

BEŞ EKSENLİ BİR EDUBOT ROBOT KOLUNDA TERS KİNEMATİK HESAPLAMALAR VE YÖRÜNGE PLANLAMASI

Tuğba Selcen TONBUL ve Müzeyyen SARITAŞ*

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570 Ankara, *msari@mmf.gazi.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, beş eksenli bir Edubot robotta, ters kinematik hesaplamalar ve yörünge planlaması yapılmıştır. Ters kinematik probleminde, robotun uç noktasının gideceği yerin koordinatları (x, y, z) ve robot elinin başlangıç pozisyonuna göre açısı (φ) girdi olarak verilmiş ve eklem açılarının alabileceği değerler $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ hesaplanmıştır. Eklem açıları hesaplandıktan sonra, robot verilen görevi gerçekleştirirken, hareketinin titreşimsiz ve düzgün olabilmesi için yörünge planlaması yapılmıştır. Yörünge planlaması yapılırken; pozisyonda, hızda ve ivmede süreklilik sağlamak için, beşinci dereceden polinomlar kullanılmıştır.

Robotun ters kinematik hesaplamaları ve yörünge planlaması, Matlab 5.02 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Robotun eklem açılarının, açısal hızlarının ve açısal ivmelerinin zamana göre değişimleri elde edilmiştir. Ayrıca, başlangıç ve hedef noktaları arasında, robotun geçmesi istenen noktalar dikkate alınarak, yörünge hesaplamaları tekrar yapılmıştır. Son olarak, sonuçlar Edubot Robot üzerinde denenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Edubot robot, manipulatör, kinematik, yörünge planlaması, 5. dereceden polinomlar

THE INVERSE KINEMATICS CALCULATIONS AND TRAJECTORY PLANNING ON AN EDUBOT ROBOT ARM WITH FIVE AXES

ABSTRACT

In this study, the inverse kinematics calculations and the trajectory planning has been done on an Edubot robot arm with five axes. In the inverse kinematics problem, Cartesian coordinates of the goal point (x, y, z) and the angle of the end effector (φ) with respect to the initial position are entered as an input and the joint

angles ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) are calculated. After calculating the joint angles, the trajectory is planned in such a way that the robot achieves a smooth motion while performing the task. Fifth order polynomials have been used while planning trajectory for obtaining continuity in the positions, velocities and accelerations.

The inverse kinematics calculations and the trajectory planning of the robot have been achieved by using Matlab 5.02. The time variations of the joint angles, angular velocities and angular accelerations are obtained. Further more, the trajectory calculations have been repeated by taking the additional requested points into consideration between the initial and the goal positions. Finally, the results have been tested on the Edubot Robot.

Keywords: Edubot robot, manipulator, kinematics, trajectory planning, fifth order polynomials

1. GİRİŞ

Robot [1-30], programlanarak, taşıma ya da yer ve yön değiştirme işlemlerini gerçekleştirebilen bir sistemdir. Taşıma görevi, gövde boyutlarına kıyasla uzak bir mesafeye hareket olarak tanımlanır. Manipulasyon ise, gövdenin pozisyonunda meydana gelen değişikliktir. Manipulatör [1,21-30], bir küme eklem birimine bağlandığı bir küme rijit kol içerir. Eklemlere motorlar takılmıştır. Böylece mekanizma verilen bir görevi gerçekleştirmek için kontrol edilebilir. Robotun analizi; matematik, mekanik ve elektronik gibi pek çok bilim dalına ait bilgi gerektirmektedir.

Robotlar [6-20,30], endüstride, tıpta, haberleşmede ve daha bir çok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca, askeri uygulamalarda da robot kullanımı yaygındır.

Robotları, kullanılan kontrol tekniğine ve içerdikleri eklem türlerine göre iki farklı şekilde sınıflandırabiliriz. Kontrol tekniğine göre robotlar: Adaptif olmayan robotlar, adaptif robotlar ve akıllı robotlardır. Akıllı robotlarda, adaptif robotlarda bulunan sensör donanımına ek olarak geniş bir bellek ve çevrenin ayrıntılı bir modeli bulunmaktadır. Robotlarda; döner, prizmatik, silindirik, küresel, düzlemsel veya helisel eklemlerden biri kullanılır ve robot, bu eklem türüne göre de sınıflandırılır. Döner ve prizmatik eklemler robotikte en çok kullanılan eklem türleridir.

Bir robot, mekanik bölümler, hareketlendiriciler ve kontrol birimlerinden oluşmaktadır. Robotun mekanik bölümleri; yapısal parçalar, güç ileten parçalar, (rot, dişliler vs.), taşıyıcılar ve akuplaj bölümleri olarak sayılabilir. Mekanik bölümler, temel yapı parçaları ve servis parçaları olarak ikiye ayrılabilir. El veya diğer gereçler (kaynak, boyama, öğütme, sıkıştırma araçları) mekaniğin servis parçalarını oluşturur. Modern robotların hareketlendiricileri, çoğunlukla elektrikseldir (DC sürücüler). Ancak, hidrolik ve pnömatikler de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Modern robotların kontrol birimleri, bilgisayar tabanlıdır (CNC- Sayısal Bilgisayar Kontrolü) ve gelişmiş yapıya sahiptirler. Bu günün bilgisayarları ve mikroişlemcileri, yüksek hızda elektronik işlemler yaparak, karmaşık kontrol algoritmalarının gerçekleştirilmesine geniş imkan tanımaktadır. DSP (sayısal sinyal işleme) uygulayarak paralel işlemci yapısı kullanmak, robot uygulamalarının gelişiminde önemli yer tutmaktadır.

2. TERS KİNEMATİK PROBLEMLER

2.1. Paden Kahan Alt Problemleri

Bir robotun eklem açıları verildiğinde, uç noktasını ve yönünü belirleyen probleme ileri kinematik problemi; robotun verilen bir uç nokta konfigürasyonu için eklem açılarını belirleyen problem ise ters kinematik problemi olarak ifade edilmektedir [5,22-29]. Robotun ileri kinematik haritası için exponansiyellerin çarpımını kullanarak, ters kinematik problemlerin çözümüne geometrik bir algoritma geliştirmek mümkündür. Ters kinematik problem, uygun alt problemlere indirgenerek çözülebilir. Bu yöntem, ilk kez Paden [24] tarafından sunulmuş ve Kahan'ın [25] yayınlanmamış çalışması üzerine bina edilmiştir. Aşağıda belirtilen alt problemlerin özelliği, hem geometrik olarak anlamlı olması, hem de sayısal olarak kararlı olmasıdır.

