



5 serbestlik dereceli robot kolunun modellenmesi ve kontrolü

Nurettin Gökhan Adar¹, Hüseyin Ören¹, Recep Kozan^{1*}

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya

03.04.2013 Geliş/Received, 04.04.2013 Kabul/Accepted

ÖZET

Bu çalışmada 5 serbestlik dereceli bir robot kolunun dinamik modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modellemesi yapılacak robot kolu 3 uzuvlu her biri dönel 5 eklemlili toplam 5 serbestlik derecesine sahip uzaysal bir koldur. Dinamik modelleme için Lagrange-Euler denklemlerinden yardım alınarak hareket denklemleri çıkarılmıştır. Çıkarılan bu denklemler matris-vektör formuna çevrilmiştir.

Elde edilen hareket denklemlerinin doğruluğunu görmek için uzuvların serbest düşme hareketi yapması sağlanarak her bir eklemin konum grafikleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilmesi istenen senaryoya karşılık gelen eklem konumlarının elde edilebilmesi için bir kontrol algoritması tasarlanmıştır. Bu çalışmada PID tip kontrol algoritması kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda verilen kübik eklem konum yörüngelerinin gayet başarılı bir şekilde takip edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Robot kolu, Dinamik denklemler, Yörünge, Konum kontrolü, PID kontrol

Modelling and control of 5 dof robotic arm

ABSTRACT

In this paper, dynamic modeling of a 5 DOF Robotic Arm was carried out. The Robotic Arm totally had 5 DOF spatial articulated arm which consist of 3 parts. The modeling of dynamic equations of motion were based on Lagrange-Euler equations. The equations were taken into matrix-vector form. The parts of Robotic Arm had been in free fall to see the accuracy of the equations of motion and each joint graphs were obtained. A control algorithm was designed to achieve the position of the joint corresponding to the desired scenario. PID control algorithm is used in this study. As a result of the simulation of the orbits of the cubic joint position had been followed up successfully.

Keywords: Robotic arm, Dynamic Equations, Trajectory, Position Control, PID control

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. GİRİŞ

İnsansı robotlar ve bu robotlara ait uzuvların tasarımı, imalatı ve kontrolü son yılların önemli araştırma konularını oluşturmaktadır. İnsan için tehlike arz eden yerlerde, zor koşullarda ve ağır görevleri yerine getirebilmek için insan kol ve bacak yapısına benzer yapıya sahip insansı kol ve bacak ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Daha önceleri sanayide kullanılmak üzere alt platformu sabit manipülörler kullanılıyordu. Ancak insan, bacakları sayesinde hareket edebilen ve kol-elem yapısı sayesinde birçok hareketi rahatlıkla yerine getirebilen bir canlıdır. Sabit platformlu manipülörlerdeki bu kısıtları ortadan kaldırmak için insansı robot tasarımları gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada alt platformu paletli üst kısmı insan üst gövdesine benzer bir robot platforma ait olan kolun dinamiği üzerine durulmuş olup kontrol algoritması geliştirilmiştir.

