İnsansı Robotun Kontrol Sistem Dizaynı
Control System Design of a Humanoid Robot

Davut Akdaş[1],Sabri Bicakcı[2]

[1,2]Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Balıkesir Üniversitesi
akdas@balikesir.edu.tr, sbicakci@balikesir.edu.tr

Özet

Bu makale Balıkesir Üniversitesinde TÜBİTAK destekli sürdürülmekte olan insansı robot projesinin kontrol sistemi tanıtılmaktadır. Bu insansı robot projesi araştırmacıların daha önceki insansı robotu olan "Gonzalez"in bir devamı niteliğindedir. Bu makalede kontrol sistemi tasarımı ile birlikte, kontrol sisteminin esas aldığı matematik modellemeden de bahsedilmektedir. Robotun matematik modeli son derece karmaşık olabilmekte ve pratik olarak da herhangi bir yarar sağlaması güç olabilmektedir. Bu nedenle modellemede yapılırken, araştırmacılara sistem karakteristiği hakkında en fazla bilgi verecek şekilde modeller elde edilmiştir. Kontrol sistemi tasarımı yapılırken, uygulaması basit ve robota herhangi bir zarar vermeyecek teknikler ilk olarak uygulanmıştır. Daha sonra, sistemin kararlılığını arttırabilecek diğer teknikler de kullanılmıştır. Burada bahsi geçen teknikler başarı ile uygulanmıştır. Bu makalede, sayfa sınırlaması nedeniyle sadece başlıca simülasyon ve deneysel grafikler sunulmuştur.

Abstract

This paper gives details of control system of the humanoid robot at Balikesir University, which is sponsored by TUBITAK. This research project is the continuation of researcher's previous humanoid robot "Gonzalez". As well as giving details of the control system, this paper also discusses the mathematical models on which the robot's control system based. The mathematical system of the robot can be very complicated and hardy any use of. Therefore, researchers aim to derive mathematical equations in a way that they can be most useful. For implementation of control system simple and potentially least damaging techniques initially implemented. Later, more sophisticated control techniques used to increase system's robustness. All these techniques successfully tested. Due to maximum number of page limitation, some of the simulation and experimental results presented here.

1. Giriş

İnsan şeklindeki robotlar muhtemelen gelecek 20–30 yıl içerisinde toplumda yerlerini almaya başlayacaklardır. Yaşadığımız ortam biz insanlar için dizayn edildiği için, yeni teknolojinin de bu ortamda uyumlu çalışması gerekmektedir. İnsan şeklindeki robotlar yönleriyle bizlere hizmet edebilecek en uygun yapıya sahiptirler [1]. İnsan şeklindeki robotlarla ilgili her araştırma ile bu tür robotları daha fazla geliştirmenin yanında, insanları da değişik yönlerden tanımamak mümkün olmaktadır (örneğin düztabanlı robotlar yapılarak, düztabanın insan yürümesine olan etkileri kolaylıkla incelenebilmektedir). Ayrıca, bu alanda geliştirilecek olan dizayn, kontrol ve yürüme teknikleri diğer bilimsel alanlara da kolaylıkla aktarılabilir. Örneğin, bel altı felçli olan kişilere, bir çeşit sürücü ünitesi ile tahrikli pantolon robotlar yapılabilir ve bu kişilere hayatlarını biraz daha normal yaşama imkânı sağlanabilir.

Günümüzde insan şeklindeki robotların öncüsü olan Asimo adlı robot, tüm dünyada bilimsel bir heyecan uyandırmış ve son yıllarda bu alanda yapılan araştırmaların sayısında ciddi bir sağlanmıştır. Toplam araştırmacı gruplarının sayısı 150–200 arasındadır. Bu rakamın neredeyse yarısını Japon araştırma grupları oluşturmaktadır. Robotların doğrudan hareketleriyle ilgili olarak başlıca beş kategoride araştırma yapılamaktadır. Bunlar; mekanik dizayn, sürücüler ve güç sistemleri, yürümenin verimliliği, algılayıcı elemanlar (sensorlar) ve kontrol sistem teknikleridir.

