

Esnek Uzunlu Bir Manipülatörde Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile Optimize Edilen Kontrolcü Parametreleri Etkilerinin İncelenmesi

Sevda TELLİ ÇETİN¹, Sezgin ESER^{2*}

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa

²Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 70200, Karaman

¹<https://orcid.org/0000-0002-3281-9112>

²<https://orcid.org/0000-0001-7906-2324>

*Sorumlu yazar: sezgineser88@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 30.06.2022

Kabul tarihi: 21.11.2022

Online Yayınlanma: 05.07.2023

Anahtar Kelimeler:

Esnek Manipülatör

Optimizasyon

Yapay Arı Kolonisi

Kontrol

ÖZ

Bu çalışmanın temel amacı, esnek uzunlu manipülatörün kontrol torqu ifadesinde yer alan parametrelerin etkilerinin incelenmesidir. Çalışmada ilk olarak, esnek uzun varsayılan modlar metodu ile modellenmiştir. Ardından, kontrol torqu ifadesi sistem enerjisine bağlı olarak elde edilmiştir. Esnek manipülatör için gerçekleştirilen kontrolde amaç, uzun istenen konuma ulaşması ve hareket sırasındaki salınımların sönümlenmesi olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, torqu ifadesinde yer alan katsayı parametrelerinin belirlenmesinde Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması kullanılmıştır. MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar literatürde ilgili torqu ifadesini kullanan bir çalışma ile karşılaştırılmıştır. Son olarak torqu ifadesinde yer alan tüm katsayı parametreleri için simülasyonlar tekrarlanarak ilgili parametrelerin optimizasyona dahil edilme gerekliliği incelenmiştir.

Investigation of the Controller Parameters Effects Optimized by Artificial Bee Colony Algorithm for a Flexible Manipulator

Research Article

Article History:

Received: 30.06.2022

Accepted: 21.11.2022

Published online: 05.07.2023

Keywords:

Flexible manipulator

Optimization

Artificial bee colony

Control

ABSTRACT

The main objective of this study is to examine the effects of the parameters in the control torque expression of the flexible manipulator. First, the flexible manipulator is modelled based on assumed mode method. Then, the control torque expression is obtained depending on the system energy. In the control performed for the flexible manipulator, the aim is determined as achieving the position objective of the flexible manipulator and damping the oscillations during the movement. For this purpose, Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm is performed to determine the parameters in the torque expression. The simulations performed in MATLAB are compared with a study in the literature using the related torque expression. Finally, the simulations are repeated for all coefficient parameters in the torque expression and the necessity of including the relevant parameters in the optimization was examined.

To Cite: Telli Çetin S., Eser S. Esnek Uzunlu Bir Manipülatörde Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile Optimize Edilen Kontrolcü Parametreleri Etkilerinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(2): 1230-1242.

Giriş

Geleneksel endüstriyel manipülatörler, esnek manipülatörler ile karşılaştırıldıklarında daha rijit ama aynı zamanda daha ağır bir yapıya sahiptir. Bu türden bir tercihin altında yatan temel sebepler, titreşim hareketlerinden kaçınmak ve daha başarılı bir konum kontrolü gerçekleştirmektir. Buna karşılık, taşınabilirliğin, enerji verimliliğinin, yüksek çalışma hızlarının ve daha güvenli bir çalışma operasyonu gerçekleştirmenin amaç edinilmesi, araştırmacıları esnek uzuvlu manipülatörler üzerine çalışmaya yönlendirmiştir. Hareket esnasında meydana gelen titreşimler ise, esnek uzuvlu manipülatörlerin kontrolünde karşılaşılan ve çözülmesi gereken önemli bir sorundur. Bu nedenle, esnek uzuvlu manipülatörlerin konum ve titreşim kontrolü üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, esnek uzuv modellemesinde genellikle Euler-Bernoulli veya Timoshenko kiriş teorisinden faydalandığı görülmektedir. Eğilme momenti etkilerinin dikkate alındığı, kirişte meydana gelen kayma ve dönme hareketi ile oluşan eylemsizlik momenti etkilerinin ise ihmal edildiği durumlarda Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılmaktadır. Uzuv boyunun kesitine oranla kısa olduğu durumlarda ise Timoshenko kiriş teorisi tercih edilmektedir (Dwivedy ve Eberhard, 2006).

Esnek uzuvlu manipülatör, sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahiptir. İndirgenmiş parametreler metodu, varsayılan modlar metodu ve sonlu elemanlar metodu, esnek uzuvlu manipülatörü sonlu sayıda denklem ile ifade etmek için yaygın olarak kullanılan metotlardır. Bu metotların yanı sıra, deneysel verilerden faydalanılarak modellenmenin gerçekleştirildiği çalışmalar da literatürde yer almaktadır (Alam ve Tokhi, 2007; Supriyono ve Tokhi, 2012).

Esnek uzuvlu manipülatörler üzerine uzun yıllardır çalışmalar yürütülmektedir (Sakawa ve ark., 1985). Kontrol çalışmaları, günümüzde de güncelliğini koruyarak araştırmalara konu olmaya devam etmektedir.

