

ESNEK SİSTEMLERİN ARTIK TİTREŞİMLERİNİN AZALTILMASINA YÖNELİK YENİ BİR GÜRBÜZ YÖNTEM

Ali KILIÇ*, Sadettin KAPUCU*

(*) Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 27310,
Şehitkâmil/Gaziantep

akilic@gantep.edu.tr, kapucu@gantep.edu.tr

ÖZET

Artık titreşimlerin yok edilmesi veya azaltılması için kullanılan yöntemlerden bir tanesi girdi sinyalinin önceden bilinen sistem parametreleri kullanılarak düzenlenmesidir. Ancak artık titreşimi tamamen yok etmek için bu parametrelerin tam olarak bilinmesi gereklidir. Gerçekte ise bu mümkün olmamaktadır. Bu çalışmada, hatalı belirlenen ya da tahmin edilen sistem parametrelerine rağmen esnek sistemlerin artık titreşimlerinin yok edilmesi veya oldukça azaltılmasının bir yönteminden bahsedilmektedir. Sistemin erişmesi istenilen konum öncelikle iki eşit kısma bölünmekte, birinci ve ikinci kısımlarda artık titreşim sıfırlanacak biçimde seçilen girdi sinyali düzenlenmektedir. Böylelikle artık titreşimlerin azaltılmasında daha gürbüz bir yöntem elde edilmektedir. Önerilen yöntemin esnek bir mekanik sistem üzerinde benzetim sonuçları ve deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Artık Titreşim Sönümleme, Düzenlenmiş Girdi sinyali, Esnek Mekanik Sistem

A NEW ROBUST METHOD FOR REDUCING RESIDUAL VIBRATIONS IN FLEXIBLE SYSTEMS

ABSTRACT

One of the methods used to reduce or eliminate residual vibrations is modifying input signal using the system parameters are known beforehand. However, in order to eliminate residual vibration completely, these parameters must be known exactly. In reality, it is not possible. In this study, a new method mentioned about in spite of the wrong estimated or predicted system parameters the elimination or reducing fairly of residual vibrations in flexible systems. Desired position of the system is primarily divided into two equal parts, in the first and second parts; the selected input signal is modified to remove vibration. In this way, more robust method of reducing vibrations is achieved. The proposed method has been applied in a flexible mechanical system and in this paper simulation results and experimental results are presented.

Keywords: Residual Vibration, Input Shaping, Flexible Mechanical System

1. GİRİŞ

Hareket kontrolü, günümüzde kontrol ile uğraşanların başlıca çalışma konularından birisi haline gelmiştir. Modern üretim endüstrisinde yüksek hızlı ve hassas hareket kontrolü yüksek ve kaliteli üretim için gerekmektedir. Ancak yüksek hız gereksinimi artık titreşim nedeniyle hareketin hassas kontrolünü zorlaştırır. Dolayısıyla, hareketin hızı ile artık titreşimin yok edilmesi ya da azaltılması arasında dengenin bulunması hareket kontrolünün önemli bir uğraşı alanıdır. Genellikle artık titreşimi yok etmek ya da azaltmak için geleneksel olarak yapının kalınlaştırılması ve kapalı devre kontrol yöntemleri kullanılarak sağlanmak istenmektedir. Ancak bu kontrol yöntemleri anlık olarak sistem durumunun bilinmesini sağlayacak hassas geri besleme duyargaları ve pahalı kontrol ekipmanları ile yüksek hızlı bilgisayarlar gerektirmektedir. Sistem kontrolü karmaşıklaşmakta ve pahalı bir sisteme dönüşmektedir. Buna karşılık alternatif yöntem ise, açık döngü kontrol yöntemleri kullanarak, önceden biçimlendirilmiş girdi (planlanmış hareket) ile istenilen hedefe artık titreşimsiz erişmektir. Bu yöntem, sistemi pahalı ve karmaşık bir hale getirmediğinden, araştırmacılar için oldukça çekici bir yöntem haline gelmektedir..

