

İnsansı Robot SURALP için Sıfır Moment Noktası Tabanlı Referans Sentezi ile Eğimi Değişen Yüzeylerde Yürüme Kontrolü

Utku Seven, Metin Yılmaz, Evrim Taşkıran, Özer Koca, Kemalettin Erbatur

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

utkuseven@su.sabanciuniv.edu metinyilmaz@su.sabanciuniv.edu

evrimt@su.sabanciuniv.edu ozerk@su.sabanciuniv.edu erbatur@sabanciuniv.edu

Özetçe

Bir robotun insan gibi iki bacak üzerinde yürümesi ona insanların yaşama ve çalışma ortamlarında karşılaşılan engellerden sakınabilme özelliği sağlayacaktır. İnsan şeklindeki bir robotun insanlar tarafından sosyal bir varlık olarak algılanmasının ve insanlarla işbirliğinde bulunmasının diğer şekildeki robotlara göre daha kolay olacağı düşünülmektedir. Bu görüşler özellikle son 15 yılda insansı robot araştırmalarına ivme kazanmıştır. Bununla birlikte bir insansı robotun çok sayıdaki serbestlik derecesi ve doğrusal olmayan girift dinamiği yürüme kontrolü açısından ciddi zorluklar teşkil etmektedir. Eğimi değişen yüzeyler bu kontrol problemini daha da güçleştirmektedir.

İki bacaklı robot hareket kontrolünde kararlı bir yürüme referansının sentezi en az geri beslemeli denge yöntemleri kadar önem taşımaktadır. Doğrusal Ters Sarkaç Modeli (DTSM) ve Sıfır Moment Noktası (SMN) kararlılık kriterine dayanan referans sentezi yöntemlerine literatürde rastlanmaktadır. Sabancı Üniversitesi İnsansı Robotu SURALP için de DTSM ve SMN tabanlı bir referans sentezi yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntemle düz zemin üzerinde elde edilen yürüme deney sonuçları yazarların daha önceki yayınlarında sunulmuştur. Bu bildiri daha önce tasarlanan referans sentez yöntemini özetlemekte ve eğimli yüzeyler üzerinde yürümeye yönelik bir kontrol yöntemini sunmaktadır. SURALP ile daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak eğimi değişen yüzeyler üzerinde yürüme testleri yapılmış, referans sentezi ve kontrol yöntemlerinin bu yüzeyler üzerinde yürümedeki başarımı deneysel olarak incelenmiştir.

1. Giriş

İnsan yaşama ve çalışma ortamında insana yardımcı rol alması düşünülen bir robot için iki bacaklı insansı yapının belirgin avantajları bulunmaktadır. İnsansı robotların bacaklarının hareket yeteneği ile, insan ortamındaki tipik engelleri aşabilmeleri ve insanlar için tasarlanmış ulaşım araçlarında yolculuk edebilmeleri mümkündür.

Bununla birlikte, iki bacaklı robot yapısının da dezavantajları vardır. İki bacak üzerinde hareket etmek ve ilerlemek zorlu bir görevdir. Bu zorluk temel olarak insansı robotun karşılıklı etkileşim altında kontrol edilmesi gereken çok sayıdaki serbestlik derecesi ve doğrusal olmayan girift dinamiğinden kaynaklanmaktadır [1, 2]. Son 25 yıl içerisinde

insansı robot yürüyüşü üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bir dizi başarılı proje ortaya çıkmıştır [3-10].

Bu alandaki en zorlu problemlerden biri, sadece düz zemin üzerinde değil, düzgün olmayan yüzeylerde de yürüyüşün gürbüz dengesini sağlamaktır. Eğimli bir yürüme yüzeyi, insan günlük hayatında tipik olarak karşılaşılan bir zemin koşuludur. Böyle zeminler ile çoğunlukla dış mekanlarda karşılaşılsa da, ev ve ofis gibi iç mekanlarda da zeminler tam olarak düz değildir. Eğimli veya düzgün olmayan yüzeyler üzerinde iki bacaklı yürüme konusu üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmış ve sürmektedir. [11-14].

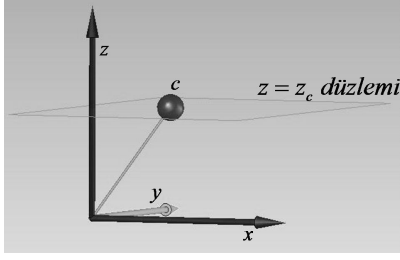
Sabancı Üniversitesi'nde tasarlanan ve imal edilen insan boyutlarındaki 29 serbestlik dereceli insansı robot SURALP (Sabancı Üniversitesi Robot Araştırmaları Laboratuvar Platformu) ile de eğimi değişen yüzeyler üzerinde yürüme çalışmaları yapılmıştır ve yayınlanmıştır [15]. [15]'deki çalışmada ayak kartezyen uzay referans yörüngeleri için sinüzoidal ve doğrusal kısımlardan oluşan fonksiyonlar kullanılmış, bu fonksiyonların parametreleri deneysel olarak ayarlanmıştır.

