

ROBOT KOL DENETİM TASARIMI İÇİN DURUM DEĞİŞKENLERİ GERİ BESLEMELİ VE TÜMLEVLİ DENETİMCİ YAKLAŞIMI

Uğur CANER ve Mehmet EROĞLU

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570, Ankara,
ugurcm@hotmail.com, meroglu@gazi.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, durum değişkenleri geri beslemeli ve tümlevli denetimcinin robot manipülatör tasarımı için önemli avantajlara sahip olduğu gösterilmiştir. Tüm sistemin dinamik modeli, doğru akım motorunun dinamiği de dikkate alınarak, üçüncü mertebe diferansiyel denklem olarak elde edilmiştir. Doğrusallaştırma işlemi, manipülatörün nominal yörüngesi etrafındaki küçük sapmaları ifade eden denklemler bulunarak yapılmıştır. Sistemde denetim tasarım aracı olarak kutup yerleştirme işleminden yararlanılmıştır. Doğrusallaştırma katsayıları manipülatörün yörüngesi boyunca güncellendiği için kutup yerleştirme işlemi dolayısıyla denetimci kazançları da güncellenmektedir. Manipülatörün eklemleri arasındaki etkileşim sebebiyle bir eklem diğerine uyguladığı dönme momenti, her eklem için bozucu giriş olarak işlemde geçirilmiştir. Böylece bağımsız eklem denetimi uygulanabilmiştir. Sistem başarımı, iki serbestlik dereceli manipülatör için benzetimler yapılarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robot manipülatör denetimi, doğrusallaştırma tekniği, bağımsız eklem denetimi, simülasyon.

STATE FEEDBACK PLUS INTEGRAL ERROR CONTROLLER APPROACH FOR ROBOT ARM CONTROL DESIGN

ABSTRACT

In this study, it is explained that the state feedback plus integral error controller has outstanding advantages for robot manipulator design. Dynamic model of whole system has been obtained as a third order differential equation by taking into consideration of servo motor dynamics. The linearization process was carried out by finding equations that express deviations about nominal trajectory. Control design tool in the system is pole placement technique. Because of that linearization coefficients have being updated during manipulator trajectory, controller gains were updated for pole placement. The torques caused by interaction between joints were treated as a disturbance for each joint. By doing that, the independent joint control has become possible. System performance was evaluated by simulations of two degree of freedom robot arm.

Keywords: Robot manipulator control, linearization technique, independent joint control, simulation.

1. GİRİŞ

Robot manipülatör denetimi üzerine yapılan çalışmaların tümünde, robot kolunun istenilen yörüngeyi mümkün olduğu kadar yakın izlemesi amaçlanır. Ayrıca, modelleme hatalarına ve dış bozucu girişlere karşı yüksek mukavemet, arzu edilen özelliklerin başında gelir. Bu amaçların, en az maliyetle başarılması yine önemli tasarım şartlarından birisidir.

Manipülatör sistemi, çok girişli çok çıkışlı bir sistemdir. Fakat, her eklem pozisyon denetimi için ayrı giriş sinyallerine ihtiyaç duymaktadır. Çeşitli yöntemlerle elde edilen, manipülatör sisteminin dinamik modeli doğrusal değildir ve eklemlerin birbiri ile etkileşimini ifade eden bağlantılı terimler içerir. Manipülatör dinamik modelinin denetim stratejilerini belirlemede önemli bir rol oynadığı bilinmektedir [1]. Eklemler birbiri ile atalet, merkezkaç, Coriolis ve yerçekimi yükleri dolayısıyla

etkileşim halindedir. Bu sebeplerden dolayı, manipülatör denetimi, sürekli araştırılmakta olan önemli bir problem olarak kendisini göstermektedir.

Birçok klasik robot denetim çalışmasında, doğru akım motorunun dinamiği denetim algoritmalarında dikkate alınmaz. Fakat, özellikle yüksek hızlı hareketlerde, motor dinamiğinin sistem başarımı üzerinde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir [2]. Bu yüzden, motor dinamiği dikkate alınmadan tasarlanan denetim yaklaşımları, gerçek uygulamalarda yetersiz kalabilmektedir. Yapılan başka bir yaygın uygulamada ise motor armatür endüktansı ihmal edilerek, toplam model yine ikinci merteye olarak elde edilmektedir [3].

Bağımsız eklem denetimi uygulayabilmek ve dinamik modeli doğrusallaştırmak için yapılan en yaygın uygulama, sistemde geri besleme halkalarıyla doğrusal olmayan terimleri yok etmektir [4]. Başka bir deyişle, doğrusal olmayan denetim uygulanarak, sistem, doğrusal alt sistemlere ayrılır. Bu yöntemin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için sistemin dinamik modelinin tam olarak bilinmesi gerekir. Birçok modelleme hatası ve dış bozucu kuvvetler dolayısıyla, sistemin dinamik modeli tam olarak belirlenemez. Dolayısıyla bu yaklaşım bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir.

Çok girişli çok çıkışlı sistemlerde, durum değişkenleri geri beslemeli ve tümlüvli denetimcinin, geleneksel orantılı, tümlüvli, türevli denetimciye göre avantajlı olduğunu gösteren bir çalışma daha önce yapılmıştır [5]. Bu çalışmada denetim edilen süreç, Niederlinski tarafından verilen transfer fonksiyonudur.

