

ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ PUMA TİPİ BİR MANİPÜLATÖRÜN PID KONTROLÜ

Mehmet Ali DURAN^{a*}, Arif ANKARALI^b

^aSelçuk Üniversitesi, Çumra Meslek Yüksekokulu, 42500 KONYA

^bSelçuk Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 42075 KONYA

Özet

Bu çalışmada, üç serbestlik dereceli PUMA tipi robot kolunun uç elemanının PID yöntemi ile yörünge kontrolü yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, robota ait kinematik ve dinamik denklemler elde edilmiştir. Yörünge planlanması kartezyen koordinatlarda yapılmıştır. İstenen yörünge için gerekli mafsallık değişkenleri ters kinematik analizle hesaplanmıştır. Yörüngeyi izlemek üzere tasarlanan kontrolcüye, dinamik analiz sonucu elde edilen servo motor torkları sisteme dış bozucu etki şeklinde dahil edilmiştir. PID kontrol yöntemi uygulanan kontrol sistemine, sikloid, harmonik ve polinom yapıları üç farklı yol alma fonksiyonu giriş olarak kabul edilmiş ve elde edilen sistem cevapları istenen yörüngeye yakınsaması açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, harmonik yol alma fonksiyonunun daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PUMA robot, kinematik analiz, dinamik analiz, PID kontrol.

PID CONTROL OF THE PUMA-TYPE MANIPULATORS HAVING THREE DEGREES OF FREEDOM

Abstract

In this study, trajectory control of tip of arm of the PUMA-type manipulators having three degree of freedom was performed with PID method. At the first stage of the study, all the kinematics and dynamic equations were obtained. The trajectory planning was realized at cartesian coordinates. Required joint variables for materialization of desired trajectory were calculated with reversed kinematics analysis. Servo motor torques obtained by dynamic analysis was included into the controller designed to observed trajectory as external distorting action. Cycloid, harmonic and polynomial structured three different headway functions were regarded as input and obtained responses were compared in terms of convergence for required trajectory. As a result of comparison, it is observed that harmonic headway function was more advantageous.

Keywords: PUMA manipulator, kinematics analysis, dynamic analysis, PID control.

1. Giriş

Üç serbestlik derecesine sahip PUMA tipi bir manipülatör; 3 rijit uzvun ucu açık bir mekanizma oluşturacak şekilde dönel mafsallarla birleştirilerek tahrik elemanları tarafından sürülmesi şeklinde modellenebilmektedir. Bu tip bir manipülatörün kontrolünde öncelikle robot kolunun uç elemanına bağlı olduğu düşünülen hareketli eksen takımının, sabit referans koordinat sistemine göre yönlendirme ve konumunu belirlemek üzere Denavit-Hartenberg matris cebri metoduyla denklemler elde etmek

mümkündür. Denklemler üzerinde olduğu düşünülen hareketli eksen takımlarının birbirlerine göre dönmelerini ve yer değiştirmelerini ifade eden homojen transformasyon matrisleri yazılabilir. Sonra genel olarak hareketi tanımlamak üzere bileşke homojen transformasyon matrisi hesaplanmaktadır. Daha sonra elde edilen matrisleri kullanarak yine matris cebri metoduyla ters kinematik analiz gerçekleştirilerek, verilen bir konum ve yönlenme için gerekli olan mafsallık değişkenlerinin değerlerinin hesaplanacağı ters kinematik denklemler elde edilerek kontrol aşamasında kullanılmaktadır.

Kontrolün amacı, bir işlemdeki değişkenlerin istenilen şekilde davranması için giriş sinyalleri üretmektir. Daha değişik bir ifadeyle sisteme uygun bir giriş uygulayarak, arzu edilen çıkışı elde etmektir [1].

Endüstriyel çevrelerde PID kontrolcü hala en çok kullanılan geri beslemeli kontrolcüdür. Pratikte edinilen tecrübeler bu kontrolcünün bir çok proses kontrol problemi ile son derece iyi bir şekilde baş edebildiğini göstermiştir. PID yönteminin diğer avantajları ise az sayıdaki tasarım parametresinin olması ve bunların performans ölçüleri ile kolayca ilişkilendirilebilmesidir [2].

Bu çalışmanın amacı, üç serbestlik derecesine sahip PUMA tipi bir manipülatörün kontrol sistemine PID kontrol metodu uygulayarak, sikloid, harmonik ve polinom yol alma fonksiyonlarına vermiş olduğu sistem cevapları incelenmektedir.

2. Robot Kolu Kinematığı

Robot kolu kinematığı, hareketin geometrisinin sabit referans koordinat sistemine göre zamanın fonksiyonu olarak analitik olarak incelenmesidir. Bu çalışma esnasında

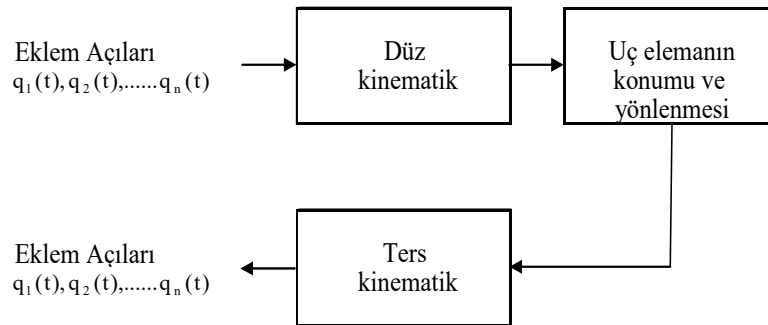
harekete neden olan kuvvetler ve momentler ile ilgilenilmez. Teori ve pratikte robot kolu kinematiği ile ilgili olarak aşağıda verilen iki temel durum vardır.

