

Atf İçin: Garip Z, 2022. Seri Robot Manipülöründe Ters Kinematik Problemi Çözmek İçin Kaotik Tabanlı Çiçek Tozlaşma Algoritmasının Uygulanması. İğdir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(1): 80-90.

To Cite: Garip Z, 2022. Application of Chaotic Based Flower Pollination Algorithm to Solve Inverse Kinematics Problem in Serial Robot Manipulator, Journal of the Institute of Science and Technology, 12(1): 80-90.

Seri Robot Manipülöründe Ters Kinematik Problemi Çözmek İçin Kaotik Tabanlı Çiçek Tozlaşma Algoritmasının Uygulanması

Zeynep GARİP

ÖZET: Ters kinematik problemlerinin çözümü, seri robot manipülörlerinin temel problemlerinden biridir. Bu çalışmada, 7 serbestlik dereceli bir seri manipülörün ters kinematik problemini çözme karmaşıklığını en aza indirmek için kaotik tabanlı bir algoritma geliştirilmiştir. Henon kaotik harita ile modifiye edilen çiçek tozlaşma algoritması kullanılarak orijinal algoritmanın global ve lokal arama özelliklerinin etkinliği artırılması amaçlanmıştır. Simülasyon çalışmaları için, modifiye edilmiş algoritmaların performansını doğrulamak için metre cinsinden P1[-25 100 50], P2 [50 – 25 75] ve P3 [50 – 25 75] olmak üzere üç farklı istenen konum vektörü seçilmiştir. Ayrıca bu algoritmalar son efektörün konum hatası ve çözüm süresine göre karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, seri robot manipülörünün ters kinematik çözümleri için kaotik tabanlı algoritmaların etkin bir şekilde kullanılabilmesini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Robot manipülörü, kaotik harita, çiçek tozlaşma algoritması, konum hatası

Application of Chaotic Based Flower Pollination Algorithm to Solve Inverse Kinematics Problem in Serial Robot Manipulator

ABSTRACT: The solution of inverse kinematics problems is one of the main problems for serial robot manipulators. In this study, a chaotic-based algorithm has been developed to minimize the complexity of solving the inverse kinematics problem of a series manipulator with 7 degrees of freedom. It is aimed to increase the efficiency of the global and local search features of the original algorithm using the flower pollination algorithm modified with the Henon chaotic map. For the simulation studies, to verify performance of modified algorithms, three different desired position vectors are selected as P1 [-25 100 50], P2 [24 50 100] and P3 [-30 30 80] in meter. In addition, these algorithms were compared according to the end-effector position error and the solution time. The simulation results showed that the chaotic-based algorithms can be effectively used for the inverse kinematic solutions of the serial robot manipulator.

Keywords: Robot manipulator, chaotic map, flower pollination algorithm, position error

¹Zeynep GARİP ([Orcid ID: 0000-0002-0420-8541](https://orcid.org/0000-0002-0420-8541)), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Zeynep GARİP, e-mail: zbatik@subu.edu.tr

GİRİŞ

Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak, robot kolu manipülatörleri tüm sektörlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Endüstriyel sistemlerde ve teknik uygulamalarda seri manipülatörlerin insanlar gibi farklı işler yapabilmeleri beklenmektedir. Çalışma alanı belirleme, dinamik analiz ve yörünge oluşturma gibi kullanım amaçlarına ve yerlerine göre yüksek serbestlik derecelerine sahip seri manipülatörler tasarlanmaktadır (Hwang ve ark., 2017; Toz, 2017). Yedi veya daha fazla serbestlik derecesine sahip robot kolları geleneksel altı serbestlik derecesine sahip robot kollarına göre önemli ölçüde el becerisi ve çok yönlülük sağlamaktadır (Seraji ve ark., 1993).

Endüstride kullanılan seri manipülatörlerin ileri ve ters kinematik çözümleri kontrol sürecinin temel parçasıdır. Robotik manipülatörün ileri kinematiği uç efektörün konumunu ve yönünü tanımlar. Ters kinematik ise önceden konumu belirlenmiş uç efektörün konumuna karşılık gelen eklem konumlarının belirlenmesidir (Karpinska ve ark., 2012). Robot manipülatörlerin ters kinematik çözümünde analitik ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Analitik yöntemlerin çözümü zor olsa da hızlı sonuçlar vermektedir. Bunun yanında analitik yöntemlerle gerçekleştirilen çözüm tüm manipülatörleri kapsamamaktadır. Sayısal yöntemlerde ise ters kinematiğin hesaplanması zor ve yavaştır. Ayrıca bu yöntemler robot manipülatörlerinin gerçek zamanlı kontrolünde yeterli değildir (Zhang ve Xiao, 2019). Son zamanlarda meta-sezgisel algoritmalar birçok araştırma ve uygulama alanında başarıyla uygulanmaktadır. Meta-sezgisel algoritma kullanılarak seri manipülatörün hareket ve yörünge planlaması yapıldığında matematiksel olarak kolay modellenmesi ve daha az hesaplama gerektirmektedir. Bu sebeplerden dolayı bu algoritmalar Ateş Böceği Algoritması (ABO), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Kuantum tabanlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (KPSO), Yapay Arı Koloni (YAK), Karınca Aslanı Optimizasyon (KAO), Harmoni Arama Algoritması (HAA), Yer Çekim Algoritması (YÇA), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) ve Genetik Algoritma (GA) gibi sezgisel algoritmalar robot manipülatörün ters kinematik çözümünde kullanılmaya başlanmıştır (Dereli ve ark., 2019; Jha ve ark., 2017). Ayrıca meta-sezgisel algoritmalar, seri manipülatörlerin ters kinematik çözümünde matematiksel yöntemlerle karşılaştırıldığında daha etkili ve başarılı olduğu kanıtlanmıştır (El-Sherbiny ve ark., 2018).