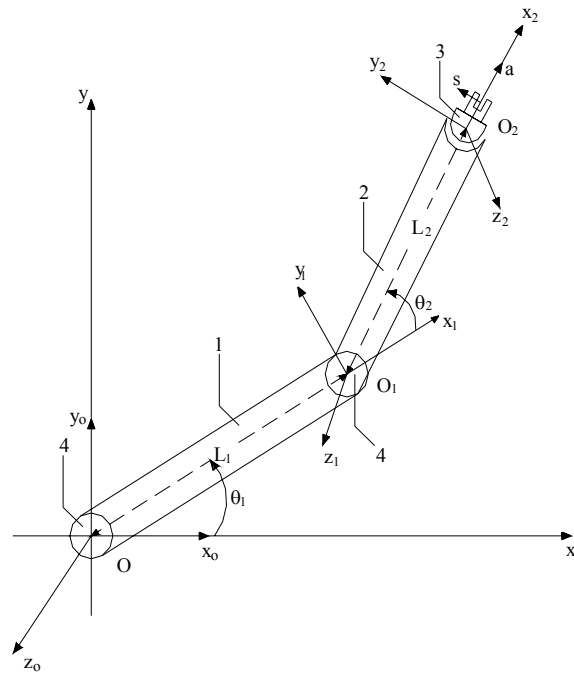
İdeal durumda, eklemlere ters dinamik vasıtasıyla hesaplanan dönme momentleri uygulanırsa, manipülatör nominal yörüngeyi takip eder. Fakat, birçok bozucu etken dolayısıyla, manipülatör nominal yörüngeden sapmalar gösterir. Bundan dolayı, sapmaların düzeltilmesi için bir denetimci tasarım edilerek sisteme yerleştirilmelidir. Bir kaynakta, ters dinamik vasıtasıyla hesaplanan dönme momentlerinin eklemlere uygulanmasına birinci denetimci, yörüngeden sapmaları düzeltmek için tasarlanan denetimciye ise ikinci denetimci denilmektedir [6].

Bu çalışmada, önce manipülatör sisteminin dinamik modeli, Lagrange denklemleri kullanılarak, ikinci merteye vektörel diferansiyel denklem olarak belirlenmiştir. Bu denklem, manipülatörün nominal yörüngesi etrafındaki küçük sapmaları ifade eden Jacobian matrisleri kullanılarak doğrusallaştırılmıştır. Bu yüzden, yörünge boyunca doğrusallaştırma katsayıları güncellenmektedir. Daha sonra, manipülatör sisteminin doğrusal dinamik modeli, doğru akım motorunun dinamik denklemleriyle birleştirilmek suretiyle tüm sistemin dinamik modeli bulunmuştur. Elde edilen, üçüncü merteye

diferansiyel denklem, manipülatörün izlemesi istenilen nominal yörüngesinden küçük sapmaları için geçerlidir. Bu çalışmada kullanılan denetim stratejisi iki kısma ayrılabilir. Birinci kısmı, manipülatörün nominal yörüngesini izlemesi için gerekli dönme momentlerini ters dinamik vasıtasıyla hesaplayarak eklemlere uygulamaktır. Birçok bozucu iç ve dış etken dolayısıyla, manipülatör nominal yörüngeden sapmalar gösterir. Yörüngeden bu küçük sapmalar için geçerli olan, sistemin doğrusallaştırılmış dinamik modeli, durum değişkenleri geri beslemeli ve tümlüvli denetim stratejisiyle sapmaları düzeltmek için düzeltici dönme momentlerini eklemlere uygulamaktadır. Denetimcinin bu işlevi ise ikinci kısım olarak görülebilir. Sistemde denetim tasarım aracı olarak kutup yerleştirme işleminden yararlanılmıştır. Manipülatörün izlediği yörünge boyunca, küçük zaman aralıklarında, doğrusallaştırma katsayıları, denetimci kazançları ve ters dinamik vasıtasıyla eklemler için hesaplanan dönme momentleri güncellenmektedir. Eklemler arası etkileşim sebebiyle bir eklemin diğerine uyguladığı dönme momenti her eklem için bozucu giriş sinyali olarak işlemde geçirilmiştir. Kullanılan denetimci ardışık geri besleme ağı dolayısıyla büyük bozucu kuvvetlere karşı mukavemetlidir. Bu sayede, bağımsız eklem denetimi uygulanarak yüksek sistem başarımı elde edilmiştir.

2. MANİPÜLATÖR KİNEMATİĞİ

İki serbestlik dereceli manipülatör sistemi Şekil 1'de görülmektedir. Şekildeki O_2 noktasının hareketsiz olduğu varsayılmıştır. O ve O_1 noktalarında, doğru akım motorları bulunmaktadır. Manipülatör iki adet döner eklem ve iki adet seri linkten oluşmuştur.



Şekil 1. İki adet döner eklem sahip manipülatör
1. Birinci link 2. İkinci link 3. El 4. Motor

Kinematik analiz için, önce temel ve lokal koordinat sistemleri manipülatör üzerine yerleştirilmiştir. O noktasında temel koordinat sistemi bulunmaktadır ve hareketsizdir. O_1 ve O_2 noktasında ise lokal koordinat sistemleri yerleştirilmiştir. Eklemler, kağıt düzlemine dik olan z eksenini etrafında dönmektedir.

Robot kolundaki elin, pozisyon ve yönelimi, temel koordinat sistemine göre belirlenebilir. Bu işlem için, dönüşüm matrislerinden yararlanılır. Dönüşüm matrisleri, komşu linkler arasındaki ilişkiyi ifade ederler. Bu matrisler kullanılarak, elin pozisyon ve yönelimi, temel koordinat sistemine göre hesaplanabilir. Aynı şekilde, dönüşüm matrislerinin tersi kullanılarak, eklem değişkenlerinin değerleri de bulunabilir. Yani, robot eli, herhangi bir konumda bulunduğu zaman, θ_1 ve θ_2 'nin hangi açı değerlerinde olması gerektiği hesaplanabilir. Bu işleme ters kinematik denilmektedir. Kinematik parametreler ve dönüşüm matrisleri, 'Denavit Hartenberg' gösterimi kullanılarak belirlenmiştir.

