

# Dört Bacaklı Robotlarda Merkezi Örüntü Üreteci ve Genetik Algoritmalar ile Referans Sentezi

Ö. Kemal Adak, M. Mert Gülhan, Koray Erkekli, Beste Bahçeci ve Kemalettin Erbatur  
Mekatronik Mühendisliği  
Sabancı Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
Email: omerkemal, mertgulhan, korayerkekli, bestebahceci, erbatur@sabanciuniv.edu

**Özetçe** —Bu çalışmada Merkezi Örüntü Üretimi (MÖÜ) ile referansları sentezlenen dört bacaklı robotun dengeli yürüyüşü önerilmiştir. MÖÜ biyolojiden ilham alınarak oluşturulan uygun referans sentezi yöntemidir. Bu yöntemde kullanılan uygun parametreleri belirlemek, robotun düşmesini engellemek için önemlidir. Çalışmamızda bu parametreleri belirlemek için yine biyolojiden ilham alınarak oluşturulan Genetik Algoritma (GA) optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Genetik Algoritma'nın amaç fonksiyonu denge ve enerji tüketimi olarak seçilmiştir. MÖÜ yöntemi ile üretilen referanslar, 16 serbestlik dereceli dört bacaklı robotumuza üç boyutlu (3D) tam dinamikli benzetim ortamında uygulanmıştır. Benzetim sonuçları önerilen metodun geçerliliğini kanıtlamıştır.

**Anahtar Kelimeler**—Dört Bacaklı Robot, Referans Sentezi, Merkezi Örüntü Üretimi, Genetik Algoritma.

## I. GİRİŞ

Bacaklı robotların, arama kurtarma çalışmalarından, uzay operasyonlarına, askeri araştırmalardan, eğlence sektörüne kadar geniş bir çalışma yelpazesi vardır. Son 25 yılda bacaklı robotların araştırma alanları ciddi şekilde gelişmiştir. Bacaklı robotların, özellikle dört bacaklı olanların, engebeli arazide diğer karada hareket eden robot türlerine nazaran ciddi bir avantajı vardır. Fakat bu avantaj, dört bacaklı robotların engebeli arazide düşmeden hareket edebilmesi için yeterli değildir. Dört bacaklı robotların yüksek serbestlik dereceleri ve doğrusal olmayan dinamik yapısı bu görevi zorlaştırmaktadır.

Referans sentezi, dört bacaklı robotlarda dengeli hareketin sağlanması açısından hayati önem taşır. Kararlı bir referans sentezi yönteminin kullanılmadığı bir durumda robotun düşme ihtimali çok düşüktür. Literatürde sıkça kullanılan çeşitli kararlı referans sentezi yöntemleri vardır. Biyolojiden ilham alınarak oluşturulan oluşturulan Merkezi Örüntü Üretimi (MÖÜ) bunlardan bir tanesidir.

1987 yılında, Matsuoka sinir hücrelerinin çalışma prensibini, matematiksel olarak modellemiştir [1]. 1991 yılında Taga ve çalışma arkadaşları bu nöron osilatör modelini, bacaklı robotlarda referans sentezi yöntemi olarak kullanmışlardır [2]. Kimura ve çalışma arkadaşları Taga'nın çalışmasını devam ettirerek, önerilen yöntemi "Patrush" ve "Tekken" isimli dört bacaklı robotlarına uygulamışlardır

