

Dört Bacaklı Robotlar için Önzilemeli Kontrol ile Sıfır Moment Noktası Tabanlı Yürüme Yörüngesi Sentezi

Kaan Can Fidan, Tunç Akbaş, Şefik Emre Eskimez, Selim Özel, Ömer Kemal Adak, Özge Drama, Mert Konukoğlu, Güneş Yılmaz, Kemalettin Erbatır

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

kaanfidan@sabanciuniv.edu tuncakbas@su.sabanciuniv.edu eskimez@su.sabanciuniv.edu
selimozel@su.sabanciuniv.edu omerkemal@sabanciuniv.edu ozgedrama@su.sabanciuniv.edu
mkonukoğlu@su.sabanciuniv.edu gunesyilmaz@su.sabanciuniv.edu erbatır@sabanciuniv.edu

Özetçe

Bacakları üzerinde hareket eden robotların engel aşma konusunda önemli avantajları söz konusudur. Özellikle dört bacaklı robotların değişken arazi yapıları üzerinde birçok uygulamaları düşünülmektedir. Bu çalışmada, dört bacaklı bir robotun düz zemin üzerinde hızlı yol almasına yönelik tırsı türü ilerleme üzerinde durulmaktadır. Sıfır Moment Noktası (SMN) kararlılık kriterine ve Doğrusal Ters Sarkaç Modeli'ne (DTSM) dayalı bir yürüme referansı sentez yöntemi sunulmaktadır. Tırsı ilerleme için bir SMN referans yörüngesi önerilmiş, bu yörüngeden, önzilemeli kontrol yaklaşımı ile Robot Ağırlık Merkezi (RAM) için bir referans yörünge elde edilmiştir. Oluşturulan ağırlık merkezi yörüngesi ters kinematik yöntemi ile bacak eklemlerinin konum referanslarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Önerilen referans sentezi yöntemi, 16 serbestlik dereceli bir robot modeli ile üç boyutlu ve tam dinamikli bir simülasyon ortamında denenmiştir. Simülasyon sonuçları sunulan yaklaşımın başarılı olduğunu göstermektedir.

1. Giriş

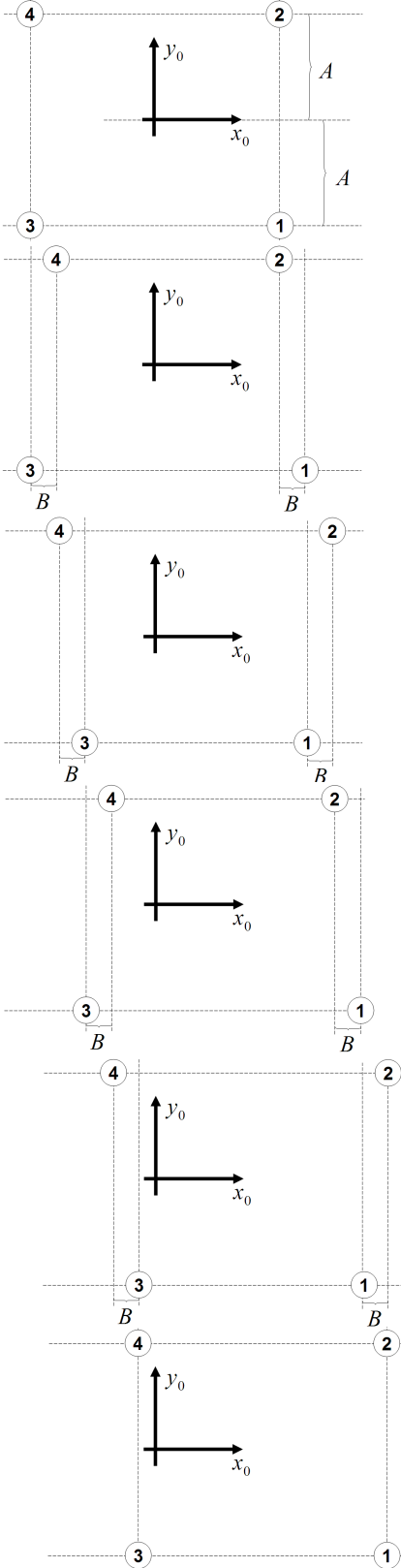
Dört bacaklı robotlar, arama-kurtarma, yük taşıma, insan için zararlı ortamlarda görev alma gibi işlevlerde birtakım avantajlara sahiptirler. Mobil robotların hareket konusunda kısıtlı kaldığı engebeli ve sarp arazilerde daha kolay hareket edebilirler. İki bacaklı insansı robotlara nazaran dengeleri daha gürbüzdür. Bu avantajların yanında dört bacaklı robotların hızlı ve dengeli bir şekilde hareketi önemli bir kontrol problemidir.