Çok değişik kontrol sistemleri, birçok araştırmacı tarafından farklı anatomik yapıdaki robotlarda test edilmiştir. İlk yıllarda Bang-bang türü kontrol sistemi hidrolik sürücüleri kontrol etmede kullanılmıştır [2]. Observer tabanlı modern kontrol teknikleri ile tek düzlemde (planar) robot kontrolü başarıyla yapılmıştır [3]. Başka bir teknik de sanal yay ve sönümleyici elemanları robotun kontrol sistemine ekleyerek robotun kararlığının sağlanmasıdır [4]. Yapay sinir ağları (Neural Networks) kullanılarak 10 serbestlik dereceli robotun kararlılığı sağlanmıştır. Ayak dönme göstergeci (foot rotation indicator, FRI) robotların kararlı yürümesinde bir ölçü olabileceği ortaya konulmuştur. Bu teknik Zero Moment Point (Momentlerin sıfır olduğu nokta, ZMP) ile sadece robot kararlı olduğunda aynı sonucu vermektedir. Kuvvetlerin dengelenmediği durumlarda ZMP robotun dengeli olduğunu gösterirken, FRI robotun dengesizliğinin gerçek bir göstergesi olabilmektedir [5]. Robotun kendisine uygulanan harici kuvvetleri algılayabilmesi ve ZMP'nin yerini destek ayağının altında tutacak şekilde eklemlerin yürüme yörüngelerini değiştirmesi, robotun gerçek zamanlı yörünge tayinini

gerektirmektedir [6]. Robotun yürüme kararlılığını sağlayacak eklem yörüngeleri kinematik eşitliklerin çözümlerinden bulunabildiği gibi [7], bazı araştırmacılar doğrudan insan yürüme hareketlerini kamera aracılığı ile algılayıp, uygun dönüşümler uygulandıktan sonra robotlarında kullanmışlardır [8]. Bu tür teknikler robotun bulunduğu ortam hakkında önceden kabullerin yapılmasını gerektirmektedir. Kontrol sisteminin parametreleri simülasyonlarla önceden yaklaşık olarak belirlenmekte ve deneysel olarak optimum değerleri bulunmaya çalışılmaktadır. Bu deneysel parametre belirlenmesi doğrudan insan gözlemlerine dayalı olabildiği gibi bir çeşit gerçek zamanlı parametre belirleme algoritması aracılığı ile de yapılabilmektedir [9].

Robotun kontrol sistemi, model tabanlıdır. Bu nedenle, ikinci bölümde, kullanılan matematik modeller kısaca açıklanmıştır. Üçüncü kısım robotun kontrol sistemini tanımlamaktadır. Matlab Simülasyonları dördüncü kısımda ve deneysel sonuçlar beşinci kısımda verilmiştir. Sonuçlar makalenin son kısmını oluşturmaktadır.

2. Matematik Modeller

Robotu karakteristiğini belirlemek için kinematik ve dinamik denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler kendi aralarında ayrıca düzlemsel veya üç boyutlu olarak da ayrılmaktadır. Robotun yapacağı harekete göre veya gerçek zamanlı parametre belirlenmesi gerekebilmekte bu durumda non-linear eşitlikler robotun çalışma noktalarında Taylor serisine açılarak lineerleştirilebilmektedir. Günümüzde modern yazılım programları matematik modellerin sembolik olarak elde edilmesine olanak vermektedir. Sembolik olarak elde edilen denklemlerin doğruluğunun kontrolü kolay bir şekilde yapılabilmekte ve her eklemin etkisi de gözlemlenebilmektedir. Nümerik olarak gerçekleştirilen hesaplamalar çok daha kısa sürelerde elde edilebilmesine rağmen modelin doğruluğunun sorgulanması karmaşık sistemlerde neredeyse imkânsızdır. Sembolik hesaplamalar, serbestlik derecesinin karesiyle orantılı olarak katlanarak hesaplama süresi ve denklemlerin karmaşıklığı artmaktadır. Bu nedenle robotun tasarımı yapılırken matematik modelin çıkarımı ve yapısını basitleştirecek dizaynların yapılması uygun olacaktır. Robotun yapısının mümkün olduğunca simetrik olması ve aynı düzlemde eklemlerin birbirini takip etmesi, matematik modelin yapısını sadeleştirebilmektedir. Balıkesir Üniversitesindeki insansı robot da bu faktörler göz önünde bulundurularak dizayn edilmiştir.

