

14 Serbestlik Dereceli İki Ayaklı Bir Robotun Dinamik Yürüme Hareketinin Kontrolü

K. Oytun Yapıcı¹, Z. Yağız Bayraktaroğlu²

¹KaleAltınay Robotik ve Otomasyon A.Ş., Tuzla, İstanbul
yapici@itu.edu.tr

²Makina Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, Gümüşsuyu, İstanbul
bayraktar6@itu.edu.tr

Özetçe

Robot biliminin yeni bir boyut kazanmaya başladığı günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte kullanım alanları endüstriyle sınırlı robotların evlerimize girmesi yakın gelecekte mümkün olacaktır. Özellikle son yıllarda insan biçimli robotların gittikçe hızlanan evrimine tanık olmaktadır. Bu bildiride iki ayaklı bir robotun dinamik yürüme hareketinin kontrolü üzerine yapılmış araştırmaların sonuçları aktarılmıştır. Robot ileri-geri dinamik yürüme, merdiven çıkma-inme, yürürken dinamik dönme, yan yan yürüme hareketlerini yapabilmektedir. Adım boyları ve periyodları istenildiği gibi değiştirilerek esnek yürüme hareketleri sağlanabilmektedir.

1. Giriş

Literatürde mevcut iki ayaklı robot prototiplerinin sayısı son 10 yılda artma eğilimi göstermektedir. 1968 yılında Miomir Vukobratovic tarafından iki ayaklı yürüme hareketinin teorik temellerinin sunulmasının ardından [1] 1969 yılında Mihajlo Pupin Enstitüsü'nde ilk aktif antropomorfik dış iskelet yapılmıştır [2]. Bundan sonra Japonya'daki Waseda Üniversitesi'nde 1973 yılında Wabot-1 isimli robotla "statik yürüme" hareketi gerçekleştirilmiştir [3]. Wabot-1 den sonra 1984 yılında ilk "dinamik yürüme" hareketini yapabilen robot WL-10RD yapılmıştır [4]. WABIAN-2R isimli en son model 41 serbestlik derecesine sahiptir. 1475 mm boyunda ve 64.5 kg ağırlığındadır. Hareket kabiliyetini arttırmak amacıyla bacakları 7 serbestlik dereceli olarak tasarlanmıştır ve dizlerini bükmeden yürüyebilmektedir [5].

Japonya'daki diğer kayda değer ticari amaçlı çalışma ise AIST, Kawada Industries firması ve METI desteğiyle yürütülmekte olan HRP projesidir. En son prototipler olan HRP-3 ve HRP-3P 42 serbestlik derecesine sahiptir [6]. 1600 mm boyunda ve 68 kg ağırlığındadır. 2.5 km/saat lik maksimum yürüme hızlarına çıkabilmektedir. Düşük sürtünme katsayılı yüzeylerde yürümesini sağlayan kontrol algoritması bu robotun dikkat çekici bir özelliğidir.

Yine Japonya'da ticari amaçlı diğer bir çalışma Honda firması tarafından yürütülmektedir [7]. 1986 yılında başlayan projede 1997 yılına kadar 10 adet prototip üretilmiştir. Son prototip olan ASIMO 2000 yılında kamuoyuna duyurulmuştur. 34 serbestlik derecesine sahip olan ASIMO 1300 mm boyunda ve

54 kg ağırlığındadır. 5 km/saat hızla yürüyebilmekte ve 6 km/saat hızla koşabilmektedir. 2007 itibariyle 46 adet üretildiği bilinmektedir. Literatürde kullanılan kontrol metodları hakkında bir bilgi yoktur.

İnsan boyutlarındaki diğer bir prototip ise Münih Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen JOHNNIE isimli robottur [8]. 17 serbestlik derecesi bulunmaktadır. 1800 mm boyunda ve 40 kg ağırlığındadır. 2.4 km/saat lik yürüme hızlarına çıkabilmektedir. Ayak bileklerindeki eklemlerin sürüş mekanizmasının vida mekanizması olması dikkat çeken bir özelliğidir.

Yine Münih Teknik Üniversitesi tarafından JOHNNIE den sonra geliştirilmesine başlanan LOLA isimli robot ise an itibariyle yapım aşamasında olup, bu robotun mekanik tasarımı ve kontrolcülere maksimum 5 km/saat lik yürüme hızlarına çıkabilecek şekilde gözden geçirilmiştir [9]. Serbestlik derecesi ise 22 ye çıkarılmıştır.