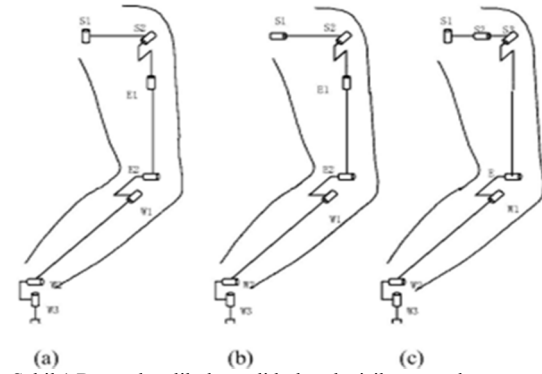
Literatüre baktığımızda birçok başarılı insansı robot tasarımı bulunmaktadır. Özellikle insan kol hareket kabiliyetine yakın olduğundan dolayı 5 serbestlik ve 7 serbestlik dereceli insansı robot kol tasarımı üzerine durulmuştur. Waseda Üniversitesi (Japonya) tarafından Wabian insansı robotu ve Wendy mobil robotu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Arnold isimli Ruhr Üniversitesi tarafından 1997 yılında tek kolla sahip mobil insansı robot tasarımı gerçekleştirilmiştir. 1999 yılında Hermes isimli mobil robot platformu tasarlanmıştır. Michigan Üniversitesi (ABD) tarafından 2002 yılında "DAV" isimli gezgin insansı robot geliştirilmiştir. Bu robot tasarım ve maliyet göz önünde tutularak tasarlanmıştır [1]. İmalatı gerçekleştirilen bu robotun ana boyutları 750(l) x 750 (w) x 1700(h) (mm) şeklindedir. Robot toplam 43 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 4 adedi gövdenin hareketini sağlayan tekerleklere, 2 adedi gövdeye, 7 adedi kollara, 8 adedi ellere ve 8 adedi başa aittir. Ayrıca robot birbirinden bağımsız çalışan 2 adet kameraya sahiptir [1]. Wakayama Üniversitesi (Japonya) tarafında 2002 yılında "Robovie" isimli gezgin insansı robot geliştirilmiştir. Üst bedeni insana benzeyen görüntüye sahip olan bu robot insanlarla iletişim amacıyla tasarlanmıştır. İşitme, görme ve dokunma gibi insana ait olan duyuların fonksiyonlarını yerine getirmek için değişik algılayıcılara sahiptir [2]. Shenyang Üniversitesi (Çin) tarafından 2005 yılında "YIREN" isimli gezgin insansı robot geliştirilmiştir [3]. Gezgin insansı robotun tekerlekleri karışık alanda tüm yönlü hareketini sağlamak için tasarlanmıştır. Robot toplam 23 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 3 adedi gövdenin hareketini sağlayan tekerleklere (2 adedi sürücü teker, 1 adedi gezgin teker), 7 adedi kollara, 1 adedi el, 2 adedi bel ve 2 adedi boyun bölgesine aittir [3]. 2000-2006 yılları arasında Forschungszentrum

Informatik Karlsruhe (Almanya) tarafından "ARMAR" isimli 3 adet gezgin insansı robot geliştirilmiştir [4-5-6].

Bu çalışmada geniş çalışma uzayına sahip bir robot kolunun tasarımı, analizi ve simülasyonu gerçekleştirmektir. Dinamik analiz ve simülasyonlarını gerçekleştirmek için Matlab/Simulink programından yararlanılmıştır.

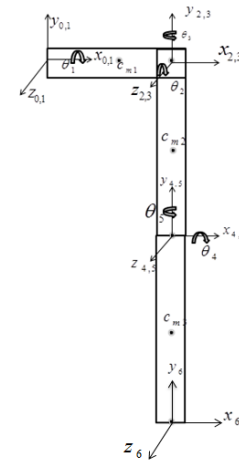
2. ROBOT KOLUNUN KİNEMATİĞİ

Bu çalışmada beş serbestlik dereceli insansı robot kolu kinematik ve dinamik açıdan incelenmiştir. beş serbestlik dereceli insansı robot kolu birçok değişik tasarıma sahiplerdir. Bunlardan en çok kullanılanları şekil-1'de verilmiştir [7].



Şekil 1 Beş serbestlik dereceli kolun değişik tasarımları

Bu çalışmada şekil-1b'deki kol yapısı seçilmiştir. Seçilen kol yapısına uygun olarak referans koordinat sistemi ve her bir uzva ait referans sistemi şekil-2'de gösterilmiştir. Hareket zenginliğini ve çalışma uzayını artırmak için uzuvlara döner eklem yerleştirilmiştir. Mekanizmanın eksen takımları aynı olacak şekilde yerleştirilerek kinematik çözümü kolaylaştırılmıştır.



Şekil 2 Seçilen kol yapısı ve referans eksen takımı

Şekil-2 de gösterilen mekanizmada θ 'lar (theta) her bir eklem için açısal yer değiştirmesini göstermektedir. İnsansı robot kolumuz beş serbestlik dereceli olduğundan beş farklı θ açısı vardır. C_m 'ler de uzuvların ağırlık merkezini göstermektedir. Her bir uzuv kare kesitli dikdörtgen prizma olarak seçilmiştir.

