

İki Ayaklı Yürüme Hareketinin Merkezi Örüntü Üretici (CPG) İle Gerçekleştirilmesi

Cafer BAL^{1*}, Gökçe YILDIRIM²

ÖZET: Bu çalışmanın amacı, insansı iki ayaklı yürüme hareketinin ve adaptif yürüme eğrisinin tasarımı için bir robot modelinin geliştirilmesidir. Bu doğrultuda, ortalama boyutlardaki bir insanın ölçüleri esas alınarak SolidWorks paket programı kullanılarak tasarlanan model simülasyon analizleri için MATLAB/SimMechanics ortamına aktarılmıştır. Kinematik analizler ve yörünge planlaması MATLAB/SimMechanics tasarımı aracılığı ile yapılmıştır. Sistemin ileri kinematik hesaplamalarında Denavit-Hartenberg yöntemi tercih edilmiştir. Ters kinematik analiz ile robot eklemlerine uygulanacak açılar hesaplanmıştır. Yürüme eğrisinin oluşturulmasında, yörünge noktaları verilerine uydurulan polinom fonksiyonları aracılığı ile Örüntünün Merkezi Üretimi (CPG) eğitilmiştir. Eğitilmiş CPG tarafından üretilen kalça ve diz eklemlerinin açılarını tasarlanan robota uygulanarak yürüme eylemi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İki ayaklı yürüme, düz kinematik, ters kinematik, yörünge planlama, CPG

Implementation of Biped Locomotion Movement with Central Pattern Generator (CPG)

ABSTRACT: The purpose of this study is to develop a robot model for the design of humanoid bipedal walking movement and adaptive walking curve. Accordingly, the model designed using the SolidWorks package program based on the measurements of an average sized person was transferred to the MATLAB / SimMechanics environment for simulation analysis. Kinematic analysis and trajectory planning were done by MATLAB / SimMechanics design. Denavit-Hartenberg method was preferred for the advanced kinematic calculations of the system. Angles to be applied to robot joints were calculated by inverse kinematic analysis. In the formation of the walking curve, the Central Pattern Generator (CPG) was trained through the polynomial functions adapted to the trajectory points data. Walking action was performed by applying the hip and knee joint angles produced by trained CPG to the designed robot.

Keywords: Bipedal walking, straight kinematics, inverse kinematics, trajectory planning, CPG.

¹ Cafer BAL (Orcid ID: 0000-0002-1199-2637), Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye

² Gökçe YILDIRIM (Orcid ID: 0000-0002-1863-1578), Bingöl Üniversitesi Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Cafer BAL, e-mail: cbal@firat.edu.tr

GİRİŞ

Günümüz teknolojilerindeki gelişmeler temelinde insan hayatının kolaylaştırılmasına, robotik teknolojilerinin zorlu işlerde ve insan sağlığına zarar veren ortamlarda kullanılmasına yol açmıştır. Gündelik hayatta insanların yapmasının zor ve tehlikeli olduğu işlerde kullanılmak üzere çeşitli endüstriyel robotlar tasarlanmıştır. Bu robotların çalışma ortamında insanların görevlerini yerine getirebilmesi için insan yapısı örnek alınarak tasarlanması daha uygun olacaktır. Bunun için de insanın anatomik yapısının iyi bilinmesi gerekmektedir. İki ayaklı yürüyen robotun tasarımını ve kontrolünü yapabilmek için öncelikle insanın yürüme hareketini nasıl gerçekleştirdiğinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Tüm canlılarda olduğu gibi insanda da yürüme hareketini etkileyen vücut şekli, iskelet kas sistemindeki yük, boy uzunluğu gibi etmenler vardır (Hase ve Yamazaki, 1999). Dengeli yürümenin gerçekleşmesi için eklemler, kaslar ve bağlar birbirleri ile uyumlu bir şekilde çalışırlar. Yürüme, temel olarak vücudun ağırlık merkezini bir konumdan başka bir konuma taşımak için yapılan hareketlerin tamamıdır (Altınorak, 2006). Bu hareketler belirli bir periyotta tekrarlanan ve adım olarak isimlendirilen hareketlerdir. Adım basan ayağın yerle temasını kesip salınan ayağın yerle temasa geçtiği andır (Kanatlı ve ark., 2006). Bir yürüme periyodu basan ayağın yerle temasını kesip yeniden yere basması ile oluşan hareket sürecidir. Böylece bir yürüme periyodu iki adımdan oluşmaktadır. Yürüme esnasında ayakların konumuna göre yürüme iki fazda gerçekleşir. Her iki ayak da zemin üzerinde iken çift destek fazı, ayaklardan biri zemin üzerinde diğeri salındığında tek destek fazı diye adlandırılır (Şeker ve ark., 2014). Adımı oluşturan bacak yapısı eklemler ve onların hareket kabiliyetinden oluşmaktadır.

Literatür incelendiğinde başta Japonya da olmak üzere pek çok ülkede özellikle insansı robotlar üzerinde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların en dikkat çekenlerinden biri HONDA firmasının ürettiği ASIMO dur. Chestnutt ve ark., 2007'de engelli ortamlarda engelleri tanıyarak onlara çarpmadan ilerleyebilen bir Honda ASIMO insansı robotu üzerine çalışmışlardır (Chestnutt ve ark., 2007). Ayrıca yapısına eklenen planlama sistemi sayesinde gelecekte karşılaşılabileceği engellere göre hareket etme yeteneği kazandırılmıştır. Aynı zamanda çevresindeki hareketli nesnelerin hızlarının tespit edilebilmesi için tasarıma bir görme sistemi de eklenmiştir.

