

ESNEK EKLEMLİ VE TEK UZUVLU BİR MANİPÜLATÖRÜN ARTIK TİTREŞİMLERİNİN AZALTILMASI

Sadettin Kapucu, Gürsel Alıcı, Sedat Bayseç
Gaziantep Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 27310 GAZİANTEP

ÖZET

Bu çalışma, esnek eklemlili ve tek uzuvlu bir manipülatörün uç noktasının istenilen konuma geldiğinde oluşan, artık titreşimlerin azaltılması için yörünge planlanması metotlarının uygulanmasını içermektedir. Bu metotlardan; i) üç parçalı ve her bir parçasının zaman aralığı ayarlanmasıyla, ii) sikloit referans sinyalinin üzerine rampa sinyali eklenmesiyle, iii) herhangi bir referans sinyalinin ani darbe sinyal takımı evrişimiyle (convolution) elde edilen yörünge girdi sinyalleri uygulanmıştır. Esnek eklemlili tek uzuvlu bir manipülatörün hareket denklemleri çıkarılarak yukarıda bahsedilen üç metodun benzetim sonuçları sunulmuştur. Uygulanan metotların üstünlükleri ve yetersizlikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Başvuru girdi sinyallerinin önceden uygun bir şekilde düzenlenmesi, manipülatör uç noktasının artık titreşimlerini önemli oranda azalttığı tespit edilmiştir.

ABSTRACT

This study addresses residual vibration reducing methods of a flexible joint single link manipulator when it reaches the desired position. Three reference input shaping methods are considered; i) adjusting travelling time of each section of a tree-piece continuous trajectory provided that a given travelling time is unchanged, ii) superimposing a ramp function onto cycloid function, and iii) convolving a sequence of impulses with a desired reference input to generate a shaped input. These methods are applied to a flexible joint single link manipulator and simulation results are presented. The results reveal that by properly planning the reference input shaping of the flexible joint single link manipulator, residual vibration of the manipulator tip is eliminated or at least reduced.

GİRİŞ

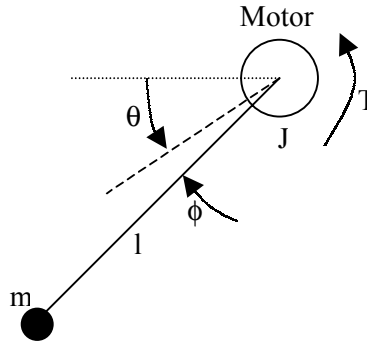
Günümüzde yüksek başarılı manipülatörlere olan ihtiyaç, manipülatör denetimi üzerine yapılan çalışmaları artırmıştır. Tüm manipülatörler bir noktaya kadar elastik sistemlerdir ve deneysel çalışmalar, manipülatör eklemlerindeki esnekliğin tasarım, modelleme ve denetimde göz önüne alınması gerekliliğini göstermektedir [1,2]. Hassas konumlama gerektiren manipülatörlerin başarımları özellikle eklemlerdeki esneklik nedeniyle kısıtlanmaktadır. Esnek bir manipülatörün yüksek hızlarda, uç noktasının istenilen konuma geldiğinde oluşan artık titreşimlerin azalması için durulma zamanına ihtiyacı olmaktadır. Bu tür manipülatörlerin konum denetimi için temel olarak açık döngüye dayalı iki yaklaşım vardır [3]. Bunlar ters manipülatör dinamiği ve girdi sinyalinin düzenlenmesidir. Birinci yaklaşımda; Fardanesh ve Rastegar [4] en iyi girdiyi frekans alanında özyineleme ile belirlemişlerdir, Feliu ve diğerleri [5] en iyi girdi ile manipülatör uç noktası konumu arasındaki hatanın en küçük kareler yöntemiyle en aza indirilmesini kullanmıştır. İkinci yaklaşımda ise, Steering ve

diğerleri [6,7] girdinin ani darbe sinyal takımı evrişimi ile elde edilen girdiyi, Murpy ve Watanabe [8] aynı prensibe dayanan girdiyi sayısal filitrelemeyi kullanmışlardır.

