

Ters Sarkaç Modeli ve Salınan Bacak Telafisi ile Oluşturulan Yürüyen Robot Referans Yörüngeleri

Utku Seven¹, Evrim Taskiran², Özer Koca³ ve Kemalettin Erbatır⁴

Mekatronik Programı, Sabancı Üniversitesi
Orhanlı-Tuzla, 34956 İstanbul, Türkiye

¹utkuseven@su.sabanciuniv.edu ²evrint@su.sabanciuniv.edu ³ozerk@su.sabanciuniv.edu
⁴erbatır@sabanciuniv.edu

Özetçe

İki bacaklı yürüyen robotlarda referans yörüngesi oluşturulması çok önemli bir problemdir. Referans yörüngesi oluşturulmasını kolaylaştıran Doğrusal Ters Sarkaç Modeli (DTSM) literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Buna ek olarak Sıfır Moment Noktası (SMN) ölçütü de kararlı referans oluşturulmasında kullanılmaktadır. Ancak, DTSM tabanlı yörünge oluşturma yöntemleri salınan bacak dinamiğini ihmal etmektedir. Bu durum özellikle bacaklar ağır olduğunda kararlılık açısından bir sorun teşkil etmektedir. Bu bildiri, robotun gövdesinin ve salınan bacağın dinamiklerini içeren, iki noktasal ağırlıklı bir DTSM kullanmakta ve bu modeli beşinci dereceden durum-uzay denklemleri ile tanımlamaktadır. Gövde ağırlık merkezi (GAM) referans yörüngesi, önceden belirlenmiş ayak merkezi ve SMN referansları kullanılarak elde edilmiştir. Yürüme hareketinin sağlanması amacıyla ters kinematik tabanlı bir konum kontrolü uygulanmıştır. Tek noktasal ağırlıklı ve iki noktasal ağırlıklı Doğrusal Ters Sarkaç Modellerinin yürüyüş performansları 12 serbestlik dereceli ve iki bacaklı bir yürüyen robotun üç boyutlu tam dinamik benzetimi yardımıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, robotun yürüyüş kararlılığı açısından iki noktasal yüklü modelin daha olumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir.

1. Giriş

İnsansı robot tasarımı ilgi çeken araştırma alanları arasında yer almaktadır. Robotik bilim dalında bu konu ile ilgili başarılı projeler yürütülmektedir [1-7]. İnsansı robotlar iki bacaklı yapıları itibarı ile insanların yaşadıkları ortamlarda görevler almaya uygundur. Merdivenleri çıkabilir, insanlar için tasarlanmış ulaşım araçlarında taşınabilirler. Bu uygunluklarına rağmen, sahip oldukları çok sayıda serbestlik derecesi ve doğrusal olmayan, kararsızlık eğilimindeki dinamiklerinden dolayı insansı robot kontrolü zorluklar göstermektedir [8-9].

Yürüme referans yörüngesi oluşturulması, kontrol probleminin ayrılmaz bir parçasıdır. Robotun basitleştirilmiş bir modeli olarak DTSM kullanan referans yörünge teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır [10-12]. İki bacaklı yürüyen robot yürüme referansı oluşturulmasında önemli bir gereklilik,

referansın telafi edilemez düşme hareketlerine yol açmamasıdır. SMN [8] ölçütü, insansı robotların yürüyüş kararlılığı analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. SMN ölçütünün kullanıldığı, DTSM tabanlı referans yörünge oluşturma yöntemlerinin başarılı uygulamaları bulunmaktadır [13, 18]. Bu bildiriye yaklaşımda SMN, kararlılık sağlamak amacıyla yürüyüş esnasında ayak tabanı temas yüzeyi içerisinde tutulmaya çalışılırken, robot ağırlık merkezi de DTSM için hesaplanan referans yörüngesini takip etmektedir.

Doğrusal Ters Sarkaç Modeli'nde salınan ayak dinamiği göz önüne alınmamaktadır. DTSM yaklaşımı robotu tek bir noktasal yüke indirger ve bacakların da ağırlıksız olduklarını kabul eder. Ancak, özellikle ağır bacaklı robotlarda, bu kabul problem teşkil etmektedir. [19] bu durumdan kaynaklanan problemleri çözmek amacıyla iki noktasal yük içeren bir model sunmuştur. Altı serbestlik dereceli bir robotun yürüme yönündeki hareketleri için referans oluşturulması üzerinde çalışılmıştır. [20] vücut ağırlığının gövde ve salınan bacağına dağıtılması konusunda bir fikir sunmuştur. [7] tüm vücut için bir yerçekimi telafi tekniği önermektedir.