Robot kolumun referans koordinat sistemine göre i eklemi ile i-1 eklemi arasındaki koordinat dönüşümü homojen dönüşüm matrisleriyle temsil edilmiştir. Homojen dönüşüm matrisi;

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & \alpha_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & \alpha_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Robot kolumun uç noktasının yönelimi ve pozisyonu her bir ilişkili eklem için homojen dönüşüm matrislerinin sıra ile çarpımı sonucu elde edilir.

$$T(\theta) = \prod_{i=1}^n T_i(\theta_i) = \begin{bmatrix} \bar{n} & \bar{o} & \bar{\alpha} & \bar{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. ROBOT KOLUNUN DİNAMİĞİ

Bir robot kolun dinamik modeli, robot kolun dinamik davranışların belirleyen hareket denklemlerinden oluşur. Bu denklemlerin bilgisayar yardımı ile çözümü robot ve robot kontrol tasarımı açısından büyük kolaylık sağlar. Robot kolumun dinamik analizi, eklemlere tahrik elemanları tarafından uygulanan moment veya kuvvet büyüklükleri ile robot kolumun zamana göre konumu, hız ve ivmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi demektir. Böyle bir analiz için, robot kolun dinamik davranışların tanımlayan lineer olmayan diferansiyel denklem takımlarının elde edilmesi ve çözülmesi gerekmektedir.

Robot kolumun dinamik denklemlerini elde etmek için bilinen birçok metod vardır. Bunlar Lagrange-Euler (L-E), Recursive Lagrange (R-L), Newton-Euler (N-E), Genelleştirilmiş D'Alembert (G-D) prensibi gibi yaklaşımlardır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanlar L-E ve N-E yaklaşımlarıdır [8]. Bu çalışmada robot kolun dinamik modelinin çıkarılmasında, iyi planlanmış bir yapıya sahip ve çıkarılması N-E yaklaşımından daha basit ve sistematik olan L-E yaklaşımı ile elde edilmiş denklemler kullanılmıştır [9].

$$K_i = \frac{1}{2} (m_i v_{C_i}^T v_{C_i} + {}^i \omega_i^T C_i I_i {}^i \omega_i) \quad (3)$$

$$K = \sum_i^n K_i \quad (4)$$

$$U_i = -m_i {}^0 g^T {}^0 P_{C_i} + U_{ref} \quad (5)$$

$$U = \sum_i^n U_i \quad (6)$$

$$L = K - P \quad (7)$$

şeklinde yazılır.
Burada

U=Robot kolumun toplam potansiyel enerjisi
K= Robot kolumun toplam kinetik enerjisi
L= Langrange fonksiyonu tanımlamaktadır.
sistemin tork/kuvvet ifadesini bulmak için

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (8)$$

ifadesi kullanılır.

Robot kolumun dinamik davranışını analiz etmek için kullanılan Euler-Lagrange denklemleri matris-vektör formunda aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (9)$$

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + B(\theta) [\dot{\theta} \dot{\theta}] + C(\theta) [\dot{\theta}^2] + G(\theta) \quad (10)$$

Burada B coriolis matrisidir ve $[n \times n(n-1)/2]$ boyutundadır. , hızların ortak vektörü olup boyutu $[n(n-1)/2 \times 1]$ dir.

$$[\dot{\theta} \dot{\theta}] = [\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \dots \dots \dots \dots \dot{\theta}_{n-1} \dot{\theta}_n]^T \quad (11)$$

C merkezkaç matrisidir ve $[n \times n]$ boyutundadır. , $[n \times 1]$ boyutunda vektördür.

$$[\dot{\theta}_1^2 \dot{\theta}_2^2 \dots \dots \dot{\theta}_n^2]^T \quad (12)$$

τ : Tork/kuvvet vektörü $[n \times 1]$

M: Kütle matrisi $[n \times n]$

G: Ağırlık vektörü $[n \times 1]$

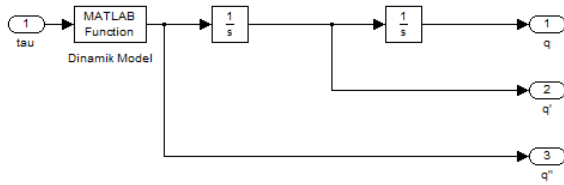
$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = M_{5 \times 5} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \end{bmatrix} + B_{5 \times 10} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \\ \dot{\theta}_4^2 \\ \dot{\theta}_5^2 \end{bmatrix} + G_{5 \times 1} \quad (13)$$

Modellenmesi yapılan robotik kolun teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1 Kolun teknik özellikleri

