



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Uydu Esnek Kanatlarının Artık Titreşim Kontrolüne Yönelik Yapay Arı Kolonisi Ve Guguk Kuşu Optimizasyon Algoritmaları ile LQR Denetleyici Tasarımı

Artificial Bee Colony and Cuckoo Search Optimization Algorithms Based LQR Controller Design for Residual Vibration Control of Satellite Flexible Wings

Ferhat Kaya^{1*}, Çağlar Conker²

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay, TÜRKİYE

² İskenderun Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Hatay, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author*: ferhatkaya.mfibe18@iste.edu.tr

Öz

Sunulan çalışma, esnek bir uydu kanadı için doğrusal kuadratik regülatör (LQR) denetleyici parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonunda Yapay Arı Kolonisi ve Guguk Kuşu metasezgisel optimizasyon algoritmalarının tasarımı ve performans analizi hakkında ayrıntılar sunmaktadır. Kontrol yanıtlarının önemli parametreleri göz önünde bulundurularak yeni bir çoklu amaç fonksiyonu tasarlanmış ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Guguk Kuşu (CS) metasezgisel algoritmaları ile optimize edilmiştir. Algoritmaların başlangıç değerleri için farklı farklı üçer konfigürasyon belirlenerek bu konfigürasyonlar üç farklı (10,50 ve 100) popülasyon boyutu değerleri için 100 iterasyonda simülasyonlar yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha başarılı kontrol yanıtlarına ulaşan konfigürasyonlar ile literatürde aynı düzenek ile yapılan bazı çalışmalar karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde mevcut bulunan, PSO, m-PSO algoritmaları ve geleneksel tasarlanmış LQR denetleyici çalışmaları ile kıyaslanarak önerilen yaklaşımın etkinliği gösterilmiştir. Önerilen çoklu amaç fonksiyonu ve Guguk Kuşu Algoritması, esnek uydu kanadı sapma açısında PSO algoritmasına kıyasla %37,56 ve m-PSO algoritması ile karşılaştırıldığında ise %61,87 oranında daha üstün bir performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Uydu Esnek Kanadı, Çok Amaçlı Optimizasyon, LQR, Yapay Arı Kolonisi, Guguk Kuşu Algoritması

Abstract

The present study provides details on the design and performance analysis of the Artificial Bee Colony (ABC) and Cuckoo Search (CS) metaheuristic optimization algorithms for the multi-objective optimization of linear quadratic regulator (LQR) controller parameters for a flexible satellite wing. A novel multi-objective function was designed, taking into account significant parameters of control responses, and was optimized using ABC and CS metaheuristic algorithms. Different initial configurations were determined for the algorithms, and simulations were performed for 100 iterations for three different (10, 50, and 100) population sizes. The results obtained were compared to identify the configurations that led to more successful control responses. These configurations were then compared to some studies in the literature that used the same system. The obtained results were compared with the existing literature on PSO, m-PSO algorithms, and traditionally designed LQR controller studies to demonstrate the effectiveness of the proposed approach. The proposed multi-objective function and the Cuckoo Algorithm showed a superior performance of 37.56% compared to the PSO algorithm and 61.87% compared to the m-PSO algorithm in flexible satellite wing angle.

Keywords: Flexible Satellite Wings, Multi-Objective Optimization, LQR, Artificial Bee Colony, Cuckoo Search

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Spacecraft design and development are of critical importance for both military and civilian purposes. The utilization of flexible wing structures and flexible linkage components provides significant advantages for spacecraft in numerous space missions. However, these flexible structures can reduce performance due to residual vibrations emerging from their motion and structure. In the presented study, a flexible link manipulator developed by Quanser has been utilized as a prototype for a flexible satellite wing. The LQR (Linear Quadratic Regulator) control technique is used to eliminate the residual vibrations of the system. Traditionally, LQR control weighting

matrices are determined by expert designers. The aim is to ensure that the flexible link manipulator system reaches the desired angular position as soon as possible and to eliminate tip deflections. A new multi-objective function has been designed by considering the important parameters of control responses suitable for this aim. It has been optimized using Artificial Bee Colony (ABC) and Cuckoo Search (CS) metaheuristic optimization algorithms.

The ABC and CS algorithms were examined in three different population sizes (10, 50, and 100) and 100 iterations to determine the optimal LQR control weighting matrices. The

DOI:10.21205/deufmd.2024267716

Atf şekli / How to cite:

Kaya, F., Conker, C. (2024). Uydu Esnek Kanatlarının Artık Titreşim Kontrolüne Yönelik Yapay Arı Kolonisi Ve Guguk Kuşu Optimizasyon Algoritmaları ile LQR Denetleyici Tasarımı. DEUFMD, 26(77), 316-324.

Geliş Tarihi / Received: 09.05.2023

Kabul Tarihi / Accepted: 06.11.2023

initial parameters of the algorithms were obtained through simulation studies for three different configurations. To demonstrate the effectiveness of the designed objective function with the existing literature on PSO, m-PSO algorithms, and traditionally designed LQR controller studies.

Materials and Methods

The mathematical model of the system has been obtained using the Lagrange method, and the motion equations are presented in Eq. 1 and Eq. 2, while the system parameter values are provided in Table 1. These equations define the angular position and tip angle in the system. LQR, one of the closed-loop control approaches known for its stable structure and success in being affected by disturbances, has been employed. LQR Weight matrices are determined using Artificial Bee Colony (ABC) and Cuckoo Search (CS) metaheuristic optimization algorithms. Both algorithms aim to efficiently solve optimization problems based on swarm intelligence.

In Chapter 2, the theoretical background of the motion equations, control structure, designed multi-objective function, and metaheuristic algorithms has been detailed.

Results and Discussion

The parameters for the initialization of the optimization algorithms, specifically the discovery rate of foreign eggs (pa) and the step size (alfa) for the Cuckoo Search Algorithm, were selected as (0.2-0.2), (0.5-1), and (0.7-5), respectively, to create three different configurations. The configurations and the obtained results are shown in Table 3. Similarly, for the Artificial Bee Colony algorithm, three configurations were determined for the modification rate (mr) and termination criterion (A) parameters as (0.3-600), (0.5-200), and (0.8-400), respectively. These configurations are shown in Table 4. These configurations were examined separately for population sizes of 10, 50, and 100, each with 100 iterations, and the obtained results are presented in tables and graphs. It has been observed that within the scope of the study, the Artificial Bee Colony algorithm achieved the lowest objective function value with Configuration-3 at a population size of 100, while the Cuckoo Search algorithm reached the lowest objective function value with Configuration-1 at a population size of 100.