Önceden hareket profilinin biçimlendirilmesi, sistem modeline göre eyleyici girdi sinyalinin artık titreşimi yok etmek üzere değiştirilmesini içermektedir. Bu yöntemle ilgili ilk çalışmalardan biri Smith [1] tarafından verilmiştir. Bahsedilen yöntemde girdi adım komutu iki adım komutu olarak düzenlenmekte biri diğerinden belirli bir süre daha sonra sisteme uygulanarak öncekinin yarattığı artık titreşimin yok edilmesi prensibine dayanmaktadır. Daha sonra hareket profili biçimlendirme yöntemleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Cuciou ve arkadaşları [2] eşit zaman aralıkları olan adım ivme hareket profili önerisinde bulunmuşlar ve bu önerilerini iki farklı mekanik sistem üzerinde denemişlerdir. Mimmi ve Pennachi [3] iki tip ivme hareket profili önermiştir. Bunlardan birisi farklı zaman aralıklarını içeren sabit ivme profili diğeri ise trapezoid ivme profilidir. Alici ve diğerleri [4] sikloid, sabit hız ve sikloid den oluşan ivme profili önermişlerdir. İvmelerdeki ani değişimler

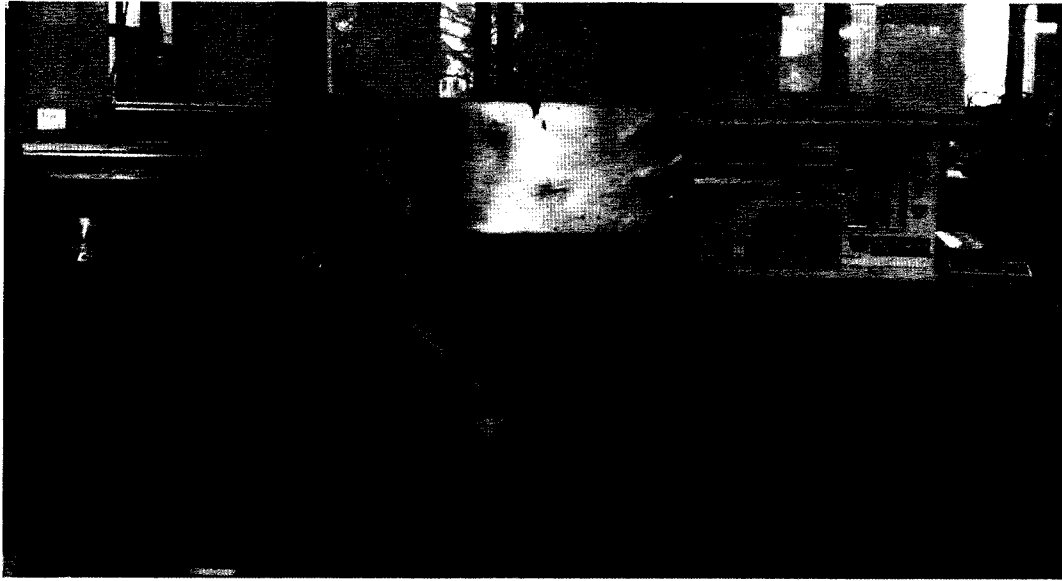
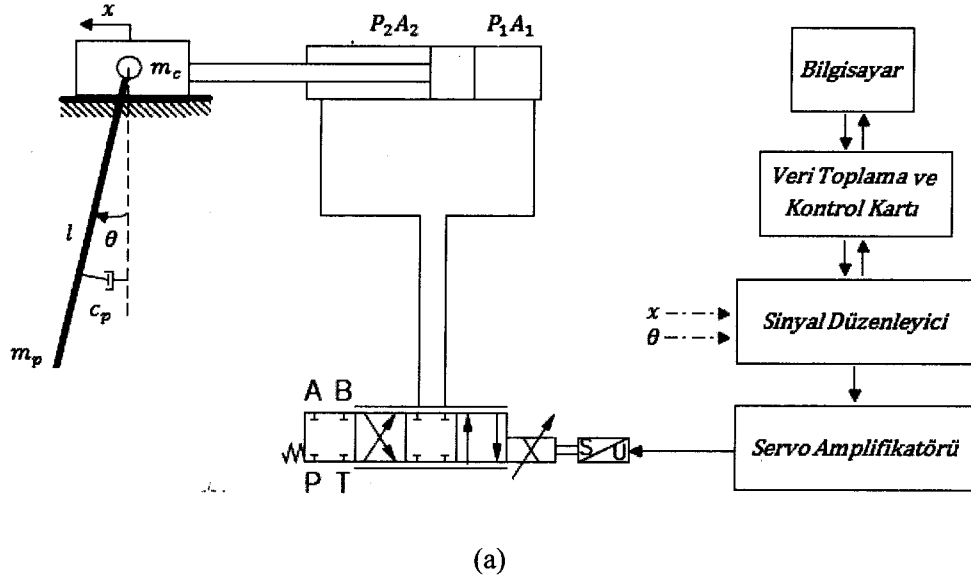
nedeniyle bu önceden biçimlendirilmiş eyleyici profilleri titreşimi tetiklemektedir. Önerilen yöntemlerden bazıları ise matematiksel fonksiyonların (özellikle kam profillerinde kullanılan) ve bunların birleşimlerinin kullanılmasını sinüs serisi [5], versin fonksiyonu [6], polinomlar [7] gibi metotlar içermektedir.

