



ÖNGÖRÜLÜ KONTROL İLE ALTI EKLEMLİ BİR ROBOT KOLUNUN EKLEM ESASLI YÖRÜNGE KONTROLÜ

Burhanettin DURMUŞ¹, Hasan TEMURTAŞ²

¹Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya, bdurmus@dpu.edu.tr

²Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kütahya, temurtas@dpu.edu.tr

Geliş Tarihi: 04.06.2008

Kabul Tarihi: 14.05..2010

ÖZET

Bu çalışmada altı eklemlili bir robot kolunun eklem esaslı yörünge kontrolü için genelleştirilmiş öngörülü kontrolör (GPC) tasarlanmıştır. Robot kolunun dinamik modellemesinde Lagrange-Euler yöntemi kullanılmış, yörünge planlaması sinüzoidal yörünge prensibine göre yapılmıştır. Tasarlanan kontrolör, istenilen yörünge boyunca robot kolu eklemlerini kontrol edecek uygun tork değerlerini üretmektedir. Öngörü modeli için CARIMA (Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average) doğrusal formu kullanılmış, parametre kestirim işlemi ise en küçük kareler yöntemi (Recursive Least Squares-RLS) ile gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robot kontrolü, yörünge planlaması, öngörülü kontrol.

BASED JOINT TRAJECTORY CONTROL OF 6-DOF ROBOT MANIPULATOR BY USING GENERALIZED PREDICTIVE CONTROL

ABSTRACT

In this study, generalized predictive controller (GPC) was designed for based joint trajectory control of 6-DOF (Degree-Of-Freedom) robotic manipulator. Modeling of the dynamics of the robotic manipulator was made by using the Lagrange-Euler equations and the cubic trajectory principle was used for trajectory planning. Designed controller computes values of torque belonging to joints through motion. CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average) model was used for prediction model. The parameter estimation was carried out using the RLS (Recursive Least Squares).

Keywords: Robotic control, trajectory planning, predictive control.

1. GİRİŞ

Günümüz otomasyon sistemlerinin vazgeçilmez elemanı olan robotlar; üretim, hizmet, güvenlik, sağlık gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İnsan gücüne oranla daha ucuz olmaları, üretim hızını, kapasitesini ve verimliliğini arttırmaları robotları önemli kılmaktadırlar. Geniş bir uygulama alanı bulunan robotlar için yıllardır birçok kontrol metotları geliştirilmiş, dinamik modelleri oluşturulmuş, icra edeceği hareket ve görevleri için değişik yapıda ve ekleme sahip tasarımlar yapılmıştır. Bu tasarımların en yaygın olanları kol benzeri yapılarda olan robot kollarıdır.

Robot kolları uzuvların birbirlerine eklemler aracılığı ile bağlandığı ve ilk eklemin sabitlendiği yapılardır. İcra edeceği göreve bağlı olarak uzuvların şekilleri değiştirilebilir ve uzuv sayıları artırılabilir. Robot kolunda uzuv sayısını arttırmak kolun hareket manevrasını arttırmaktadır. Ancak eklemler arasında yüksek oranda etkileşimler mevcut olduğundan eklem sayısı arttırmak kolun kontrolünü güçleştirecektir. Dolayısıyla eklem sayısının optimum düzeyde tutulması istenir. Bu bağlamda altı serbestlik derecesi birçok uygulama için ideal görülmüştür [1].

Robot kolunun dinamik kontrolü, robot kolu eklemlerinin istenilen pozisyon ve hız referansları doğrultusunda hareketlerini sağlayacak giriş bilgilerini (tork / voltaj) üretmek eklemlere vermek şeklindedir. Ancak, robot

kolunun dinamik davranışını veren denklemlerin ikinci dereceden doğrusal olmayan diferansiyel denklemler olmaları ve aralarında yüksek oranda etkileşimler bulunması robot kolunun kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu yüzden klasik kontrol sistemlerini kullanan endüstriyel robot kolları belirli bir hız limitinin üzerine kolayca çıkamamakta, sonuç olarak üretim verimliliği sınırlanmaktadır. Ayrıca, her geçen gün artan performans isteklerinden dolayı daha gelişmiş kontrol tekniklerine gereksinim duyulmaktadır.