Yürüyüş çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir [1]. Yürüyüş şekli; bacakların salınım sıralaması, salınım zamanlaması, destek safhası süreleri ve salınım safhası süreleri ile tanımlanır. Dört bacaklı canlılarda gözlemlenen yürüyüş şekilleri emekleme (crawl), tırsı (trot), rahvan (pace), eşkin (canter) ve dört nala (gallop) gidiştir. Genellikle kaplumbağalarda gözlemlenen emekleme yürüyüş şeklinde hareket boyunca üç baktan destek alınması denge kararlılığını sağlamaktadır. Emekleme yürüyüş şeklinde sırasıyla; sol ön, sağ arka, sağ ön, sol arka bacaklar hareket etmektedir. Tırsı yürüyüş şekli deve ve at başta olmak üzere birçok dört bacaklı canlıda gözlemlenmektedir. Bu yürüyüş şeklinde çapraz bacaklar aynı

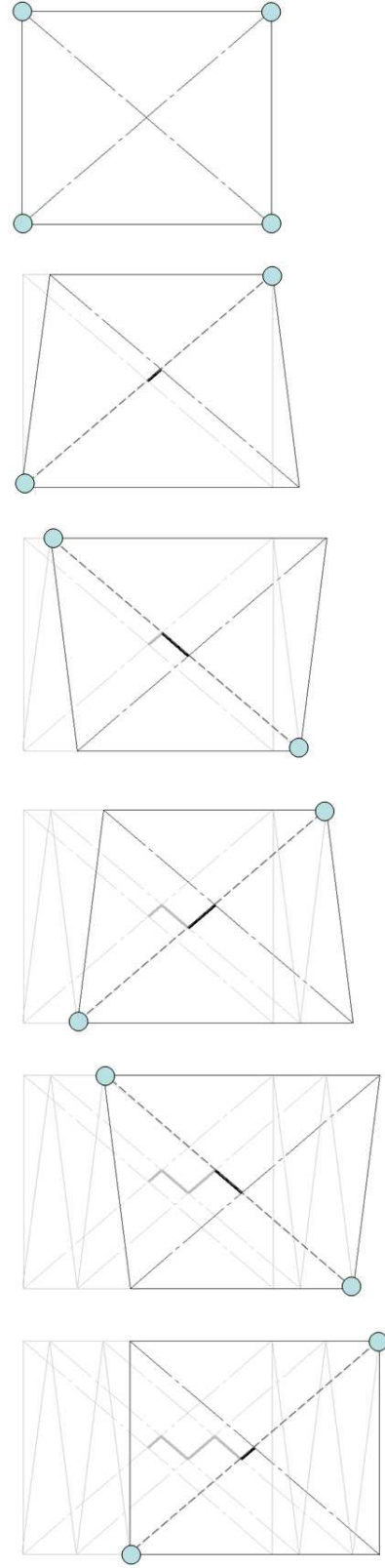
anda hareket etmektedir. [1]. Tırsı çok benzeyen rahvan yürüyüş şeklinde ise aynı taraftaki bacaklar birlikte hareket etmektedir. Bu yürüyüş şekli kertenkele ve semenderde gözlemlenmektedir. Eşkin ve dört nala gidiş atlarda görülen hızlı ilerleme şekilleridir.

Robotlar için tırsı yürüyüş bir çok araştırmaya konu olmuştur [2-7]. Tırsı, aynı hızda gerçekleşen rahvandan daha dengelidir. Statik bir yürüyüş olan emeklemeden hızlıdır ve daha hızlı yürüyüş şekillerine geçişte de bir ara şekil niteliği taşımaktadır.

