



İstanbul
GEDİK
Üniversitesi



TÜRKİYE ROBOTBİLİM KONFERANSI

2-3 KASIM 2016 - İSTANBUL

ToRK 2016 Bildiriler Kitabı



Konferans Sponsorları



OTC DAIHEN EUROPE GmbH

FESTO

GINATIC
OTOMASYON

ROBOT SEPETİ
+CDM

T.C.
İstanbul Gedik Üniversitesi
Cumhuriyet Mahallesi İlkbahar Sokak No: 1-3-5
Yakacık 34876 Kartal İstanbul
Telefon: 444 5 438
Fax: +90 (216) 452 87 17
e-mail: info@gedik.edu.tr

Editörler

Editorial Board

Yrd. Doç. Dr. Savaş DİLİBAL
Doç. Dr. Erol ŞAHİN
Yrd. Doç. Dr. Haydar ŞAHİN
Doç. Dr. Sinan KALKAN
Doç. Dr. Sanem SARIEL

Yayın Danışma Kurulu

Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Levent AKIN - Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Çağatay BAŞDOĞAN - Koç Üniversitesi
Prof. Dr. Aydan ERKMEN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Veysel GAZİ - Kemerburgaz Üniversitesi
Doç. Dr. Sinan KALKAN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Erhan ÖZTOP - Özyeğin Üniversitesi
Doç. Dr. Volkan PATOĞLU - Sabancı Üniversitesi
Doç. Dr. Uluç SARANLI - Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Sanem SARIEL - İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Erol ŞAHİN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Redaksiyon

Redaction

Arş. Gör. Canberk Sözer

ISBN Numarası

ISBN Number

9786058557215

Baskı

Printed by

Özlem Matbaacılık ve Reklamcılık LTD. ŞTİ.
2. Matbaacılar Sit. Litros Yolu D2BB4 Zeytinburnu İstanbul
Tel: (0212) 501 66 00

Üç Serbestlik Dereceli Paralel Rehabilitasyon Eyleyicinin Ateş Böceği Algoritması Kullanılarak Boyutsal Olarak Eniyilemesi

Özgün Selvi, Samet Yavuz
Makine Mühendisliği
Çankaya Üniversitesi
Ankara, Türkiye

Email: ozgünselvi@cankaya.edu.tr, syavuz@cankaya.edu.tr

Özetçe —Bu çalışma, insan bilek eklemi rehabilitasyonunda kullanılacak üç serbestlik derecesine sahip üç bacaklı küresel bir paralel eyleyicinin belirli bir çalışma uzayında çalışmasını sağlayacak boyutsal parametrelerin tespitini amaçlamaktadır. Bahsi geçen eyleyicinin son-elemanı insan bilek eklemi için üç serbestlik derecesini kapsamaktadır. Eyleyicinin her bacağı iki küresel uzva sahiptir ve tüm eklem eksenleri ortak bir noktada kesişmektedir. Eniyileme algoritmasında kullanılmak üzere eyleyicinin ters kinematik denklemleri çözülmüş Jacobi matrisi elde edilmiştir. Daha sonra ters kinematik denklemlerinden ve Jacobi matrisinden elde edilen kısıtlar ateş böceği algoritmasında kullanılarak belirli çalışma alanı için boyutsal eniyileme gerçekleştirilmiştir. Son olarak bu boyutsal parametrelerle bilek hareketleri benzetilerek çalışma alanı testi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler—Rehabilitasyon robotiği, paralel rehabilitasyon eyleyicileri, Ateş böceği Algoritması.