Diğer büyük ölçekli insansı robot projesi ise Kore İleri Teknoloji Enstitüsü tarafından geliştirilen KHR isimli robottur. 2000 yılında başlayan projede şimdiye kadar 4 prototip yapılmıştır. Son prototip KHR-3 HUBO ismiyle anılmaktadır ve 41 serbestlik derecesine sahiptir [10]. 1250 mm boyunda ve 56 kg ağırlığındadır. 1.25 km/saat lik yürüme hızlarına çıkabilmektedir.

2. Kinematik

İki ayaklı yürüme hareketinin 3 boyutta gerçekleştirilmesi için her bir bacakta 3 tanesi konumlandırmayı 3 tanesinde yönlendirmeyi sağlamak üzere 6 serbestlik derecesinin bulunması yeterlidir. Kalçadaki ve ayak bileğinde motorlar en yoğun çalışmanın olduğu eksenlerdeki motorlar en az çalışmanın olduğu eksenlerdeki motorların ağırlığını taşımayacak şekilde optimum bir sıralamayla yerleştirilmiştir. Gövdeye ise iki volan dengenin kapalı çevrim kontrolünün sağlanması için yerleştirilmiştir ve hareket açısından bir esneklik sağlamamaktadır. Böylece mekanizmanın toplam serbestlik derecesi 14 tür.

2.1. Ters Kinematik

Robotun ayaklarını yer düzleminde istenilen noktalara konumlandırmak için bu konumlara göre bacaklardaki eklem açılarının ne olduklarının bulunması gereklidir. Ters kinematik çözüm [11] dan yola çıkılarak motorların optimum

sıralamasına göre elde edilmiştir. Kalçadaki motorların sıralaması optimum olacak şekilde değiştirildiğinden kalça açılarını veren ifadeler [11] deki kalça açılarını veren ifadelerden farklıdır. Kalçadaki açılarını veren ifadeler ise aşağıdaki gibi yön ilişkisinden bulunur.

$$R_y(-\theta_3)R_x(-\theta_2)R_z(-\theta_1) = R_y(\theta_4)R_x(\theta_5)R_z(\theta_6)R^{(1)-1}R^{(0)}$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$\theta_3 = -\text{Atan2}(r_{13}, r_{33})$$

$$\theta_2 = \text{Atan2}(r_{23}, \sqrt{r_{21}^2 + r_{22}^2})$$

$$\theta_1 = -\text{Atan2}(r_{21}, r_{22})$$
(1)

3. Dinamik

Açık kinematik zincire sahip bir robotun dinamiği kapalı formda ve genel halde aşağıdaki gibi yazılır [12]:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\theta, \dot{\theta}) = \tau$$
(2)

Burada; n serbestlik derecesi olmak üzere, $M(\theta)$, $n \times n$ kütle matrisi; $V(\theta, \dot{\theta})$ coriolis ve merkezci ivmeleri içeren ifadelerin vektörü; $G(\theta)$, $n \times 1$ yerçekimi ivmesini içeren ifadelerin vektörü; $F(\theta, \dot{\theta})$ ise $n \times 1$ sürtünmeleri içeren ifadelerin vektörüdür.

Robotun dinamiğini elde etmek için çok gövdeli sistemlerin dinamiğinin elde edilmesinde kullanılan algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmaların özelliği tekrarlamalı formda olmaları ve bilgisayarda hesaplama açısından efektif olacak şekilde geliştirilmeleridir. Ele aldığımız mekanizmanın serbestlik derecesi oldukça fazladır ve daha sonra buna kolların da eklenebileceği düşünülürse mekanizmanın serbestlik derecesi iki katından fazlasına kadar çıkabilmektedir. Bu nedenlerle Newton-Euler formülasyonuna dayanan Luh-Walker-Paul tarafından geliştirilmiş algoritma [12,13] seçilmiştir. Bu algoritmanın özelliği bütün hesapların uzuvlara bağlı yerel koordinat eksenlerinde yapılması sebebiyle daha az işlem gerektirmesidir. Serbestlik derecesi arttıkça yapılan hesaplamalar doğrusal olarak artmaktadır.