Bu bildiri, tek ayak ve çift ayak destek safhaları için sırasıyla tek ve çift noktasal yük içeren DTSM kabulleri esasına dayanmaktadır. Tek noktasal yüklü model üçüncü dereceden [21], çift noktasal yüklü model ise beşinci dereceden [22] bir durum-uzay gösterimi ile ifade edilmiştir. GAM iki model için de bir durum değişkenidir. GAM referans yörüngesi oluşturulmasında durum-uzay modelinin durum geri beslemeli bir şekilde benzetiminin yapılması sonucunda elde edilen SMN ve salınan ayak referansları ile benzetim esnasında kaydedilen GAM yörüngeleri kullanılmaktadır. Eklem yörüngeleri ise ters kinematik metodu ile elde edilir ve her eklem için ayrı bir PID kontrol sistemi kullanılır.

Referans yörünge oluşturulması ve kontrol algoritmaları 12 serbestlik dereceli bir insansı robotun 3-B dinamik benzetimi yardımıyla test edilmiştir.

Bir sonraki bölüm, benzetimde kullanılan robot modelini tanıtmaktadır. Bölüm 3, SMN ve salınan ayak için referans yörünge oluşturulmasını açıklamaktadır. Tek-çift noktasal yük değişimli DTSM, bu modelin durum-uzay gösterimi ve GAM referans yörüngesi elde

etmek amacıyla yapılan benzetim ise Bölüm 4'te anlatılmaktadır. Benzetim sonuçları Bölüm 5'te gösterilmiştir ve son olarak sonuçlar sunulmuştur.

2. İnsansı Robot Modeli

Bu bildiride kullanılan insansı robot modeli altışar eklemli iki bacak ve onları bağlayan gövdeden oluşmaktadır. Bacaklarda üç eklem kalçada, bir eklem dizde ve iki eklem de bilekte bulunmaktadır. İnsansı robotun bağ boyları ve ağırlıkları Tablo 1'de belirtilmiştir.

Şekil 1'de canlandırma penceresinin bir görünümü sunulmuştur. Robotun 3-B tam dinamik benzetim modeli [23]'de kullanılan modele benzemektedir. Zemin teması, uyarlamalı ceza tabanlı bir teknik yardımıyla modellenmiştir. Benzetim algoritması ve temas modelinin ayrıntıları [24]'te verilmiştir.

3. SMN ve Salınan Ayak Referans Yörüngeleri

Bölüm 1'de belirtildiği gibi SMN ve salınan ayak referans yörüngeleri, GAM referansını elde etmek için kullanılmaktadır. SMN ölçütüne göre, SMN ayak tabanının içinde kaldığı sürece kararlı bir yürüyüş sağlanabilmektedir. Bu bildiride kullanılan SMN ve salınan ayak referans yörünge elde etme algoritmaları [17]'de anlatılmaktadır. Bu süreç ana hatlarıyla aşağıda anlatıldığı gibidir:

- 1) Ayak basma yerlerinin tayin edilmesi (adım boyu: B , ayaklar arası mesafe: $2A$) (Şekil 2).
- 2) Tek ayak destek safhasında SMN'nin ayak altındaki hareketinin ($2b$) tayin edilmesi (Şekil 3).
- 3) Yürüyüş periyodunun belirlenmesi ($2T$, Şekil 3).
- 4) X-yönü (yürüyüş yönü) SMN referansının "basamakları eğimli merdiven" şeklinde aşağıda verilen denkleme göre tayin edilmesi (Şekil 3).

$$p_x^{ref} = \frac{2b}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) + (B - 2b) \sum_{k=1}^{\infty} u(t - kT)$$

Burada u birim adım fonksiyondur.

- 5) Y-yönü SMN referansının (p_y^{ref}), tek ayak destek ve çift ayak destek safhaları arasındaki değişim zamanının sıfır olduğu kabulüne dayanarak tayin edilmesi.
- 6) Bu durumda elde edilen referans Şekil 4'te görüldüğü gibi kare dalga şeklinde olmaktadır.