I. GİRİŞ

Paralel eyleyiciler, son uzuvları çeşitli bağımsız kinematik zincirlerle yere bağlanan kapalı çevrim kinematik zincirlerdir [1]. Bu bildiriye üç serbestlik dereceli küresel bir paralel eyleyici incelenmiştir. Bu eyleyici ilk olarak Gosselin C. ve Angeles J. [2] – [3] tarafından sunulup, eyleyicinin eniyilemesi üzerinde çalışılmıştır. Gosselin C. ve Hamel J. [4] kamera-hizalama cihazı önürünün boyutsal parametrelerini belirlemek için kinematik eniyileme üzerinde çalışmışlardır. Liu vd. [5] şartlama ve dirençlik indekslerini kullanarak bu eyleyicinin tasarimsal eniyilemesi ile uğraşarak uzvusal eniyileme ve çalışma performansının analizini sunmuşlardır. Belirli koşullu indeks, GCI ve GDCI gibi çeşitli indeksler ve çok kriterli rastgele arama, doğrusal eyletim yöntemi, Monte Carlo yöntemi, kapsamlı arama minimizasyon algoritması, ateş böceği algoritması, genetik algoritma vb. eniyileme algoritmaları ve yöntemleri kullanılarak paralel eyleyicilerde eniyileme yolunda çalışmalarda bulunulmuştur. Huang T. vd. [6] belirli koşullu indeks kullanarak iki serbestlik dereceli paralel eyleyicinin çalışma alanını dikdörtgensel bir alanla sınırlamıştır. Olds K.C. [7] paralel robotlarda eniyileme problemini çözebilmek için genel indeksler için yeni bir yaklaşım geliştirmiştir Lou, Y. J. vd. [8] maharet indeksini kullanarak çalışma alanı etkinliğini karakterize etmişlerdir.

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

Maharetliliği ölçmek için Jacobian Matrisinin ters koşul sayısını kullanmışlardır. Stan, S. [9] paralel robotlar için tek açılı eniyilenmiş tasarım yöntemini eniyilik ölçütü ve nümerik bakış açıları kullanarak sunmuştur. Mini boyutlu paralel robotların çalışma alanını maksimize etmek için genetik algoritma kullanarak kinematik performans eniyilemesi yapmıştır. Ayrıca yine genetik algoritma kullanılarak, Stan, S. vd. [10] tarafından düzlemsel paralel medikal robotların geometrik parametreleri eniyilenmeye çalışılmıştır. Gao, Z. ve Zhang, D. [11] üç serbestlikli paralel mekanizmaların en iyi çalışma alanını elde edebilmek için parçacık yığıcı algoritmasını uygulamışlardır. Doğa ilhamlı üstsezgisel [13] bir algoritma olan Ateş böceği algoritması Yang [12] tarafından geliştirilmiştir. Literatürde sadece birkaç araştırmacının robotik eniyileme için bu algoritmayı tercih ettiği görülmektedir. Bu araştırmacılar arasında yer alan Nedic N. vd. [14] bir paralel robot platformun kademeli yük-kuvvet kontrolünün parametre tayininde ateş böceği algoritmasına başvurmuşlardır. Ayrıca bahsi geçen araştırmacılar ateş böceği algoritmasının doğrusal olmayan eniyileme problemlerinde diğer üstsezgisel algoritmalarından daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Bu bildiriye insan bilek eklemi rehabilitasyonunda kullanılacak üç serbestlikli ve üç bacaklı paralel bir eyleyicinin tanımlı bir çalışma alanı için boyutsal eniyilenmesi ele alınmıştır. Bunu sağlayabilmek için bildiri beş parçaya incelenecektir. İlk bölüm eyleyicinin geometrisini ortaya koyup çalışma alanının sınırlarını çizmektedir. Onu takip eden bölüm eyleyiciyi kinematik olarak analiz edip Jacobi matrisini önermektedir. Sonraki bölümde, önceki bölümden elde edilen kısıtlarla Ateş böceği algoritmasının uygulanışı verilmiştir. Son olarak elde edilen boyutsal parametreler deneyerek sonuca gidilmiştir.