Khan ve ark., 2008'de 4 serbestlik derecesine sahip iki ayaklı robotun yürütmesinde maksimum istikrarı sağlamak amacıyla oransal, integral ve türev kontrolörlerin çeşitli kombinasyonlarını deneyerek analizler yapmışlar ve çalışmalarını simülasyon ortamında test ederek doğruluğunu ispatlamışlardır (Khan ve ark., 2008). Raibert ve ark., 1993'te 5 serbestlik derecesine sahip iki ayaklı yürüyen robotun yürüme eğrisi kontrolü için iki tür kontrolör kullanmış ve kontrolörlerin performansı kıyaslanmıştır. PD ve kayma kipli kontrolör (SMC) ile yapılan deneyler sonucunda parametrelerin belirlenmesinde SMC kontrolörün daha etkin sonuç verdiği gözlemlenmiştir (Raibert ve ark., 1993). Sugihara ve ark., 2002'de ağırlık merkezini (COG) kontrol eden gerçek zamanlı bir hareket metodunu sıfır moment noktası (ZMP) ile geliştirmişlerdir (Sugihara ve ark., 2002). Yöntemin gerçek zamanlı tepkisi, daha sonra gerçekleştirilecek iki ayaklı yürüyen robot çalışmaları için yüksek mobilitelere sahip olma olanağı tanımıştır. Çalışmalarında ZMP planlaması, ZMP manipülasyonu, eklem açılarında COG hız dekompozisyonu ve eklem açılarının konum kontrolü konularına yer vermişlerdir. Önerilen yöntem bilgisayar simülasyonları ile denetlenmiş ve doğruluğu kanıtlanmıştır. Jong ve Rhee, 1998'de ZMP yürüncesini tasarlamak için bulanık mantığı kullanarak bir yöntem önermişlerdir (Jong, ve Rhee., 1998). Erbatur ve ark., 2008'de Sabancı Üniversitesi tarafından tasarlanan, yürüyen insansı robot olan SURALP platformu üzerinde çalışmışlardır (Erbatur ve ark., 2008). SURALP'in bacak modülü SURALP-L olarak adlandırılmıştır. Toplam 12 serbestlik derecesine sahiptir. Çalışmada bacak modülünün mekanik tasarımı, tahrik mekanizmaları, sensörler, kontrol donanımı ve algoritmaları sunulmaktadır. Başka bir tez çalışmasında, on iki serbestlik derecesine sahip iki ayaklı yürüyen robotun prototip imalatı için

gövde, kalça eklem grubu, diz eklemi ve bilek eklem grubu olmak üzere dört ana montaj grubu tasarlanmıştır (Gerçek, 2012). Montaj gruplarına ait tasarım kriterlerinde, fiziksel parametreleri için literatürdeki mevcut değerler kullanılmış, bilgisayar ortamındaki benzetimi için ise bilgisayar ortamında yapılan bir çubuk modelden yararlanılmıştır. Nakanishi ve ark., 2004'te yaptıkları çalışmada iki ayaklı yürüme hareketini öğretmek için bir yöntem önermişlerdir. Doğrusal olmayan çift faz osilatörler kullanarak iki ayaklı yürüme ile ilgili bir öğrenme yapısı oluşturmuşlar ve bu çalışmalarını fiziksel bir robot üzerinde test ederek doğruluğunu göstermişlerdir (Nakanishi ve ark., 2004). Taga ve ark., 1991'de tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada çevre şartlarının belirsiz olduğu durumlarda iki ayaklı yürümenin gerçekleştirilmesi için nörofizik ve doğrusal olmayan dinamiklerin teorisi üzerinden kontrollü yürümenin bir ilkesi önerilmiştir. Çalışma simülasyon ortamında test edilmiştir ve mekanik gürültü ve çevresel değişikliklere rağmen uygun bir yürüme gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca tek bir parametrenin değiştirilmesi ile koşma hareketinin de sağlandığı gözlemlenmiştir (Taga, 1991).

Bu çalışmada; 6 sağ bacak, 6 sol bacak olmak üzere toplam 12 serbestlik derecesine sahip iki ayaklı yürüme hareketinin ve yürüme eğrisinin modellenmesi için ortalama boyutlardaki bir insanın ölçüleri esas alınarak iki ayaklı bir yürüyen robot modellenmiştir. SolidWorks paket programı kullanılarak tasarlanan iki ayaklı yürüme robotunun kinematik analizleri ve yörünge planlaması MATLAB/SimMechanics ortamında gerçekleştirilmiştir. Sistemin ileri kinematik hesaplamalarında Denavit-Hartenberg yöntemi tercih edilmiştir. Ters kinematik analiz ile robot eklemlerine uygulanacak açılar hesaplanmıştır. Yürüme eğrisinin oluşturulmasında, yörünge noktaları verilerine uydurulan polinom fonksiyonları aracılığı ile CPG eğitilmiştir. Eğitim sinyali olarak 6. dereceden polinomlar kullanılmıştır ve elde edilen bu eğitim sinyali Hopf osilatör denklemlerine uygulanarak robot eklemlerine yürüme eğrisi eğitimi yapılmıştır. Kalça ve diz eklem açıları eğitilmiş CPG tarafından üretilerek robot eklemlerine uygulanarak tasarlanan iki ayaklı robotun yürüme eylemi gerçekleştirilmiştir. Böylece yürüme eylemi adaptif bir yapıya kavuşturulmuştur.

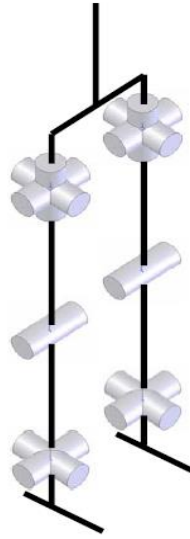
Makalenin birinci bölümünde, literatürde yer alan iki ayaklı yürüyen robotlarla ilgili çalışmalar irdelenmiştir. İkinci bölümde, SolidWorks programında tasarımı yapılan ve bu tasarım MATLAB/SimMechanics ortamına aktararak simülasyona hazırlanan modele yer verilmiştir. Makalenin üçüncü bölümünde roboto ait kinematik hesaplamalar sunulmuştur. Daha sonra yürüme eğrisi tasarımı iki farklı yolla gerçekleştirilerek bölüm dördte verilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon analizleri ve değerlendirmeleri ise beşinci bölümde sunulmuştur.

MATERYAL VE YÖNTEM

İki Ayaklı Yürüyen Robotun Tasarımı

Endüstriyel alanlarda insanların görevlerini üstlenecek robotların insan yapısına yakın bir tasarıma ihtiyacı vardır. İnsan bacak yapısı karmaşık ve birebir taklit edilmesi zor bir yapıdır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen tasarımlarda serbestlik derecelerinin sayısı ne kadar fazla ise bilgisayara yüklenen işlem yükü de o kadar fazla olmaktadır. Bu nedenle günümüz teknolojisi ile insan bacak yapısını bilgisayar ortamında birebir taklit etmek oldukça zordur. Bu çalışmada, insan boyutlarında ve insan hareket kabiliyetini en iyi şekilde taklit edecek şekilde bir tasarım gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bir manipülatörün çalışma uzayındaki hareketi için genellikle 5-7 serbestlik derecesine sahip robotlar tasarlanmaktadır (Anonim, 2017).

