

ÇOK ADIMLI GİRDİ ŞEKİLLENDİRİCİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Seda VATAN CAN^{1, a)} ve Levent MALGACA^{2, b)}

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü. 45400, MANİSA

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 35390, İZMİR

^{a)}seda.vatan@cbu.edu.tr, ^{b)}levent.malgaca@deu.edu.tr

Bu çalışmada, çok eksenli esnek manipülatörlerin titreşimlerini azaltmak amacıyla Çok Adımlı Pasif Kontrol (ÇAPK) yöntemi önerilmiştir. ÇAPK, manipülatörün hareket öncesi ve sonrası pozisyonlarındaki doğal frekans bilgilerini dikkate alarak tasarlanmış Posicast kontrol (PK) yöntemine dayalı bir girdi şekillendirme yaklaşımıdır. Yöntemin etkinliğini değerlendirmek üzere, Matlab/Simscape ortamında modellenmiş iki eksenli bir esnek manipülatör üzerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. ÇAPK ile şekillendirilmiş sistem girdilerinin manipülatörün hareketi esnasındaki titreşimlere ve artık titreşim düzeylerine etkileri, şekillendirilmemiş ve PK yöntemi ile karşılaştırılmalı olarak yer değiştirme cevapları üzerinden analiz edilmiştir. Sonuçlar, ÇAPK yönteminin hem hareket sırasında hem de hareket sonrasındaki titreşimleri önemli ölçüde azalttığını ve geleneksel PK yöntemine kıyasla daha yüksek bir performans sergilediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Girdi şekillendirme, pasif kontrol, esnek manipülatör

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A MULTI-STEP INPUT SHAPING METHOD

ABSTRACT

In this study, a Multi-Step Passive Control (MSPC) method is proposed to reduce the vibrations of multi-link flexible manipulators. MSPC is an input shaping approach based on the Posicast control (PC) method, designed by considering the natural frequencies at the initial and final positions of the manipulator. To evaluate the effectiveness of the method, simulation studies are conducted on a two-link flexible manipulator modeled in the Matlab/Simscape. The influence of system inputs shaped using MSPC on in-motion vibrations and residual vibration levels of the manipulator are evaluated based on displacement responses, in comparison with unshaped inputs and the PC method. The results show that MSPC significantly reduces vibrations both during and after the motion, and it improves the traditional PC method. It has been demonstrated that MSPC is an effective and applicable alternative among passive control strategies, particularly in systems where multiple natural frequencies are dominant, as it can enhance control performance.

Keywords: Input shaping, passive control, flexible manipulator

1. GİRİŞ

Pasif kontrol yöntemleri ile harici ekipman kullanmadan yalnızca sistem parametreleri aracılığıyla robot kollar gibi dinamik sistemlerin hareketlerini ve oluşan titreşimleri kontrol etmek mümkündür. Harici ekipmanlar (sensör, aktüatör gibi) sistemlerin maliyetini arttırır ve sistem donanımının daha karmaşık

olmasına neden olur. Bu sebeple, pasif kontrol yöntemleri, kontrol stratejileri açısından önemli bir noktada yer almaktadır. Ancak, diğer yöntemlerde olduğu gibi pasif kontrolörlerin tasarımı da çeşitli zorluklar barındırmaktadır. Rossi ve ark. [1], esnek manipülatörler için pasif kontrolörlerin tasarımındaki sorunlara değinmiştir.