Alt problem 1: Tek eksen etrafında dönme

ξ_1 bir eksen olsun. Verilen bir p noktasının ξ_1 eksenini etrafında θ_1 kadar döndürülerek q noktasına ulaşmasını sağlayan ifade aşağıda verilmiştir.

$$e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} p = q \quad (1)$$

Alt problem 2: İki sıralı eksen etrafında dönme

ξ_1 ve ξ_2 kesişen iki eksen olsun. Verilen bir p noktasının önce ξ_2 eksenini etrafında θ_2 kadar ve daha sonra ξ_1 eksenini etrafında θ_1 kadar döndürülerek q noktasına ulaşmasını sağlayacak ifade aşağıdadır.

$$e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} p = q \quad (2)$$

Alt problem 3: Verilen bir mesafeye kadar dönme

ξ bir eksen olsun. Bir p noktasının ξ eksenini etrafında, q noktasına δ kadar mesafe kalana kadar döndürülmesini ifade eden denklem aşağıda verilmiştir.

$$\|q - e^{\hat{\xi}\theta} p\| = \delta \quad (3)$$

Yukarıda verilen alt problemler, robotun en azından birkaç kesişen eklemi varsa kullanışlıdır. Ters kinematik problemlerin çözümünde, geometrik cebirin klasik eleme teorisinden yararlanılabilir. Bu yönteme diyalektik eleme de denir [22]. Diyalektik eleme ile önce problem, sadece bir eklem açısını içeren tek değişkenli bir polinoma indirgenir. Bu polinom çözülerek eklem açılarından biri elde edilir. Bulunan açı değeri problemde yerine konular ve diğer eklem açıları bulunana kadar aynı işlem tekrarlanır. Diyalektik eleme ile hesaplanamayan ters kinematik problemler de bulunmaktadır.

Günümüzde, ters kinematik problemin çözümü için, analitik ve nümerik pek çok yöntem geliştirilmesine rağmen, genel bir yöntem yoktur. Her robot için farklı bir yöntem uygulanmaktadır.

2.2. Edubot'un Kinematik Hesaplamaları

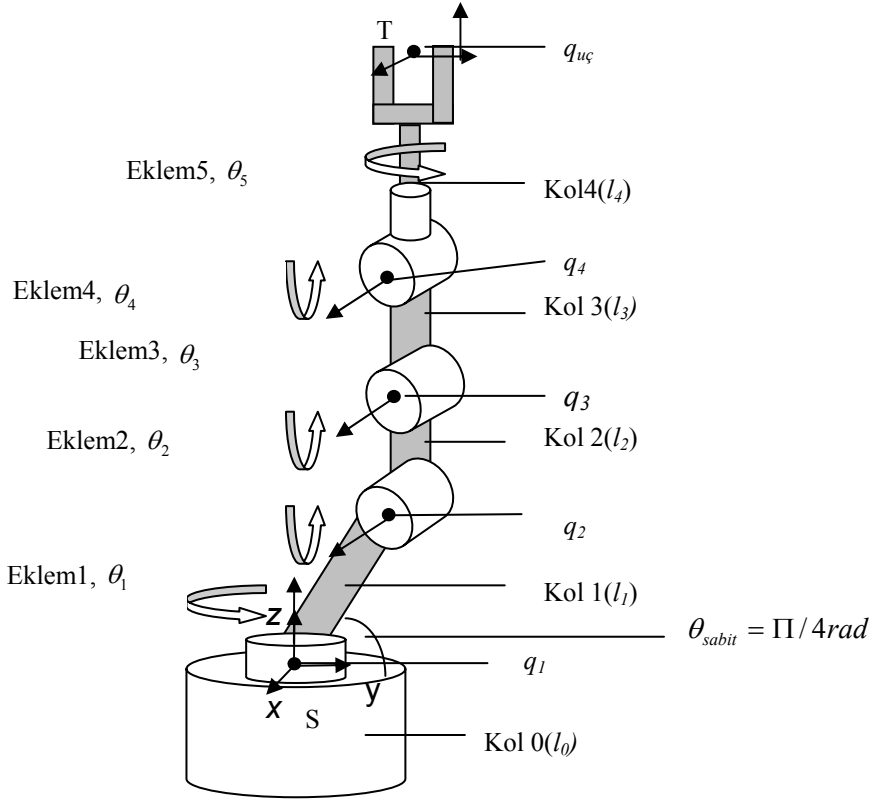
Edubot robot, eğitim amaçlı, beş eksenli bir robottur [1,27]. Şekil 1'de görüldüğü gibi 1 numaralı eklem orijin kabul edilir ve z eksenli etrafında dönme sağlamaktadır. Eklem-2, eklem-3, ve eklem-4, x eksenli etrafında dönme sağlamaktadır. Eklem-5, robot elini z eksenli etrafında döndürmektedir ve eklem-6, elin bir malzemeyi tutup bırakması için açılıp kapanmasını kontrol etmektedir. Eklem-5 ve eklem-6, uç noktanın pozisyonunu ve yönünü etkilemedikleri için bu çalışmada, kinematik dönüşüm hesaplarına dahil edilmemiştir. Edubot robotun fiziksel boyutları:

$l_1=9.899\text{cm}$, $l_2=9\text{cm}$, $l_3=8\text{cm}$, $l_4=16\text{cm}$ ve $\theta_{\text{abit}}=45^\circ$ şeklindedir.

Yukarıdaki bilgilere dayanarak bütün eklem açıları sıfır iken; eklemlerin koordinatları ve uç noktanın koordinatları, sırası ile aşağıda verilmiştir.

$$q_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; q_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 7 \\ 7 \end{bmatrix}; q_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 7 \\ 16 \end{bmatrix}; q_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 7 \\ 24 \end{bmatrix}; q_{uc} = \begin{bmatrix} 0 \\ 7 \\ 40 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Şekil 1'de verilen Edubot'un, fiziksel boyutlarını dikkate alarak, çalışma alanının sınırları belirlenebilir. Edubot, z eksenli boyunca -26 ile $+40$ cm, y eksenli boyunca -26 ile $+40$ cm ve x eksenli boyunca $+40$ ile -40 cm aralığında çalışabilmektedir. Robot, bu değerlerin dışına ulaşamaz. Ayrıca hedef noktanın çalışma alanı içinde kalabilmesi için, orijine uzaklığı 40 cm'yi geçemez. Bunların dışında, robot elinin başlangıç pozisyonuna göre açısından ve robot kollarının her birinin boyutlarından



Şekil 1. Edubot'un genel görünüşü

kaynaklanan sınırlamalar vardır. Hedef nokta çalışma alanı dışında verildiğinde, eklem açılarının değerleri karmaşık sayı şeklinde çıkmaktadır.