II. EYLEYİCİ GEOMETRİSİ VE ÇALIŞMA ALANI SINIRLARI

Eniyileme yoluna gidilen eyleyici Şekil 1'de verilmiştir. Rehabilitasyon esnasında insan eli eyleyicinin son uzvuyla bir tutamaç yardımıyla etkileşime geçecektir. Daha sonra eyleyici, kullanıcıya aktif ve pasif direnç içeren çeşitli bilek hareketlerini gerçekleştirmesinde yardım edecektir. İnsan bilek eklemlerinin kesişim noktasıyla, eyleyicinin etrafında

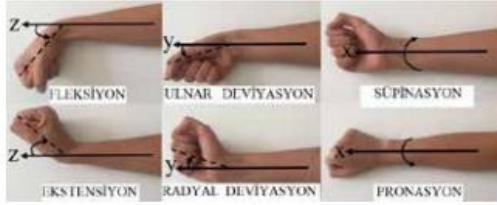
döndüğü P noktası örtüşmektedir (Şekil 3.). İnsan bilek ekleminin sahip olduğu sınırlar kullanılarak eyleyicinin yönelimi ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$) tespit edilmiştir. Bilek ekleminin, x ekseninde pronasyon-süpinasyon hareketini, y ekseninde radyal-ulnar deviyasyonu ve z ekseninde fleksiyon-ekstansiyon hareketini yaptığı kabul edilmiştir (Şekil 3). Bu hareketlerin sınırları literatürden seçilerek belirlenmiştir (Tablo 1.)[16].

II. TERS KİNEMATİK ÇÖZÜMLER ve JACOBI ANALİZİ

Ateş böceği algoritmasında kullanılmak üzere elde edilecek olan amaç fonksiyonunun kısıtları ters kinematik çözümlerden ve Jacobi matrisinden alınmıştır. Öncelikle, platformun dönüşüm matrisleri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir. Birim vektör $u, [0,0,1]^T$ olarak tanımlansın.



Şekil 1. Rehabilitasyon amaçlı üç serbestlikli paralel küresel eyleyici



Şekil 2. İnsan bileğinin hareketleri,

Tablo 1. Belirlenen çalışma alanı ve sınırları

Hareket	Eksen	Sınırlar	Sağlanan
δ_1	x	(-10 °, 50 °)	Pronasyon ve Süpinasyon
δ_2	y	(-30 °, 40 °)	Radyal-Ulnar Deviyasyon
δ_3	z	(-40 °, 40 °)	Ekstansiyon ve Fleksiyon

$$\delta = \delta_x, \delta_y, \delta_z \quad (1)$$

w_i 'in platforma göre yönelimi,

$$w_i^* = R_y^z \cdot R_x^y \cdot [0,0,1]^T \quad (2)$$

β tüm eklemlerin x eksenine göre temsil etsin. Bu değer tüm eklemler için eşit kabul edilip Ateş böceği algoritması ile bulunacaktır. γ_i tüm eklemlerin z eksenine göre temsil etsin. Bu değer tüm eklemler için eşit kabul edilip Ateş böceği algoritması ile bulunacaktır. γ_i tüm eklemlerin z eksenine göre temsil etsin. Bu değer tüm eklemler için eşit kabul edilip Ateş böceği algoritması ile bulunacaktır. γ_i tüm eklemlerin z eksenine göre temsil etsin. Bu değer tüm eklemler için eşit kabul edilip Ateş böceği algoritması ile bulunacaktır.

$$w_i = R_{\delta_3^z} \cdot R_{\delta_2^y} \cdot R_{\delta_1^x} \cdot w_i^* \quad (3)$$

olsun. w_i 'in eyleyici bacaklarına göre yönelimi şöyle yazılabilir.

$$w_i = R_{\theta_{1,i}^z} \cdot R_{\alpha_{1,i}^x} \cdot R_{\theta_{2,i}^z} \cdot R_{\alpha_{2,i}^x} \cdot [0,0,1]^T \quad (4)$$

Eşitlik 4'ü matris formunda yazıp, x ve y bileşenlerinden $S(\theta_{2,i})$ elimine edildiğinde aşağıdaki eşitliklere ulaşırız.

$$w_x S(\theta_{1,i}) = w_y C(\theta_{1,i}) + C(\alpha_{2,i})S(\alpha_{1,i}) + C(\alpha_{1,i})C(\theta_{2,i})S(\alpha_{2,i}) \quad (5)$$

$$C(\theta_{2,i}) = -\left(w_y - C(\alpha_{1,i})C(\alpha_{2,i})\right) \text{Csc}(\alpha_{1,i}) \text{Csc}(\alpha_{2,i}) \quad (6)$$