Pasif kontrol yöntemleri arasında girdi şekillendirme yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [2,3]. Posicast kontrolü (PK), Smith [4] tarafından geliştirilen ve girdi şekillendirme yöntemlerinin öncüsü kabul edilen bir yaklaşımdır. Yaygın kullanılan diğer girdi şekillendirme yöntemlerine kıyasla da uygulaması daha basittir. Bu kurama göre, sistemin girdisi, tek bir sinyal yerine belirli bir gecikme süresiyle iki ayrı kısımda uygulanır. Böylece, sistemin hareketi değişmeden, ilk adımdan kaynaklanan titreşim, ikinci kısımdaki ters yönlü titreşimle bastırılabilir [4]. Başka bir şekilde, sistemin adım girdisini, belirli bir gecikmeden sonra gelen negatif bir adım ve son bir pozitif adım olmak üzere üç adımdan oluşacak şekilde de tasarlayarak uygulamak mümkündür. Bu tür bir girdi şekillendirme yöntemi üç adımlı Posicast kontrol (PK) olarak adlandırılır [5]. PK, sönüm oranı düşük sistemlerde salınımları önlemek için kullanılır ve bu yaklaşım genellikle elektriksel sistemlerde test edilmiştir [4-6]. Ancak klasik PK yöntemi, doğal frekans ve sönüm oranı gibi dinamik sistem parametrelerinin doğruluğuna son derece duyarlıdır ve teorik olarak sıfır artık titreşim sağlasa da uygulamada titreşim tamamen ortadan kaldırılamamaktadır [7]. Bu nedenle PK genellikle geri besleme sistemleri içerisinde kullanılmış ve bu sistemlerle birlikte geliştirilmiştir. Hung [8], geri beslemeli PK klasik PK'ye kıyasla daha etkili olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca bazı çalışmalarda PK, adaptif ya da optimizasyon tabanlı yöntemlerle geliştirilmiştir [9-13]. Ancak aktif kontrol entegrasyonlarıyla birlikte PK pasif kontrol yönteminin getirdiği avantajları yitirmektedir.

Singhose'un [7] önerdiği tek adımlı girdi şekillendirme yöntemi iki doğal frekans dikkate alacak şekilde kullanılabilmesi için çoklu frekans baskılama olarak ele alınmıştır [14]. Ancak bu çalışmada, yöntem sadece tek adımlı şekillendirme olarak ele alınmış ve birden fazla frekans durumunda parametrelerin hesaplanması açıkça ortaya konulmamaktadır.

Çok eksenli manipülatörlerin doğal frekans hareket süresince pozisyon ve yönelimlerinin değişmesi ile değişir. PK, doğal frekans ve sönüm oranını dikkate alan bir kontrol yöntemidir. Bu nedenle, sistemin doğal frekansındaki değişime karşı oldukça hassastır [7]. Bu durumda, çok eksenli manipülatörlerde

PK'ün kontrol performansının, manipülatörün hareketine bağlı olarak düşmesi beklenir [15].

Bu çalışmada, PK yönteminin birden fazla baskın frekansın görüldüğü durumlarda da etkin bir kontrol sağlayabilmesi için çok adımlı pasif kontrol (ÇAPK) yöntemi önerilmektedir. Bu yöntem birden fazla baskın frekansın ortaya çıktığı tüm sistemlerde uygulanabileceği gibi çok eksenli manipülatörlerde de kullanılabilir. Çok eksenli manipülatörlerde ÇAPK yöntemi, manipülatörün başlangıç ve bitiş konumlarındaki doğal frekanslar dikkate alınarak uygulanabilir. Bu çalışmada önerilen yöntem, Matlab/Simscape üzerinde modellenen iki eksenli esnek bir manipülatör üzerinde incelenmiştir. Yöntemin etkinliği şekillendirilmemiş ve PK ile şekillendirilen trapez girdi cevapları ile karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM

PK [4], ölü-nokta (dead-beat) tepkiler üretmek amacıyla geliştirilen, girdi şekillendirme alanındaki öncü yöntemlerden biridir. Ancak, PK yöntemi model belirsizliklerine karşı oldukça hassastır ve bu nedenle kontrol performansı yetersiz kalabilmektedir. Geleneksel PK yöntemi ilgili sistemin doğal frekansını ve sönüm oranını dikkate alarak sistem girdisini yeniden şekillendirir. Ancak birden fazla baskın frekansın bulunduğu durumlarda bu yöntem yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, ÇAPK ile birden fazla frekans içeren bir çözüm sunulmaktadır.