1. Verilen bir manipülatör için eklemlere ait eklem açıları vektörü $q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))^T$ şeklinde tanımlanır ve uzuvların kol parametreleri verilerek uç noktanın sabit eksen takımlarına göre konumu ve yönlenmesi nasıl tanımlanır?

2. Uç noktanın istenilen konumu ve yönlenmesi sabit referans eksen takımına göre kol parametreleriyle birlikte verilerek, manipülatör bu noktaya ulaşabilir mi? Ulaşabilirse kaç çeşit robot kol konfigürasyonu bu şartları sağlar?

Birinci durum düz kinematik problemi, ikinci durum ise ters kinematik problemi olarak bilinir.

PUMA tipi bir robot kolunda bağımsız değişkenler eklem değişkenleri olduğundan ve yapılacak iş referans yer koordinatlarına göre tanımlandığından ters kinematik analiz çok daha sık kullanılır. Şekil 1’de düz ve ters kinematik problem arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 1. Düz ve ters kinematik problemler

PUMA tipi bir robot kolunun uzuvları referans koordinat takımına göre ya dönme ya da öteleme hareketi yapar. Bu nedenle uç elemanın üç boyutlu uzaydaki toplam yer değiştirmesi uzuvların açısal dönmeleri ve doğrusal ötelenmeleri sonucu

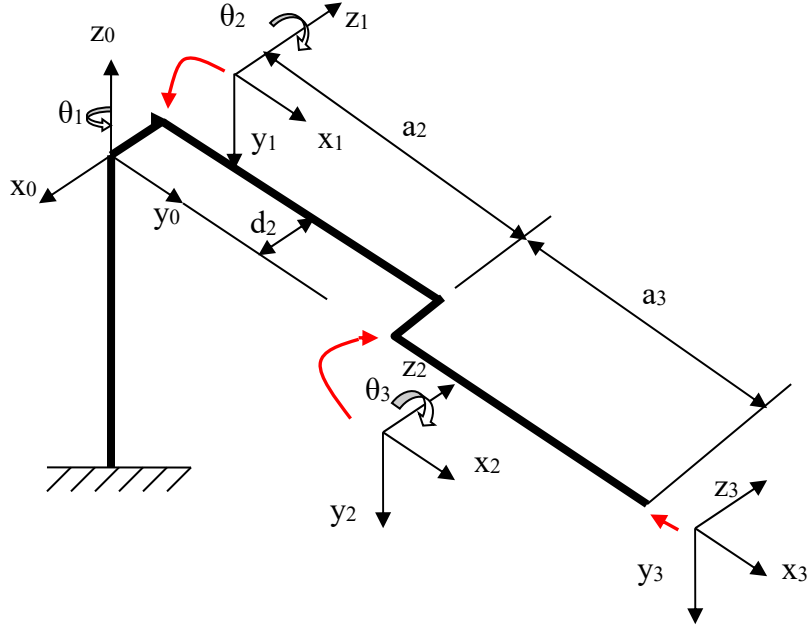
oluşur. Denavit ve Hartenberg robot kolu uzuvlarının sabit bir referans koordinat sistemine göre uzaydaki geometrisini tanımlamak için, matris cebri kullanılan genel ve sistematik bir yöntem önermişlerdir. Bu metot ile birbirini izleyen iki uzuv için 4x4 homojen dönüşüm matrisleri tanımlanır. Sonuçta bu metot, robotun eli üzerindeki koordinat sisteminin referans koordinat sistemine göre tanımlanmasını sağlayacak bir eşdeğer 4x4 homojen dönüşüm matrisi haline getirir. Robot kolu hareketinin dinamik denklemlerinin elde edilmesinde 4x4 homojen dönüşüm matrisleri kullanılır [3], [4].

2.1. Düz kinematik problemi

PUMA tipi bir robot kolunun uzuvlarının referans koordinat sistemine göre tanımlanmasında vektör ve matris cebri kullanılır. Bir robot kolu uzvu referans koordinat takımına göre dönme ve öteleme şeklinde iki temel hareket yapabileceğinden, uzvun hareketini tanımlamak için her bir uzvun mafsal eksenini üzerinde bir koordinat sisteminin bulunduğu düşünülecektir. Bir 3x3 dönüşüm matrisi mafsal üzerindeki eksen takımının referans eksen takımına göre dönmelerini tanımlamak için kullanılabilir. Bu matrisler daha sonra mafsal koordinat takımının öteleme hareketlerini de içerecek şekilde 4x4 dönüşüm matrislerine dönüştürülür. Robot kolunun uzay geometrisini tanımlamada kullanılan bu matris gösterimi ilk defa Denavit ve Hartenberg tarafından kullanılmıştır.

2.1.1. Denavit – Hartenberg parametreleri

PUMA tipi robot kolu genel görünümü ve bu robot kolu için uzuv koordinat sistemi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. PUMA tipi robot kolu için uzuv koordinat sistemi

Tablo 1. PUMA robot kolu için uzuv koordinat parametreleri

Eklem i	θ_i	α_i	a_i	d_i	Eklem Hareketi
1	90°	-90°	0	0	-160/+160
2	0°	0°	431,8	149,09	-225/45
3	0°	0°	433,07	0	-45/225

θ_i ; z_{i-1} eksenini etrafındaki x_{i-1} 'den x_i eksenine mafsallık açısıdır (sağ el kuralını kullanarak).

d_i ; (i-1). koordinat takımının orijininin, z_{i-1} eksenini ile x_i ekseninin kesiştiği noktaya, z_{i-1} eksenini boyunca olan mesafedir.

a_i ; z_{i-1} ile z_i eksenini arasındaki en kısa mesafedir.

α_i ; z_{i-1} ekseninden z_i eksenine x_i eksenini etrafındaki kayma açısıdır.