Kullanılan ticari robotların büyük çoğunluğu nispeten basit olan kontrol sistemleri ile donatılmışlardır. Bunlara örnek olarak PI (Proportional Integral) ve PID (Proportional + Integral + Differential) tipi kontrolörler gösterilebilir [2-4]. Fakat bu tip kontrol sistemlerinin sadece düşük hızlarda yeterli olabildikleri yapılan çalışmalar ile kanıtlanmıştır [1]. Robot kolunun çalışma hızını artırabilmek için eklem hızları artırıldığında etkileşimler ve robot kolu modelindeki belirsizlikler nedeniyle istenilen yörünge ile gerçekleşen yörünge arasında önemli hatalar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle klasik kontrol sistemlerini kullanan robot kolları, yeterli hassasiyeti yakalamak için düşük hızlarda çalıştırılmaktadır. Artan performans taleplerinden dolayı robot kolu kontrolü için daha gelişmiş kontrol algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu algoritmalarından biride Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol (GPC) algoritmasıdır.

İlk olarak Clarke ve arkadaşları [5-9] tarafından geliştirilen ve kendinden önceki uzun menzilli öngörülü kontrol algoritmalarının bir sentezi niteliğini taşıyan Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol (Generalized Predictive Control - GPC) algoritması bir gerileyen ufuklar metodudur [10]. Robot kontrolü gibi referans yörüngenin önceden programlandığı durumlar için oldukça kullanışlıdır [11].

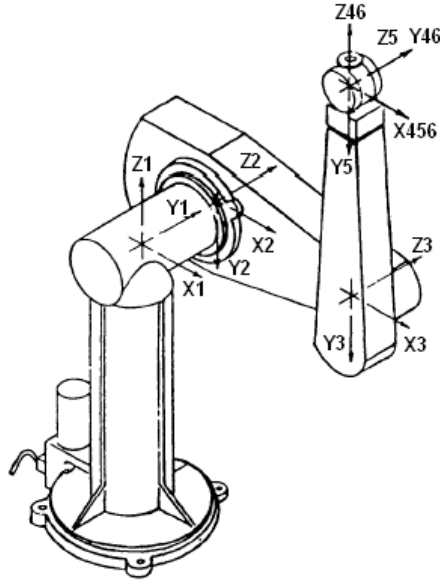
Bu çalışmada, altı eklemlı bir robot kolu için Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol (GPC) algoritmasını kullanan bir kontrolör tasarlanmıştır. Kontrolör daha önceden belirlenen referans yörüngeleri takip etmesi için eklemlere uygulanacak uygun tork değerlerini üretmektedir. Üretilen bu tork değerleri robot koluna manipülatörüne uygulanır. Robot kolu dinamik modelinden alınan konum ve hız bilgilerini tekrardan kontrolöre iletilerek referans yörünge ile gerçekleşen yörünge arasındaki hatalar minimize edilecek şekilde hareket sonuna kadar kontrole devam edilir.

Robot kolunun dinamik modellenmesinde Lagrange-Euler yöntemi kullanılmıştır. Modele sürtünme ve uç noktada taşınan yük etkisi de ayrıca ilave edilmiştir. Referans yörüngeler sinüzoidal yörünge prensibine göre hesaplanmıştır. Dinamik model 4. dereceden Runge-Kutta yöntemi ile robot kolu simülatörüne dönüştürülmüştür.

Bu çalışmanın kalan kısmı şöyle organize edilmiştir: Bölüm 2’de kullanılan robot kolunun dinamik modellenmesi anlatılmıştır. Bölüm 3’te GPC yapısı ve tasarlanan kontrolör yapısı sunulmuştur. Bölüm 4 te ise yapılan simülasyon çalışmaları sunulmuştur.

2. ALTI EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN DİNAMİK MODELİ

Çalışmada kullanılan altı eklemlı PUMA 560 robot kolu Şekil 1’de ve kolun temel parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir [12]. Burada i ; eklem sayısını, α_i ; \bar{x}_i eksenini etrafında \bar{z}_{i-1} ekseninden \bar{z}_i eksenine kadar olan açıyı (sağ el kuralı kullanılarak), a_i ; \bar{z}_{i-1} ve \bar{z}_i eksenleri arasındaki en kısa mesafeyi, d_i ; \bar{z}_{i-1} eksenini boyunca $(i-1)$. koordinat çerçevesinin orijininden \bar{x}_i eksenini ile \bar{z}_{i-1} ekseninin kesişme yerine kadar olan mesafeyi gösterir. Robot kolunun dinamik model çözüm için Lagrange-Euler denklem sistemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre n eklemlı bir robot kolu için $n \times 1$ boyutlu eklem tork vektörü $\tau(t)$ ile $n \times 1$ boyutlu eklem açı vektörü $\theta(t)$ arasındaki ilişki Denklem (1) ‘deki gibi doğrusal olmayan bir diferansiyel denklem takımı ile gösterilir [13].