PK yöntemi ile girdi şekillendirici tasarımında, sistemin ω_n ve ζ değerleri kullanılarak A_I , A_2 , A_3 , T_{d1} ve T_{d2} olmak üzere beş parametre hesaplanır [15]. Burada, ω_n sistemin doğal frekansını, ζ ise sönüm oranını ifade etmektedir. ÇAPK'da, bu parametrelerin iki farklı durum yani iki farklı doğal frekans için belirlenmesi gerekir. Sistemin dikkate alınan iki doğal frekansına göre PK yöntemi ile belirlenen şekillendirici parametrelerinin matris gösterimleri Denklem 1 ve Denklem 2'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A_I \\ T_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{I1} & A_{I2} & A_{I3} \\ 0 & T_{Id1} & T_{Id2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} A_{II} \\ T_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{II1} & A_{II2} & A_{II3} \\ 0 & T_{II d1} & T_{II d2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

I ve II indisleri iki farklı durumu temsil etmektedir. ÇAPK yönteminde, PK ile belirlenen genlik ve zaman parametre matrisleri zaman kaydırması uygulanarak

matris çarpımı ile çarpılır. Yani, Denklem 1 ve Denklem 2’de verilen iki matrisin zaman kaydırmalı çarpımı için, birinci matrisin her bir

$$\text{Adım 1} \rightarrow [A_1 \ A_2 \ A_3] = A_{I1} [A_{I11} \ A_{I12} \ A_{I13}] = [A_{I1}A_{I11} \ A_{I1}A_{I12} \ A_{I1}A_{I13}] \quad (3)$$

$$\text{karşılık zamanları} \rightarrow [T_1 \ T_2 \ T_3] = [(0 + 0) \ (T_{I1d1} + 0) \ (T_{I1d2} + 0)]$$

$$\text{Adım 2} \rightarrow [A_4 \ A_5 \ A_6] = A_{I2} [A_{I11} \ A_{I12} \ A_{I13}] = [A_{I2}A_{I11} \ A_{I2}A_{I12} \ A_{I2}A_{I13}] \quad (4)$$

$$\text{karşılık zamanları} \rightarrow [T_4 \ T_5 \ T_6] = (0 + T_{I2d1}) \ (T_{I1d1} + T_{I2d1}) \ (T_{I1d2} + T_{I2d1})$$

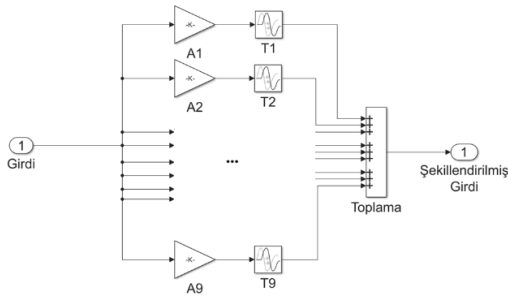
$$\text{Adım 3} \rightarrow [A_7 \ A_8 \ A_9] = A_{I3} [A_{I11} \ A_{I12} \ A_{I13}] = [A_{I3}A_{I11} \ A_{I3}A_{I12} \ A_{I3}A_{I13}] \quad (5)$$

$$\text{karşılık zamanları} \rightarrow [T_7 \ T_8 \ T_9] = (0 + T_{I3d2}) \ (T_{I1d1} + T_{I3d2}) \ (T_{I1d2} + T_{I3d2})$$

ikinci matrisin zaman satırındaki her bir eleman, çarpılan birinci matris elemanına karşılık gelen zaman değeriyle toplanır (bkz. Denklem (3-5)). Daha sonra, tüm genlikler karşılık geldikleri zamanlara göre sıralanır. Böylece, ÇAPK için 9x2 boyutundaki zaman kaydırmalı çarpım matrisi Denklem 6’da verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} A_{\text{ÇAPK}} \\ T_{\text{ÇAPK}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & \dots & A_7 & A_8 & A_9 \\ T_1 & T_2 & T_3 & \dots & T_7 & T_8 & T_9 \end{bmatrix}_{9 \times 2} \quad (6)$$