Girdi sinyalinin yukarıda bahsedilen ikinci yaklaşımdaki gibi önceden düzenlenmesine ilişkin bu çalışmada, esnek eklemli ve tek uzuvlu bir manipülatörün uç noktasının istenilen konuma geldiğinde oluşan, artık titreşimlerin azaltılması için; i) üç parçalı ve her bir parçasının zaman aralığı ayarlanmasıyla, ii) sikloit referans sinyalinin üzerine rampa sinyali eklenmesiyle, iii) herhangi bir referans sinyalinin ani darbe sinyal takımı evrişimiyle elde edilen yörünge girdi sinyalleri önerilmektedir. İlk metot da önerilen üç parçalı etki zamanları ayarlanabilen yörünge girdisi; yarım döngülü ivmelenen sikloid, rampa, ve yarım döngülü azalan ivmeli sikloiden oluşmaktadır. İkinci metot da ise yüksek hızlı kamlarda kullanılan sikloid profilinin üzerine rampa sinyali eklemek suretiyle, istenilen zaman içinde hareketi tamamlaması için her bir fonksiyonun yükseklikleri ayarlanmaktadır. Üçüncü metot da ise herhangi bir referans sinyalinin ani darbe sinyalleri ile evrişimi sırasında taşıma zamanı artmaktadır.

ESNEK EKLEMLİ VE TEK UZUVLU BİR MANİPÜLATÖRÜN MODELLENMESİ

Bu çalışmada, ele alınan sistem Şekil 1'de şematik olarak gösterilmektedir. Manipülatör bir dönme momenti (T) motoru ile sürülmektedir. Motor ataleti (J) olan bir göbeğe bağlanmıştır.



Sekil 1. Basitleştirilmiş esnek eklemli tek uzuvlu bir manipülatör.

Sürücü motor bağlantı elemanlarından kaynaklanan esneklik, doğrusal bükülme yayı olarak ifade edilmiş ve yay sabiti (k) ile gösterilmiştir. Manipülatörün yatayla yaptığı açı θ ile ve yayın sapması ϕ ile gösterilmiştir. Dolayısıyla, manipülatör uç noktasının yaptığı toplam sapma :

$$\psi = \theta + \phi \quad (1)$$

Manipülatör kolunun yatay düzlemde olduğu, sönüm kuvvetlerinin ve eklemlerdeki sürtünme kuvvetlerinin ihmal edilebileceği varsayımıyla, bu manipülatörün Langrange denklemleri kullanılarak elde edilen hareket denklemleri [9,10] aşağıdaki gibi bulunur;

$$(J + ml^2)\ddot{\psi} + J\ddot{\phi} = T \quad (2)$$

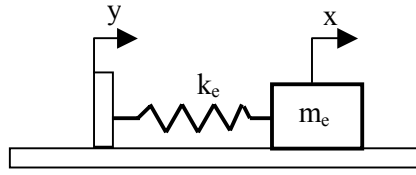
$$ml^2\ddot{\psi} + k\phi = 0 \quad (3)$$

Denklem (1)'in zamana göre iki kez türevi alınıp denklem (2) ve (3)'de yerine konulursa

$$(J + ml^2)\ddot{\theta} + ml^2\ddot{\phi} = T \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} + \ddot{\phi} + \left(\frac{k}{ml^2}\right)\phi = 0 \quad (5)$$

elde edilir. Burada denklem (5) manipülatör kolunun titreşimini vermektedir. Titreşime θ girdisi sebep olmaktadır. Eğer matematiksel olarak θ tanımlanabilirse, denklemin çözümü elde edilebilir ve böylelikle artık titreşim azaltılabilir. Denklem (5) doğrusal bir diferansiyel denklem olup, Şekil 2’de gösterilen basit bir kütle yay sisteminin matematiksel modelinin eşdeğeridir [12].



Şekil 2: Esnek eklemlili tek uzuvlu manipülatörün özdeş yay kütle sistemi.

Her ne kadar, Şekil 1 ve 2 fiziksel olarak farklı gözükseler de matematiksel modelleri birbirlerine benzemektedir. Dolayısıyla, eşdeğer yay katsayısını k_e ve eşdeğer kütle m_e olan Şekil 2’de verilen bu basit yay-kütle sistemini, bu çalışmada kullanabiliriz. Bu sistemin hareket denklemi:

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = \omega_n^2 y \quad (6)$$

olacaktır. Burada, $\omega_n^2 = k_e/m_e$.

ARTIK TİTREŞİM AZALTMA METODLARI

İ)Üç Parçalı ve Her Bir Parçasının Zaman Aralığı Ayarlanmasıyla Yörünge Elde Edilmesi.