Eş.1, manipülatörün yapısal parametrelerinin ve yerçekimi ivmesinin sayısal değerlerini göstermektedir. Burada M_1 ve M_2 , sırasıyla birinci ve ikinci link'in kütlelerini, L_1 ve L_2 ise linklerin uzunluklarını ifade etmektedir.

$$M_1=M_2=5\text{kg}, L_1=L_2=L=0,5\text{m}, g=9,81\text{m/sn}^2 \quad (1)$$

3. MANİPÜLATÖR DİNAMİĞİ

Serbestlik derecesi n olan bir manipülatör sistemi, Lagrange denklemleri yardımıyla ikinci mertebe vektörel diferansiyel denklem olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$T = D(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) \dot{q} + c(q) \quad (2)$$

Burada, $n \times 1$ boyutunda olan T matrisi, eklemlere etkiyen genelleştirilmiş dönme momentlerini ifade etmektedir. D matrisi $n \times n$ boyutundadır ve atalet kütlelerinin ivmelenmesiyle oluşan etkiyi gösterir. Matris h, $n \times 1$ boyutundadır, merkezkaç ve Coriolis etkisini gösterir. Matris c ise $n \times 1$ boyutundadır ve yerçekimi dolayısıyla eklemlere etkiyen dönme momentini ifade etmektedir. Genelleştirilmiş koordinat olarak tanımlanan q sembolü $n \times 1$ boyutundadır ve eklemlerin açılma yer değiştirmesini temsil etmektedir. Dolayısıyla, \ddot{q} açılma ivmeyi ($\ddot{\theta}$), \dot{q} ise açılma hızı ($\dot{\theta}$) temsil etmektedir.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Eş.3'de manipülatörün dinamik modeli görülmektedir.

$$D_{11} = \frac{1}{3}L^2(M_1 + 4M_2 + 3M_2 \cos \theta_2) \quad (4)$$

$$D_{12} = \frac{1}{3}M_2L^2 + \frac{1}{2}M_2L^2 \cos \theta_2 \quad (5)$$

$$D_{21} = \frac{1}{3}M_2L^2 + \frac{1}{2}M_2L^2 \cos \theta_2 \quad (6)$$

$$D_{22} = \frac{1}{3}M_2L^2 \quad (7)$$

$$h_2 = \frac{1}{2}L^2 \sin \theta_2 \cdot M_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 \quad (8)$$

$$h_1 = \frac{1}{2}L^2 \sin \theta_2 \cdot M_2 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1) \quad (9)$$

$$c_1 = \frac{1}{2}gL(M_1 \cos \theta_1 + M_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + 2M_2 \cos \theta_1) \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{1}{2}gLM_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (11)$$

4. MANİPÜLATÖR DİNAMİK MODELİNİN DOĞRUSALLAŞTIRILMASI

Manipülatörün dinamik modeli, birinci mertebe vektörel diferansiyel denklem formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{x} = f[x(t), u(t)] \quad (12)$$

Bu denklemde $n \times 2$ boyutunda olan x vektörü, manipülatör sistemi için açılma yer değiştirmeleri ve türevlerini ifade eden durum değişkenleridir. Vektör u ise n boyutundadır ve hareket dolayısıyla eklemlere etkiyen dönme momentlerini ifade etmektedir. Şu anda, motor denklemleri dikkate alınmadan sadece manipülatör sistemi için denetim girişi, manipülatörün izlemesi istenilen yörünge için eklemlere uygun dönme momentlerinin (u) bulunması olarak görülebilir. Nominal yörünge (x_n), nominal dönme momentlerinin (u_n) eklemlere uygulanmasıyla elde edilir. Bu durum için sistemin dinamik modeli aşağıda yazılmıştır. $\delta x(t)$ ve $\delta u(t)$ nominal yörüngeden sapmaları ifade etmektedir.

$$\dot{x}_n = f[x_n(t), u_n(t)] \quad (13)$$

$$\delta x(t) = x(t) - x_n(t) \quad (14)$$

$$\delta u(t) = u(t) - u_n(t) \quad (15)$$

Sapmaları ifade eden denklemler, sistemin durum değişkenleri denkleminde yerine konularsa ve elde edilen denklemin sağ tarafı, Taylor serisi ile açılırsa küçük sapmalar için manipülatör sisteminin doğrusal dinamik modeli elde edilir. $(\partial f/\partial x)$ ve $(\partial f/\partial u)$ Jacobian matrislerini ifade etmektedir.

$$d/dt(x_n + \delta x) = f[x_n(t) + \delta x(t), u_n(t) + \delta u(t)] \quad (16)$$

$$f[x_n(t) + \delta x(t), u_n(t) + \delta u(t)] = f[x_n(t), u_n(t)] + [(\partial f/\partial x)_{x_n, u_n}] \delta x + [(\partial f/\partial u)_{x_n, u_n}] \delta u + \dots \quad (17)$$

$$\delta \dot{x} = [(\partial f/\partial x)_{x_n, u_n}] \delta x + [(\partial f/\partial u)_{x_n, u_n}] \delta u \quad (18)$$

$$\delta \dot{x} = A(x_n, u_n) \delta x + B(x_n, u_n) \delta u \quad (19)$$

Örnek teşkil etmesi açısından, iki serbestlik dereceli bir manipülatör için doğrusallaştırılan dinamik model aşağıda gösterilmiştir. Aşağıdaki denklemlerde görünen a ve b katsayıları, Jacobian matrislerinin elementlerini temsil etmektedir. Dolayısıyla bu katsayılar manipülatör sisteminin izlediği yörünge boyunca güncellenmektedir.