Dereli ve ark., (2019) 7 serbestlik derecesine sahip robot kolunun ters kinematik analizi ateş böceği algoritması kullanarak gerçekleştirmiştir. Diğer bir çalışmalarında ise kuantum davranışlı parçacık sürü optimizasyonu ile bu sistemin doğruluğunu ve etkinliğini göstermişlerdir. Ayrıca geliştirdikleri algoritmanın performansını PSO, YAK ve ABO algoritmaları ile ölçmüşlerdir. Zhang ve ark., (2019) tarafından lojistik kaotik harita ile yapay arı koloni algoritması birleştirilerek yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritma ile Cyton Gamma 300 robot manipülatörünün ters kinematik hesaplamasını yapmışlardır. Wang ve ark., (2010) 7 serbestlik dereceli manipülatörün ters kinematik çözümü kapalı döngü algoritması ile çözmüşlerdir. Algoritmanın doğruluğu simülasyon ve deneysel çalışmalarla sağlanmıştır. Huang ve ark. (2012) 7 eksenli robot manipülatörlerinin ters kinematik problemini daha etkin bir şekilde çözmek için bir PSO algoritması geliştirmişlerdir. Tabandeh ve ark. (2010) geliştirdikleri genetik algoritmayı 4 eksenli uzaysal, 6 eksenli uzaysal ve 7 eksenli kinematik konfigürasyona sahip robot manipülatörlerinin ters kinematik çoklu çözümünde kullanmışlardır. Durmuş ve ark. (2011) altı eksenli robot manipülatörün ters kinematik çözümü için PSO ve HAA algoritmaları ile gerçekleştirmişlerdir. Köker (2013) son efektördeki hatayı en aza indirmek için altı eksenli bir Stanford robot manipülatörünün ters kinematik problemini çözmek amacıyla yapay sinir ağı ve genetik algoritmayı hibrit bir şekilde kullanmıştır. Toz (2017) altı serbestlik dereceli ve eklem kaçıklıklı bileklikli bir seri robot manipülatörünün ters kinematik problemi KAO algoritmasıyla

çözümlemiştir. Jha ve ark. (2017) tarafından 5 eksenli robot manipülâtörünün uç efektörünün konumunu ve açısal hatayı tespit etmek amacıyla TLBO ve GA algoritmalarını kullanmıştır. El-Sherbiny ve ark. (2018) tarafından bilgi tabanlı yapay arı koloni algoritma tabanlı 5 eksenli robot kolunun ters kinematik problemini çözmüşlerdir. Ayyıldız ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada konveyör bandında çalışma yetisine sahip 4 serbestlik derecesine sahip seri robot manipülâtörünün ters kinematik probleminin optimizasyonu GA, PSO, QPSO, YÇA algoritmalarıyla gerçekleştirmiştir.

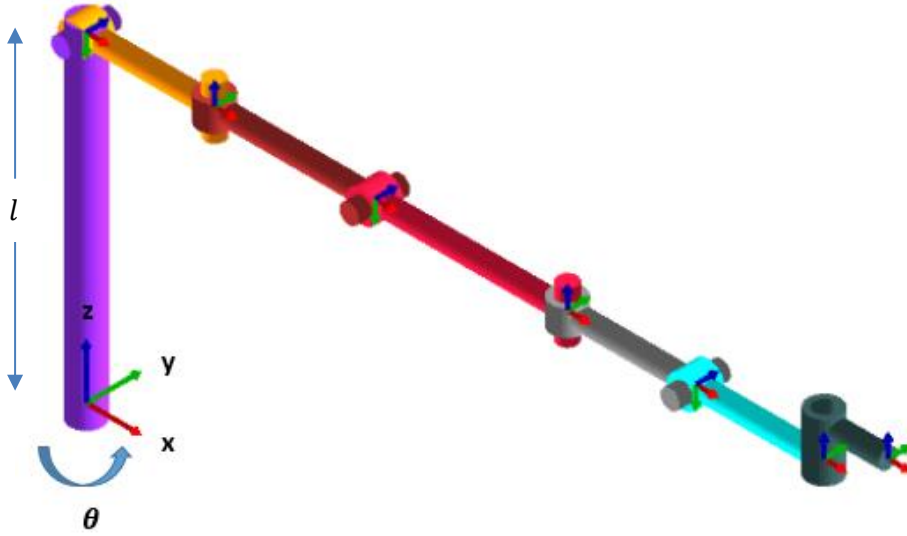
Bu çalışmada çiçek tozlaşma algoritması (ÇTA) ve kaos optimizasyon tekniklerine odaklanılmıştır. ÇTA'nın seçilmesinin sebebi hem global hem de yerel arama uzayını desteklemesidir. Ayrıca algoritmanın kullandığı parametre sayısı da azdır. Buna rağmen algoritma yerel arama yaparken performansını sergileyememektedir. Bu sebepten dolayı kaos optimizasyonu, yerel aramada optimum noktaya yakınsamasını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Kaos optimizasyonun temeli kaotik haritalar ile algoritmadaki rastgele parametrelerin tutarlılık ve doğruluklarını geliştirmek amacıyla bir hibritleşmeye dayanmaktadır (Yousri ve ark., 2019). Bu makalede 7 serbestlik derecesine sahip seri robot manipülâtörünün ters kinematik optimizasyon problemini çözmek amacıyla kaotik tabanlı algoritmalar önerilmiştir. ÇTA ve henon kaotik harita birleştirilerek 3 farklı hibrit algoritma önerilmiştir. Bu algoritmalar Henon Kaotik tabanlı Çiçek Tozlaşma Algoritması 1 (KÇTA 1) , Henon Kaotik tabanlı Çiçek Tozlaşma Algoritması 2 (KÇTA 2) ve Henon Kaotik tabanlı Çiçek Tozlaşma Algoritması 3 (KÇTA 3) olarak adlandırılmıştır. Henon kaotik harita global ve yerel aramadaki dengeyi sağlama ve yerel aramada lokal bir noktaya takılmasını önlemede kullanılmıştır. Algoritmaların performansı üç farklı seçilmiş hedef noktası belirlenerek konum hatası ve çözüm süresi bakımından değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