Eşitlik 6'yı eşitlik 5'in içine yerleştirip $\theta_{1,i}$ için çözdüğümüzde aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$\theta_{1,i} = \text{ArcTan} \left[\frac{-e_2 e_3 \pm \sqrt{e_1^2 (e_1^2 + e_2^2 - e_3^2)}}{e_1^2 + e_2^2}, \frac{-e_1^2 e_3 \pm e_2 \sqrt{e_1^2 (e_1^2 + e_2^2 - e_3^2)}}{e_1^3 + e_1 e_2^2} \right] \quad (7)$$

Burada, $e_1 = -w_x, e_2 = w_y, e_3 = (-w_z + C(\alpha_{1,i})C(\alpha_{2,i})) \text{Cot}(\alpha_{1,i}) + C(\alpha_{2,i})S(\alpha_{1,i})$ eşitlikleri geçerlidir. Eşitlik 4'ün matris formundan, x bileşenini kullanarak $S(\theta_{2,i})$ ve z bileşenini kullanarak $C(\theta_{2,i})$ 'i bulalım.

$$S(\theta_{2,i}) = \text{Csc}(\alpha_{2,i}) (w_x C(\theta_{1,i}) + w_y S(\theta_{1,i})) \quad (8)$$

$$C(\theta_{2,i}) = -\left(w_z - C(\alpha_{1,i})C(\alpha_{2,i})\right) \text{Csc}(\alpha_{1,i}) \text{Csc}(\alpha_{2,i}) \quad (9)$$

Son olarak $\theta_{2,i}$,

$$\theta_{2,i} = \text{ArcTan}[C(\theta_{2,i}), S(\theta_{2,i})] \quad (10)$$

olur. Paralel eyleyiciler bir ya da daha fazla serbestlik kazandıklarında tekillik durumuna girerler ve rijitliklerini tamamen kaybederler. Jacobian matris analizi bize bu tekillikleri tanımlamamıza yardımcı olmaktadır. Ayrıca Jacobi matrisinden elde edilen kısıtlarla eniyileme algoritmasının amaç fonksiyonu oluşturulacaktır. Son uzvun açılma hızını $\omega = [\omega_x \omega_y \omega_z]^T$ ve giriş $\theta = [\theta_{1,i} \theta_{2,i} \theta_{3,i}]^T$ olarak tanımlayalım. Birbirleri arasındaki Jacobian ilişkisi,

$$J_x \omega = J_q \theta \quad (11)$$

şeklinde olur. Son uzvun açısal hız denklemi,

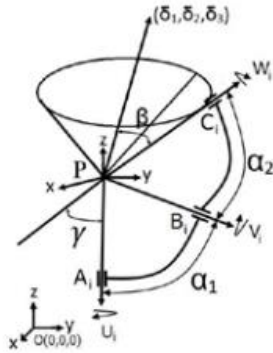
$$\omega = u_l \cdot \hat{\theta}_{1,l} + v_l \cdot \hat{\theta}_{2,l} + w_l \cdot \hat{\theta}_{3,l} \quad (12)$$

şeklinde olur. Eşitlik 12'de her iki tarafı $v \times w$ ile noktasal olarak çarpalım.

$$\omega \cdot (v_l \times w_l) = u_l \cdot (v_l \times w_l) \cdot \hat{\theta}_{1,l} \quad (13)$$

$R_B^A = R_{\delta_3}^A \cdot R_{\delta_2}^B \cdot R_{\delta_1}^C$ ilişkisinden yararlanarak rijit bir cisim için eğik-simetrik matrisi aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\Omega \equiv R_B^A R_B^{A^{-1}} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$



Şekil 3. Eyletici eklem eksenlerinin belirlenmesi

Açısal hız bileşenleri aşağıdaki hali alırlar.