Bir robotun eklem açıları verildiğinde, uç noktasını ve yönünü belirleyen probleme ileri kinematik problemi; robotun verilen bir uç nokta konfigürasyonu için eklem açılarını belirleyen problem ise ters kinematik problemi olarak 2.1'de ifade edilmiştir. Edubot robotun ileri ve ters kinematiği için kullanılan exponansiyel formül ise aşağıdaki verilmiştir.

$$e^{\hat{S}_1\theta_1} e^{\hat{S}_2\theta_2} e^{\hat{S}_3\theta_3} e^{\hat{S}_4\theta_4} g_{st}(0) = g_d \quad (5)$$

Robotun, bütün eklem açıları sıfır iken, temel çerçevesini uç nokta çerçevesine dönüştüren $g_{st}(0)$, robotun her eklemi için θ dönüşüm matrisleri ve uç nokta çerçevesi için g_d matrisi aşağıda görülmektedir.

$$g_{st}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & 1 & 40 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-a)$$

$$e^{\dot{\xi}_1 \theta_1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-b)$$

$$e^{\dot{\xi}_2 \theta_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 7 \sin \theta_2 + 7(1 - \cos \theta_2) \\ 0 & \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 7(1 - \cos \theta_2) - 7 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-c)$$

$$e^{\dot{\xi}_3 \theta_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 16 \sin \theta_3 + 7(1 - \cos \theta_3) \\ 0 & \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 16(1 - \cos \theta_3) - 7 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-d)$$

$$e^{\dot{\xi}_4 \theta_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 24 \sin \theta_4 + 7(1 - \cos \theta_4) \\ 0 & \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 24(1 - \cos \theta_4) - 7 \sin \theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-e)$$

$$g_d = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos \varphi & \sin \theta_1 \sin \varphi & x \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cos \varphi & -\cos \theta_1 \sin \varphi & y \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-f)$$

Denklem 6-f'deki uç nokta çerçevesi, g_d , robotun uç noktasının koordinatlarını (x , y ve z) ve robot elinin başlangıç pozisyonu, φ 'yi ($\varphi = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$) içermektedir. Buna göre kullanıcı, robotun uç nokta koordinatları ile birlikte φ açısını da vermek zorundadır.

Edubot'da z eksenine yönünde dönme sağlayan tek eklem, birinci eklem olup; başlangıç noktasındaki x koordinat değerini, sadece bu eklem değiştirebilmektedir. Eklem-1'deki θ_1 açısı aşağıdaki eşitlikten bulunur.

$$\theta_1 = -a \tan(x, y) \quad (7)$$

Bulunan θ_1 değeri, Eşitlik 5’de yerine yerleştirililerek aşağıdaki gibi düzenlenir;

$$e^{\dot{\xi}_2\theta_2} e^{\dot{\xi}_3\theta_3} e^{\dot{\xi}_4\theta_4} = g_p \quad (8)$$

Yukarıda, $g_p = e^{-\dot{\xi}_i\theta_i} g_d (g_{st}(0))^{-1}$ ifadesine dönüşmüştür.

Bu çalışmada eşitlik 8, alt problemlere iki farklı şekilde (çözüm 1 ve çözüm 2 şeklinde) indirgenerek, θ_2 , θ_3 ve θ_4 açıları hesaplanmıştır.

3. YÖRÜNGE PLANLAMASI

Manipulatörün uç noktasının, başlangıç pozisyonundan sonuç pozisyonuna kadar hareketi esnasında yer değiştirme ve dönme yollarını belirleyen noktalar kümesine “yörünge” denir. Hareketin aktivitesine göre, yörünge planlaması [1,2,13,21-23,29, 30], noktadan noktaya hareket veya sürekli yol hareketi şeklindedir. Noktadan noktaya hareket (PTP) türünde, yörünge son durumu tanımlanmıştır ancak hareketin türü ve zaman koordinasyonu yapılmamıştır. Noktadan noktaya hareketi kontrol etmek için üç yöntem bulunmaktadır. Bunlar; sıralı eklem hareketi, koordine edilmemiş eklem hareketi ve koordine edilmiş eklem hareketidir. Sıralı eklem hareketi; bir anda diğer bütün eklemlerin sabitlenip sadece bir eklem hareket ettirilmesi şeklindedir. Bu hareket türü, bir endüstriyel robotun kontrolünde hızlı basitleştirmeler sağlayabilmekte ancak hareketin süresini uzatmaktadır. Koordine edilmemiş eklem hareketinde, eklemler arasında hareket koordinasyonu olmadığı için robotun uç noktasının, geçiş noktaları arasındaki yolunun ve hızının belirlenmesi kolay değildir. Koordine edilmiş eklem hareketi, noktadan noktaya hareketin en kullanışlı türüdür. Burada, bütün eklemler sonuç pozisyonuna eş zamanlı ulaşacak şekilde koordine edilmektedir.

Sürekli yol hareketinde, bütün eklem değişkenleri, eklemlerin hareketlerinin eş zamanlı olarak tamamlanması için interpolate edilir ve bu sayede koordine edilmiş eklem hareketi sağlanır. Boya püskürtme ve kaynak yapma sürekli yol hareketine örnek gösterilebilir. Sürekli yol hareketi, kontrollü bir yol üzerinde genellikle sabit hızda, sürekli ve düzgün bir harekettir. Bazı uygulamalarda noktadan noktaya hareket sürekli yol hareketi ile birleştirilir. Böyle durumlarda noktadan noktaya kontrolcü, uç noktayı sürekli yol hareketinin başlangıcına getirir. Daha sonra sürekli yol kontrolcüsü uç noktayı hatasız bir yol üzerinde taşır. Bu uygulama daha kompleks görevlerin yerine getirilmesinde kullanılır.

3.1. Yolun Tanımlanmasında ve Üretilmesinde Genel Yöntemler

Robot hareketi, uç çerçevenin (T) temel çerçeveye (S) bağlı hareketi olarak

tanımlanabilir. Bu tanım, bu hareketin, başka bir robota, uç noktaya veya çalışma parçasına uygulanmasını sağlar. Robot hareketinde temel problem, robot ucunu, o anki başlangıç değerinden ($T_{başlangıç}$), istenilen bir son değere (T_{son}) taşımaktır. Bu harekette, robot kolunun hem yönü hem de pozisyonu değişmektedir. Yolun daha detaylı tanımlanması istendiğinde, uç nokta için, başlangıç ve sonuç noktaları arasında geçiş noktaları ya da ara noktalar tanımlanmalıdır. Bu geçiş noktalarının her biri, uç noktanın temele göre pozisyonunu ve yönünü belirleyen çerçevelerdir. Hareket üzerindeki bu uzaysal sınırların yanı sıra kullanıcı, hareketin geçici özelliklerini de belirleyebilir. Örneğin iki geçiş noktası arasındaki hareketin süresi, yol tanımlanırken verilebilir.