$$x_1 = \theta_1, x_2 = \theta_2, x_3 = \dot{\theta}_1, x_4 = \dot{\theta}_2, T_1 = u_1, T_2 = u_2 \quad (20)$$

$$\delta \dot{x}_1 = \delta x_3 \quad (21)$$

$$\delta \dot{x}_2 = \delta x_4 \quad (22)$$

$$\delta \dot{x}_3 = a_{31} \delta x_1 + a_{32} \delta x_2 + a_{33} \delta x_3 + a_{34} \delta x_4 + b_3 \delta u_1 \quad (23)$$

$$\delta \dot{x}_4 = a_{41} \delta x_1 + a_{42} \delta x_2 + a_{43} \delta x_3 + a_{44} \delta x_4 + b_4 \delta u_2 \quad (24)$$

$$\delta \ddot{\theta}_1 = a_{31} \delta \theta_1 + a_{32} \delta \theta_2 + a_{33} \delta \dot{\theta}_1 + a_{34} \delta \dot{\theta}_2 + b_3 \delta T_1 \quad (25)$$

$$\delta \ddot{\theta}_2 = a_{41} \delta \theta_1 + a_{42} \delta \theta_2 + a_{43} \delta \dot{\theta}_1 + a_{44} \delta \dot{\theta}_2 + b_4 \delta T_2 \quad (26)$$

$$\delta x = x - x_n \quad (27)$$

$$\ddot{\theta}_1 = a_{31} \theta_1 + a_{32} \theta_2 + a_{33} \dot{\theta}_1 + a_{34} \dot{\theta}_2 + b_3 u_1 - a_{31} \theta_{n1} - a_{32} \theta_{n2} - a_{33} \dot{\theta}_{n3} - a_{34} \dot{\theta}_{n4} - b_3 u_{n1} + \ddot{\theta}_{n1} \quad (28)$$

$$c = -a_{31} \theta_{n1} - a_{32} \theta_{n2} - a_{33} \dot{\theta}_{n3} - a_{34} \dot{\theta}_{n4} - b_3 u_{n1} + \ddot{\theta}_{n1} \quad (29)$$

$$\ddot{\theta}_1 = a_{31} \theta_1 + a_{32} \theta_2 + a_{33} \dot{\theta}_1 + a_{34} \dot{\theta}_2 + b_3 u_1 + c \quad (30)$$

$$\ddot{\theta}_2 = a_{41} \theta_1 + a_{42} \theta_2 + a_{43} \dot{\theta}_1 + a_{44} \dot{\theta}_2 + b_4 u_2 \quad (31)$$

$$-a_{41} \theta_{n1} - a_{42} \theta_{n2} - a_{43} \dot{\theta}_{n3} - a_{44} \dot{\theta}_{n4} - b_4 u_{n2} + \ddot{\theta}_{n2} \quad (31)$$

$$d = -a_{41} \theta_{n1} - a_{42} \theta_{n2} - a_{43} \dot{\theta}_{n3} - a_{44} \dot{\theta}_{n4} - b_4 u_{n2} + \ddot{\theta}_{n2} \quad (32)$$

$$\ddot{\theta}_2 = a_{41} \theta_1 + a_{42} \theta_2 + a_{43} \dot{\theta}_1 + a_{44} \dot{\theta}_2 + b_4 u_2 + d \quad (33)$$

5. DOĞRU AKIM MOTORUNUN MODELLENMESİ

Doğru akım motorunun dinamik denklemleri aşağıdaki denklemler ile tanımlanmıştır.

$$L_a (di_a/dt) = -R_a i_a + e_a - e_b \quad (34)$$

$$d\theta/dt = \omega \quad (35)$$

$$e_b = K_b \omega \quad (36)$$

$$T_m = K_i i_a \quad (37)$$

L_a = Armatür endüktansı = 0,005 Henry

i_a = Armatür akımı (amp)

R_a = Armatür direnci = 1 ohm

e_a = Armatür voltajı (V)

e_b = Geri besleme voltajı (V)

K_b = Geri besleme voltaj katsayısı = 0,1 V.sn/rad

K_i = Akım-dönme momenti katsayısı = 10 N.m/amp

T_m = Motorun ürettiği dönme momenti (N.m)

θ = Motor milinin açılmal yer değiştirmesi (rad)

ω = Motor milinin açılmal hızı (rad/sn)

Doğru akım motorunun dinamik denklemleri ve manipülatör sisteminin dinamik modeli birleştirilerek eklemelere etkiyen toplam dönme momentini ifade eden eşitlik aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$T_m + T_D = J \ddot{\theta} + B_t \dot{\theta} + T \quad (38)$$