[3]. Ijspeert, MÖÜ yönteminin gelişmesine ciddi şekilde katkı vermiştir. Ijspeert MÖÜ yöntemini insansı robotların ve yüzen semender robotların referans sentezinde kullanmıştır [4]. Tsujita ve çalışma arkadaşları, doğrusal olmayan osilatörler kullanarak dört bacaklı robotlarının referanslarını sentezlemişlerdir [5]. Liu, Van Der Pol ve Faz osilatörlerini ayrı ayrı kullanarak dört bacaklı robotlar için referans sentezi gerçekleştirmiştir [6, 7]. Adak ve çalışma arkadaşları MÖÜ yöntemini GA ile birleştirerek dört bacaklı robotlarda kararlı referans sentezleri gerçekleştirmiştir [8, 9]. Bu çalışmalarda GA için üç farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Seçilen amaç fonksiyonları denge, enerji tüketimi, eşit oranda denge ve enerji tüketimi esas alınarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada MÖÜ yöntemi, dört bacaklı robot için kararlı tırıs yürüyüşü referansları üretmek için kullanılmıştır. MÖÜ yönteminde kullanılan faz osilatörünün uygun parametre seçimi için GA uygulanmıştır. GA yönteminin amaç fonksiyonu denge ve enerji tüketimi olarak seçilmiştir. Akbaş ve çalışma arkadaşlarının araştırmalarından esinlenilerek [10], benzetim ortamında robotun gövdesine üç ekseninde yapay burulumsal yaylar eklenmiştir. Bu yaylar benzetim sırasında GA tarafından belirlenen kararsız parametreler sonucundan robotun düşüp benzetimi durdurmasını engellemesinin yanında, amaç fonksiyon için dengenin tanımlanabilmesine de olanak sağlamıştır. GA sonucunda bulunan en iyi parametreler, robotun gövdesindeki burulumsal yaylar çıkarılarak tekrar benzetim ortamında test edilmiştir ve robotun düşmeden yürüdüğü gözlemlenmiştir. Bu benzetimler sonucunda üretilen referansların kararlılığı ve geçerliliği kanıtlanmıştır.

## II. MÖÜ İLE REFERANS SENTEZİ

Merkezi Örüntü Üretimi ile sentezlenen referansların üretimi için literatürde kullanılan osilatörleri iki ana başlıkta toplayabiliriz. Bunlar sinirsel osilatörler ve doğrusal olmayan osilatörlerdir. Sinirsel osilatörler, gerçek sinir hücrelerinin çalışma prensiblerinin matematiksel olarak modellenmesiyle ortaya çıkmıştır. Doğrusal olmayan

osilatörler ise sinirsel osilatörlerin çıktıklarını iyi bir şekilde taklit eden osilatörlerdir.

Bu çalışmada, doğrusal olmayan osilatörler sınıfına giren Kuramoto'nun faz osilatörü kullanılmıştır [11]. Bu osilatörün matematiksel modeli aşağıdaki gibidir;

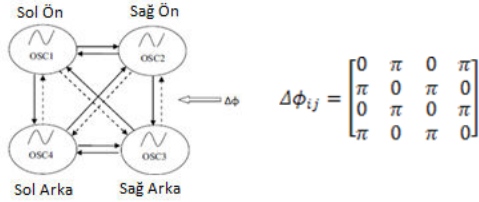
$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i - \Delta\phi_{ij}), \quad (1)$$

$$\dot{r}_i = \mu_i(R_i - r_i) - \frac{3}{2}\mu_i\dot{r}_i, \quad (2)$$

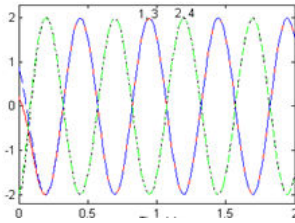
$$x_i = r_i(1 + \sin\theta_i), \quad (3)$$

Bu modelde  $\theta_i$  i numaralı osilatörün fazını,  $\omega_i$  ise frekansını temsil etmektedir. Her osilatör kendi frekansında çalışırken,  $\lambda_{ij}$  terimi bütün osilatörleri birbirine senkronize etmektedir.  $\Delta\phi_{ij}$  i ve j numaralı osilatörler arasındaki faz farkını temsil etmektedir. i numaralı osilatörün genliği olan  $r_i$  ise pozitif sabit sayı olan  $R_i$  terimine asimptotik olarak yakınsamaktadır.  $\mu_i$  pozitif bir sabiti temsil ederken,  $x_i$  ise i numaralı osilatörün çıktısıdır. Faz osilatörü kararlı limit çevrimi özelliğine sahip olduğu için, çıktıları kararlıdır.