Şekil 1. Altı eklemlilik robot kolu

$$D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_s(t) + \tau_l(t) = \tau(t) \quad (1)$$

Burada $\ddot{\theta}$, $\dot{\theta}$ ve θ sırasıyla eklemlere ait ivme, açılış hız ve pozisyonu temsil eden n-boyutlu vektörlerdir. $D(\theta)$, $n \times n$ boyutlu simetrik atalet matrisidir. $H(\theta, \dot{\theta})$, Coriolis ve merkezkaç kuvvetini temsil eden n-boyutlu vektördür. $G(\theta)$ yerçekim kuvvet vektörü, $\tau_s(t)$ sürtünmeyi temsil eden kuvvet vektörü, $\tau_l(t)$ uç noktadaki yük etkisini temsil eden kuvvet vektörü ve $\tau(t)$ ise genişletilmiş tork vektörüdür [13].

Çizelge 1. Puma 560 robot koluna ait Denavit-Hartenberg parametreleri

i (eklem no)	α_i (derece)	θ_i	a_i (metre)	d_i (metre)
1	-90	θ_1	0	0
2	0	θ_2	0.4318	0.1491
3	90	θ_3	-0.0203	0
4	-90	θ_4	0	0.4331
5	90	θ_5	0	0
6	0	θ_6	0	0.056

Dinamik modellemede robot kolumun sürtünmesi de göz önüne alınmış; statik, kinetik (Coulomb) ve akışkan sürtünmesini içeren bir sürtünme modeli oluşturulmuştur [14]. Bu model aşağıdaki denklem ile gösterilmektedir.

$$\tau_{\text{sürtünme}} = f_s \left(\frac{\text{sgn}(\dot{q})}{1 + \left(\frac{\dot{q}}{x_s}\right)^2} \right) + f_k \tanh(\dot{q}) + k_{vn}(\dot{q}) \quad (2)$$

Burada f_s statik sürtünme, x_s Stribeck Etkisinden oluşan statik sürtünme sabiti, f_k kinetik sürtünme ve k_{vn} akışkan sürtünmesidir. Puma 560 robot koluna ait sürtünme parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir [15].

Çizelge 2. Puma 560 sürtünme parametreleri

i (eklem no)	f_s	f_k	k_{vn}	x_s
1	5	2	1	0.1
2	5	2	1	0.1
3	2.5	1	1	0.1
4	0.3	0.1	0.05	0.1
5	0.2	0.1	0.05	0.1
6	0.2	0.1	0.05	0.1

Robot kolunun uç noktasında taşınan yükün dinamik modele etkisi aşağıdaki denklem ile temsil edilir.

$$\tau_y(t) = m J^T J \ddot{\theta} + m J^T \dot{J} \dot{\theta} - m J^T \bar{g} = m L(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (3)$$

Burada, J , robot kolunun Jacobian matrisi, \bar{g} , yer çekim ivme vektörü, m , uç noktada taşınan yükün kütlesi ve $L(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$, birim yük başına düşen ilave tork değeridir [1].

Bu çalışmada yörünge planlaması için sinüzoidal yörünge planlaması kullanılmıştır. Hareketin yörüngesi Şekil 2'de verilmiştir. Buna göre her bir ekleme ait referans açı (pozisyon) ve açısal hız değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır [1]:

$$\theta(t) = a + b \cos(wt) \quad (4)$$

$$\dot{\theta}(t) = -b w \sin(wt) \quad (5)$$

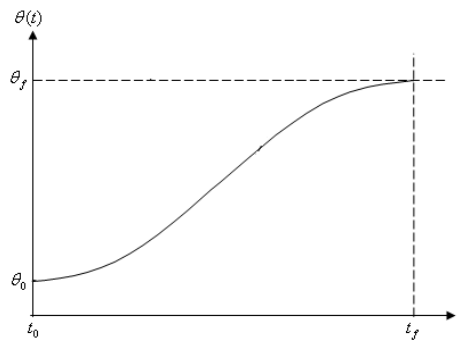
$$w = \frac{\pi}{t_f}, \quad a = \frac{\theta_f + \theta_0}{2}, \quad b = -\left(\frac{\theta_f - \theta_0}{2}\right) \quad (6)$$

$$\theta[i] = \left(\frac{\theta_f + \theta_0}{2}\right) - \left(\frac{\theta_f - \theta_0}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi i}{n}\right), \quad i = 0 \dots n \quad (7)$$