$$\omega_{x,l} = C(\delta_2) C(\delta_3) \delta_1 - S(\delta_3) \delta_2 \quad (15)$$

$$\omega_{y,l} = C(\delta_2) S(\delta_3) \delta_1 + C(\delta_3) \delta_2 \quad (16)$$

$$\omega_{z,l} = -S(\delta_2) \delta_1 + \delta_3 \quad (17)$$

Ayrıca eyleyicinin geometrisinden takip eden eşitlikleri $u = [0,0,1]^T$, $v = R_{\theta_{1,l}}^A \cdot R_{\alpha_{1,l}}^B \cdot [0,0,1]^T$, $w_l = R_{\theta_{2,l}}^A \cdot R_{\alpha_{2,l}}^B \cdot R_{\theta_{3,l}}^C \cdot R_{\alpha_{3,l}}^D \cdot [0,0,1]^T$ olarak biliyoruz. Bu eşitlikleri eşitlik 13'ün içine yazdığımızda J_x ve J_q vektörlerini elde ederiz.

$$J_q = \begin{pmatrix} J_{q_{1,1}} & 0 & 0 \\ 0 & J_{q_{2,2}} & 0 \\ 0 & 0 & J_{q_{3,3}} \end{pmatrix}, J_x = \begin{pmatrix} J_{x_{1,1}} & J_{x_{2,1}} & J_{x_{3,1}} \\ J_{x_{1,2}} & J_{x_{2,2}} & J_{x_{3,2}} \\ J_{x_{1,3}} & J_{x_{2,3}} & J_{x_{3,3}} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$J_{q_{1,1}} = S(\alpha_{1,1})S(\alpha_{2,1})S(\theta_{2,1}), J_{q_{2,2}} = S(\alpha_{1,2})S(\alpha_{2,2})S(\theta_{2,2}),$$

$$J_{q_{3,3}} = S(\alpha_{1,3})S(\alpha_{2,3})S(\theta_{2,3}),$$

$$J_{x_{1,i}} = S(\alpha_{2,i})(S(\alpha_{1,i})S(\delta_2)S(\theta_{2,i}) - C(\delta_2)(C(\delta_3 - \theta_{1,i})))$$