7 Eksenli Manipülâtörün Kinematik Modeli

7 eksenli robotik manipülâtör, nesnelere bir konumdan diğer konuma taşıma ve nesne yakalama gibi özelliklere sahiptir. 7 eksenli robotik manipülâtörün kontrolü ileri veya ters kinematik modelleme ile sağlanmaktadır. Ters kinematik problemi son efektörün konumunu bulmak amacıyla ileri kinematik denklemleri kullanılarak çözülür. 7 serbestlik derecesine sahip robotun son efektör pozisyonunu tahmin etmede genellikle Denavit-Hartenberg yöntemi (DH) tercih edilmektedir. DH yöntemi seri manipülâtörü tanımlamak ve hareketlerini modellemek amacıyla kullanılmaktadır. DH, koordinat çerçeveleri, prosedürlerini ve son bölüm manipülâtör için türetilmiş ileri kinematik denklemlerini göstermektedir. Şekil 1'de verilen robot manipülâtöre göre DH kinematik model oluşturulmuştur.

Homojen transformasyon matrisi Eşitlik 1 ile ifade edilmektedir. Seri robot manipülâtörünün dönüşüm matrisleri DH parametrelerinden elde edilmektedir. Çizelge 1'de listelen DH parametreleri a_i, α_i, d_i ve θ_i sırasıyla bağlantı uzunluğu, bağlantı açısı, bağlantı ofset ve ekleme açılarını temsil etmektedir. Şekil 1'de verilen robotik manipülâtörün DH parametrelerine ve Eşitlik 1'e göre bitişik link koordinat çerçevelerinin dönüşüm matrisleri elde edilmektedir. Eşitlik 3, Eşitlik 2'de bulunan altı dönüşüm matrisinin çarpımı ile elde edilmektedir. Eşitlik 1-2'deki DH parametrelerinde $s\theta_i, c\theta_i, sai - 1$ ve $cai - 1$ sırasıyla $\sin \theta_i, \cos \theta_i, \sin \alpha_i - 1$ ve $\cos \alpha_i - 1$ 'ün kısaltmasını vermektedir. Uzunluklar metre ve açılar ise derece olarak verilmiştir.



Şekil 1. 7 eksenli seri robot manipülör

$${}^{i-1}T_i(\theta_i) = \begin{bmatrix} c\theta_i & -ca_i s\theta_i & sa_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & ca_i c\theta_i & -c\theta_i sa_i & a_i s\theta_i \\ 0 & sa_i & ca_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & s\theta_2 & l_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & 0 & -c\theta_2 & l_2 s\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & -s\theta_3 & l_3 c\theta_3 \\ s\theta_3 & 0 & c\theta_3 & l_3 s\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^3T_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & l_4 c\theta_4 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & l_4 s\theta_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & -s\theta_5 & l_5 c\theta_5 \\ s\theta_5 & 0 & c\theta_5 & l_5 s\theta_5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & l_6 c\theta_6 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & l_6 s\theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^6T_7 = \begin{bmatrix} c\theta_7 & -s\theta_7 & 0 & l_7 c\theta_7 \\ s\theta_7 & c\theta_7 & 0 & l_7 s\theta_7 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^0T_7 = {}^0T_1({}^1T_2(\theta_2)){}^2T_3(\theta_3){}^3T_4(\theta_4){}^4T_5(\theta_5){}^5T_6(\theta_6){}^6T_7(\theta_7) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

0T_7 manipülörün ileri kinematik denklemini oluşturmaktadır. (P_x, P_y, P_z) ve (n, o, a) ise sırasıyla uç efektörün taban koordinatındaki konumu ve yönüdür.

Optimizasyon Performansının Formülasyonu

ÇTA tabanlı ters kinematik denklemlerin hesaplanmasında her bir polen 7 eksenli seri robot manipülörünün eklem değişkenler $(\theta_1^\circ, \theta_2^\circ, \theta_3^\circ, \theta_4^\circ, \theta_5^\circ, \theta_6^\circ, \theta_7^\circ)$ kümesini kapsamaktadır. Optimal çözüm sağlanabilmesi için son efektörün hedef konuma ulaşması optimal ayarlamalarla elde edilir.