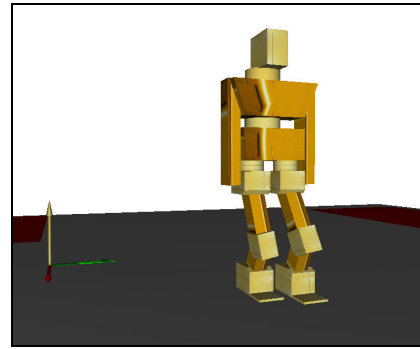
$$p_y^{ref} = Au(t) + 2A \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k u(t - kT)$$

- 6) Yürüyüş safhaları arasında yumuşak bir geçiş sağlamak amacıyla "merdiven" ve "kare dalga" biçimindeki referansların yumuşatılması. Bu bildiride kullanılan yumuşatılmış referanslar Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu şekiller [17]'deki yumuşatma algoritmasının Şekil 3 ve Şekil 4'teki referanslara uygulanmasıyla elde edilmiştir.

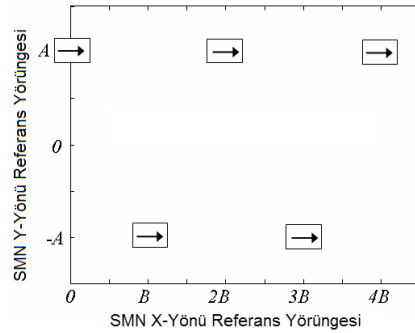
- 7) Y-yönü ayak referansları sabittir. Şekil 5'te görülen ayak x-yönü referans yörüngeleri ise sinüs dalgaları şeklinde tasarlanarak yumuşatılmaları sağlanmıştır. Bu yörüngeler, ayak yerleşimleri (Şekil 2) ve adım periyotlarına ($2T$) göre belirlenmiştir. Ayakların z-yönü referans yörüngeleri de ayağın Şekil 5'te x-yönünde ilerlediği zamanlarda yere basmadığı esasına dayanarak tasarlanmıştır.

Tablo 1: Robot Bağlarının Uzunluk ve Ağırlıkları

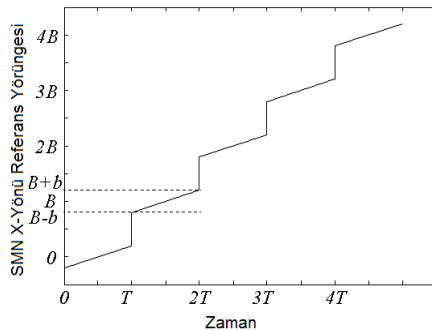
Uzuv	Ölçüler (LxWxH) [m]	Ağırlık [kg]
Gövde	0.2 x 0.4 x 0.5	50
Uyluk	0.27 x 0.1 x 0.1	12
Baldır	0.22 x 0.05 x 0.1	0.5
Ayak	0.25 x 0.12 x 0.1	5.5



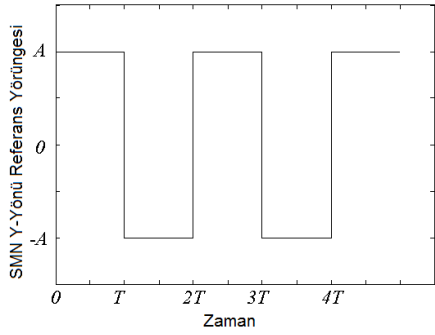
Şekil 1: Canlandırma penceresinden bir görüntü



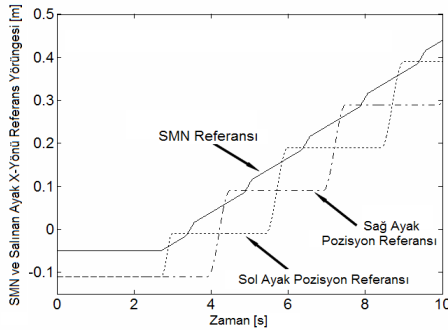
Şekil 2: Referans ayak basma yerleşimi



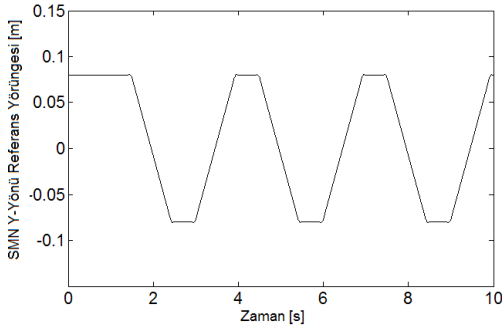
Şekil 3: Ayak altında hareket eden SMN x-yönü referansı



Şekil4: Yumuşatma öncesi SMN y-yönü referansı.



Şekil 5: Yumuşatma sonrası SMN ve salınan ayak x-yönü referansları.