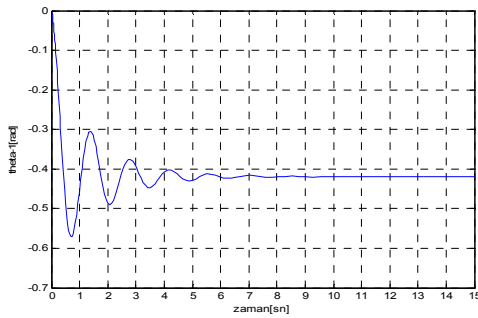
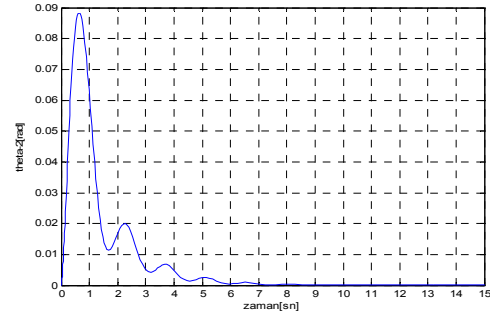
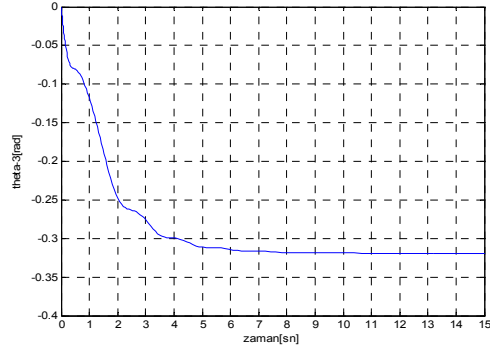
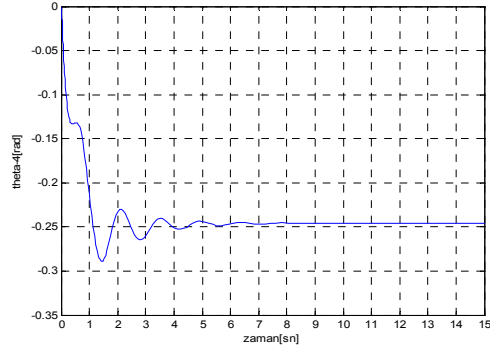
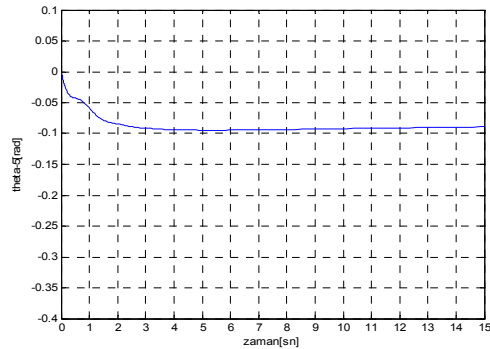
uzuv	1.uzuv	2.uzuv	3.uzuv
Ağırlık[kg]	1.9625	6.86875	6.86875
Uzunluk[m]	0.1	0.35	0.35
Genişlik[m]	0.05	0.05	0.05
Yükseklik[m]	0.05	0.05	0.05

Euler-Lagrange denklemleri ile elde edilen dinamik denklemlerin sağlanmasını yapmak için her bir uzva serbest düşme hareketi verilmiştir. Robot kolunun dinamik denklemlerinin yazılması ve her bir eklemin dinamik davranışını gözlemleyebilmek için Matlab/Simulink programından yararlanılmıştır. Robot kolunun Matlab/Simulink blok diyagramı şekil-3'de gösterilmiştir.



Şekil 3 Matlab/Simulink blok diyagramı

Her bir eklemin serbest düşme hareketi sonucu elde edilen eklem konum grafikleri aşağıda verilmiştir.

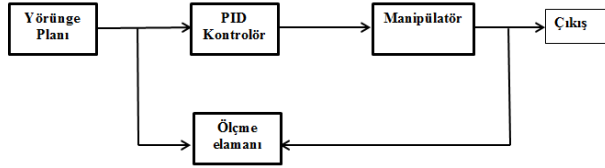
a) θ_1 grafiğib) θ_2 grafiğic) θ_3 grafiğid) θ_4 grafiğie) θ_5 grafiği

Şekil 4 Serbest düşme hareketi sonucu elde edilen eklem konum grafikleri

4. ROBOT KOLUNUN KONTROLÜ

Robot kontrol probleminde amaç, robotun uç noktasının verilen yörüngeyi en uygun şekilde izlemesini sağlamaktır. Bunun için sistemin matematiksel olarak ifadesi elde edilmeli ve sistem için uygun bir kontrolcü dizayn edilmelidir. Bugünkü robot kolu kontrol sistemlerinde genel yaklaşım, her bir kolun birbirinden bağımsız servo mekanizmalar olarak düşünülmesi üzerine yapılmaktadır [10]. Robot kollarının kontrolüyle ilgili hız kontrolü, tork kontrolü gibi çeşitli yaklaşımlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

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.