Hareket profili için, manipülatörün önce ivmelendirilip daha sonra ters ivmelendirilmesi yerine, ivmelendirildikten sonra sabit bir hızda bir miktar yol alması ve daha sonra ters ivmelendirilmesi daha uygun bir hareket profili olacaktır. Şekil 3’de artan sikloid, sabit hız ve azalan sikloid’den oluşan üç parçalı yörünge verilmiştir. Manipülatör uç noktasının istenilen konuma geldiğinde dinamik yüklerden dolayı oluşan titreşimi her bir profil zamanı ayarlanarak azaltmak mümkün olacaktır. Üç parçalı profilden oluşan bu yörünge; toplam zamanı, profillerin toplam zamanına ve mesafesine, eşit olmalıdır. Ayrıca bir profilden diğer bir profile geçişte hareketin düzgünlüğü için hızlar aynı olmalıdır. Üç parçalı yörünge denklemleri ve ivmeleri şu şekilde olmaktadır;

$$y_1 = Y_1 \left[\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\pi} \sin \pi \frac{1}{\tau_1} \right], \quad \ddot{y}_1 = \frac{\pi Y_1}{\tau_1^2} \sin \frac{\pi}{\tau_1} t = R_1 \sin \omega_1 t$$

$$y_2 = \frac{Y_2}{\tau_2} t, \quad \ddot{y}_2 = 0 \quad (7)$$

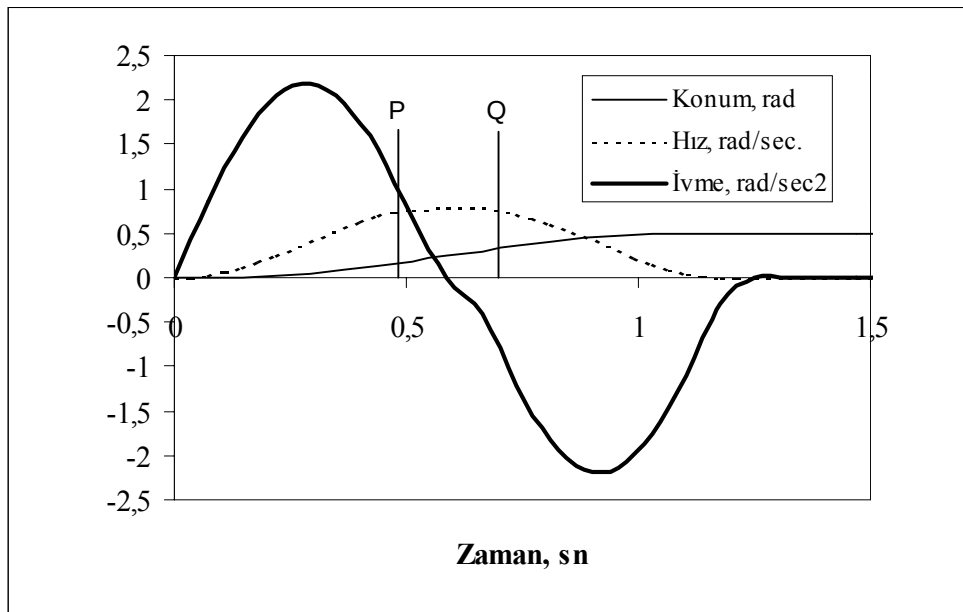
$$y_3 = Y_3 \left[\frac{t}{\tau_3} + \frac{1}{\pi} \sin \pi \frac{t}{\tau_3} \right], \quad \ddot{y}_3 = -\frac{\pi Y_3}{\tau_3} \sin \frac{\pi}{\tau_3} t = -R_3 \sin \omega_3 t$$

Burada,

Y_1, Y_2, Y_3 her bir parça için yörünge mesafesini,

τ_1, τ_2, τ_3 ise bu parçalar için sırasıyla zamanı göstermektedir.

$$R_1 = \frac{\pi Y_1}{\tau_1^2}, \quad \omega_1 = \frac{\pi}{\tau_1}, \quad R_3 = \frac{\pi Y_3}{\tau_3^2}, \quad \omega_3 = \frac{\pi}{\tau_3}.$$



Şekil 3: Artan sikloid, sabit hız ve azalan sikloid'den oluşan üç parçalı yörünge'nin konumu, hızı, ve ivmesi.