3.1. Tek Destek Fazı

Tek destek fazı tek ayağın yerde olduğu durumdur ve sağ ayak için ve sol ayak için iki farklı durum söz konusudur. Şekil 1'de sol ayağın yerde olduğu durum için hesaplarda kullanılan parametreler görülmektedir. Tek destek fazı için eklem torkları (3) nolu denklemler ile tekrarlamalı formda elde edilir. Bu denklemlerde ileri yayılım döngüsü olarak adlandırabileceğimiz ilk döngüde sırasıyla yere basan ayakta başlayarak havadaki ayağa kadar uzuvlara atanmış koordinat takımlarının açısal hızları, açısal ivmeleri, çizgisel ivmeleri, uzuvların ağırlık merkezlerinin çizgisel ivmesi, ağırlık merkezlerindeki kuvvetler ve momentler hesaplanır. Geri yayılım döngüsü olarak adlandırabileceğimiz ikinci döngüde ise bu uzuvların ağırlık merkezlerine etkiyen kuvvetler ve momentler havadaki ayaktan başlayarak yere basan ayağa kadar bir uzuvdan diğerine etki tepki prensibiyle aktarılır. Motorların bulunduğu eksenlere denk gelen momentler ise motorlar tarafından dengelenmesi gereken momentler olarak elde edilir.

$i: 0 \rightarrow 11$

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \hat{e}_{i+1}$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} \hat{e}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} \hat{e}_{i+1}$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}R^i (\dot{\omega}_i \times {}^i P_{i+1} + \omega_i \times ({}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{v}_i)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} = {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^i P_{C_{i+1}} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^i P_{C_{i+1}}) + \dot{v}_{i+1}$$

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}}$$

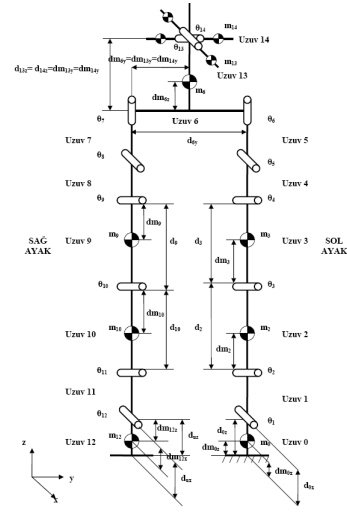
$${}^{i+1}N_{i+1} = I_{C_{i+1}} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times I_{C_{i+1}} {}^{i+1}\omega_{i+1}$$
(3)

$i: 12 \rightarrow 1$

$${}^i f_i = {}^{i+1}R^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i$$

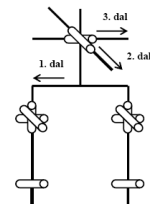
$${}^i n_i = {}^{i+1}N_{i+1} + {}^{i+1}R^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}^{i+1}R^{i+1} f_{i+1}$$

$$\tau_i = {}^i n_i^T \hat{e}_i$$



Şekil 1: Dinamik hesaplarda kullanılan parametreler

Bu algoritma seri kinematik zincire sahip robot kolları için geliştirilmiş olduğundan bu mekanizmaya uyarlanması gerekmektedir [14]. Kinematik zincir Şekil 2'de görüldüğü gibi gövdede dallanarak üçe ayrılmaktadır. Buna göre gövde uzvunda algoritmanın ilk döngüsü üçe ayrılır. İkinci döngüde ise her bir daldan gelen kuvvet ve moment etkileri gövdede toplandıktan sonra döngü devam eder.



Şekil 2: Kinematik zincirdeki dallanma

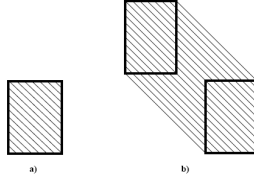
3.2. Çift Destek Fazı

Çift destek fazında 12 serbestlik dereceli manipülatör olarak kabul edilen mekanizmanın uç noktası olarak kabul edilen ayağa etkiyen yer temasından kaynaklanan kuvvetler ve momentler algoritmaya direk olarak dahil edilir. Bu durumda geri yayılım esnasında bu kuvvetlerin ve momentlerin etkileri

her iki bacakta motorlar tarafından dengelenmiş olacaktır. Bu kuvvetler ve momentler ise 6 eksenli kuvvet ve moment sensörleri ile ölçülebilir.

4. İki Ayaklı Yürüme Hareketinin Modellenmesi

Mekanizma yere şekil bağlı olmadığından ötürü ayaklarla yer arasında direk olarak kontrol edilemeyen 6 serbestlik derecesi mevcuttur. Mekanizmanın dengesini kaybetmemesi için denge ile ilgili bir kavram olan sıfır moment noktasının(SMN) Şekil 3’de görüldüğü gibi destek çokgeni olarak adlandırılan çokgen içinde kalması gereklidir. Ayağın yerle olan kuvvet bağının korunabilmesi sıfır moment noktası tanımından [14,15] yola çıkılarak tasarlanan kontrolcülerle sağlanmaktadır.