Bacaklar üzerinde ilerleme için dengeli referans yörüngeleri oluşturulmasında SMN kararlılık kriteri yaygın şekilde kullanılmıştır. Bu kriterin başlıca kullanım alanı iki bacaklı robotların referans sentezidir [8-13]. Dört bacaklı robotlar için de SMN kriterinin kullanıldığı çalışmalar bildirilmiştir [3-7,14-18]. SMN kararlılık kriteri, dengeli bir yürüyüş için SMN'nin yere değen ayaklar tarafından oluşturulan destek poligonun içinde olması gerektiğini ifade eder. Çok serbestlik dereceli robotlar için SMN denklemleri kolaylıkla elde edilebilmektedir. Ancak bu denklemlerler birçok konum, hız ve ivme değişkenini içerdiklerinden dolayı referans yörünge sentezinde kullanılmaları zordur. Bu sebeple, birçok çalışmadaki referans sentezinde çok serbestlik dereceli robot modellerinin değil, basitleştirilmiş modellerin kullanımına gidilmiştir. DTSM bu şekilde yalın bir modeldir. Referans sentezine ayak basma noktalarının atanması ile başlanır. Bu noktalarla uyum içindeki bir SMN referans yörüngesinin oluşturulması bir sonraki aşamadır. Bu yörünge ve DTSM'nin kullanımı ile RAM için bir referans yörüngesi oluşturulur. Ayak konum referansları ile RAM arasında bir ters kinematik probleminin çözümü ile robot eklemleri konum referanslarına ulaşılır. Bu referansları takip eden bağımsız eksen konum kontrolörlerinin kuvvet ve yönelim kontrolörleri ile desteklenmeleri, birçok çalışmada ana kontrol yapısını oluşturmuştur [9,13,19,20]. SMN referans yörüngesinden RAM yörüngesi elde edilmesi için çeşitli çözüm yöntemleri önerilmiştir. Laplace transformu uygulaması [9,21], Fourier dizini kullanımı [12,13,21] ve önzilemeli kontrol [9,22] bu yöntemlerdendir. Önzilemeli kontrol SMN referanslarının çevrimiçi değiştirilmesine izin verdiğinden bu yöntemler arasında en başarılı olanı olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte önzilemeli kontrolün ikiden çok bacaklı robotların yürüme referansı sentezinde kullanımı yaygınlaşmamıştır.



Şekil 1: Beş adımlık bir tırıs ilerlemenin ayak basma konumları. Daireler ayakları temsil etmektedir. Ön sağ ayak 1, ön sol ayak 2, arka sağ ayak 3 ve arka sol ayak 4 rakamı ile numaralandırılmıştır. x_0 ve y_0 dünya koordinat sistemini tanımlayan eksenlerdir.



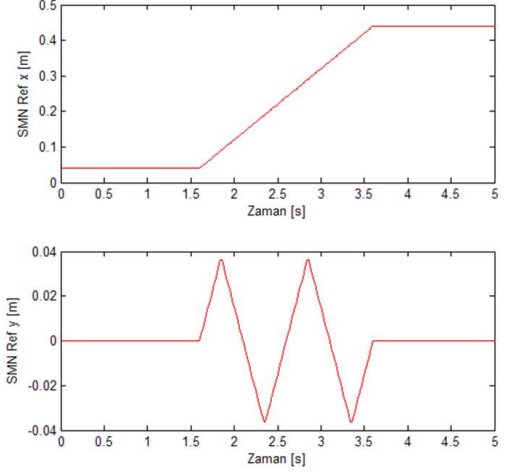
Şekil 2: Şekil 1'de gösterilen beş adımlık tırıs ilerlemeye karşılık gelen SMN referans yolu. SMN referansı yere basan çapraz ayakların arasında oluşan hat üzerinde ilerlemektedir. Kesikli çizgi yere basan ayakların oluşturduğu hattı, noktalı kesikli çizgi ise bir sonraki evrede yere basacak ayakların hattını göstermektedir.

Asterisk isimli altı bacaklı robot kendisine özel yuvarlanma yürüyüşü yaparken ağırlık merkezi yörüngesini oluşturmak için önzilemeli kontrol kullanmaktadır [17]. [18] dört bacaklı bir robotun çapraz bacak destek safhalarında SMN kriteri ve önzilemeli kontrolün düşük ilerleme hızlarında kullanıldığını rapor etmektedir.

Bu bildiriye, dört bacaklı bir robotun düz zemin üzerinde tırs şeklindeki ilerlemesi için ayak konum referansları ve dengeli bir SMN referans yörüngesi önerilmekte, DTSM ve önzilemeli kontrolün kullanımı ile bu SMN yörüngesinden RAM yörüngesi oluşturmaktadır. Ayaklar ve RAM arasında ters kinematik problemlerinin çözümü ile elde edilen eklem konum referansları bağımsız eksen PID kontrolörlerin kullanımı ile izlenmektedir. Önerilen referans sentez sistemi ve kontrol yapısı dört bacaklı ve 16 eklemli bir robot modeli üzerinde üç boyutlu ve tam dinamikli simülasyon çalışmaları ile test edilmiştir. Bildiri şu şekilde yapılandırılmıştır: 2. Bölüm’de tırs yürüyüş için önerilen SMN referans yörüngesinin hesaplanması anlatılmıştır, DTSM’nin özetlenmesi ve hesaplanan SMN yörüngesinden önzilemeli kontrol kullanılarak RAM yörüngesi hesaplanması 3. Bölüm’de ele alınmıştır. 4. Bölüm’de, simülasyon sonuçlarına ayrılmıştır. Sonuçlar 5. Bölüm’de sunulmaktadır.