Furthermore, the effectiveness of the designed structure is demonstrated by comparing it with similar studies using the LQR controller found in the literature. It has been observed that the control responses obtained by the ABC and CS algorithms are

more successful compared to the compared studies, and they enhance the control performance. Table 5 presents the Q (q1, q2, q3, q4), R weighting, and gain (K) matrices used for comparison with ABC, CS, and the studies in the literature. The results obtained for the flexible wing tip angle and servo angle are presented in Figure 7 and Figure 8, respectively.

As a result, it has been observed that the proposed multi-objective function and the optimization algorithms used are successful in satellite flexible wing vibration control, and better results have been achieved compared to other studies examined in the literature.

Conclusion

This paper presents the design and performance analysis of ABC, and CS algorithms in optimizing the weighting matrices of the LQR controller for a flexible satellite wing. The main control aim is to suppress residual vibrations due to the system's movement while reaching the desired angular reference as quickly as possible. To address this problem and to provide a solution, a multi-objective function is designed to account for important parameters of the control response. The obtained results were compared with the existing literature on PSO, m-PSO algorithms, and traditionally designed LQR controller studies to demonstrate the effectiveness of the proposed approach. The findings obtained from the end of the study results are listed below;

- The effectiveness of the designed objective function and the CS and ABC algorithms has been demonstrated in optimizing the LQR control weighting matrices and controlling the vibrations of flexible space wings.
- There is a difference of 0.0792% between the settling times of servo angles for the CS and ABC algorithms. The CS algorithm provides a more successful settling time.
- When examining the settling times of servo angles, the CS algorithm shows differences of 82.03% compared to Traditional LQR, 49.80% compared to m-PSO, and 26.14% compared to PSO.
- For the flexible wing structure, the best settling time performance is provided by the Cuckoo Search algorithm. The Cuckoo Search algorithm shows differences of 37.56% compared to PSO, 61.87% compared to m-PSO, and 161.28% compared to the traditional method.

1. Giriş

Askeri ve sivil amaçlar için kullanılan uzay araçlarının tasarımı ve geliştirilmesi güncelliğini koruyan ve araştırmacıların üzerine çalıştığı önemli konulardan birisidir. Uzay teknolojilerinin gelişmesiyle, geliştirilen hava taşıtlarının yapısında birçok yenilik üzerine çalışmalar yapılmaktadır [1]. Uzay manipülatörleri genellikle esnek bağlantılı bileşenler ve esnek kanat yapıları içermektedir. Esnek bağlantılı sistemler, hafif ağırlıkları, düşük ataletleri, düşük enerji tüketimleri, yüksek manevra kabiliyetleri ve iş verimlilikleri nedeniyle birçok uzay görevinde kullanılabilirler [2]. Esnek kanatlara sahip uyduların hareketi sırasında ve sonrasında meydana gelen titreşimler, kanat yapılarında deformasyona yol açabilir. Artık titreşimler uydunun manevra kabiliyetini, ötelenmesini ve dönmesine sebep olabilmekte ve uydunun performansını

doğrudan etkilemektedir [1]. Bu nedenle, söz konusu sistemlerde oluşan artık titreşimlerin etkin bir şekilde giderilmesi ve yüksek maliyetli uzay görevlerinin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için kritik bir öneme sahiptir.

Esnek sistemlerin artık titreşimlerinin yok edilmesi için birçok kontrol tekniği geliştirilmiş olup ilgili problemin çözümüne yönelik çalışmalara devam edilmektedir. Temel olarak titreşim kontrolü için açık çevrim (ileri beslemeli) ve kapalı çevrim (geri beslemeli) olmak üzere iki farklı kontrol yaklaşımı bulunmaktadır. Açık çevrim; sistem çıktısının girdi sinyalinin üzerinde etkisi bulunmadan, sisteme uygun kontrol sinyalinin oluşturulması ile yapılan kontrol yaklaşımıdır. Esnek sistemler için kullanılan ileri beslemeli kontrol uygulamaları olarak girdi şekillendirme çalışmaları [3,4] önemli bir yer tutmaktadır. Kapalı çevrim kontrol yöntemleri ise sistem çıktısının, girdi sinyali üzerinde etkisinin olduğu kontrol yaklaşımlarıdır.

Literatürde esnek yapıli sistemlerin titreşim kontrolü için kayan kipli kontrol [5], PID kontrol [6] gibi geri beslemeli kontrol yaklaşımlarıyla yapılan çalışmalar mevcuttur. Esnek sistemlerin titreşim kontrolüne akıllı çözümleri üretmek için yapay sinir ağları [7], bulanık mantık [8] gibi yapay zeka yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca kontrol yaklaşımlarının avantajlarından yararlanılarak kontrol performanslarını daha iyi noktalara taşımak için en az iki tekniğin beraber kullanılarak yapıldığı kayan kipli kontrol+ girdi şekillendirici [9], bulanık mantık + PID [10], LQR+ metasezgisel optimizasyon algoritmaları [11] gibi hibrit yöntemler ilgili referanslarla sunulmaktadır.

Çalışma kapsamında geri beslemeli kontrol yaklaşımı olan doğrusal kuadratik regülatör (LQR) kontrol tekniği kullanılmaktadır [11-17]. Bu teknik, geleneksel olarak ağırlık (Q ve R) matrislerinin uzman tasarımcı tarafından belirlenmesi ile yapılan bir kontrol yaklaşımıdır. Geleneksel yaklaşım kontrol tekniğinin her zaman en iyi sonucu vereceğini garanti etmemektedir. Bu nedenle, LQR kontrol ağırlık matrisleri, Yapay Arı Kolonisi ve Guguk Kuşu metasezgisel optimizasyon algoritmaları ile belirlenmektedir.