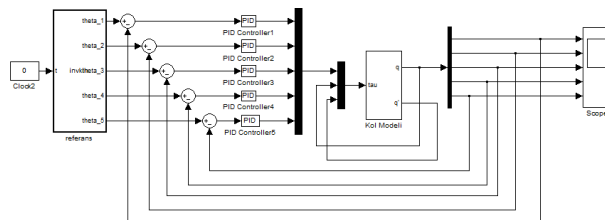
Şekil 5 Yörünge planlama blok diyagramı

PID kontrolcü lineer bir kontrolcüdür. Hata sinyali $e(t)$, kontrol sinyali $u(t)$ ' ye çevirir. Lineer bir kontrolcü olduğundan zaman ve frekans domenlerinde incelenebilir. Zaman domeninde kontrol sinyali şu şekildedir:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right) \quad (14)$$

PID kontrolde en önemli nokta kontrolcü katsayıları olan orantı kazancını (K_p), integral zamanını (T_i) ve türev zamanını (T_d) ayarlamaktır. Bunun için deneysel ve teorik birçok yöntem geliştirilmiştir.

Robot kolunun kontrolü için her bir eklemi kontrol edebilmek için PID kontrol kullanılmıştır. Elde edilen matematiksel denklemler ile PID kontrolleri Matlab-Simulink ortamına uygun şekilde aktarılmıştır (Şekil 10).



Şekil 6 PID kontrol blok diyagramı

Burada sistemin çıkışları her bir eklem için açılma açısı $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ ve sistem girişi bu eklemlere uygulanması gereken moment değeridir.

Robot kolunun her bir eklem için açılma açısı $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ için 3. mertebe polinomlardan yararlanılmış ve her bir eklem yörüngesi aşağıda verilmiştir.

$$\theta(t) = a + b t + c t^2 + d t^3 \quad (15)$$

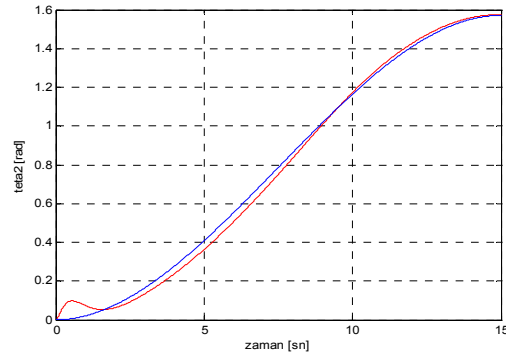
Kullanılan her bir eklem yörünge katsayıları aşağıdaki başlangıç ve bitiş şartları kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \theta_1 0 &\rightarrow \frac{\pi}{2} \\ \theta_2 0 &\rightarrow \frac{\pi}{4} \\ \theta_3 0 &\rightarrow \frac{\pi}{3} \\ \theta_4 0 &\rightarrow \frac{\pi}{2} \\ \theta_5 0 &\rightarrow \frac{\pi}{6} \end{aligned}$$

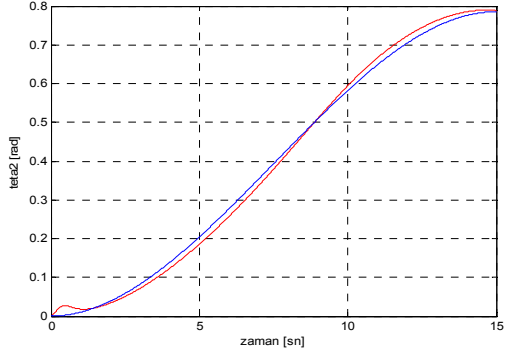
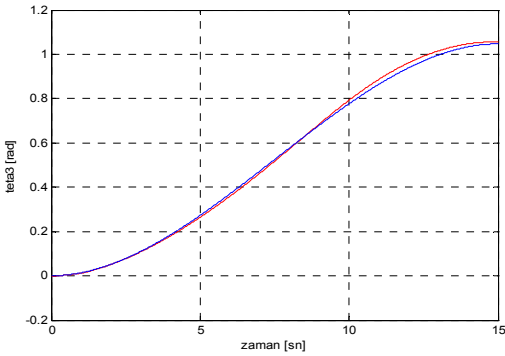
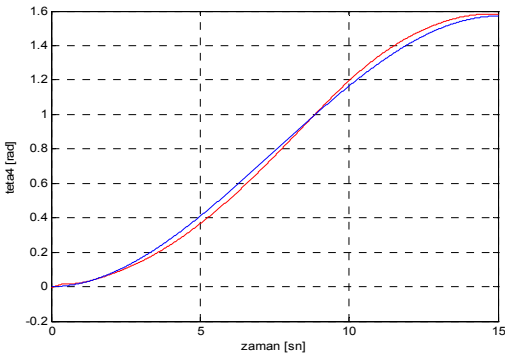
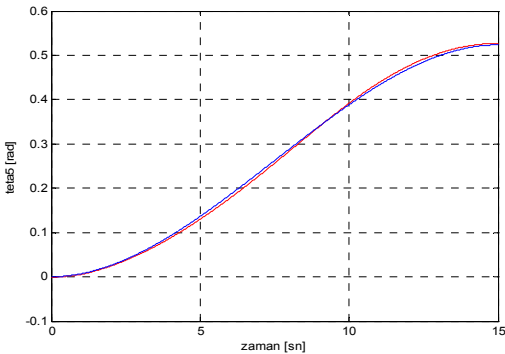
Hesapla bulunan katsayılar aşağıdaki şekildedir.