2. SMN Referans Yörüngesi

Bu bildiriye yer düzlemine sabit bir dünya koordinat sisteminin x yönü yürüyüş yönü olarak kabul edilmektedir. y yönü yürüyüş yönüne diktir ve z eksenini dikey olarak yukarıyı göstermektedir. Robot gövdesine sabitlenmiş bir diğer koordinat sisteminin eksenleri dünya koordinat sistemi ile aynı yönelimdedir. Yürüme başlangıcında gövde koordinat sisteminin dünya koordinat sisteminin tam üzerinde belli bir yükseklikte olduğu varsayılmıştır. SMN yörüngesinin oluşturulması için öncelikle ayak basma yerlerinin ve zamanlamalarının belirlenmesi gerekir. Öndeki iki ayağın x yönü koordinatlarının yürüyüşe başlamadan önce aynı olduğu kabulü ile ayak basma konumları atanmıştır. Yürüyüş bitiminde de öndeki ayakların x yönü koordinatlarının birbirine eşit olduğu kabul edilmiştir. Aynı kabuller arka ayaklar için de yapılmıştır. Son adım hariç her adımın bitiminde ön ayaklardan biri diğerinin bir adım boyu önünde olacaktır. Son adımda, geride kalan ön ayak diğerinin x yönü koordinatına getirilerek durdurulur. Bu adımlama prensibi arka ayaklar için de geçerlidir. Adım boyu için B sembolü kullanılmaktadır. Solda bulunan ayakların y yönü konum referansları birbirine eşit ve sabittir. A , bu sabit referans için kullanılan semboldür. Sağ yandaki ayakların konum referansı $-A$ ’dır. Şekil 1 beş adımlık bir yürüyüş için ayak basma noktalarını göstermektedir. Tırs yürüyüşte çapraz ayaklar aynı anda ileriye doğru hareket etmektedir. İki ayağın aynı anda havada olması yerde olan iki ayak arasında çizgi şeklinde bir destek hattı oluşmasını sağlar. Dengeli bir yürüyüş için SMN yörüngesinin bu hattın dışına çıkmayacak şekilde oluşturulması gerekmektedir. SMN’in izlediği yol, havadaki ayakların yere basması ile oluşan yeni destek hattı ile eski destek hattının kesiştiği yerden yönünü yeni destek hattını izleyecek şekilde değiştirerek devam eder. Bu şekilde, x - y düzlemi üzerinde SMN’in izleyeceği referans yol oluşturulmuş olur (Şekil 2). Ancak SMN yörüngesinin tanımlanmasında bu yola ek olarak zamanlama bilgisine de ihtiyaç vardır.



Şekil 3: Şekil 1’de gösterilen beş adımlık tırs ilerlemeye karşılık gelen SMN referansının x ve y komponentleri.

Bu bildiriye yürüyüş yönündeki SMN komponentinin sabit bir hızla ilerlemesi önerilmektedir. Bu seçim ile elde edilen beş adımlık bir yürüyüşe ait x ve y yönü SMN referansları Şekil 3’te sunulmaktadır.

3. Önzilemeli Kontrol ile RAM Referans Yörüngesi Hesaplanması

SMN kriteri bir çok robot araştırmasında kullanılmış ve kabul görmüş bir metoddur [8]. DTSM modeli robotun tüm dinamiklerini içermeyen, oldukça basitleştirilmiş bir modeldir. DTSM kullanılması kararlı referansların elde edilme işlemi yalınlaştırabilir. DTSM’nde robotun gövdesinin, RAM’da konsantre olmuş noktasal bir kütle olduğu varsayılır. Bu nokta yerde hareket etmeyen (kaymayan) bir noktaya kütleli bir çubuk ile bağlıdır. Bu kütleli çubuk destek bacağının idealleştirilmiş bir modelidir. Salınan bacaklar da kütleli varsayılmaktadır. Şekil 4 DTSM’ni göstermektedir. Şekilde $c = (c_x \ c_y \ c_z)^T$ noktasal kütleli koordinatlarıdır. DTSM’nde c_z ’nin sabit olduğu kabul edilmektedir. c_z ’yi sabit kabul ederek x ve y yönündeki RAM denklemlerinin birbirine bağıllığı ortadan kaldırılır. Ortaya çıkan RAM denklemleri aşağıdaki gibidir:

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

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

Yukarıdaki denklemde, g yerçekimi sabiti ve z_c noktasal kütleli hareketinin sınırlandırılmış olduğu düzlemin yüksekliğidir. p_x ve p_y SMN koordinatlarıdır. (1)’deki sonuç Şekil 5 üzerinde tork eşitliği yazarak bulunabilir. Verilen bir SMN yörüngesinden RAM referans yörüngesinin hesaplanması önemli bir problemdir. [9] bu problemi önzilemeli kontrol yöntemi ile çözmeyi önermektedir. Bu çözüm için aşağıdaki sistem tanımı kullanılmaktadır.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x \quad (3)$$

$$p_x = [1 \ 0 \ -z_c/g] [c_x \ \dot{c}_x \ \ddot{c}_x]^T \quad (4)$$

Bu sistemdeki kontrol girişi u_x , RAM ivmelenmesinin zamana göre ilk türevidir. Sistemin çıkışı x yönündeki SMN konumudur. Kontrol girişi kullanılarak önceden elde edilen (Bölüm 2) SMN referansı izlenmektedir. Sonuç olarak sistem, SMN referansının izlenmesini sağlayacak RAM yörüngesini hesaplamaktadır. Sistemin kontrol yöntemi yukarıda da belirtildiği gibi önizlemeli kontroldür. Bu kontrol sisteminin uygulanması için önce (3-4)'ün ayrık zamanda ifade edilmesi gerekir:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad p_k = Cx_k \quad (5)$$

$$x_k = [c_x(kT) \ \dot{c}_x(kT) \ \ddot{c}_x(kT)]^T \quad u_k = u_x(kT) \quad (6)$$

$$p_k = p_x(kT)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = [T^3/6 \ T^2/2 \ T]^T \quad C = [1 \ 0 \ -z_c/g]$$

Burada k bit ayrık zaman endeksidir. T örnekleme periyodudur. (5-7)'deki sistem tanımı, sadece durum değişkeni vektörünü $x_k = [c_x(kT) \ \dot{c}_x(kT) \ \ddot{c}_x(kT)]^T$ ve sistem çıkışı $p_k = p_x(kT)$ olarak değiştirmek suretiyle y yönü SMN ve RAM ilişkisini içeren bir tanıma dönüştürülebilir. Hesaplamalar x ve y yönleri için birbirinden bağımsız olarak ayrı ayrı yapılır.

Önizlemeli kontrolün klasik kontrol yöntemlerinden farkı çıkışlarını oluştururken N_L döngü ilerideki referans değerlerine bakması ve bu aralıkta bir performans göstergesini (PG) minimize edecek optimal kontrol girişini hesaplamasıdır. Optimal kontrol girişinin oluşturulabilmesi için Rosenthal ve Tomizuka tarafından ayrık sistemler için bir yöntem [23] geliştirilmiştir. Bu yöntem Katayama tarafından [24] tamamlanmıştır. Aşağıdaki performans göstergesi ve bu göstergeden kontrol girişi oluşturma metodu [24]'da detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Kesikli sistemi kontrol edecek olan u_k fonksiyonunun optimizasyonu aşağıdaki PG aracılığı ile gerçekleştirilmektedir.

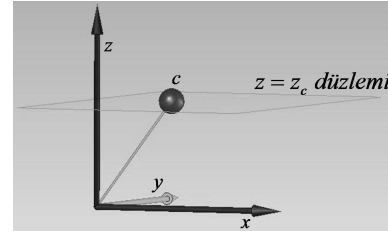
$$J = \sum_{i=k}^{\infty} \{Q_e e(i)^2 + \Delta x^T(i) Q_x \Delta x(i) + R \Delta u^2(i)\} \quad (8)$$

Bu PG'de $e(i) = p_i - p_i^{ref}$ sistem çıkışının referansı takip etme hatasıdır. $\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$ durumların değişimini gösteren bir vektör ve $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ girişin değişimini gösteren bir vektördür. Q_e ve R sıfırdan büyük skalar değerlerdir (çok giriş ve çıkışlı sistemlerde

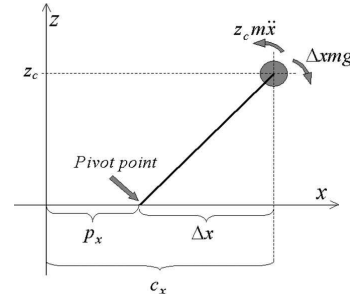
bu değerler matrik olacaktır) ve Q_x 3×3 pozitif tanımlı, simetrik, bir matristir. (8)'daki PG'yi minimize edecek optimal giriş, her örnekleme anında N_L döngü ileri bakan bir önizlemeli kontrol metodu düşünüldüğünde şu şekildedir [9,24]:

$$u_k = -G_i \sum_{i=0}^k e(k) - G_x x(k) - \sum_{j=1}^{N_L} G_p(j) p^{ref}(k+j) \quad (9)$$