7 eksenli seri robot manipülöründe, robot kolunun başlangıç noktasından hedef noktaya varana kadar birçok varış yolu vardır. Bu noktada önemli olan konu uygunluk fonksiyonuyla

manipülörün hedefe minimum hatayla varmasıdır. Matematiksel model D-H parametreleri ve tüm eklem değişkenlerinin aralıkları kullanılarak oluşturulur. Elde edilen vektör ile hedef konum vektörü arasındaki uzaklık hata olarak kabul edildiğinden dolayı hatayı en aza indirmek için amaç fonksiyonu (Eşitlik 4) tanımlanmıştır.

$$E_r = \sqrt{(P_x - P'_x)^2 + (P_y - P'_y)^2 + (P_z - P'_z)^2} \quad (4)$$

Eşitlik 4'te verilen P'_x, P'_y, P'_z hesaplanacak konumları P_x, P_y, P_z son efektörün hedef konumu ve E_r ise P ve P' arasındaki hatayı temsil etmektedir. Bu çalışmanın amacı E_r hata değerinin minimize edilmesidir.

Kaotik harita ile ÇTA'nın Geliştirilmesi

ÇTA arama kabiliyetini arttırmak amacıyla bu çalışmada optimizasyon problemi olarak sayılan ters kinematik denklemlerini çözmek amacıyla rasgele sayı üreteçlerin yerine Henon ayrık kaotik harita dizileri tercih edilmiştir. Bu kaotik haritanın performansı Çimen ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada test fonksiyonları kullanılarak yapılmıştır ve istatistiksel sonuçlara göre Henon tabanlı çiçek tozlaşma algoritması etkin olduğu görülmüştür. Bu sebepten dolayı robot manipülörün ters kinematiklerinin çözmek amacıyla Henon kaotik tabanlı çiçek tozlaşma algoritması tercih edilmiştir.

ÇTA, popülasyon temelli global bir optimizasyon algoritmasıdır (Yang, 2012). Algoritmanın sözde kodu Algoritma 1'de verilmiştir. ÇTA'da, tozlaşma sürecinin özelliği, tozlaşma davranışı ve çiçek sabitliğinin göz önünde bulundurularak dört kurala indirgenmiştir.

1. Biyotik tozlaşma, polenlerin tozlayıcı tarafından taşındığı çapraz tozlanma işlemidir. Bu durum global bir tozlaşma sürecidir ve tozlayıcıların hareketi Lévy uçuşuna uymaktadır.
2. Abiyotik veya kendi kendine tozlaşma aynı bitki veya çiçeğin tozlaştırıcı olmadan yaptığı işlemidir. Polen taşıma mesafesi genellikle biyotik tozlaşmadan daha kısa olduğundan, bu işlem yerel tozlaşma olarak bilinir.
3. Tozlayıcılar, belirli çiçek türlerine eğilimi olan çiçek kararlılığı geliştirebilir. Çiçek sabiti üreme olasılığına eşdeğerdir. Bu olasılık, ilişkili çiçeklerin benzerliği ile orantılıdır.
4. Bir anahtar olasılığı; $p \in [0, 1]$ tozlaşma tipini kontrol etmek için kullanılır. Bu kurallara göre, iki farklı arama tekniği (yerel ve global) kullanılabilir. Yerel arama uygulayarak, mevcut olanların çevresinde en iyi çözümler bulunur. Buna ek olarak, global tozlaşma esasen yerel bir optimum çözümde sıkışıp kalmayı önler.

Algoritma 1: ÇTA'sının sözde kodu

```

1: Amaç Fonksiyonu  $f(x)$ ,  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 
2: Rasgele başlangıç popülasyonu üret
3: Başlangıç popülasyonundaki en iyi( $g^*$ ) çözümü hesapla
4: Olasılık parametresini belirle  $p \in [0,1]$ 
5: while t<maksimum iterasyon
6:   for i=1:n
7:     if rand<p then
8:       Global tozlaşma :  $x_i^{t+1} = x_i^t + \gamma L(\lambda)(g^* - x_i^t)$ 
9:     else
10:      Yerel tozlaşma :  $x_i^{t+1} = x_i^t + rand \cdot x(g^* - x_i^t)$ 
11:    end if
12:  Yeni çözümleri değerlendir
13:  Popülasyondaki kötü çözümleri daha iyileri ile güncelle
14:  end for
15:  En iyi çözümü( $g^*$ ) seç
16: end while

```

Henon kaotik haritanın matematiksel modeli Eşitlik 5'te verilmiştir. Henon haritasının kaotik davranışı a ve b parametrelerine bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan sistemde $a = 1,4$ ve $b = 0,3$ parametre değerleri seçilmiştir (Henon, 1976).

Eşitlik	Sınırlar	Harita
$x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + by_n \quad (5)$ $y_{n+1} = x_n$	$a = 1,4$ $b = 0,3$	

Şekil 2. Henon Kaotik Harita.