MÖÜ ile dört bacaklı robot yürüyüş referansı sentezlerken, osilatörler arasındaki faz farkını doğru ayarlamak çok önemlidir. Osilatörler arasındaki faz farkı, robot bacaklarının hareketleri arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Bu faz farkı da robotun yürüyüş tipini belirlemektedir. Bu çalışmada kullanılan tırs, köşegen osilatörleri birbirine bağlayan matrisimiz şekil 1'deki gibi belirlenmiştir. Osilatörlerin çıktıları ise şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 1 - MÖÜ ağı ve osilatörleri bağlayan matris.



Şekil 2 - Osilatör çıktıları.

Bu çalışmada MÖÜ ağının çıktıları, dört bacaklı robotun ayak referansları olarak atanmıştır. Kararlı yürümeye uygun ayak referansları ise osilatör çıktılarına GA uygulandıktan sonra bulunmuştur. Her bir bacakta eklem referansları ise belirlenen ayak referansları kullanılarak, ters kinematik yöntemiyle bulunmuştur.

### III. GENETİK ALGORİTMA

Bu çalışmada ana değişken olarak robotun yürüyüş hızı seçilmiştir ve diğer parametreler yürüyüş hızına bağlı olarak optimize edilmiştir. Robotun yürüyüş hızı aşağıdaki denklem ile temsil edilmiştir;

$$v_{ort} = B\omega \quad (4)$$

Bu denklemde B adım uzunluğunu,  $\omega$  ise adım frekansını temsil etmektedir. GA adım yüksekliği ve adım frekansı değişkenlerini istenilen robot hızında optimize etmek için kullanılmıştır. Adım uzunluğu ise, adım frekansı optimize edildikten sonra (4) numaralı denklem kullanılarak belirlenmiştir.

GA'da kullanılacak olan değişkenler yonteme uygun şekilde ikili (0 ve 1) sisteme çevrilerek genler oluşturulmuştur. GA'ya girecek olan ilk genlerin fiziksel olarak mantıklı aralıklarda oluşturulması optimizasyonun yakınsama süresini hızlandırmaktadır. Bu sebepten adım uzunluğu, adım yüksekliği ve adım frekansı değerleri aşağıdaki aralıklarda belirlenmiştir;

$$\begin{aligned} 0.03 \text{ m} < h_s < 0.1 \text{ m} \\ 0.8 \text{ s}^{-1} < \omega_s < 2.5 \text{ s}^{-1} \\ 0.01 \text{ m} < B_s < 0.25 \text{ m} \end{aligned} \quad (5)$$

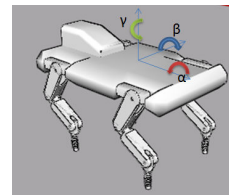
Robot gövdesinin benzetim ortamının sabit koordinat eksenine göre oryantasyonu, robotun dengesinin ölçülmesi için kullanılan niceliklerden biridir. Bu robot oryantasyonu robot gövdesinin yalpa açısı, yunuslama açısı ve sapma açısı olarak temsil edilebilir. Bu açılar Şekil 9'da  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  olarak temsil edilmişlerdir. Bu açılar kullanılarak robotun dengesinin ölçülebilmesi için, robotun gövdesine üç eksenli yapay burumsal yaylar eklenmiştir. Bu yaylar amaç fonksiyon için dengenin tanımlanabilmesinin yanında belirlenen kararsız parametreler sonucundan robotun düşüp benzetimi durdurmasını engellemesine de olanak sağlamıştır. Eklenen yapay burumsal yayların robot gövdesine etkisi aşağıdaki denklemler ile belirtilmiştir;