$$\begin{aligned} \theta_1 &\rightarrow a=0, b=0, c=0.0209, d=-9.3084 \times 10^{-4} \\ \theta_2 &\rightarrow a=0, b=0, c=0.0105, d=-4.6542 \times 10^{-4} \\ \theta_3 &\rightarrow a=0, b=0, c=0.0140, d=-6.2056 \times 10^{-4} \\ \theta_4 &\rightarrow a=0, b=0, c=0.0209, d=-9.3084 \times 10^{-4} \\ \theta_5 &\rightarrow a=0, b=0, c=0.0070, d=-3.1028 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Her bir eklem için PID kontrolü sonucu elde edilen eklem yörüngesi referans ve gerçekleştirilen değer grafikleri aşağıda verilmiştir.



a) θ_1 grafiği

b) θ_2 grafiğic) θ_3 grafiğid) θ_4 grafiğie) θ_5 grafiği

Şekil 7 Eklem konum referansları ve kontrol sonucu gerçekleştirilen değerleri

5. SONUÇ

Bu çalışmada beş eklemlilik bir robot kolunun eklemlerinin PID algoritması ile konum kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla her bir eklem için farklı senaryolar hazırlanmıştır. 15 saniyelik bir çalışma süresi içerisinde her bir eklemin konum yörüngelerinin gerçekleştirilmesi istenmiştir. Şekil-7'den de görüldüğü gibi başlangıçtaki küçük bir salınımdan sonra eklem konum yörüngelerinin gayet kapalı bir şekilde takip edildiği anlaşılmaktadır. Klasik bir kontrol algoritması olan PID ile kontrol işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Han J.D., Zeng S.Q., Tham K.Y., Badgero M., Weng J.Y., Dav: A Humanoid Robot Platform for Autonomous Mental Development, ICDL, 2002.
- [2] Kanda T., Ishiguro H., Ono T., Imai M., Nakatsu R., Development and Evaluation of an Interactive Humanoid Robot "Robovie", IEEE International Conference on Robotics Automation, 2002.
- [3] Tiejun Z., Dalong T., Mingyang Z., The Development of a Mobile Humanoid Robot with Varying Joint Stiffness Waist, IEEE International Conference on Robotics Automation, 2005.
- [4] Asfour T., Berns K., Dillmann R., The Humanoid Robot ARMAR Design and Control, IEEE, 2000.
- [5] Ly D.N., Regenstien K., Asfour T., Dillmann R., A Modular and Distributed Embedded Control Architecture for Humanoid Robots, IEEE International Conference on Robotics Automation, 2004.
- [6] Albers A., Brudniok S., Ottnad J., Sauter C., Sedchaicharn K., Armar III – Design of the upper body.
- [7] Zhao T., Yuan J., Zhao M., Tan D., Research on the Kinematics and Dynamics of a 7-DOF Arm of Humanoid Robot, International Conference on Robotics and Biomimetics, 2006.
- [8] Eğrisöğüt A., Kozan R., Scara Robot Dinamiğinin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Modellenmesi, Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 46, Sayı 550.
- [9] John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, 2004
- [10] Fu, K.S., González, R.C.; Lee, C.S.G., Robótica: Control, detección, visión e inteligencia", Ed. McGraw-Hill, Madrid, 1998.