P ve Q geçiş noktalarında hızların eşitliği için gerekli bağıntı ise sırasıyla aşağıdaki gibidir;

$$\frac{2Y_1}{Y_2} = \frac{\tau_1}{\tau_2} \text{ ve } \frac{Y_1}{Y_3} = \frac{\tau_1}{\tau_3} \quad (8)$$

Burada, τ_1, τ_3 'e eşit olarak alınmıştır. Dolayısıyla ivmelenme ve ters ivmelenme süreleri eşit olarak kabul edilmiştir. Doğrusal differensiyel denklem (6), üç parçalı giriş fonksiyonunun her bir parçası için çözülür, yarım-açı tanjant özdeşliklerinden faydalanarak gerekli düzenlemeler yapılırsa aşağıdaki ikinci dereceden polinomlar [11]:

$$(B_2 + B_3)s^2 - 2A_2s + (B_3 - B_2) = 0 \text{ ve}$$

$$\left(A_3 - \frac{D_3}{\omega_n} + A_2 \right) s^2 + 2B_2s + \left(A_3 - \frac{D_3}{\omega_n} - A_2 \right) = 0 \quad (9)$$

elde edilir. Burada,

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{ml^2}},$$

$$D_3 = -\frac{R_3 \omega_n}{\omega_n^2 - \omega_3^2},$$

$$A_2 = \left(\frac{R_1}{\omega_n^2 - \omega_1^2} \right) \frac{\omega_1}{\omega_n} (1 + \cos \omega_n \tau_2),$$

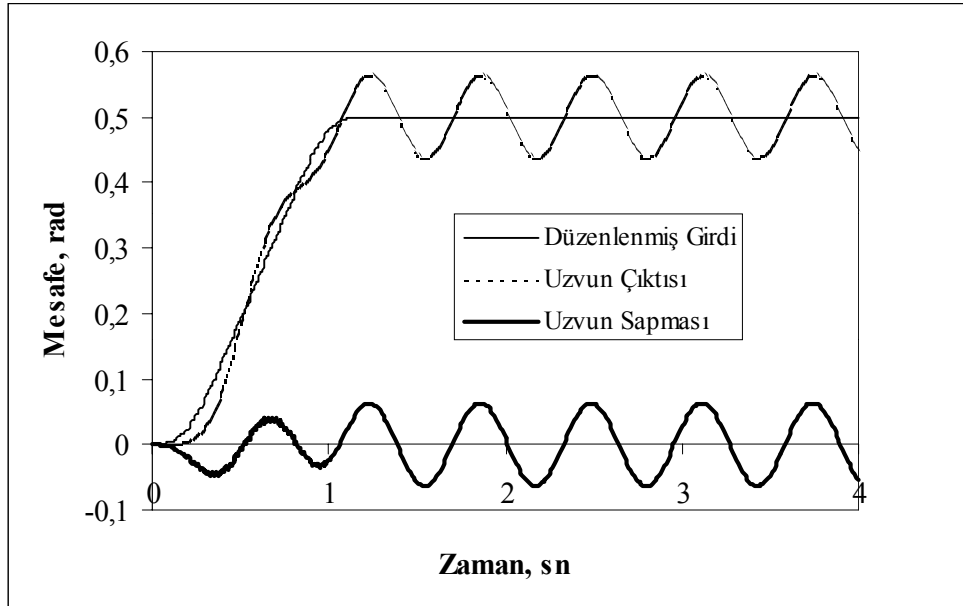
$$B_2 = \left(\frac{R_1}{\omega_n^2 - \omega_1^2} \right) \frac{\omega_1}{\omega_n} \sin \omega_n \tau_1,$$

$$A_3 = A_2 \cos \omega_n (\tau_2 - \tau_1) - B_2 \sin \omega_n (\tau_2 - \tau_1) + \frac{D_3}{\omega_n},$$

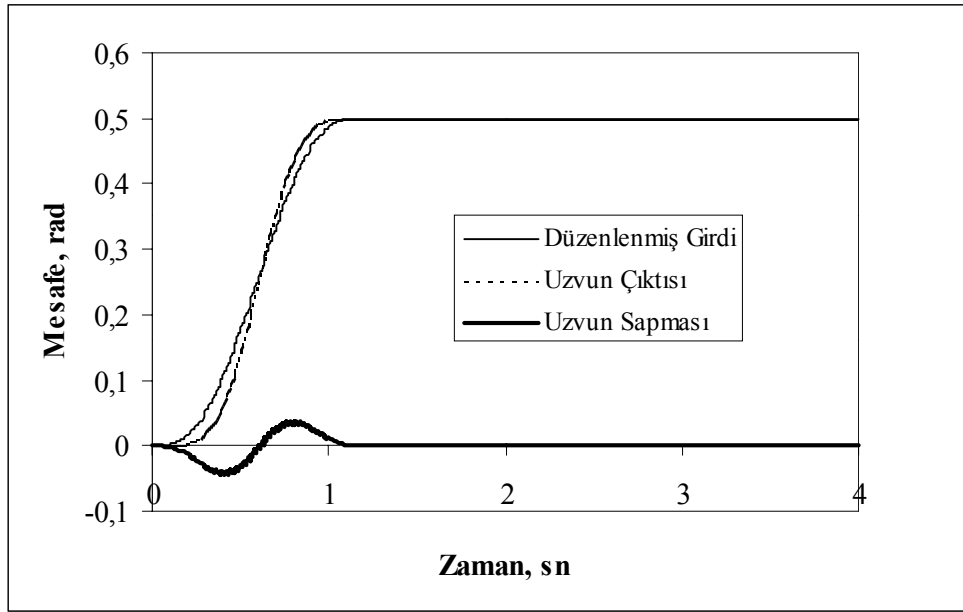
$$B_3 = A_2 \sin \omega_n (\tau_2 - \tau_1) + B_2 \cos \omega_n (\tau_2 - \tau_1),$$