Açısal hız denklemi aşağıdaki gibi türetilir:

$$\dot{\theta}[i] = \left(\frac{\theta_f - \theta_0}{2}\right) \left(\frac{\pi}{t_f}\right) \sin\left(\frac{\pi i}{n}\right) \quad (8)$$

Burada, t_f , toplam simülasyon süresi, θ_f , i . eklem başlangıç pozisyonu, θ_0 , i . eklem bitiş pozisyonu, n ise eklem sayısıdır.



Şekil 2. Hareketin yörünge planlaması

Robot kolunun uç nokta koordinatları aşağıdaki gibi hesaplanır [12]:

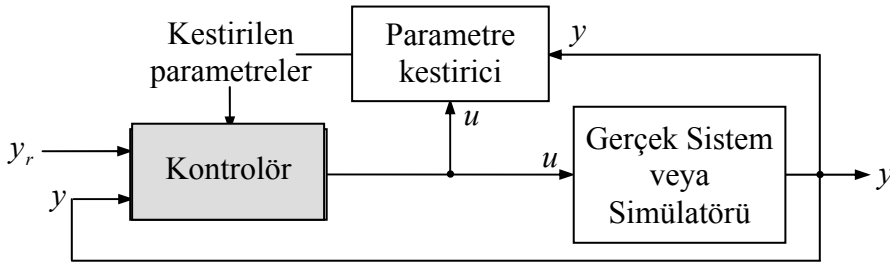
$$\begin{aligned}
 P_x &= [d_6(\cos(\theta_2 + \theta_3)\cos\theta_4 \sin\theta_5 + \sin(\theta_3 + \theta_3)\cos\theta_5) + d_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2] \cos\theta_1 - (d_2 + d_6 \sin\theta_4 \sin\theta_5) \sin\theta_1 \\
 P_y &= [d_6(\cos(\theta_2 + \theta_3)\cos\theta_4 \sin\theta_5 + \sin(\theta_3 + \theta_3)\cos\theta_5) + d_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2] \sin\theta_1 + (d_2 + d_6 \sin\theta_4 \sin\theta_5) \cos\theta_1 \\
 P_z &= d_6(\cos(\theta_2 + \theta_3)\cos\theta_5 - \sin(\theta_2 + \theta_3)\cos\theta_4 \sin\theta_5) + d_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin\theta_2
 \end{aligned} \tag{9}$$

Sürtünme, motor ataletleri ve uç noktada taşınan yükün etkisini de içeren en genel anlamda bir dinamik model oluşturulmuştur. Lagrange-Euler denklem sistemi ile modellenen bu yapıda birbirleriyle yüksek oranda etkileşimli altı adet ikinci dereceden doğrusal olmayan diferansiyel denklem mevcuttur. Bu tip denklemlerin çözümü için klasik nümerik çözümler kullanılmadığından özel metotların kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada, dinamik modelin denklem takımının çözümü için 4. dereceden Runge-Kutta integrasyon metodu kullanılmıştır [1].

3. GENELLEŞTİRİLMİŞ ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÖR TASARIMI

Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol (Generalized Predictive Control - GPC), uzun menzilli öngörülü kontrol algoritmaları sınıfına ait olup ilk olarak D. W. Clarke ve arkadaşları tarafından 1987 yılında tanıtılmıştır [5-9]. GPC, esas olarak sistem çıkışı $y(t)$ 'nin sonlu bir ufuk üzerinden öngörüldüğü ve kontrol sinyalleri dizisinin kuadratik bir maliyet fonksiyonunu minimize edecek şekilde hesaplandığı bir algoritmadır. Uygun cevabı elde etmek için kontrol sinyallerinin beklenti büyüklüklerinde bazı tahminler yapılmaktadır, bu tahminler GPC yaklaşımının püf noktasını teşkil eder.