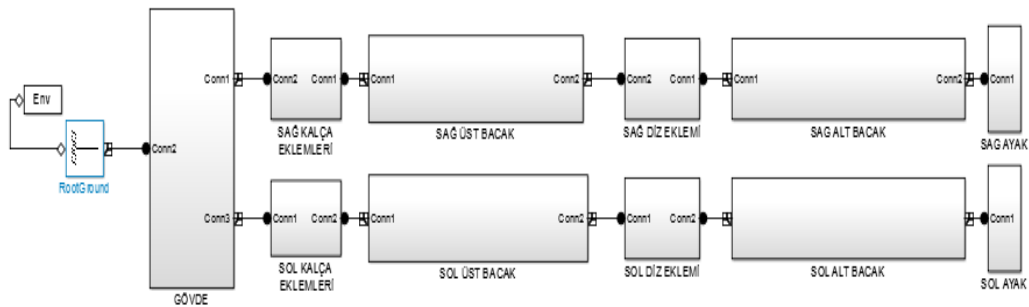
Bu çalışmada her bacak için 6 serbestlik derecesi kullanılmıştır. Bunlardan 3 tanesi kalça eklemde, bir tanesi diz eklemde ve 2 tanesi de bilek eklemindedir ve toplamda 12 serbestlik derecesine sahiptir. Tasarımı SolidWorks paket programında gerçekleştirilen iki ayaklı robotun serbestlik derecelerinin yerleşimi **Şekil 1**'de sunulmuştur.



Şekil 1. İki ayaklı yürüyen robotun serbestlik derecelerinin yerleşimi

Bu çalışma için gerçekleştirilen tasarım üst bacak, alt bacak, gövde ve ayak olmak üzere temel dört uzuvdan meydana gelmektedir. Robotun boyutları üst bacak ve alt bacak uzunlukları 400 mm, ayağın yüksekliği 5 mm, ayağın uzunluğu 250 mm, genişliği 100 mm olarak belirlenmiştir (Acar, 2007).

Tasarım SolidWorks paket programında yapılmıştır. Daha sonra SimMechanics yardımıyla blog diyagramları elde edilerek simülasyonu gerçekleştirmek için MATLAB/SimMechanics ortamına aktarılmıştır. Simülasyon için elde edilen SimMechanics modeli Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. İki ayaklı yürüyen robotun SimMechanics modeli

Kinematik Hesaplamalar

Robotik teknolojisinde bir robottan istenen şey uç noktanın istenilen konuma ulaşmasını sağlamaktır. Bunu sağlamak için kinematik hesaplamalara ihtiyaç duyulur. Kinematik hesaplamalar ile mevcut eklemin konum ve yönelimini bulabilmek amacıyla bir önceki ve bir sonraki eklemin konum ve yönelimini bilmek gerekmektedir. Kinematik hesaplamalar ileri kinematik ve ters kinematik olarak ikiye ayrılmaktadır. Robotun eklemlerine önceden belirlenen açılar girildiğinde robotun uç noktasının gideceği konumu hesaplama ileri kinematik hesaplama olarak adlandırılır (Aykaç, 2011). Bu çalışmada, ileri kinematik hesaplamalar için Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemi kullanılmıştır (Ewald ve Buschmann, 2013). Bu yöntemde her bir ekleme bir koordinat sistemi yerleştirilir ve bu koordinat sistemlerine göre homojen dönüşüm matrisleri elde edilir.

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada d_i kesişen eklemler arasındaki eklem kaymasını ifade etmektedir. θ_i ardışık iki eksen takımı arasındaki eklem açısıdır. a_i ise ardışık eksen takımları arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. α_i ardışık eksen takımları arasındaki eksen açısını ifade etmektedir.

Tüm eklemler için dönüşüm matrisleri belirlendikten sonra 0. Eksen takımı ile diğer eksen takımları arasındaki bağlantılar aşağıda yer verilen denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$A_2^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} \quad (2)$$

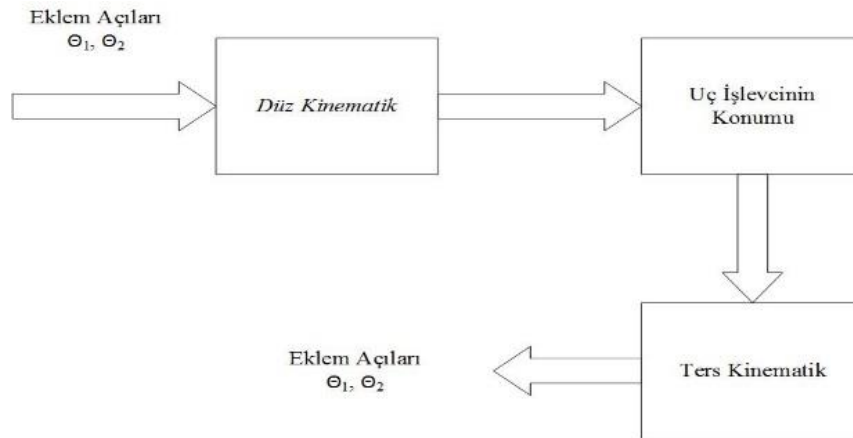
$$A_3^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} A_3^{2(b)} \quad (3)$$

$$A_4^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} A_3^{2(b)} A_4^{3(b)} \quad (4)$$

$$A_5^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} A_3^{2(b)} A_4^{3(b)} A_5^{4(b)} \quad (5)$$

$$A_6^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} A_3^{2(b)} A_4^{3(b)} A_5^{4(b)} A_6^{5(b)} \quad (6)$$

Konumu önceden belirlenen uç noktanın o konumda olması için eklem açılarının neler olduğunu hesaplamaya ters kinematik analiz denir (Aykaç, 2011). Çalışmada ters kinematik analiz için, literatürde sıkça tercih edilen geometrik yaklaşım tercih edilmiştir (Acar, 2007). **Şekil 3'** de kinematik hesaplamaların akışını gösteren blok şema sunulmuştur.



Şekil 3. Düz ve Ters kinematik arasındaki ilişkiyi gösteren blok şema

Yürüme Eğrisi Tasarımı

Endüstriyel robotların çalışma uzayında belirlenen noktaya engellere takılmadan en hızlı şekilde ulaşmasını sağlamak, robotik alanındaki bilim insanlarının üzerinde sıkça çalıştığı bir uygulama sahasıdır (Ewald, ve Buschmann, 2013; Azimi, ve ark., 2005). Ayaklı yürüyen robotlarda ise istikrarlı yürümenin gerçekleşebilmesi için eklem açılarının ayarlanması oldukça önemlidir. Bu çalışmada iki ayaklı yürüyen robotta sadece kalçadaki 3. Eklem (θ_3) ve diz eklem açıları (θ_4) için yürüme eğrisi tasarımı gerçekleştirilmiş ve tasarımda kullanılan diğer eklemlerin sabit olduğu kabul edilmiştir.