Bu matriste, T_9 en büyük gecikme süresi olup her iki durumun T_{d2} değerlerinin toplamına eşittir. ÇAPK şekillendiriciye ait blok diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1 Çok Adımlı Pasif Kontrol Blok Diyagramı

Geliştirilen ÇAPK yöntemi, birden fazla doğal frekansın etkisinin görüldüğü tüm sistemlerde benzer şekilde kullanılabilir.

3. MODEL

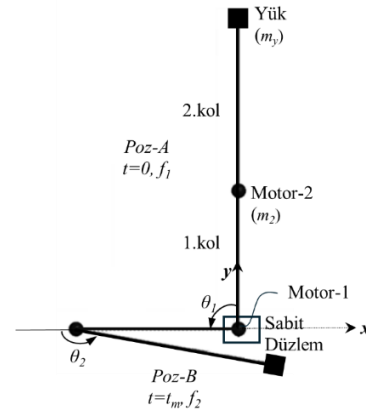
Bu çalışmada iki eksenli bir seri manipülatör modeli dikkate alınmıştır. Manipülatöre ait geometrik ve materyal özellikleri ile sistem parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

genlik elemanı, ikinci matrisin genlik satırındaki tüm elemanlarla çarpılır. Aynı anda,

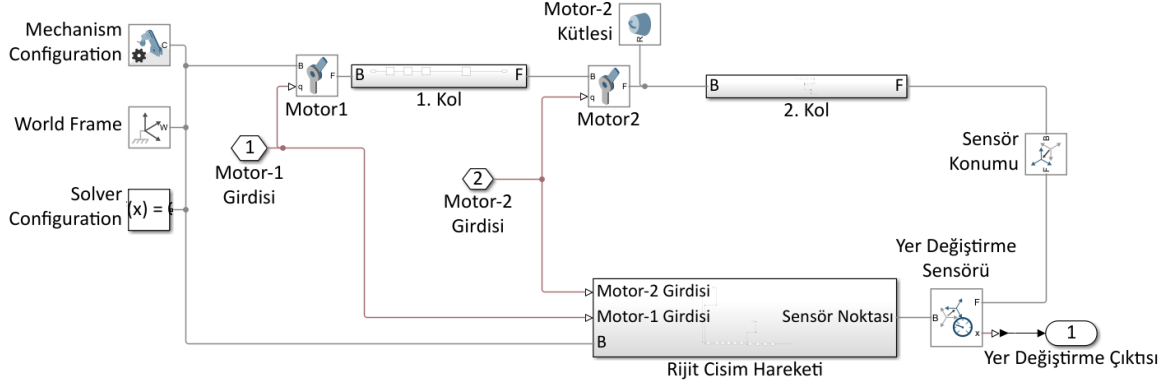
Manipülatörün Şekil 2’de gösterildiği gibi iki farklı çalışma pozisyonu dikkate alınmıştır ve simülasyon modeli Matlab/SimScape üzerinde hazırlanmıştır.

Tablo 1. Manipülatörün geometrik ve parametrik özellikleri

Parametre	Açıklama	Değer
K_{motor}	Motor yay rijitliği	16000 Nm/rad
L_1	1. kol uzunluğu	463.5 mm
L_2	2. kol uzunluğu	575 mm
E	Elastisite modülü	71 GPa
ρ	Materyal yoğunluğu	2700 g/m ³
ν	Poisson oranı	0.3
ξ	Sönüm oranı	$\xi=0.0084$
$b_1 \times h_1$	1.kolun kesit alanı	80x6 mm
$b_2 \times h_2$	2.kolun kesit alanı	60x6 mm
m_2	2. motor kütlesi	3.26 kg
m_y	Yük kütlesi	0.40 kg