GPC, tek bir öngörü yerine sonlu bir öngörü ufuğu boyunca oluşturulan öngörü dizilerini kullanan daha genel bir maliyet fonksiyonuna sahip olması ile kendinden önce yapılan öngörülü çalışmalardan esaslı bir şekilde farklıdır [10, 11]. Öngörülü kontrol algoritmasının esası temel olarak; bir öngörücü, bir maliyet fonksiyonu, bu maliyet fonksiyonunu minimize edecek bir kontrol dizisini seçme algoritması ve adaptif durumda parametre tanılama algoritmasının birleşmesinden meydana gelmektedir. GPC algoritmasının blok diyagramı Şekil 3 'de verilmiş olup u sistem girişi, y sistem çıkışı, y_r ise referans yörünge vektörüdür. Parametre kestirimi uygun bir parametre kestirme algoritması ile yapılır.



Şekil 3. GPC Algoritmasının Blok Diyagramı

GPC algoritmasında CARIMA formunda (Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average) doğrusal bir işlem modeli kullanılmaktadır [5-9]. Denklemi (10)'da verilmiştir. GPC algoritması bu model sayesinde kararsız sistemler için bile doğru çıkış öngörülerini elde edebilmektedir.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + C(q^{-1})\xi(t)/\Delta \tag{10}$$

$A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $C(q^{-1})$ parametreleri $m \times m$ 'lik matris düzeyinde polinom değişkenlerdir ($m =$ eklem sayısı).

$$A(q^{-1}) = I_m + \sum_{j=1}^{n_a} a_j q^{-j}, B(q^{-1}) = \sum_{j=0}^{n_b} b_j q^{-j}, C(q^{-1}) = I_m + \sum_{j=1}^{n_c} c_j q^{-j} \quad (11)$$

n_a, n_b, n_c polinom mertebeleridir. I_m $m \times m$ 'lik birim matristir. Hesaplamalarda kolaylık olması açısından $n_c = 0$ alınacak, yani $C(q^{-1})$ ihmal edilecektir. $\Delta = 1 - q^{-1}$, fark alma operatörüdür ($\Delta u_j(t) = u_j(t) - u_j(t-1)$). $1/\Delta$ ifadesi ise integratör görevi görerek hatayı daha da azaltır. Bu durumda hata $e(t) = \xi(t)/\Delta$ olur.

Maliyet fonksiyonu kontrolün başından sonuna kadar her kontrol adımı sonunda sisteme uygulanacak uygun $\Delta u(t)$ 'yu bulmak için gerekli olup denklemi (12)'de verilmiştir [10].

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} (\hat{y}(t+j) - y_r(t+j))^T (\hat{y}(t+j) - y_r(t+j)) + \sum_{j=1}^{N_u} (\Delta u(t+j-1))^T \Lambda(j) (\Delta u(t+j-1)) \quad (12)$$

Burada $\hat{y}(t+j)$ herhangi bir (t) anında öngörülen sistem çıkışı, $y_r(t+j)$ sistemin referans çıkışı, $\Delta u(t+j-1)$ kontrol sinyalindeki değişim miktarını, N_1 başlangıç ufkunu, N_2 bitiş ufkunu ve N_u ise kontrol ufkunu temsil eder. $\lambda(j)$ ise kontrol ağırlık faktörü olup oldukça küçük seçilir ($\lambda \approx 10^{-6}$ gibi). Referans yörüngeler ne kadar yakın takip edilirse kontrol o kadar güçlü olur. Bu takibi sağlamak için önce maliyet fonksiyonu J minimize edilir. Yani $\frac{\partial J}{\partial \tilde{u}} = 0$ yapılır. Sonra \tilde{u} çekilerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\tilde{u} = (G^T G + \Lambda)^{-1} G^T (y_r - f) \quad (13)$$

Bütün kontrol adımlarında bu denklem kullanılır. Kontrol bitene kadar her kontrol adımı sonunda \tilde{u} 'nin ilk elemanı $\Delta u(t)$ alınır. Bir önceki kontrol girdisi ile toplanarak yeni kontrol girdisi ($u(t) = u(t-1) + \Delta u(t)$) elde edilir ve sisteme uygulanır. Fakat G ve f fonksiyonlarını belirleyen $A(q^{-1})$ ve $B(q^{-1})$ parametrelerinin her kontrol adımı sonunda tekrardan hesaplanması gerekir. Bu iş için bir parametre kestirim algoritmasına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada yakınsama açısından daha hızlı olduğundan ardışık en küçük kareler algoritması kullanılmıştır [16].

