

Yay Şekilli Tek Ayak Destek SMN Yörüngeleri ile İnsansı Robot Yürüme Referansı Sentezi

Özer Koca¹, Utku Seven², Evrim Taşkiran³, Kemalettin Erbatır⁴

Mekatronik Programı
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

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

Özetçe

Son kırk yıldır, insansı robotlar araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Kararsız dinamiğinden ötürü, insansı robot kontrolü zor bir görevdir. Bu zorluğa neden olan ana problemlerden biri, yürüme referansı yörüngesinin elde edilmesidir. Bu alanda, Doğrusal Ters Sarkaç Modeli (DTSM, Linear Inverted Pendulum Model) olarak bilinen referans elde etme yöntemine rastlanmaktadır. İki ayaklı robot yürüyüşünde sıkça kullanılan kararlılık analizi olan, DTSM'ye bağlı referans elde etmenin geliştirilmiş şekli, Sıfır Moment Noktası (SMN, Zero Moment Point) ölçütü uygulanarak elde edilir. Genellikle, yürüyüş sırasında SMN referansı, destek ayağının tabanı ortasında sabitlenmiş olarak düşünülmektedir. İnsan yürüyüşünde ise SMN sabit kalmayıp, aksine destek ayağının altında hareket halinde olduğu için bu tür referans elde etme düşüncesi doğallıktan yoksundur. Bu bildiri, yürüyüş doğrultusuna dik ve paralel doğrultularda hareket eden tek ayak destek SMN referansları ile yürüyüş referansı elde edilmesini sunmaktadır. 12 serbestlik derecesine sahip iki ayaklı bir robot modelinin 3-boyutlu dinamik benzetimlerinde, ters kinematik tabanlı bağımsız eklem konum kontrolörü kullanılmıştır. Benzetim sonuçları, hareketli SMN referanslarının daha başarılı bir yürüyüş sağladığını göstermektedir.

1. Giriş

İnsansı robotlar üzerindeki araştırmalar son yıllarda yoğunlaşarak devam etmektedir [1-6]. Araştırmalar, insan ortamındaki görevler için iki ayaklı yapının uygunluğundan doğmaktadır. Bununla birlikte iki ayaklı yürüyen robot kontrolü, birçok serbestlik derecesi söz konusu olduğundan ve doğrusal olmayan kararsız dinamik yapısından ötürü çok çaba gerektiren bir konudur [7-8]. Yürüme referansı yörüngesi oluşturulması ana sorunlardan biridir. Çözüm olarak deneme ve yanılma tekniğinden, eniyileme tekniklerine kadar çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Referans elde etmede kullanılan değerli bir ölçüt, referans yörüngesinin, fazladan bir kontrol yöntemi uygulanmadan robotun kendi doğal dinamiği ile takip edilebiliyor olmasıdır. DTSM'ye bağlı referans oluşturulması tekniği bu fikre dayanmaktadır [9-11]. Yürüme, destek ayaklarının robotun yürüyüş doğrultusunda düşmeye başlamasına müsaade edecek ve sonrasında tamamen düşmeyi engelleyecek şekilde değiştirilmesiyle oluşturulur. Referans yörüngesinin kararlı olması, iki ayaklı robot referans sentezi için bir başka önemli ihtiyacıdır. Robotik biliminde

1970'lerde girmiş olan SMN Ölçütü [7] bacaklı robot hareketlerinin kararlılık analizinde sıkça kullanılır. Doğrusal Ters Sarkaç Modeli tabanlı referans oluşturma yönteminin geliştirilmiş şekli, tasarım sürecinde SMN ölçütü uygulanarak elde edilir [12,13]. Bu yaklaşımda, robot ağırlık merkezi Doğrusal Ters Sarkaç yörüngesini takip ederken, kararlılık için SMN yürüyüş sırasında destek ayağı tabanının ortasında sabit tutulur.

DTSM ve sabitlenmiş tek ayak destek SMN referans konumları ile referans oluşturulması başarıyla kullanılmasına rağmen, bu tür referans oluşturma yöntemi bir noktada doğallıktan yoksundur. İncelemeler, insan yürüyüşünde Sıfır Moment Noktası'nın destek ayağının altında sabitlenmiş olmadığını işaret etmektedir. Aksine, ayak tabanında topuktan parmaklara doğru hareketi söz konusudur [14-16].

[16] doğrusal ters sarkaç yaklaşımına dayalı değişken SMN ile dinamik olarak kararlı hareket oluşturulması fikrini önermektedir. Bu çalışmada, SMN'nin, tek ayak destek evresinde destek ayak topuğundan ucuna birinci derece fonksiyonları takip edeceği belirtilmiştir.

[17] ve [18] benzer bir yaklaşımla, Doğrusal Ters Sarkaç Modeli'ne ve hareketli destek ayak SMN referanslarına dayalı olan bir referans oluşturma tekniği önermiştir.