Diğer yöntem ise Singer ve Seering [8] tarafından önerilen, çok popüler olan girdi komutunun ani darbelerle evriştirilmesi yöntemidir. Önerilen yöntemler, sistem model parametrelerinin tam olarak bilinmesini gerektirdiğinden gürbüz bir yöntem değildirler birbirlerine göre avantajlı ve dezavantajları vardır. Singer ve Seering tarafından önerilen girdi komutunun ani darbelerle evriştirilmesi yönteminin (girdi evriştirilmesi yöntemi) gürbüzlüğü ani darbe sayısının artırılması ile artırılabilir. Ancak bu durumda da hareket süresi artmaktadır. Hareket süresi daha iyi ve gürbüz olan bir yöntem Singer ve Seering yöntemiyle karşılaştırmalı olarak Kapucu [9] tarafından önerilmiştir.

Bu çalışmada, hatalı belirlenen ya da tahmin edilen sistem parametrelerine rağmen esnek sistemlerin artık titreşimlerinin yok edilmesi veya oldukça azaltılmasının bir yönteminden bahsedilecektir. Sistemin erişmesi istenilen konum öncelikle sezgisel olarak iki eşit kısma bölünmekte, birinci ve ikinci kısımlarda artık titreşim sıfırlanacak biçimde seçilen girdi sinyali düzenlenmektedir. Girdi sinyalinin düzenlenmesinde sikloid rampalı versin ve rampa fonksiyonu kullanılmaktadır [9, 10]. Böylelikle artık titreşimlerin azaltılmasında daha gürbüz bir yöntem elde edilmektedir. Önerilen yöntemin esnek bir mekanik sistem üzerinde benzetim sonuçları ve deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur.

2. DENEY DÜZENEGİ VE MODELİ

Önerilen yöntemin test edileceği deney düzeneği Şekil 1 de verilmiştir. Deney düzeneği hidrolik olarak tahrik edilen Stanford tipi manipülatörün yatay konuma sabitlenmiş, kayar uzvuna bağlanmış bir birleşik sarkaçtan oluşmaktadır. Sarkaç dikey düzlemde serbestçe salınım yapabilecek şekilde döner mafsallı ile kayar uzva bağlanmıştır. Deney düzeneğinin



Şekil 1. a) Deneysel Düzeneğin Şematik Gösterimi.

b) Deneysel Düzeneğin Resmi

Matematiksel modeli Lagrange mekaniği kullanılarak oluşturulmuştur.

$$m_c + m_p x + m_p l \theta \cos \theta + c_c x + m_p l \theta^2 \sin \theta = P_1 A_1 - P_2 A_2 \quad (1)$$

$$m_p l \cos \theta x + m_p l \theta + c_c \theta + m_p l g \sin \theta = 0 \quad (2)$$

Burada; m_p sarkacın kütlesi, m_c kayar uzvun kütlesi, c_c hidrolik silindirin sönümleme katsayısı, c_p sarkacın sönümleme katsayısı, A_1 piston alanı, A_2 piston kolu tarafının alanı, P_1 piston alanına etki eden basıncı, P_2 piston kolu tarafının alanına etki eden basıncı göstermektedir. P_1 ve P_2 basınçlarının hesaplanmasında Bayseç, S. ve Jones, J. R. [11] tarafından önerilen ikinci dereceden denklemler kullanılmıştır.