KÇTA, ÇTA'nın tozlaşma sürecinin özelliğini kapsayan kurallar göz önünde bulundurularak geliştirilmiş ve orijinal algoritmanın performansının artırılması amaçlanmaktadır. ÇTA'da global ve yerel tozlaşma operatörleri bulunmaktadır. KÇTA'da orijinal ÇTA'dan farklı olarak global veya yerel operatörün hangisinin seçileceği kaotik bir dizi ile belirlenerek KÇTA 1 algoritması oluşturulmuştur. Sözde kodda 7.satırdaki *rand* sayı dizisi kaotik harita (if *kaotikhenondizisi* < p) ile değiştirilmiştir. KÇTA 2 algoritmasında ise lokal tozlaşmadaki sağlayan rastgeliliği sağlayan dizi kaotik dizi ($x^{t+1} = x_i^t + \text{kaotikhenondizisi}(x_j^t - x_k^t)$) ile güncellenmiştir. Son olarak KÇTA 3 ise KÇTA 1 ve KÇTA 2 algoritmalarındaki değişikliklerinin birleşiminden oluşmaktadır.

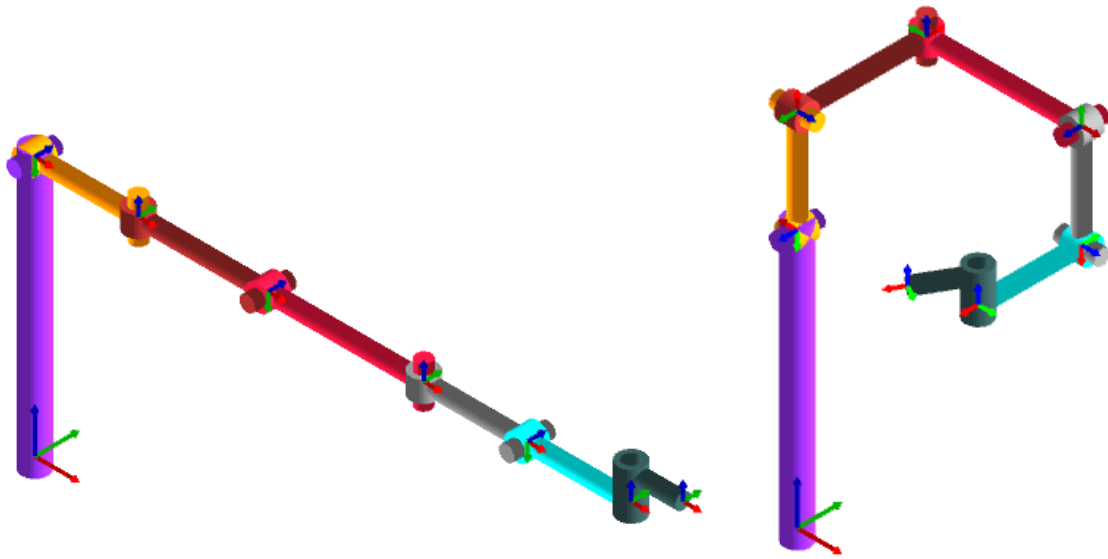
BULGULAR VE TARTIŞMA

Kaotik tabanlı çiçek tozlaşma algoritmalarının performansı test etmek amacıyla 7 eksenli seri robot manipülörünün ters kinematik problemi kullanılmıştır. Bu çalışmada son efektörün pozisyonu rasgele olarak seçilmiştir. Çizelge 1'de manipülörün bağlantı parametreleri verilmiştir.

Çizelge 1. Robot manipülörün DH parametreleri (Dereli ve ark., 2019).

i	$a_i(m)$	$a_i(^{\circ})$	$d_i(m)$	$\theta_i(^{\circ})(Range)$
1	0	-90	11=0.5	$-180 < \theta_1 < 180$
2	12=0.2	90	0	$-90 < \theta_2 < 30$
3	13=0.25	-90	0	$-90 < \theta_3 < 120$
4	14=0.3	90	0	$-90 < \theta_4 < 90$
5	15=0.2	-90	0	$-90 < \theta_5 < 90$
6	16=0.2	0	0	$-90 < \theta_6 < 60$
7	17=0.1	0	d7=0.05	$-30 < \theta_7 < 70$

Algoritmalarla popülasyon sayısı 20, olasılık oranı 0.8 ve maksimum iterasyon sayısı 1000 olarak belirlenmiştir. Durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı baz alınacaktır. Son efektörün konumu doğru bir şekilde değerlendirmek amacıyla her bir algoritma 20 kez çalıştırılmıştır. Çizelge 2'de son efektörün üç farklı hedef konumları ve ters kinematik çözümleri karşılaştırmalı olarak listelenmiştir. Bu konumlar [-25, 100, 50], [24 50 100] ve [-30 30 80] metre cinsinden belirlenmiştir. Şekil 1'de verilen robot manipülörüne Çizelge 1'de verilen DH parametreleri uygulandığında elde edilen konum Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3. Robot manipülörün DH parametrelerine göre başlangıç ve son konumu

Belirlenen hedef konumlarına (P_1, P_2 ve P_3) göre yapılan ters kinematik analiz sonuçlarından elde edilen eksen açıları Çizelge 2'de listelenmektedir. Geliştirilen yöntemlerle elde edilen optimal çözüme karşılık gelen son efektörlerin konumları Çizelge 3'de ve konum hatası ve çözüm süreleri Çizelge 4'te listelenmiştir. Çizelge 4'e göre P_1 ve P_2 hedef konumlarında KÇTA 1, P_3 hedef konumunda ise KÇTA 3 minimum hatayı vermektedir.