Şekil 2. Manipülatör modeli ve dikkate alınan çalışma pozisyonları



Şekil 3 İki eksenli esnek manipülatör simülasyon modeli

İki eksenli manipülatörün 1. ve 2. kolların hareket açıları θ_1 ve θ_2 ile ifade edilmektedir. Poz-A ve Poz-B olarak gösterilen çalışma pozisyonları için hareket açıları sırasıyla $[0^\circ, 0^\circ]$ ve $[90^\circ, 170^\circ]$ olarak dikkate alınmıştır. Model üzerinden impuls girdi cevaplarının Fast Fourier dönüşümleri alınarak 1. temel doğal frekansları Poz-A için $f_1 = 2.6703$ Hz, Poz-B için $f_2 = 4.2915$ Hz olarak hesaplanmıştır.

3.1. Simülasyon Modeli

Şekil 2’de gösterilen manipülatör modeli Matlab/Simscape üzerinde esnek giriş blokları kullanılarak modellenmiştir. Modelin Simulink blok diyagramı Şekil 3’te gösterilmiştir.

Motorları temsilen döner eklem blokları kullanılmış ve motorların iç mekanik özellikleri ve tahrik girişleri, Motor-1 ve Motor-2 bloklarında tanımlanmıştır. Motor-2 kütlesi, noktasal kütle olarak modele dahil edilmiştir; fakat hareket sırasında etkisi ihmal edilebilir düzeyde olduğu için Motor-1’in kütlesi modele dahil edilmemiştir.

Motor-1 ve Motor-2’nin tahrik girişleri, açısal yer değiştirme, açısal hız ve açısal ivme sinyallerinden oluşmaktadır ve şekillendirilmiş hız girdilerinin türevi ve integrali alınarak hesaplanmaktadır.

Rijit cisim hareket bloğunda, yapının aynı girdi sinyallerine karşın esnek deformasyonlar olmaksızın yalnızca rijit dönme ve öteleme hareketi hesaplanmaktadır. Esnek modelde ise, yapının belirli noktalarında elastik şekil değiştirmeler ile birlikte rijit cisim hareketleri

de hesaplanmaktadır. Sensör, esnek ve rijit modeller arasındaki yer değiştirme farkını hesaplayarak sadece manipülatör titreşimlerinin belirlenmesini sağlamaktadır.

4. BULGULAR

ÇAPK yönteminin uygulanmasında manipülatör modelinin Şekil 2’de gösterildiği gibi hareket öncesi ve sonrası pozisyonları dikkate alınmıştır. Manipülatörün Poz-A ve Poz-B konumlarındaki doğal frekansları kullanılarak PK parametreleri Denklem 7 ve 8’de verildiği gibi elde edilmiştir.

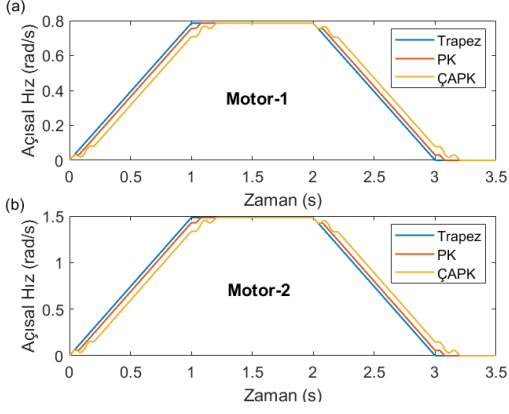
$$\begin{bmatrix} A_A \\ T_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9912 & -0.9999 & 1.0087 \\ 0 & 0.0624 & 0.1248 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} A_B \\ T_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9858 & -0.9998 & 1.0140 \\ 0 & 0.0388 & 0.0777 \end{bmatrix} \quad (8)$$