Kinematik denklemler ağırlık merkezinin bileşenlerinin yerini hesaplamada eşitlik (1) deki gibi yazılabilir.
m_i robotun *i* ekleminin tek noktada toplanmış kütlesi.
(i= 1,2,..,k), *k* hesaba katılan eklem sayısı. r_i robotun *i* ekleminin kütle merkezini gösterir vektör. $i=1,...,k$. q_j iki eklem arasındaki mesafe $j=2,...,k$. n^c ise R^c de her bir vektörün doğrultusunu ifade eder. Bu durumda, 3 üç boyutlu (3D), non-linear denklem, F_3 , kapalı formada aşağıda verilmiştir.

$$F_3 = m_1 r_1 n^1 + m_2 (q_2 n^1 + r_2 n^2) + ... + m_k (... + q_k n^{k-1} + r_k n^k) \quad (1)$$

İki ayağın öne doğru, birbirinden açıklığı $SepSn_1$ ise,

$$SepSn_1 = q_2 Sin(x_1) + q_3 Sin(x_1 + x_2) - q_5 Sin(x_1 + x_2 - x_3 - x_4) - q_6 Sin(x_1 + x_2 + x_3 - x_4 - x_5) \quad (2)$$

İki ayağın zemine göre birbirinden yükseklik farkı $SepSn_3$ ise,

$$SepSn_3 = q_2 Cos(x_1) + q_3 Cos(x_1 + x_2) - q_5 Cos(x_1 + x_2 + x_3 - x_4) - q_6 Cos(x_1 + x_2 + x_3 - x_4 - x_5) \quad (3)$$

Eşitlik (2) ve (3) düzlemsel olarak iki ayağın birbirine göre mesafesini vermektedir. Bu iki denklem 3D olarak da hesaplamıştır fakat burada gösterilmemiştir. Matlab da yapılan simülasyonlar, robotun çalışma noktasına yakın yörüngelerde 2D ve 3D denklemlerin birbirine çok yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Özellikle gerçek zamanlı orak eklem yörüngelerinin belirlenmesi ve eklem uzuvlarının yerlerinin hesaplanmasında mevcut robotta da önemlidir. Robotun eklemlerini sürmek için elektrik motorları kullanılmıştır, tipik olarak bu motorların dişli kutusuyla birleştirilmiş modeli (4) verilmiştir.

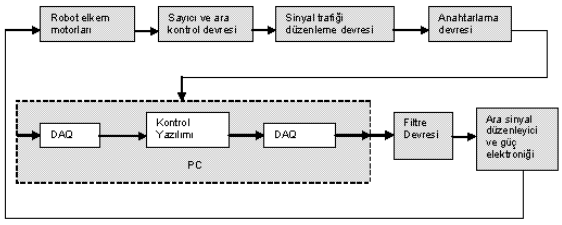
$$M = N\eta \frac{K_t}{R_a} \vartheta - \eta \frac{K_t}{R_a} K_b N^2 \dot{\theta} - J_m \eta N^2 \ddot{\theta} \quad (4)$$

K_t moment katsayısı, R_a motor direnci, J_m motorun atalet momenti, η verimlilik, N dişli kutusu oranı, v uygulana gerilim, $\dot{\theta}$ açısal hız, $\ddot{\theta}$ açısal hızlanmadır.
Robotun dinamik modeli kapalı formada aşağıdaki eşitlik (5) verilmiştir. A ve B katsayı matrisleri, f harici kuvvetler, E^T robotun hareketini sınırlandırıcı denklem katsayı matrisidir.

$$A(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = f + E^T(\theta)\Lambda \quad (5)$$

Mevcut robotun dinamikleri hakkında bilgi özdeğer (eigenvalue) vektörünün değerlerinden bulunmuştur. Bilgisayar ortamında kesik zamanlı modelin, Analog modelle aynı özelliklere sahip olabilmesi için 320Hz örnekleme süresiyle, kesik süreli model elde edilmiştir. Bu model aşağıdaki eşitlik (6) da olduğu gibi "state space " formunda ifade edilmiştir. Bu model robotun yan düzlemdeki eklemlerinin oluşturduğu yapının karakteristiğini ifade eder. Benzer bir eşitlik ön düzlemdeki eklemler için de çıkarılmıştır.

$$\begin{aligned} x_s(k+1) &= \Phi_s x_s(k) + \Gamma_s u_s(k) \\ y_s(k) &= C_s x_s(k) \end{aligned} \quad (6)$$