He ve Ge (2015), Euler-Bernoulli kirişinin titreşim kontrolü için yeni bir bariyer Lyapunov fonksiyonu önermiştir. Ardından, ilgili fonksiyon sistem parametrelerinin bilinmediği durumlarda da kullanılabilir şekilde geliştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda kirişte meydana gelen titreşimlerin başarılı şekilde sönümlendiği sonucuna ulaşılmıştır. Liu ve ark.(2018), Euler-Bernoulli kirişinde meydana gelen titreşimleri sönümlemek için geri adım atma yöntemi ile bir kontrolcü tasarlamıştır. He ve Sun (2016), yayılı bozucu giriş altında esnek manipülatörün kontrolü için, manipülatörün gerçek modeli üzerinden bir kontrolcü tasarlamıştır. Simülasyonlar sonucunda manipülatörün hedeflenen konuma ulaştığı ve titreşim hareketinin de başarılı şekilde sönümlendiği görülmüştür. Liu ve ark. (2016), çalışmalarında parametrik belirsizliklerin ve dış bozucuların etkisindeki esnek uzuvlu manipülatör için pertürbasyon yaklaşımı ile bir kontrolcü oluşturmuştur. Sonuçlar ise katsayıları uygun değerlerde seçilen PD kontrolcü ile karşılaştırılmıştır. İlgili kontrolcü ile bozucu giriş ve parametre belirsizlikleri etkisinde bile başarılı bir kontrol sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır. Yang ve Liu (2016), esnek uzuvlu manipülatör için gözlemci temelli bir kontrolcü tasarlamıştır. Çalışmanın sonucunda, esnek uzuvlu manipülatörün istenen konuma ulaşma ve titreşim sönümleme amaçlarını

gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Buna karşılık, ilgili yöntemin parametre belirsizlikleri ve bozucu giriş etkileri ile baş edemediği vurgulanmıştır. Zhao ve ark.(2019), esnek uzuvlu manipülatör için bozucu giriş gözlemcisine dayalı bir kontrolcü geliştirmiştir. Böylece esnek uzuv amaçlanan konuma ulaşırken, bozucu giriş etkilerinin de elimine edildiği ve titreşimin sönümlendiği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Yapay sinir ağları, esnek uzuvlu manipülatörlerin kontrolünde faydalanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Sun ve ark. (2017), esnek manipülatör kontrolü için adaptif yapay sinir ağları ile kontrolcü oluşturmuştur. Çalışma kapsamında ilk olarak uzvun açısız konum ve hız değerlerinin bilindiği kabulü ile tam durum geri beslemesi kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ardından, açısız hız değerinin ölçülemediği durum göz önüne alınarak gözlemci tasarlanmış ve kontrol gerçekleştirilmiştir. Yang ve Tan (2018), çalışmalarında yapay sinir ağlarına dayanan kayan kipli kontrol yöntemi tasarlamıştır. Bu sayede kesin olmayan sistem parametreleri ve bozucu giriş durumundaki esnek manipülatörün kontrolü sağlanmıştır. Ancak, yöntemin giriş doygunluğu problemi ile baş edemediği de belirtilmiştir. Xu (2018), yapay sinir ağları ve bozucu giriş gözlemcisi tasarlayarak iki uzuvlu esnek bir manipülatörün kontrolünü gerçekleştirmiştir. Sun ve ark.(2018), bulanık mantık ve yapay sinir ağları ile kontrolcü oluşturmuş, başarılı bir yörünge kontrolü ve titreşim sönümlenme gerçekleştirmiştir.

Esnek manipülatörler için farklı yöntemler ile elde edilen kontrolcü ifadelerinde yer alan kazanç katsayılarının, deneme yanılma yöntemi ile belirlendiği çalışmaların yanı sıra, ilgili katsayıların çeşitli optimizasyon yöntemleri ile optimize edildiği çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Loudini (2013), çalışmasında esnek uzuvlu bir manipülatörün kontrolünde bulanık mantık tipi PD kontrolcü kullanmıştır. Kontrolcü kazanç katsayıları ilk aşamada deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiş, ikinci aşamada ise Genetik Algoritma (GA) ile kazanç katsayıları optimize edilmiştir. Meng ve ark. (2018), esnek manipülatör için sistemin toplam enerji ifadesinden faydalanarak bir kontrol torku tanımlamıştır. Kontrol torku değerinin belirlenmesinde bulanık mantık destekli GA kullanılmıştır. Bulanık mantık, optimizasyon amaç fonksiyonunda yer alan ağırlık katsayısının simülasyon esnasında uygun değerlere güncellenmesi için kullanılmıştır. GA ise kontrol torkunda yer alan üç parametreden birinin kontrol amacına uygun şekilde optimize edilmesi için kullanılmıştır. Diğer iki parametre ise uygun sabit değerlerde seçilmiştir.

Bu çalışmanın amacı; Meng ve ark. (2018) tarafından sistem enerjisinden faydalanılarak oluşturulan kontrol torku için, farklı bir optimizasyon yöntemi ve amaç fonksiyonu geliştirilerek sonuçların iyileştirilmesi ve referans çalışmada sabit tutulan parametrelerin de farklı kombinasyonlar ile online optimizasyon sürecine dahil edildiği alternatif simülasyonlar ile tork ifadesinde yer alan bağımsız parametrelerin etkilerinin incelenmesidir.