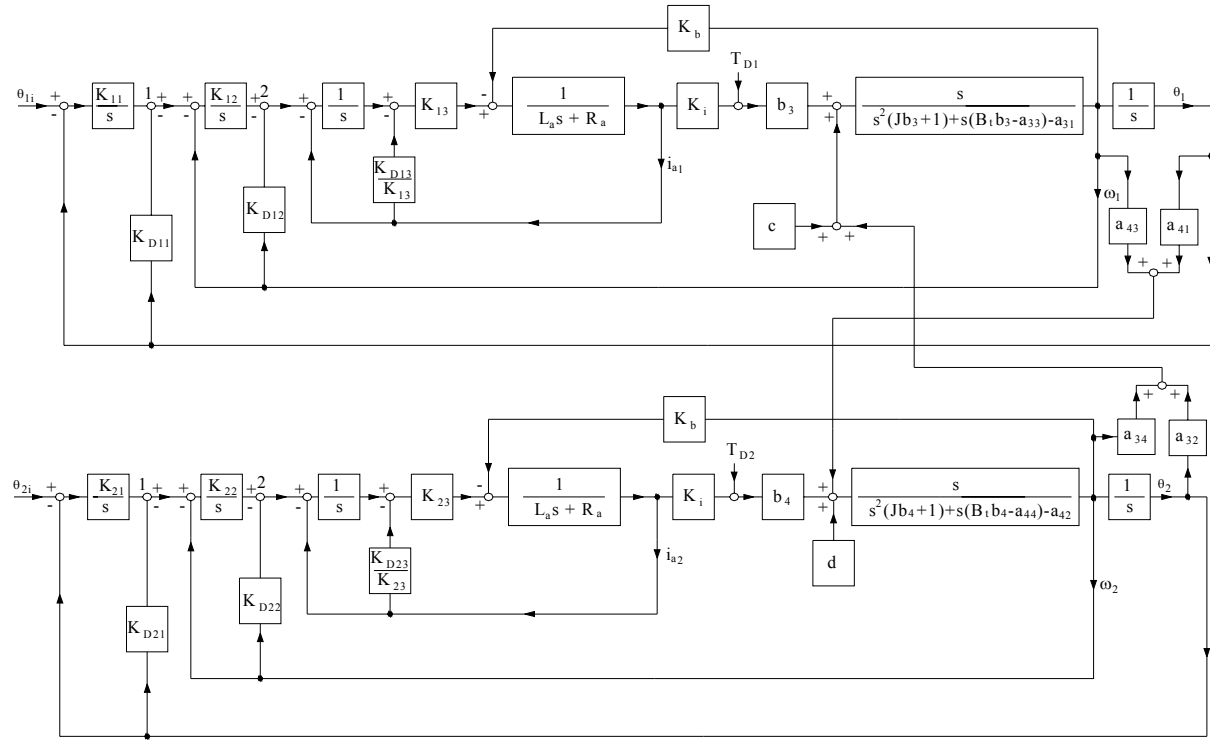
$$J = 0,1 \text{ N.m.sn}^2/\text{rad}$$

$$B_t = 0,01 \text{ N.m.sn/rad}$$

Yazılan bu eşitlik, manipülatör sisteminde herhangi bir eklem için toplam dönme momenti dengesini ifade etmektedir. Burada T_D ekleme etkiyen bozucu dönme momentini, J motorun polar atalet momentini, B_t (N.m.sn/rad), toplam viskoz sürtünme katsayısını, T ise manipülatörün doğrusallaştırılmış dinamik modeli kullanılarak belirlenen dönme momentidir. θ motorun ve eklem için açılmal yer değiştirmesini ifade etmektedir. Bu eşitlikte motor ve manipülatör eklemi arasındaki dişli sayısı oranı 1 alınmıştır. Doğrusallaştırılmış denklem (Eş.19) kullanılarak belirlenen ve manipülatörün hareketi dolayısıyla ekleme etkiyen dönme momentini ifade eden T sembolü, doğrusallaştırma katsayılarını, diğer eklemelerin dinamiğini ve ters dinamik vasıtasıyla hesaplanan dönme momentlerini içermektedir. Örneğin iki serbestlik dereceli manipülatörün birinci eklemi için Eş.30'da belirlenmiş olan doğrusal dinamik denklem kullanılarak, hareket dolayısıyla bu ekleme etkiyen dönme momenti aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$[\ddot{\theta}_1 - (a_{31} \theta_1 + a_{32} \theta_2 + a_{33} \dot{\theta}_1 + a_{34} \dot{\theta}_2 + c)]/b_3 = u_1 = T_1 \quad (39)$$

Bu eşitlikte, c katsayısı iki eklemde dinamiğini içeren ve ters dinamik vasıtasıyla, birinci ekleme uygulanması gereken dönme momentini ifade etmektedir. Bu işlev, giriş bölümünde ifade edilen denetimcinin birinci kısmını ifade etmektedir. Manipülatörün yörüngesi boyunca bu dönme momenti ve doğrusallaştırma katsayıları güncellenmektedir. Bu sayede eklemeler kısmi olarak birbirinden ayrılmıştır. Fakat yörüngeden sapmaları düzelten denetim sisteminin ikinci kısmı doğrusal denklem dolayısıyla birbirine bağımlıdır. Bu durum Eş.39'da görülmektedir. Tasarlanan denetim sisteminde bu etkileşim, her eklem için bozucu giriş olarak işlem denetimciye geçirmektedir. Bu sayede bağımsız eklem denetimi uygulanabilmektedir. Böylece, sistemde her eklem karakteristik fonksiyonu ayrı ayrı hesaplanarak kutup yerleştirme işlemi yapılmaktadır. Kutuplar s düzleminde negatif gerçek eksen üzerine yerleştirilmekte ve tekrarlı kutup kullanılmaktadır. Her eklem altıncı mertebeye karakteristik fonksiyona sahiptir. Dolayısıyla, her eklem için altı adet tekrar eden kutbu negatif gerçek eksen üzerine yerleştirilmektedir. İki serbestlik dereceli manipülatör için denetim sisteminin blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Manipülör sisteminin denetim blok diyagramı