[19]'da olduğu gibi, [17] ve [18]'de de, Doğrusal Ters Sarkaç dinamik denklemlerini çözmek ve SMN referanslarını sağlayacak bir robot ağırlık merkezi (RAM, Center of Mass) elde etmek için Fourier dizisi yaklaşımı kullanılmıştır. İki ayak destek evresinde ise Sıfır Moment Noktası referansı yumuşatma teknikleri kullanılmıştır. Salınan ayak için yumuşak geçişli yörünge hesaplanması, doğrusal olarak hareket eden tek ayak destek SMN referansları ile yürüyüş için referans oluşturulması görevini tamamlar. Ancak, [17] ve [18]'deki referans oluşturma algoritması robot ayaklarını zemine paralel olarak tutmaktadır. [15]'deki insan yürüyüşü için yapılan deneyler ise, yürüyüş sırasında ayakların yere paralel olarak tutulduğu zaman destek ayağının altındaki SMN hareketinin düz bir çizgiden daha çok bir yay yapısında olduğunu işaret etmektedir. Bu nedenle, zemine paralel olacak şekilde doğal bir yürüyüş elde etmek için, düz çizgi yapısında ileri hareketli tek ayak destek SMN referans yörüngesinin düzenlenmesi gerekmektedir. [20], SMN referans yörüngesinin yürüyüş doğrultusuna dik doğrultuda da düzenlenmesini önermektedir. Bu teknik, bildirimizde [20]'de sunulduğundan daha uzun adımlı bir yürüyüşün gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır. Önerilen referans oluşturma tekniği, yay şeklindeki tek ayak destek SMN referansları kullanılarak 12 serbestlik derecesine sahip iki ayaklı bir robot modelinin 3-boyutlu tam dinamik benzetim ve

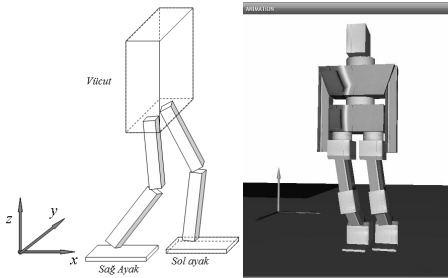
canlandırma ortamında test edilmiştir. Karşılaştırma amaçlı olarak, benzetimler sabitlenmiş ve doğrusal tek ayak destek SMN referansları ile de gerçekleştirilmiştir. Bağımsız eklem konumu kontrolörü, RAM referansına ters kinematik uygulanarak elde edilen konum referanslarına uygulanmıştır. Benzetim sonuçları, yeni referans oluşturma yöntemi ile yürüyüş performansının, sabit ve doğrusal SMN referans yörüngeli yöntemlere göre daha üstün olduğunu göstermektedir.

Verilen SMN yörüngeleri için RAM elde etmekte kullanılan Fourier dizisi yaklaşımı 2. Bölüm’de incelenmiştir. 3. Bölüm, eklem kontrol algoritmasını özetlemektedir. 4. Bölüm, benzetim sonuçlarına ayrılmıştır. 5. Bölüm’de sonuçlar sunulmaktadır.

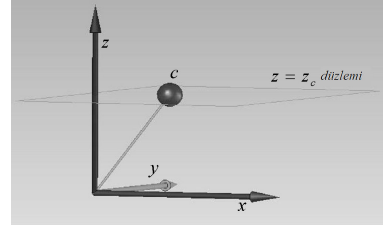
2. Doğal SMN Yörüngeleri ile Referans Sentezi

Bu bölüm, ilk olarak DTSM’yi ve SMN ile RAM’ın konumu arasındaki ilişkiyi açıklayacaktır. Bu konuları, SMN referanslarının nasıl olmaları gerektiği ve verilen SMN referanslarından RAM referansı elde etmek için kullanılan bir yöntem takip edecektir.

Bu konudaki tek kabul, robot bacak ağırlıklarının robot gövde ağırlığından çok küçük olduğu kabulüdür. Yine de, bu yöntem yürüyüşün göreceli kararlılığının bozulması karşılığında ağır bacaklar için de uygulanabilir özelliktedir. Bu bildiride, SMN ve RAM referans oluşturulması için kinematik ayarlamalarda bir sınırlama olmamasına rağmen, açıklanan kontrol yapısı için bir sınırlama bulunmaktadır: Robot bacaklarının en az altı serbestlik derecesine sahip olması gerekmektedir. Şekil 1’deki çizim, aşağıda sunulan referans oluşturma ve kontrol algoritmasının uygulanacağı bir robot yapısını göstermektedir. Şekil 1’de gösterilen robot yapısı doğrusal olmayan dinamikli, çok sayıda serbestlik derecesine sahip ve eklemler arası dinamik etkileşimlidir. Atalet matrisi gibi dinamik parametrelerin kapalı yapı çözümleri çok zor elde edilmektedir. Bu denklemlerin çözümleri için genellikle Newton-Euler tekrarlı yöntemleri kullanılmaktadır [21-22]. Tam dinamik model elde etmek benzetim, referans sentezi ve kontrol yöntemlerinin benzetimler yolu ile denenmeleri için yararlı olmakla birlikte, yürüyüş kontrolü için gerekli olan temelleri geliştirmeye yardımcı olacak geçerli bir model olmak için fazlasıyla karmaşıktır. Kontrolör sentezi için daha basit modeller daha uygundur. Ters Sarkaç Modeli basit bir modeldir. Bu modelde robot gövdesi, RAM’da noktasal bir yük olarak kabul edilir. Bu noktasal yük, zeminde bulunan sabit (kaymayan) bir temas noktasına, idealleştirilmiş destek bacağı temsil eden ağırlıksız bir çubukla bağlanmıştır.



Şekil 1: İki ayaklı bir robotun kinematik düzenlemesi tek ayak destek evrelerinde ters sarkaç yapısına benzemektedir. Bölüm 4’te sunulan testler için kullanılan canlandırma programından alınmış bir ekran görüntüsü sağda yer almaktadır.



Şekil 2: Doğrusal Ters Sarkaç Modeli.