2.1.2. 3 Serbestlik dereceli PUMA tipi bir robot kolu için kinematik denklemler

Bir PUMA tipi robot için T kol matrisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$T = {}^0A_3 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(1)

$$T_1 = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & -S_1 & a_3 C_1 C_{23} + a_2 C_1 C_2 - d_2 S_1 \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & C_1 & a_3 S_1 C_{23} + a_2 S_1 C_2 + d_2 C_1 \\ -S_{23} & -C_{23} & 0 & -a_3 S_{23} - a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2)

Burada $a_x = C_{23}$

$$n_y = S_1 C_{23}$$

$$n_z = -S_{23}$$

$$s_x = -C_1 S_{23}$$

$$s_y = -S_1 S_{23}$$

$$s_z = -C_{23}$$

$$a_x = -S_1$$

$$a_y = C_1$$

$$a_z = 0$$

$$p_x = a_2 C_1 C_2 + C_1 a_3 C_{23} - d_2 S_1$$

$$p_y = a_2 S_1 C_2 + S_1 a_3 C_{23} + d_2 C_1$$

$$p_z = -a_2 S_2 - a_3 S_{23}$$

olarak bulunur.

Burada;

$$\begin{aligned} S_i &\equiv \sin \theta_i, \\ C_{ij} &\equiv \cos(\theta_i + \theta_j), \\ S_{ij} &\equiv \sin(\theta_i + \theta_j). \end{aligned}$$

2.2. Ters kinematik problemi

Ters kinematik problem, verilen uç nokta konumu ve yönlenmesi için eklem değişkenlerinin değerlerinin hesaplanmasıdır. Yani, robotun takım koordinat sisteminin uzayda istenen noktaya gitmesi ve istenen yönlenmeyi sağlaması için, eklem değişkenlerinin alması gereken açısal konum değerleri ters kinematik analiz ile belirlenir.

2.2.1. Geometrik yaklaşım

Bu bölümde 3 uzuvlu dönel eklemli manipülatörlerin ters kinematik problemlerinin 'geometrik yaklaşım' ile çözülmesi ele alınacaktır.

PUMA benzeri robotların değişik kol konfigürasyonları üç tane göstergenin (Kol, Dirsek, Bilek) yardımıyla belirlenebilir. İlk iki gösterge bir kimsenin ilk üç eklem için elde edilen dört tane farklı çözüm içinden en uygun olan bir tanesini seçmesini sağlar. Benzer şekilde, üçüncü gösterge de son üç eklem için mümkün olan iki çözümden bir tanesini seçmeyi sağlar. Kol konfigürasyonu göstergeleri ters çözümü bulmak için kullanıcı tarafından önceden belirlenir. Çözüm iki aşamada gerçekleştirilir. Önce, dirsekten bileğe bir konum vektörü tanımlanır. Bu her bir i mafsalı için ($i = 1, 2, 3$) çözümü, konum vektörünün (x_{i-1}, y_{i-1}) düzlemindeki izdüşümüne bakarak belirlenmesini sağlar. Bir kimse geometriden hareketle kol çözümünü rahatça bulabilir. Eklem çözümünün sağlanmasını yapmak için, kol konfigürasyonu göstergeleri eklem açılarının fonksiyonu olan ilgili 'karar verme' denklemlerinden belirlenebilir. Uygun bir düzenleme ve ayarlama ile bu yaklaşım, çoğu dönel eklemli endüstriyel robotların, ters

kinematik probleminin çözümünde kullanılabilir.

2.2.1.1. 1 Numaralı eklem çözümü

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{-KOL p_y \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2} - p_x d_2}{-KOL p_x \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2} + p_y d_2} \right) \quad (3)$$

2.2.1.2. 2 Numaralı eklem çözümü

$$\sin \theta_2 = \sin \alpha \cdot \cos \beta + (KOL \cdot DIRSEK) \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\cos \theta_2 = \cos \alpha \cdot \cos \beta - (KOL \cdot DIRSEK) \sin \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \right) \quad -\pi \leq \theta_2 \leq \pi \quad (4)$$

2.2.1.3. 3 Numaralı eklem çözümü

$$\sin \theta_3 = \sin(\phi - \beta) = \sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta$$

$$\cos \theta_3 = \cos(\phi - \beta) = \cos \phi \cos \beta - \sin \phi \sin \beta$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3} \right) \quad -\pi \leq \theta_3 \leq \pi \quad (5)$$

3. Dinamik Analiz

Manipülâtörün dinamik modeli hareketin simülasyonu, yapının analizi ve kontrol algoritmasının tasarımı için önem arz etmektedir. Hareketin simülasyonu kontrol stratejilerini ve hareket planlama tekniklerini sistemin fiziksel varlığına ihtiyaç duymaksızın test edilmesine olanak tanır. Dinamik modelin analizi prototip kolların mekanik tasarımına yardımcı olmaktadır.

Burada hareketin kontrolü için uygun olan dinamik denklemlerinin formülasyonu, karakteristikleri ve özellikleri üzerinde durulacaktır. Bir robot kolunun dinamik modeli Lagrange mekaniği ve Newton mekaniği gibi fiziksel kanunlardan elde edilebilir. Bu kanunların uygulanmasıyla değişik sayıda mafsallı manipülatörün belirlenen kollarının geometrik ve atalet parametrelerine göre hareketin dinamik denkleminin elde edilmesi mümkündür. Klasik olarak Lagrange-Euler(L-E) ve Newton-Euler(N-E) formülasyonları sistematik olarak gerçek bir robot kol hareketinin denklemlerini elde etmek için kullanılabilir. Buradan elde edilecek hareket denklemleri aynı fiziksel robotik manipülatörün dinamik davranışını tanımlayacağından bu anlamda birbirine eşdeğerdir. Bununla beraber, bu denklemlerin yapısı değişik elde edilme nedenlerine bağlı olarak farklılık gösterebilir. L-E hareket denklemleri robot dinamiği için kapalı durum denklemlerinin elde edilmesini sağlar ve bu denklemler ileri seviyede mafsallı değişkenli uzayla ilgili kontrol stratejilerinin tasarım ve analizinde kullanılabilir. Aynı zamanda, bu denklemler ileri dinamik problemlerinin çözümü için kullanılabilir. Uygulanan moment ve kuvvetler verilirse, dinamik denklemler mafsallı ivmelerinin çözümü için kullanılır. Daha sonra integre edilerek mafsallı genelleştirilmiş hızlarının ve koordinatlarının hesaplanması için kullanılır. Ters dinamik problemin çözümünde ise, genelleştirilmiş koordinatlar ve bunların zamana göre ilk iki türevi verilmişse genelleştirilmiş kuvvetler/torklar hesaplanabilir.