Hareket denklemlerinden anlaşılacağı üzere sadece kayar uzuv elektrohidrolik servo valf ile tahrik edilmekte ve kapalı devre pozisyon kontrolü yapılmakta, sarkaç ise dikey ekseninde serbestçe salınabilmektedir. Hidrolik silindir ve servo valfin frekanslarının sistemin diğer kısımlarından daha fazla olduğu kabul edilmektedir. Hidrolik silindirin hareket profilinin önceden düzenlenmesi ile sarkacın istenilen konuma geldikten sonra salınımın yok edilmesi ya da belirgin bir biçimde azaltılması istenilmektedir.

3. REFERANS GİRDİ FONKSİYONU

Bu çalışmada referans komut fonksiyonu olarak zaman kısıtlaması getirmeyen sikloid rampalı versin ve rampa fonksiyonu kullanılacaktır. Belirlenmiş hareket süresince, hareketin başlangıcından bu sürenin sonuna yapılan toplam mesafe, bu girdiyi oluşturan üç fonksiyonun ayrı ayrı, aynı sürede yaptıkları mesafelerin toplamına eşittir. Burada kullanılan referans girdisi, belirlenmiş seyahat süresini ve toplam mesafeyi değiştirmeden, her üç fonksiyonun genliğini ve yer değişimini ayarlayarak, salınan sistemin titreşimi azaltmakta veya yok etmektedir. Böylece önceden belirlenmiş hareket süresi sonunda, istenilen konumda, titreşimsiz kalması sağlanmaktadır. Sikloid-Rampa, Versine-Rampa ve Rampa fonksiyonun hareket profili şu şekilde ifade edilmektedir [9, 10]:

$$Y = \frac{L_1 R t}{2\pi} + \frac{L_2}{2\pi} R t - \sin R t + \frac{L_3 R t}{2\pi} + \frac{L_3}{2\pi} [1 - \cos R t] \quad (3)$$

Burada L_1 rampa hareket profilinin yüksekliği, L_2 sikloid hareket profilinin genliği, L_3 rampalı versin hareket profilinin genliğini t hareket zamanı, τ seyahat zamanını, $R=2\pi/\tau$ ve $L=L_1+L_2+L_3$ göstermektedir. Seyahat zamanı olarak tanımlanan τ önceden tanımlanan bir noktadan bir noktaya gidiş süresini ifade etmektedir. Esnek/elastik bir sistemin hareketini tamamladıktan sonra üzerinde kalıcı titreşim olmaması için yukarıda verilen Sikloid-Rampa, Versin-

Rampa ve Rampa fonksiyonun genlikleri aşağıda belirtilen denklemler ile sağlanmaktadır.

$$L_1 = \frac{LR(R-2\xi\omega_n)}{\omega_n^2} = \frac{L\tau_n(\tau_n-2\xi\tau)}{\tau^2} \quad (4)$$

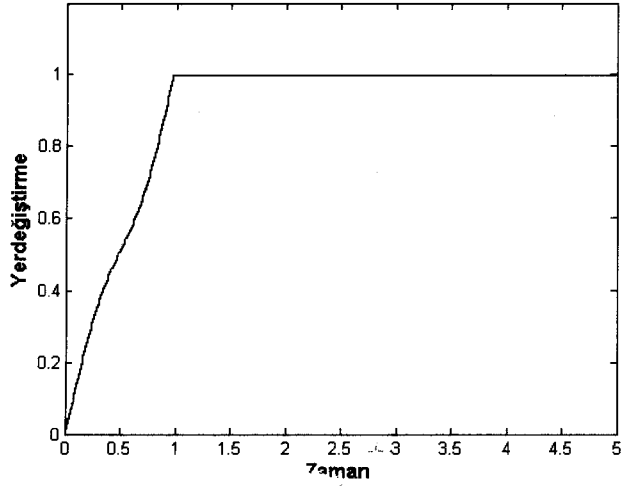
$$L_2 = L \left(1 - \frac{R^2}{\omega_n^2}\right) = L \left(1 - \frac{\tau_n^2}{\tau^2}\right) \quad (5)$$