Yürüme eğrisi tasarımı için aksenal koordinatlarda polinom uydurma ve merkezi örüntü üretici (CPG) ile eğri uydurma olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır.

Polinom ile eğri uydurma

Polinom ile eğri uydurma yöntemi için ters kinematik hesaplamalar sonucunda belirlenen eklem açıları referans alınmıştır. Eklemler için oluşturulması istenilen eğriler **Şekil 4** ve **Şekil 5**' de kırmızı noktalar ile ifade edilmiştir. Referans açıları takip eden 6. dereceden polinomlar en küçük kareler eğri uydurma metodu ile oluşturulmuş ve denklemlerde gösterilmiştir.

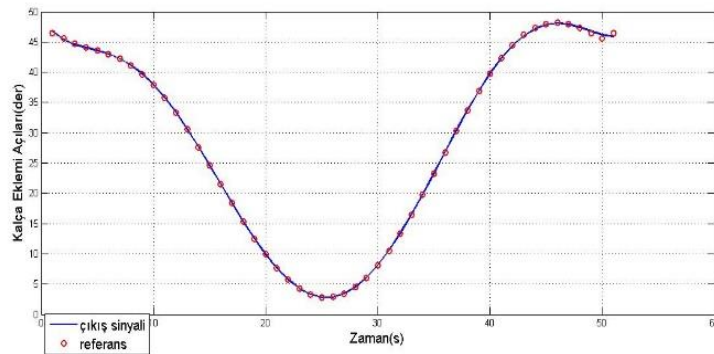
θ_3 açısı için uydurulan polinom denklemi;

$$(1.0e + 04) * (0.5631t^6 - 1.6991t^5 + 1.8022t^4 - 0.7681t^3 + 0.1107t^2 - 0.0088t + 0.0047) \quad (7)$$

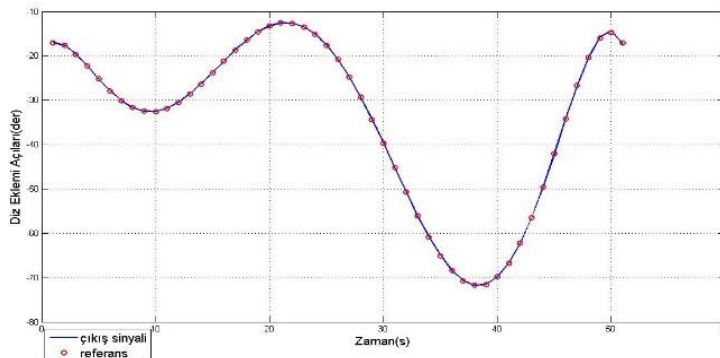
θ_4 açısı için uydurulan polinom denklemi;

$$(1.0e + 04) * (-1.7034t^6 + 4.7140t^5 - 4.6113t^4 + 1.8668t^3 - 0.2674t^2 + 0.0013 - 0.0017) \quad (8)$$

olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. θ_3 açısı için belirlenen yörünge ve yörünge polinomundan elde edilen grafik

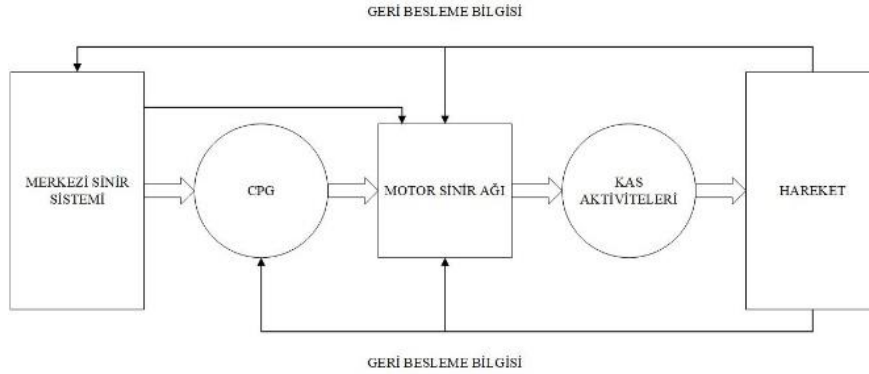


Şekil 5. θ_4 açısı için belirlenen yörünge ve yörünge polinomundan elde edilen grafik

CPG ile eğri uydurma

Bir diğer yürüme eğrisi tasarımı merkezi örüntü üretici (CPG) ile üretilmiş ve simülasyon ortamında eklemlere uygulanmıştır. CPG ile iki ayaklı yürüme üzerine geçmişten günümüze birçok çalışma yapılmıştır ve CPG ile hareket üretimi birçok robotik uygulamalarında hala üzerinde yoğun olarak çalışılan konulardandır (Miyakoshi ve ark., 1998; Tsuchiya, 2003). İki ayaklı yürüme hareketini

taklit edebilmek için insan bacağına fizyolojik yapısının taklit edilmesinin yanı sıra insanda yürümeyi sağlayan kontrol mekanizmasının da incelenmesi gerekmektedir. İnsanda dengeli yürüme omurilik tarafından gerçekleştirilir. Oluşturulan sinyaller sinir hücreleri yardımı ile eklemlere aktarılır ve yürüme hareketi otonom olarak gerçekleşir. Merkezi örüntü üretici yöntemi de insandaki bu otonom yapıyı taklit etmek üzere geliştirilmiştir. Omurgalı canlılardaki hareket kontrolü **Şekil 6**'da bloklarla sunulmuştur.



Şekil 6. Omurgalılarda hareket kontrolünü ifade eden blok şeması

Bir CPG yapısı temel olarak birbirine sinaps adı verilen bağlantılarla bağlı olan iki sinir hücresinden oluşmaktadır. Sinir hücreleri sinapslar üzerinden birbirini engelleyici ve/veya destekleyici sinyaller ile sıralı sinyaller üretirler. Oluşan bu yapı yarım merkezli osilatör olarak adlandırılmaktadır. Literatürde çalışmaların, sinirsel osilatörler ve doğrusal olmayan osilatörler olarak gruplandığı iki tür yapı, yürüme eğrisi tasarımında kullanılabilir. Doğrusal olmayan osilatörler sinirsel osilatörleri en iyi taklit edebilen osilatörlerdir (Adak, 2013; Righetti ve Ijspeert, 2006). Bu çalışmada doğrusal olmayan osilatörlerden yürüme eğrisi tasarımı için Hopf osilatör tercih edilmiştir.