Şekil 3: Destek çokgenleri a) tek ayak yerde b) iki ayak yerde

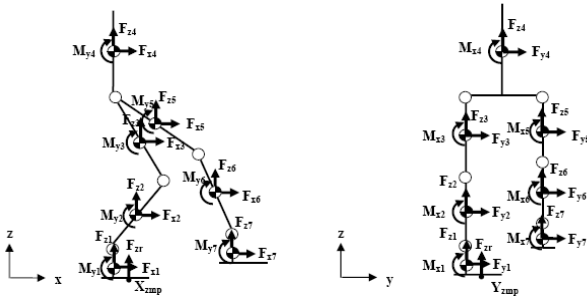
Tek ayak yere bastığı durumda destek çokgeni ayağın geometrisinin kapsadığı alan olacaktır. İki ayağın yerde olduğu durumda ise iki ayağın köşelerini birleştiren çokgen destek çokgeni olacaktır.

4.1. Sıfır Moment Noktası

Yürüme esnasında mekanizmaya etkileyen kuvvetler yerçekimi ivmesi ile atalet ivmelerinin meydana getirdiği kuvvetler ile yerden gelen tepki kuvvetleridir. Etki kuvvetleri ile tepki kuvvetlerinin dengesini yer düzleminde momentlerin sıfır olduğu bir noktaya göre yazarak sıfır moment noktasının konumunu elde edebiliriz. Mekanizmanın dengesini kaybetmeden yürüyebilmesi için ise bu noktanın destek çokgeni içinde kalması gereklidir. Sıfır moment noktasının yer düzlemindeki konumunu Şekil 4’ten yola çıkarak aşağıdaki gibi elde edebiliriz [16].

$$x_{zmp} = \frac{\sum (F_{ix} z_i - F_{iz} x_i) + \sum M_{iy}}{\sum F_{iz}} \quad (4)$$

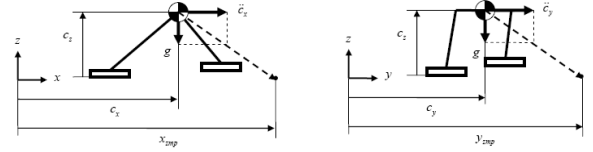
$$y_{zmp} = \frac{\sum (F_{iy} z_i - F_{iz} y_i) + \sum M_{ix}}{\sum F_{iz}}$$



Şekil 4: Uzuvlara etkileyen kuvvetler ve momentler (cephe ve profil düzlemi)

4.1.1. Doğrusal Ters Sarkaç Modu

(4) nolu denklemlerde de görüldüğü üzere sıfır moment noktasının konumu oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan bir analitik ifadeyle belirlenir. Bu noktanın destek çokgeninin içinde kalacak şekilde kontrol edilebilmesi için bu ifadeler daha basit bir model kullanılarak basitleştirilmiştir [17]. Buna göre mekanizmayı Şekil 5’de görüldüğü gibi ağırlık merkezinde toplanmış bir noktasal kütleyle indirgeyerek bir ters sarkaç olarak ele aldığımızda ve ağırlık merkezinin z eksenindeki hareketi kısıtlandığında mekanizmaya etkileyen kuvvetler yerçekimi ivmesinden kaynaklanan ağırlık kuvveti ve yataydaki çizgisel atalet ivmesinden kaynaklanan kuvvet olacaktır.



Şekil 5: Ağırlık merkezindeki ivmeler (cephe ve profil düzlemi)

Mekanizmanın hareketini Şekil 5’teki gibi cepheden ve profilden olacak şekilde iki ayrı düzlemde inceleyecek olursak bu düzlemlerdeki kuvvetlerden yer düzlemindeki sıfır moment noktasına göre moment aldığımızda aşağıdaki denklemleri elde ederiz.

$$c_x - \frac{c_z}{g} \ddot{c}_x = x_{zmp} \quad (5)$$

$$c_y - \frac{c_z}{g} \ddot{c}_y = y_{zmp}$$

Bu denklemler (4) nolu denklemlerin basitleştirilmiş halidir ve ağırlık merkezinin z eksenindeki konumu sabitlendiğinde ters sarkacın dinamiğinin doğrusal olarak elde edildiği ve cephe ile profil düzlemleri için aynı denklemlerin elde edildiği görülmektedir. Bu durum diferansiyel denklemlerin çözümünü basitleştirerek istenilen sıfır moment noktasının konumuna göre ağırlık merkezinin x ve y eksenlerindeki yörüngelerinin hesaplanmasını kolaylaştırmaktadır. Bu basitleştirilmiş model Doğrusal Ters Sarkaç Modu (DTSM) olarak adlandırılmaktadır.