Çizelge 2. Hedef noktalara göre belirlenen optimum açı değerleri

Hedef Konumlar (P_x, P_y, P_z)	Algoritma	Açılar						
		θ_1°	θ_2°	θ_3°	θ_4°	θ_5°	θ_6°	θ_7°
P1 [-25 100 50]	ÇTA	71.8426	19.7792	34.2324	-51.8039	10.4909	56.9951	38.4093
	KÇTA 1	117.2145	-8.7678	12.6976	3.4830	-72.5359	9.5174	56.0692
	KÇTA 2	176.4837	0.0020	-88.0058	8.6462	3.5588	-46.4904	66.6128
	KÇTA 3	159.3749	5.4173	-51.2830	-22.6370	-42.8438	30.6860	46.7986
P2 [24 50 100]	ÇTA	55.6247	-10.8454	-18.7128	-24.2542	82.0030	-89.9687	7.7394
	KÇTA 1	129.1541	-21.1367	-79.4326	-87.7720	27.8990	88.2270	51.1116
	KÇTA 2	-179.5297	-89.9667	-77.0423	-88.6275	89.4984	88.3994	16.3489
	KÇTA 3	-173.9151	-86.5484	-76.0532	-6.6792	67.7784	-89.6369	- 30.0000
P3 [-30 30 80]	ÇTA	30.8102	17.4824	118.5780	-76.5699	63.2843	80.8483	80.1078
	KÇTA 1	177.4396	28.3518	-23.1185	-89.9194	-78.0442	-88.1116	88.1929
	KÇTA 2	140.4795	29.9979	118.5559	-90.0000	-15.1437	-89.9756	- 21.4159
	KÇTA 3	124.6548	-75.8700	-73.6553	84.9244	74.2148	84.3397	16.8002

Çizelge 3. Son efektörün konumları, konum hatası ve çözüm süresi

Hedef Konumlar (P_x, P_y, P_z)	Algoritma	Açılar		
		P_x	P_y	P_z
P1 [-25 100 50]	ÇTA	-24.8955	99.9983	49.9483
	KÇTA 1	-24.9975	100.0037	49.9970
	KÇTA 2	-25.0098	99.9976	49.9992
	KÇTA 3	-24.9985	100.0078	49.9996
P2 [24 50 100]	ÇTA	24.0037	50.0029	99.9870
	KÇTA 1	23.9996	50.0010	99.9996
	KÇTA 2	24.0015	49.9997	100.0007
	KÇTA 3	23.9940	49.9970	99.9905
P3 [-30 30 80]	ÇTA	-29.9966	30.0024	80.0036
	KÇTA 1	-29.9977	29.9985	80.0020
	KÇTA 2	-30.0013	30.0002	80.0027
	KÇTA 3	-30.0003	29.9977	79.9988

Çizelge 4. Son efektörün hedef konumlarına göre konum hatası('m') ve çözüm süresi(s)

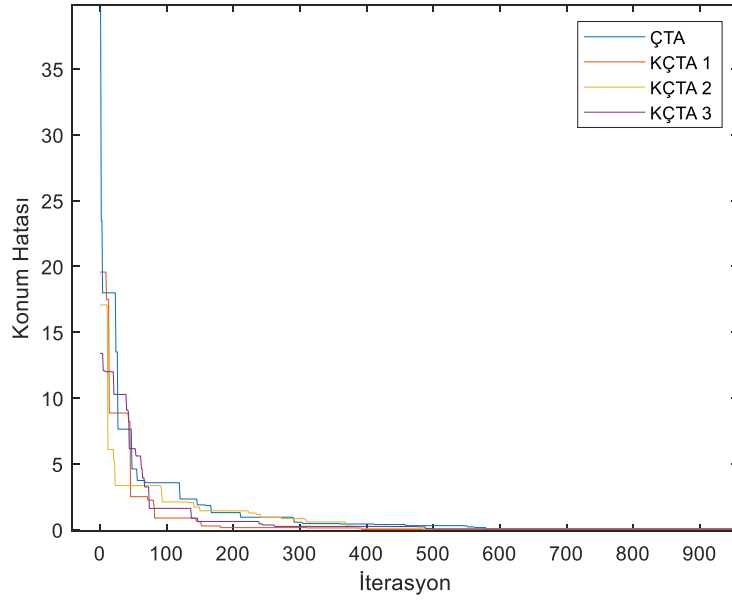
(P_x, P_y, P_z)	Algoritma	ÇTA	KÇTA 1	KÇTA 2	KÇTA 3
P1 [-25 100 50]	Konum Hatası	0.1166	0.0054	0.0101	0.0079
	Çözüm Süresi	1.1508	2.2042	2.3212	2.2658
P2 [24 50 100]	Konum Hatası	0.0138	0.0012	0.0017	0.0117
	Çözüm Süresi	1.6515	2.3856	1.2280	0.5883
P3 [-30 30 80]	Konum Hatası	0.0055	0.0034	0.0030	0.0026
	Çözüm Süresi	1.2522	2.2349	2.4782	2.4024