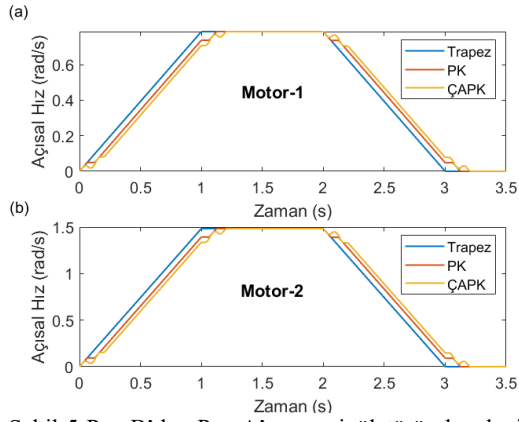
ÇAPK şekillendiricide kullanılacak olan parametreler zaman kaydırmalı çarpım yöntemiyle Denklem 9’da verilen ÇAPK şekillendirici parametreleri Poz-A’dan Poz-B’ye hareket için hesaplanmıştır. Poz-B’den Poz-A’ya hareket sırasında matris çarpım sırası değişmektedir.

Manipülatörün hareketi Poz-A’dan Poz-B’ye ve Poz-B’den Poz-A’ya olmak üzere iki farklı durum için planlanmıştır. Bir trapez girdi, planlanan manipülatör hareket açıları için hareket süresi 3s, ivmelenme zamanı 1s, yavaşlama zamanı 1s ve sabit zaman 1s olacak şekilde Matlab fonksiyonu ile üretilmiştir. Trapez girdi sinyalleri ÇAPK şekillendiriciden geçirilerek şekillendirilmiş girdi sinyalleri elde edilmiştir. Trapez girdi, PK ve ÇAPK ile üretilen girdi sinyalleri Şekil 4 ve Şekil 5’te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A_{\text{ÇAPK}} \\ T_{\text{ÇAPK}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.977 & -0.991 & -0.986 & 1.005 & 0.999 & 0.994 & -1.014 & -1.009 & 1.023 \\ 0 & 0.038 & 0.062 & 0.078 & 0.101 & 0.125 & 0.140 & 0.164 & 0.203 \end{bmatrix} \quad (9)$$

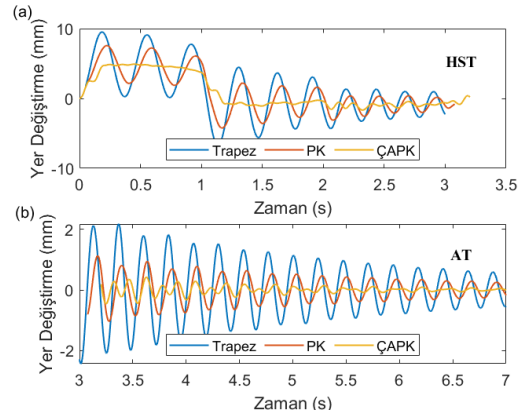


Şekil 4. Poz-A'dan Poz-B'ye manipülâtörün hareketi için elde edilen şekillendirilmiş girdiler; (a) Motor-1, (b) Motor-2



Şekil 5 Poz-B'dan Poz-A'ya manipülâtörün hareketi için elde edilen şekillendirilmiş girdiler; (a) Motor-1, (b) Motor-2