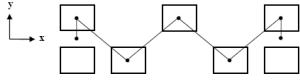
4.2. Dinamik Yürüme

Mekanizmanın ağırlık merkezinin sabit hızla hareket ettiğini veya ivmelenmesinin ihmal edilebilir kadar küçük olduğunu varsayacak olursak sıfır moment noktasının ağırlık merkezinin konumuna bağlı olduğu statik yürüme olarak adlandırılan özel bir hal elde edebiliriz. Ağırlık merkezinin ivmelenmesinin yeteri kadar küçük kalması için statik yürüme esnasındaki hareketlerin yavaş olması ve robotun çift destek fazında daha uzun süre kalması gerekmektedir. Bu nedenle statik yürüme hareketi ile yüksek hızlara çıkabilmek mümkün değildir. Dinamik yürüme hareketi yürümenin kontrolünü zorlaştırsada yüksek hızlara çıkabilmek açısından gereklidir.

4.2.1. Ağırlık Merkezi Yörüngesi

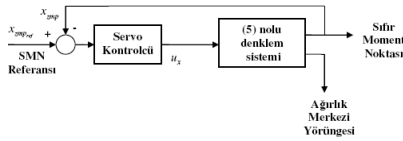
Dinamik yürümede ağırlık merkezi yörüngeleri (5) nolu denklemlerle verilen basitleştirilmiş modelden elde edilen diferansiyel denklemlerin çözülmesi yolu ile elde edilir.

Yürüme esnasında destek çokgeni ayağın geometrisiyle aynıdır ve yer düzleminde bir bölgedir. Sıfır moment noktasının yürüme hareketi boyunca ayağın orta noktasında kalmasını sağlamak kararlılık açısından daha iyidir. Böylece sıfır moment noktasının ayak kenarlarına olan mesafesi büyük olacaktır ve bu nokta etrafındaki sapmalar kararlılık açısından büyük problem oluşturmayacaktır. Buna göre sıfır moment noktası referansı Şekil 6'daki gibi verilebilir.



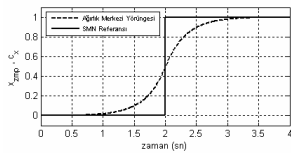
Şekil 6: Sıfır moment noktası referansı

(5) nolu diferansiyel denklemlerin çözümü için ise diferansiyel denklemlerin çözümünün bir servo kontrol problemi olarak ele alındığı durum uygun bulunmuştur [18]. Ağırlık merkezinin ivmesinin zamana göre türevini yeni bir değişken olarak tanımladığımızda; (5) nolu denklemler, tanımlanan yeni değişken giriş, sıfır moment noktasının konumu ile ağırlık merkezinin konumu çıkışlar olacak şekilde durum-uzay gösteriminde uygun bir dinamik sisteme dönüştürülürse Şekil 7'de gösterildiği gibi sıfır moment noktası konumu geri besleme olarak alınarak istenilen sıfır moment noktası referansını takip edecek şekilde bir kontrol gerçekleştirilerek diğer çıkış olarak ağırlık merkezi yörüngesi elde edilmiş olur.



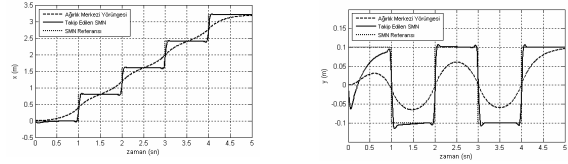
Şekil 7: DTSM'nin servo kontrol ile çözümü

Dinamiğin kararsız olması sebebiyle istenilen SMN referansının takip edilmesinde herhangi bir kontrolcü kullanılamamaktadır. Şekil 8'deki yörüngeden de görüldüğü üzere ağırlık merkezi sıfır moment noktası referansında değişim meydana gelmeden önce hareketlenmeye başlamaktadır. Bu durumun kontrolle mümkün olabilmesi için referansın gelecekteki değerlerine bakarak kontrol uygulayan bir kontrolcünün kullanılması gereklidir. Literatürde referansın gelecekteki değerlerine bakarak kontrol uygulayan öngörülebilir kontrol tekniğinin [19] HRP isimli robot üzerinde başarılıyla uygulandığı çalışmalar mevcuttur [18].



Şekil 8: Ağırlık merkezi yörüngesinin SMN referansından önce değişimi

Yapılan araştırmalarda model öngörülebilir kontrolün öngörülebilir kontrolle benzer olduğu sonucuna varılmıştır [20]. Bu nedenle servo kontrolcü olarak bir model öngörülebilir kontrolcü tasarlanmıştır. Bu kontrolcü ile elde edilen ağırlık merkezi yörüngeleri Şekil 9'daki gibidir.