Salınan ayak da ağırlıksız kabul edilir. Şekil 2’de, bir ters sarkaç görülmektedir. Bu şekilde, $c = (c_x \ c_y \ c_z)^T$ bu noktasal yükün koordinatlarına karşılık gelmektedir. Ters sarkaç modelinin hareket denklemleri doğrusal değildir ve birbirleriyle bağımlıdır. RAM’ın belirli bir yükseklikte sabitlenmesi kabulü, x ve y doğrultularında bağımsız denklemleri olan doğrusal bir sistem ortaya çıkarmaktadır. Bu model DTSM olarak adlandırılır ve referans sentezi algoritmaları tasarlamak için yeterince yalındır [11]. DTSM ile elde edilmiş, RAM hareket denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\ddot{c}_x = \frac{g}{z_c} x + \frac{1}{mz_c} u_p \quad (1)$$

$$\ddot{c}_y = \frac{g}{z_c} y - \frac{1}{mz_c} u_r \quad (2)$$

Bu denklemden, m gövde ağırlığı (noktasal yük), z_c bu noktasal yükün bağlı olduğu düzlemin yerden yüksekliği, g yerçekimi sabitidir (9.806 m/s^2). u_p ve u_r , sırasıyla y ve x yönleri etrafındaki kontrol momentleridir. Bu momentler, doğrusal ters sarkacın destek noktasına (Şekil 2’deki merkez) etki etmektedir.

Bir referans yörüngesinden en çok istenen özellik yürüyüşün kararlı olmasıdır. İki ayaklı robot çalışmalarında, yoğun bir şekilde kabul gören kararlılık ölçütü SMN’nin konumuna bağlıdır [7]. Şekil 2’deki düzenlemeye göre, sıfır moment noktası $x - y$ düzlemi üzerinde hiçbir yatay moment bileşeni olmayan bir nokta olarak tanımlanmıştır. Şekil 2’de kütsel yük için SMN koordinatları olan p_x ve p_y ifadeleri aşağıdaki gibidir [19].

$$p_x = c_x - \frac{z_c}{g} \ddot{c}_x \quad (3)$$

$$p_y = c_y - \frac{z_c}{g} \ddot{c}_y \quad (4)$$

(3) ve (4) SMN ve RAM’ı birbiri ile ilişkilendiren denklemlerdir. Bu sayede, referans oluşturmak için kararlı bir SMN yörüngesi kolayca tanımlanabilir. Robot kararlılığı için gerekli koşul, SMN’nin her zaman yere basan ayak veya ayakların tanımladığı destek poligonunun içinde bulunmasıdır. Bu koşulu sağlamak için, genellikle, SMN’nin destek ayak tabanının tam ortasında olması planlanır. [19]’da referans SMN yörüngesi bu düşünce kullanılarak Şekil 4’teki gibi elde edilmiştir. Bu şekilde, A ayak merkezlerinin y yönündeki uzaklığı, B adım uzunluğu ve T de yürüyüş periyodunun yarısıdır. Şekil 4’ten gözlemlenebileceği üzere, ilk olarak adım konumları belirlenmiştir. Eğer yarım safha süresi olan T verilmişse, merdiven benzeri p_x ve kare-dalga yapısındaki p_y eğrileri de tamamıyla tanımlanmış olur.

Ancak, [19]'da yürüyüşün doğallığı üzerinde durulmamıştır. Bu çalışmadaki referans SMN eğrilerinin başlama noktası, [14] ve [15]'teki incelemelerin insana ait SMN'nin ayak tabanı altında ileri doğru hareket ettiğini göstermesine rağmen, ayak tabanının altındaki sabit bir nokta olarak seçilmiştir (Şekil 5). Dahası Şekil 4'teki eğriler, sol destek evresinden sağ destek evresine geçişlerin, çift destek evresi olmaksızın anlık olarak planlandığını göstermektedir.

[17]'de, Şekil 6-b'de gösterilen p_x referans eğrisi kullanılmıştır. Bu şekildeki referans eğrisi hareketli bir SMN elde etmek için kullanılmıştır. Sabit bir SMN kullanımındansa, bu tür bir SMN kullanımı insan SMN'sine benzediği için daha doğaldır. Şekildeki b parametresi ayak tabanının altındaki SMN hareketinin sınırlarını belirlemektedir. Ayak merkezine göre simetrik bir yörünge kabul edilmiştir. Buradaki b değişkeni ayak uzunluğunun yarısı olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte bu kabul bir zorunluluk değildir. SMN, topukla parmak ucunu birbirine bağlayan bir çizgi üzerinde, çizginin uzunluğunu tamamen kapsamadan hareket edebilir.

Tek ayak destek evresi ile çift ayak evresi arasında yumuşak geçiş sağlayan ek bir yumuşatma yöntemi Bölüm 4'te anlatılacaktır. Bu yöntem, Şekil 4.c ve 6.c'de gösterilen kare dalga şekilli eğrileri yumuşatarak yamuk şeklindeki y -yönü SMN referanslarını oluşturmaktadır.

Şekil 5'deki SMN eğrisinin şekli, ilk önce topuğun yere temasıyla başlayıp son olarak parmakların yerden kalkmasıyla oluşan bir insan yürüyüşüne aittir. Ayakların yere paralel durumda olduğu insan yürüyüşü sırasında, tek destek ayak SMN yörüngeleri Şekil 7'de gösterildiği gibi yay şekline sahiptir [15]. Ayağı yere paralel tutan düzenlemeler, salman ayak yörüngesi oluşturulmasını basitleştirmekte ve bu sebeple hareket sentezinde sıkça kullanılmaktadır. Dahası, Şekil 4.c ve 6.c'deki sabitlenmiş y yönü SMN referansları (yukarıda bahsedilen kare dalga şeklini yamuk şekle getiren yumuşatma yönteminden sonra bile) SMN hız referansında devamsızlık göstermektedir. Bu devamsızlık, SMN referansını izlemekte sapmalara neden olabilmektedir. Bu nedenlerden ötürü, bu bildiride Şekil 8.c'de gösterilen y yönü SMN referans yörüngesi sunulmaktadır. Bu, safha süresi $2T$ ve genliği $A+w$ olan bir sinüs eğrisidir. w , referans SMN'nin tek destek ayağı altında kalabilmesi için ayak genişliğinin yarısından daha küçük seçilen bir sabittir.