Bu bildiri de SURALP ile gerçekleştirilen bir eğimi değişen yüzeyler üzerinde yürüme çalışması sunulmaktadır. [15]'da kullanılan farklı, DTSM ve SMN kararlılık kriterine dayanan bir referans sentez yöntemi [16-18] uygulanmakta, eğim üzerinde yürümeye yönelik eğitimölçer geribeslemeli yeni bir kontrol yöntemi önerilmekte ve bu yöntemlerin değişken eğimler üzerinde sağladığı başarımler incelenmektedir.

Bildirinin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2, SMN tabanlı referans sentezi yöntemini özetlenmektedir. Eğim üzerinde yürümede kullanılan kontrol yöntemi Bölüm 3'te açıklanmaktadır. Bölüm 4 test platformu SURALP'ı tanıtmakta vey yürüme deney sonuçlarını sunmaktadır. Sonuçlar ve planlanan çalışmalar üzerine bir tartışma Bölüm 5'i oluşturmaktadır.

2. SMN Tabanlı Referans Sentezi

İki bacak üzerinde yürüten robotlar için referans sentezi en az kontrol yöntemi tasarımı kadar önemlidir. Aynı kontrol yöntemi kullanılsa iki durumda, referansı daha iyi planlanmış bir robotun daha kararlı yürümesi mümkündür. SMN iki bacaklı robot yürüyüşü için önemli bir kararlılık ölçütü olarak kabul edilmiştir. Bu ölçüte göre, yürüyüş esnasında SMN destek poligonu içerisinde kalmalıdır [1].



Şekil 1: Doğrusal ters sarkaç modeli

SMN koordinatları insansı robot gövdesinin ve bağlarının konum ve ivmelenmelerine bağlı fonksiyonlar olarak tanımlanmaktadır. Birçok değişkene bağlı olan bu tanımları kontrol algoritması tasarımında ve referans yürünge sentezinde kullanmak oldukça zordur. Yere bağlı olmaksızın hareket eden (serbest düşüşü mümkün) bir insansı robotun dinamik denklemleri çok karmaşıktır. Kararlı referanslar ve kararlılaştırıcı kontrolörlerin elde edilmesinde bu denklemlerin olduğu gibi kullanımı zordur. Yürünge ve kontrolör tasarımlarında detaylı modeller yerine sadeleştirilmiş olanları kullanmak daha yararlı olabilmektedir. DTSM [19] insansı robotlar için kullanılabilir bu tür sadeleştirilmiş bir modeldir. Bu model yardımıyla SMN ve robot ağırlık merkezi (RAM) arasında bir ilişki kurulabilmektedir [20]. Bu ilişki, SMN tabanlı kararlı referans yürünge sentezini konu alan çeşitli yayınlarda incelenmiştir. Bu çalışmalarda RAM referansları önceden tanımlanmış kararlı SMN referans yürünceleri ile elde edilmektedir. RAM hesaplanmasında Laplace dönüşümü, öne bakışlı kontrol (preview control) ve Fourier dizini yaklaşımları uygulanmıştır. [16]'da ele alınan Fourier dizini ile SMN yürüncesinden RAM yürüncesi oluşturma yöntemi [17]'de geliştirilmiş ve yöntem SURALP'a uygulanarak düz zemin üzerinde yürüme deney sonuçları [18]'de sunulmuştur. Bildiririz bu SMN tabanlı yürünge sentezi yönteminin eğimi değişen yüzeyler üzerindeki başarımını (eğim üzerinde yürüyüşe yönelik önerilen yeni bir kontrolör tasarımı ile birlikte) incelemektedir.

Giriş bölümünde bahsi geçen DTSM'de, robot gövdesini simgeleyen tek noktasal yük RAM'da konumlandırılmış ve bu noktasal yük zemin üzerinde sabit (kaymayan) bir noktaya ağırlıksız bir çubukla bağlanmıştır. Bu ağırlıksız çubuk idealleştirilmiş destek bacağına simgelemektedir. Aynı amaçla, salınan bacak da ağırlıksız olarak kabul edilmektedir. RAM'ın yüksekliği sabit olarak kabul edilmiştir. Anlatılan ters sarkaç Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu şekilde, $c = (c_x \ c_y \ c_z)^T$ noktasal yükün koordinatlarını vermektedir [21].

Referans yürüncesinden istenilen en önemli özellik yürüyüşe kararlılık kazandırmasıdır. SMN ölçütü, iki bacaklı insansı robot alanında en çok kabul görmüş ve kullanılan kararlılık kriteridir [1]. Şekil 1'deki model için SMN, $x-y$ düzleminde tanımlanmış ve üzerinde herhangi bir yatay moment bileşeni bulunmayan bir noktadır. Bu şekildeki gösterilen noktasal yüklü model için SMN koordinatları p_x ve p_y aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [22]:

$$p_x = c_x - (z_c/g)\ddot{c}_x \quad (1)$$

$$p_y = c_y - (z_c/g)\ddot{c}_y \quad (2)$$

z_c noktasal yük hareketinin sınırlandırıldığı düzlemin yüksekliğidir. g yerçekimi sabitidir.