L-E hareket denklemlerinin yetersizliği kinematik zinciri tanımlayan 4×4 homojen matrislerden kaynaklanır. Halbuki N-E formülasyonunun üstünlüğü vektör formülasyonu ve onun tekrarlanan yapısına dayanır. L-E formülasyonunun hesaplama zamanının daha da iyileştirilmesi için Hollerbach (1980) Lagrange formülasyonunun yapısını tekrarlanan hale getirmiştir [3],[4]. Tork denklemleri;

$$+ \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) a_2^2 \ddot{\theta}_1 - \left[\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) a_1 a_2 \cos(\theta_2) + \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) a_2^2 \right] \ddot{\theta}_2 - a_1 a_2 \sin(\theta_2) \left[(m_2 + 2m_3) l_1 l_2 - \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2^2 \right]$$

$$T_2 = - \left[\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) a_1 a_2 \cos(\theta_2) + \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) a_2^2 \right] \ddot{\theta}_1 + \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) a_2^2 \ddot{\theta}_2 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) a_1 a_2 \sin(\theta_2) l_1^2 \quad (6)$$

$$T_3 = m_3 \ddot{\theta}_3 - g m_3 \quad (7)$$

şeklindedir.

4. Yörünge Planlama

Yörünge planlaması; bir grup polinomdan hareketle, istenen yörünge'nin zamana bağlı kontrol noktaları şeklinde, başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar elde edilmesidir. Yörüngeyi oluşturan kontrol noktaları mafsal veya kartezyen koordinatlarda verilebilir. Bununla beraber genellikle kartezyen koordinatlarda verilir. Çünkü tutucunun konfigürasyonlarını bu koordinat sisteminde tanımlamak daha kolaydır [5].

4.1. Kartezyen yol yörüngelerinin planlanması

Manipülatorlerde mafsal koordinatları elin konum ve yönlenmesini tam olarak tanımlamasına rağmen, mafsal koordinatları bir hedef işi tam olarak tanımlamak için uygun değildir. Daha karışık yapıları robotik sistemlerde, bir işi manipülatöre yaptırabilmek üzere geliştirilmiş paket programlar vardır. Bu tür sistemlerde bir iş genellikle ardışık kartezyen düğüm noktaları şeklinde tanımlanır ve manipülatör elinin veya sonlandırıcının bu noktalardan geçmesi istenir. Böylece bir işi yapacak robotun hareketlerinin tanımlanmasında; genellikle manipülatör elinin uzayda izleyeceği eğrinin

yanında, hareket etmek zorunda olduğu hedef konumların tanımlanabilmesi için gerekli formülasyonlarla ilgilenilir [3].

4.2. Yol alma fonksiyonunun belirlenmesi

Yol alma fonksiyonu, hareketin kartezyen yörünge boyunca konumunun değişimini belirlemek için kullanılmaktadır. Yapılacak simülasyonlarda sikloid, harmonik ve polinom yol alma fonksiyonları kullanılacaktır. Bu fonksiyonlar aşağıda verilmiştir.

Sikloid yol alma fonksiyonu;

$$s = \Delta s \left[\frac{t}{t_p} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{t_p} t\right) \right] \quad (8)$$

Harmonik yol alma fonksiyonu;

$$s = \frac{\Delta s}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{t_p} t\right) \right] \quad (9)$$

Polinom yol alma fonksiyonu;

$$s = \Delta s \left[35 \left(\frac{t}{t_p}\right)^3 - 84 \left(\frac{t}{t_p}\right)^4 + 70 \left(\frac{t}{t_p}\right)^5 - 20 \left(\frac{t}{t_p}\right)^6 \right] \quad (10)$$

Burada;

Δs : toplam yörünge uzunluğu (m)

t: zaman (s)

t_p : yol alma süresi (s)

5. Robot Kontrolü

Robot kontrol sisteminin yapısı yerine getirilecek görevin karmaşıklığı ile değişir. Basit robotlar, hareketi kontrol etmek için pnömatik, mekanik veya basit elektriksel mantık kontrolcülerini kullanırlar. Karmaşık endüstriyel robotlarda her eklem için konumu veya hareket eksenine kapalı döngülü servo sistemiyle kontrol edilir. Bu kontrolcüler eklem hareketlerini kontrol etmek için algılayıcılardan sürekli konum bilgisi alırlar.

Robotlara uygulanabilecek kontrol metotları lineer ve nonlineer olmak üzere iki kısımda incelenebilir [2],[6].

5.1. PID (Orantı+İntegral+Türev) tipi kontrolcü

PID kontrolcü lineer bir kontrolcüdür. Hata sinyali $e(t)$ 'yi kontrol sinyali $u(t)$ 'ye çevirir. Lineer bir kontrolcü olduğundan zaman ve frekans domenlerinde incelenebilir.