Hopf osilatör

Hopf osilatörler harici bir işleme gerek duymadan periyodik girdi sinyalinin frekansını öğrenebilecek doğrusal olmayan osilatörlerdir. Bir Hopf osilatörün dinamik denklemleri (Righetti ve Ijspeert, 2006) aşağıda sunulmuştur:

$$\dot{x} = \gamma(\mu - r_i^2)x_i - w_i y_i + \epsilon F(t) + \tau \sin(\theta_i - \phi_i) \quad (9)$$

$$\dot{y} = \gamma(\mu - r_i^2)y_i - w_i x_i \quad (10)$$

$$\dot{w}_i = -\epsilon F(t) \frac{y_i}{r_i} \quad (11)$$

$$\dot{\alpha}_i = \eta x_i F(t) \quad (12)$$

$$\dot{\phi}_i = \sin\left(\frac{w_i}{w_0} \theta_0 - \theta_i - \phi_i\right) \quad (13)$$

$$\theta_i = \text{sgn}(x_i) \cos^{-1}\left(-\frac{y_i}{r_i}\right) \quad (14)$$

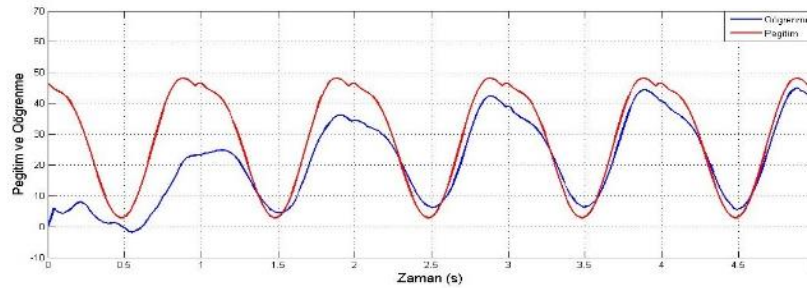
$$F(t) = P_{\text{egitim}}(t) - Q_{\text{öğrenme}}(t) \quad (15)$$

$$Q_{\text{öğrenme}}(t) = \sum_{i=0}^N \alpha_i x_i \quad (16)$$

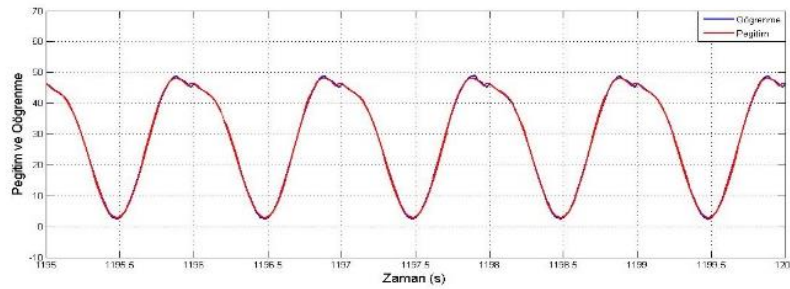
Bu denklemlerde τ ve ϵ bağlantı sabitleri ve μ öğrenme sabitidir. $Q_{\text{öğrenme}}$ CPG çıkışı olup her bir osilatör çıkışının ağırlıklı toplamıdır. $P_{\text{eğitim}}$ osilatörün öğrendiği eğitim sinylidir. $F(t)$ ise, negatif geri beslemeyi ifade etmektedir. Denklemlerdeki a_i , w_i sırasıyla sinyalin genliğini ve frekansını ifade etmektedir. ϕ_i i. osilatörün ilk osilatörlerle arasındaki faz farkını ifade etmektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada eğitim sinyali olarak daha önceden elde edilen 6. dereceden polinomlar kullanılmıştır. Eğitim sinyali Hopf osilatör denklemlerine uygulanarak robot eklemlerine yürüme eğrisi eğitimi yapılmıştır. **Şekil 7'**de kalça ve diz eklemi için elde edilen grafikler öğrenme sürecinin ilk 5 saniyesi ve 1200 saniyelik eğitimin son 5 saniyesi için gösterilmiştir.



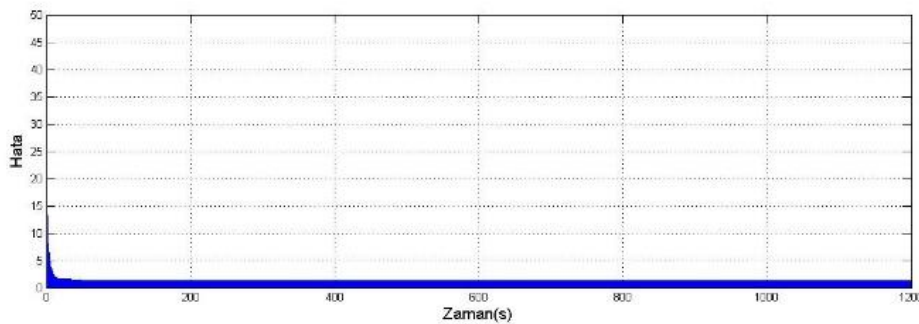
(a)



(b)

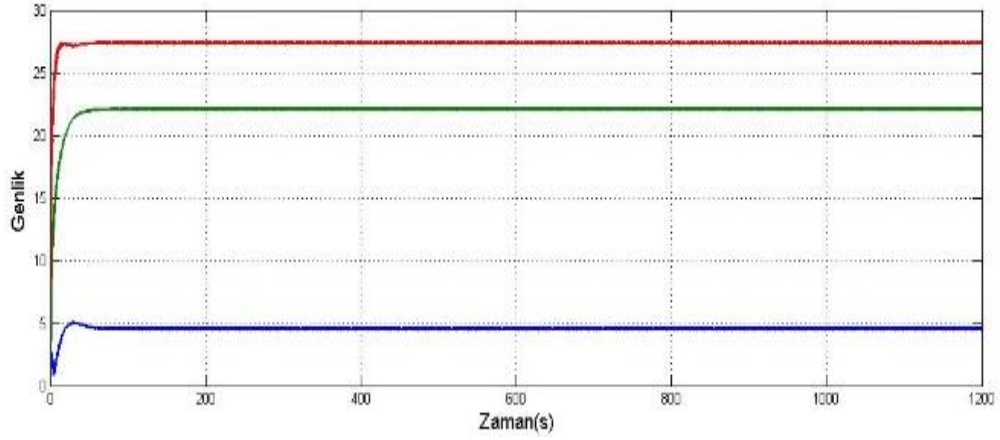
Şekil 7. Kalça eklemi $P_{\text{eğitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyallerinin (a) ilk 5 saniye için (b) 1200 saniyelik eğitimin son 5 saniyesi için grafikleri

Şekil 7' nin gerçekçi bir şekilde yorumlanması için **Şekil 8'**de eğitim sinyali ($P_{\text{eğitim}}$) ile öğrenme sinyali ($Q_{\text{öğrenme}}$) arasındaki hata oranı gösterilmektedir. **Şekil 8'** den de görüldüğü gibi eğitim başladıktan kısa bir süre sonra hata oranı kabul edilebilir bir değerde sabit kalmaktadır. Burada hata oranı %2 civarındadır.