RAM konumu referansları olan $c_x^{ref}(t)$ ve $c_y^{ref}(t)$ ($c_z^{ref}(t) = z_c$, DTSM'de sabittir) için çözüm elde etmede kullanılan (3) ve (4) numaralı denklemler, daha önce tanımlanan eğrilerle ve $p_x^{ref}(t)$ ve $p_y^{ref}(t)$ 'nin matematiksel ifadeleri ile oluşturulmuştur. Gerekli olan RAM referans yörüngeleri bulunduktan sonra, ters kinematik yoluyla ağırlık merkezi konumundan elde edilen eklem referanslarını izlemek için eklem uzayında konum kontrolü uygulanmaktadır. Şekil 4, 6 ve 8'de gösterilen SMN referanslarını sağlayan RAM referanslarını bulabilmek için, Fourier dizisi yakınsaması kullanılmıştır. [19]'da, Şekil 4'te gösterilen SMN referanslarından, RAM yörüngeleri elde etmek için bu yöntem kullanılmıştır. [17] ve [18] de, [19]'daki bu yöntemi, Şekil 6'daki SMN eğrileri için kullanmıştır. Şekil 6 ve 8'de gösterilen x yönü SMN referans eğrileri özdeştir ve x yönü RAM referansı için kullanılan Fourier dizisi [18]'de gösterilenle aynıdır:

$$c_x^{ref} = \frac{B}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) + \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \beta_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right). \quad (5)$$

(5)'teki katsayılar aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [18].

$$\alpha_k = 0, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (6)$$

$$\beta_k = \frac{(B - 2b)T^2 \omega_n^2}{k\pi(T^2 \omega_n^2 + k^2 \pi^2)}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Bu sonsuz toplam, N terimli bir sonlu toplam ile yakınsanmıştır. (Bölüm 4'teki benzetim sonuçlarında $N = 24$ kullanılmıştır). Şekil 8'deki SMN y yönü referansı için kullanılan ifade aşağıdaki gibidir:

$$p_y^{ref} = (A + w) \sin\left(\frac{2\pi t}{2T}\right). \quad (7)$$

(7)'deki fonksiyon $2T$ periyoduna sahip periyodik bir denklemdir. $c_y^{ref}(t)$ 'in de aynı periyoda sahip periyodik bir fonksiyon olduğunu varsaymak doğaldır. Böylece, bu fonksiyon da bir Fourier dizisi ile yakınsanabilir:

$$c_y^{ref}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi k t}{2T}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k t}{2T}\right). \quad (8)$$

(4) ve (8) kullanılarak, p_y^{ref} aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$p_y^{ref}(t) = c_y^{ref} - \frac{z_c}{g} \ddot{c}_y^{ref} \quad (9)$$

$$= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \left(1 + \frac{\pi^2 k^2}{\omega_n^2 T^2}\right) \cos\left(\frac{2\pi k t}{2T}\right) + b_k \left(1 + \frac{\pi^2 k^2}{\omega_n^2 T^2}\right) \sin\left(\frac{2\pi k t}{2T}\right)$$

Bu ifadenin, $p_y^{ref}(t)$ için Fourier dizisi yapısında olduğunu ve $p_y^{ref}(t)$ 'nin tekil bir fonksiyon olduğunu göz önünde bulundurursak a_0 ve $a_k(1 + (\pi^2 k^2)/(\omega_n^2 T^2))$ katsayılarının ($k = 1, 2, 3, \dots$ için) sıfır olduğu sonucuna varabiliriz. $b_k(1 + (\pi^2 k^2)/(\omega_n^2 T^2))$ katsayısı da p_y^{ref} için kullanılan Fourier dizisi yakınsaması kullanılarak elde edilebilir:

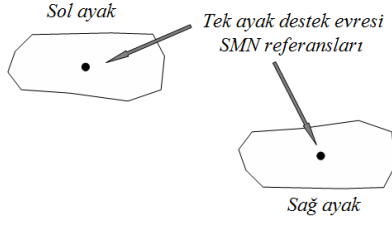
$$p_y^{ref} = (A + w) \sin\left(\frac{2\pi t}{2T}\right) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \left(1 + \frac{\pi^2 k^2}{\omega_n^2 T^2}\right) \sin\left(\frac{2\pi k t}{2T}\right) \quad (10)$$

$$\Rightarrow b_1 = \frac{(A + w)\omega_n^2 T^2}{\omega_n^2 T^2 + \pi^2}, \quad b_k = 0 \quad \forall k > 1. \quad (11)$$

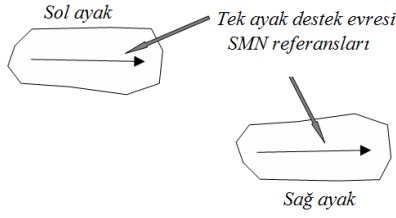
Bu çözümler ile RAM referans sentezi bölümü sonlanmaktadır. Önümüzdeki bölüm salınan ayak için referans oluşturulmasından ve hareket kontrolünden bahsetmektedir.