6. BENZETİMLER

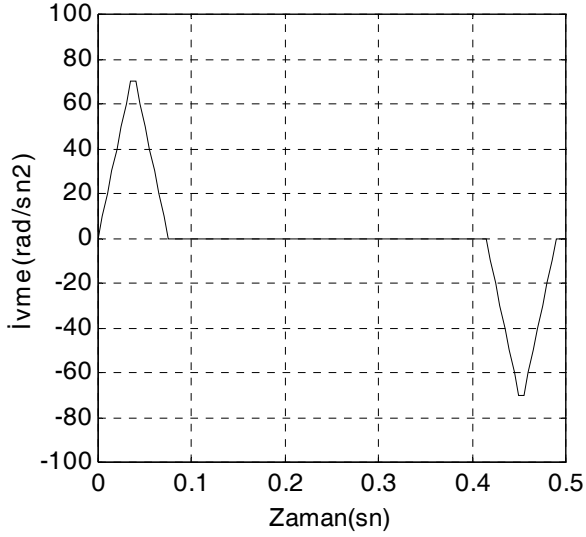
Tasarlanan denetim sisteminin başarımı, iki serbestlik dereceli manipülörün yörünge girişlere karşı verdiği cevapların benzetimleri yapılarak değerlendirilmiştir. Manipülörün izlediği yörünge boyunca doğrusallaştırma katsayılarını ve denetimci kazançlarını güncelleyen bir yazılım Matlab programında yazılmıştır. Benzetimlerde, her iki eklemin altı adet tekrarlı kutbu, negatif gerçek eksen üzerinde -500 noktasına yerleştirilmiştir. Parametre güncelleme sayısı ise yörünge boyunca 100 kere yapılmaktadır. Yani parametreler 5 msn aralıklarla güncellenmektedir. Yörünge planında manipülörün birinci ekleminin ulaşması istenilen maksimum ivme 70rad/sn^2 , ikinci ekleme için ise 40rad/sn^2 olarak belirlenmiştir. Eklemler, artan bir ivme ile hızlanmakta, sabit bir hızda kalmakta ve azalan bir ivme ile durmaktadır. Simülasyonlarda, noktalı çizgi ile belirtilen grafikler, yörünge planında belirlenmiş ve arzu edilen yörüngelerdir. Düz çizgi ile belirtilen grafikler ise manipülör sisteminin ekleme değişkenlerinin izledikleri gerçek açısal hız ve konumları ifade etmektedir.

Parametre güncelleme sıklığı arttırıldığında, sistem daha hassas olmakta ve titreşimler azalmaktadır. Fakat gerçek zamanlı kontrolde, hesaplamaların daha kısa sürede yapılması gerektiği için daha güçlü bilgisayarların kullanılması gerekebilir. Bu ise uygulama açısından zorluklara ve maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Denetimci kutupları negatif gerçek eksenin soluna kaydırıldığında, sistemin gecikme zamanı kısalmaktadır. Fakat, bu işlem, motorların

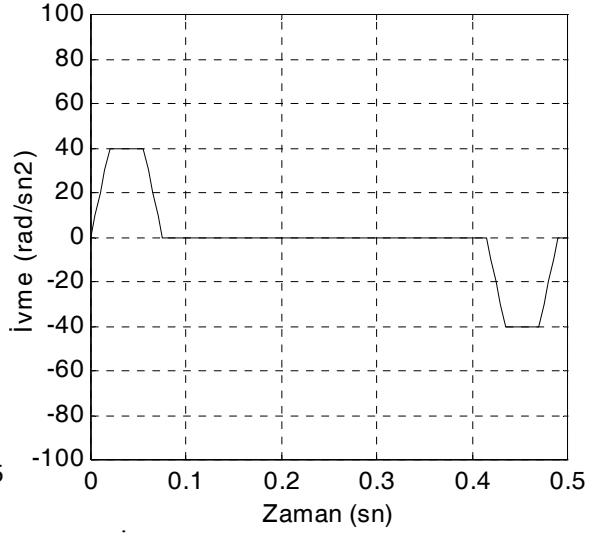
çekmek istedikleri akımlardaki ani değişiklikleri arttırmaktadır. Bu durum, sistem cevabındaki titreşimlerin artmasına ve güçlü yükselteçlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, motorların büyüklükleri arttığı için sistem düşük frekanstaki titreşimlere duyarlı hale gelmektedir. Örneğin, hızlı bir hareketten sonra manipülör aniden durdurulmak istendiğinde, titreşimler meydana gelecek ve sistem cevabı uzayacaktır. Manipülörün kullanım yeri ve amacına göre, tüm bu faktörler dikkate alınarak sistem tasarımı yapılmalıdır. Yazılan bilgisayar programı yardımıyla, manipülör sisteminin yapısal parametreleri, doğru akım motorunun parametreleri, yerleştirilmek istenilen kutup değeri, parametre güncelleme sıklığı ve bozucu kuvvetler, direkt olarak programa girilerek sistem tasarımı için simülasyonlar yapılmaktadır.

Şekil 3'de yörünge planında belirlenen ve manipülör eklemlerinin izlemesi istenilen açısal ivme-zaman diyagramı görülmektedir. Şekil 4-6'da ise manipülör eklemlerinin izlediği gerçek ivme-zaman grafikleri görülmektedir.

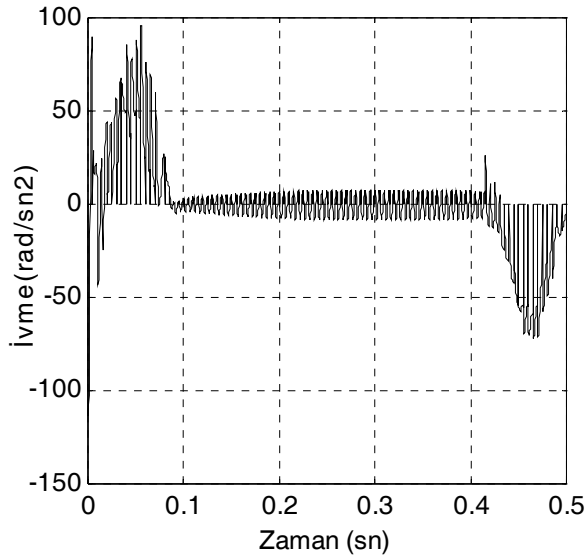
Manipülörün bozucu girişlere karşı mukavemetini değerlendirmek için her iki ekleme 1000 Nm 'lik rampa bozucu giriş uygulanarak aynı yörünge planı ve parametreleri için simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 7'de her iki eklemin konum zaman cevapları görülmektedir. Denetimcinin ardışık geri besleme ağı dolayısıyla, manipülör çok büyük bozucu girişlere karşı oldukça mukavemettir. Fakat, simülasyonlarda, yükseltecin motorların çekmek istedikleri akımları karşılayabildikleri varsayımı yapılmıştır.