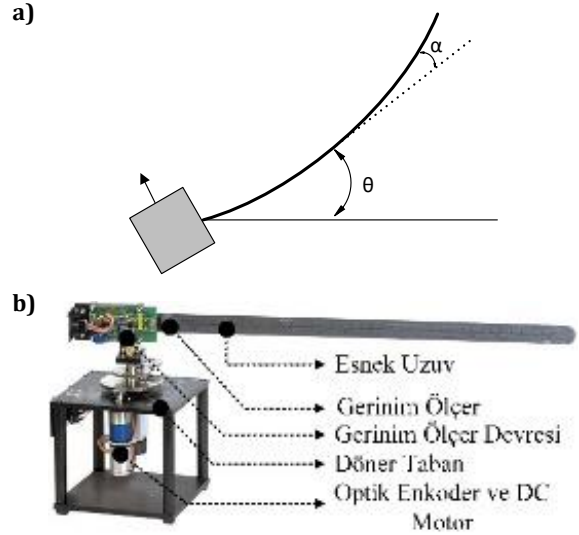
Sunulan çalışma ile Quanser firması tarafından geliştirilen esnek kol sistemi bir uydu kanat prototipi olarak düşünülerek titreşim kontrolü yapılmaktadır. İlgili düzeneğin literatürde uydu kanat sistemlerinin incelenmesi için kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [1,9,18]. Sistemin servo açısı istenilen konuma en hızlı sürede gelirken esnek uzuvda meydana gelecek artık titreşimlerin olabildiğince hızlı bastırılması için LQR kontrol tekniği kullanılmıştır. Kontrol tekniğinin ağırlık matrisleri yapay arı kolonisi (ABC) ve Guguk Kuşu (CS) sürü tabanlı metasezgisel optimizasyon algoritmaları üç farklı popülasyon boyutu değerinde (10-50-100) ve 100 iterasyonda incelenerek belirlenmektedir. Algoritmaların başlangıç parametreleri ise belirlenmiş üçer farklı konfigürasyon için benzetim çalışmaları sonucu elde edilmiştir. Çalışma ile uydu esnek kanat sistemin ayrıntıları, LQR tekniği ve optimizasyon algoritmaların teorik detayları ve elde edilen kontrol sonuçları detaylı olarak sunulmaktadır. Ayrıca LQR denetleyicinin geleneksel olarak [15], parçacık sürü optimizasyonu (PSO) [16] ve modifiye parçacık sürü optimizasyonu (m-PSO) [17] ile tasarlanan üç farklı çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında uydu esnek kanadı prototipi olarak Quanser tarafından tasarlanmış bir esnek manipülatör kullanılmaktadır. Alt bölümlerde; kullanılan deney düzeneği, tasarlanan kontrol yapısı, kullanılan optimizasyon algoritmaları hakkında teorik detaylar sunulmaktadır.

2.1. Uydu Esnek Kanat Yapısı

Kullanılan prototip, DC servo motor tarafından tahrik edilen yatay düzlemde hareket eden esnek bir uzuvdan oluşmaktadır. Sistemde DC servo motorun açıl konumu (θ) enkoder ile, esnek uzvun uç açısını (α) gerinim ölçer ile ölçülmektedir. Esnek kol sisteminin ayrıntıları ile şematik gösterimi Şekil 1 ile sunulmaktadır [19].



Şekil 1. Uydu esnek kanat sisteminin a) şematik b) mekanik model

Figure 1. a) Schematic illustration and b) Mechanical model of the satellite flexible wing system

Kullanılan prototipin matematik modeli karmaşık robotik sistemlerinin modellemesinde iyi sonuç verdiği bilinen Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Hareket denklemlerinin içerdiği ifadeler ve sayısal değerler Tablo 1 ile sunulmaktadır. Hareket denklemlerinin üretilmesine yönelik detaylara Quanser tarafından sunulan ürün kataloğundan [19] ulaşılabilmektedir. Deney düzeneğinin hareket denklemleri Eş. 1 ve Eş. 2 ile sunulmaktadır.

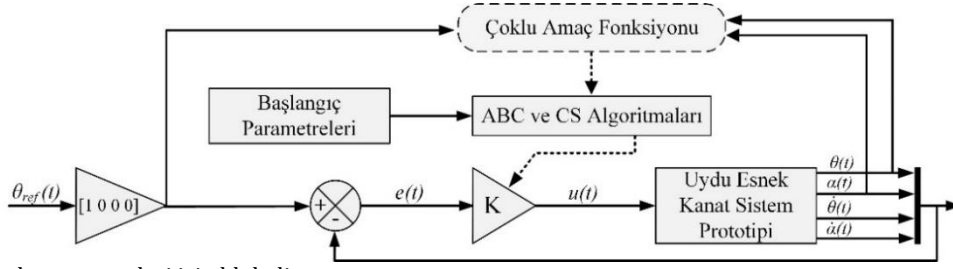
$$\ddot{\theta} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}}\dot{\theta} + \frac{K_s}{J_{eq}}\alpha + \frac{1}{J_{eq}}\tau \quad (1)$$

$$\ddot{\alpha} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}}\ddot{\theta} + K_s \left(\frac{J_{link} + J_{eq}}{J_{link}J_{eq}} \right) \alpha - \frac{1}{J_{eq}}\tau \quad (2)$$

Tablo 1. Deney düzeneği parametreleri

Table 1. Experimental setup parameters

Sembol	Açıklama	Değer
B_{eq}	Dişli eşdeğer viskoz sönüm oranı	0.004 N.m.s/rad
J_{link}	Esnek robot kol atalet momenti	0.0038 kg.m ²
J_{eq}	Büyük-Dişli eşdeğer atalet momenti	0.0026 kg.m ²
η_g	Dişli kutusu verimi	0.9
η_m	Motor verimi	0.69
R_m	Motor armatür direnci	2.6 Ω
K_s	Esnek kol için esneklik katsayısı	1.3522
K_m	Zıt emk sabiti	0.00767 V/(rad/s)
K_t	Motor tork sabiti	0.00767 N.m/A
K_g	Planet dişli kutusu oranı	14:5
V_m	Motor giriş voltajı	-
L_1	Esnek uzvun uzunluğu	0.419 m
ω_n	Doğal frekans	20,4
ζ	Sönüm oranı	0,07



Şekil 2. LQR kontrol parametreleri için blok diyagramı

Figure 2. Block diagram for LQR control parameters

2.2. Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR)

Doğrusal kuadratik regülatör (LQR) kontrol tekniği kapalı çevrim kontrol sistemlerinden birisidir. Birçok kullanım alanı olan bu yaklaşımın kararlı yapısı, bozuculardan etkilenme konusunda başarılı olması tercih edilmesinin sebeplerindedir[20].

Eş. 3 ile tanımlanan bir sistem için x durum vektörünü, u ise kontrol matrisini temsil etmektedir. A , B ve C ise dinamik sistemin matrisleri olarak gösterilmektedir.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (3)$$

İkinci dereceden maliyet fonksiyonu olan J , Eş. 4 ile gösterilmektedir. Denklemdaki Q , ve R simetrik ve pozitif ağırlık matrisleridir.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (4)$$

Ağırlık matrisleri (Q ve R) ikinci dereceden maliyet fonksiyonunun minimize edilmesinde kullanılmaktadır. Maliyet fonksiyonunun minimize edilmesiyle u hesaplanır. $u = K(referans - x)$ şeklinde gösterilmektedir. K , kazanç vektörünü temsil eder Eş. 5 ile gösterilmektedir.

$$K = R^{-1} B^T P \quad (5)$$

LQR kazanç matrisinin hesaplanmasında pozitif tanımlı simetrik matris olan P 'ye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için Eş. 6 ile gösterilen Ricatti denkleminin çözümü kullanılmaktadır.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (6)$$

Ricatti denkleminin çözümü sonucu belirlenen P değeri sayesinde sistemin kazancı bulunarak denetleyici tasarlanmaktadır. Eşitlikte bulunan, Q ve R matrisleri tasarlanan LQR denetleyicinin performansını doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir [20]. Ağırlık matrisleri Eş. 7 ile gösterilmektedir.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_n \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

Ağırlık matrislerinin seçimi sistem cevabını ve kontrol performansını doğrudan etkilemektedir.