Şekil 6: Yumuşatma sonrası SMN y-yönü referansı.

4. İki Noktasal Yüklü Model İle GAM Yörüngesi Elde Edimi

Bu bölümde öncelikle tek noktasal yük içeren model ile referans yörünge elde edimi açıklanmıştır. Bunu iki noktasal yüklü modelin genel halinin açıklanması takip etmektedir. Son olarak da GAM referans yörünge elde ediminin çevrimdışı durum geri beslemeli olarak sağlanması açıklanmıştır. Şekil 7'de tek noktasal yüklü modelin x-z düzleminde görünümü sunulmuştur. Bu şekilde, c_x robot ağırlık merkezi (RAM) x-yönü pozisyonu, c_z robot ağırlık merkezi (RAM) z-yönü pozisyonu ve \ddot{c}_x de robot ağırlık merkezi (RAM) x-yönü ivmelenmesini göstermektedir. g yer çekimi ivme

katsayısını (9.81 m/s^2) ve M de vücut ağırlığını temsil etmektedir.

Robot ağırlık merkezi yüksekliğinin sabit olduğu varsayımı ise x ve y yönlerindeki denklemlerin ayrık hale gelmesini sağlamaktadır. SMN x-yönü bileşeni p_x aşağıdaki formüller kullanılarak elde edilmiştir:

$$M\ddot{c}_z = Mg(c_x - p_x) \quad (1)$$

$$p_x = c_x - \frac{c_z}{g} \ddot{c}_x \quad (2)$$

Bu model robot dinamiğinin basitleştirilmiş bir hali olarak kullanılmaktadır. M , robot gövdesi ve bacakların toplam ağırlığı ve c de RAM ile gösterilen robot ağırlık merkezinin pozisyonudur. Fakat RAM yerine GAM kullanılması durumu basitleştirdiği için daha yaygın bir kabuldür.

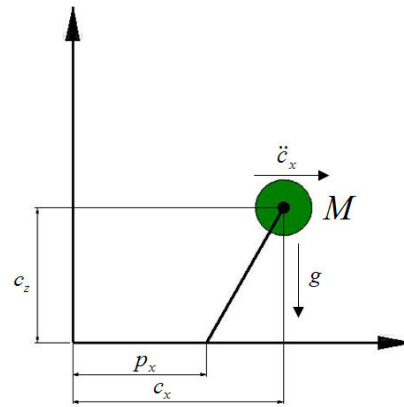
(2) numaralı denkleme Laplace dönüşümü uygulandığında aşağıda verilen şekle dönüşür.

$$P_x(s) = L(c_x - \omega^2 \ddot{c}_x) \quad (3)$$

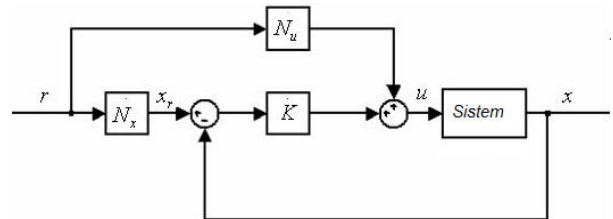
$\omega = \sqrt{c_z/g}$ tanımı ile verilmiştir. Bu denklem istenilen p_x referans yörüngesinden c_x referans yörüngesini elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Fakat SMN ölçümü ayaktaki kuvvet algılayıcılarından elde edilen gürültülü bir sinyal olduğu için denkleme bir alçak geçiren süzgeç eklemek gerekmektedir.

$$P_x(s) = \frac{1}{1 + s\tau} L(c_x - \omega^2 \ddot{c}_x) \quad (4)$$

Bu denklemde τ filtre zaman değişkenidir. Bu tip bir filtre gerçek uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. (4) ile gerçekçi bir sonuç elde edilmektedir.



Şekil7: Tek noktasal yüklü Doğrusal Ters Sarkaç Modeli.