Kullanılan SMN referans yürüncesi Şekil 2'de

gösterilmektedir. Yürüme yarı periyodu T ve destek ayağı konumlarının belirlenmesi referans yürünge sentezindeki ilk safhadır (Şekil 2.a). Bu şekilde A y yönündeki ayak koordinatlarını ve B adım uzunluğunu ifade etmektedir. Doğal bir SMN yürüncesi [16] hedeflenmekte ve bunun elde edilmesi için tek ayak destek safhalarında SMN referansı x yönünde doğrusal hareketli olarak seçilmektedir (Şekil 2.b). Şekil 2.c'deki, b parametresi SMN'nin ayak tabanı altındaki hareket aralığını simgelemektedir ve ayak merkezine göre simetrik bir yürünge olduğu varsayılmaktadır (SMN ayak altında $2b$ uzunluğunda bir mesafeyi katetmektedir). b ayak uzunluğunun yarısı olarak tanımlanabileceği gibi bu bir şart değildir: SMN ayak topuğu ve parmakları bağlayan bir çizgi üzerinde bu çizginin tamamını kapsamadan hareket edebilir. Tek ve çift ayak destek safhaları T ve τ parametreleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Tek ayak destek süresi T_s $T - 2\tau$ ifadesine eşittir. Çift ayak destek süresi T_d , τ parametresinin iki katıdır. x ve y yönlerindeki SMN referans eğrileri sırası ile Şekil 2.c ve Şekil 2.d'de gösterilmektedirler.

$p_x^{ref}(t)$ ve $p_y^{ref}(t)$ eğrilerinin tanımlanmasından sonraki adım bu referanslardan RAM referans yürüncelerini oluşturmaktır. (RAM yürüncesi hesaplandıktan sonra, RAM konumundan ters kinematik işlemleri ile elde edilen eklem referansları ile konum kontrolü uygulanmaktadır.)

Şekil 2'deki $p_x^{ref}(t)$ 'in tanımı aşağıdaki gibidir:

$$p_x^{ref} = (B/T)(t - T/2) + p_x^{ref} \quad (3)$$

Bu eşitlikteki p_x^{ref} , T periyodu ile periyodiktir ve $[0, T]$ aralığında üç doğru parçasının birleşimi olarak ifade edilebilir:

$$p_x^{ref} = \begin{cases} \Omega_1 + \sigma_1 t & 0 \leq t \leq \tau \\ \Omega_2 + \sigma_2 t & \tau < t \leq T - \tau \\ \Omega_3 + \sigma_3 t & T - \tau < t \leq T \end{cases} \quad (4)$$

Kullanılan değişkenler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= 0, \quad \sigma_1 = \delta/\tau, \\ \Omega_2 &= \delta - \tau\sigma_2, \quad \sigma_2 = -2\delta/T - 2\tau, \\ \Omega_3 &= -\delta - (T - \tau)\sigma_3, \quad \sigma_3 = \sigma_1, \\ \delta &= (T - 2\tau/T)(B/2 - b). \end{aligned} \quad (5)$$

δ , p_x^{ref} 'in periyodik olmayan $(B/T)(t - T/2)$ bileşeni ile p_x^{ref} 'in kendisi arasındaki zirve farkın büyüklüğüdür. Şekil 2'deki $p_y^{ref}(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

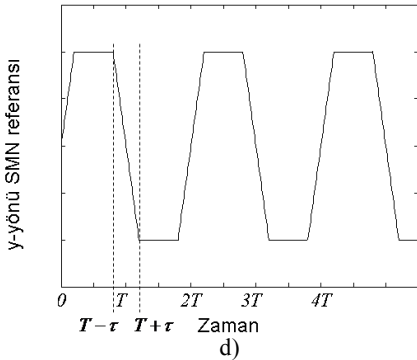
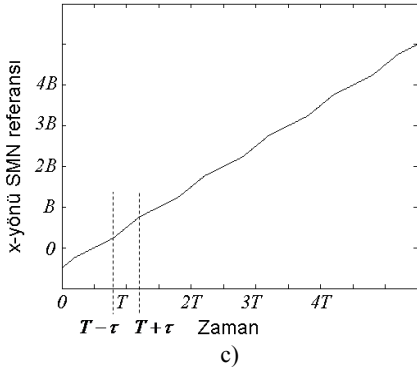
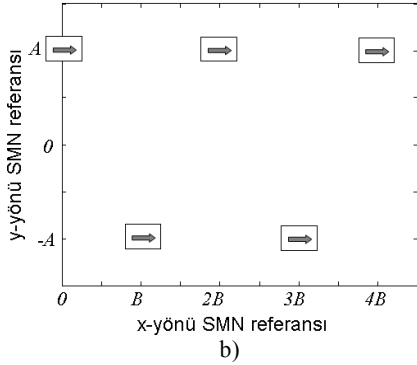
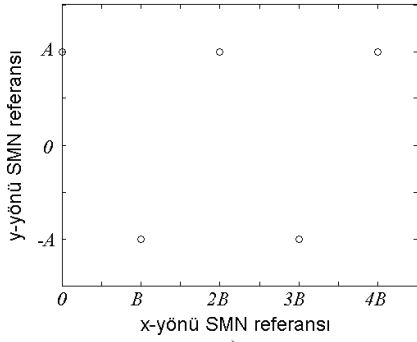
$$p_y^{ref} = \sum_{k=1}^{\infty} A(-1)^k \left\{ (2/2\tau)(t - kT) [u(t - (kT - \tau)) - u(t - (kT + \tau))] + [u(t - (kT + \tau)) - u(t - (kT + T - \tau))] \right\}, \quad (6)$$