Robotta, ani hareketler mekanizmayı yıpratır ve robotta titreşimlere yol açar. Bunu engellemek için, fonksiyonun kendisi, birinci türevi ve ikinci türevinin de sürekli olması istenebilir. Yolun düzgün olmasını garanti etmek için yolun geçiş noktaları arasındaki uzaysal ve geçici özelliklerine bazı sınırlamalar konmalıdır. Bütün geçiş noktaları, ters kinematik uygulama ile istenilen eklem açıları kümesine dönüştürülür. Daha sonra her eklem için geçiş noktalarından geçen ve hedef noktasında son bulan düzgün bir fonksiyon bulunur. Her hareket parçası için gereken süre, bütün eklemler için aynıdır. Eklem uzay şeması, geçiş noktalarında istenilen pozisyonu ve yönü sağlar. Bu kısımda, uç noktanın, başlangıç pozisyonundan hedef pozisyonuna, belirli bir süre içerisinde hareket ettirilmesi problemi ele alınmıştır. Ters kinematik kullanılarak hedef pozisyonla ve yönle ilgili eklem açıları hesaplanabilir. Robotun başlangıç pozisyonu da eklem açıları cinsinden verilmelidir. Her eklem için kullanılacak fonksiyonun t_0 'daki değerinin başlangıç pozisyonundaki değere, t_f 'deki değerine ise eklem hedef pozisyonundaki değere eşit olması istenir. $\theta(t)$ üzerindeki iki sınırlama aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\theta(0) &= \theta_0 \\ \theta(t_f) &= \theta_f\end{aligned}\tag{9}$$

Yukarıdakilere ek olarak, ikinci sınırlama da fonksiyonun hızının sürekli olması sınırlamasıdır. Hareketin bir başlangıç ve bir hedef noktası varsa hızın ilk ve son değerlerinin sıfır olması gerekmektedir.

$$\begin{aligned}\dot{\theta}(0) &= 0 \\ \dot{\theta}(t_f) &= 0\end{aligned}\tag{10}$$

Robot hareketi için ara noktalar tanımlanmışsa, geçiş noktalarının düz doğru parçaları ile birleştirildiğini düşünelim. Eğer bu doğruların eğimi, bir geçiş noktasında işaret değiştiriyorsa hız sıfır seçilir. Doğruların eğimi, işaret değiştirmiyorsa iki eğimin ortalaması geçiş noktasının hızı olarak seçilir. Bu şekilde, sadece geçiş noktalarının verilmesi ile, sistem her noktadaki hızı kendisi belirler.

Hızları seçerken ivmelerin de o noktalarda sürekli olması gerekmektedir. Sonuç olarak, beşinci dereceden bir polinom; pozisyonun, hızın ve ivmenin başlangıç ve son değerleri ile birlikte altı sınırlamayı sağlayabilir. Pozisyonda, hızda ve ivmede süreklilik sağlayan [1,29,30] beşinci derecen polinom aşağıda verilmiştir.

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (11)$$

Pozisyon, hız ve ivmedeki başlangıç ve son değerler sırası ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \theta_0 &= a_0 \\ \theta_f &= a_0 + a_1t_f + a_2t_f^2 + a_3t_f^3 + a_4t_f^4 + a_5t_f^5 \\ \dot{\theta}_0 &= a_1 \\ \dot{\theta}_f &= a_1 + 2a_2t_f + 3a_3t_f^2 + 4a_4t_f^3 + 5a_5t_f^4 \\ \ddot{\theta}_0 &= 2a_2 \\ \ddot{\theta}_f &= 2a_2 + 6a_3t_f + 12a_4t_f^2 + 20a_5t_f^3 \end{aligned} \quad (12)$$

Yukarıdaki denklemlerin çözümünden Eşitlik 11'deki katsayılar sırası ile aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} a_0 &= \theta_0 \\ a_1 &= \dot{\theta}_0 \\ a_2 &= \frac{\ddot{\theta}}{2} \\ a_3 &= \frac{20\theta_f - 20\theta_0 - (8\dot{\theta}_f + 12\dot{\theta}_0)t_f - (3\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^3} \\ a_4 &= \frac{30\theta_0 - 30\theta_f + (14\dot{\theta}_f + 16\dot{\theta}_0)t_f + (3\ddot{\theta}_0 - 2\ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^4} \\ a_5 &= \frac{12\theta_0 - 12\theta_f - (6\dot{\theta}_f + 6\dot{\theta}_0)t_f - (\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^5} \end{aligned} \quad (13)$$

3.2. Edubot'un Yörünge Planlaması

Robotun uç noktasını bir noktadan başka bir noktaya taşıırken, her noktada eklem açılarına dair bilgilerin elimizde olduğunu varsayabiliriz. Hareketin mümkün olduğunca düzgün yapılabilmesi için, pozisyonda, hızda ve ivmede süreklilik

sağlayan beşinci dereceden polinomlar kullanılmıştır. Bu çalışmada, Edubot' un ilk dört eklemi üzerinde ters kinematik hesaplamalar yapılmış ve bu açıların zamana göre değişimleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{40} & a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ t^3 \\ t^4 \\ t^5 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Denklem 14'deki katsayılar, her bir eklem için, Eşitlik 13'ten bulunur. Eğer hareket sadece bir hedef noktası içeriyorsa hızın başlangıç ve son değerleri sıfır alınır. Ara noktalar tanımlanmışsa; ara noktadaki hız, noktalar arasındaki eğimlerin ortalaması alınarak bulunur.

Edubot için hazırlanan bilgisayar yazılımında, ara noktanın tanımlanmadığı ve bir ya da birden fazla ara noktanın tanımlandığı durumlar için eklem açılarının, açısız hızların ve açısız ivmelerin zamana göre değişimleri incelenmiştir. Aşağıda robot kontrol programı hakkında detaylı bilgi sunulmuştur.