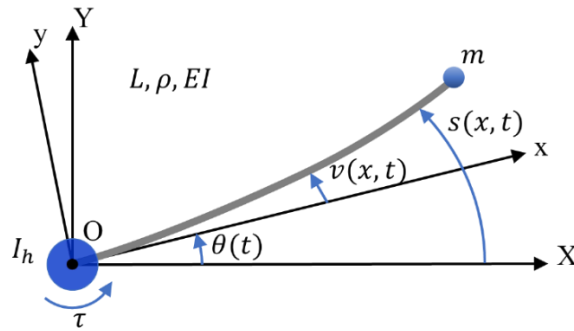
Bu amaçla, ilk olarak, bulanık mantık destekli GA optimizasyonu yerine Karaboğa (2005) tarafından oluşturulan Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması'na dayanan bir kontrolcü geliştirilmiştir. Amaç fonksiyonu güncellenmiş ve içerdiği ağırlık katsayısı için uygun sabit bir değer atanmıştır. Geliştirilen kontrolcü ile elde edilen sonuçlar, referans çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İkinci adımda ise,

kontrolcüde yer alan ve referans çalışmada sabit değerlerde alınan tork parametrelerin de optimize edildiği simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, tork ifadesinde yer alan üç parametrenin mevcut tüm kombinasyonları ile tekrarlanmıştır. Simülasyon sonuçları; amaçlanan açısal konumda meydana gelen aşma, son konuma ulaşma süreleri, hareket esnasında uç noktada meydana gelen maksimum salınım ve ihtiyaç duyulan maksimum tork değeri üzerinden karşılaştırılmıştır.

Dinamik Model ve Kontrolcü

Dinamik Model

Esnek uzuvlu manipülâtörün geometrik modeli Şekil 1 ile gösterilmiştir. Burada, mutlak koordinat takımı XOY , yerel koordinat takımı xOy , esnek uzvun birim uzunluğunun kütlesi ρ , esnek uzuv uzunluğu L , esnek uzuv eğilme rijitliği EI , uç kütle m , bağlantı göbeği ataleti I_h , kontrol torku τ , esnek uzvun mutlak koordinat takımına göre açısal konumu $\theta(t)$, esnek uzuv üzerinde bir noktanın eğilmesi $v(x, t)$, son olarak esnek uzuv üzerinde bir noktanın mutlak koordinat takımına göre konumu $s(x, t)$ ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Esnek uzuvlu manipülâtörün geometrik modeli

Çalışmaya konu olan esnek uzuvlu manipülâtör yalnızca yatay ekseninde hareket edebilmektedir. Esnek uzva ve uç kütleyle etki eden yer çekiminin ihmal edilebilir olduğu kabulü yapılmıştır. Ayrıca, esnek uzuv uzunluğunun kesitine göre yeterli boyutta olduğu kabul edilerek kesit dönme atalet etkileri ve kesme kuvveti etkileri de ihmal edilmiştir. Bu kabuller altında esnek uzuv Euler-Bernoulli modeli ile ifade edilmiştir. Son olarak, uç kütle için noktasal kütle kabulü yapılmıştır.

Uzuv üzerinde herhangi bir noktanın mutlak koordinat takımına göre pozisyonu Denklem 1 ile ifade edilmiştir.

$$s(x, t) = x\theta(t) + v(x, t) \quad (1)$$

Varsayılan modlar metodu kullanılarak esnek uzuvlu manipülâtör sisteminin dinamik ifadesi Denklem 2 ile gösterilen yapıda elde edilmiştir (Eser ve Çetin, 2021).

$$M\ddot{X} + KX = T \quad (2)$$

Denklem 2’de yer alan \mathbf{X} , bağımsız parametreleri ve türevlerini içermektedir. Matris elemanları Denklem 3 ile verilmiştir.

$$\mathbf{X} = [\theta(t) \quad q_1(t) \quad \dots \quad q_n(t) \quad \dot{\theta}(t) \quad \dot{q}_1(t) \quad \dots \quad \dot{q}_n(t)]^T \quad (3)$$

Denklem 4-7 ile \mathbf{M} atalet matrisinin elemanları ifade edilmiştir. Matriste yer alan diğer terimler ise sıfırdır.

$$\mathbf{M}_{(1, 1)} = I_h + \rho \frac{L^3}{3} + mL^2 \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{(1, i+1)} = \rho \int_0^L x \phi_i(x) dx + mL \phi_i(L) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{(i+1, 1)} = \mathbf{M}_{(1, i+1)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{(i+1, i+1)} = \rho \int_0^L \phi_i^2(x) dx + m \phi_i^2(L) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Katılık matrisi \mathbf{K} köşegen matris yapısına sahiptir ve elemanları Denklem 8 ve 9 ile ifade edilmiştir.

$$\mathbf{K}_{(1, 1)} = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_{(i+1, i+1)} = EI \int_0^L \phi_i''^2(x) dx \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Sağ taraf matrisi ise Denklem 10 ile gösterilmiştir.

$$\mathbf{T} = [\tau \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (10)$$

Kontrolcü

Kontrolcü, sistemin toplam enerji ifadesinden faydalanılarak oluşturulmuştur. Esnek uzuvlu manipülatörün sahip olduğu toplam enerji, kinetik ve potansiyel enerjiler toplamı olarak Denklem 11 ile ifade edilmiştir.

$$E = E_K + E_P \quad (11)$$

Sistemin kinetik ve potansiyel enerjisinin ifade edilmesinde Denklem 2 ile verilen dinamik ifadeden yararlanılmıştır. Kinetik enerji ifadesi, atalet matrisi üzerinden Denklem 12 ile, potansiyel enerji ifadesi ise katılık matrisi üzerinden Denklem 13 ile gösterilmiştir.

$$E_K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} \quad (12)$$

$$E_P = \frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{K} \mathbf{X} \quad (13)$$

Sistemin sahip olduğu toplam enerjinin zamana göre türevi alındığında elde edilen

$$\dot{E} = \dot{\theta}(t)\tau(t) \quad (14)$$

ifadesi incelendiğinde, enerjinin zamanla değişiminin uzvun açısal hızına ve sisteme ilgili anda etki eden tork değerine bağlı olduğu görülmektedir.