3. Kontrol Yöntemi

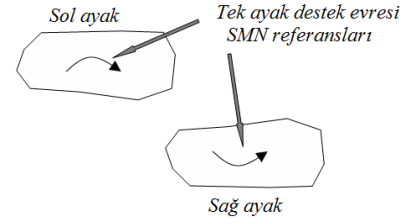
Salınan ayak konum referansları SMN ve RAM referanslarından elde edilmiştir (Şekil 9). Kontrol algoritması bağımsız eklem PID konum kontrolüne dayalıdır. Eklem konumu referansları ters kinematik yoluyla RAM'dan elde edilmiştir ve salınan ayak referansları dünya koordinatlarında tanımlanmıştır (Şekil 10). Ters kinematik işleminde kullanılan ayak yönelim referansları ayakların robot gövdesine paralel olduğu düşünülerek hesaplanmıştır ve bu referanslar yürüme boyunca sabittir. PID kontrolörü katsayıları deneme yanılma yoluyla bulunmuştur. Böylece, (önceki bölümde elde edilenler gibi) kararlı referans yörüngeleri kullanıldığında yürüme hareketi elde edilebilmektedir.



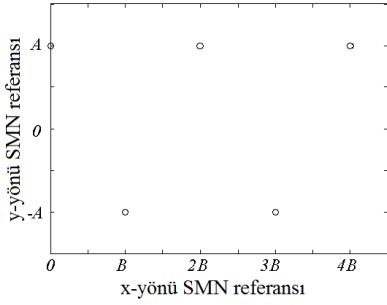
Şekil 3: Doğal SMN yürüncüğü.



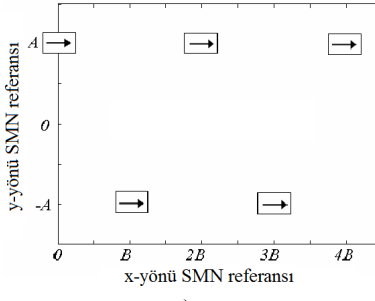
Şekil 5: Doğal SMN yürüncüğü.



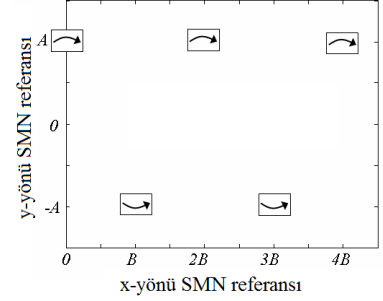
Şekil 7: Doğal SMN yürüncüğü.



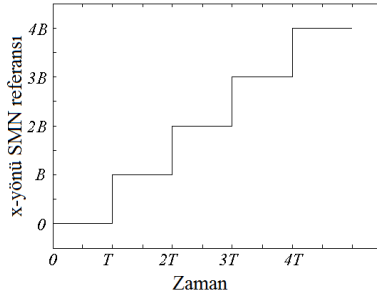
a)



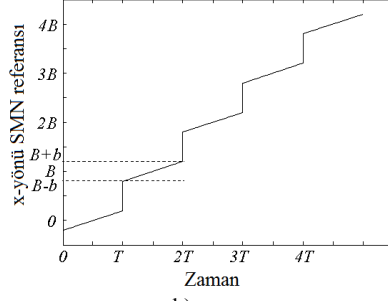
a)



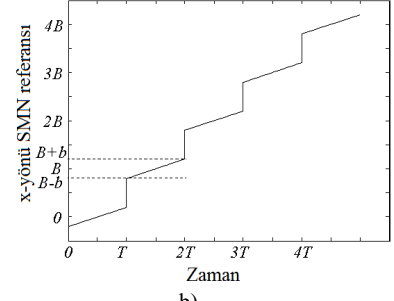
a)



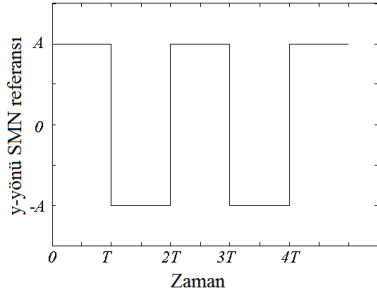
b)



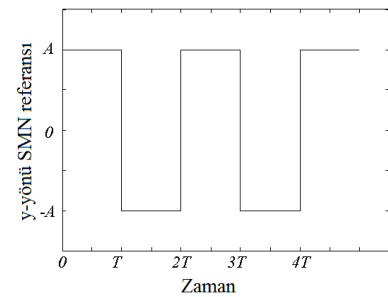
b)



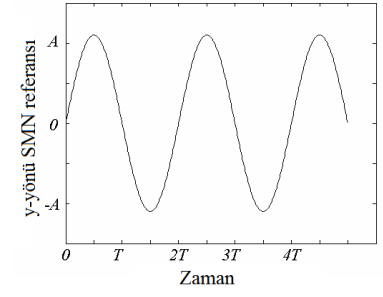
b)



c)



c)



c)

Şekil 4: Sabit SMN referansı.

a) $x-y$ düzlemindeki $p_y^{ref} - p_x^{ref}$ ilişkisi. SMN referansı ve adım konumları çakışmaktadır. b) p_x^{ref} , doğal x-ekseni SMN referansı. c) p_y^{ref} , y-yönü SMN referansı.

Şekil 6: Hareketli SMN referansı.

a) $x-y$ düzlemindeki $p_y^{ref} - p_x^{ref}$ ilişkisi. b) p_x^{ref} , doğal x-ekseni SMN referansı. Şekil 4'tekinden farklıdır. c) p_y^{ref} , y-yönü SMN referansı.