$u(\cdot)$ birim adım fonksiyonudur. $\omega_n \equiv \sqrt{g/z_c}$ şeklinde tanımlandığında, referans değişkenleri için (1) ve (2)'yi aşağıdaki şekilde yazabiliriz:

$$\ddot{c}_x^{ref} = \omega_n^2 c_x^{ref} - \omega_n^2 p_x^{ref} \quad (7)$$

$$\ddot{c}_y^{ref} = \omega_n^2 c_y^{ref} - \omega_n^2 p_y^{ref} \quad (8)$$

y -yönü SMN referansı $p_y^{ref}(t)$, $2T$ periyoduna sahip periyodik bir fonksiyondur. Bu nedenle, $c_y^{ref}(t)$ 'nin de periyodik olduğu ve aynı periyoda sahip olduğu söylenebilir. Böylece, $c_y^{ref}(t)$ için bir Fourier serisinin uygulanabilir olduğunu görmekteyiz.



Şekil 2: a) Ayak (taban merkezi) basma noktaları, b) $x-y$ düzleminde $p_x^{ref} - p_y^{ref}$ ilişkisi, c) p_x^{ref} , x -yönü SMN referansı, d) p_y^{ref} , y -yönü SMN referansı

$$c_y^{ref}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{2T}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{2T}\right) \quad (9)$$

$a_0/2$ ve $a_k(1 + (\pi^2 k^2)/(\omega_n^2 T^2))$ katsayılarının $k=1,2,3,\dots$ değerlerinde sıfıra eşittir. b_k katsayıları şu şekildedir:

$$b_k = \begin{cases} \frac{\omega_n^2 T^2}{\omega_n^2 T^2 + \pi^2 k^2} \frac{2A}{\pi k} \left\{ \frac{2}{\tau} \left[\frac{T}{\pi k} \sin\left(\frac{\pi k \tau}{T}\right) - \tau \cos\left(\frac{\pi k \tau}{T}\right) \right] \right. \\ \left. + \left[\cos\left(\frac{\pi k \tau}{T}\right) - \cos\left(\frac{\pi k (T-\tau)}{T}\right) \right] \right\} & k \text{ tek ise} \\ 0 & k \text{ çift ise} \end{cases} \quad (10)$$

$p_x^{ref}(t)$ periyodik bir fonksiyon değildir. Bu da Fourier serisi ile ifade edilemeyeceği anlamına gelir. Fakat, bu fonksiyon periyodik p_x^{ref} ve periyodik olmayan $(B/T)(t-T/2)$ fonksiyonlarının toplamı şeklinde yazılabilir. Aynı şekilde, c_x^{ref} 'in de periyodik ve periyodik olmayan kısımlara sahip olduğunu düşünmek yerinde olacaktır. Ayrıca $p_x^{ref}(t)$ ve c_x^{ref} 'e ait periyodik olmayan kısımların aynı olmadığını düşünürsek, $p_x^{ref}(t) - c_x^{ref}$ farkı da periyodik olmayacaktır. Bu, Şekil 2'de gösterilen sürekli bir yürüyüş için mümkün değildir. Bu sebeple, iki fonksiyonun periyodik olmayan kısımlarının aynı olduğu sonucuna varabiliriz. Şekil 2.c'de gösterilen $p_x^{ref}(t)$ 'in periyodik kısmının periyodu T 'dir ve aynı varsayımı c_x^{ref} 'in periyodik kısmının periyodu için de yapabiliriz. Sonuç olarak, c_x^{ref} şu şekilde ifade edilebilir:

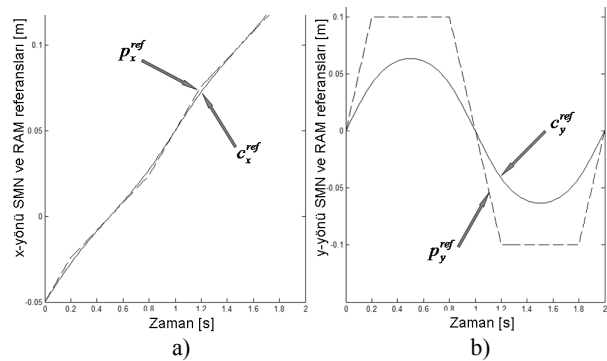
$$c_x^{ref} = \frac{B}{T} \left(t - \frac{T}{2}\right) + \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \beta_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \quad (11)$$