Meng ve ark. (2018), Denklem 11 ile verilen sistemin toplam enerji ifadesini içerecek şekilde

$$V(t) = E + \frac{1}{2}r_1(\theta(t) - \theta_d) + \frac{1}{2}r_2\dot{\theta}^2(t) \quad (15)$$

Lyapunov fonksiyonu önerisinde bulunmuştur. İlgili fonksiyondan yola çıkarak ve Denklem 14 ile verilen enerjinin zaman türevi ifadesini de dikkate alarak kontrol torkunu

$$\tau(t) = \frac{r_1}{1 + r_2m_{11}}(\theta_d - \theta(t)) + \frac{r_2}{1 + r_2m_{11}}k + \frac{-r_3}{1 + r_2m_{11}}\dot{\theta}(t) \quad (16)$$

şeklinde tanımlamıştır. Denklem 16 'de yer alan m_{11} ve k terimleri ise Denklem 17 ve 18 ile ifade edilmiştir.

$$m_{11} = \mathbf{M}_{(1,1)} \quad (17)$$

$$k = (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{X})_{(1,1)} \quad (18)$$

Bu çalışmada Meng ve ark. (2018) tarafından oluşturulan tork ifadesi kontrol torku olarak kullanılmıştır. Tork ifadesinde, Denklem 16'da görüldüğü üzere üç farklı kazanç katsayısı yer almaktadır. r_1 parametresi uzvun açısal konum farkına ilişkin kazanç katsayısı içinde yer almaktadır ve PID kontrolcüde yer alan oransal etki benzeri etki göstermektedir. r_3 parametresi ise açısal hız terimine ilişkin kazanç katsayısı içinde yer almakta ve PID kontrolcüde yer alan türev etki benzeri bir etki göstermektedir. r_2 parametresi ise sistemin potansiyel enerjisi ile ilintili olan k teriminin kazanç katsayısının yanı sıra konum farkı ve açısal hız kazanç katsayılarında da yer almaktadır. Denklem 17 ile ifade edilen m_{11} daima pozitif değer alacağı için r_2 parametresi ile k terimine ilişkin katsayı ters orantılıdır. Artan r_2 değerleri ile sistemin salınım hareketine ilişkin değerleri içeren k terimi katsayısının değeri azalmaktadır. Benzer şekilde, artan r_2 değerleri diğer terimlerin katsayı

değerlerinde de azalmaya neden olmaktadır. Dolayısı ile r_2 parametresindeki değişim tüm kazanç katsayılarını etkilemektedir.

Referans çalışmada r_1 ve r_2 katsayıları uygun değerlerde alınmış ve yalnızca r_3 değeri optimize edilmiştir. Bu çalışmada öncelikle farklı bir amaç fonksiyonu ve ABC Algoritması kullanılarak r_3 parametresi optimize edilmiş ve sonuçlar referans çalışma ile karşılaştırılmıştır. Sonraki adımda diğer parametrelerin optimizasyonunu da barındıran mümkün olan tüm kombinasyonlar için sonuçlar elde edilmiş ve performans karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon

Optimizasyon işlemi için seçilen amaç fonksiyonu Denklem 19 ile verilmiştir. Amaç fonksiyonu esnek uzun amaçlanan konuma ulaşması ve sistemin toplam enerjisinin minimize edilmesi amaçlarının eşit oranda etkisi ile oluşturulmuştur.

$$f_a = 0,5(\theta - \theta_a)^2 + 0,5E \quad (19)$$

Optimizasyon işlemi, simülasyon süresince $\Delta t = 0,5 s$ zaman aralıklarında tekrarlanmıştır ve tork parametreleri güncellenmiştir. ABC Algoritması'na ilişkin parametreler deneme yanılma yöntemi sonucunda, kaynak sayısı 5, kolonide yer alan arı sayısı 10, geliştirilemeyen kaynağı bırakma döngü sayısı 10 ve maksimum döngü sayısı 5 olarak seçilmiştir. Algoritma adımları ise aşağıda ifade edilmiştir. Adımlarda kaynak olarak bahsedilen optimize edilecek parametrenin sayısal değer adaylarıdır. 3. adımdan 6. adıma kadar olan süreç maksimum döngü sayısına ulaşılan kadar devam ettirilmiş ve maksimum döngü sonucunda elde edilen en iyi kaynak değeri, ilgili Δt zaman aralığı için parametre değeri olarak seçilmiştir.

Optimize edilecek parametre için en düşük ve en yüksek değerler belirlenmiş, böylece

1. Adım: arama uzayı oluşturulmuştur. Bu çalışmada arama uzayı alt sınırı 0, üst sınırı ise 5 olarak seçilmiştir.
2. Adım: Kâşif arılar ile arama uzayı içinde rastgele kaynaklar belirlenmiştir.

Döngü Başlangıcı

3. Adım: İşçi arılar ile belirlenen parametre yakınlarında yeni kaynak araması gerçekleştirilmiştir.
4. Adım: İşçi arıların belirlediği parametrelerin, amaç fonksiyonu doğrultusunda belirlenen ağırlık oranlarına göre gözcü arılar kaynak bölgelerine dağıtılmıştır.
5. Adım: Gözcü arılar da tıpkı işçi arılar gibi buldukları kaynak çevresinde yeni kaynak araması gerçekleştirmiştir.
6. Adım: Geliştirilmeye çalışılan kaynaklar arasında kaynak bırakma döngüsünü aşanlar

belirlenmiş ve ilgili kaynak yerine kâşif arı tarafından yeniden rastgele kaynak değeri oluşturulmuştur.