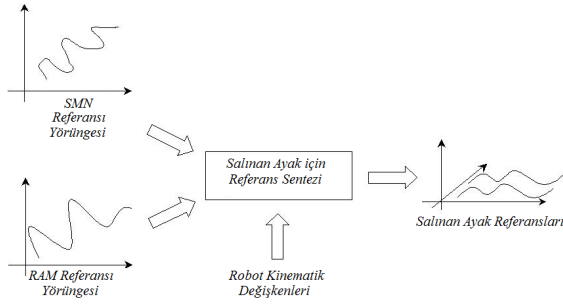
Şekil 8: Yay şekilli hareketli SMN referansı.

a) $x-y$ düzlemindeki $p_y^{ref} - p_x^{ref}$ ilişkisi. b) p_x^{ref} , doğal x-ekseni SMN referansı. c) p_y^{ref} , sinüs eğrisi şeklinde SMN referansı. Şekil 6'daki y-yönü referansından farklıdır.

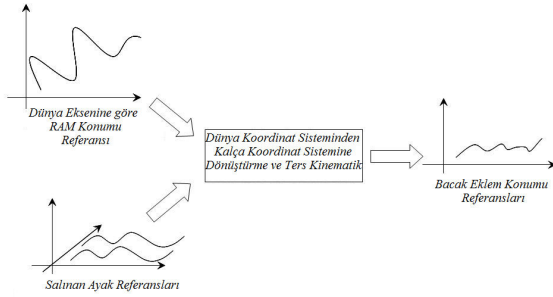
4. Benzetim Sonuçları

Bu bildiriye kullanılan iki ayaklı robot modeli altışar serbestlik derecesine sahip iki bacadan ve bu bacakları birleştiren bir gövdeden oluşmaktadır (Şekil 1). Üç eklem

kalçada konumlandırılmıştır. İki eklem ayak bileğinde ve bir eklem de dizdedir. Eklem arasındaki uzunluklar ve ağırlıklar Tablo 1'de verilmiştir. Benzetim çalışmaları, tanımlanan bu robot modeli ile Bölüm 2'deki referanslar (Şekil 4, 6 ve 8) ve Bölüm 3'te anlatılan kontrol sistemi kullanılarak yürütülmüştür.



Şekil 9: SMN ve RAM referanslarından elde edilen salınan ayak referansları.



Şekil 10: Ters kinematikle elde edilmiş bacak eklem konumu referansları.

Tablo 1: Robot Bağlarının Ağırlık ve Boyutları

Bağ	Ölçüler (LxWxH) [m]					Ağırlık [kg]
Gövde	0.2	x	0.4	x	0.5	50
Üst bacak	0.27	x	0.1	x	0.1	12
Alt bacak	0.22	x	0.05	x	0.1	0.5
Ayak	0.25	x	0.12	x	0.1	5.5

Tablo 2: Benzetim Özellikleri

Parametre	Değer
Adım yüksekliği	0.02 m
Adım süresi	3 s
Ayaklar arası y-yönü uzaklığı	0.16 m
Ayaklar arası y-yönü SMN referansı uzaklığı	0.2 m
Adım uzunluğu	0.22 m
Destek ayağı altındaki SMN hareketi genliği	0.08 m
Gövde yüksekliği	0.50 m

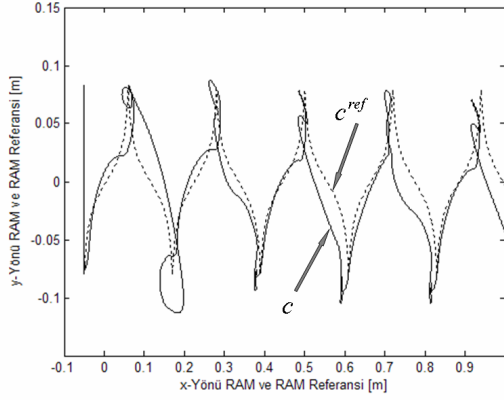
Çift destek evresi [17] ve [18]'de de uygulanan SMN referansı yumuşatma yöntemi ile elde edilmiştir. Fourier dizilerinin düzenli olmayan yakınsaması olarak tarif edilebilen Gibbs Fenomeni'ni [24] çözmek için kullanılan Lanczos Sigma Katsayıları [23], bu yumuşatma için uygulanmıştır.

Canlandırma penceresinden bir görüntü Şekil 1'de gösterilmektedir. Tam dinamikli 3-boyutlu benzetim sistemi yapısı [21]'deki ile benzerdir. Zemine yapılan temas uyumlu ceza tabanlı bir yöntemle modellenmiştir. Benzetim algoritması ve temas modellenmesinin ayrıntıları [22]'de bulunabilir. Referans sentezinde kullanılan parametreler Tablo 2'de sunulmuştur.

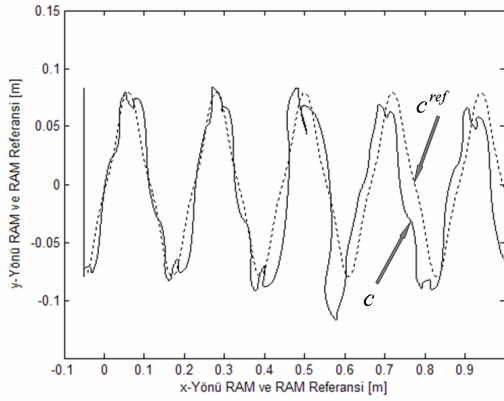
Şekil 11, (Şekil 4'teki gibi) sabit tek ayak destek SMN referansları ile gerçekleştirilmiş 11 adımlık bir yürüyüş için