Şekil 1, LQR kontrol sistemi

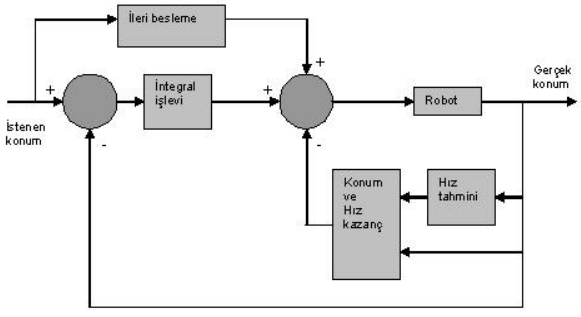
Şekil 1, robottaki sinyal akışını göstermektedir. DAQ kartları ADLINK firmasından alınmıştır. Bu kartlar; iki adet dijital/analog çevirici, bir adet analog/dijital çevirici ve iki adet dijital giriş/çıkışlı karttan oluşmaktadır. En hızlı sinyal okuma döngüsü 250KHz de gerçekleşmiştir. Minimum yüklü kontrol döngüsü ise en hızlı 30KHz de gerçekleşmiştir. Fakat kontrol sistemi geliştikçe, bu kontrol döngü hızı 500Hz kadar düşmüştür.

3. Kontrol Sistemi

Robot tek ayak veya çift ayak yere basma durumuna göre farklı dinamik modellere sahiptir. Eşitlik (5) verilen model bu her iki durumda da doğru sonuç vermektedir. Normal bir yürüme sırasında robot çoğu zaman tek ayak üzerindedir. Bu nedenle kontrol sisteminin en kararlı olmasını gerektiren aşama budur. Mevcut robotta bazı eklemlerde 8^{o}' ye varan eklemler arası boşluk vardır. Bu boşluğun sebebi motorun dişli kutusu, ara dişli mekanizması ve değişik imalat hatalarıdır. Eklemler zemine dik olan vektör civarında sıfır noktası olarak kalibre edilmiştir. Bu sıfır açılarının hizalanması durumunda kontrol mühendisliğinde iyi bilinen "Singularity" denilen kutup noktası problemi ortaya çıkmaktadır. Robotun 13 adet farklı kutup noktası vardır. Bu ters sarkaç problemini andırmaktadır, fakat bu sarkaç'ın 13 adet serbestlik derecesi vardır. Yürüme yörüngeleri ve bunların ortaya çıkardığı eklem yörüngeleri seçimi önemli olmaktadır. Fakat robota harici gelebilecek bozucu momentler ve ölçme gürültüleri, teorik olarak hesaplanan eklem yörüngelerinin takibini bozucu etki oluşturmaktadır. Bu sebeple Matlab simülasyonlarından sonra çok yüksek performanslı kontrol sistemi matrisleri doğrudan robota uygulanmamalıdır. Deneysel çalışmalarda her zaman çok aşırı dikkat ve tedbirli olmak, robotun alması muhtemel hasarları en aza indirecektir. Robotun kontrol matrisleri orantısal kontrol ağırlı olarak (*P* Kontrol) belirlendikten sonra robota uygulanmıştır. Daha sonra iteratif olarak, mümkün olabilecek en optimum değerler bulunmaya çalışılmıştır. Robotun ilk kontrol deneylerinde aşağıdaki eşitlik (7) verildiği gibi bir *PID* (orantı, integral ve hız) katsayılarından oluşan bir kontrol yöntemi kullanılmıştır. Yürüyen robotların özel dinamikleri ve davranışlarından dolayı K_p katsayısı ağırlıklı olarak belirlenmiştir.

$$\mathbf{u(t)} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\,d\tau + K_d \frac{de}{dt} \qquad (7)$$

Bu kontrol sisteminde K_p matrisi diyagonal bir matristir. Bu tür yapıların avantajı; eğer herhangi bir eklemde değişik sebeplerden dolayı bir arıza meydana gelmişse, diğer eklemler bu durumdan etkilenmemektedir. Dezavantajı ise, bir eklemin yaptığı hareket sonrasında, değişen robot oryantasyonun gerektirdiği kontrol cevapları optimum değerlerde motorlara verilememektedir. Robotun ilk testleri PID kontrol sistemi ile başarılı ile gerçekleştirildikten sonra LQR (linear Quadratic Regulator) optimum kontrol sistemi tasarlanmış ve robotta başarı ile test edilmiştir.