Şekil 8: Sistemin öbek şeması

[21] bu modeli aşağıda verilen durum-uzay denklemlerini elde etmek için kullanmaktadır ve (5) yardımıyla çevrimiçi durum geri beslemeli bir kararlılaştırma uygulamaktadır.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_x \\ c_x \\ \dot{c}_x \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -1/\tau & 1/\tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} p_x \\ c_x \\ \dot{c}_x \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\omega^2/\tau \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_B \ddot{c}_x, \quad (5)$$

$$p_x = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} p_x \\ c_x \\ \dot{c}_x \end{bmatrix} + \underbrace{0}_D \ddot{c}_x$$

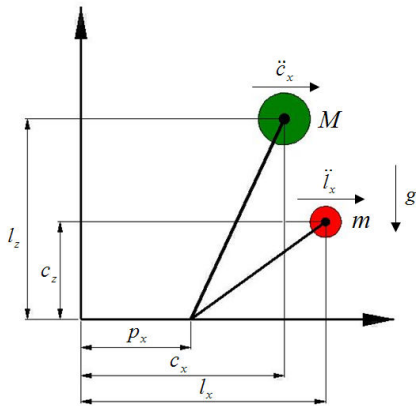
Fakat bu bildiride bu denklem, aşağıda açıklandığı gibi çevrimdışı referans yörünge elde edimi için kullanılmaktadır:

İlk olarak (A,B,C,D) ile gösterilen sürekli durum-uzay modeli bilgisayar uygulamaları için, (F,G,H,J) ile gösterilen ayrık hale dönüştürülmüştür. Durum geri besleme katsayısı olan K kararlı kapalı çevrim kutupları elde edecek şekilde bulunmuştur. Bu katsayı Şekil 8'de gösterilen öbek şemada kullanılmıştır. N_x ve N_u ileri besleme ve durum referans katsayı matrisleridir ve aşağıdaki gibi hesaplanmışlardır.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & H \\ G & J \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Bu denklem [25]'te açıklanmıştır. Şekil 8'de görülen r SMN x-yönü referansdır. Durum değişkeni olan c_x kaydedilir ve GAM x-yönü pozisyon referansı olarak kullanılır. c_x ve ayak referansları aynı koordinat eksen takımında tanımlandığı için (dünya koordinat eksen takımını), eklem referanslarını elde etmek için ters kinematik yöntemi kullanılabilir.

Daha sonra PID bağımsız eklem kontrolörleri yürüyüşün sağlanması için uygulanmıştır. Benzetimde kullanılan robot, Bölüm 5'te gösterileceği gibi bu haliyle de başarılı bir şekilde yürümektedir.



Şekil 9: Bu bildiride önerilen çift noktasal yüklü model

Fakat bu kabulde tek ayak destek safhalarında bir hata vardır. Tek noktasal yük içeren DTSM salınan bacak ağırlığını hesaba katmadığı için bu ayak tek ayak destek safhasında RAM'ın istenilen referans yörüngesinin dışına çıkmasına sebep olmaktadır. RAM ileri-geri ya da sağa-sola kaymaktadır.

Bu bildiride bu problemin üstesinden gelmek için çift noktasal yüklü bir model önerilmiştir. Şekil 9 bu bildiride önerilen çift noktasal yüklü modeli göstermektedir. Bu şekilde robot ağırlık merkezi RAM'dan farklı olarak iki ayrı noktasal yük belirlenmiştir. Şekildeki c_x GAM ile ifade edilen robot gövde ağırlık merkezinin pozisyonunu, l_x de BAM ile ifade edilen salınan bacak ağırlık merkezi pozisyonunu göstermektedir. m ise salınan bacak ağırlığını ifade etmektedir. Bu şekilde elde edilen SMN denklemi aşağıdaki gibidir:

$$p_x = \frac{M}{(M+m)} c_x - \frac{M}{(M+m)} \ddot{c}_x \frac{c_z}{g} + \frac{m}{(M+m)} l_x - \frac{m}{(M+m)} \ddot{l}_x \frac{l_z}{g}. \quad (7)$$

Bu denklemde, l_x BAM x-yönü pozisyonunu, \ddot{l}_x BAM'ın x yönündeki ivmelenmesini ve l_z de BAM'ın z-yönü pozisyonunu göstermektedir. Bu ifadelerle göre (7) aşağıdaki hale getirilir:

$$P_x(s) = L(Rc_x - R\ddot{c}_x\omega^2 + rl_x - r\ddot{l}_x\gamma^2). \quad (8)$$

(8)'de kullanılan katsayılar aşağıdaki gibidir:

$$\frac{M}{(M+m)} = R, \quad \frac{m}{(M+m)} = r, \quad \frac{c_z}{g} = \omega^2, \quad \frac{l_z}{g} = \gamma^2. \quad (9)$$

(8)'de kullanılan ω ve τ terimleri (3)'te kullanıldığı anlamları taşımaktadır. Aynı (3)'e uygulandığı gibi bu denklemde de bir alçak geçiren süzgeç eklenir ve aşağıdaki denklem elde edilir.