RAM konumunu ve RAM referans konumunun zemin düzlemi üzerine izdüşümünü göstermektedir. Bu şekilde, RAM referansının sadece kaba bir şekilde takip edilebileceği gözlemlenebilir. Tek ayak destek evrelerinde referans eğrilerinden sapmanın daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. İleri doğru hareketli tek ayak destek SMN referansları (Şekil 6'daki gibi) ile yapılmış bir yürüyüş için RAM konumu ve RAM referans konumunun zemin düzlemi üzerine izdüşümü ise Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu referanslar ile kararlı bir yürüyüş elde edilmiştir. RAM yörüngesi takibi sonuçlarının, sabit SMN referansı kullanılmış benzetim sonuçlarıyla karşılaştırıldığında daha iyi olduğu görülmektedir. Şekil 13'te gösterilen RAM ve RAM referansı konumları ise yay şeklindeki SMN tek ayak destek referansı ile (Şekil 8'deki gibi) oluşturulmuş bir yürüyüşe aittir. Bahsi geçen son şekilde, RAM referansının daha önceki iki yöneme göre çok daha iyi takip edildiği gözlemlenebilir. Canlandırmalardan elde ettiğimiz gözlemlere göre sabit SMN referans benzetimlerinde, ileri hareketli ve yay şekilli SMN referans benzetimleriyle karşılaştırıldığında, robot gövdesi her adımda daha büyük açılarla eğilmiştir. Bu duruma, sabitlenmiş SMN referans eğrisinden elde edilmiş RAM referansının (Şekil 11) daha yüksek periyodik ivmelenme ve geri yönde ivmelenmeleri neden olmaktadır. İleri hareketli SMN kullanımını gövde yönelimindeki salınımları gözle görünür ölçüde azaltmaktadır. Yay şekilli referansların uygulanması, salınımları neredeyse yok etmesi nedeniyle yürüyüşü daha da kaliteli hale getirmektedir. Sabitlenmiş SMN, ileri hareketli SMN ve yay şekilli SMN referansları ile yapılan benzetimlerdeki vücut yuvarlanma, yunuslama ve sapma açıları, sırasıyla Şekil 14, 15 ve 16'da gösterilmektedir. Bahsedilen şekiller de, yürüyüş canlandırmamızdan elde ettiğimiz gözlemlere paralel olarak, yay şekilli SMN referansları kullanıldığında elde edilen yürüyüşün kalitesindeki gelişmeyi belirtmektedir. Özellikle üzerinde durulması gereken konu, ileri hareketli ve yay şekilli SMN referanslarıyla gerçekleştirilen yürüyüşlerdeki yuvarlanma (dünya düzlemi x yönü etrafındaki dönme açısı) açılarının karşılaştırılmasıdır. Bunun nedeni ise, yay şekilli SMN referansının, bizim ana hedefimiz olan y yönünde daha iyi bir kontrol performansı elde etmek için yine bu yöndeki SMN referansı bileşeninin yumuşatılması ile oluşturulmasıdır. Şekil 15 ve 16, yay şekilli referanslar kullanıldığında yuvarlanma açısı doruk değerinin çok büyük oranda azaldığını göstermektedir. Bu sonuç da, önerilen referans elde etme yöntemini desteklemektedir.

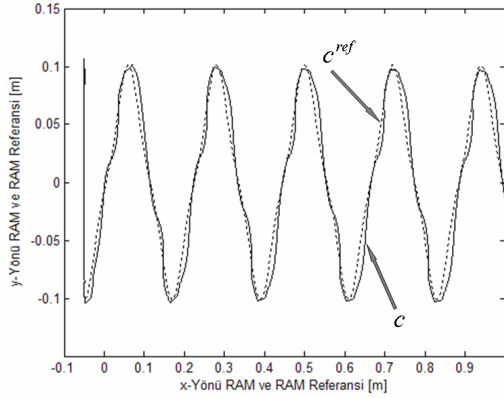
Kontrolör performansı üzerine bir açıklama olarak, farklı referans elde etme yöntemlerinin yürüyüş kalitesi üzerine yaptıkları etkileri karşılaştırmak için basit bir kontrolör kullanıldığı belirtilmelidir. İlgimizi tekrar, bütün yöntemler arasında yay şekilli SMN referansları ile en iyi sonucu elde ettiğimiz Şekil 13'e çevirirsek, hala arzu edilen RAM yörüngelerinden sapmalar olduğunu gözlemleyebiliriz. Bu sonuç da, robot gövdesi üzerine yoğunlaşan ve bütün robotun RAM'ı üzerinde salınan ayağın etkilerini ihmal eden DTSM'nin, bacaklar yeterince hafif olmadığında bazı sorunlar ortaya çıkarabileceğine işaret etmektedir. Bu bildiride kullanılan modelde bacaklar 18 kg ağırlığındadır. Bu ağırlık, 50 kg olan vücut ağırlığından çok daha az olsa da, özellikle tek ayak destek evrelerinde RAM eğrisini belirgin bir şekilde etkilemektedir. Bunu engellemek için, salınan bacak ağırlığından kaynaklanan etkileri telafi edecek ve ağır bacaklı robotların yürüyüş performansını artıracak yöntemler kullanılmalıdır.



Şekil 11: Sabit SMN referansları ile x - y düzlemi üzerine RAM konumu ve RAM referansı konumu izdüşümleri.



Şekil 12: İleri hareketli SMN referansları ile x - y düzlemi üzerine RAM konumu ve RAM referansı konumu izdüşümleri.

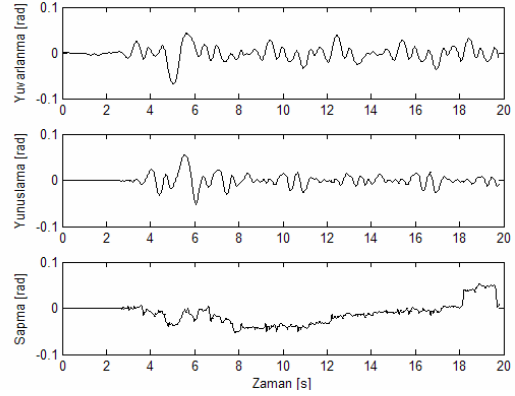


Şekil 13: Yay şekilli hareket eden SMN referansı ile x - y düzlemi üzerine RAM konumu ve RAM referansı konumu izdüşümleri.