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışmada, altı eklemlilik bir robot kolunun yörünge kontrolü için geliştirilmiş öngörülü kontrolör tasarlanmış ve simülasyon ortamında test edilmiştir. Tasarlanan kontrolör, kolun hareketi boyunca referans modelden gelen her bir ekleme ait referans yörüngeleri takip edecek eklemlere ait uygun tork değerlerini üretmektedir. Kontrolör, referans yörünge ve robot kolu dinamik modelinden elde edilen pozisyon (açı) bilgilerini girdi olarak alır ve sisteme (robot koluna) uygulanacak tork değerlerini çıktı olarak üretir. Üretilen torklar eklemlere uygulanır.

Tasarlanan GPC kontrolör, CARIMA formunda doğrusal bir öngörü modeli kullanır. Geçmiş tork değerleri ve sistemden elde edilen pozisyon verilerini kullanarak sonraki adımlarda eklemlere uygulanacak tork değerlerini öngörür. Öngörülen değerler maliyet fonksiyonuna yerleştirilir. Referans yörünge ile öngörülen yörünge arasındaki hata minimize edecek uygun tork değişim vektörü $\Delta u(t)$ hesaplanır. Hesaplanan bu değer bir önceki tork değerine eklenerek $u(t) = u(t-1) + \Delta u(t)$ sisteme uygulanır. Hareket sonuna kadar bu işlemler tekrarlanır.

Öte yandan her kontrol adımında öngörü modelindeki parametrelerin güncellenmesi gerekir. Bunun için bir parametre kestirim algoritmasına ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada literatürde çok tercih edilen parametre kestirim algoritması olarak "Ardışık En Küçük Kareler Yöntemi" (Recursive Least Squares – RLS) kullanılmıştır [16]. Simülasyon çalışmaları için aşağıda verilen örnek bir kontrol senaryosu düşünülmüştür:

- Toplam simülasyon zamanı 10 sn ve toplam kontrol adımı 10000 olarak belirlenmiştir.
- 4000. adımda uç noktada taşınan yükün düştüğü varsayılmıştır.
- Aşırı hesaplama yükünden kaçınmak için geçmiş üç çıkış (pozisyon) ve üç giriş(tork) bilgisi kullanılarak gelecek üç adım sonrasına kadar öngörü işlemi yapılmıştır. Bu durumda $n_a=2$ ve $n_b=1$ olarak seçilmiştir.
- Maliyet fonksiyonu parametrelerinde başlangıç ufuğu; $N_1=1$, bitiş ufuğu; $N_2=3$ ve kontrol ufuğu $N_u=1$ olarak alınmıştır.

Çizelge 3'de verilen örnek kontrol uygulamasında eklemlere ait başlangıç ve bitiş açıları için eklemlere ait yörünge ve açısal hız eğrileri Şekil 4'deki gibi elde edilmiştir.

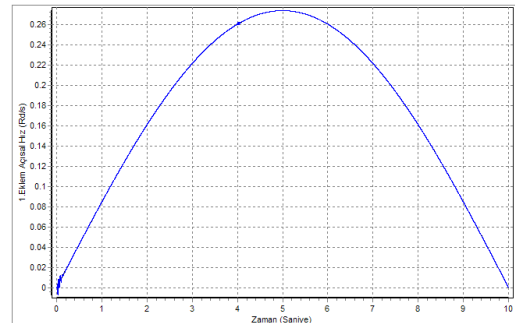
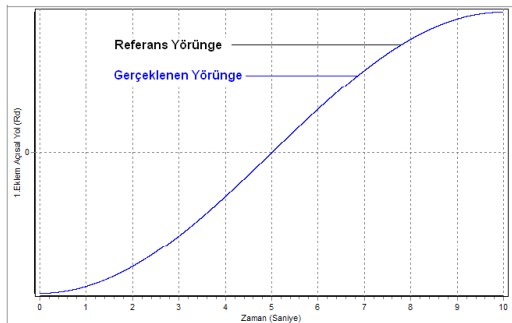
Çizelge 3. Örnek uygulama için eklemlere ait başlangıç ve bitiş açıları