β_k değerleri için aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

$$\beta_k = \frac{\omega_n^2 T^2}{\pi^2 k^2 + \omega_n^2 T^2} \frac{2}{\pi k} \left\{ \sigma_1 \left[-\tau \cos\left(\frac{2\pi k \tau}{T}\right) + \frac{T}{2\pi k} \sin\left(\frac{2\pi k \tau}{T}\right) \right] \right. \\ \left. + \sigma_2 \left[\tau \cos\left(\frac{2\pi k \tau}{T}\right) - \frac{T}{2} \left(\cos\left(\frac{2\pi k \tau}{T}\right) \right) - \frac{T}{2\pi k} \sin\left(\frac{2\pi k \tau}{T}\right) \right] \right\}. \quad (12)$$

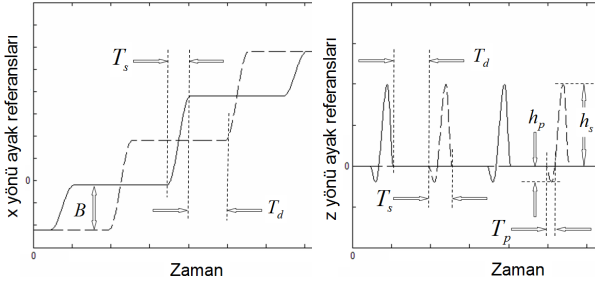
c_x^{ref} ve c_y^{ref} için elde edilen eğriler ilgili orijinal (Şekil 2'de tanımlanan) SMN referansları ile birlikte Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekil 3'te kullanılan parametre değerleri şu şekildedir: $A = 0.1$ m, $B = 0.1$ m, $b = 0.04$ m, $T = 1$ s ve $\tau = 0.2$ s.

Ayak konum referans yörüngeleri de oluşturulmalıdır. RAM ve ayakları birbirine bağlayan bacak eklemleri referans konumları bu aşamadan sonra ters kinematik hesaplamaları ile hesaplanabilir. Kullanılan x ve z yönü ayak yörüngeleri Şekil 4'te gösterilmektedir. y yönü referansları sağ ve sol ayaklar için $-A$ ve A değerlerinde sabittir.



Şekil 3: SMN referansları ile c_x^{ref} ve c_y^{ref} RAM referansları a)

$$c_x^{ref} \quad b) \quad c_y^{ref}$$



Şekil 4: x ve z yönü ayak yörüngeleri. Düz çizgiler sağ, kesik çizgiler sol ayağa aittir.

3. Kontrol Yöntemi

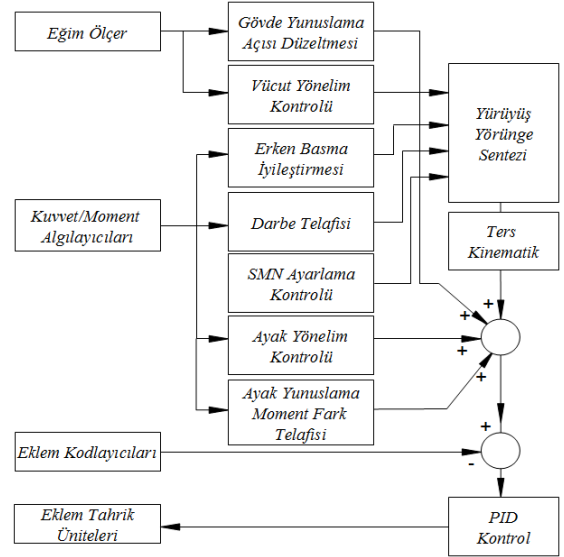
İlk olarak, dünya koordinat ekseninde tanımlanmış olan RAM ve ayak referansları kullanılarak ters kinematik aracılığı ile eklem pozisyon referansları oluşturulmaktadır. Eklem pozisyonları kontrolü için bağımsız eklem kontrolörleri kullanılmıştır. Sonrasında, yürüyüş esnasında vücut dengesi ve ayak ile zemin arasındaki etkileşimin iyileştirilmesi amacıyla bir dizi telafi ve düzeltme kontrolörü kullanılmaktadır. Kullanılan bu kontrolörler bir blok şema şeklinde Şekil 5'te gösterilmektedir. Bu bildiriye kullanılan kontrol yöntemi büyük ölçüde [15], [18] ve [23]'te sunulan yaklaşımı takip etmektedir. Bununla birlikte bu çalışmalardakilerden farklı olarak eğimi değişen yüzeylerde yürüme başarımını arttırmak üzere aşağıda açıklanan "gövde yunuslama açısı düzeltme" bloğu kontrol yapısına eklenmiştir.