Çizelge 5. P1, P2 ve P3 için algoritmaların karşılaştırmalı sonuçları

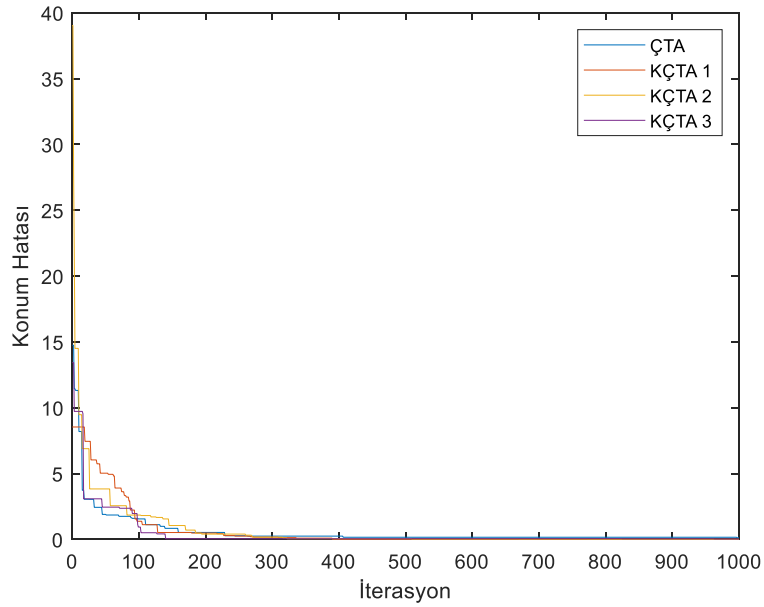
Hedef Konumlar (P_x, P_y, P_z)	Algoritma	Min	Mak	Ort	Standart sapma
P1 [-25, 100, 50]	ÇTA	0.0166	0.1185	0.0564	0.0302
	KÇTA 1	0.0054	0.0810	0.0407	0.0218
	KÇTA 2	0.0101	0.0994	0.0577	0.0251
	KÇTA 3	0.0079	0.1005	0.0390	0.0244
P2 [24 50 100]	ÇTA	0.0138	0.0808	0.0447	0.0223
	KÇTA 1	0.0012	0.0665	0.0241	0.0175
	KÇTA 2	0.0017	0.1036	0.0333	0.0296
	KÇTA 3	0.0117	0.0714	0.0400	0.0194
P3 [-30 30 80]	ÇTA	0.0055	0.0586	0.0293	0.0155
	KÇTA 1	0.0034	0.0416	0.0141	0.0110
	KÇTA 2	0.0030	0.0371	0.0157	0.0099
	KÇTA 3	0.0026	0.0512	0.0138	0.0115

Çizelge 5'te optimal fonksiyonun istatistiksel sonuçları listelenmiştir. Bu çizelgeye göre üç farklı hedef noktası göz önünde bulundurulduğunda kaotik tabanlı algoritmalar orijinal algoritmaya göre daha iyi sonuçlar vermiştir. P1 [-25, 100, 50] ve P2 [24 50 100] hedef konumlarına sahip son efektör incelendiğinde KÇTA 1 algoritması diğer algoritmalara göre en iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca standart sapma değeri de en küçük değere sahip olduğundan problem çözme kalitesinde daha kararlı olduğunu göstermektedir. P3[-30 30 80] hedef konumu incelendiğinde KÇTA 3 algoritmasının minimum ve ortalama performans değerlerinde en iyi sonuçları verdiği görülmektedir. Standart sapma değerinde ise KÇTA 2 algoritmasında elde edilen sonuçlar arasında farklılık olmadığı görülmektedir. Sonuç olarak Çizelge 4'te rapor edilen sonuçlar önerilen kaotik tabanlı çiçek tozlaşma

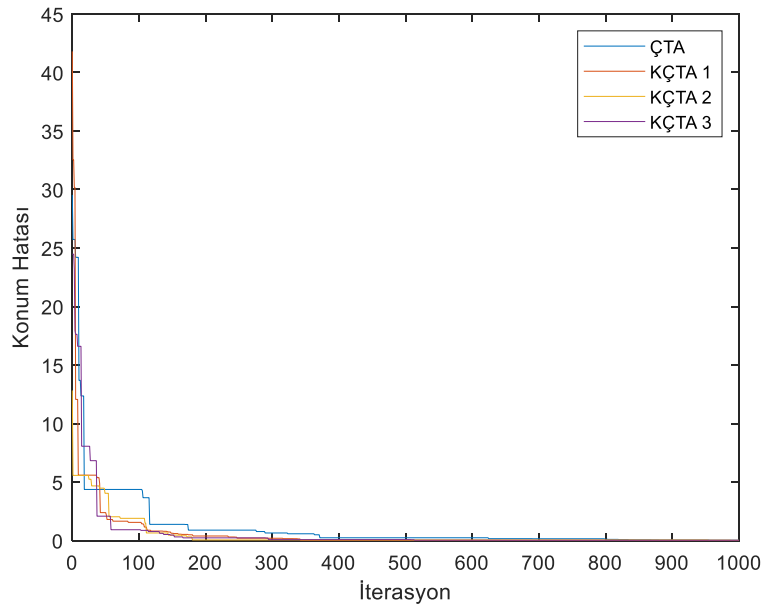
algoritmalarının etkinliğini göstermektedir. Ortalama konum hatasının P1 için 0.0390 (“m”), P2 için 0.0241(“m”) son olarak P3 için ise 0.0138(“m”) değerlerinde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4. Son efektörün P1[-25, 100, 50] hedef konumuna göre iterasyon boyunca konum hatası



Şekil 5. Son efektörün P2 [24 50 100] hedef konumuna göre iterasyon boyunca konum hatası



Şekil 6. Son efektörün P3[-30 30 80] hedef konumuna göre iterasyon boyunca konum hatası