$$C(\theta_{2,i}) + C(\alpha_{1,i})S(\delta_3 - \theta_{1,i})S(\theta_{2,i}))$$

$$J_{x_{2,i}} = S(\alpha_{2,i})(C(\theta_{2,i})S(\delta_3 - \theta_{1,i})$$

$$-C(\alpha_{1,i})C(\delta_3 - \theta_{1,i})S(\theta_{2,i}))$$

$$J_{x_{3,i}} = -S(\alpha_{1,i})S(\alpha_{2,i})S(\theta_{2,i})$$

II. ENİYİLEME YÖNTEMİ ve ATEŞ BÖCEĞİ ALGORİTMASIN UYGULANMASI

Bu çalışmada önceki bölümlerde belirtilen küresel eyleyicinin boyutsal parametrelerinin belirlenmesinde Ateş böceği algoritması kullanılmıştır. Ateş böceği algoritması, ateş böceklerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilen, doğa kaynaklı üstsezgisel bir algoritmadır [13]. Ateş böceği algoritmasında her etken (ateş böcekleri) ışık üretmekte ve parlak ışığa sahip olanlar diğerlerini kendine doğru çekmektedir [15]. Bu çalışmada belirli çalışma alanına sağlama amacıyla eniyilemesi yapılacak boyutsal parametreler; küresel eyleyicinin link boyları olan $\alpha_{1,i}$ ve $\alpha_{2,i}$ (her bacak için eşit kabul edileceklerdir) ve tüm eklem eksenlerinin x eksenine etrafındaki yönelimini z eksenine göre temsil eden β parametreleridir. Yang X. S. [13] tarafından taslaklanan algoritmanın bu çalışmaya uyarlanması aşağıdaki gibidir.

```

Amaç fonksiyonu  $f(x_i) =$ 
 $1/\sqrt{1 + \alpha_{1,i}^2 + \alpha_{2,i}^2 + \beta_i^2} \cdot \text{Mean}(kqlist) \cdot \text{Mean}(kxlist)$ 
 $x_i = (\alpha_{1,i}, \alpha_{2,i}, \beta_i)^T$ ,
Ateş böceklerinin ilk popülasyonu  $x_i (i = 1, 2, \dots, n_f)$ .
 $x_i$ 'deki ışık yoğunluğu  $I$ ,  $f(x_i)$  tarafından belirlenir.
Işık emiş katsayısı  $\gamma$ 'ı tanımla
for ( $m_i; 1, \text{MaxGen}$ )
  for  $i = 1: n_f$ 
    for  $j = 1: n_f$ 
      if ( $I_i < I_j$ ),  $r_{i,j} = \sqrt{\text{Sum}[(x_{k,i} - x_{k,j})^2, (k, 1, n_c)]}$ ;
      While  $k \leq n_c$   $x_{k,i} = x_{k,i} + \frac{\beta_0 S_k}{1 + \gamma r_{i,j}^2} (x_{k,j} - x_{k,i}) +$ 
 $\alpha S(\text{Random}[] - 0.5)$ ,
      end (ateş böceği i'yi j'ye yaklaştır)
      else
      While  $k \leq n_c$   $x_{k,i} = x_{k,i} + \alpha S(\text{Random}[] - 0.5)$ 
      end (ateş böceğini rastgele hareket ettir)
      end if
 $f(x_i)$ 'in yeni sonuçlarını değerlendir ve ışık yoğunluğunu
güncelle
    end for j
  end for i
  Ateş böceklerini sıralandır ve en iyi anlık sonuç  $g^{**}$ 'i bul.
end for

```

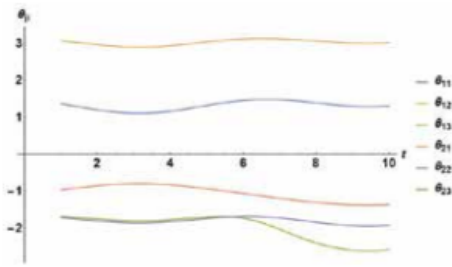
Algoritmada geçen parameter değerleri, Lukasik S. ve Zak S.'in [15] ateş böceği algoritması üzerine yaptıkları çalışmaya uygun belirlenmiştir. Algoritmada, n_f ateş böceği popülasyonunu belirtmektedir ve 50 seçilmiştir. Koordinat sayısı olan n_c , eniyilenmesi beklenen parameter sayısını belirtmektedir. Yaklaşım hızı ya da emiş katsayısı olan γ (0.8), etkileşim halindeki ateş böceklerinin [15] birbirine yaklaşım oranını vermektedir. Çekicilik katsayısı β_0 (0.8), bir ateş böceğinin diğer ateş böceklerini kendisine çekebilme kapasitesidir. Rastgelelik α , ateş böceklerinin hangi ölçüde rastgele hareket ettiğini belirler ve her adımda bir ölçek (S) ile çarpılır. Burada $f(x_i)$ amaç fonksiyonu ve x_i eniyilenmesi beklenen parametrelerdir. Son olarak $r_{i,j}$ ateş böcekleri arasındaki mesafenin monoton azalan fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Algoritmada geçen $kqlist$ ve $kxlist$ takip eden eşitliklerde tanımlanmıştır. Eşitlik (19) ve (20)'in ortalamaları kullanılarak verilen sınır şartları içerisinde tekillik durumu control edilmiştir.