Şekil 2, LQR kontrol sistemi

Şekil 2, LQR kontrol sistemini göstermektedir. Burada da *PID* de olduğu gibi *P* kısmına eşdeğer kısım daha dominant seçilmiştir. Kontrol sisteminde az oranda integral, türev ve ileri besleme matrisleri, kontrol sisteminin performansını arttırmak için kullanılmıştır. Eklemlerin göreceli hızlarının doğrudan ölçümü yapılmamaktadır. Bu nedenle Şekil 2, de gösterildiği gibi hız tahmini elemanı "Observer" yerleştirilmiştir. Observer'lar, hız tahmininde sistemin dinamiklerini kullandığı için, normal türev alma işlemi kullanılarak yapılabilecek hız tahminlerine göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir.

$$z_s(k+1) = F_s z_s(k) + E_s x_{s1}(k) + H_s u_s(k)$$
$$\hat{x}_{s2}(k) = z_s(k) + K_s x_{s1}(k) \qquad (8)$$

Eşitlik 8, robotta kullanılan Observer sisteminin state-space modelini göstermektedir. F_s, E_s, H_s ve K_s observer'in katsayı matrisleri ve $\hat{x}_{s2}$ tahmini yapılan göreceli açısal hızdır.

$$u_s(k) = -L_s^2 x_{as}(k) - L_s^{11} x_{s1}(k) - L_s^{12} \hat{x}_{s2}(k) + L_s^{ff} r_s(k) \qquad (9)$$

Eşitlik 9, deki L_s değişkenleri sırasıyla integral, orantısal, türev ve ileri besleme katsayı matrisleridir. us robotun motorlarına gönderilen kontrol sinyalleridir.

Şekil 2 deki sistem blokları uygun bir şekilde birleştirilerek sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bu fonksiyon Eşitlik 10 için bir sınırlayıcı denklem olarak kullanılarak Cebirsel Ricatti eşitliğinin çözmede kullanılır.

$$J_s = \sum_{k=0}^{\infty} \left(x_{ds}(k)^T Q_{ds} x_{ds}(k) + u_s(k)^T R_{ds} u_s(k) \right) \qquad (10)$$

Q_{ds} orantısal kazançlar için ağırlık matrisi ve R_{ds} kontrol sinyalleri ağırlık matrisidir. Bu iki katsayı matrisinin birbirlerine oranı sistemin kontrol performansını belirlemektedir.

Kontrol sistemin değişik bozucu gürültü ve harici kuvvetlere karşı yeterli performans sağlayabileceğinin bir ölçüsü olmalıdır. Singular Value Decomposition (SVD) yöntemi bu amaç için kullanılmıştır.

$$\begin{bmatrix} z_s(k+1) \\ x_{as}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s - H_s L_s^{12} & -H_s L_s^2 \\ 0_{6\times 6} & \Phi_{as} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s(k) \\ x_{as}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_s - H_s (L_s^{11} + L_s^{12} K_s) \\ -\Gamma_{as} \end{bmatrix} x_{s1}(k) + \begin{bmatrix} H_s L_s^{11} \\ \Gamma_{as} \end{bmatrix} r_s(k)$$

$$\tilde{a}_s = \begin{bmatrix} F_s - H_s L_s^{12} & -H_s L_s^2 \\ 0 & \Phi_{as} \end{bmatrix}, \tilde{b}_s = \begin{bmatrix} E_s - H_s \left(L_s^{11} + L_s^{12} K_s \right) \\ -\Gamma_{as} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{c}_s = -\begin{bmatrix} L_s^{12} & L_s^2 \end{bmatrix}, \tilde{d}_s = -\left(L_s^{11} + L_s^{12} K_s \right) \text{ ve } \tilde{g}_s = \begin{bmatrix} H_s L_s^{11} \\ \Gamma_{as} \end{bmatrix},$$

$$G_{cs}(z) = \tilde{c}_s (zI - \tilde{a}_s)^{-1} \tilde{b}_s + \tilde{d}_s, N_s(z) = \tilde{c}_s (zI - \tilde{a}_s)^{-1} \tilde{g}_s + L_s^{11}$$
$$G_s(z) = C_s (zI - \Phi_s)^{-1} \Gamma_s \qquad (11)$$