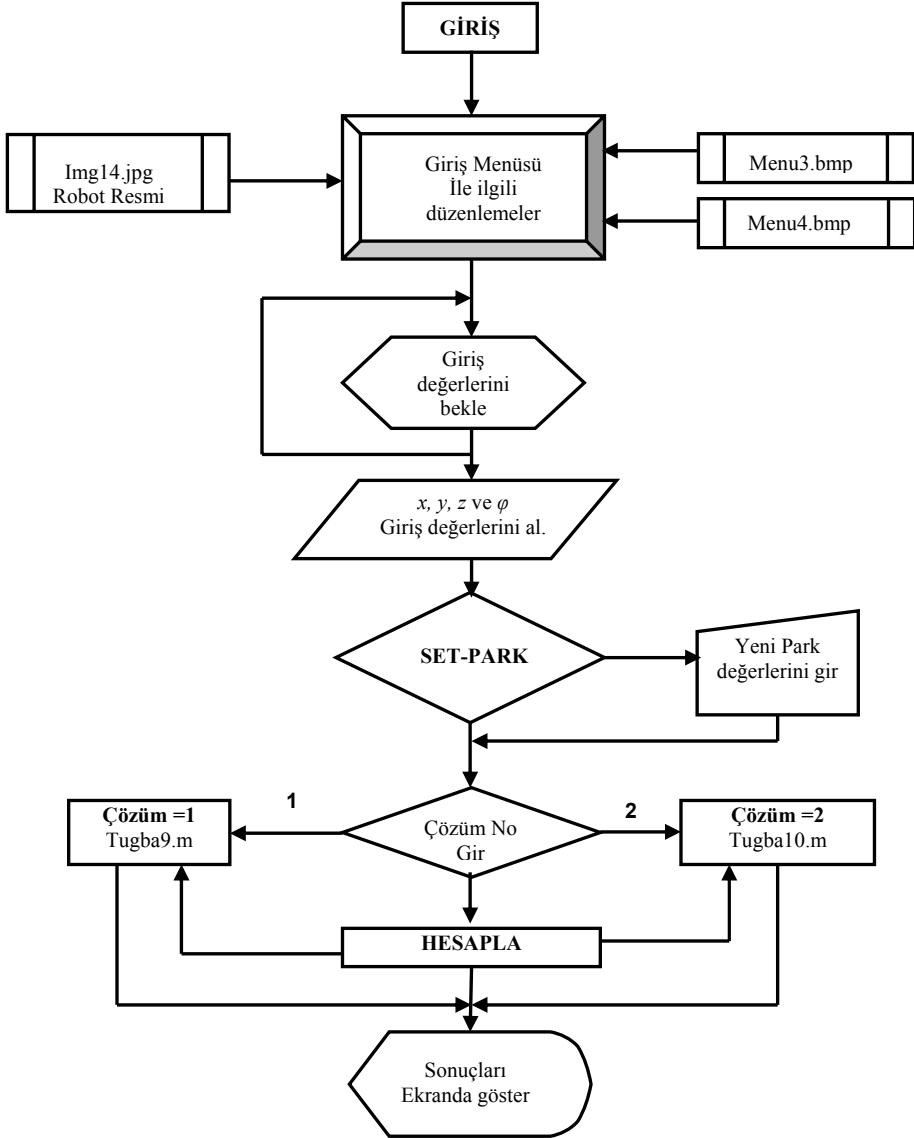
4. ROBOT KONTROL PROGRAMI

4.1. Robot Kontrol Programının Tanıtılması

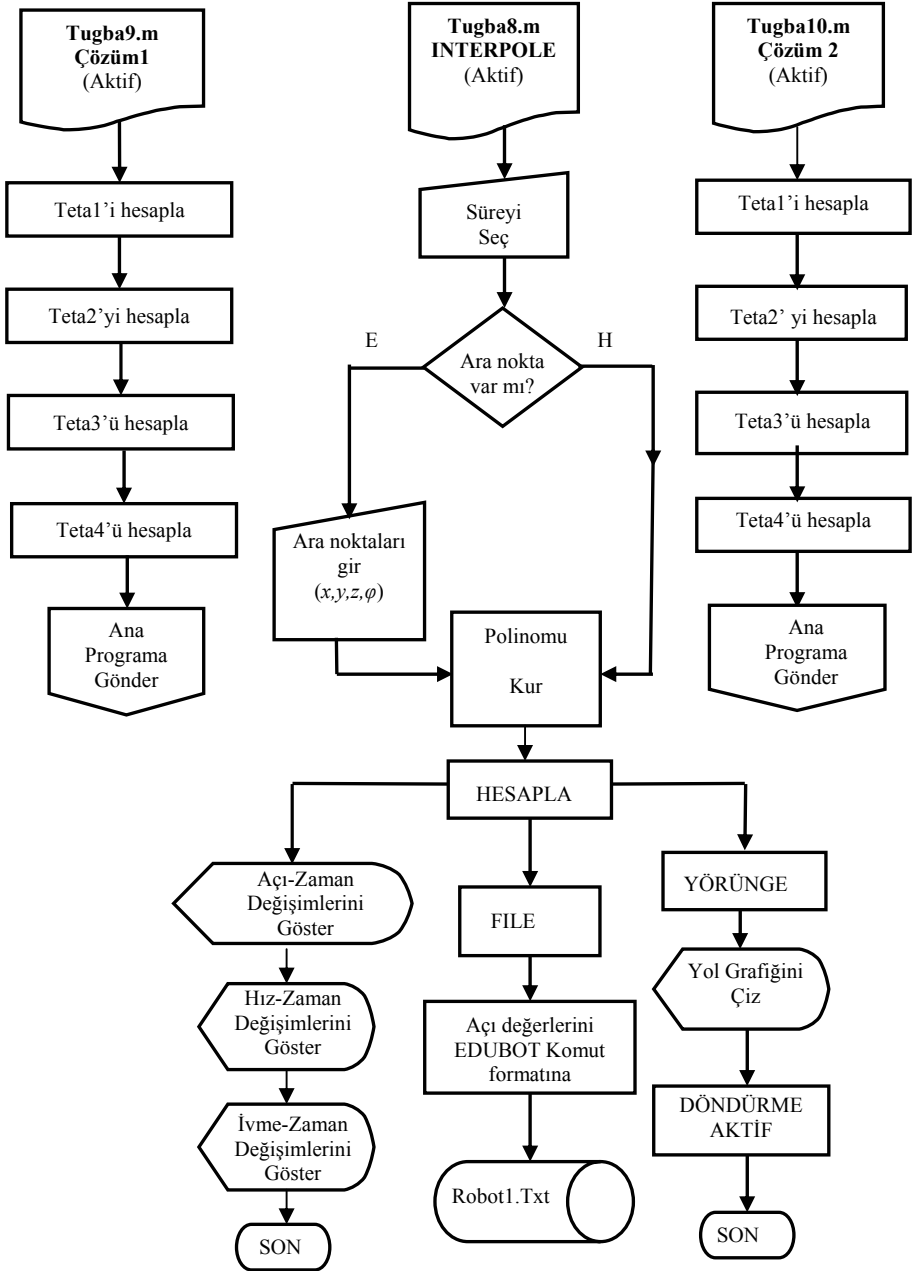
Hazırlanan robot kontrol programı, verilen uç nokta koordinatları (x, y, z) için eklem açılarının değerlerini hesaplar. Daha sonra kullanıcının isteğine göre eklem açılarının, açısız hızlarının ve açısız ivmelerinin zamana göre değişimini ve hareket gerçekleştirilirken uç noktanın izlediği yolu üç boyutlu olarak çizer. Eklem açılarının zamana göre değişimini hesaplamak için beşinci dereceden polinom kullanılmıştır. Bu polinom pozisyonda, hızda ve ivmede süreklilik sağladığı için tercih edilmiştir.

Program Matlab 5.02'de yazılmıştır [1]. Programın algoritması [1], Şekil 2'de verilmiştir. Programın tümü, **Selcen** isimli bir ana program ve **Setpark**, **Tugba8**, **Tugba9** ve **Tugba10** isimli dört alt programdan meydana gelmektedir. Kullanıcı önce Selcen isimli ana programı çalıştırır. Ekran, robot kolunun resminin bulunduğu bir sayfa gelir. Bu sayfaya, uç noktanın gitmesini istediğimiz pozisyon ve yön bilgileri girilir, 'HESAPLA' butonuna basıldığında eklem açıları hesaplanır ve ekranda sonuç pozisyonu grafiksel olarak çizilir. Eklem açılarının hesaplanması **çözüm 1** (Tugba9) veya **çözüm 2** (Tugba10) olmak üzere iki farklı yoldan

yapılabilir. Çözümlerde, ters kinematik problem, alt problemlere farklı şekillerde indirgenmekte; robot, aynı uç nokta konfigürasyonuna farklı eklem açıları ile ulaşmaktadır. Uç nokta koordinatları, çalışma alanının dışında seçildiğinde ise eklem açıları karmaşık sayı çıkmaktadır.