2.3. LQR Denetleyicinin Optimizasyonu

Geleneksel yöntemler ile yapılacak olan tasarımların oluşturduğu dezavantajların giderilmesi için ağırlık matrislerinin (Q ve R) sürü tabanlı Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Güğuk Kuşu (CS) metasezgisel optimizasyon algoritmaları ile belirlenmesi hedeflenmektedir. Algoritmalar 10, 50 ve 100 popülasyon boyutu

değerinde ve 100 iterasyonda incelenmiştir. Ayrıca algoritmaların başlangıç parametreleri detaylı benzetim çalışmaları ile belirlenmiştir.

Tablo 2. LQR denetleyici ağırlık matrisleri alt ve üst sınırları

Table 2. LQR controller weight matrices lower and upper bounds

	Q1	Q2	Q3	Q4	R1
Alt Sınır	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Üst Sınır	2500	1000	10	10	10

Tablo 2 ile alt ve üst sınırları sunulan LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin (Q ve R) matrislerinin optimizasyonu için amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilecek optimizasyonun amacı esnek uzvun istenilen açısal referansa en hızlı ulaşırken sistemin hareketinden ve yapısından dolayı oluşacak artık titreşimlerin tamamen yok edilmesi veya en az seviyeye getirilmesidir. Sistemin zaman cevabından elde edilen tepe zamanı (t_p), yükselme süresi (t_r), yerleşme zamanı (t_s), kararlı durum hatası (s_s) ve maksimum aşım (s_p) parametrelerini en aza indirmek için esnek kanat uç açısını (α) ve servo motor açısını (θ) için tarafından yeni bir çoklu amaç fonksiyonu tasarlanarak Eş. 8 ile gösterilmektedir. Önerilen amaç fonksiyonunun tasarımı literatürdeki ilgili [11,12,14] çalışmalar incelenerek sistemin kontrol yanıtlarını dikkate alan yeni bir yaklaşım kullanılmıştır.

$$J = J_{\theta} + J_{\alpha}$$

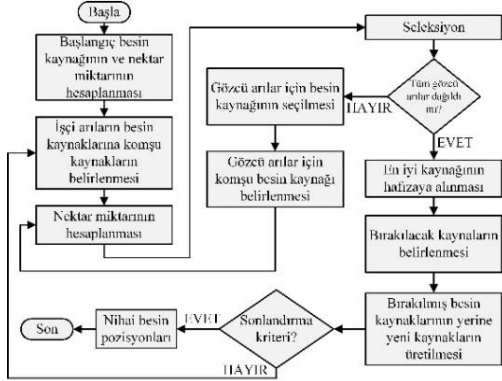
$$J_{\theta} = (20t_r(\theta)) + (10t_s(\theta)) + (10t_p(\theta)) + (0.1|\max s_p(\theta)|) + (4.4|\max s_s - ref|(\theta)) \quad (8)$$

$$J_{\alpha} = (0.1\text{norm}(\alpha)) + (4t_s(\alpha)) + (100t_p(\alpha)) + (0.8|\max s_p(\alpha)|) + (1500|\max s_s - ref|(\alpha))$$

2.4. Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony -ABC)

Yapay arı kolonisi, arıların doğadaki besin bulma davranışlarından esinlenerek karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için 2005 yılında Derviş Karaboğa tarafından ortaya atılan sürü tabanlı bir metasezgisel arama algoritmasıdır [21]. Algoritmada üç çeşit (işçi, kâşif ve gözcü) arı türünden oluşmaktadır. Birinci grup bilinen kaynaktan nektar taşıyan işçi arılardır. Bu arılar dans ederek diğer arılara nektarın bulunduğu yerin bilgisini bildirmektedir. İkinci arı çeşidi ise gözcü arılardır. İşçi arılar tarafından getirilen bilgiler sayesinde nektarın bulunduğu yere doğru yönelmektedirler. Koloninin yarısı işçi yarısı ise gözcü arılardan oluşmaktadır. İşçi ve gözcü arılar buldukları nektar tükendiği zaman birer kâşif arıya dönmekte ve üçüncü grubu oluşturmaktadır. Bu grup ise belli bir

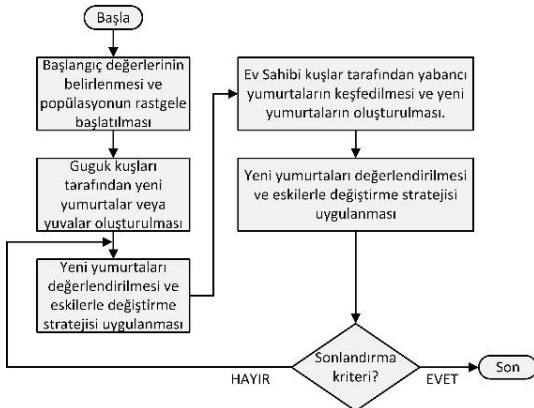
bilgi olmadan kovanın etrafında gelişigüzel dolaşarak nektar aramaktadırlar [21]. Yapay arı kolonisi algoritmasının algoritma akış şeması Şekil 3 ile sunulmaktadır.



Şekil 3. Yapay arı kolonisi (ABC) algoritma akış şeması
Figure 3. Flowchart of the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm

2.5. Guguk Kuşu Algoritması (Cuckoo Search-CS)

Guguk kuşu (CS) optimizasyon algoritması, Yang ve Deb tarafından, guguk kuşlarının davranışlarından esinlenerek, sürü zekasına dayanan verimli bir metasezgisel optimizasyon algoritması olarak geliştirilmiştir. Guguk kuşları, özel yaşam tarzları ve agresif üreme stratejilerinden esinlenilerek oluşturulmuştur [22]. Algoritmanın akış şeması Şekil 4 ile gösterilmektedir. Kendi yuvaları dışındaki başka canlıların yuvalarında yumurtlayabilen guguk kuşları yumurtladıkları yuvadaki yavru çıkma olasılığı yüksek yumurtaları yuvadan atabilirler. Ayrıca yuvanın sahibi de guguk kuşunun yumurtasını tanırsa yumurtayı atar veya o yuvayı terk etme davranışını göstermektedir. Fakat yuva sahibi yumurtaları tanıyamazsa guguk kuşunun yumurtalarına da kendi yumurtaları gibi üzerine oturmaktadır. Bu durum kuluçka parazitliği olarak tanımlanır ve algoritma bunun üzerine geliştirilmiştir [22].