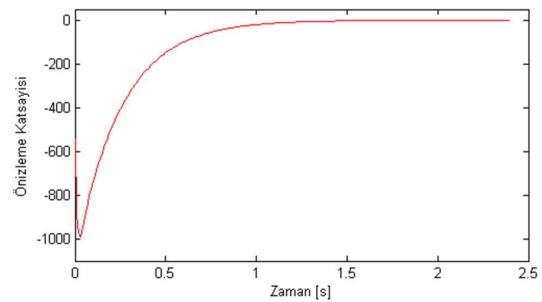
Burada G_i , G_x ve $G_p(j)$ katsayıları, Q_e , Q_x , R ve (5)'teki sistem parametrelerinden hesaplanan önizlemeli kontrol kazançları olarak tanımlanmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi önizleme kontrol kazancı $G_p(j)$ 1.6 saniyeden sonra sıfıra çok yakındır. Dolayısıyla [9]'da da değinildiği üzere N_L 'i $1.6/T$ olarak seçmek uygundur. Anlatılan önizlemeli kontrol metodu ile sistemin SMN'i, tanımlanan SMN referansını takip edecektir. Bu süreç boyunca oluşan sistem durumları vektörünün pozisyon elemanının kaydedilmesi ile RAM referans yörüngesi elde edilmektedir. Şekil 7'de 5 adımlık bir tırıs yürümeye ait SMN referansını ve önizlemeli kontrol ile bu referanslardan hesaplanan RAM referansını göstermektedir.



Şekil 4: Doğrusal ters sarkaç modeli

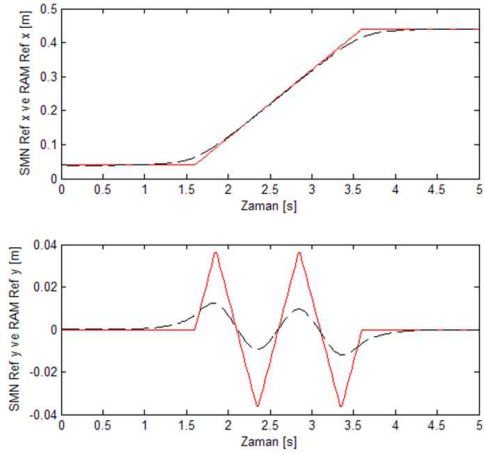


Şekil-5: Tork eşitliği şeması ($x-z$ düzlemi için)



Şekil 6: Önizlemeli kontrol kazancı $G_p(j)$ grafiği

($T=0.01$ s, $z_c=0.614$ m, $Q_e=1$, $Q_x=0$, $R=10^{-6}$)



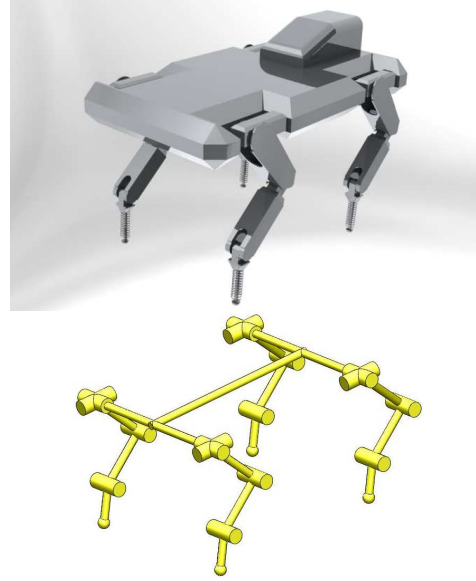
Şekil 7: Şekil 1’de gösterilen beş adımlık tırs ilerlemeye karşılık gelen SMN ve RAM (kesikli eğri) referans yörüngeleri.