Geliştirilen algoritmalarla son efektörün hedef konumuna göre elde edilen eklem açıları kullanılarak iterasyon boyunca hesaplanan konum hataları Şekil 4-6'da gösterilmektedir. Algoritmaların maksimum iterasyon sayısı 1000 olarak belirlense bile belirli bir iterasyon değerinden sonra çözüm geliştirilememiştir. Bu grafikler incelendiğinde son efektörün P1[-25, 100, 50], P2 [24 50 100] hedef konumlarına ulaşmada KÇTA 1 algoritması, P3[-30 30 80] hedef konumunda ise KÇTA 2 algoritmasının performansının daha iyi olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada 7 eksenli seri robot manipülâtörün ters kinematik problemin çözümü sağlanmıştır. Problem geliştirilen üç farklı kaotik tabanlı algoritma (KÇTA 1, KÇTA 2 ve KÇTA 3) ve orijinal ÇTA kullanılarak çözülmüştür. Algoritmalar belirlenen manipülâtörün üç farklı son efektör konumuna göre ulaşabilmesi için gerekli açıları belirlemiştir. Ayrıca minimum, maksimum, ortalama konum hataları, çözüm süreleri ve standart sapma performans kriteri belirlenmiştir. Sonuç olarak gerçekleştirilen tüm simülasyon sonuçlarına göre kaotik tabanlı algoritmaların başarılı olduğu görülmüştür. Ek olarak kaotik tabanlı algoritmaların manipülâtörün ters kinematik çözümüne uygun olduğu görülmüştür.

Çıkar Çatışması

Makalenin planlanması, yürütülmesi ve yazılması sırasında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederim.

Yazar Katkısı

Makalenin planlanmasının, yürütülmesinin ve yazılmasının makalenin tek yazarı olarak tarafımdan yapıldığını beyan ederim

KAYNAKLAR

- Ayyıldız M, Çetinkaya K, 2016. Comparison of four different heuristic optimization algorithms for the inverse kinematics solution of a real 4-DOF serial robot manipulator. *Neural Computing and Applications*, 27: 825–836.
- Çimen ME, Garip, ZB, Boz AF, 2021. Chaotic flower pollination algorithm based optimal PID controller design for a buck converter. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 107: 281–298.

- Dereli S, Köker R, 2019. A meta-heuristic proposal for inverse kinematics solution of 7-DOF serial robotic manipulator: quantum behaved particle swarm algorithm. *Artificial Intelligence Review*.
- Dereli S, Köker R, 2019. Calculation of the inverse kinematics solution of the 7-DOF redundant robot manipulator by the firefly algorithm and statistical analysis of the results in terms of speed and accuracy. *Inverse Problems in Science and Engineering*.
- Durmuş B, Temurtaş H, Gün A, 2011. An Inverse Kinematics Solution using Particle Swarm Optimization. *IATS*.
- El-Sherbiny A, Elhosseini MA, Haikal AY, 2018. A comparative study of soft computing methods to solve inverse kinematics problem. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4):2535-2548.
- Hénon MA, 1976. Two-Dimensional Mapping With a Strange Attractor. *The Theory of Chaotic Attractors*. Springer, 94–102.
- Huang H, Chen C, Wang P, 2012. Particle Swarm Optimization for Solving the Inverse Kinematics of 7-DOF Robotic Manipulators. *IEEE International Conference on System*.
- Hwang S, Kim H, Choi Y, Shin K, Han C, 2017. Design Optimization Method for 7 DOF Robot Manipulator Using Performance Indices. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 18(3): 293-299.
- Jha P, Bibhuti Bhusan Biswal, 2017. Optimization Approach for Inverse Kinematic Solution, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.71409. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/57605>
- Karpinska J, Tchon K, Janiak M, 2012. Approximation of Jacobian Inverse Kinematics Algorithms: Differential Geometric vs. Variational Approach. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 68:211–224.
- Köker R, 2013. A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization. *Information Sciences*, 222: 528-543.
- Seraji H, Long MK, Lee TS, 1993. Motion Control of 7-DOF Arms: The Configuration Control Approach. *IEEE Transactions On Robotics And Automation*, 9(2).
- Tabandeh S, Melek WW, Clark CM, 2010. An adaptive niching genetic algorithm approach for generating multiple solutions of serial manipulator inverse kinematics with applications to modular robots. *Robotica*, 28: 493–507.
- Toz M, 2017. Inverse Kinematic Solution Of A 6 Dof Serial Robot Manipulator With Offset Wrist By Using ALO Algorithm. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 8(2): 81-90.
- Wang J, Li Y, Zhao X, 2010. Inverse Kinematics and Control of a 7-DOF Redundant Manipulator Based on the Closed-Loop Algorithm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 7(4):1-10.
- Yang XS, 2012. Flower pollination algorithm for global optimization. *Unconventional Computation and Natural Computation*, 240–249.
- Yousri D, AbdelAty AM, Said LA, Elwakil AS, Maundy B, Ahmed G. Radwan, 2019. Chaotic Flower Pollination and Grey Wolf Algorithms for parameter extraction of bio-impedance models. *Applied Soft Computing Journal* 75: 750–774.
- Zhang L, Xiao N, 2019. A novel artificial bee colony algorithm for inverse kinematics calculation of 7-DOF serial manipulators. *Soft Computing*, 23: 3269–3277.