Şekil 4. Guguk kuşu algoritması algoritma akış şeması
Figure 4. Flowchart of the Cuckoo Search (CS) algorithm

3. Bulgular ve Tartışma

Makale kapsamında, sürü tabanlı CS ve ABC algoritmaları için üç farklı konfigürasyon belirlenmiştir. Bu konfigürasyonlar 10, 50 ve 100 popülasyon değerinde ayrı ayrı incelenmiş ve elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler ile sunulmuştur. Guguk kuşu Algoritmasının yabancı yumurtaların keşif oranı (pa) ve adım boyutu (alfa) olan parametreleri sırasıyla (0.2-0.2), (0.5-1) ve (0.7-5) olarak seçilerek üç farklı konfigürasyon oluşturulmuştur. Benzer biçimde yapay arı kolonisi için modifikasyon oranı (mr) ve durdurma kriteri (A) parametreleri için sırasıyla (0,3-600),

(0.5-200) ve (0.8-400) olacak şekilde üç konfigürasyon belirlenmiştir. Tüm simülasyon sonuçları 100 iterasyonda elde edilmiştir. Optimizasyon başarılarını kıyaslamak için kullanılacak en düşük amaç fonksiyonu değeri (J), optimizasyon süreleri ve konfigürasyonların başlangıç parametreleri, her algoritma için ayrı ayrı gösterilmektedir.

Tablo 3. CS Algoritması için konfigürasyonlar

Table 3. Configurations for CS Algorithm

Konfig-1	Popülasyon	10	50	100
	Parametreler			
pa	0.2	0.2	0.2	0.2
alfa	0.2	0.2	0.2	0.2
J	38.333	36.3292	35.9657	
Süre(sn)	207.008	970.0443	1.9140e+03	
Konfig-2				
pa	0.5	0.5	0.5	0.5
alfa	1	1	1	1
J	36.7852	36.3094	36.0858	
Süre(sn)	203.0523	974.8149	1.9253e+03	
Konfig-3				
pa	0.7	0.7	0.7	0.7
alfa	5	5	5	5
J	38.2188	36.1295	36.0953	
Süre(sn)	202.4303	968.0658	1.9327e+03	

Tablo 4. ABC Algoritması için konfigürasyonlar

Table 4. Configurations for ABC algorithm

Konfig-1	Popülasyon	10	50	100
	Parametreler			
mr	0.3	0.3	0.3	0.3
A	600	600	600	600
J	38.7974	36.0367	36.0232	
Süre(sn)	200.134	956.024	1.8946e+03	
Konfig-2				
mr	0.5	0.5	0.5	0.5
A	200	200	200	200
J	38.2586	36.491	35.9907	
Süre(sn)	198.7855	953.9476	1.8916e+03	
Konfig-3				
mr	0.8	0.8	0.8	0.8
A	400	400	400	400
J	38.5493	36.6087	35.8305	
Süre	199.6230	963.9631	1.9634e+03	

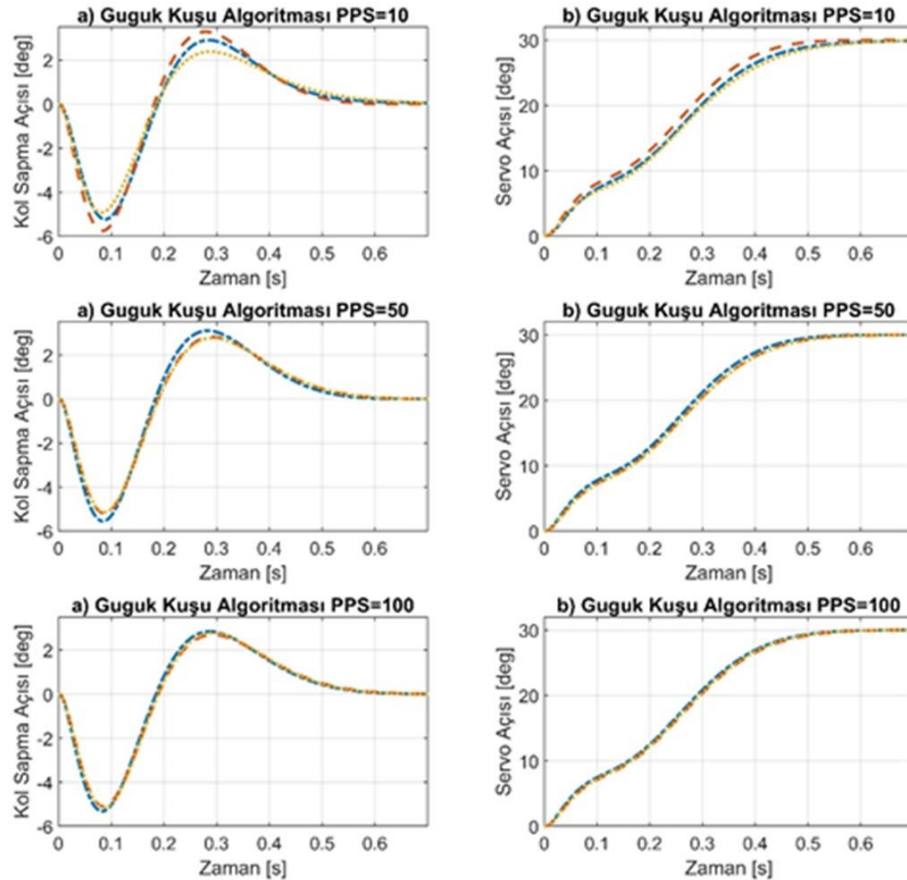
Tablo 3 ile gösterilen sonuçlar incelendiğinde her konfigürasyon için 100 popülasyon boyutu değerinde en düşük amaç fonksiyonu değeri elde edildiği görülmektedir. Bununla beraber işlem sürelerinin uzadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Tüm sonuçlar incelendiğinde ise guguk kuşu algoritmasının en düşük amaç fonksiyonuna birinci konfigürasyonda ve 100 popülasyon boyutu değerinde ulaştığı gözlemlenmektedir. Popülasyon sayısı arttıkça konfigürasyonlardan bağımsız olarak daha düşük amaç fonksiyonu değerlerine ulaşılırken optimizasyon süreleri artmıştır.

Tablo 4 ile yapay arı kolonisi için elde edilen simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Optimizasyon sonuçları incelendiğinde Konfig-3 ile en düşük amaç fonksiyonu değerine ulaşılmaktadır. Bu değer makale kapsamında incelenen iki algoritma ve üçer konfigürasyon için en düşük değer olarak görülmektedir. Aynı zaman da en uzun hesaplanma süresine sahiptir.