$$L_3 = \frac{L2\xi R}{\omega_n} = \frac{L2\xi\tau_n}{\tau} \quad (6)$$

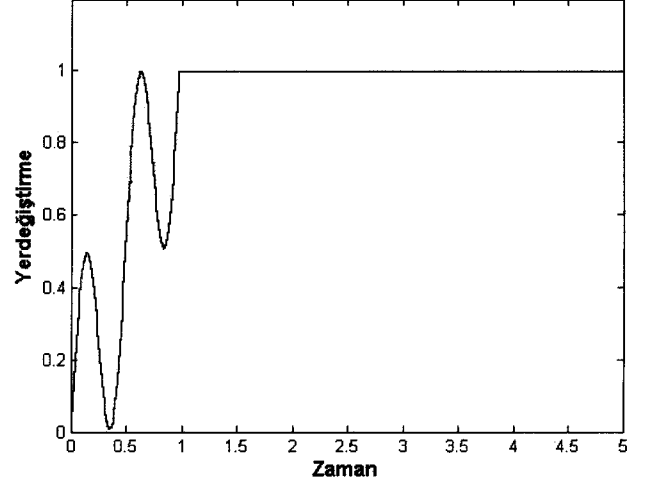
Burada ω_n elastik/esnek sistemin doğal frekansı, ξ sönümlenme oranı, τ_n doğal frekans periyodunu göstermektedir. Verilen seyahat zamanına (τ), göre L_1 , L_2 ve L_3 değişimleri seyahat süresi sonunda titreşimsiz/salınımsız bir yer değiştirme sağlar.

4. ÖNERİLEN GİRDİ FONKSİYONU

Önceki bölümdeki denklemlerden de anlaşılacağı üzere referans girdi fonksiyonunun teorik olarak seyahat süresinin belirlenmesinde her hangi bir kısıtlama yoktur. Bu yöntemin diğerlerine göre olan bu avantajı kullanılarak sezgisel olarak yeni ve gürbüz bir yöntem önerilmiştir. Nihai yer değiştirme (hedef yer değiştirmesi) ve seyahat süresi belirlenmiş bir hareket iki bölüme ayrılmakta ve her bölüm için yukarıdaki tanımlanan referans girdi sinyali düzenlenmektedir. Birinci bölüm hareketi tamamlandığında sistemde titreşim yok edilmekte ya da azaltılmakta ikinci bölüme uygun şartlarla girmesi sağlanmaktadır. Sistem parametrelerinden doğal frekansı ve sönümlenme oranı belirli bir hata ile bile elde edilse ya da tahmin de bulunursa da hareket süresi sonunda hareket tamamlandıktan sonra artık titreşim yok edilmekte ya da azaltılmaktadır. Şekil 2 de rastgele seçilen herhangi bir referans girdi fonksiyonunun denklem 3, 4, 5, 6 ile düzenlenmiş hali Şekil 2.a da ve bunun önerilen yöntem ile yeniden oluşturulduğu hali Şekil 2.b de gösterilmektedir. Toplam seyahat süresi ve nihai yer değiştirme mesafesi ikiye bölünmüş ve her bölüm için denklem 3, 4, 5, 6 uygulanarak Şekil 2.b elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2. a) Referans Girdi Fonksiyonu