Eşitlik 11, SVD analizinde kullanılan matris eşitlikleri ve bunları tanımlayan matrisleri göstermektedir. Bu matrisler robotu giren ve çıkan değerleri aşağıdaki, Eşitlik 12 deki gibi ifade edebilir. G_s Robotun dinamiklerini içeren matris, x_{s1} robotun eklemleri arasındaki açıları gösteren vektör ve u_s kontrol sinyalleridir. Eşitlik 13 de kontrol sinyalini oluşturur.

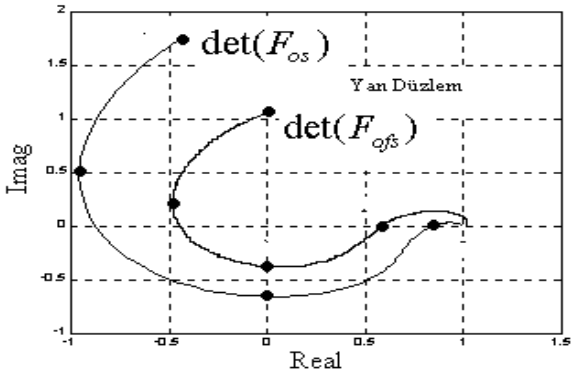
$$x_{s1}(z) = G_s(z)u_s(z) \quad (12)$$

$$u_s(z) = G_{cs}(z)[x_{s1}(z) + n_s(z)] + N_s(z)r_s(z) \quad (13)$$

Bu matris ifadeleri kullanılarak kontrol döngüsünün herhangi bir noktasından giren, gürültü veya diğer bozucu etmenlerin, referans, kontrol ve çıkış sinyalleri üzerine etkisi kolaylıkla incelenebilmektedir.

$$F_{os}(z) = I - G_s(z)G_{cs}(z) \quad (14)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak, Eşitlik 14 de tanımlanan sistem çıkış denklemi, sistemin kararlılığını göstermektedir. Sistemdeki filtre devreleri (alçak geçirgen filtreler) sistemin stabilite marjinlerini biraz düşürmüştür.



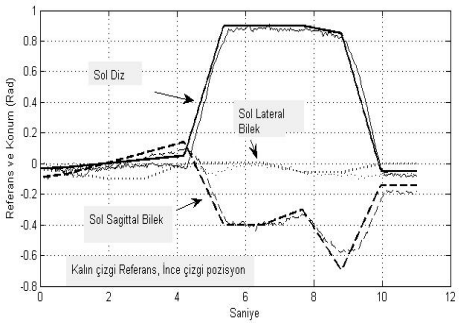
Şekil 3, Yan düzlem için Nyquist diyagramı.

4. Deneysel Sonuçlar

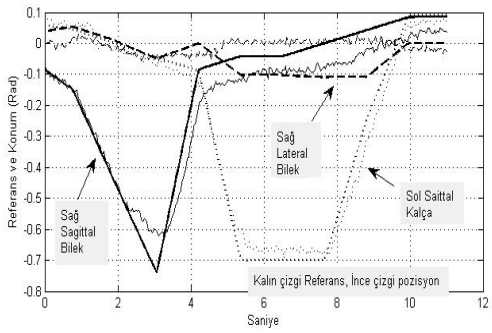
Aşağıdaki şekil 4 ve 5 kontrol sisteminin başarılı bir şekilde robotu kararlı hale getirdiğini ve istenen referans sinyallerini takip edebildiğini göstermektedir. Yürüme robot eklemlerinin çok hassas referans sinyallerini takip etmesini gerektirmemektedir. Hatta yüksek kontrol katsayıları robotun eklemlerinin mekanik empedansının çok yüksek olmasına sebep olur. Yüksek empedans robotun yürüme esnasında ayağının zeminle veya herhangi bir uzvunun dış ortamla etkileşiminde büyük tepki kuvvetlerine sebep olur. Bu kuvvetlerde robotun yürümesinin titreşimli olmasına ve hatta en kötü durumda robotun yürüme kararlılığının bozulmasına sebep olmaktadır.