$$s = \tan \left(\frac{\omega_n}{2} \right).$$

Benzetim için rastgele olarak $\tau = 1.2$ saniye, $\omega_n = 10$ rad/sn., $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0.40$ sn., $Y_1 = Y_3 = 0.125$ rad. ve $Y_2 = 0.25$ rad. alınmıştır. Benzetim sonucu Şekil 4’de verilmiştir. 1.2 saniyeden sonra artık titreşimlerin oluştuğu görülmektedir. Rastgele seçilen τ_1, τ_2, τ_3 ve Y_1, Y_2, Y_3 değerleri yerine denklem (8 ve 9) kullanılarak hesaplanan $\tau_1 = \tau_3 = 0.5718$ sn., $\tau_2 = 0.0565$ sn., $Y_1 = Y_3 = 0.2275$ rad. ve $Y_2 = 0.045$ rad. değerleri kullanıldığında elde edilen sonuçlar Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5’de görüldüğü üzere 1.2 saniyeden sonra artık titreşimler yok olmuştur.



Şekil 4: Profillerin zamanı ve mesafesi rastgele seçilmiş üç parçalı düzenlenmiş girdi ve buna karşılık sistemin cevabı uzvun sapması.



Şekil 5: Profillerin zamanı ve mesafesi denklem (8 ve 9) kullanılarak hesaplanan üç parçalı düzenlenmiş girdi ve buna karşılık sistemin cevabı uzvun sapması.

ii) Sikloid Referans Sinyalinin Üzerine Rampa Sinyali Eklenmesi

Burada referans sinyali olarak toplam hareket zamanında etkiyen sikloid + rampa fonksiyonu

$$y = \frac{Y_1}{2\pi} [2Rt - \sin(2Rt)] + \frac{Y_2}{\tau} t \quad (10)$$

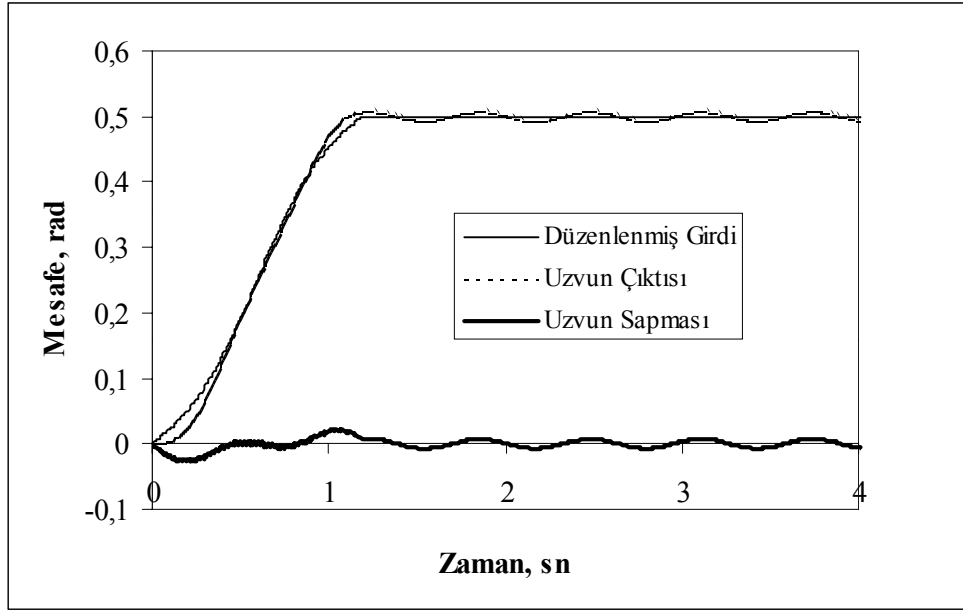
olacaktır. Burada, y toplam mesafeyi, Y_1 sikloid fonksiyonu mesafesini, Y_2 rampa fonksiyonu mesafesini, t hareket süresi, τ bir noktadan diğer bir noktaya kadar geçen süre olup, $R = \pi/\tau$ olarak alınmıştır. Başlangıç şartları sıfır olarak alınıp Şekil 2 de eşdeğeri verilen denklem (6) kütle-yay sistemi olarak sikloid+rampa girdisi için çözülür ve başlangıç şartlarına göre bulunan çözüm sabitleri sıfıra eşitlenirse, Y_1 sikloid fonksiyonu ile Y_2 rampa fonksiyonu mesafeleri