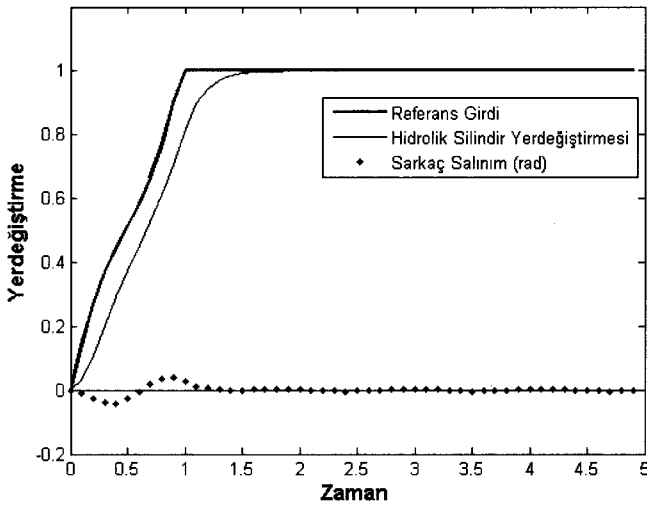
b) Önerilen Girdi Fonksiyonu

5. BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMA

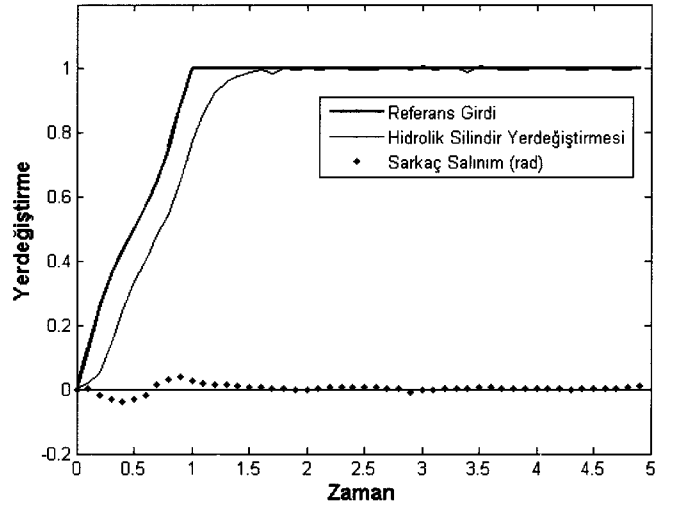
Robot kolu ucuna takılı sarkaç şeklindeki parçaların ya da köprülü vinçlerin yüklerinin taşınması sırasında oluşan salınımların yok edilmesi önem arz etmektedir. Bu durumu analiz etmek üzere “deney düzeneği ve modeli” bölümde bahsedilen sistem oluşturulmuştur. Referans girdi fonksiyonu ve önerilen yöntem bu düzenek üzerinde denenmiştir. Robotun kayar uzvunun üzerine döner mafsallı ile 0.485 mm uzunluğunda ve 12

mm çapında bir çelik çubuk bağlanmıştır.

Deneysel olarak sarkacın doğal frekansı yaklaşık olarak $\omega_n=5,5045$ radyan/saniye, mafsaldaki sönümlleme oranı da $\xi=0.08$ olarak bulunmuştur. Rastgele seçilen hareket zamanı $\tau=0,9703$ saniye ve $L=9$ cm için referans girdi fonksiyonu ve önerilen yöntemin fonksiyonu sistem modeline ve deney düzeneğine uygulanmış olup sonuçlar Şekil 3 ve Şekil 4 de sırasıyla verilmiştir.

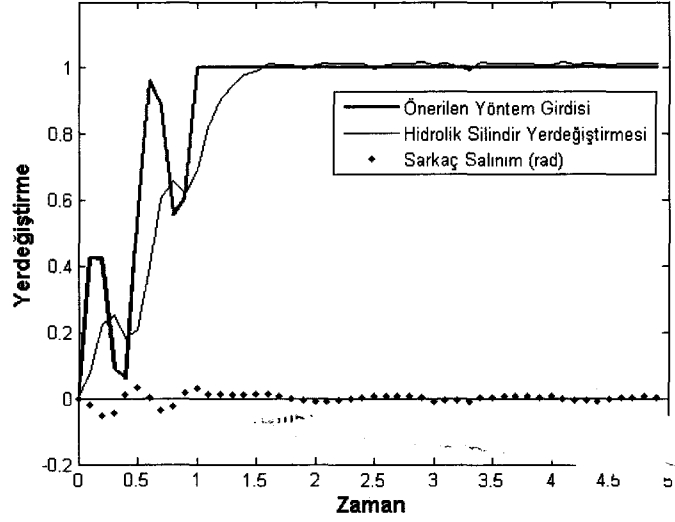
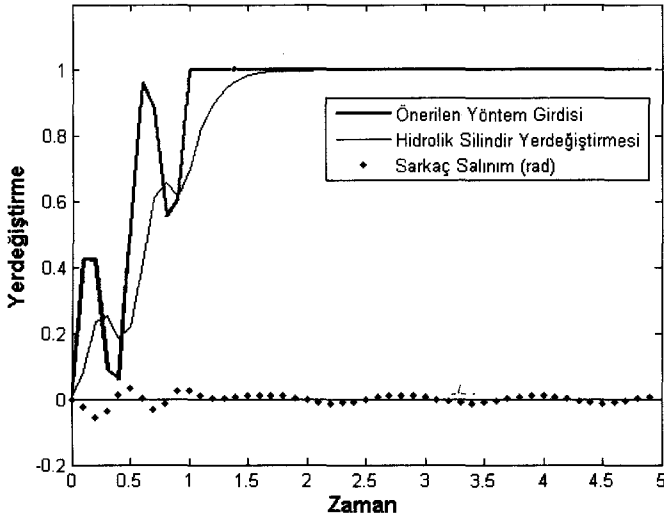