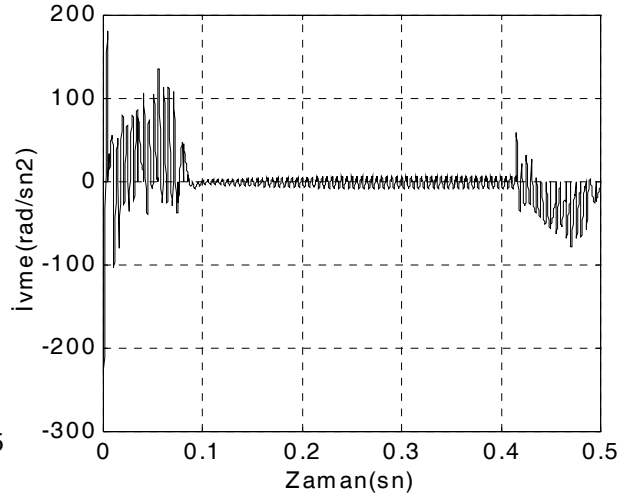
a. Birinci eklemin ivme-zaman grafiđi



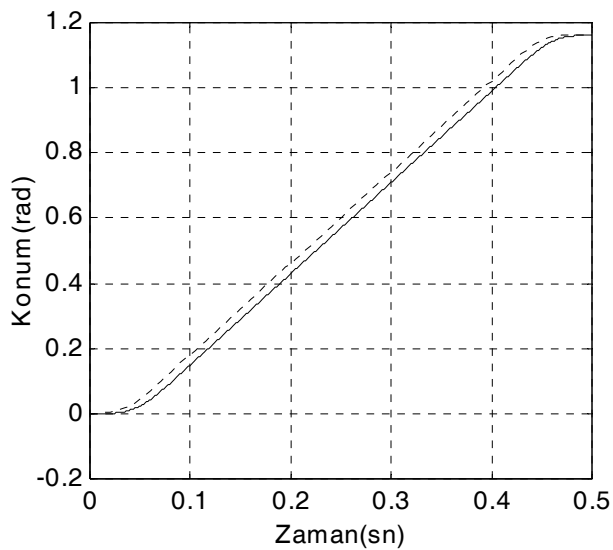
b. İkinci eklemin ivme-zaman grafiđi

şekil 3. Eklemlerin yörünge planında belirlenmiş olan ivme-zaman diyagramları

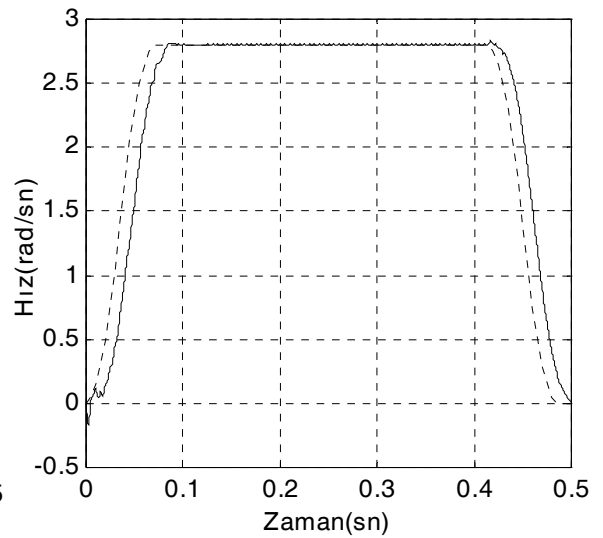
a. Birinci eklemin ivme-zaman grafiđi



b. İkinci eklemin ivme-zaman grafiđi

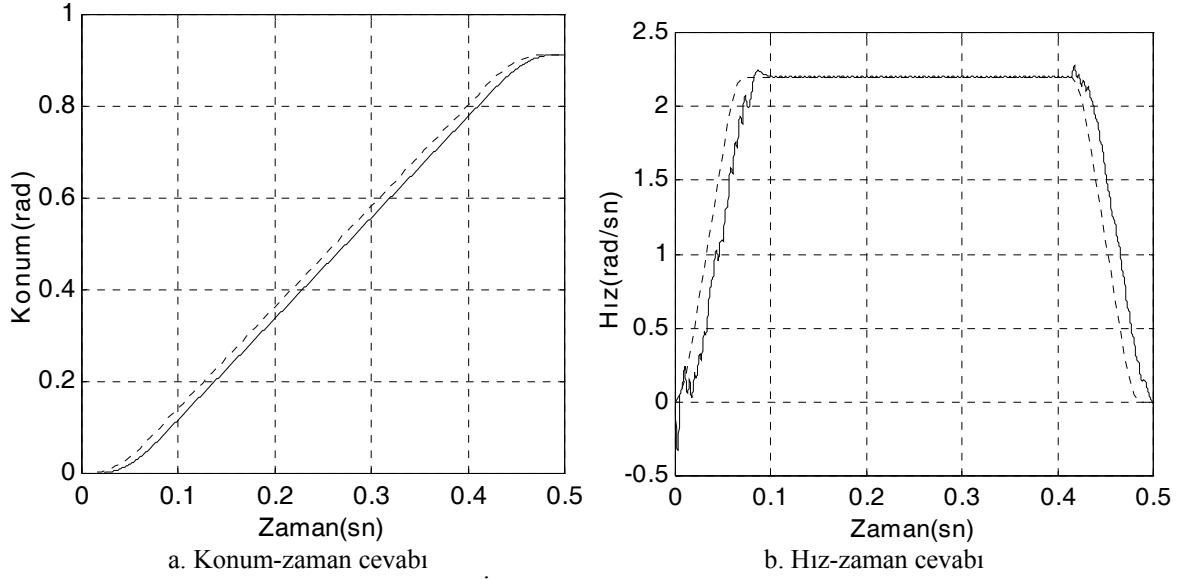
şekil 4. Manipülatör eklemlerinin izlediği ivme-zaman diyagramları