3.1. Gövde Yunuslama Açısı Düzeltmesi

Robotun yürüyüşü için; robot gövdesini yürüyüş yönü düzlemi ile hizalı, kontrol tasarımcısı tarafından verilebilen belirli bir açı altında ve yunuslama eksenini etrafındaki salınımları azaltılmış bir şekilde tutabilmek amacı ile, bir açı düzeltme algoritması geliştirilmiştir. Otomatik sıfırlama süreci için geliştirilen algoritmadan farklı olarak [23], robotun gövde yunuslama açısının iyileştirilebilmesi için daha hızlı bir tepki gerekmektedir. Kontrol eyleminin, yunuslama salınımlarını takip edebilecek ve bunları yürüyüş sırasında düzeltebilecek kadar hızlı olması gerekmektedir. Ayrıca, robot gövdesini kesin olarak dik olarak hizalamak yerine, robotun yunuslama eğilme referansı açısı ile hizalanabilmesi amaçlanmıştır. Bu kontrolör ayak bileği yunuslama açısını iyileştirmek için, eğimölçerden alınan geri beslemeyi kullanmaktadır. Kontrol kuralı şu şekildedir.

$$\bar{\theta}_{yun}(s) = \theta_{yun}(s) + \left(K_{P-yun} + K_{I-yun} \frac{1}{s} \right) (\theta_{gövde_yun}(s) - \theta_{yun_eğ}) \quad (13)$$

Bu formülde $\theta_{yun}(s)$ sağ ve sol ayak bileği eklemleri için önceden planlanmış yunuslama açısı referanslarını ve $\bar{\theta}_{yun}(s)$ ise iyileştirilmiş referansları göstermektedir. $\theta_{gövde_yun}(s)$ eğim ölçerden alınan gövde yunuslama açısı, $\theta_{yun_eğ}(s)$ ise yunuslama eğilme açısı referansıdır. K_{P-yun} ve K_{I-yun} sırasıyla gövde yönelim kontrolü, oransal ve integral eylem katsayılarıdır. Sıfırlama sürecindeki gövde yönelim kontrolünü çevrimiçi yürüyüş kontrol algoritmalarına uyarlayabilmek için, kontrol değişkenleri K_{P-yun} ve K_{I-yun} yeniden ayarlanmıştır. Aynı kontrol eylemi hem sağ hem de sol ayak bileği yunuslama açalarına uygulanmıştır.

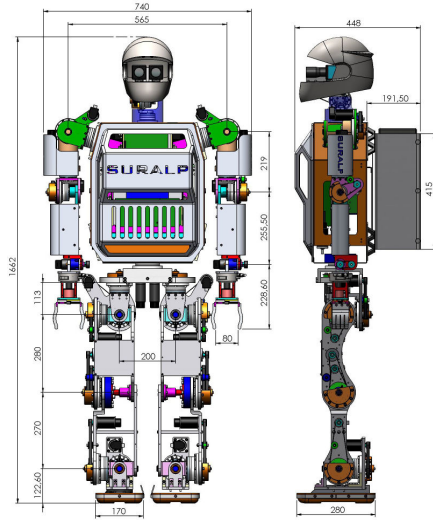
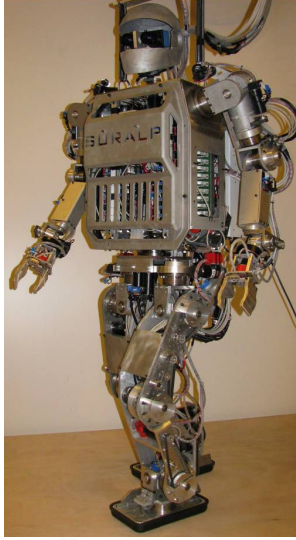


Şekil 5: Kontrol blok şeması

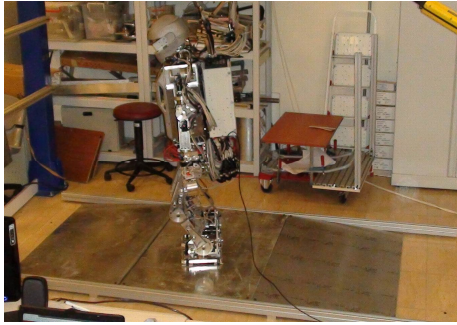
Bu çevrimiçi yunuslama açısı iyileştirilmesi sadece, her iki ayağında yerde olduğu, yürüyüşün çift destek safhasında kullanılmıştır. (13)'ün genel kontrol algoritması içinde nasıl kullanıldığı Şekil 5'te gösterilmektedir. K_{P-yun} ve K_{I-yun} kazanç değerleri deneme yanılma yoluyla bulunmuştur.