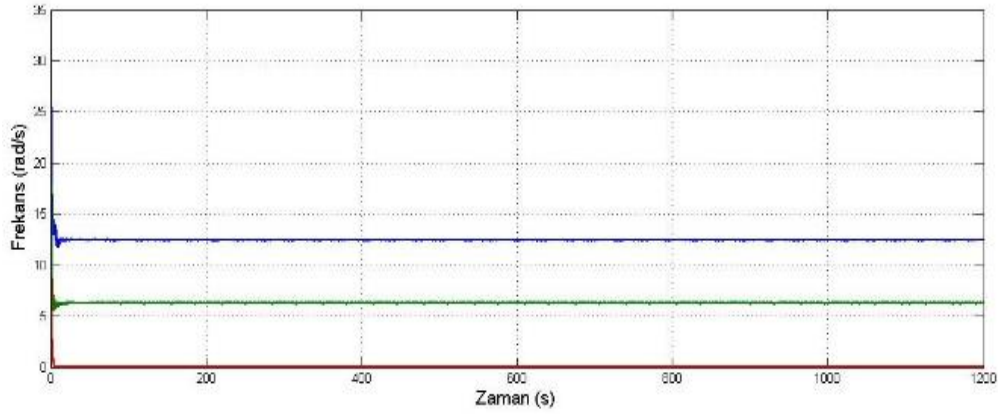


Şekil 8. Kalça eklemi için $P_{\text{eğitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyalleri arasındaki hatanın zamana bağlı değişimi

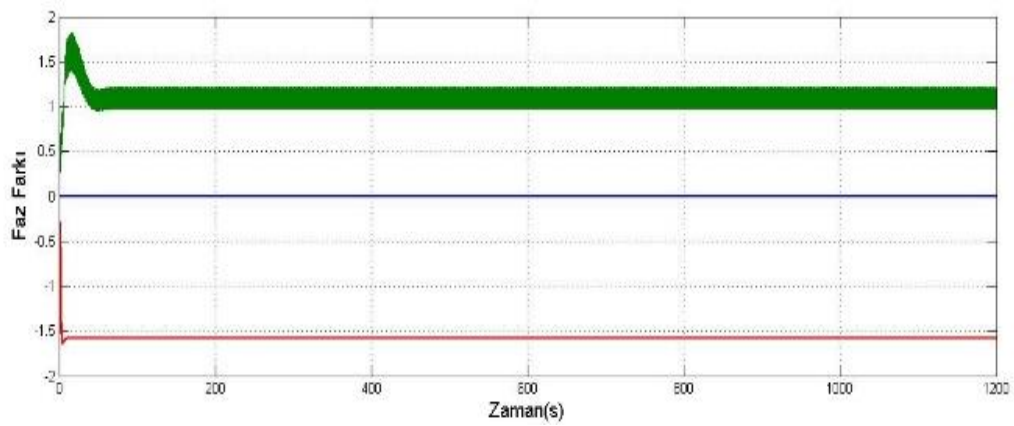
Şekil 9, 10 ve 11’ de sırasıyla öğrenme sinyalinin her bir bileşeni için genlik, frekans ve faz farkı değerleri grafik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 9. Hopf CPG osilatörünün kalça eklemi sinyalleri için genlik öğrenme performansı

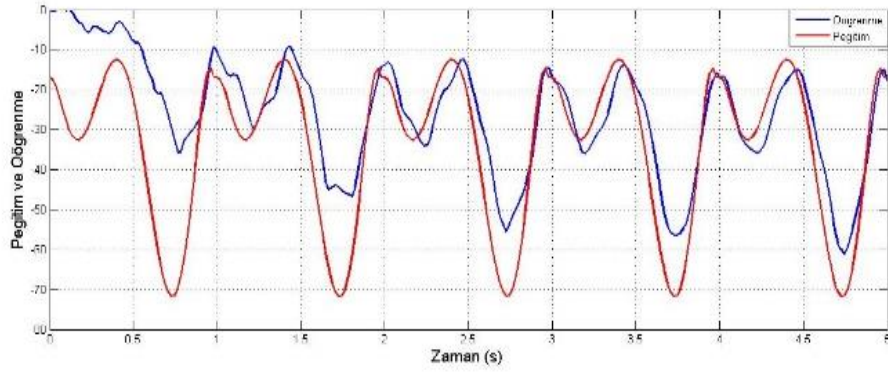


Şekil 10. Hopf CPG osilatörünün kalça eklemi sinyalleri için frekans öğrenme performansı

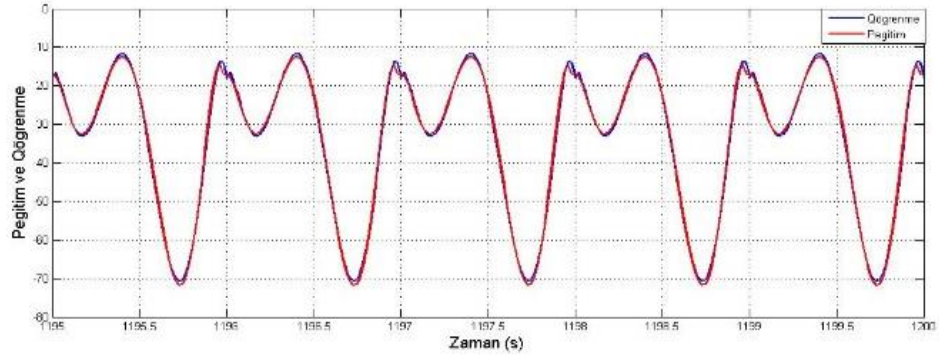


Şekil 11. Hopf CPG osilatörünün kalça eklemi sinyalleri için faz farkı öğrenme performansı

Benzer eğitim algoritması diz eklemleri için de uygulanmıştır. Kalça eklemine olduğu gibi 1200 saniyelik eğitim sürecinin ilk 5 saniyesi ve son 5 saniyesi Şekil 12’ de sunulmuştur. Ayrıca eğitim ve öğrenme sinyalleri arasındaki hata da Şekil 13’de gösterilmiştir.