$$P_x(s) = \frac{1}{1+s\tau} (Rc_x - R\ddot{c}_x\omega^2 + rl_x - r\ddot{l}_x\gamma^2). \quad (10)$$

Oluşturulan modelde yeni durum değişkenleri p_x , c_x , \dot{c}_x , l_x ve \dot{l}_x olarak seçilerek (10) aşağıdaki durum-uzay denklem takımı haline getirilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_x \\ c_x \\ \dot{c}_x \\ l_x \\ \dot{l}_x \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -1/\tau & R/\tau & 0 & r/\tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} p_x \\ c_x \\ \dot{c}_x \\ l_x \\ \dot{l}_x \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} -R\omega^2/\tau & -r\gamma^2/\tau \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} \ddot{c}_x \\ \ddot{l}_x \end{bmatrix} \quad (11)$$

Çıkış vektörü $y = [p_x \ l_x]^T$ olarak seçildiği takdirde aşağıdaki çıkış denklemi elde edilir.

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} p_x \\ c_x \\ \dot{c}_x \\ l_x \\ \dot{l}_x \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_D \begin{bmatrix} \ddot{c}_x \\ \ddot{l}_x \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Tek noktasal yüklü modele de uygulandığı gibi bu model de ayrıklaştırılarak (F,G,H,J) haline dönüştürülür ve kutup yerleştirme teknikleriyle durum geri besleme

katsayısı K tayin edilir. (6) kullanılarak ileri besleme ve durum referans katsayıları bulunmuştur.

Benzetim, Şekil 8'deki öbek şemaya dayalı olarak tekrar çalıştırılır. Fakat bu sefer referans yörünge vektörü SMN x-yönü referansı ile salınan ayak ağırlık merkezi (BAM) x-yönü referanslarını (l_x) içermektedir. Bacak ağırlık merkezleri benzetimin her çevriminde GAM ve ayak referanslarından yararlanarak, her uzvun ağırlık merkezinin bulunması ve tek noktaya indirgenmesi yardımıyla hesaplanmaktadır. Benzetim esnasında elde edilen c_x yörüngeleri kaydedilmekte yürüyüş esnasında GAM referans yörüngesi olarak kullanılmaktadır. Tek noktasal yük içeren modelde de olduğu gibi ters kinematik ve PID kontrolörler sisteme uygulanır.

Yörünge oluşturulması için kullanılan benzetimde tek ve çift noktasal yüklü modeller değişimli olarak kullanılmaktadır. Şöyle ki, robot çift ayak destek safhasındayken tek, tek atak destek safhasındayken çift noktasal yüklü modeller kullanılmaktadır. Modeller arası geçişteki devamlılık ise, her geçiş olduğunda referansın sıfırlanmasıyla sağlanmıştır.

Yukarıda sunulan tüm çalışmalar x-yönü için geçerlidir. y-yönü için de benzer çıkarımlar kullanılarak istenilen sonuçlar elde edilebilmektedir. x-yönü için uygulanan tüm yöntemler y-yönü için de uygulanmıştır ve istenilen referans yörüngeleri elde edilmiştir. Sonuç olarak x-yönü ve y-yönü referansları elde edildikten sonra birleştirilmiş ve GAM için istenilen referans yörüngesi elde edilmiştir.

5. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde Tablo 2'de değişkenleri verilen yürüyüş yörüngesi göz önünde bulundurulmuştur. İki farklı senaryo için benzetim yapılmıştır:

- 1) Bölüm 3'te anlatılan şekilde, GAM referansının SMN ve salınan ayak referansları yardımıyla, tek ve çift ayak destek safhaları için, tek noktasal yüklü modelin [18] kullanılmasıyla elde edilmesi.
- 2) Bölüm 3'te açıklandığı şekilde GAM referans yörüngelerinin tek ve çift noktasal yük içeren modelin değişimi kullanılarak elde edilmesi