Döngü Sonu

Bulgular ve Tartışma

Çalışmada ilk olarak r_3 parametresi optimizasyonuna ilişkin sonuçlar referans çalışma ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma açısız konum, uç nokta salınımları, açısız hız ve kontrol torku grafikleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Diğer adımda ise, kontrol torku ifadesinde yer alan parametrelerin optimizasyonları üzerinden karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Parametre etkileri, açısız konum aşma değerleri, uç noktada meydana gelen maksimum salınım değerleri, son konuma ulaşma süreleri ve gerek duyulan maksimum tork değerleri üzerinden incelenmiştir. Referans çalışma ile karşılaştırma gerçekleştirildiği için referans çalışma ile aynı değerlerde seçilen esnek uzuvlu manipülatöre ilişkin değerler Tablo 1 ile verilmiştir. Hedeflenen açısız konum, referans çalışmada olduğu gibi $\theta_d = 0,5 \text{ rad}$ seçilmiştir.

Tablo 1. Esnek uzuvlu manipülatör parametreleri

Parametreler	Tanım	Değer	Birim
L	Uzuv uzunluğu	1	m
EI	Eğilme rijitliği	3	Nm^2
ρ	Esnek uzvun birim uzunluk kütlesi	1	kgm^{-1}
I_h	Bağlantı göbeği ataleti	0,04	kgm^2
m	Uç kütle	0,2	kg

Referans Çalışma ile Karşılaştırma

Bu çalışmada kullanılan kontrol yönteminin referans alınan Meng ve ark. 2018 çalışması ile performans karşılaştırması için, referans çalışmada olduğu gibi yalnızca r_3 parametresi optimize edilmiştir. Tork ifadesindeki diğer parametrelerin değerleri ise referans çalışmada olduğu gibi $r_1 = 4,2$ ve $r_2 = 0,9$ olarak seçilmiştir. Karşılaştırma sonuçları Şekil 2 ile gösterilmiştir. Lejantta yer alan “ABC r3”, bu çalışmada önerilen kontrolcü ile elde edilen sonuçları, “Referans Kontrolcü” ise Meng ve ark., 2018 çalışmasında elde edilen sonuçları ifade etmektedir.

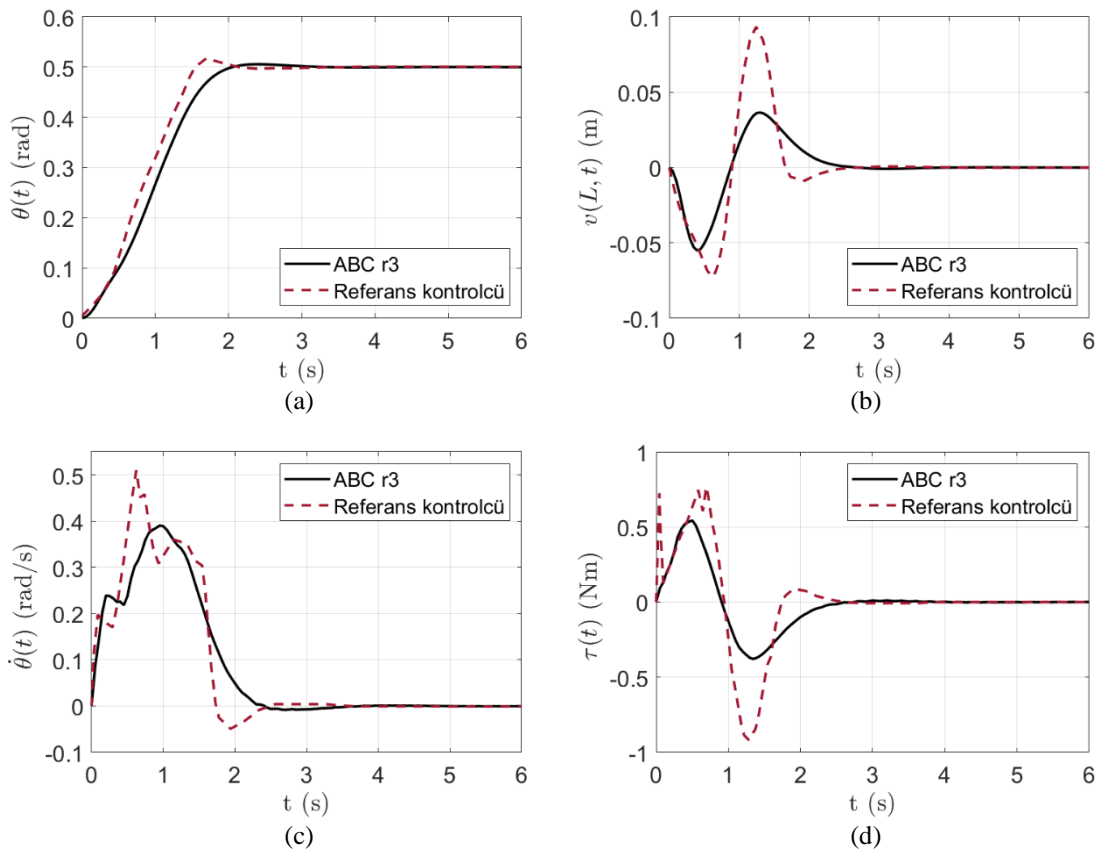
Şekil 2(a) ile gösterilen, açısız konum grafikleri incelendiğinde, referans çalışma ile %3 civarında aşma görülürken, bu çalışmada önerilen yöntem sonucunda bu değer %0,8 civarına düşürülmüştür. Referans çalışmaya benzer olarak önerilen yöntem ile de yaklaşık 2 s sonunda hedeflenen açısız konuma ulaşılmış, böylece aşma azaltılırken hedeflenen açısız konuma ulaşma süresinde artışa sebep olunmamıştır.