4. Deneysel Sonuçları

Bu bölümde, insansı robot SURALP'nin teknik özellikleri ve deney sonuçları sunulmuştur. Robot Şekil 6'da gösterilmiştir. SURALP, bacaklarında 6, kollarında 6, ellerinde 1, boynunda 2 ve belinde 1 olmak üzere toplamda 29 serbestlik derecesine sahip olarak, insan boyut ve oranlarında tasarlanmıştır ve imal edilmiştir. Robot 114 kg ağırlığındadır. Tahrik elemanı olarak DC motorlar kullanılmıştır. Kayış ve kasnak sistemleri ile motor hareketi harmonik redüksiyon dişlilerine iletilmektedir. Motor sürücüleri gövde içerisinde yer almaktadır. Algılayıcı sistem, eklem konum kodlayıcılarını, el ve ayak bileklerinde konumlandırılmış 6 eksen kuvvet/tork algılayıcılarını, robot gövdesine konumlandırılmış doğrusal ivmeölçer, eğimölçer ve jiroskopu içermektedir. SURALP'nin kontrol donanımı sırt çantası şeklinde monte edilen modüler bir dSpace dijital sinyal işleme sisteminden oluşmaktadır. [15]'te elde edilen sonuçlar doğrultusunda 3. Bölüm'de ele alınan gövde yunuslama açısı düzeltme tekniği daha önce kullanılan kontrol yöntemlerine ek olarak SURALP üzerinde uygulanmıştır. Şekil 7'de görülen eğik düzlem yapısı 6°'lik (%10.5'lik) bir eğimle laboratuvar zemininden yatay bir platforma tırmanmakta, bu platformu takiben yine 6° ile yokuş aşağı devam ederek zemine inmektedir. Robot deneylerde laboratuvar zemininde başladığı yürüyüşünü bu eğik düzlemler yapısının üzerinde sürdürmüş, bir tarafından tırmandığı platformun diğer tarafından inmiştir. Deneylerde Tablo 1'deki parametreler kullanılmıştır. SMN tabanlı yörüngelerin ve gövde yunuslama açısı düzeltmesi kontrol yönteminin kullanımı robotu fonksiyon tabanlı yörüngelerde olduğundan daha karalı bir hale getirmiş, eğim geçişlerinde 6°'lik eğik düzlem açalarına rağmen denge kaybı olmamıştır. Şekil 8 bu deney sırasındaki gövde yunuslama açısını göstermektedir. Bu açının ölçümü robotun göğsünde bulunan bir eğimölçer vasıtasıyla yapılmıştır.



Şekil 6: İnsansı robot SURALP

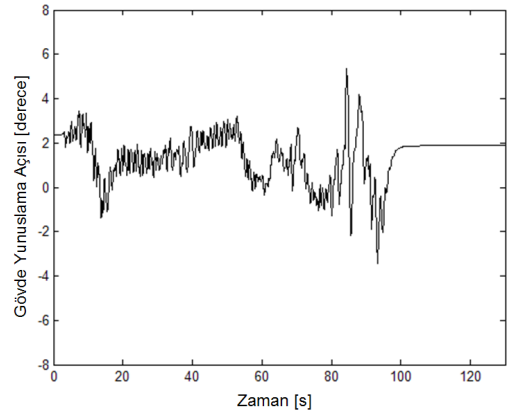


Şekil 7: SURALP değişken eğim platformu üzerinde

Eğim kontrol algoritmaları gövde yunuslama yönelimini 2° 'de tutmayı amaçlamaktadırlar. Eğim değişim anları Şekil 8'de 10'uncu ve 80'inci saniyelerden hemen sonra gerçekleşen salınım artışları ile gözlemlenmektedir. Gövde eğimi 2° etrafındaki referansına yakın tutulabilmektedir. Bu deneyde adım uzunluğu 9 cm'dir. Aynı şekilde bir çok deney yapılmış, robotun eğim düzensizlikleri üzerinde gürbüz bir şekilde yürüyüş dengesini koruduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 1: Referans Sentez Parametreleri

Sembol	Tanım	Değer
T_s	Tek ayak destek süresi	1 s
T_d	Çift ayak destek süresi	0,9 s
T_p	Zemin itme süresi	0.4 s
A	Y yönü SMN referansı	7 cm
$2b$	Taban altındaki SMN hareketi	4 cm
B	Adım uzunluğu	9 cm
h_s	Adım yüksekliği	1.5 cm
h_p	Zemin itme genliği	1 cm



Şekil 8: Değişken eğim platformu üzerinde yürüyüş sırasında gövde yunuslama açısı.

[15]'te SMN tabanlı referans sentezi yöntemi ve gövde yunuslama açısı düzeltilmesi olmaksızın elde edilen başarımlar 3.2° 'yi aşmayan eğimlere 6 cm'lik adım uzunlukları ile geçilebilmesi olmuştur. Bu da bildirimizde kullanılan referans sentezi ve kontrol tekniklerinin başarısına işaret etmektedir.

5. ,Sonnular

Düz olmayan zeminler üzerinde iki bacaklı yürüyüş önemli bir araştırma alanıdır. Eğimli yüzeyler ile insan yaşama ortamında tipik olarak karşılaşılmaktadır. Bu bildiride eğimli yüzeyler üzerinde yürüyüş konusu ele alınmıştır. Bu bildiride, referans yörünge sentez yöntemi olarak daha önce düz zemin üzerinde denenmiş olan bir yaklaşım kullanılmaktadır.