$$u_{yalpa} = K_{yay}\alpha + K_{damper}\dot{\alpha} \quad (6)$$

$$u_{yunustama} = K_{yay}\beta + K_{damper}\dot{\beta} \quad (7)$$

$$u_{sapma} = K_{yay}\gamma + K_{damper}\dot{\gamma} \quad (8)$$

Denklemlerde  $u$  ile temsil edilen değişkenler  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenleri etrafındaki destek momentlerini,  $K_{yay}$  yay katsayısını ve  $K_{damper}$  damper katsayısını temsil etmektedir. Yay katsayısı ve damper katsayısı değerleri sırasıyla 250 N/m ve 1500 Ns/m olarak seçilmiştir. Bu değerler robot gövdesinin makul oranlarda hareket etmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3 - Robot gövdesine yerleştirilen yapay burumsal yay-damper sistemi ve robotun dönme açıları

Yapay burumsal yay-damper sisteminde ölçülen momentler, robot gövdesinin dengesinin ölçümünde kullanılmaya elverişlidir. Yapay burumsal yay-damper sisteminde gelen tepki momentleri, GA için performans ölçümünde kullanılabilir. Bu hedefle belirlenen amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f_B = \frac{\sum(u_{sd\ roll} + u_{sd\ pitch} + u_{sd\ yaw})}{t_s} \quad (9)$$

Bu denklemde  $t_s$  robotun belirlenen sabit adım sayısına ulaşana kadar benzetim ortamında geçen süreyi temsil etmektedir.

Robot hareketinde önemli olan bir başka nitelikte enerji tüketimidir. Robotun enerji tüketiminin azalması, robotun kullanım süresini arttırmakta ve enerji maliyetini düşürmektedir. Bu sebeple enerji tüketimi içinde bir amaç fonksiyon belirlenmiştir;

$$f_E = \frac{\bar{P}}{\bar{V}} \quad (10)$$

Bu denklemde  $\bar{P}$  eklem eyleyicilerinin benzetim süresince harcadıkları gücün ortalamasını,  $\bar{V}$  ise robot gövdesinin ortalama hızını temsil etmektedir.

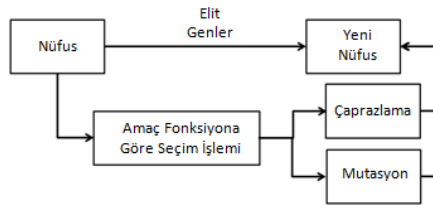
Robot yürüyüşünde hem dengenin hem de enerji tüketiminin önemli rol oynaması yeni bir amaç fonksiyonun gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle GA'da kullanılması amacıyla yeni bir amaç fonksiyon belirlenmiştir;

$$f_e = w_1 f_B + w_2 f_E \quad (11)$$

$w_1$  ve  $w_2$  ağırlıklı değerleri denge veya enerji tüketiminin önemine göre birbirlerinden farklı olarak belirlenebilir. Bu çalışmada ikisinede eşit derece önem verildiği için bu iki değer 1 olarak belirlenmiştir. GA'nın amacı belirlenen bu son amaç fonksiyonu minimize etmektir. GA'da kullanılan parametreler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Table 1: GA parametreleri

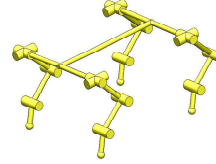
Çaprazlama Oranı	%45
Mutasyon Oranı	%10
Hayatta Kalan Elit Gen Oranı	%10
Toplam Nüfus	20
Tekrarlama Sayısı	20



Şekil 4 – Yeni nüfus üretim şeması.

#### IV. BENZETİM ORTAMI

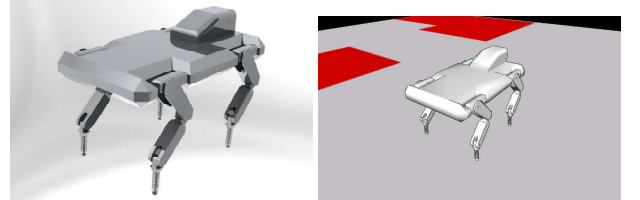
Bu çalışmada kullanılan dört bacaklı robotun her bacağına iki tanesi kalçada, bir tanesi dizde ve bir tanesi bilekte olmak üzere toplam dört serbestlik derecesi bulunmaktadır. Dört bacaklı robotun kinematik düzeni ve ölçüleri Şekil 5'de gösterilmiştir.