Gövde ve bacakların benzetim için kullanılan DTSM parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Bacak ve gövde yükseklikleri [18]'de kullanılan tipik benzetim parametrelerinden alınmıştır ve daha iyi yürüme performansı elde etmek için ayarlanmıştır. Şekil 10 tek noktasal yük içeren model için sonuçları göstermektedir. Şekilde RAM için verilen referans ve izlenen yörünge arasında hem x hem de y yönlerinde sapmalar olduğu görülmektedir. İki ayak destek safhasındaki referans izlemenin tek ayak destek safhasındakine göre daha başarılıdır. Çift noktasal yük içeren model için benzetim sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre tek ayak destek safhasındayken çift noktasal yüklü model referans yörünge izleme konusunda daha başarılıdır. Bu da göstermektedir ki, geliştirilen yöntem yardımıyla salınan ayağın robot dinamiği üzerindeki

olumsuz etkileri azaltılmıştır. Şekil 10 ve Şekil 11'deki sonuçları elde etmek için ters kinematik tabanlı açık çevrim kontrol algoritmaları kullanılmıştır. Sensörlerden elde edilen vücut açısı, zemin temas kuvvetleri ya da vücut ivmelenmesi gibi verilerden yararlanılmamıştır. Bu şekilde, başarımların sadece referans yörüngeleri açısından karşılaştırılması mümkün olmuştur. Tek-çift noktasal yük değişimli modelin, tek noktasal yüklü modele göre daha başarılı sonuçlar sağladığı gözlemlenmiştir.

6. Sonuçlar

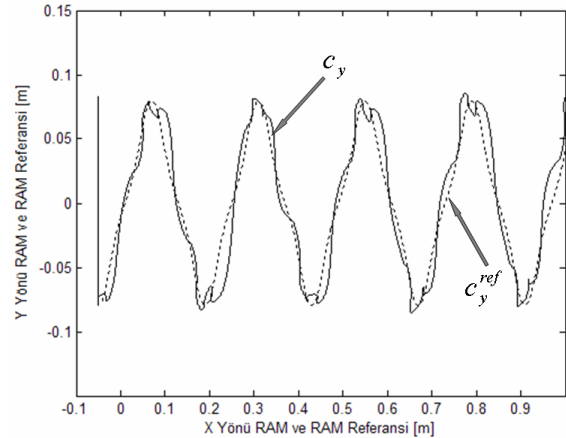
Bu bildiriye SMN ölçütüne dayalı ve tek-çift noktasal yükler arasında değişimli DTSM kullanan bir insansı robot referans yöntemi sunulmuştur. Benzetim sonuçlarına göre tek-çift noktasal yükler arası değişimli çalışan model, tek noktasal yük içeren modele göre daha iyi bir performans sergilemektedir. Sunulan yöntemin Sabancı Üniversitesi'nde tasarlanan SURALP insansı robot platformunda denenmesi planlanan çalışmalarımız arasındadır.

Tablo 2: Bazı Önemli Benzetim Değişkenleri

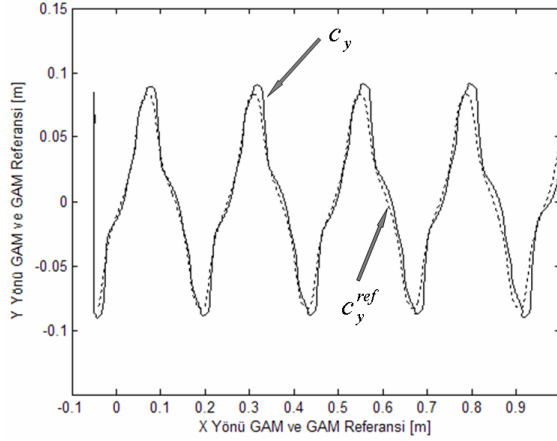
Değişken	Değer
Adım yüksekliği	0.02 m
Adım süresi	3 s
Ayaklar arası y-yönü mesafesi	0.16 m
SMN referansı ayaklar arası y-yönü mesafesi	0.2 m
Adım uzunluğu	0.24 m
Ayak altındaki SMN hareketi	0.08 m

Tablo 3: Bazı Önemli Benzetim Değişkenleri

Tek Noktasal Yüklü Model		Tek-Çift Noktasal Yük Değişimli Model	
Değişken	Değer	Değişken	Değer
c_z	0.77 m	c_z	0.77 m
M	86 kg	M	68 kg
		l_z	0.31 m
		m	10 kg



Şekil 10: Tek noktasal yüklü sistem için x-y düzleminde referans ve gerçek GAM referans yörüngeleri



Şekil 11: Çift noktasal yüklü sistem için x-y düzleminde referans ve gerçek GAM referans yörüngeleri

7. Teşekkür

Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. (Araştırma proje numarası: 106E040).