Çalışmanın kapsamında elde edilen sonuçlar, birbirine yakın değerlere ulaşmaktadır. Bu durumda, önerilen amaç fonksiyonunun başarılı sonuçlar ürettiği gösterilmektedir. Genel olarak popülasyon büyüklüğü ve optimizasyon başarısı birbiriyle paralellik göstermektedir. Popülasyon büyüklüğü arttıkça, incelenen iki algoritmanın optimizasyon sonuçları da iyileştiği aynı zamanda hesaplama sürelerinin uzadığı görülmektedir. Tablo 3 ve Tablo 4 incelendiğinde guguk kuşu algoritması konfigürasyonlarının hesaplama süreleri aynı popülasyon boyutu değerindeki yapay arı kolonisi algoritması konfigürasyonlarından daha uzun olduğu görülmektedir.

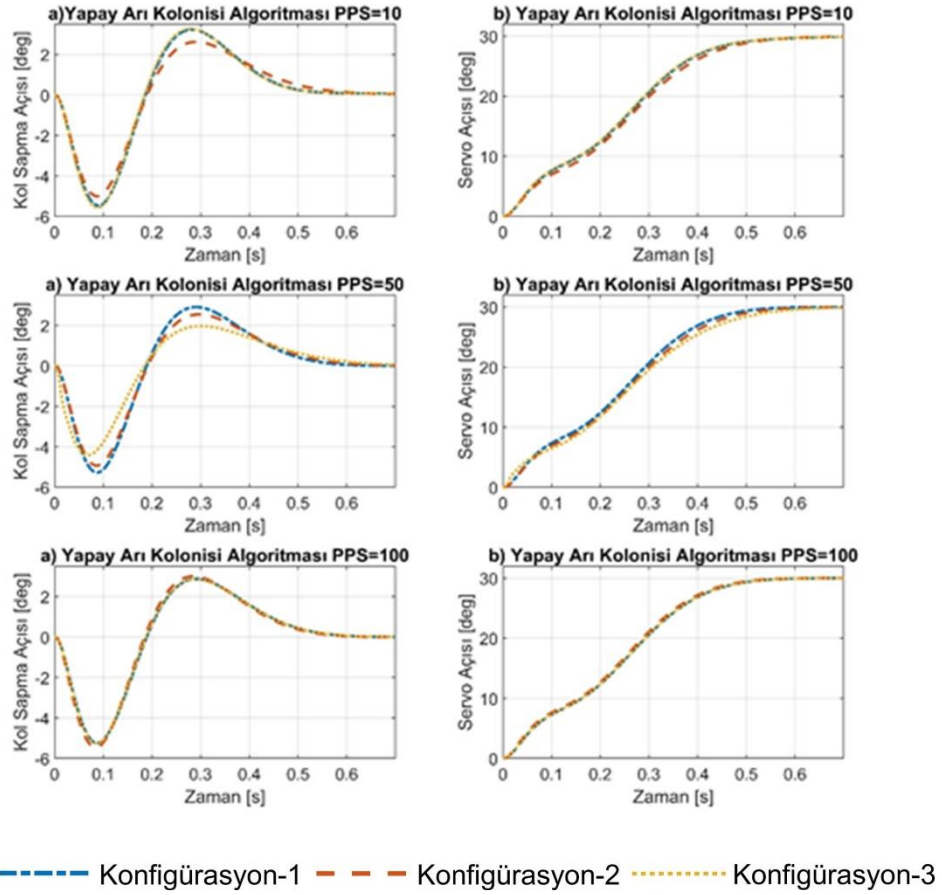
LQR ağırlık matrislerinin Guguk kuşu algoritması ile optimize edilerek ulaşılan sonuçların uydü esnek kanat prototipine uygulanması ile elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 5 ile sunulmaktadır. Konfigürasyonlar arasındaki farkları gösterebilmek için sunulan şekiller ile uydü kanadının uç sapma açısı ve servo açısı grafikleri her popülasyon boyutu değeri ayrı ayrı çizilmiştir. 10 popülasyon boyutu değerinde en yüksek uç sapma genliği konfigürasyon-2 olurken en düşük genlik konfigürasyon-3 tarafından ulaşılmıştır. Bununla beraber servo açısı en iyiden kötüye doğru sırasıyla konfigürasyon-2, konfigürasyon-1 ve konfigürasyon-3 şeklindedir. 50 popülasyon boyutu değeri incelendiğinde ise konfigürasyon-2 ve konfigürasyon-3 kanadının uç sapma genlikleri birbirine çok yakın çıkarken, konfigürasyon-1 en yüksek genliğe sahiptir. Servo açısının istenilen konuma en hızlı konfigürasyon-1 ile ulaştığı sonucuna ulaşılmaktadır. 100 popülasyon boyutu değerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise tüm konfigürasyonlar için sonuçlar birbirine çok yakın çıktığı görülmektedir. Uç sapma genlikleri büyükten küçüğe konfigürasyon 1, 3 ve 2 şeklinde sıralanmaktadır. Ayrıca Konfigürasyon-1 en düşük amaç fonksiyonu değerine ulaşan algoritmadır.

Uydü esnek kanat prototipinin artık titreşim kontrolü için tasarlanan LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin ABC ile optimize edilmesi sonucunda elde edilen Kol sapma açısı ve Servo açısı simülasyon sonuçları Şekil 6 ile sunulmaktadır.



Şekil 5. CS algoritması simülasyon sonuçları

Figure 5. CS algorithm simulation results



Şekil 6. ABC algoritması simülasyon sonuçları

Figure 6. ABC algorithm simulation results

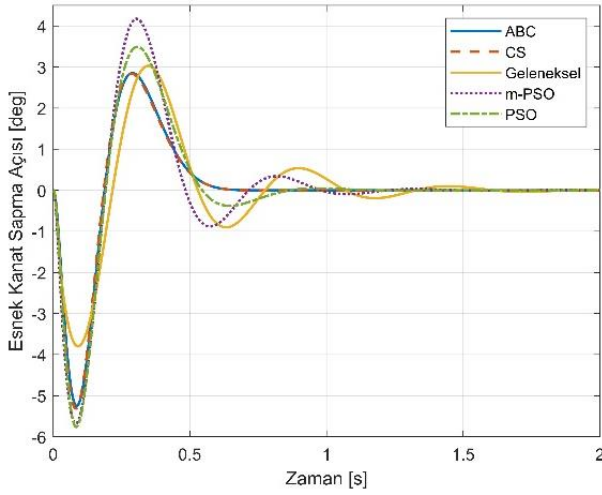
Şekil 6 ile gösterilen sonuçlar uydunun kanadının uç sapma açısı ve servo açısı olarak incelenmiş ve yüksek popülasyon büyüklüğü değerinde sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu durum, önerilen amaç fonksiyonunun başarılı bir optimizasyon sonucu elde ettiğini göstermektedir. 10 popülasyon boyutu değerinde en düşük uç sapma açısı konfigürasyon-2, 50 popülasyon boyutu değerinde ise konfigürasyon-3 tarafından elde edilmiştir. 50 popülasyon boyutu değerinde konfigürasyon-1 en hızlı referans konuma ulaşan algoritmadır. Ayrıca konfigürasyonlar 50 ve 100 popülasyon boyutu değerinde referans konuma daha kısa sürede