Ayrıca eklemler arasındaki mekanik boşluklar ve eklemlerin göreceli açılarının sınırlandırılmaması nedeniyle singularity (kutup noktaları) etkileri daha belirgin olmaktadır.
Yürüyen rotların manipülatörlerden farklı olarak referans sinyallerini hassas takip etmesi veya takip ederken zaman küçük gecikmelerinin olması önemli değildir. Robotun Ağırlık Merkezi veya Momentlerinin sıfır olduğu noktanın izdüşümünün, ayağın oluşturduğu poligonun içinde olması robotun yürüme kararlılığı için yeterlidir. Deneysel olarak elde edilen, Şekil 4 ve 5 de küçük takip hataları ve çok az zaman gecikmesi görülmektedir. Bunlar robotun kararlılığını arttırmak için seçilen kontrol sistemi katsayılarının bir sonucudur. Yapılan deneylerde bu küçük hatalar herhangi bir kararlılık sorunu ortaya çıkarmamıştır.

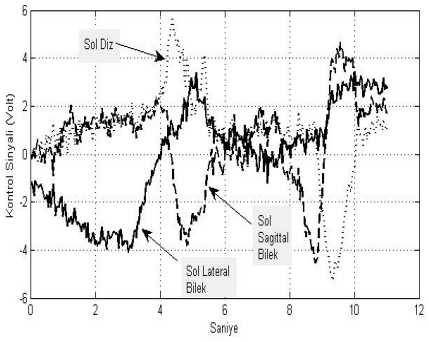
Şekil 6, robotun motorlarına gönderilen kontrol sinyallerini göstermektedir. Sinyaller ±6 Volt aralığında kalmıştır. Sistemin motorlara verebileceği maksimum 10 Volt'luk gerilim hiçbir zaman aşılmamıştır.



Şekil 4, Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları.



Şekil 5, Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları.



Şekil 6, Robot öne doğru yürürken eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri.

5. Sonuç

Robotun iki ayağı ve tek ayağı üzerinde dengede kalmasını sağlayacak kontrol sistemi başarı ile tasarlanmıştır. Observer'lar sistemin göreceli açısal hızlarını başarı ile

kestirmiştir. Kontrol sisteminin tüm parçalarını içeren state-space modeli SVD yöntemi ile stabilite marjinleri incelenmiştir. Deneysel veriler robotun kontrol sisteminin başarılı tasarlandığını ve kendinden beklenen performansı yerine getirdiğini göstermiştir.

6. Kaynaklar

[1] Waldron, K. J., ”From Walking to Galloping”, Third International Conference on Climbing and Walking Robots, Madrid, Spain, 2-4 October 2000.

[2] Kato, I. ve Tsuiki, H., ”Hydraulically Powered Biped Walking Machine with a High Carrying Capacity”, Proceedings of the 4th International Symposium on External Control of Human Extremities, pp 410-421, 1972.

[3] Medrano-Cerda, G. A., ve Eldukhri, E. E., ”Biped Robot Locomotion in the Sagittal Plane”, Transactions Instrument Measurement and Control, Vol. 19, No. 1, pp 38-49.

[4] Pratt, J., Dilworth, P. ve Pratt, G., ”Virtual Model Control of a Bipedal Walking Robot”, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, April 1997, pp 193-198.

[5] Goswami, A., ”Foot Rotation Indicator (FRI) Point: A New Gait Planning Tool to Evaluate Postural Stability of Biped Robots”, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, May 1999, pp 47-52.

[6] Takanishi, A., Takeya, T., Karaki, H. ve Kato, I.,”A Control Method for Dynamic Biped Walking Under Unknown External Force”, IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS’90, pp 795-801.

[7] Akdas, D., ve Medrano-Cerda, G. A. “Design of a Stabilizing Controller for a 10-degree of Freedom Bipedal Robot Using Linear Quadratic Regulator Theory”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C, Vol. 215 No C1, 2000, pp. 27-43

[8] Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y. ve Takenaka, T., (1998) ”The Development of Honda Humanoid Robot”, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation Leuven, Belgium, May 1998, pp 1321-1326.

[9] Park, J. H. ve Cho, H. C.,”An On-Line Trajectory Modifier for the Base Link of Biped Robots To Enhance Locomotion Stability”, Int. Conference on Robotics & Automation San Francisco, CA April 2000, pp 3353-3358.