Şekil 9: SMN referansı, takip edilen SMN ve ağırlık merkezi yörüngesinin x ve y eksenli referansları

5. Kontrol

Mekanizmanın referans eklem yörüngelerini hassas bir şekilde takip edebilmesi amacıyla motorlara uygulanması gereken torklar (3) nolu algoritma kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntem hesaplanmış moment yöntemi olarak bilinmektedir. Hesaplanmış moment yöntemiyle elde edilen torklar eklem referanslarından elde edilmektedir. Eklem referansları ise çift destek fazında her iki ayağın, tek destek fazında ise yere basan ayağın yerden ayrılmamasını sağlayacak şekilde verilmelidir. Bu nedenle dinamik yürümenin kontrolü açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere iki ayrı kontrolcü ile sağlanmaktadır.

5.1. Dinamik Yürümenin Açık Çevrim Kontrolü

Bu kontrol yaklaşımında model öngörülebilir kontrol ile SMN referansını takip edecek şekilde elde edilmiş ağırlık merkezi yörüngeleri ağırlık merkezine referans olarak verilmektedir. Mekanizmanın ağırlık merkezini gövde üzerindeki ters kinematiğin eldesinde referans olarak kullanılan noktaya taşıyacak olursak, yörüngeleri bu noktaya referans olarak verebiliriz. Gerçekte ağırlık merkezinin yeri hareket esnasında sürekli olarak yer değiştirmektedir. Fakat gövdeden çıkan uzuvların maksimum açıklıktaki ağırlık merkezlerinin yeri gövdeye yakın olduğu takdirde ve bu uzuvların ağırlıkları gövdenin ağırlığına göre oldukça düşük kaldığı takdirde bu uzuvların hareketi sonucunda meydana gelecek ağırlık merkezinin sabit kabul edilen yerindeki sapmalarda küçük olacaktır.

5.2. Dinamik Yürümenin Kapalı Çevrim Kontrolü

Kullanılan modelin basitleştirilmiş bir model olması, ağırlık merkezinin gövdedeki bir noktada sabit kaldığı varsayımı, pratikte meydana gelebilecek gürültü ve bozucu gibi hesaba katılmayan etkenlerin varlığı ve merdiven çıkma ile dönmeler esnasında modelden sapmaların meydana gelmesi nedeniyle oluşacak hataların giderilmesi için sıfır moment noktasının yerinin kapalı çevrim kontrol edilmesine ihtiyaç vardır. Bu nedenle gövdeye Şekil 10'daki gibi iki volan eklenmiştir.

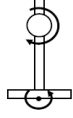


Şekil 10: Gövdeye yerleştirilmiş volanlar

Her volanı birbirinden bağımsız olarak ele alıp sürtünme etkilerinin de hesaba katmadığımız takdirde volanların dinamiği aşağıdaki gibi elde edilir.

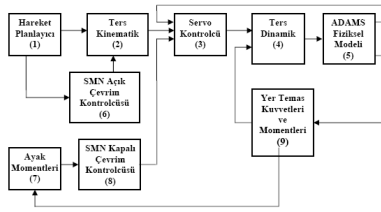
$$J\ddot{\theta} = \tau \quad (6)$$

Bu denklemdeki tork değeri Şekil 11'de görüldüğü gibi ayakların orta noktasından ölçülen momente eşitlendiğinde volanların ivme referansları elde edilir. Bu volanların uygun biçimde ivmelendirilmesiyle ayak ortasındaki momentler dengelenmiş olacaktır.



Şekil 11: Ayak ortasından ölçülen moment ile volandaki dengeleyici moment

Kontrol sisteminin genel yapısı ve blok diyagramı Şekil 12'de görüldüğü gibidir.



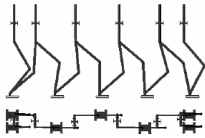
Şekil 12: Kontrol sisteminin genel yapısı ve blok diyagramı

6. Benzetim Sonuçları

Benzetimler için fiziksel ortam olarak ADAMS yazılımı kullanılmıştır. Kontrolcülerin tasarlanması için ise MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Bu iki yazılım etkileşimli olarak çalışabilmektedir. İki yazılım arasındaki veri alışverişi sabit örnekleme zamanlarında yapılmaktadır ve bu örnekleme zamanı 0.0005 saniye olarak belirlenmiştir. Örnekleme zamanının belirlenmesinde en büyük etkenin yer temas kuvvetleri olduğu görülmüştür. MATLAB yazılımında ise çözücü olarak ode5 tercih edilmiştir ve hesap adım zamanı veri alışverişi için seçilen zamanla aynıdır.