Şekil 2. Programın algoritması



Şekil 2. (devam ediyor)

4.2. Programın Algoritması

Eklem açıları hesaplandıktan sonra **'INTERPOLE'** butonuna basıldığında yeni bir sayfa açılır. Bu sayfa Tugba8 alt programı tarafından düzenlenir. Kullanıcı burada ara nokta sayısını ve iki nokta arasındaki hareketin süresini seçer. Eğer ara nokta sayısı sıfırdan farklı ise, yani hedef nokta haricinde uç noktanın geçmesi gereken ara noktalar tanımlanacaksa, bu noktaların koordinatları açılan menüden girilir. **'HESAPLA'** butonuna basıldığında ekrana dört eklem açısının hareket süresince aldığı değerlerin grafiği elde edilir. Sonra boşluk tuşuna basıldığında ekrana açısal hız-zaman grafikleri görünür. Tekrar boşluk tuşuna basıldığında ise açısal ivme-zaman grafikleri ekrana gelir.

Kullanıcı, **'YÖRÜNGE'** butonuna bastığında, uç noktanın izlediği yolun kartezyen koordinatlarda üç boyutlu çizimini ekranda görür.

'FILE' butonuna basıldığında, hesaplanan açı değerleri bir dosya haline getirilip **'Robotica'** kontrol yazılımına aktarılır. **'Robotica'** kontrol yazılımı Edubot için hazırlanmış bir yazılımdır. Eklem açıları ve hızları verilerek robotun çalışmasını sağlar. Selcen programında hesaplanan veriler bu yazılım aracılığı ile Edubot'a aktarıldığında; robot, istenilen hareketi yerine getirir. Yapılan uygulamalarda robotun bazı hareketleri gerçekleştiremediği, bazılarını ise belli bir hata ile gerçekleştirdiği gözlenmiştir. Robotun hareketi esnasında meydana gelen hataların bir sebebi, hesaplamalar yapılırken mekanik kısıtlamaların dikkate alınmamasıdır. Edubot'un eklemlerindeki hareketlendiriciler $\pm 95^\circ$ civarında dönme sağlayabilmektedir. Bu değerlerin dışına çıkıldığında eklemlerdeki motorlar zorlanmaktadır. Oluşan hataların bir başka kaynağı ise bu tezin çalışma konusu dışında olan kontrol teknikleridir.

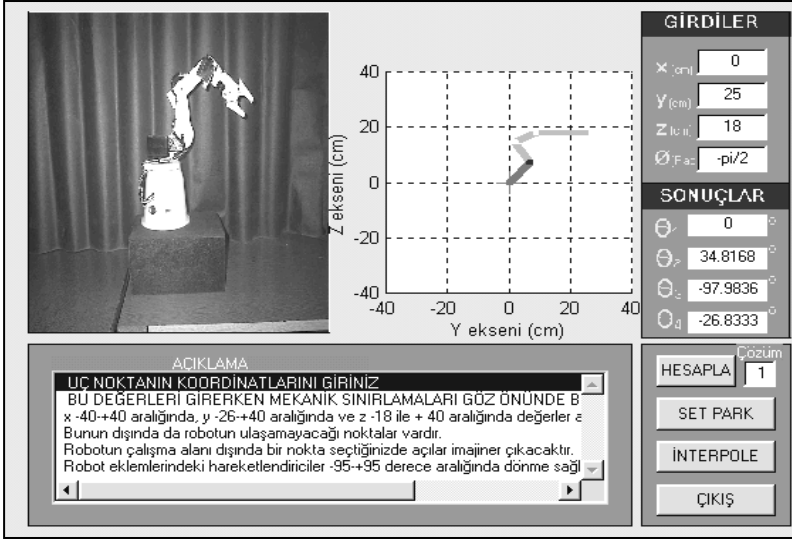
4.3. Örnek Program Çıktıları

Örnek 1

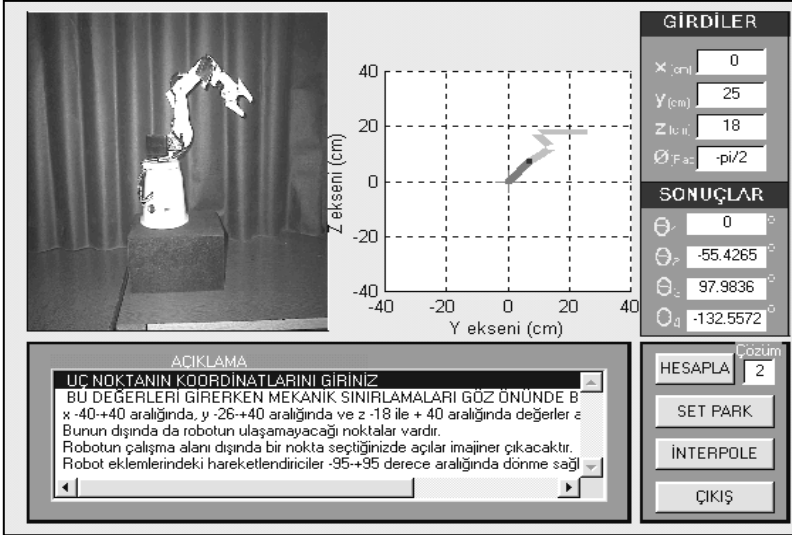
Bu örnekte, verilen bir uç nokta konfigürasyonu, $x=0$ cm, $y=25$ cm, $z=18$ cm ve robot elinin başlangıç pozisyonuna göre açısı, $\varphi=-\pi/2$, girdi olarak verildi. Robotun ters kinematik problemi, alt problemler kullanılarak iki farklı çözüm yolu (çözüm 1 ve çözüm 2) ile çözüldü. Burada, çözüm 1 ve çözüm 2 kullanılarak robotun o noktadaki pozisyonunun çizdirilmesi ele alındı. Sonuçlar Şekil 3' ve Şekil 4'teki grafiklerde olduğu gibi gözlemlendi. Şekil 3 ile Şekil 4 karşılaştırıldığında; robotun, aynı uç nokta konfigürasyonuna farklı eklem açıları ile ulaştığı görülmektedir.

Örnek 2

Bu örnekte, robotun uç noktası hedef noktaya giderken; eklem açılarının, açısal hızların ve açısal ivmelerin zamana göre değişimleri incelenmiştir. Hedef nokta