Bağ	Boyutlar(BxExY) [m]	Kütle[kg]
Gövde	1.2x0.6x0.15	50
Uyluk	0.28x0.05x0.1	4.8
Baldır	0.27x0.05x0.1	3.85
Bilek	0.22x0.05x0.5	3.85

Şekil 5 – Robotun kinematik düzeni ve ölçüleri.

Gerçekleştirilen benzetimler için Newton-Euler yöntemi tabanlı tam dinamikli üç boyutlu benzetim ve animasyon ortamı kullanılmıştır. Bu benzetim ortamında temas modeli olarak uyarlamalı ceza tabanlı yer modeli kullanılmıştır. Benzetim ortamının işleyişi ve temas yüzeyi modellenmesi hakkındaki ayrıntılı bilgi [12] numaralı referans da bulunabilir.



Şekil 6 – Robotun katı modellemesi ve benzetim ortamı.

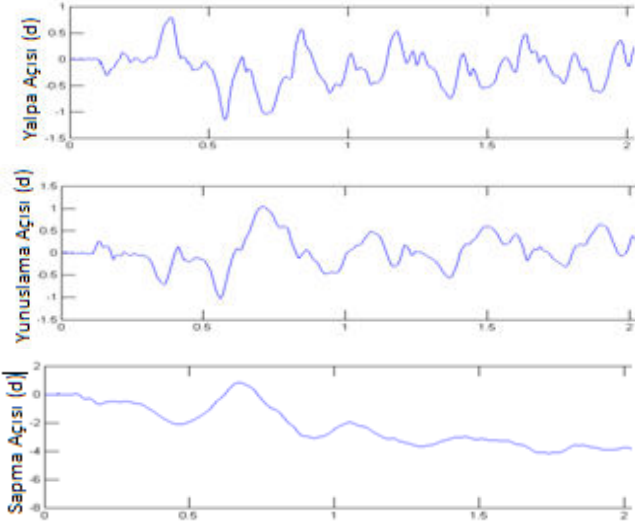
#### V. BENZETİM SONUÇLARI

GA ile optimize edilmiş MÖÜ tabanlı referans sentezleme işlemi 16 serbestlik dereceli dört bacaklı robot üzerinde tırs yürüyüşü için uygulanmıştır. GA sonucunda elde edilen yürüyüş parametreleri iki farklı robot hızı için Tablo 2'de belirtilmiştir.

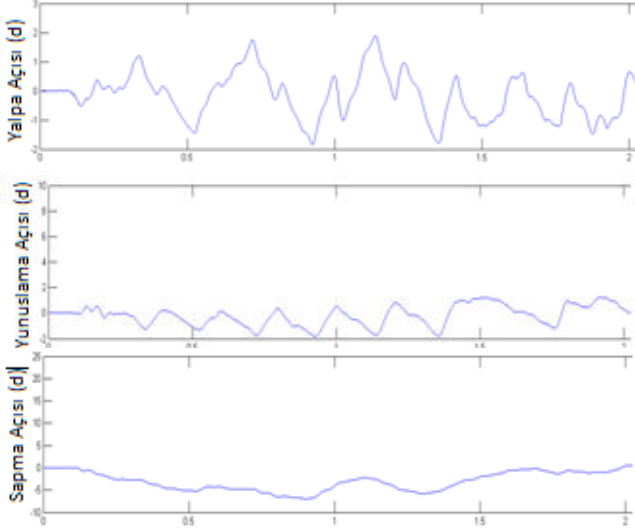
Tablo 2: Benzetim Sonuçları

Hız (m/s)	Adım Frekansı ( $s^{-1}$ )	Adım Yüksekliği (m)	Adım Uzunluğu (m)
0.1	0.8772	0.03	0.114
0.6	2.5	0.04	0.24