Zaman domeninde kontrol sinyali şu şekildedir:

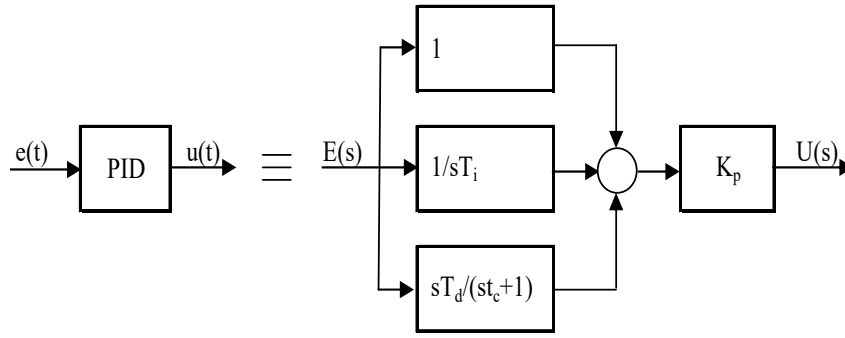
$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (11)$$

Laplace Dönüşümü alındıktan sonra bu denklem:

$$U(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right] E(s) \quad (12)$$

şeklinde olur.

Temel olarak kontrolcü üç terimden oluşur. Birinci terim hata sinyali ile, ikinci terim hata sinyalinin integrali ile, üçüncü terim ise hata sinyalinin türevi ile orantılıdır. Şekil 3'de PID kontrol yönteminin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3. PID kontrol yöntemi blok diyagramı

Bu yapıda türev ifadesinin uygulanmasında bazı değişiklikler yapılmıştır. Saf türev işlemi yüksek frekanslarda sınırsız genliğe sahip olduğundan pratik açıdan kullanılmaz. Ayrıca hata sinyali ile üst üste binen en ufak yüksek frekanslı gürültünün genliği bile çok yüksek olacaktır. Yumuşatma işlemi hata sinyalini, türevi alınmadan önce alçak geçişli bir filtreden geçirmek suretiyle yapılabilir. Pratikte iki işlem de aynı filtrede gerçekleştirilir. PID kontrolcünün transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{st_c + 1} \right] \quad (13)$$

Türev işleminin gerçekleşebilmesi için t_c 'nin T_d 'ye göre çok ufak olması gerekir. t_c çok büyük seçilirse terim, düşük frekanslarda bile oransal bir terime dönüşür.

Orantı İşlemi (P), proses değerindeki bir değişime çabuk cevap verdiği için hızlıdır. Orantı terimi yüzünden sabit hata, sabit kontrol işlemine neden olur. İntegral işlemi (I), hata sabit kaldığı sürece kontrol işleminin büyümesine yol açar. Dolayısıyla integral kontrolcü kullanılarak hata daima azaltılır. Oransal kontrolcü ile kıyaslandığında integral kontrolcü daha yavaş tepki verir. Bir hata ortaya çıktığında türev işlemi (D) çok çabuk devreye girer. Ancak hatanın değiştiği anlarda etkindir.

5.2. Sistemin transfer fonksiyonu

Sistemin transfer fonksiyonu;

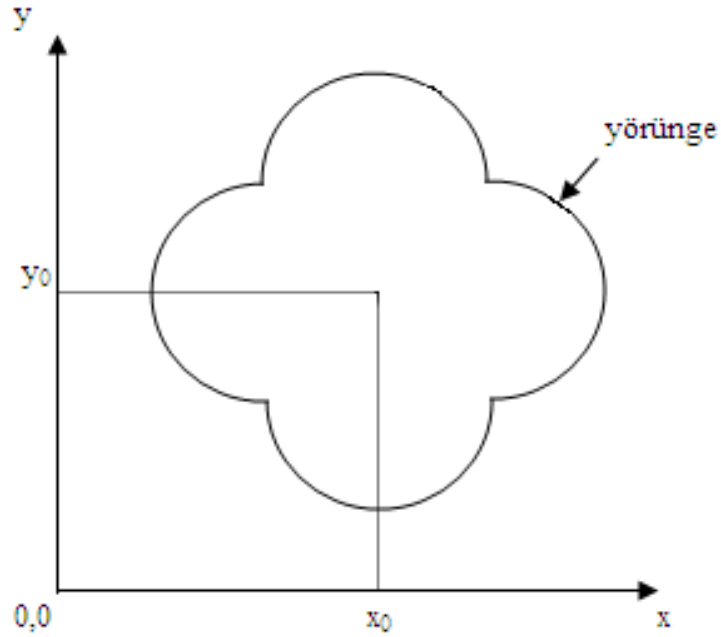
$$\frac{\Theta_m(s)}{V_a(s)} = \frac{k_a}{s(s^2 J_{\text{eff}} L_a + (L_a f_{\text{eff}} + r_a J_{\text{eff}})s + r_a f_{\text{eff}} + k_a k_b)} \quad (14)$$

şeklindedir.