$$kqlist = 1/(\text{Norm}[\text{Inverse}[J_q]] \text{Norm}[J_q]) \quad (19)$$

$$kxlist = 1/(\text{Norm}[\text{Inverse}[J_x]] \text{Norm}[J_x]) \quad (20)$$

II. ENİYİLENMİŞ DEĞERLERİN SONUÇLARI

Eniyilenen veriler 30 adımlık bir koşturma sonrasında $\alpha_1 = 0.95$, $\alpha_2 = 0.94$ ve $\beta = 0.82$ olarak bulunmuştur. Elde edilen bu boyutsal parametreler, belirlenen çalışma alanı içerisinde eyleyicinin tekilselliğe uğratmadan çalışmasını sağlamalıdır. Son uzvun yönelimini veren ve t, (1,10) aralığında Tablo 1'de verilen çalışma aralıklarını sağlayan δ_1 , δ_2 ve δ_3 'ü aşağıdaki fonksiyonlar şeklinde tanımlayalım. $\delta_1 = 10 S(t/2) + 40$, $\delta_2 = 5 C(t) + 20$, $\delta_3 = 7 S(t/2) + C(t) + 30$ Bu aralıkta eyleyicinin döner eklemlerinin hareketlerini incelediğimizde herhangi bir tekilselliğe uğramadan bilek eklemi sınırlarına göre belirlenen çalışma alanında düzgün bir hareket gerçekleştirdiği görülmektedir (Şekil 4.).



Şekil 4. Eniyilenen parametrelerle benzetim sonucu

Bu çalışmada üç serbestlikli rehabilitasyon amacıyla kullanılacak paralel bir küresel eyleyicinin boyutsal parametreleri, insan bileğinin çalışma sınırları baz alınarak belirlenen çalışma alanına sağlayacak ve dönel eklemlerde herhangi bir tekilselliğe sebep olmayacak şekilde ateş böceği algoritması kullanılarak eniyilenmeye çalışılmıştır. İlerleyen çalışmalarda bu çalışmadan elde edilen sonuçlar temel alınarak daha fazla serbestlik derecesine sahip, aşırı-kapalı sistemlerin incelenmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] J.P. Merlet, *Parallel robots* (Vol. 74). Springer Science & Business Media, 2012
- [2] C.M. Gosselin and J. Angeles, The optimum kinematic design of a spherical 3 DOFs parallel manipulator, *Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design*, 1989
- [3] C.M. Gosselin and E. Laovie, On the kinematic design of spherical three-degree-of-freedom parallel manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 1993
- [4] C.M. Gosselin and J.F. Hamel, The agile eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device, *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, 1994
- [5] L. Xin-Jun L., J. Zhen-Lin, G. Feng, Optimum design of 3 DOF spherical parallel manipulators with respect to the conditioning and stiffness indices, *Mechanism and Machine Theory*, 2000
- [6] T.L. Huang, D. G. Chetwynd and D.J. Whitehouse, Optimal Kinematic Design of 2-DOF Parallel Manipulators with Well-Shaped Workspace Bounded by a Specified Conditioning Index, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.20, No.3, 2004
- [7] C. Olds, Global Indices for Kinematic and Force Transmission Performance in Parallel Robots, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.31, No.2, 2015
- [8] Y.J. Lou, G.F. Liu and Z.X. Li, A General Approach for Optimal Design of Parallel Manipulators, *IEEE Transactions on Automation science and engineering*, 2005
- [9] S. Stan, Workspace optimization of a two degree of freedom mini parallel robot, *Automation, Quality and Testing, Robotics, 2006 IEEE International Conference on* Vol. 2, 2006
- [10] S. Stan, M. Manic, R. Balan and V. Maties, Genetic algorithms for workspace optimization of planar medical parallel robot, *IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing*, 2009
- [11] Z. Gao and D. Zhang, Workspace representation and optimization of a novel parallel mechanism with three-degrees-of-freedom. In: *Sustainability*, pp. 2011
- [12] H. Zang, S. Zhang and K. Hapeshi, A review of nature-inspired algorithms. *Journal of Bionic Engineering*, 2010
- [13] X. Yang, *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press, 2010.
- [14] N. Nedic et al., Optimal cascade hydraulic control for a parallel robot platform by PSO, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014
- [15] S. Lukasik, Z. Szymon and S. Ak, Firefly algorithm for continuous constrained optimization tasks, *International Conference on Computational Collective Intelligence*, 2009
- [16] D.H. Gates et al, Range of motion requirements for upper-limb activities of daily living. *American J. of Occ. Therapy*, 2016