ulaştıkları gözlemlenmektedir. Popülasyon boyutunun artması ile tüm konfigürasyonların uydusu esnek kanadı için simülasyon sonuçlarının daha iyiye gittiği sonucuna ulaşılmaktadır. Çalışma kapsamında incelenen yapay arı kolonisinin 100 popülasyon boyutu değerinde konfigürasyon-3 ile ve guguk kuşu algoritmasının 100 popülasyon boyutu değerinde konfigürasyon-1 ile en düşük amaç fonksiyonu değerine ulaştıkları görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ile literatürde esnek robot kol ve LQR ile yapılan bazı çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 5. Karşılaştırılan kontrol yapılarının LQR denetleyici parametreleri

Table 5. LQR controller parameters of the compared control structures

	Q1	Q2	Q3	Q4	R1	K
ABC	190.74	810.93	0.255	0.795	4.6181	[6.4396 -8.1409 0.5209 0.1124]
CS	181.86	1000	1.040	2.236	2.60	[7.4002 -11.005 0.6847 0.1757]
İkizoğlu ve Gürışık (Geleneksel)	100	150	2	1	1	[10 -14.8249 1.6209 -0.7451]
Kumar ve Ohri (m-PSO)	145	4.1	1.05	7.1	1	[12.0416 -37.3209 1.6291 -0.9073]
Dharavath ve Ohri (PSO)	56.8	50.6	0.01	0.5	1	[7.5366 -8.0217 0.5113 -0.0109]



Şekil 7. Esnek Kanat uç açısı simülasyon sonuçları

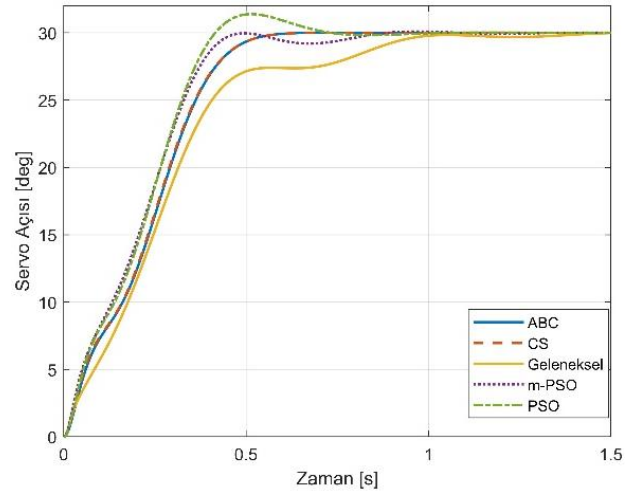
Figure 7. Simulation results of flexible wing tip deflection

Tablo 5 ile ABC, CS ve literatürdeki karşılaştırma için kullanılan karşılaştırılan çalışmaların Q (q_1, q_2, q_3, q_4), R ağırlık ve kazanç (K) matrisleri gösterilmektedir. ABC ve CS algoritmalarının ağırlık matrisleri çalışma kapsamındaki amaç fonksiyonu ve başlangıç değerleri ile elde edilen değerlerdir. İkiçoğlu ve Gürışık tarafından 2018 yılında yapılan bir çalışma ile LQR kontrol ve yeni bir hibrit yöntem önerilmiştir [15]. Yapılan çalışmanın LQR ağırlık ve kazanç matrisleri kullanılmıştır. Dharavath ve Ohri 2021 yılında benzer bir deney düzeneğinin titreşim kontrolü için ITAE amaç fonksiyonu kullanarak yine sürü tabanlı bir metasezgisel optimizasyon algoritması olan parçacık sürü optimizasyon algoritması ile LQR parametrelerini belirlemişlerdir [16]. Kumar ve Ohri 2020 yılında yaptıkları çalışma ile benzer bir kontrol problemi için LQR kontrol yönteminin performansını arttırmak ve Q matrisinin belirlenmesi için modifiyeli bir parçacık sürü optimizasyon (m-PSO) kullanmışlardır [17]. Değerleri Tablo 4 ile sunulan bu çalışmaların karşılaştırılmış hali Şekil 7 ve Şekil 8 ile sunulmaktadır.

Esnek kanat yapısının sapma açısının sunulduğu Şekil 7 incelendiğinde ABC ve CS algoritmalarının birbirine çok yakın sonuçlar görülmektedir. Bununla beraber oluşan artık titreşimlerin daha kısa sürede giderildiği sonucuna ulaşılmaktadır. ITAE amaç fonksiyonu ve PSO algoritması ile yapılan kontrol çalışmasının artık titreşimlerin giderilmesi ise diğer çalışmalara göre daha uzun sürdüğü gözlemlenmektedir. Şekil 8 ile elde edilen kontrol yanıtlarının servo motor açısı için karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekil 7 ile benzer biçimde çalışma kapsamında 100 popülasyon boyutu değerinde incelenen sürü tabanlı ABC ve CS algoritmaları birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum makale kapsamında yazılan yeni çok amaçlı fonksiyonun ve algoritmaların başarısını göstermektedir. Bu algoritmalar istenilen servo açısı referansına diğer çalışmalara göre hızlı ulaşmışlardır. Önerilen yaklaşım ile literatürdeki çalışmalardan daha iyi sonuç elde edildiği görülmektedir.

4. Sonuçlar

Makale kapsamında yapılan çalışma ile kullanılan deney düzeneğinin esnek kanat istenilen açısal referansa en hızlı şekilde ulaşırken sistemin hareketinden dolayı oluşacak artık titreşimlerin bastırılması için LQR kontrol yapısı tasarlanmıştır.



Şekil 8. Servo açısı simülasyon sonuçları

Figure 8. Simulation results of servo angle

LQR kontrol yönteminin ağırlık matrisleri ABC ve CS algoritmaları ile belirlenmiştir. Optimizasyon için kontrol amacına uygun ve sistemin kontrol yanıtları dikkate alınarak yeni bir amaç fonksiyonu önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın etkinliği, literatürde bulunan ağırlık matrislerinin PSO, m-PSO ve geleneksel olarak belirlendiği LQR denetleyiciler ile karşılaştırılarak önerilen yaklaşımın üstünlüğü gösterilmiştir.

Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıdaki şekliyle özetlenebilir;

- Elde edilen sonuçlar, tasarlanan yeni amaç fonksiyonunu ve kullanılan algoritmaların etkinliğini göstermektedir.
- CS ve ABC algoritması karşılaştırılan diğer algoritmalara göre uçuş kanadı açısında daha düşük genliğe sahiptir. Servo açılarına bakıldığında ise, bu algoritmaların istenilen açısal referansa daha hızlı ulaştıkları görülmektedir.
- Algoritmaların başlangıç parametrelerinin belirlenmesi optimizasyonun başarısını doğrudan etkilemektedir. Özellikle 10-50 popülasyon boyutu değerinde, konfigürasyonlar arasındaki farklar daha belirgindir.
- Algoritmaların popülasyon boyutu değeri arttıkça hesaplama süreleri artarken daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir.
- CS ve ABC algoritmaların servo açılarının yerleşme zamanları arasında %0,0792 fark bulunmaktadır. CS algoritması daha başarılı olma süresi sunmaktadır.
- Servo açılarının yerleşme zamanları incelendiğinde, CS algoritması Geleneksel LQR arasında %82,03, m-PSO ile %49,80 ve PSO ile %26,14 fark bulunmaktadır.
- Esnek kanat yapısı için en iyi yerleşme zamanı performansını Guguk Kuşu algoritması vermektedir. Guguk Kuşu algoritması ile PSO arasında %37,56, m-PSO ile %61,87 ve geleneksel yöntemle göre ise %161,28 fark bulunmaktadır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar katkılarının beyanı

Ferhat KAYA: Metodoloji, yazılım, literatür taraması, yazım, simülasyon, kaynaklar.

Çağlar CONKER: Metodoloji, tasarım, yazılım, inceleme ve düzenleme, denetleme.

Kaynaklar

- [1] Xie, L., Yu, X., Chen, L. 2022. Robust fuzzy sliding mode control and vibration suppression of free-floating flexible-link and flexible-joints space manipulator with external interference and uncertain parameter, *Robotica*, 40(4), s. 997-1019. doi:10.1017/S0263574721000977
- [2] Conker, C., A. Kilic, S. Mistikoglu, S. Kapucu, H. Yavuz. 2014. An enhanced control technique for the elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 60(9), s. 592-599. doi:https://doi.org/10.5545/sv-jme.2014.1698.
- [3] Conker, C., H. Yavuz, H.H. Bilgic. 2016. A review of command shaping techniques for elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators. *Journal of Vibroengineering*, 18(5), s. 2947-2958. doi:https://doi.org/10.21595/jve.2016.16725.
- [4] Singhose, W.E. 2009. Command shaping for flexible systems: A review of the first 50 years, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10(4), s. 153-168. doi:10.1007/s12541-009-0084-2
- [5] Kurode, S., Dixit, P. 2012. Output feedback control of flexible link manipulator using sliding modes. 2012 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering, Dhaka, Bangladesh, 949-952. doi: 10.1109/ICECE.2012.6471708.
- [6] Bezsilja, J., Takarics, B., Vanek, B., Guo, J. 2022. Parameter Uncertainty Analysis in Precise Pointing Control of Flexible Spacecraft, *IFAC-PapersOnLine*, 55(20), s. 241-246. Doi:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.102.
- [7] Talebi, H.A., Khorasani, K., Patel, R.V. 1998. Neural network based control schemes for flexible-link manipulators: simulations and experiments, *Neural networks*, 11(7-8), s. 1357-1377. doi: 10.1016/s0893-6080(98)00038-0.
- [8] Pham, D. T. and M. Kalyoncu. 2009. Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm, 2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics, Cardiff, UK, 2009, pp. 475-480, doi: 10.1109/INDIN.2009.5195850
- [9] Hu, O.I., Wang, Z., Gao, H. 2008. Sliding mode and shaped input vibration control of flexible systems, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 44(2), s. 503-519. doi: 10.1109/TAES.2008.4560203.
- [10] Liu, F.C., Liang, L.H., Gao, J.J. 2014. Fuzzy PID Control of Space Manipulator for Both Ground Alignment and Space Applications, *Int. J. Autom. Comput.* 11, s. 353-360. https://doi.org/10.1007/s11633-014-0800-y
- [11] Özkaya, S., Conker, Ç., Bilgiç, H.H. 2021. ESNEK ROBOT KOL SİSTEMİ İÇİN LQR DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN METASEZGİSEL ALGORİTMALAR KULLANILARAK BELİRLENMESİ, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(3), s. 735-752. DOI: 10.36306/konjes.896087
- [12] Bilgiç, H.H., Şen, M.A., Yapıcı, A., Yavuz, H. Kalyoncu, M. 2021. Meta-Heuristic Tuning of the LQR Weighting Matrices Using Various Objective Functions on an Experimental Flexible Arm Under the Effects of Disturbance, *Arabian Journal For Science And Engineering*, Doi:10.1007/s13369-021-05428-7.
- [13] Solihin, M.I., Wahyudi, Legowo, A., Akmeliawati, R. 2010. Comparison of LQR and PSO-based state feedback controller for tracking control of a flexible link manipulator. 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering. 354-358.
- [14] Kaya, F., Conker, Ç. 2020. Sarkaç Tipi Tepe Vinç Sistemi İçin Genetik Algoritma ve Termal Değişim Optimizasyon Algoritmaları ile LQR Denetleyici Tasarımı ve Performans Karşılaştırması. V. International Scientific and Vocational Studies Congress – Engineering (BILMES EN 2020), 127-139.
- [15] İkizoğlu, S., Gürışık, O. 2018. LQR Based Optimal Control for Single-Joint Flexible Link Robot, 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Istanbul, Turkey, 2018, s. 1-6. doi: 10.1109/CEIT.2018.8751937.
- [16] Dharavath, P.K., Ohri, J. 2021. Optimized Control Design of LQR for Flexible Joint Manipulator. In: Vadhera, S., Umre, B.S., Kalam, A. (eds) Latest Trends in Renewable Energy Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 760. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1186-5_22
- [17] Kumar, N., Ohri, J. 2020. Novel m-PSO Optimized LQR Control Design for Flexible Link Manipulator: An Experimental Validation, *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 14(2), s. 81-92.
- [18] Damaren, C.J. 1995. Passivity analysis for flexible multilink space manipulators, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 18:2, s. 272-279. Doi: https://doi.org/10.2514/3.21380
- [19] Quanser Inc 2012 b "SRV02-Series Flexgag-Rotary Flexible link user manual"
- [20] Anderson, B.D., Moore, J.B. 2007. Optimal control: linear quadratic methods. Courier Corporation.
- [21] Karaboga, D., Basturk, B. 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of Global Optimization*, 39(3), s. 459-471. Doi: https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x
- [22] Yang, X.S., Deb, S. 2008. Nature-inspired metaheuristic algorithms. *Luniver Press, Bristol*