Şekil 2(b) ile hareket sırasında uç noktada meydana gelen salınım hareketleri incelendiğinde ise bu çalışmada önerilen yöntem ile daha düşük değerlerde salınım meydana geldiği görülmüştür. Referans çalışmada meydana gelen maksimum salınım değeri 0,1 m değerine yaklaşırken bu çalışma ile elde edilen uç nokta salınımı için maksimum değer 0,05 m civarında olmuştur. Sonuç olarak hareket

sırasında meydana gelen salınım hareketinde yaklaşık %50 azaltılmıştır. Ek olarak, iki yöntemde de salınımın 3,5 s sonunda tamamen sönümlendiği görülmüştür.

Simülasyonlar sırasında elde edilen açısal hız değerleri ise Şekil 2(c) ile gösterilmiştir. Açısal hızlar incelendiğinde ise önerilen yöntem ile açısal hızın daha yumuşak bir değişim gösterdiği, referans çalışmanın aksine ani artış ve azalışların daha az olduğu görülmüştür.

Son olarak, kontrol torku değerinde meydana gelen değişimler Şekil 2(d) ile gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, bu çalışmada önerilen yöntem ile gerek duyulan maksimum tork değeri 0,5 Nm yakınlarında olurken, referans çalışmada bu değer 1 Nm değerine yaklaşmaktadır. Böylelikle, bu çalışmada önerilen yöntemin kullanılması durumunda ihtiyaç duyulan tork değerinde yaklaşık %50 azalma olacağı sonucuna ulaşılmıştır.



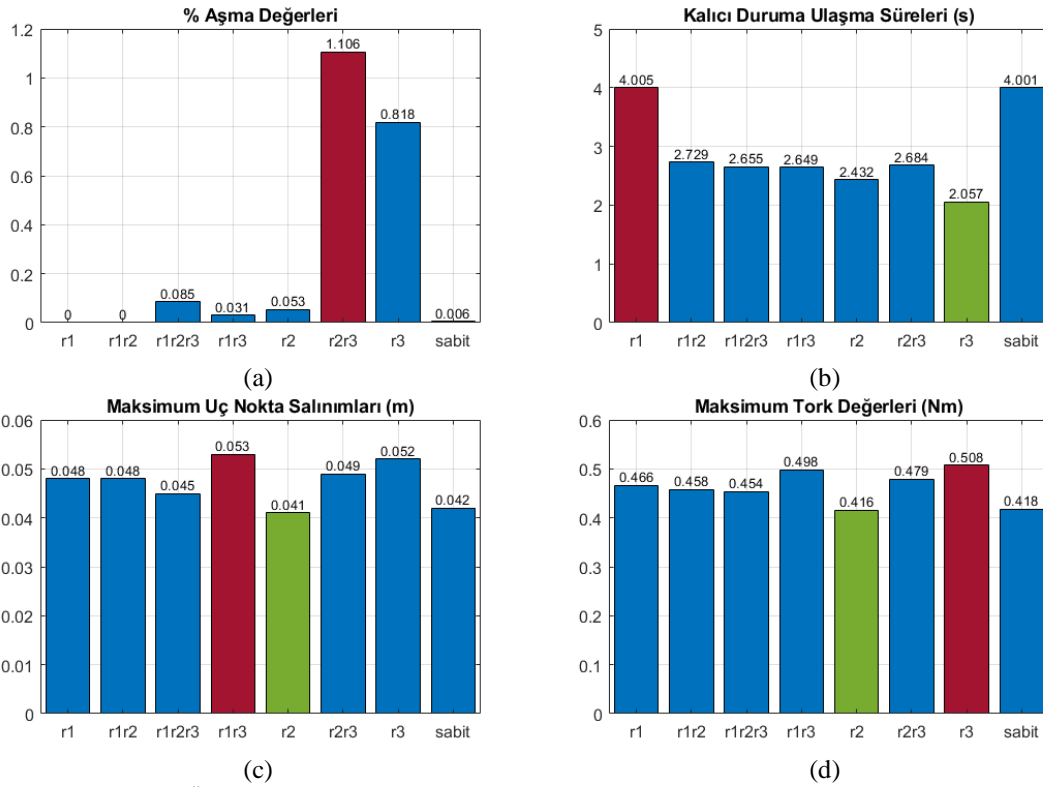
Şekil 2. Önerilen kontrol yöntemi sonuçları ile referans çalışma sonuçlarının karşılaştırması, **(a)** açısal konum, **(b)** uç nokta salınımı, **(c)** açısal hız, **(d)** tork

Tork Parametreleri Performans Karşılaştırması

Denklem 16 ile verilen kontrol torkunda yer alan parametrelerin simülasyon sonuçlarına etkisinin incelenmesi için farklı parametre kombinasyonları ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, esnek uzvun kalıcı duruma ulaşma süreleri, açısal konumda meydana gelen aşmalar, hareket sırasında görülen maksimum salınım değerleri ve ihtiyaç duyulan maksimum tork değerleri üzerinden Şekil 3 ile verilmiştir. Şekil 3(a) ile $\theta(t)$ için % aşma değerleri, Şekil 3(b) ile $s(L,t)$ konumunun kalıcı duruma ulaşma süreleri, Şekil 3(c) ile $v(L,t)$ salınımları ve Şekil 3(d) ile simülasyonlar

sırasında gerek duyulan $\tau(t)$ değerleri verilmiştir. Grafiklerin yatay ekseninde yer alan parametreler, simülasyonlarda optimize edilen parametreleri göstermektedir. Parametrelerin ilgili simülasyonlarda sabit değerler alması durumunda ise, uygun sabit değerler olan $r_1 = 4,9$, $r_2 = 0,9$ ve $r_3 = 4,9$ değerleri kullanılmıştır. En iyi ve en kötü, grafik üzerinde farklı renklerde gösterilmiştir.