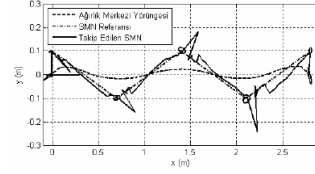
6.1. İleri Yürüme

Benzetim sonuçlarının üstüste bindirilmiş görüntüsü Şekil 13'de görüldüğü gibidir.



Şekil 13: 70 cm'lik adımlarla ileri yürüme hareketinin üstüste bindirilmiş görüntüsü

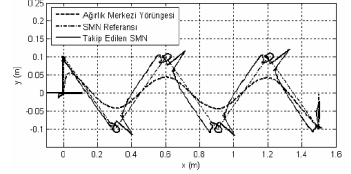
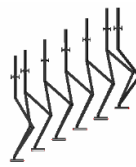
0.5 sn'lik adım periyodu ve 70 cm'lik adım boyları için elde edilmiş SMN referansı, takip edilen SMN ve ağırlık merkezi yörüngesi Şekil 14'te görüldüğü gibidir.



Şekil 14: SMN referansı, takip edilen SMN referansı ve ağırlık merkezi yörüngesi

6.2. Merdiven Çıkma

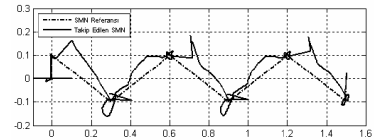
Merdiven çıkma esnasında ağırlık merkezi z ekseninde sabit hızla yükseltilmektedir. Böylece z ekseninde ivmelenme olmayacaktır ve z ekseninde hareketin sınırlı olduğu duruma göre yazılmış (5) nolu denklemler geçerliliğini koruyacaktır. Fakat sabit kabul edilen c_z parametresinden sapmalar meydana gelmektedir. Benzetim sonuçlarının üstüste bindirilmiş görüntüsü, SMN referansı, takip edilen SMN ile ağırlık merkezi yörüngesi Şekil 15'deki gibidir.



Şekil 15: Merdiven çıkma hareketi, SMN referansı, takip edilen SMN ve ağırlık merkezi yörüngesi

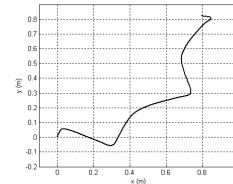
6.3. Dönerek Yürüme

Dönmeler esnasındaki merkezkaç kuvvetinin telafisi için, Kısım 5.2'de bahsedilen dengenin kapalı çevrim kontrolü için gövdeye yerleştirilmiş volanlar kullanılmaktadır. Bu benzetimden elde edilmiş hareketin kuşbakışı üstüste bindirilmiş görüntüsü, SMN referansı ve takip edilen SMN Şekil 16'daki gibidir.



Şekil 16: Dönerek yürüme hareketi, SMN referansı ve takip edilen SMN referansı

Ağırlık merkezinin yörüngesi ise Şekil 17'deki gibidir. Burada ağırlık merkezinin x-y düzleminde döndüğü görülmektedir.



Şekil 17: Dönerek yürüme hareketindeki ağırlık merkezi yörüngesi

6.4. Yan Yan Yürüme

Yan yan yürümede ağırlık merkezine ve ayaklara sadece y ekseninde referanslar verilmektedir. Bu benzetimden elde edilmiş hareketin üstüste bindirilmiş görüntüsü Şekil 18'deki gibidir. SMN referansı düz bir çizgi üzerinde olduğundan elde edilen sonuçlar anlaşılır olmayacağından SMN referansı takip edilen SMN referansı ve ağırlık merkezi yörüngesi burada verilmemiştir.



Şekil 18: Yan yan yürüme hareketi

7. Tartışma

Tasarlanan kontrolcülerin temel hareketler olarak kabul edilen ileri-geri yürüme, merdiven inme-çıkma, yan-yan yürüme ve dönerek yürüme hareketlerini başarıyla kontrol edebildiği benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. Özellikle kontrolü zor olan merdiven inme-çıkma ile dönerek yürüme hareketleri kapalı çevrim kontrol sayesinde sağlanabilmektedir. Gövdedeki volanların ataletleri çok küçük değerlerde olduğundan gerekli torkların sağlanması oldukça yüksek güç gerektireceğinden bu yöntemin pratikte uygulanması imkansız olmaktadır.