Kontrol yapısı, bir dizi alt kontrol bloğunu içermektedir. Bu bloklardan birçoğu daha önce düz zeminde yürüme amaçlı olarak tasarlanmış kontrol yasalarını içermekte, bunlara ek olarak bu bildiride eğimi değişen yüzeylerde yürüme başarımını arttırmak üzere bir "gövde yunuslama açısı düzeltme" kontrol bloğu da kullanılmaktadır. Yörünge sentezi ve kontrol algoritmalarının çeşitli eğim koşulları altında gösterdiği performans, 29 serbestlik derecesine sahip olan insansı robot SURALP ile deneysel olarak incelenmiştir. Yürüme deneyi sonuçları, önerilen kontrolörlerin eğimi 5.6° 'ye kadar çıkabilen zeminler üzerinde dengeli bir yürüyüşü sağladığını göstermektedir. Oluşturulan referans yörüngesinin, 9 cm adım boyu ile dengeli bir insansı yürüyüş başarımını sağladığı görülmüştür. Bu çalışmadaki gözlemlerimize göre

yunuslama açısının eğimli yüzeylere uyma hızının artırılması eğimideğişen yüzeyler üzerinde yürümede büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda teorik ve uygulamalı araştırmalar planlanmaktadır.

6. Teşekkür

Bu çalışma 106E040 Araştırma Projesi çerçevesinde TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

7. Kaynakça

- [1] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic, *Biped Locomotion: Dynamics, Stability and Application*. Springer, 1990.
- [2] M. Raibert, *Legged Robots that Balance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [3] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The development of Honda humanoid robot", *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp: 1321 - 1326 vol.2, May 1998
- [4] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, M. Shinichi, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: System overview and integration", *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, October 2002
- [5] S. Lohmeier, K. Löffler, M. Gienger, H. Ulbrich, and F. Pfeiffer, "Computer system and control of biped "Johnnie"", *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol.4, pp.4222-4227, New Orleans, LA, April 2004.
- [6] 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 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2431-2436, vol.3, October 2002.
- [7] J-H. Kim and Oh J-H., "Realization of Dynamic Walking for the Humanoid Robot Platform KHR-1," *Adv. Robotics*, Vol.18, No.7, pp.749-768 (2004)
- [8] J. Y. Kim, I. W. Park, J. H. Oh, "Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor", *J Intell Robot Syst* (2007) 48:457-484, January 2007.
- [9] S. Hyon and G. Cheng, "Gravity Compensation and Full-Body Balancing for Humanoid Robots," *IEEE-RAS/RSJ Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2006)*, CD-ROM, pp. 214-221, Dec. 2006.
- [10] 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. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 76-81, 2006
- [11] S. Kajita and K. Tani, "Adaptive Gait Control of a Biped Robot Based on Realtime Sensing of the Ground Profile," in 1996 *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 570-577.
- [12] K. Yokoi, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, S. Kajita and H. Hirukawa, "A Honda Humanoid Robot Controlled by AIST Software," in 2001. *IEEE Int. Conf. Humanoid Robots*, pp. 259-264.
- [13] J. Chestnutt, J. Kuffner, K. Nishiwaki and S. Kagami, "Planning Biped Navigation Strategies in Complex Environments," in 2003 *Proc. IEEE Int. Conf. Humanoid Robotics*.
- [14] H. Hirukawa, S. Hattori, S. Kajita, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa and S. Nakaoka, "A Pattern Generator of Humanoid Robots Walking on a Rough Terrain," in 2007 *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2181-2187.
- [15] E. Taskiran, U., Seven, O. Koca, M. Yilmaz and K. Erbatur, "Walking Control of a Biped Robot on an Inclined Plane," *Proc. ICONS 2009 - The 2nd International Conference on Intelligent Systems and Control*, Istanbul, Turkey, September 2009.
- [16] K. Erbatur, O. Kurt, "Natural ZMP Trajectories for Biped Robot Reference Generation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 3, pp. 835-845, March 2009.
- [17] Erbatur, K., O. Koca, E. Taskiran, M. Yılmaz and U. Seven, "ZMP Based Reference Generation for Biped Walking Robots," presented in *International Conference on Intelligent Control, Robotics, and Automation, ICICRA 2009, Venice, Italy October 28-30, 2009*, published in *World Academy of Science Engineering and Technology*, Vol. 58, pp. 546-553, October 2009
- [18] E. Taskiran, M. Yılmaz, O. Koca, U. Seven and K. Erbatur, "Trajectory Generation with Natural ZMP References for the Biped Walking Robot SURALP," accepted for publication in *Proc. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2010, May 2010, Alaska, USA*.
- [19] S. Kajita, K. Kaehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "A real time pattern generator for bipedal walking" *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Aut.*, vol.1, pp.31-37, May 2002.
- [20] 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", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp: 1620 - 1626, vol.2, Taipei, Taiwan, September 2003.
- [21] KAJITA S., Kanehiro F., Kaneko K., Yokoi K., and Hirukawa H., 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 Kasım 2001 pp. 239 - 246 vol.1
- [22] Y. Choi, B. J. You, and S. R. Oh, "On the stability of indirect ZMP controller for biped robot systems", *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp: 1966-1971, vol.2, Sendai, Japan, June 2004.
- [23] K. Erbatur, U. Seven, E. Taşkıran, Ö. Koca M. Yılmaz, M. Ünel, G. Kızıltaş, A. Sabanovic and A. Onat, "SURALP: A New Full-Body Humanoid Robot Platform" *Proc. IROS 2009 - IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, USA, Oct. 2009.