$$Y_1 = y \left[1 - \left(\frac{\tau_n}{\tau} \right)^2 \right] \text{ ve } Y_2 = y \left(\frac{\tau_n}{\tau} \right)^2 \quad (11)$$

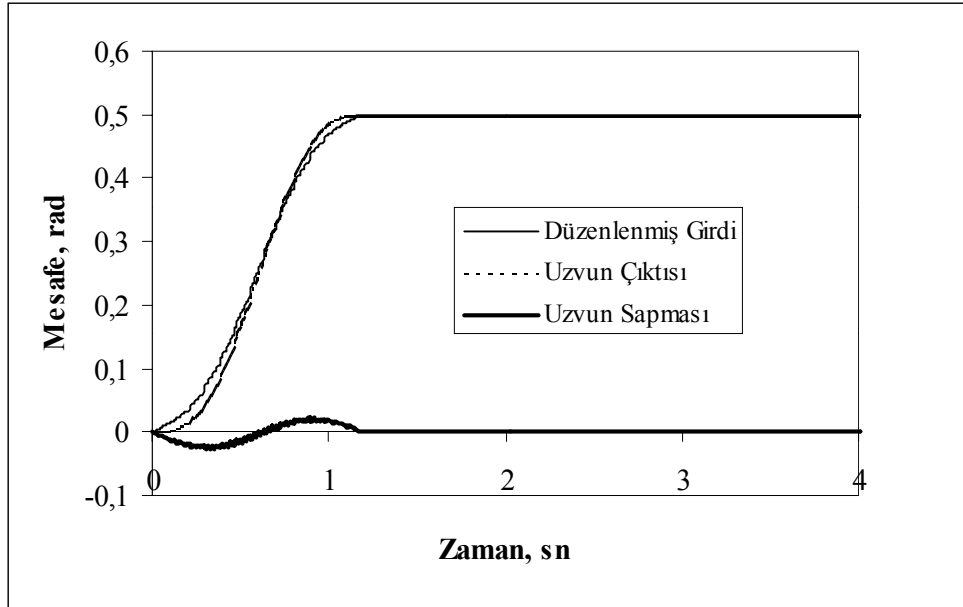
olarak bulunur. Burada τ_n doğal titreşim periyodudur.

Bir sistemin doğal titreşim periyodu ve bir noktadan diğer bir noktaya kadar geçen süreye göre Y_1 sikloid fonksiyonu ile Y_2 rampa fonksiyonu mesafeleri denklem (11)' dan kolaylıkla hesaplanabilir. Eğer, bir noktadan diğer bir noktaya kadar geçen süre, sistemin doğal titreşim periyoduna eşit ise o zaman referans sinyali denklem (10) sadece rampa sinyalinden oluşacaktır. Eğer, bir noktadan diğer bir noktaya kadar geçen süre, sistemin doğal titreşim periyodundan az ise o zaman Y_1 eksi işaretini alacaktır.

Benzetim için $\tau = 1.2$ saniye, $\omega_n = 10$ rad/sn., $y = 0.50$ rad., Y_1 ve Y_2 rastgele 0.25 rad. olarak seçilmiştir. Benzetim sonucu Şekil 6'da verilmiştir. 1.2 saniyeden sonra artık artık titreşimlerin önlenemediği görülmektedir. Rastgele seçilen Y_1 ve Y_2 değerleri yerine denklem (11) kullanılarak hesaplanan $Y_1 = 0.3629$ rad. ve $Y_2 = 0.1371$ rad. değerleri kullanıldığında elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere 1.2 saniyeden sonra artık titreşimler yok olmuştur.



Şekil 6: Rastgele seçilen sikloid ve rampa fonksiyonu mesafesine sistemin cevabı.