Belirlenen yürüyüş parametreleri, robotun gövdesindeki yapay burumsal yay-damper sistemi çıkarılarak, yeniden benzetim ortamında uygulanmıştır. Yapılan son benzetimlerde robot başarılı bir şekilde yürüyüş işlemini tamamlamıştır. Robotun belirlenen parametrelerle düşmemesi, sentezlenen referansların kararlılığını ve kullanılan yöntemin geçerliliğini ispatlamıştır. Elde edilen bu sonuç robot gövdesinin yalpa açısı, yunuslama açısı ve sapma açısı incelenerek net bir şekilde görülebilir. Şekil 7'de 0.1 ve 0.6 m/s robot hızları için robot gövdesi açılarının benzetim süresince değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5 – 0.1 m/s için benzetim sonuçları.



Şekil 6 – 0.6 m/s için benzetim sonuçları.

## VI. SONUÇLAR

Yapılan benzetim sonuçları incelenecek olursa, 0.1 m/s robot hızı için yalpa ve yunuslama açıları en fazla 1 derece, 0.6 m/s robot hızı için ise en fazla 2 derece değişmiştir. Bu sonuçlar sentezlenen referanslar ile çok dengeli bir yürüyüş elde edildiğini göstermektedir. Benzetim sonuçları sentezlenen referansların deneylerde kullanımını motive etmektedir.

## VII TEŞEKKÜR

Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir. (Araştırma proje numarası: 114E618).

## KAYNAKÇA

- [1] K. Matsuoka, "Mechanism of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators," *Biological Cybernetics*, vol: 56 pp: 345-353, 1987

- [2] G. Taga, Y. Yamaguchi, H. Shimizu "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," *Biological Cybernetics*, vol.65, pp.147-159, 1991
- [3] Y. Fukuoka, H. Kimura, and A. Cohen "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Based on Biological Concepts," *International Journal of Robotic Research*, vol.22, no:3-4 pp.187-202, 2003
- [4] J. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko and J. Cabelguen "From Swimming to Walking with a Salamander Robot Driven by a Spinal Cord Model," *Science*, vol.315, no:5817 pp.1416-1420, 2007
- [5] S. Aoi, T. Yamashita, A. Ichikawa and K. Tsujita, "Hysteresis in Gait Transition Induced by Changing Waist Joint Stiffness of a Quadruped Robot Driven by Nonlinear Oscillators with Phase Resetting," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent. Robots System*, pp. 1915–1920, 2010.
- [6] Liu, Q. Chen and J. Zhang "Coupled Van Der Pol Oscillators Utilised a Central Pattern Generators for Quadruped Locomotion," *Proc. IEEE Int. Conf. on Control and Decision*, pp. 3677–3682, 2009.
- [7] Liu, Y. Chen, J. Zhang and Q. Chen, "CPG Driven Locomotion Control of Quadruped Robot," *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 2368–2373, 2009.
- [8] Adak, Ömer Kemal. "Quadruped locomotion reference synthesis with central pattern generators tuned by evolutionary algorithms." Master Thesis 2013.
- [9] Ö. K. Adak, O. Ayit, M. M. Gülhan, and K. Erbatır. "Genetic tuning of a central pattern generator for quadruped locomotion." 3rd International Electrical and Electronic Engineering and Technologies Conference (ELECTROTECH 2015) 2015.
- [10] Akbas, T. "Bipedal Humanoid Robot Walking Reference Tuning by the Use of Evolutionary Algorithms" Master Thesis, İstanbul, Sabancı Universtiy, 2012
- [11] Acebron J A, Bonilla L L, Vicente C J P, et al. "The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena," *Rev Mod Phys*, vol:77 pp: 137–185, 2005
- [12] Erbatır, K. and Kawamura, A., "A New Penalty based Contact Modeling and Dynamics Simulation Method as Applied to Biped Walking Robots," *Proceedings of the 2003 FIRA World Congress*, Vienna, Austria, October 2003