(a)



(b)

Şekil 3. Referans Girdiye Karşılık Hidrolik Silindirin Hareketi ve Sarkacın Salınımı



a) Benzetim Sonuçları, b) Deneysel Sonuçlar

(a)

(b)

Şekil 4. Önerilen Yöntem Girdisine Karşılık Hidrolik Silindirin Hareketi ve Sarkacın Salınımı

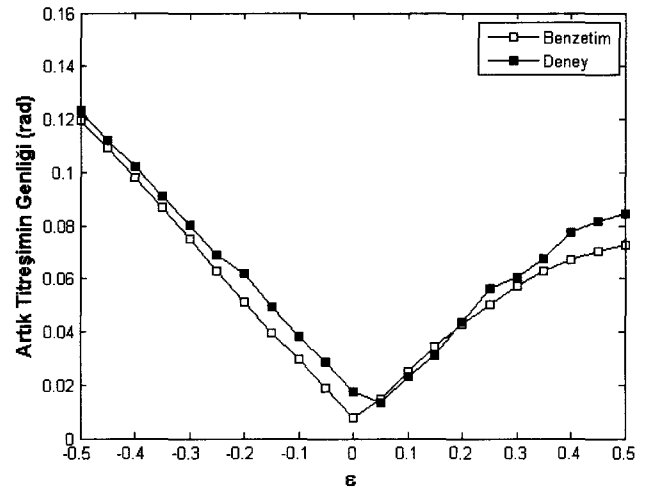
a) Benzetim Sonuçları, b) Deneysel Sonuçlar

Şekil 3 de referans girdisi ve hidrolik silindirin yerdeğiştirmesi normalize edilmiş, sarkaç salımı ise radyan birimi cinsinden verilmiştir. Benzetim ile deney sonuçlarının da örtüştüğü görülmektedir. Beklenildiği gibi sarkaç salınımı oldukça azaltılmıştır.

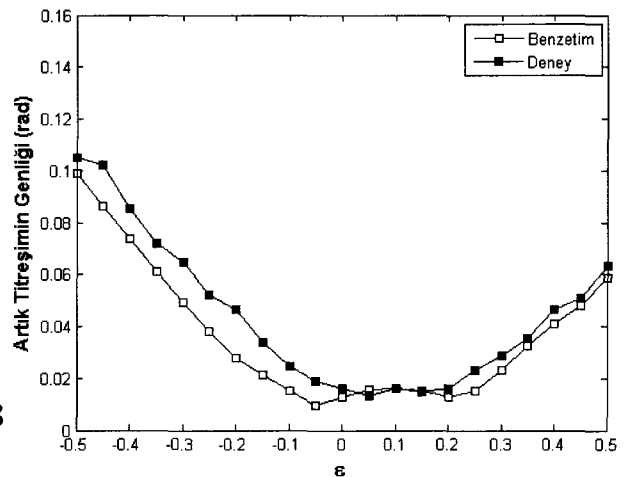
Şekil 4 de Önerilen yöntem girdisi ve hidrolik silindirin yerdeğiştirmesi normalize edilmiş, sarkaç salımı ise radyan birimi cinsinden verilmiştir. Benzetim ile deney sonuçlarının da örtüştüğü görülmektedir. Önerilen yöntemdeki sarkaç salınımları ile referans girdi sarkaç salınımları arasında büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Önerilen yöntemin model parametrelerinden doğal frekans değişimine karşı gürbüzlüğü hakkında fikir sahibi olmak içinse bir hata fonksiyonu tanımlanmıştır[7].

$$\varepsilon \omega_n = \frac{\omega_n}{\omega_n^*} - 1 \quad (7)$$

Burada ω_n^* tahmin edilen sistemin doğal frekansını göstermektedir. Sistemin sönümlenme oranının ihmal edilebilecek kadar küçük olması nedeniyle sadece doğal frekans değişimine karşı gürbüzlüğü incelenecektir.