4. Simülasyon Sonuçları

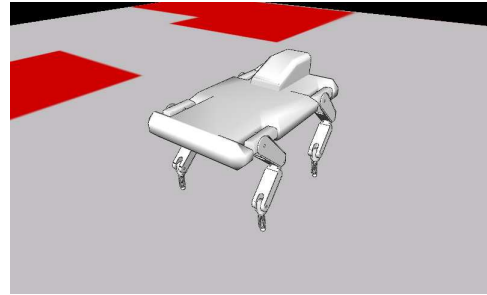
Bu bildiride bahsi geçen dört bacaklı robotun her bir bacağına dört serbestlik derecesi bulunmaktadır. Şekil 8’de görüldüğü gibi, robotun kalçasında iki, dizinde ve bileğinde birer serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bağlantı uzunlukları ve dört bacaklı robotun bağ uzunlukları ve ağırlıkları Tablo 1’de verilmiştir. Simülasyonlar bu robot üzerinde 2. ve 3. Bölümlerde anlatılan tekniklerle elde edilen RAM referanslarıyla gerçekleştirilmiştir. Yürüme yönündeki ayak konum referansları referansları, Şekil 1’de gösterilen ayak basma noktaları arasında uzun adımlarda T_u süreli ve kısa adımlarda T_k süreli enterpolasyonlarla elde edilmiştir. Bu enterpolasyonlarda sinüsoidal fonksiyonlar kullanılmıştır. Ayakların yerden kalkmaları ve inmeleri için z yönünde yine sinüsoidal ayak konum referansları kullanılmıştır. Eklem konum referansları, RAM ve ayak kartezyen konum referansları arasında ters kinematik problemlerinin çözülmesi yoluyla elde edilmiştir. Şekil 9’da animasyon ortamından bir görünüm sunulmuştur. Simülasyonda zemin teması uyarlanabilir cezalandırma temelli bir yöntem ile sağlanmıştır. [25], simülasyon algoritmasının ve zemin teması modellemesinin detaylarını içermektedir. Referans oluşturmada kullanılan değişkenler Tablo 2’de gösterilmiştir. Şekil 10, 11 adımlık bir tırs yürüyüş simülasyonu sırasında kaydedilen robot gövdesi yuvarlama ve yunuslama açılarını sunmaktadır. Bu açıların genlikleri kararlı bir yürüyüş gerçekleştiğini göstermektedir.

Tablo 1: Simülasyon Modeli Parametreleri

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



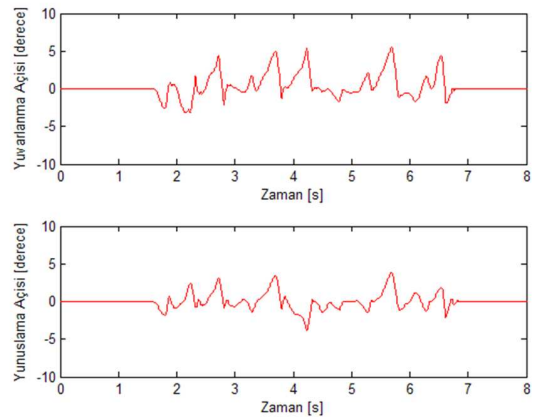
Şekil 8: Eklem yerleşimi



Şekil 9: Animasyon ortamı

Tablo 2: Referans Sentez Parametreleri

Sembo	Tanım	Değer
T_k	Kısa adım süresi	0.25 s
T_u	Uzun adım süresi	0,5 s
A	y yönü ayak basma konumu	0.25 m
B	Adım uzunluğu	0.16 m
h_s	Adım yüksekliği	0.08 m



Şekil 10: 11 adımlık bir tırs simülasyonu sırasında kaydedilen gövde yuvarlanma ve yunuslama açıları

5. Sonuçlar

Bu bildiriye dört bacaklı bir robotun tırs şeklinde ilerleyişi için kararlı bir sıfır moment noktası yörüngesi oluşturulmuştur. Robotun sıfır moment noktası ile ağırlık merkezi arasındaki ilişki DTSM ile modellenmiştir. Robotun ağırlık merkezi yörüngesini oluşturmak için, sıfır moment noktası yörüngesine önzilemeli kontrol uygulanmıştır. Robotun her bir eklemının yörüngesi ağırlık merkezi yörüngesi ile ayak konumreferansları arasında ters kinematik çözülmesi ile elde edilmiştir. Önerilen SMN tabanlı referans ile dört bacaklı bir robotun yürüme simülasyonu yapılmıştır. Simüle edilen robot, 16 cm'lik adımlarla dengeli bir tırs ilerlemesi sergilemiştir. Simülasyon sonuçları, oluşturulan SMN yörüngesinin deneylerde kullanımını motive etmektedir.