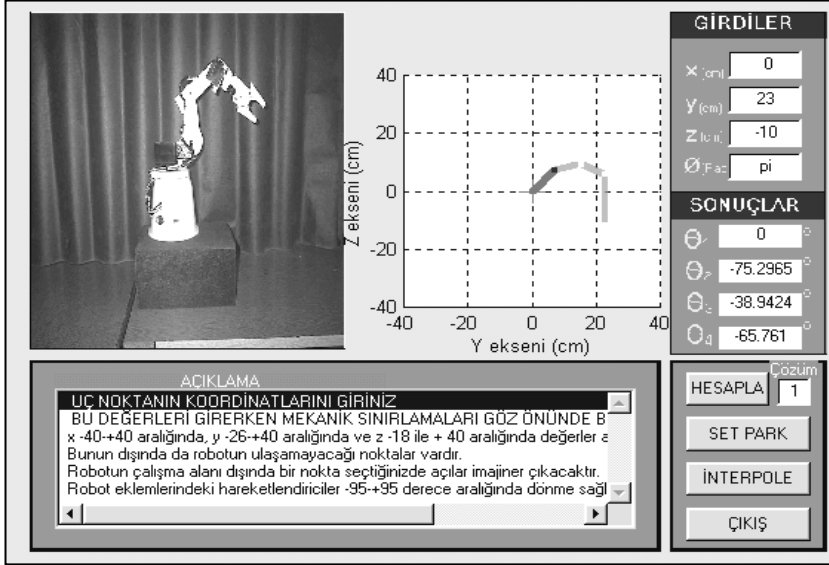


Şekil 3. Hedef nokta koordinatlar; $x=0$, $y=25$, $z=18$ ve $\varphi=-\pi/2$ değerleri için **çözüm 1** ile elde edilen grafik ve sonuçlar



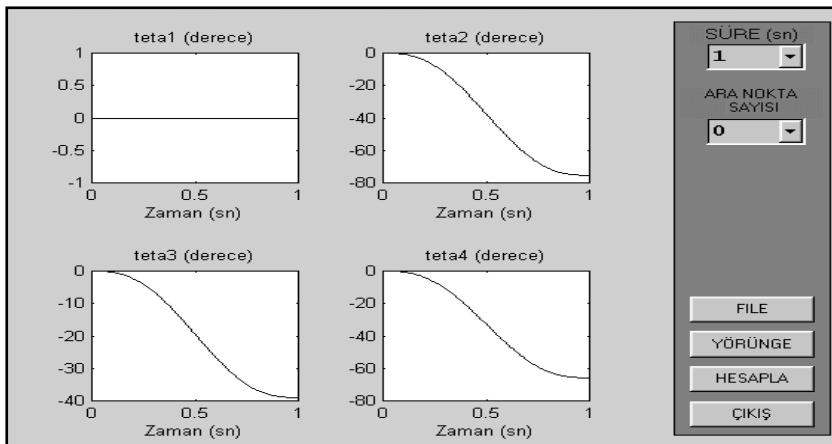
Şekil 4. Hedef nokta koordinatlar; $x=0$, $y=25$, $z=18$ ve $\varphi=-\pi/2$ için **çözüm 2** ile elde edilen grafik ve sonuçlar

koordinatları için, $x=0$ cm, $y=23$ cm, $z=-10$ cm ve robot elinin başlangıç pozisyonuna göre açısı $\varphi=\pi$ girdi olarak verildikten sonra, **çözüm 1** seçilerek elde edilen sonuçlar Şekil 5'de görülmektedir.

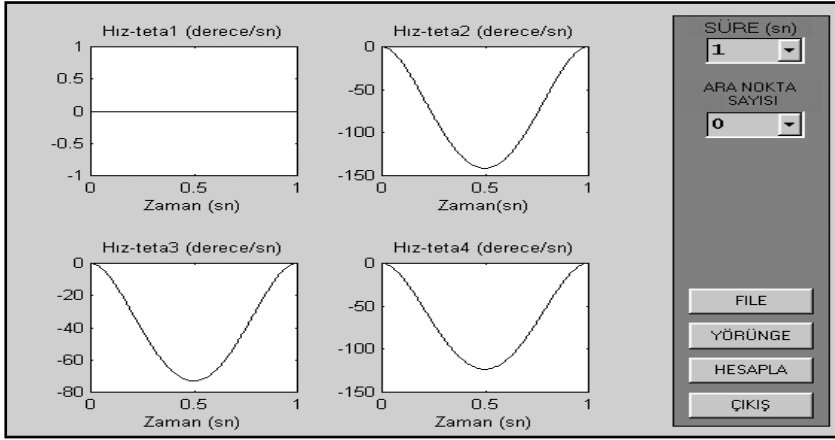


Şekil 5. Hedef nokta koordinatları; $x=0$ cm, $y=23$ cm, $z=-10$ cm ve $\varphi=\pi$ için **çözüm 1** seçilerek elde edilen grafik ve sonuçlar

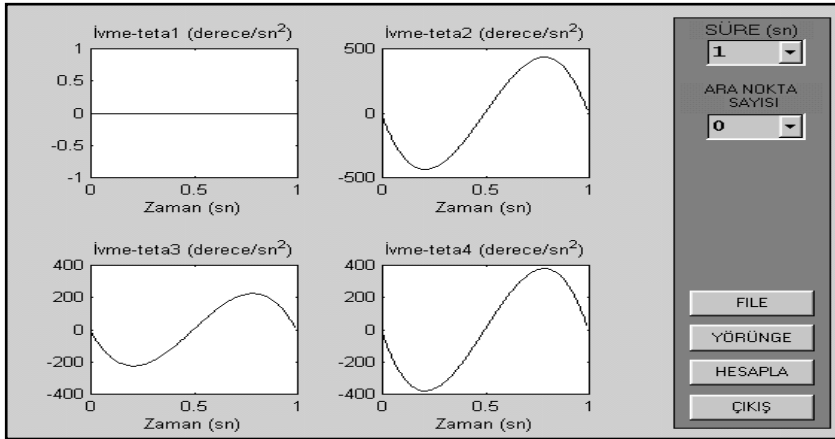
Açılar hesaplandıktan sonra 'INTERPOLE' ye tıklanmış, ara nokta sayısı sıfır ve hareket süresi 1 sn seçilmiştir. Buna göre θ_1 , θ_2 , θ_3 ve θ_4 açılarının zamana göre değişim grafikleri Şekil 6-(a)'daki gibi elde edilmiştir. Grafikte, başlangıç ve bitiş noktalarına doğru yaklaştıkça açısal değişimlerin azaldığı görülmektedir. Açısal değişimin azalması, hızın sıfıra yaklaştığını göstermektedir. Eklemlerdeki açısal hız ve açısal ivme değişimleri ise Şekil 6-(b) ve (c)'deki gibi elde edilmiş olup; açısal



Şekil 6-(a). Örnek 2'de, robot eklemlerinin zamana göre değişim eğrileri



Şekil 6-(b). Örnek 2'de, robot eklemlerinde açısal hız-zaman eğrileri



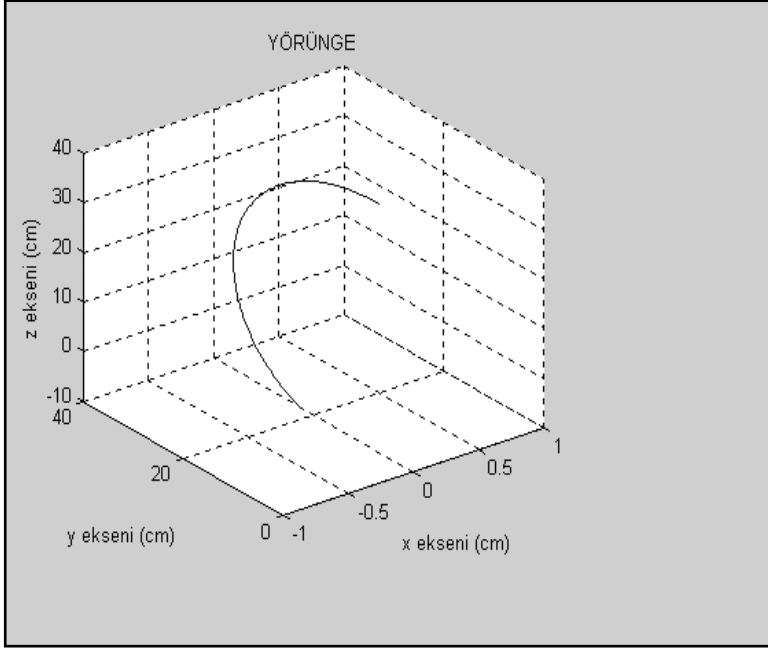
Şekil 6-(c). Örnek 2'de, robot eklemlerinde açısal ivme-zaman eğrileri