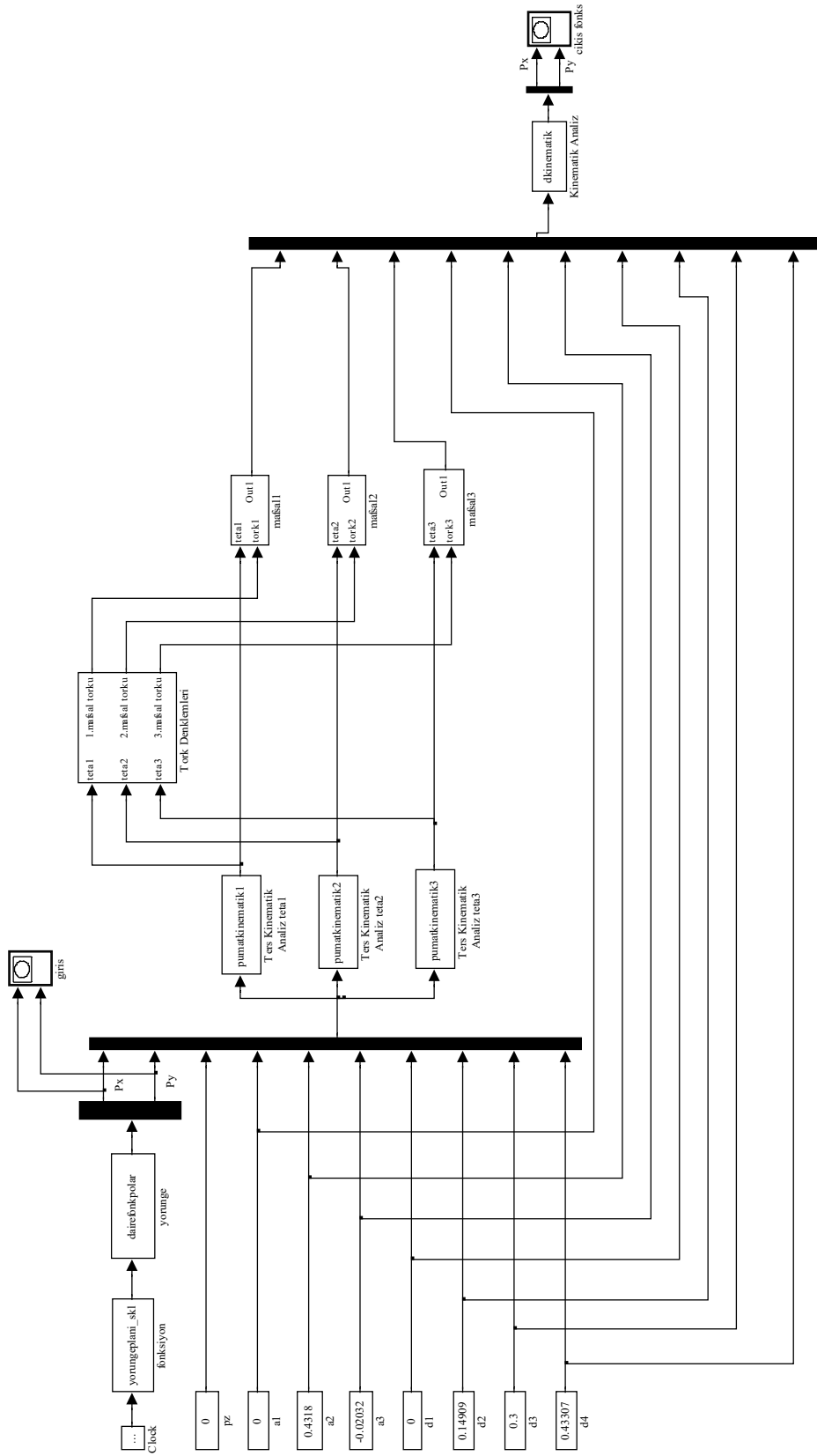
6. Simülasyonlar

6.1. Kontrol sisteminin matlab-simulink programı ile modellenmesi

Robotun uç noktasına Şekil 4’de gösterilen dört yarım daire çizdirilmek istenmektedir. Bunun için öncelikle Şekil 5’de gösterilen simulink programında sistemin modeli oluşturulmuştur. Simülasyonlarda; $x_0=0.4$ m., $y_0=0.4$ m., $r=0.1$ m. olarak alınmıştır.