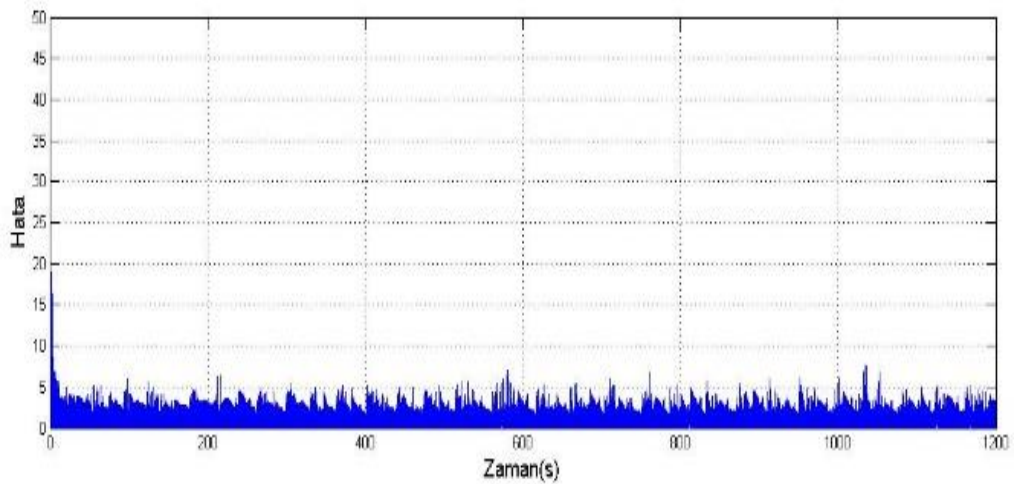


(a)



(b)

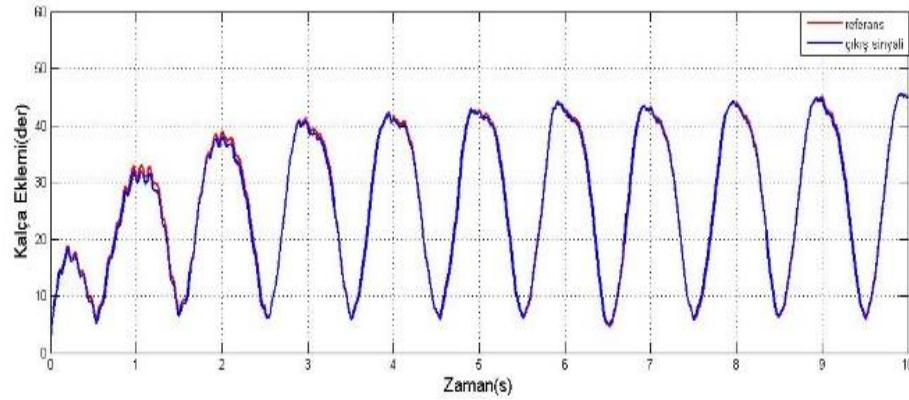
Şekil 12. Diz eklemi için $P_{\text{eğitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyallerinin ilk değerleri (a) ilk 5 saniye için (b) 1200 saniyelik eğitimin son 5 saniyesi için grafikleri



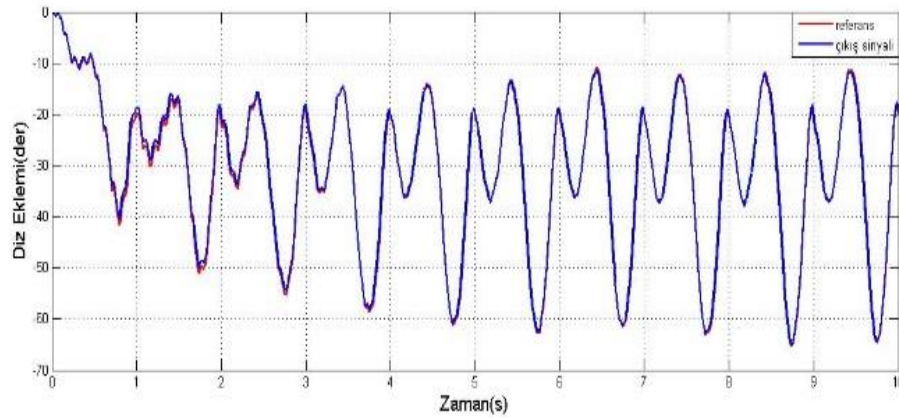
Şekil 13. Diz eklemi için $P_{\text{eğitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyalleri arasındaki hata

Şekil 13' de diz eklem açıları için hata oranı incelendiğinde yine eğitimden kısa bir süre sonra hatanın belirli bir frekans aralığında sabit kaldığı ve bu hata oranının kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Hata oranı %10 civarındadır.

Hopf osilatör için yürüme eğrisi eğitimi ile etkin değerlere ulaşıldıktan sonra, CPG eğitimi sonucunda elde edilen yürüme eğrisi iki ayaklı yürüyen robotun eklemlerine uygulanmıştır. Diz ve kalça eklemleri için yörünge izleme performansı kullanılarak gerçekleştirilen eğitim sonuçları kalça ve diz eklemlerine uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 14' de sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 14. İki ayaklı yürüyen robotun (a) kalça, (b) diz eklemi açıları

Grafiklerde de görüldüğü gibi hem kalça hem de diz eklemi için Hopf osilatörün eğitimi yoluyla etkin yürüme performansı sağlanmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada, insansı iki ayaklı yürüyen bir robotun yürüme hareketinin modellenmesi ve yürüme eğrisi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle iki ayaklı robotun matematiksel modeli için kinematik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Robotun eklemlerine önceden belirlenen açılar girildiğinde robotun uç noktasının gideceği konumu hesaplamak için Denavit-Hartenberg yöntemi ile düz kinematik analizleri yapılmıştır. Yapılan ters kinematik hesaplamaları ile de robotun eklem açılarının belirlenmesi sağlanmıştır.