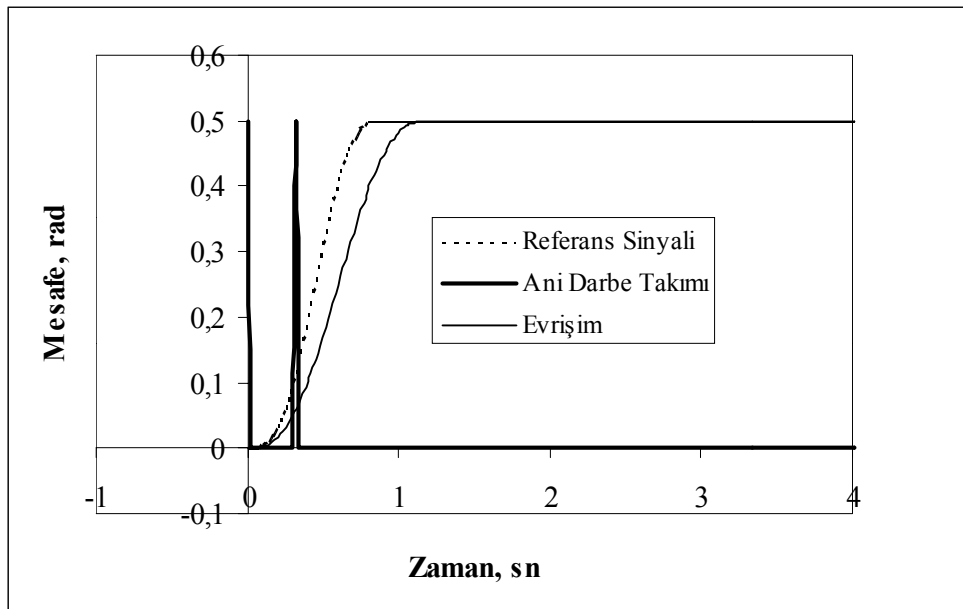
Şekil 7: Sikloid ve rampa fonksiyonu mesafelerinin denklem (11) ile hesaplanarak elde edilen girdi fonksiyonuna sistemin cevabı.

iii) Referans Sinyalinin Ani Darbe Sinyal Takımı ile Evrişiminden Elde Edilen Yörünge Girdisi

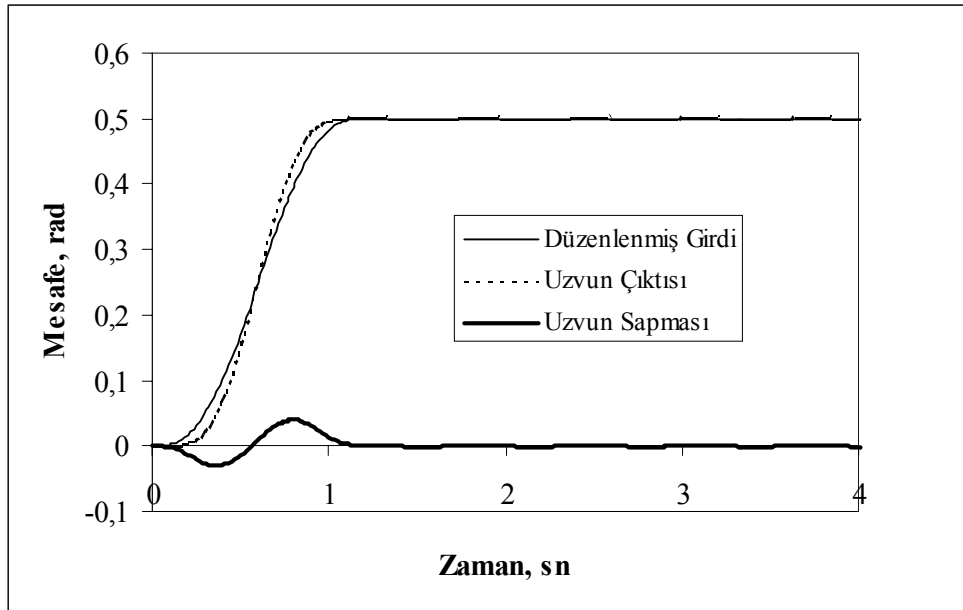
Bu metot, Singer ve Seering [6,12] tarafından referans sinyalinin önceden ani darbe sinyal takımı ile evrişimiyle dinamik bir sistemdeki artık titreşimleri azaltmak için önerilmektedir. İkinci dereceden Şekil 2’ deki gibi bir dinamik sistemin hareketi sona erdiğinde oluşan artık titreşimi azaltmak için iki ani darbe sinyal takımının büyüklükleri ve etki süreleri