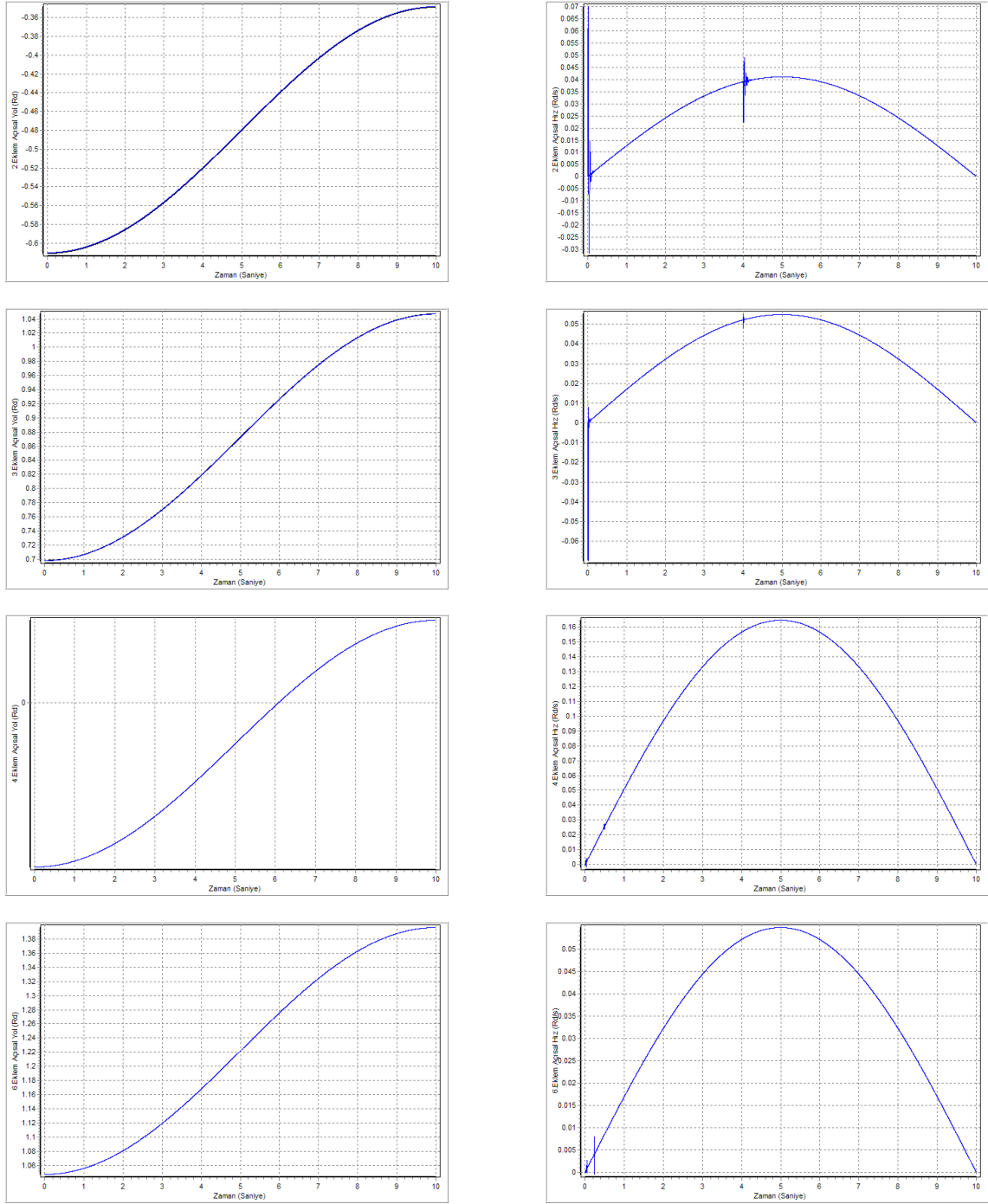
Eklem no.	Başlangıç Açısı (rad)	Bitiş Açısı (rad)
1	-0.872664625997	0.872664625997
2	-0.610865238198	-0.349065850399
3	0.698131700798	1.047197551197
4	-0.698131700798	0.349065850399
5	0.174532925199	0.349065850399
6	1.047197551197	1.396263401595

Şekillerde görüldüğü gibi eklemler referans yörüngelerini oldukça yakın takip etmişlerdir. Hareket başlangıcında hareketsiz durumdaki robot kolunun eylemsizliğinden kaynaklanan hatalar görülmektedir. Ayrıca yük düşme anında kısa süreli salınımların ardından kontrolör bu duruma kendini adapte etmekte ve hızlı bir şekilde referans yörüngeleri yakalayabilmektedir. Her iki durumda da kontrolör adaptif bir davranış sergilemektedir. Verilen örnek kontrol çalışması için eklemlerin konum hataları ve robot kolunun uç nokta koordinat hatası Çizelge 4'de verilmiştir. Eklemler çok küçük hatalar ile hedef konumlarına ulaşmışlardır.