a. Konum-zaman cevabı

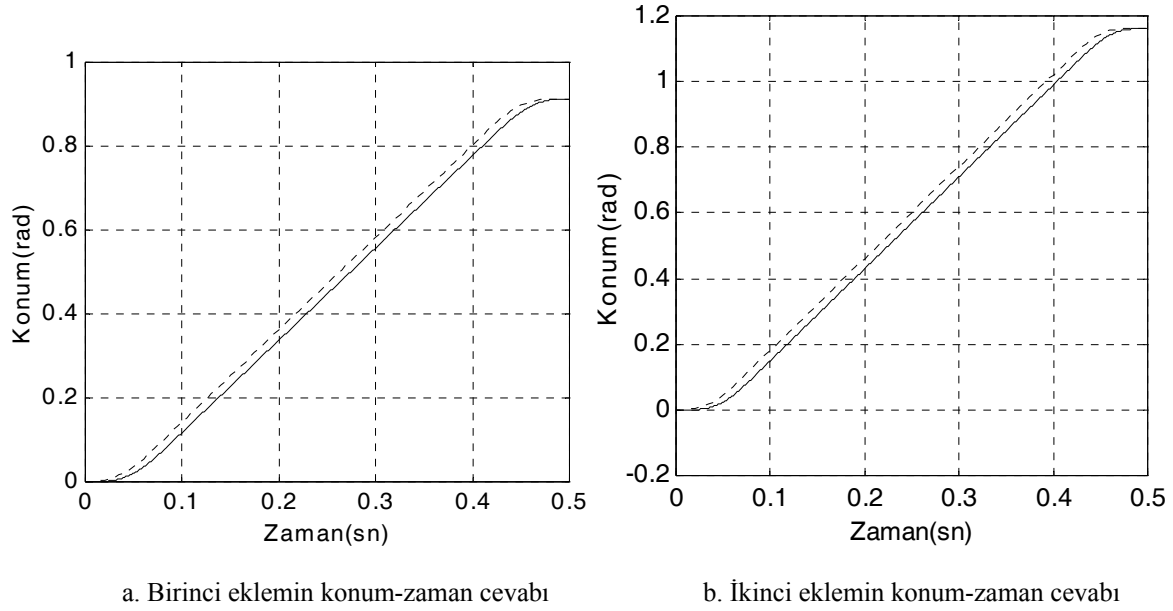


b. Hız-zaman cevabı

şekil 5. Birinci eklemin zaman cevabı



Şekil 6. İkinci eklemin zaman cevabı



Şekil 7. Eklemlerin 1000 Nm bozucu rampa girişlere karşı konum-zaman cevapları

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada tasarlanan denetimci yapısı, robot manipülatör denetimi için arzu edilen en önemli tasarım şartlarını yerine getirmektedir. Bunlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Eklemler arası etkileşim azaltılarak bağımsız eklem denetimi uygulanmıştır.
- Modelleme hatalarına ve dış bozucu girişlere karşı yüksek mukavemet sağlanmıştır. Çünkü kullanılan denetimci ardışık geri besleme ağına sahiptir.
- Simülasyonlarda görüldüğü gibi, yüksek ivmeli hareketlerde (50 rad/sn^2) sistem davranışında herhangi bir bozulma görülmemektedir.
- Kullanılan denetimci durum değişkenleri üzerinde sınırlama yapmaya imkân vermektedir.

Dolayısıyla doğru akım motorlarının çektikleri akımlar üzerinde sınırlama yapılarak, manipülatör tasarımı için daha küçük, ucuz ve hafif motorlar kullanılabilir[7].

KAYNAKLAR

- Eroğlu, M., "Computer Simulation of Robot Dynamics", **Robotica Volume 16**, 615-621, 1998.
- Tarn, T.J., Zuofeng L., Bejczy, A, K ve Yun, X., "Nonlinear Robot Arm Control through Third Order Motor Model", **IFAC Symp. Robot Control**, 53-58, 1988.
- Somlo, J., Cat, P.T., 1988, "Robust Adaptive Control of Robot Manipulators", **IFAC Symp. Robot Control**, 151-156, 1988.

4. Chen, Y.H., Pandey, S., “Robust Hybrid Control of Robot Manipulators”, **IEEE International Conference V.1 on Robotic and Automation**, 236-241, 1989.
5. Maday, C.J., **Feedback Control Systems for Time Response**, Instrument Society of America, U.S.A, 1987.
6. Koivo, A.J., **Fundamentals For Control of Robotic Manipulators**, John Willey & Song Inc., Canada, 1989.
7. Caner, U., İki Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Dinamik Analiz ve Kontrol Simlasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstits. 2002.