$$\begin{aligned} t_1 &= 0, & A_1 &= \frac{1}{2} \\ t_2 &= \frac{\pi}{\omega_n}, & A_2 &= \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

olarak bulunmuştur. Burada birinci ani darbe ile ikinci ani darbe arasındaki zaman doğal titreşim periyodunun yarısı kadardır. Dolayısıyla her hangi bir referans sinyali bu ani darbe sinyal takımı ile evrişiminden, hareket zamanı doğal titreşim periyodunun yarısı kadar daha artmaktadır. Benzetim için bu zaman artışı göz önüne alınarak toplam zamanın 1.2 saniye olması için ani darbe takımı ile ortak dönüşümü yapılacak referans sinyalinin etki süresi 0.8858 saniye alınmıştır. Şekil 8’de ani darbe takımı, rastgele seçilen sikloid referans girdisi ve bu sinyallerin evrişimi verilmiştir. Şekil 9’de ise bu sinyale sistemin verdiği cevap görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere 1.2 saniyeden sonra sistemin üzerindeki artık titreşimler hemen hemen yok denecek kadardır.



Sekil 8: Seçilen sikloid sinyalinin ani darbe sinyali ile evrişimi.



Sekil 9: Sekil 8’de ortak dönüşüm ile elde edilen sinyale karşılık sistemin cevabı.

SONUÇ

Benzetim sonuçlarına göre, üç parçalı ve her bir parçasının zaman aralığı ayarlanan, sikloit referans sinyalinin üzerine rampa sinyali eklenen ve herhangi bir referans sinyalinin ani darbe sinyal takımı ile evrişiminden elde edilen yörünge girdi sinyalleri uygulanarak, esnek eklemlili tek uzuvlu bir manipülatörün artık titreşimlerini azaltmak mümkündür. İlk metot da, ikinci dereceden polinomların olması bu metodun kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. İkinci metot toplam hareket zamanı istenildiği gibi ayarlayabilmek mümkündür. Buna karşılık girdi sinyali sadece sikloid ve rampa fonksiyonundan oluşmalıdır. Üçüncü metot ise herhangi bir referans sinyali alınabiliyor olmasına karşın toplam hareket zamanının π/ω_n ’den daha küçük olmasına imkan vermemektedir.

KAYNAKLAR

- 1- Alıcı, G. ve Daniel, R.W., "Experimental Comparison of Model-Based Robot Position Control Strategies" Proc. Of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, sayfa 76-83, Yokohama, Japan, 1993.
- 2- Good, M.C., Sweet, L.M. ve Strobel, K.L., "Dynamic Models for Control System Design of Integrated and Drive Systems", Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol 107, sayfa 53-59, 1985.
- 3- Feliu, V. ve Rattan, K.S., "Feedforward Control of Single Link Flexible Manipulators by Discrete Model Inversion", Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol 121, sayfa 713-721, 1999.
- 4- Fardanesh, B. Ve Rasteger, J., " A New Model-Based Tracking Controller for Robot Manipulators Using Trajectory Pattern Inverse Dynamics", IEEE Transactions of Robotics and Automation, Vol 8, No.2, 1992.
- 5- Feliu, V., Rattan, K.S. ve Brown, H.B., "Modelling and Control of Single Link Flexible Arms with Lumped Masses", Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol 114, No.1 sayfa 59-69, 1992.

- 6- Singer, N.C. ve Seering, W.P. “Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration”, Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol 112, sayfa 76-82, 1990.
- 7- Singhose, W., Seering, W. ve Singer, N., “Residual Vibration Reduction Using Vectors Diagrams to Generate Shaped Inputs”, Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol 116, sayfa 654-659, 1994.
- 8- Murpy, B.R. ve Watable I., “Digital Shaping Filter for Reducing Machine Vibration “ IEEE Transactions of Robotics and Automation, Vol 8, No 2, sayfa 285-289, 1992.
- 9- Spong, M.W., “Modelling and Control of Elastic Joint Robots”, Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol 109, sayfa 311-319, 1987.
- 10- Tsang, T.T.C., “ The Application of Predictive Control to Flexible Robot Arms”, technical Report QUEL 1842/90, University of Oxford, UK, 1989.
- 11- Alıcı, G., Kapucu, S., Bayseç S., “Swing-Free Transportation of Suspended Objects with Robot Manipulators”, Robotica, Vol 17, sayfa 513-521, 1999.
- 12- Alıcı, G., Kapucu, S., Bayseç S., “On Preshaped Reference Input to Reduce Swing of Suspended Objects Transported with Robot Manipulators”, Mechatronics, Vol 10, sayfa 609-626, 2000.