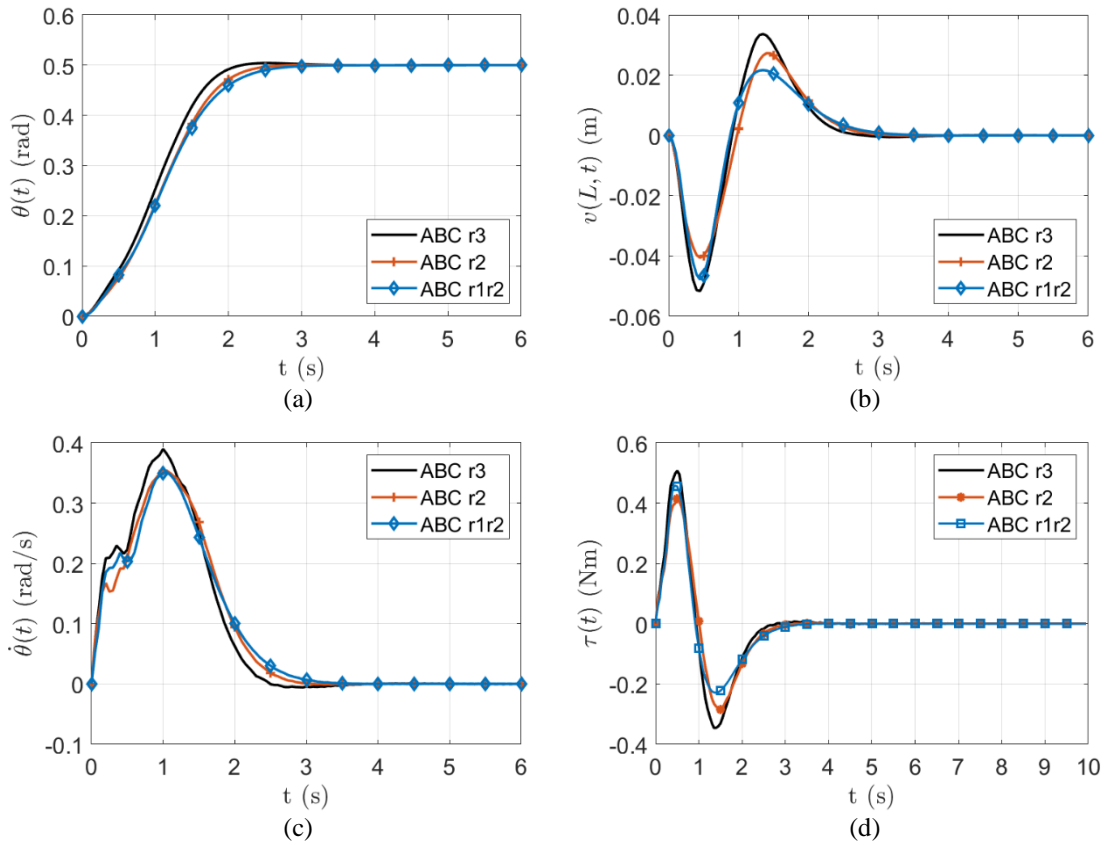
Şekil 3(a) ile gösterilen aşma değerleri incelendiğinde, r_2 ve r_3 parametrelerinin bir arada optimizasyonun kötü sonuç, r_3 parametresinin tek başına optimizasyonu ise ikinci en kötü sonuç olmuştur. Şekil 3(b) ile gösterilen kalıcı duruma ulaşma süreleri incelendiğinde, r_1 parametresinin optimizasyonunda ve tüm parametrelerin uygun sabit değerler aldığı simülasyonda en kötü sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3(c) incelendiğinde, en yüksek uç nokta salınım değerinin, r_1 ve r_3 parametrelerinin bir arada optimizasyonu ile, ikinci en yüksek uç nokta salınım değerinin ise r_3 parametresinin optimizasyonunda elde edildiği görülmüştür. Şekil 3(d)'de görüleceği üzere, r_3 parametresinin optimizasyonu sonucunda en yüksek tork gereksinimini oluşturmuştur. r_1 ve r_3 parametrelerinin birlikte optimizasyonu ve r_2 ve r_3 parametrelerinin birlikte optimizasyonu ise en yüksek tork gereksinimi duyulan sırasıyla ikinci ve üçüncü simülasyon olmuştur.



Şekil 3. Önerilen kontrol yöntemi ile farklı optimizasyon sonuçları karşılaştırması

r_2 teriminin tek başına optimize edilmesi, tüm kazanç katsayılarında ortak olarak bulunmasının sonucunda tüm sonuçlarda ortalama veya ortalamanın altında değerler ile karşılaşılmasını sağlamıştır. Grafiklerde görüleceği üzere en düşük maksimum salınım ve en düşük maksimum tork değerleri r_2 optimizasyonu ile elde edilmiştir. Bunlara ek olarak, düşük aşma değeri ve düşük kalıcı duruma ulaşma süresi de r_2 optimizasyonu ile elde edilmiştir.