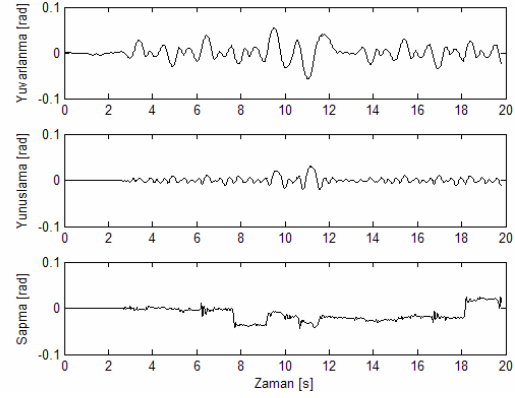
5. Sonuçlar

Bu bildiriye, iki ayaklı robotlar için yörünge oluşturma, koordinasyon ve kontrol çalışmalarından bahsedilmiştir. Yürüyüş performansını geliştirmek amacı ile yay şekilli tek ayak destek SMN referans yörüngeleri kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında bağımsız eklem konum kontrol yapısı kullanılmıştır. Diğer türdeki SMN referansları ile de yürüyüş performansları test edilmiştir. Benzetim sonuçları,

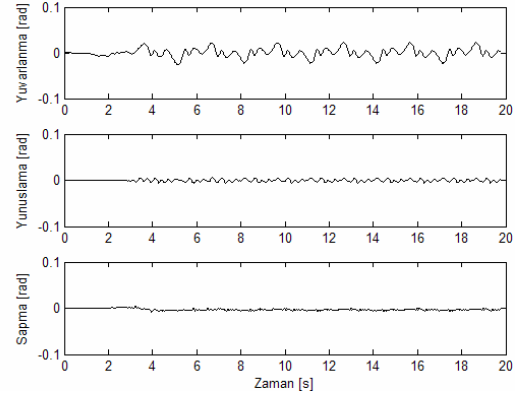
insan SMN'sine benzeyen SMN referansları kullanarak daha iyi performansa sahip bir yürüyüşe ulaşabileceği görüşünü desteklemektedir.



Şekil 14: Sabit SMN referansları ile yürüyüş sırasındaki vücut yuvarlanma, yunuslama ve sapma açıları.



Şekil 15: İleri hareketli SMN referansları ile yürüyüş sırasındaki vücut yuvarlanma, yunuslama ve sapma açıları.



Şekil 16: Yay şekilli hareket eden SMN referansları ile yürüyüş sırasındaki vücut yuvarlanma, yunuslama ve sapma açıları.

6. Teşekkür

Bu çalışma 106E040 numaralı proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

7. 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*, Lausanne, Switzerland, October 2002, 2478-2483
- [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, Sendai, Japan, October 2004, 2514-2519
- [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, New Orleans, LA, April 2004, 4222-4227
- [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*, vol.3, October 2002, 2431-2436
- [5] www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato02.html
- [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*, vol.2, May 1998, 1321-1326
- [7] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic, *Biped Locomotion: Dynamics, Stability and Application*, Springer-Verlag, 1990.
- [8] M. Raibert, *Legged Robots that Balance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [9] S. Kajita, and K. Tani, Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain -Theory and basic experiment- *ICAR, Fifth International Conference on Advanced Robotics*, vol.1, June 1991, 741-746
- [10] 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, May 2002, 31-37
- [11] 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 Oct.-3 Nov. 2001, 239 - 246
- [12] 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*, vol.2, Taipei, Taiwan, September 2003, 1620 - 1626
- [13] 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*, vol.2, Washington DC, May 2002, 1404 - 1409
- [14] A. Dasgupta, and Y. Nakamura, "Making feasible walking motion of humanoid robots from human motion capture data" *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, May 1999.
- [15] K. Erbatur, A. Okazaki, K. Obiya, T. Takahashi and A. Kawamura, "A study on the zero moment point measurement for biped walking robots", *Proc. 7th International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 431-436, Maribor, Slovenia, 2002
- [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, China Aug 2004.
- [17] O. Kurt and K. Erbatur, "Biped robot reference generation with natural ZMP trajectories," 9th IEEE International Conference on Advanced Motion Control, Istanbul, Turkey, March 2006
- [18] O. Kurt and K. Erbatur, "Humanoid walking robot control with natural ZMP references" *IECON 2006 - 33rd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 2006 pp. 4100-4106, Nov., 2006.
- [19] 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, Sendai, Japan, June 2004.
- [20] Erbatur, K. and U. Seven, "Humanoid Gait Synthesis With Moving Single Support Zmp Trajecories," Proc. Int. IASTED Conf. on Robotics and Applications, Aug. 2007, Würzburg, Germany.
- [21] Y. Fujimoto and A. Kawamura, "Simulation of an autonomous biped walking robot including environmental force Interaction", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 33-42, June 1998.
- [22] 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
- [23] R. W. Hamming, "Lanczos' σ factors" and "The σ factors in the general case." §32.6 and 32.7 in *Numerical Methods for Scientists and Engineers*, 2nd ed. New York: Dover, pp. 534-536, 1986.
- [24] J. Foster and F. B. Richards, "The Gibbs phenomenon for piecewise-linear approximation." *Amer. Math. Monthly* **98**, 47-49, 1991.