Pratikte yüksek yürüme hızlarına çıkmayı engelleyen faktörler ise mekanizmanın ağırlığı, yer tepki kuvvetlerinin dinamiğe etkisi ve doğrusal olmayan dinamiğin baskın karakter göstermesi olmaktadır. Bu da kontrolcülerin mümkün olduğu kadar hassas ve mekanizmanın mümkün olduğu kadar hafif tasarlanmasını gerektirmektedir. Bunun dışında diğer bir olumsuz etki ise sağ ayağın yere bastığı durumdaki dinamik model ile sol ayağın yere bastığı durumdaki dinamik model arasındaki geçişte, süreksizliklerin torklarda sıçramalara neden olmasıdır. Modellemenin gövde uzvu temel alınarak yapılmasının bu durumun önüne geçeceği düşünülmektedir.

8. Teşekkür

Bu çalışma 106M340 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmektedir.

9. Kaynakça

- [1] Vukobratovic, M. and Juricic, D., 1968. "A contribution to the synthesis of biped gait", IFAC Symp. Technical and Biological Problem of Control, Yerevan, USSR.
- [2] Vukobratovic M., Hristic D. and Stojiljkovic Z., 1974. "Development of active anthropomorphic exoskeletons", *Medical and Biological Engineering*, 12, 66-80.
- [3] Kato, I., Ohteru, S., Kobayashi, H., Shirai, K. and Uchiyama, A., 1973. "Information-power machine with senses and limbs", Proc. CISMIFToMM Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators, Udine, Italy, 12-24.
- [4] Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y. and Kato, I., 1985. "The realization of dynamic walking by the biped walking

robot WL-10RD". Proceedings of 1985 International Conference on Advanced Robotics (ICAR'85), 459-466.

- [5] Ogura, Y., Shimomura, K., Kondo, H., Morishima, A., Okubo, T., Momoki, S., Lim H. and Takanishi, A., 2006. "Human-like walking with knee stretched, heel-contact and toe-off motion by a humanoid robot", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Beijing, October 2006, 3976-3981.
- [6] Akachi, K., Kaneko, K., Kanehira, N., Ota, S., Miyamori, G., Hirata, M., Kajita, S. and Kanehiro, F., 2005. "Development of humanoid robot hrp-3", IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 50-55.
- [7] Hirose M. and Ogawa, K., 2007. "Honda humanoid robots development", *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 11-19.
- [8] Pfeiffer, F., Löffler, K., Gienger, M. and Ulbrich, H., 2004. "Sensor and control aspects of biped robot Johnnie", *International Journal of Humanoid Robotics (IJHR)*, 1-3, 481-496.
- [9] Lohmeier, S., Buschmann, T., Ulbrich, H. and Pfeiffer, F., 2006. "Modular joint design for a performance enhanced humanoid robot", Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Aut.(ICRA), Orlando, USA, 88-93.
- [10] Park, J. L. I.W. , Kim, J.Y. and Oh, J., 2005. "Mechanical design of humanoid robot platform khr-3 (kaist humanoid robot-3: Hubo)", IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, December 5, 321-326.
- [11] Shih, C-L., Gruver W.A. and Lee, T-T., 1993. "Inverse kinematics and inverse dynamics for control of a biped walking machine", *Journal of Robotic Systems*, 4, 531-555.
- [12] Craig, J.J., 1989. *Introduction to robotics: mechanics and control - Third edition*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., USA.
- [13] Luh, J.Y.S., Walker, M.W. and Paul, R.P.C., 1980. "On-line computational scheme for mechanical manipulators", *J. Dyn. Sys. Meas. & Contr.*, 102-2, 69-76.
- [14] Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D. and Stokic, D., 1990. *Biped locomotion: dynamics, stability, control and application*, Springer Verlag.
- [15] Vukobratovic, M. and Borovac, B., 2004. "Zero-moment point-thirty five years of its life", *International Journal of Humanoid Robotics*, 1, 157-173.
- [16] Shih, C.L., Zhu, Y. and Gruver, W.A., 1991. "Optimization of the biped robot trajectory, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics", Charlottesville, VA, USA, October 13-16, 899-903.
- [17] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H., 2001. "The 3D linear inverted pendulum mode: a simple modeling for a biped walking pattern generation", Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Maui, HI, USA, September 29, 239-246.
- [18] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H., 2003. "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2, 1620-1626.
- [19] Katayama, T., Ohki, T., Inoue, T. and Kato, T., 1985. "Design of an optimal controller for a discrete-time system subject to previewable demand", *International Journal of Control*, 41-3, 677-699.
- [20] Hess, R.A. and Jun, Y.C., 1988. "Generalized predictive control of dynamic systems", Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 2, 844-849.