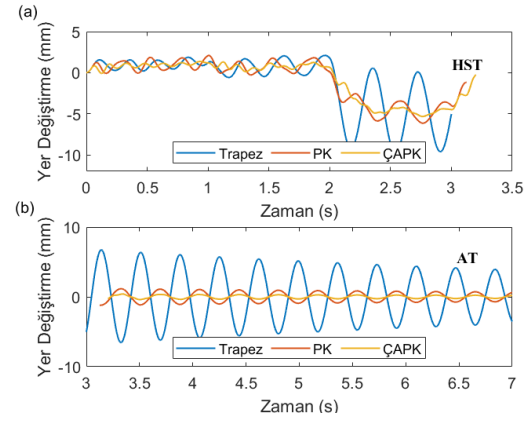
İki eksenli manipülâtör üzerinde ÇAPK ile yeniden şekillendirilen girişler için yer değıştirme cevapları elde edilmiştir. ÇAPK için yer değıştirme cevapları Poz-A'dan Poz-B'ye hareket durumunda, şekillendirilmemiş girdi ve PK ile şekillendirilmiş girdi için sistem cevapları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6 Pos-A'dan Pos-B'ye hareket durumunda yer değıştirme cevabı; (a) hareket sırasındaki titreşimler, (b) artık titreşimler

ÇAPK, hem hareket sırasındaki titreşimler (HST) hem de artık titreşimler (AT) açısından, titreşimleri azaltma konusunda PK yöntemine kıyasla belirgin şekilde daha başarılıdır. Öyle ki, manipülâtörün hareketi sırasında neredeyse hiç salınım oluşmadan hareket tamamlanmaktadır.

İkinci durumda, manipülâtör Poz-B konumundan Poz-A konumuna hareket etmektedir. İkinci duruma ait yer değıştirme tepkilerinin karşılaştırması Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7 Pos-B'den Pos-A'ya hareket durumunda yer değıştirme cevabı; (a) hareket sırasındaki titreşimler, (b) artık titreşimler

İkinci durumda, HST için giriş sinyallerinin benzerliği nedeniyle ÇAPK ve PK yöntemlerinin performansları yaklaşık olarak aynıdır. Ancak ÇAPK, AT açısından daha etkili bir titreşim azaltımı sağladığı gözlemlenmiştir.

Her iki durum için yer değıştirme tepkilerinin RMS (kök ortalama kare) değerleri ve şekillendirilmemiş trapez girdiye oranla titreşim değerlerindeki azalma oranları Tablo 2'de sunulmuştur. ÇAPK, 1. durumda HST için %36, AT için ise %86 oranında bir azalma sağlamıştır. 2. durumda HST için %30, AT için %94 oranında azalma sağlamaktadır. Azalma oranlarına göre, ÇAPK yönteminin hem HST hem de AT açısından PK yönteminin etkinliğini artırdığı görülmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular ÇAPK'nin pasif kontrol yöntemi olarak da titreşim kontrolünde esnek manipülâtörlerde etkili bir titreşim kontrolü sağlanabileceğini ortaya koymaktadır.

Tablo 2 ÇAPK'nin titreşim kontrolüne etkisi

		Yer Değiştirme RMS Değerleri (mm)			
Hareket Girdi		HST		AT	
Tipi	Tipi	HST	Azalma Oranı	AT	Azalma Oranı
Poz-A' dan Poz-B' ye	Trapez	3.978	-	0.9523	-
	PK	3.179	%20,1	0.4219	%55,7
	ÇAPK	2.538	%36,2	0.1329	%86,0
Poz-B' den Poz-A' ya	Trapez	3.596	-	3.7067	-
	PK	2.658	%26,1	0.6636	%82,1
	ÇAPK	2.534	%29,6	0.2115	%94,3

* Azalma değerleri aynı durumdaki trapez cevabına oranla hesaplanmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Posicast kontrol yöntemi çok eksenli manipülatörlerde de kullanılabilir şekilde birden fazla doğal frekansı dikkate alacak şekilde geliştirilerek çok adımlı pasif kontrol yöntemi (ÇAPK) önerilmiştir. İki eksenli esnek manipülatörün, önerilen yöntem ile oluşturulan girdilere karşılık yer değiştirme cevapları Matlab/Simscape üzerinde elde edilmiştir.

Çalışmada iki hareket durumu incelenmiş ve her iki hareket durumunda da artık titreşimler açısından ÇAPK'nin geleneksel PK yöntemine göre daha etkin olduğu görülmüştür. ÇAPK hareket sırasında görülen titreşimleri azaltmada kontrolsüz girdi cevabına oranla %30-36 arasında bir etkinlik gösterirken, artık titreşim seviyelerinde bu oran %94'lere ulaşmaktadır.