8. Kaynakça

- [1] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, M. Shinichi, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: System overview and integration", *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lozan, İsviçre, Ekim 2002
- [2] T. Sawada, T. Takagi, and M. Fujita, "Behavior selection and motion modulation in emotionally grounded architecture for QRIO SDR-4X II", *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.3, pp. 2514-2519, Sendal, Japonya, Ekim 2004.
- [3] S. Lohmeier, K. Löffler, M. Gienger, H. Ulbrich, and F. Pfeiffer, "Computer system and control of biped "Johnnie"", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.4, pp.4222-4227, New Orleans, LA, Nisan 2004.
- [4] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, and T. Isozumi, "Design of prototype humanoid robotics platform for HRP", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2431-2436, vol.3, Ekim 2002.
- [5] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H. Lim and A. Takanishi, "Development of A Humanoid Robot WABIAN-2," Proc. 2006 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 76-81, 2006
- [6] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The development of Honda humanoid robot", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp: 1321 -1326 vol.2, Mayıs 1998
- [7] S. Hyon and G. Cheng, "Gravity Compensation and Full-Body Balancing for Humanoid Robots," IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2006), CD-ROM, pp. 214-221, Aralık. 2006.
- [8] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic, *Biped Locomotion: Dynamics, Stability and Application*. Springer-Verlag, 1990.
- [9] M. Raibert, *Legged Robots that Balance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [10] S. Kajita, and K. Tani, "Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain -Theory and basic experiment-" *ICAR, Fifth International Conference on Advanced Robotics*, pp: 741-746, vol.1, Haziran 1991.
- [11] S. Kajita, K. Kaehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "A real time pattern generator for bipedal walking" *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.1, pp.31-37, Mayıs 2002.
- [12] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "The 3D Linear inverted pendulum mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation," *Proc. 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Volume 1, 29 Ekim.-3 Kasım. 2001 pp. 239 - 246 vol.1
- [13] S. Kajita, F. Kaehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, H. Hirukawa, "Biped walking pattern generation using preview control of the zero-moment-point", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp: 1620 - 1626, vol.2, Taipei, Taiwan, Eylül 2003.
- [14] T. Sugihara, Y. Nakamura, and H. Inoue, "Real-time humanoid motion generation through ZMP manipulation based on inverted pendulum control", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp: 1404 - 1409, vol.2, Washington DC, Mayıs 2002.
- [15] Y. Choi, B. J. You, and S. R. Oh, "On the stability of indirect ZMP controller for biped robot systems", *Proceedings of International Conferenc on Intelligent Robots and Systems*, pp: 1966 - 1971, vol.2, Sendal, Japonya, Haziran 2004.
- [16] C. Zhu, Y. Tomizawa, X. Luo, and A. Kawamura "Biped walking with variable ZMP, frictional constraint, and inverted pendulum model", *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp: 425 - 430, Shenyang, Çin, Ağustos 2004.
- [17] O. Kurt, and K. Erbatur, "Biped Robot Reference Generation with Natural ZMP Trajectories," Proc. The 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, AMC 2006, İstanbul, Türkiye.
- [18] K. Erbatur and U. Seven, "Humanoid Gait Synthesis with Moving Single Support Zmp Trajectories", accepted for publication in *Proc. The 13th IASTED International Conference on Robotics and Applications RA 2007*, Würzburg, Almanya, Ağustos, 2007
- [19] J. H. Park and K. D. Kim, "Biped robot walking using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Lueven, pp 3528-3533, Belçika, Mayıs 1998
- [20] O. Ayhan and K. Erbatur, "Biped Walking Robot Hybrid Control with Gravity Compensation," Proc. Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON 2005, pp. 1797-1802, Raleigh, USA, Kasım 2005.
- [21] Nishiwaki, K., Nagasaka, K., Inaba, M. and Inoue, H., "Generation of Reactive Stepping Motion for a Humanoid by Dynamically Stable Mixture of Pre-designed Motions", *Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp.702-707, Tokyo Japonya, 1999.
- [22] Erbatur, K. and U. Seven, "An Inverted Pendulum Based Approach to Biped Trajectory Generation with Swing Leg Dynamics," Proc. IEEE-RAS 7th International Conference on Humanoid Robots 2007, Pittsburgh, USA, Dec 2007.
- [23] Y. Fujimoto and A. Kawamura, "Simulation of an autonomous biped walking robot including environmental force Interaction", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 33-42, Haziran 1998.
- [24] K. Erbatur and A. Kawamura, "A new penalty based contact modeling and dynamics simulation method as applied to biped walking robots," *Proc. 2003 FIRA World Congress*, October 1-3, 2003 Vienna, Austria
- [25] Franklin, G.F., Powell, J.D., Workman, M., "Digital Control of Dynamic Systems", Addison Wesley Longman, 1998.