Bu çalışma için robotun kalça ve dizde bulunan iki eklemi üzerinde yoğunlaşmıştır. Diğer eklemlerin sabit olduğu kabul edilmiş ve iki ayaklı yürüyen robotun yürüme eğrilerinin elde edilmesi için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birincisi 6. Dereceden polinomlar kullanılarak robot ekleminin 1 saniye boyunca takip etmesi gereken yürüme eğrisinin tasarımıdır. İkincisi ise CPG ile yürüme eğrisi tasarımıdır. Çalışmada, robotik uygulamalarda sıklıkla tercih edilen doğrusal olmayan Hopf osilatör kullanılmıştır. Kalça ve diz eklemleri için eğitim sinyali oluşturularak osilatörün dinamik denklemlerine uygulanmış ve yürüme eğrisi tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Robot tasarımında bir insanın bacak boyutlarının ortalama değerleri dikkate alınmıştır. İnsan yürüme hareketini etkin bir şekilde taklit edebilmek için robotun her bir bacağına toplam 6 serbestlik dereceli olarak tasarlanması uygun görülmüştür. Bunlardan 3 tanesi kalça eklemi, bir tanesi diz eklemi

ve iki tanesi ise ayak bileği eklemidir. Böylelikle insan yürüme hareketine yakın bir tasarım elde edilmiştir.

Çalışmada, iki ayaklı yürüyen robotun katı model tasarımı SolidWorks programı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tasarlanan robot simülasyon çalışmaları için MATLAB/ SimMechanic ortamına aktarılmıştır.

Eğitim sinyali olarak 6. dereceden polinomlar kullanılmıştır ve elde edilen bu eğitim sinyali Hopf osilatör denklemlerine uygulanarak robot eklemlerine yürüme eğrisi eğitimi yapılmıştır. Çalışmada kalça ve diz eklem açıları eğitim sürecinde detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Eğitilmiş yürüme eğrileri tasarlanan robot modeline uygulanmış ve oldukça etkin bir yürüme performansı sağlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda farklı CPG yapıları ile elde edilen yürüme eğrilerinin robot modeli üzerinde sınanması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu makale, 'İki Ayaklı Yürüme Hareketinin Modellenmesi ve Akıllı Kontrolü' başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Acar M, 2007. İki ayaklı yürüme hareketinin modellenmesi ve kontrolü, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Adak ÖK, 2013. Quadruped Locomotion Reference Synthesis With Central Pattern Generators Tuned by Evolutionary Algorithms, Sabancı Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Altınorak S, 2006. İki ayak robot modellemesi denetleyici tasarımı ve dinamik benzetimi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Aykaç B, 2011. Dc motorla tahrik edilen iki uzuvlu manipülatörün adım atma hareketinin kontrolü, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Azimi E, Ghobadi M, Esfahani E, Keshmiri M, Tehrani A, 2005. Three Dimensional Smooth Trajectory Planing Using Realistic Simulation, Robot Soccer World Cup. Springer Berlin Heidelberg, pp. 381-393.
- Chestnutt J, Michel P, Kuffner J, Kanade T, 2007. Locomotion Among Dynamic Obstacles for the Honda ASIMO, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, pp.2572-2573.
- Erbatur K, Seven U, Taşkiran E, Koca Ö, Kızıldağ G, Unel M, Sabanovic A, Onat A, 2008. SURALP-L - The Leg Module of a New Humanoid Robot Platform, 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots December 1~3, Daejeon, Korea, pp.168-173.
- Ewald A, Buschmann T, 2013. Online Trajectory Replanning for Biped Robots Based on Foot Step Position Modification, The 2013 World Congress on Advances in Nano, Biomechanics, Robotics, and Energy Research, Korea, pp.155-163.
- Gerçek A, 2012. İki Ayaklı Yürüyen Robot Tasarımı Ve Prototip İmalatı, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Hase K, Yamazaki N, 1999. Computational Evolution of Human Bipedal Walking by a Neuro-Musculo-Skeletal Model, Artificial Life and Robotics 3: 133-138.
- Jong HP, Yong KR, 1998. ZMP Trajectory Generation for Reduced Trunk Motions of Biped Robots. In Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.90-95.
- Kanatlı U. ve Yetkin, H, Songür M, Öztürk A, Bölükbaşı S, 2006. Yürüme analizinin ortopedik uygulamaları, TOTBİD Dergisi, 5: 53-59.
- Khan LA, Naeem J, Khan U, Hussain SZ, 2008. PID Control of a Biped Robot, 8th WSEAS Int. Conf. on Robotics, Control and Manufacturing Technology (ROCOM '08), Hangzhou, China, April 6-8, pp.156-160.

- Miyakoshi S, Taga G, Kuniyoshi Y, Nagakubo A, 1998. Three Dimensional Bipedal Stepping Motion Using Neural Oscillators- Towards Humanoid Motion in the Real World, Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems Victoria, B.C., Canada October 1998, pp.84-89.
- Nakanishi J, Morimoto J, Endo G, Cheng G, Schaal S, Kawato M, 2004. Learning from demonstration and adaptation of biped locomotion. *Robotics and Autonomous Systems* 47: 79–91.
- Raibert M, Tzafestas C, Tzafestas S, 1993. Comparative Simulation Study of Three Control Techniques Applied to a Biped Robot, AI Lab., MIT, 545 Tech. Square Cambridge, Mass 02139, USA, IRCU, National Tech. Univ. of Athens Zografou, 15773 Athens, GREECE, July 14, pp.494-502.
- Righetti L, Ijspeert AJ, 2006. Programmable central pattern generators: an application to biped locomotion control, In *Robotics and Automation. ICRA 2006. Proceedings IEEE International Conference on*, pp.1585-1590.
- Sugihara T, Nakamura Y, Inoue H, 2002. Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation Washington, DC, May, pp.1404-1409.
- Şeker A, Talmaç MA, Sarıkaya İ. 2014. Yürüme biyomekaniği. *TOTBİD Dergisi* 2014, s.314-324.
- Taga G, Yamaguchi Y, Shimizu H, 1991. Self-Organized Control of Bipedal Locomotion by Neural Oscillators in Unpredictable Environment, *Biological Cybernetics* 65: 147-159.
- Tsuchiya K, Aoi S, Tsucita K, 2003. Locomotion Control of a Biped Locomotion Robot using Nonlinear Oscillators, Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems Las Vegas, Nevada. October, pp.1745-1750.
- http://www.erpemeteg.org/erpemeteg/Kurs_Materyalleri/Kitap/ERPE-METEG_Bolum_2.pdf (Erişim Tarihi: 05.05.2017)