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Pasadena, CA, USA, May 19-23 2008
- [7] K. Ohnishi, M. Shibata, T. Murakami, "Motion Control for Advanced Mechatronics", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol 1, no. 1, pp 56-67, March 1996
- [8] T. Murakami, F. Yu, K. Ohnishi, "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol 40, no. 2, pp 259-265, April 1993.
- [9] A. Sabanovic, K. Ohnishi, "Fundamentals of Motion Control Systems (Yet Not Published)", pp 191-202.