-0.5 ile 0,5 arasında hatalı tahmin edilen doğal



frekansa karşılık sarkacın genliği $\tau=0,9703$ saniye seyahat süresi için referans girdi ve önerilen girdi gürbüzlük eğrileri Şekil 5 ve Şekil 6 da verilmiştir.

Şekil 5 Referans Girdi İçin Gürbüzlük Grafiği
Şekil 6. Önerilen Girdi İçin Gürbüzlük Grafiği

Şekil 5 de görüldüğü üzere sistem doğal frekansındaki değişiklikler artık titreşimin genliğinin artmasına sebep olmaktadır. Şekil 6 ise doğal frekansın civarında bir vadi olduğu görülmekte, bununla doğal frekans etrafında hatalı tahminde bile bulunulsa artık titreşimin oldukça çok miktarda azaltılabildiği açıkça görülmektedir. Önerilen girdi fonksiyonun gürbüzlüğü referans gidisinden çok daha iyidir. Önerilen girdi düzenleme yönteminin diğer yöntemlerden [10] (bu yayında bahsedilen) de daha iyi olduğu benzetim ile görülmüştür. Bu konuda ki deneysel çalışmalar devam etmektedir. Özellikle önerilen yöntemin sönümleme katsayısındaki değişikliklere göre de gürbüzlüğüne araştırılması gereklidir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, robot kolu ucuna takılı sarkaç şeklindeki parçaların ya da köprülü vinçlerin yüklerinin taşınması sırasında ya da benzeri sistemlerde oluşan salınımların yok edilmesine ya da azaltılmasına yönelik bir girdi oluşturulması yönteminden bahsedilmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçları sistem parametrelerinden olan doğal frekansın belirli hata ile tahmin edilmesine rağmen önerilen girdi biçimlendirme yöntemi ile titreşimin belirli bir seviyede tutulabildiği göstermiştir. Sezgisel olarak önerilen yöntemin daha gürbüz olduğu görülmektedir.

7. REFERANSLAR

[1] Smith, O. J. M. *Feedback Control Systems*, 1958 (McGraw-Hill, New York).

[2] A. Cucciuo, R. Garziera, and P. Righettini, "Vibration Control Input-Laws in Point-to-Point Motion: Theory and Experiments", *Mechanisms and Machine Theory*, 33(4) (1998), p. 341.

[3] G. Mimmi and P. Pennacchi, "Pre-shaping Motion Input for a Rotating Flexible Link", *International Journal of Solids and Structures*, 38 (2001), p. 2009.

[4] G. Alici, S. Kapucu, and S. Baysec, "Swing-Free Transportation of Suspended Objects with Robot Manipulators", *Robotica*, 17 (1999), p.513.

[5] D.M. Aspinwall, "Acceleration Profiles for Minimizing Residual Response", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 102 (1980), p. 3.

[6] P.H. Meckl and W.P. Seering J. "Experimental Evaluation of Shaped Inputs to reduce Vibration for a Cartesian Robot" *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 112 (1990), p. 159.

[7] M.N. Sahinkaya, "Input Shaping for Vibration-Free Positioning of Flexible Systems", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of System and Control Engineering-Part 1*, 215 (2001), p. 467.

[8] N.C. Singer and W.P. Seering, "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 112 (1990), p. 76.

[9]- Kapucu, S., Yıldırım N., Yavuz H. and Baysec, S. "Suppression of residual vibration of a translating –swinging load by a flexible manipulator" *Mechatronics*, Vol 18/3 pp 121-128. April 2008

[10] Kapucu, S., Kaplan, M., "Hafif Sönümlemeli Esnek Sistemlerin Girdi Komutu Biçimlendirme Tekniği ile Artık Titreşimlerin Azaltılması" 12. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu UMTS 2005 Bildiriler Kitabı, Kayseri, Türkiye, S. 347-354, Haziran 2005.

[11] Baysec, S. and Jones, J. R. "An improved model of an electro hydraulic Servo valve" In *Proceedings of 7th IFToMM Congress*, Seville, Spain, 1987 pp. 1489-1494.