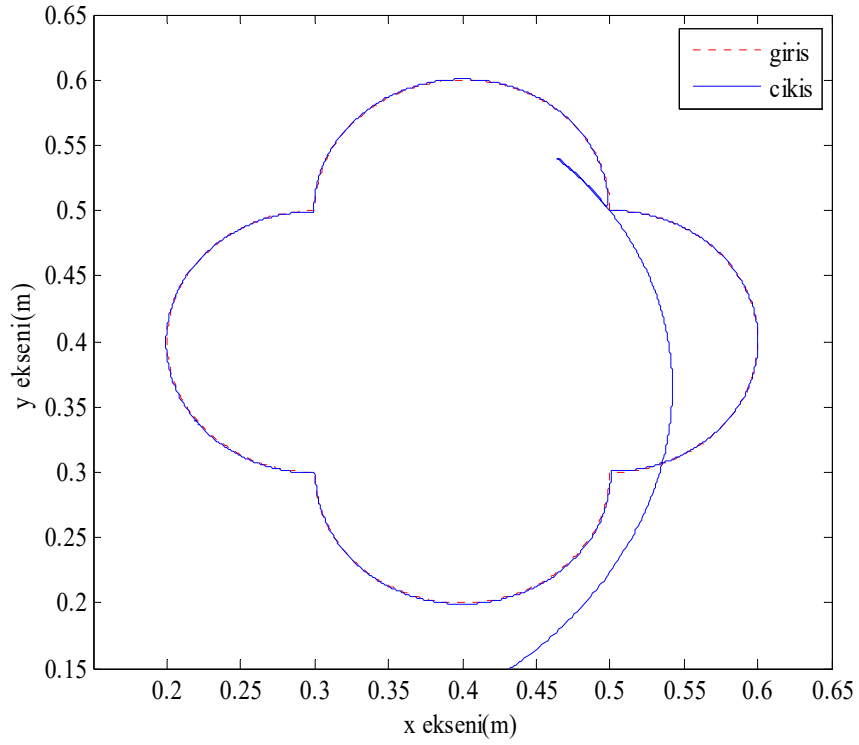


Şekil 4. Simülasyon yapılacak yörünge

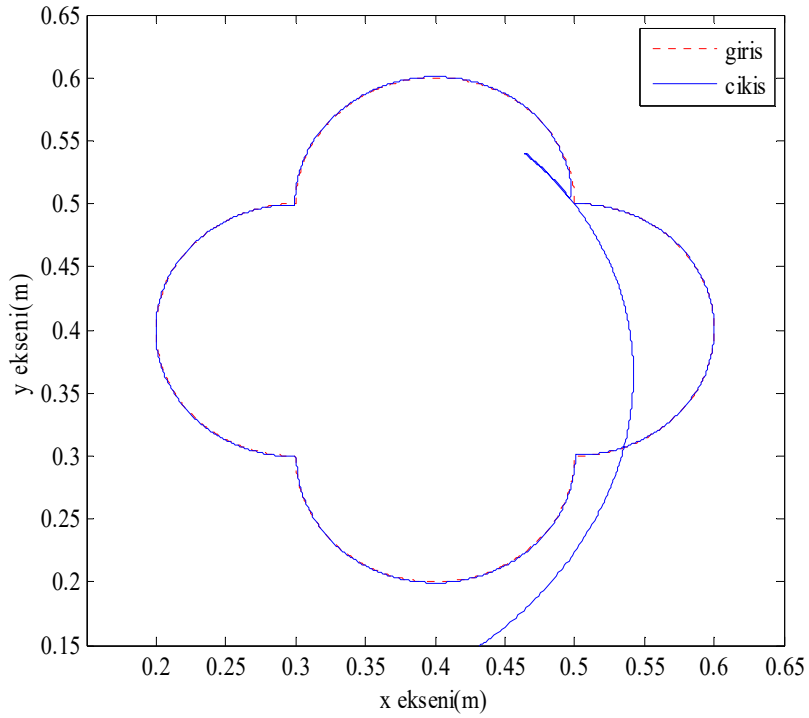


Şekil 5. Kontrol sisteminin simulink modeli

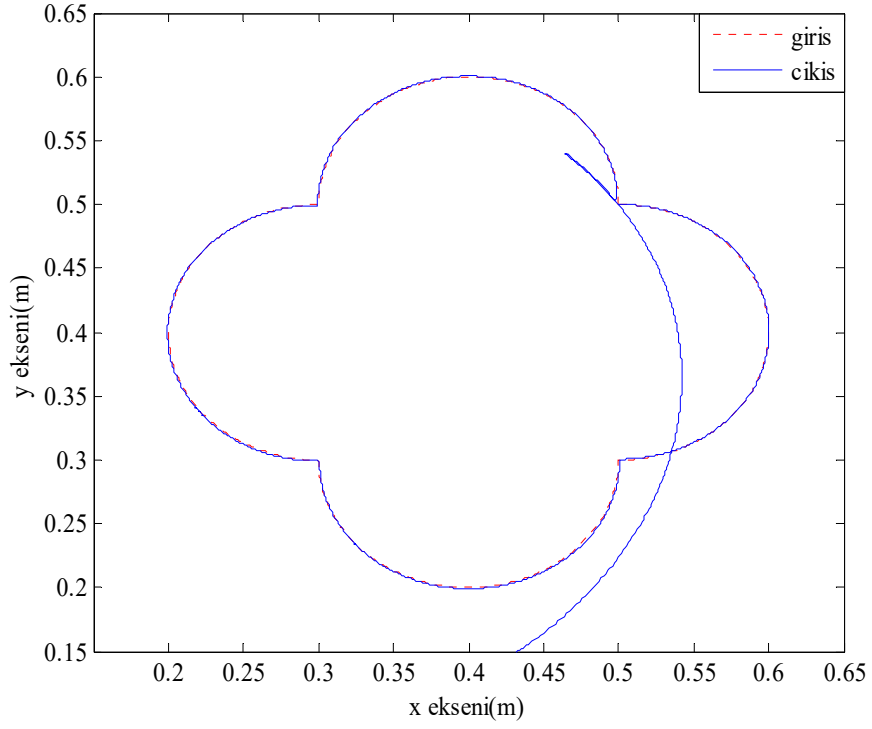
6.2. Simülasyonlar



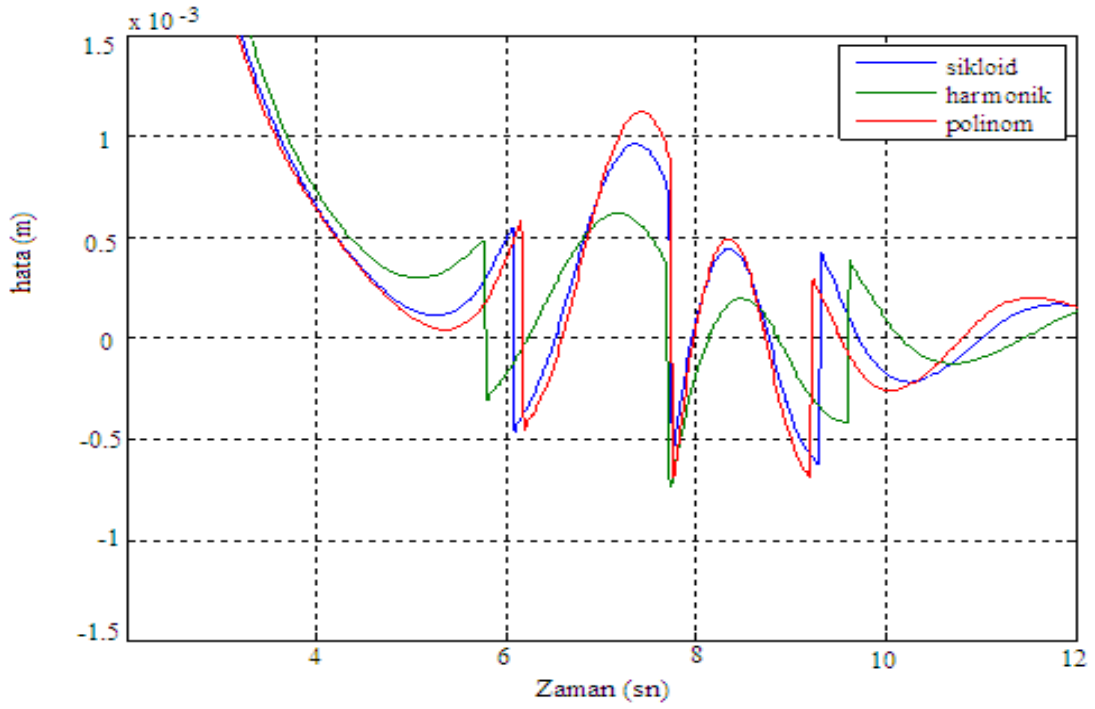
Şekil 6. Sikloid fonksiyon için giriş-çıkış yörünge grafiği