6. Kaynakça

- [1] S. Hirose, Y. Fukuda, K. Yoneda, A. Nagakubo, H. Tsukagoshi ve K. Arikawa, et al. "Quadruped Walking Robots at Tokyo Institute of Technology." *IEEE Robotics and Automation Magazine*, s:104-114, 2009.
- [2] S. Hirose, K. Yoneda, R. Furuya, ve T. Takagi, "Dynamic and static fusion gait of a quadruped walking vehicle," In Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems '89, s:199-204, 1989.
- [3] K. Yoneda, H. Iiyama ve S. Hirose, "Intermittent Trot Gait of a Quadruped Walking Machine Dynamic Stability Control of an Omnidirectional Walk In Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, s:3002-3007, 1996.
- [4] K. Yoneda ve S. Hirose, "Dynamic and static fusion gait of a quadruped walking vehicle on a winding path," *Advanced Robotics*, s:125-136, 1994.
- [5] R. Kurazume, K. Yoneda ve S. Hirose "Feedforward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle," *Autonomous Robots*, Cilt: 12, No: 2, s:157-172, 2002.
- [6] H. Takeuchi, "Real Time Optimization for Robot Control using Receding Horizon Control with Equal Constraint," *Journal of Robotics Systems*, Cilt: 20, s:3-13, 2003.
- [7] H. Osumi, S. Kamiya, H. Kato, K. Umeda, R. Ueda ve T. Arai, "Time optimal control for quadruped walking robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, s:1102-1108, 2006.
- [8] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, and D. Stokic, *Biped Locomotion: Dynamics, Stability and Application*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990
- [9] S. Kajita, F. Kahehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi ve H. Hirukawa, "Biped Walking Pattern Generation using Preview Control of the Zero-Moment-Point," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cilt:2, s:1620-1626, 2003.
- [10] K. Sorao, T. Murakami ve K. Ohnishi, "A Unified Approach to ZMP and Gravity Center Control in Biped Dynamic Stable Walking," Proceedings of IEEE ASME Int. Conf. Adv Intelligent Mechatronics, CD-Rom,1987.
- [11] J.H.Park, ve Y.K. Rhee, "ZMP Trajectory Generation for Reduced Trunk Motions of Biped Robots" Proc. IEEE IRSJ Int. Conf Intelligent Robots and Systems, IROS '98 s:90-95, 1998.
- [12] K. Erbatur ve O. Kurt, "Natural ZMP trajectories for Biped Robot Reference Generation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Cilt: 56, No: 3, 2009.
- [13] E. Taskiran, M. Yilmaz, O. Koca, U. Seven ve K.Erbatur, "Trajectory Generation with Natural ZMP References for the Biped Walking Robot SURALP," IEEE International Conference on Robotics and Aut. s:4237-4242, 2010.
- [14] H. Takeuchi, "Development of MEL HORSE," IEEE International Conference on Robotics and Automation s:3165-3170, 2001.
- [15] W. Pengfei, H. Bo ve S. Lining, "Walking research on multi-motion mode quadruped bionic robot based on moving ZMP," IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Cilt:4, s:1935-1940, 2005.
- [16] M. Kalakrishnan, J. Buchli, P. Pastor, M. Mistry ve S. Schaal, "Fast, robust quadruped locomotion over challenging terrain," IEEE International Conference on Robotics and Automation, s:2665-2670, 2010.
- [17] C. Theeravithayangkura, T. Takubo, K. Ohara, Y. Mae ve T. Arai, "Dynamic Rolling-walk Motion by Limb Mechanism Robot ASTERISK," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, s:2659-2664, 2009.
- [18] K. Byl, A. Shkolnik, S. Prentice, N. Roy ve R. Tedrak, "Reliable Dynamic Motions for a Stiff Quadruped," *Springer Tracks in Advanced Robotics*, Cilt:54, s:319-328, 2009
- [19] 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
- [20] K. Erbatur, U. Seven, E. Taskiran, Ö. Koca, M. Yilmaz, G. Kızıltas, M. Ünel, A. Sabanovic, A. Onat, "SURALP: A New Full-Body Humanoid Robot Platform", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009, St. Louis, MO, USA, Ekim 2009.
- [21] [4] 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.
- [22] B. Verrelst, O. Stasse, K. Yokoi, B. Vanderborght, "Dynamically Stepping Over Obstacles by the Humanoid Robot HRP-2," Proc. IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, Cenova-İtalya, Aralık 2006
- [23] M. Tomizuka, Rosenthal, D.E, "On the Optimal Digital State Vector Feedback Controller with Integral and Preview Actions," *Trans. of the ASME, J. of Dyn. Sys. Meas. Contr.*, 101, pp.172-178, 1979.
- [24] T. Katayama, Ohki, T., Inoue, T. and Kato, T., "Design of an Optimal Controller for a Discrete Time System Subject to Previewable Demand," *Int. J. Control*, Vol.41, No.3, pp.677-699, 1985.
- [25] K. Erbatur, A. Kawamura, "A New Penalty Based Contact Modeling and Dynamics Simulation Method as Applied to Biped Walking Robots," CD Proc. FIRA World Congress 2003,Vienna, Austria