Çizelge 4. Eklemlerin konum hataları

Eklem no.	Konum hatası (rad)	Uç nokta koordinat hatası (mm)
1	-0.000061631653	0.470019652329
2	0.000691221222	
3	-0.000339610305	
4	-0.000001564561	
5	0.000167969520	
6	-0.000001311072	





Şekil 4. Eklemlere ait yörünge ve açısal hız grafikleri

Geleneksel kontrolörlere alternatif olan öngörülü kontrol, robot kolu kontrolü gibi referans yörüngelerin önceden bilindiği kontrol uygulamaları için oldukça başarılıdır. Öngörülü kontrol değişken yük (örneğin yük düşmesi) gibi bilinmeyen ve istenmeyen durumlarda bile sistem çıkışlarını istenilen çıkışlara yakınsatacak şekilde sonuçlar üretebilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] H. Temurtas, “Üç Eklemlili Bir Robot Kolunun Nöro Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol İle Eklem Esaslı Yörünge Kontrolü”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2004).
- [2] F.C. Sun, Z.Q. Sun, and P.Y. Woo, “Neural network-based adaptive controller design of robotic manipulators with an observer”, IEEE Transactions Neural Networks, 12 (1), 55 (2001).
- [3] F. Alonge, F.D. Ippolito, and F.M. Raimondi, “An adaptive control law for robot manipulators without velocity feedback”, Control Engineering Practice, 11, 1000 (2003).
- [4] O. Nasisi and R. Carelli, “Adaptive servo visual robot control”, Robotics and Autonomous Systems, 43, 54 (2003).
- [5] D.W. Clarke, C. Mohtadi, and P.C. Tuffs, “Generalized predictive control - part 1: The basic algorithm”, Automatica, 23, 137-145 (1987).
- [6] D.W. Clarke, C. Mohtadi, and P.C. Tuffs, “Generalized predictive control - part 2: The basic algorithm”, Automatica, 23, 149-163 (1987).
- [7] D.W. Clarke, C. Mohtadi, and P.C. Tuffs, “Generalized predictive control: A new robust self-tuning algorithm in landau, I. D., and L. Dugard (Editors). Commande Adaptive - Aspects Pratiques et Theoriques, Masson, Paris, 220 (1987).
- [8] D.W. Clarke and L. Zhang, “Long-range predictive control using weighting-sequence models”, Control Theory and Applications, 134(3), 194 (1987).
- [9] D.W. Clarke and C. Mohtadi, “Properties of generalized predictive control” Automatica, 25(6), 870 (1989).
- [10] J. Zhang, J. Wei, and T. Zhong, “A generalized predictive controller to a thermal process for batch dyeing process”, International Conference on Information Acquisition 2004, China, 433 (2004).
- [11] J.E. Normey-Rico and E.F. Camcho, “Robust design of GPC for process with time delay”, International Journal Robust Nonlinear Control, 10(13), 1110 (2000).
- [12] B. Armstrong, O. Khatib, and J. Burdick, “The explicit dynamic model and inertial parameters of the PUMA 560 arm”, IEEE Conference on Robotics and Automation, 3, 516 (1986).
- [13] M.W. Spong and M. Vidyasagar, “Robot Dynamics and Control”, John Wiley & Sons, New York, 50 (1989).
- [14] J. Draye, D. Pavisic, G. Libert, “Dynamic recurrent neural network: a dynamical analysis”, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B 26(5), 700 (1996).
- [15] J. Rodrigo, H.A. Marcelo, D. Oetomo, O. Khatib, T.M. Lim, S.Y. Lim, “The operational space formulation implementation to aircraft canopy polishing using a mobile manipulator”, International Conference on Robotics&Automation, Whashington D C. USA, 400 (2002).
- [16] F. Temurtas, H. Temurtas, and N. Yumusak, “Application of neural generalized predictive control to robotic manipulators with a cubic trajectory and random disturbances”, Robotics and Autonomous Systems, 54, 82 (2005).