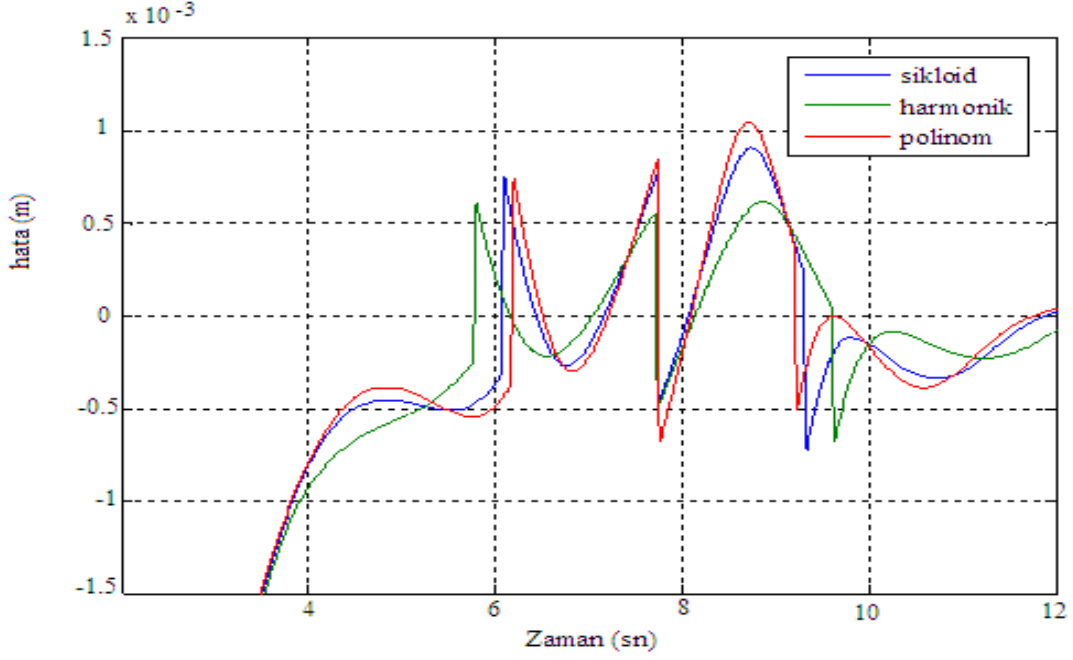
Şekil 7. Harmonik fonksiyon için giriş-çıkış yörünge grafiği



Şekil 8. Polinom fonksiyon için giriş-çıkış yörünge grafiği



Şekil 9. x ekseninde oluşan hata grafiği



Şekil 10. y ekseninde oluşan hata grafiği

7. Sonuç Değerlendirme

Bu çalışmada üç serbestlik dereceli PUMA tipi manipülatör PID yöntemi kullanılarak kontrol edilmiştir. Bu manipülatörde gövdeyi, arka kolu ve ön kolu hareket ettirmek için kullanılan mafisallar ayrı ayrı servo motorlar kullanılarak tahrik edilmiştir. Robota ait ters ve düz kinematik denklemler elde edilmiş ve istenen yörünge izlenmesi için kurulan modelde bu ifadeler kullanılmıştır. Dinamik analiz sonucu elde edilen tork denklemlerinden hesaplanan değerler, kurulan modele bir dış etki gibi ilave edilmiş ve kontrolcü tarafından üretilen torklarla karşılaştırılarak en uygun değerlerin sisteme uygulanması sağlanmış, böylece istenen yörünge hassas bir şekilde izlenmesi amaçlanmıştır.

Robotun kartezyen koordinatlarda tanımlı düzlemsel hareketinin gerçekleşmesinde sikloid, harmonik ve polinom yapıları üç farklı yol alma fonksiyonu öngörülmüştür. Bu fonksiyonların uygulanmasıyla elde edilen çıkış yörüngeleri

değerlendirilerek bir hata analizi yapılmış ve en iyi fonksiyonun harmonik yol alma fonksiyonu olduğu gözlemlenmiştir. Fakat her üç fonksiyonunda darbesiz yörünge izlenmesinde kullanılabilir ve ortaya çıkan hata miktarlarının kabul edilebilir seviyede olduğunu ifade etmek gerekir.

Kaynaklar

- [1] Paul R.P. Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control, The Massachusetts Institute of Technology, London-England, 1982.
- [2] Semetay C. Robot Kontrolü ve Kinematığı, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
- [3] Fu K.S, Gonzales R.C, Lee C.S. Robotics, McGraw-Hill Book Company; 1987.
- [4] Çuha, Y. 4+1 Serbestlik Dereceli Puma Tipi Bir Robotun Dinamik Analizi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2002.
- [5] Tonbul T.S. Beş Eksenli Bir Edobot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar ve Yörünge Planlama, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara; 2002.
- [6] Şahin Y. Scara Tipi Bir Robotun Yörünge İzlemesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya; 2006.