Eğer sistemde aşma durumunun gerçekleşmesi istenmiyor ve buna ek olarak hızlı son konuma ulaşma ve düşük maksimum salınım değeri bir arada isteniyor ise r_1 ve r_2 optimizasyonu en uygun seçenek olacaktır. Hareket sırasında meydana gelen uç nokta salınımlarının minimize edilmesinin daha önemli olduğu durumlarda ise tek başına r_2 optimizasyonunun seçilmesi daha uygun bir tercih olacaktır. İlgili iki optimizasyon sonuçları ile, referans çalışmadan daha iyi bir performans gösterdiği Şekil 2 ile aktarılan r_3 optimizasyonu karşılaştırılması ise Şekil 4 ile gösterilmiştir. Görüldüğü üzere tek parametre optimizasyonu seçilmesi durumunda r_3 yerine r_2 parametresinin tercih edilmesi ile daha başarılı bir kontrol elde edilmiştir.



Şekil 4. ABC ile optimize edilmiş r_3 , r_2 , r_1 ve r_2 parametreleri sonuç karşılaştırması, (a) açılmal konum, (b) uç nokta salınımları, (c) açılmal hız, (d) tork

Sonuç

Bu çalışmada, literatürde yer alan bir kontrolcünün kontrol parametreleri Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile farklı kombinasyonlarda optimize edilmiş ve performansları incelenmiştir.

Kontrolcüde yer alan tek parametrenin optimizasyonuna ilişkin sonuçlar, aynı parametrenin optimize edildiği Meng ve ark., 2018 referans çalışması ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile optimizasyon sonucunda özellikle esnek uzvun uç nokta salınımlarında ve ihtiyaç duyulacak maksimum tork değerlerinde referans çalışmaya göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Uzun açılmal konumunda meydana gelen aşmanın da referans çalışmaya oranla daha düşük seviyelerde kaldığı simülasyonlar sonucunda gözlemlenmiştir.

Kontrolcüde yer alan tüm parametrelerin mümkün olan tüm kombinasyonları ile simülasyonlar gerçekleştirilerek kontrol performansına etkileri incelenmiştir. Sonuçların yorumlanması, aşma değerleri, kalıcı duruma ulaşma süreleri, uç nokta salınım değerleri ve ihtiyaç duyulan tork değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Böylece, mevcut parametrelerin hangilerinin optimizasyon sürecine dahil edildiği durumda daha başarılı bir kontrol gerçekleştirildiği belirlenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- Alam MS., Tokhi MO. Dynamic modelling of a single-link flexible manipulator system: A particle swarm optimisation approach. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control* 2007; 26(1): 57–72. doi:10.1260/026309207781487466
- Dwivedy SK., Eberhard P. Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review. *Mechanism and Machine Theory* 2006; 41(7): 749-777. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2006.01.014
- Eser S., Çetin ST. Optimum control of a flexible single link manipulator with artificial bee colony algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 2022; 236(7): 3731-3742. doi:10.1177/09544062211045480
- He W., Ge SS. Vibration control of a flexible beam with output constraint. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2015; 62(8): 5023–5030. doi:10.1109/TIE.2015.2400427
- He W., Sun C. Boundary feedback stabilisation of a flexible robotic manipulator with constraint. *International Journal of Control* 2016; 89(3): 635–651. doi:10.1080/00207179.2015.1088966
- Karaboğa D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimisation. *Technical Report-TR06* 2005.
- Liu Z., Liu J., He W. Adaptive boundary control of a flexible manipulator with input saturation. *International Journal of Control* 2016; 89(6): 1191–1202. doi:10.1080/00207179.2015.1125022
- Liu Z., Liu J., He W. Boundary control of an Euler–Bernoulli beam with input and output restrictions. *Nonlinear Dynamics* 2018; 92(2): 531–541. doi:10.1007/s11071-018-4073-9
- Loudini M. Modelling and intelligent control of an elastic link robot manipulator. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 2013; doi:10.5772/51102
- Meng QX., Lai XZ., Wang YW., Wu M. A fast stable control strategy based on system energy for a planar single-link flexible manipulator. *Nonlinear Dynamics* 2018; 94(1): 615–626. doi:10.1007/s11071-018-4380-1

- Sakawa Y., Matsuno F., Fukushima S. Modeling and feedback control of a flexible arm. *Journal of Robotic Systems* 1985; 2(4): 453–472. doi:10.1002/rob.4620020409
- Sun C., Gao H., He W., Yu Y. Fuzzy neural network control of a flexible robotic manipulator using assumed mode method. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 2018; 29(11): 5214–5227. doi:10.1109/TNNLS.2017.2743103
- Sun C., He W., Hong J. Neural network control of a flexible robotic manipulator using the lumped spring-mass model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 2017; 47(8): 1863–1874. doi:10.1109/TSMC.2016.2562506
- Supriyono H., Tokhi MO. Parametric modelling approach using bacterial foraging algorithms for modelling of flexible manipulator systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2012; 25(5): 898–916. doi:10.1016/j.engappai.2012.03.004
- Xu B. Composite learning control of flexible-link manipulator using NN and DOB. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 2018; 48(11): 1979–1985. doi:10.1109/TSMC.2017.2700433
- Yang HJ., Tan M. Sliding mode control for flexible-link manipulators based on adaptive neural networks. *International Journal of Automation and Computing* 2018; 15(2): 239–248. doi:10.1007/s11633-018-1122-2
- Yang H., Liu J. Distributed piezoelectric vibration control for a flexible-link manipulator based on an observer in the form of partial differential equations. *Journal of Sound and Vibration* 2016; 363: 77–96. doi:10.1016/j.jsv.2015.11.001
- Zhao Z., He X., Ahn CK. Boundary disturbance observer-based control of a vibrating single-link flexible manipulator. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 2019; 51(4): 2382–2390. doi:10.1109/tsmc.2019.2912900