Bu çalışma ile geliştirilen yöntemin, yaygın olarak kullanılan yöntemden daha etkili olduğu ve esnek manipülatör yapılarında titreşim kontrolünde kullanılacak bir pasif kontrol yöntemi olarak etkinliği ortaya konulmuştur. Gelecek çalışmalarda, ikiden daha fazla eksen sayısına sahip sistemler üzerinde araştırılması, ikiden fazla sistem frekansının kontrol parametrelerine dahil edilmesi, manipülatörün esnekliği ile yöntemin etkinliği arasındaki ilişki ve sistemin dinamik parametrelerinin tahminlenmesine karşı duyarlılığı araştırılacaktır.

7. KAYNAKLAR

- [1] Rossi, M., Zuo, K., & Wang, D. (1994). Issues in the design of passive controllers for flexible link robots. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pt 1*, 321–326. doi: 10.1109/ROBOT.1994.351275
- [2] Mohamed, Z., & Tokhi, M. O. (2004). Command shaping techniques for vibration control of a flexible robot manipulator. *Mechatronics, 14*(1), 69–90. doi: 10.1016/S0957-4158(03)00013-8
- [3] Singer, N. C., & Seering, W. P. (1990). Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 112*(1), 76–82. doi: 10.1115/1.2894142
- [4] Smith, O. J. M. (1957). Posicast control of damped oscillatory systems. *Proceedings of the IRE, 1249–1255*. doi: 10.1109/JRPROC.1957.278530
- [5] Hung, J. Y., & Member, S. (2007). Posicast control past and present. *IEEE Multidisciplinary Engineering Education Magazine, 2*(1). <http://www.ieee.org/edsocsac>
- [6] Feng, Q., Hung, J. Y., & Nelms, R. M. (2002). The application of posicast control to DC- DC converters. *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 698–703*. doi: 10.1109/IECEC.2002.1392132
- [7] William E. Singhose, Warren P. Seering, & Neil C. Singer. (1996). Input shaping for vibration reduction with specified insensitivity to modeling errors. *The Japan-USA Symposium on Flexible Automation*. <https://www.researchgate.net/publication/243782033>
- [8] Hung, J. Y. (2003). Feedback control with posicast. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 50*(1), 94–99. doi: 10.1109/TIE.2002.804979
- [9] Feng, Q., Hung, J. Y., & Nelms, R. M. (2003). Digital control of a boost converter using Posicast. *Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and*

- Exposition*, 990–995. doi: 10.1109/APEC.2003.1179337
- [10] Hung, J. Y. (2002). Application of posicast principles in feedback control. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2, 500–504. doi: 10.1109/ISIE.2002.1026340
- [11] Oliveira, J., Oliveira, P. M., Pinho, T. M., & Cunha, J. B. (2018). PID Posicast Control for Uncertain Oscillatory Systems: A Practical Experiment. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 416–421. doi: 10.1016/J.IFACOL.2018.06.130
- [12] Oliveira, P. B. de M., Pires, E. J. S., & Novais, P. (2015). Design of Posicast PID control systems using a gravitational search algorithm. *Neurocomputing*, 167, 18–23. doi: 10.1016/j.neucom.2014.12.101
- [13] Ramash Kumar, K., Jayaudhaya, J., Tamilselvan, V., & Balakumar, S. (2022). Design of Hybrid Posicast Control for Super-Lift Luo Converter. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), 1760861. doi: 10.1155/2022/1760861
- [14] Gniadek, M., Brock, S. (2015). Basic algorithms of input shaping autotuning. *MM Sci. J.*, 2015(3), 627-630.
- [15] Malgaca, L., Can, S. V. (2024). Hybrid passive vibration control of lightweight manipulators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 220, 111640.