hızların, başlangıç ve sonuç değerlerinin de sıfır olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, pozisyon, hız ve ivme eğrilerinde süreklilik sağlanmıştır.

Hız ve ivme eğrileri hesaplandıktan sonra 'YÖRÜNGE'ye tıklanmış ve robotun uç noktasının, üç boyutlu uzayda izlediği yol Şekil 7'deki gibi gözlenmiştir.

Örnek 3

Bu örnekte, Örnek 2' deki hedef nokta koordinatları ($x=0$, $y=23$, $z=-10$ ve $\varphi=\pi$) ve çözüm 1 kullanılmış; iki ara nokta tanımlanarak eklem açılarının, açısal hızların ve



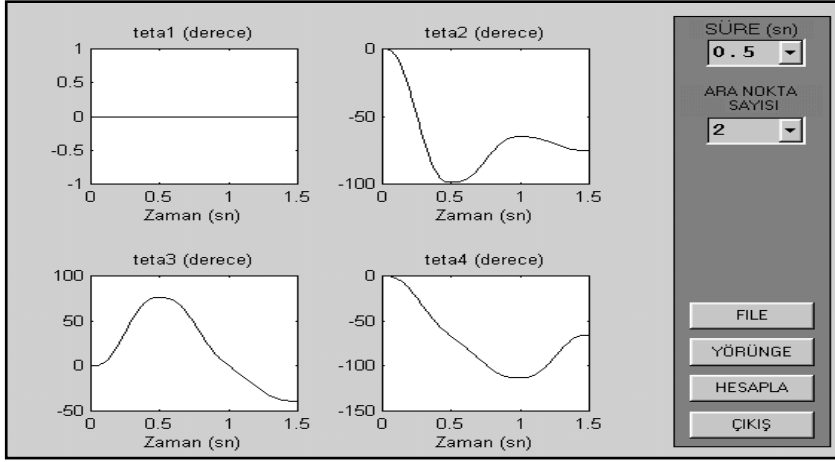
Şekil 7. Örnek 2’de, robotun uç noktasının üç boyutlu uzayda izlediği yol

açısal ivmelerin zamana göre değişimleri incelenmiştir. Bu örnekte robot, hedef noktaya, Şekil 8’de verilen iki ara noktadan geçerek ulaşmaktadır.

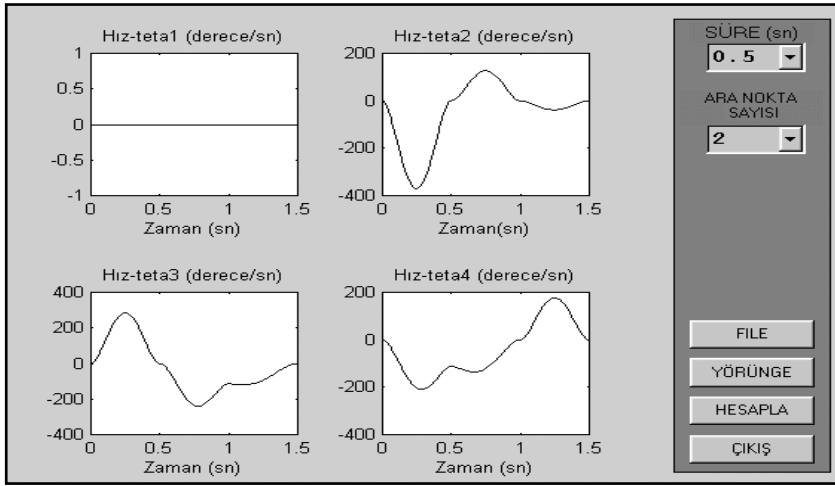
Örnek 2’de olduğu gibi, önce eklem açıları hesaplanmış daha sonra ‘INTERPOLE’ye basılmıştır. Ara nokta sayısı 2 ve noktalar arasındaki hareket süresi 0.5 sn olarak seçilmiştir. Şekil 8’de verilen geçiş noktaları için eklem açılarının, açısal hızların ve açısal ivmelerin zamana göre değişimleri ise Şekil 9-(a-c)’deki gibi elde edilmiştir. Bu şekillerden hareketin ara noktalarda da sürekli olduğu görülmektedir. Robotun uç noktasının, üç boyutlu uzayda izlediği yol, Şekil 10’daki gibi elde edilmiştir. Bu şekil incelendiğinde; uç noktanın, verilen ara noktalardan geçerek hedef noktaya ulaştığı görülmektedir.

	X	Y	Z	θ
1				<input type="text" value="0 35 13 -pi/2"/>
2				<input type="text" value="0 23 -2 pi"/>

Şekil 8. Örnek 3 için seçilen ara nokta değerleri



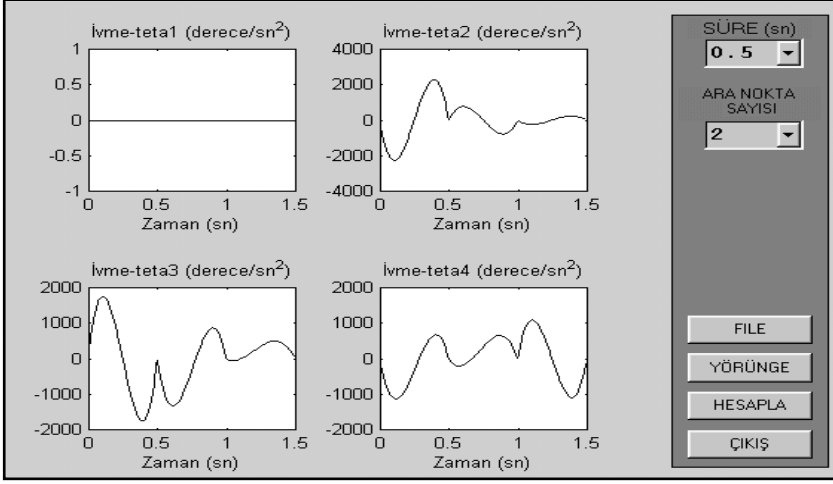
Şekil 9-(a). Örnek 3 için robot eklemleri açılış-zaman grafikleri



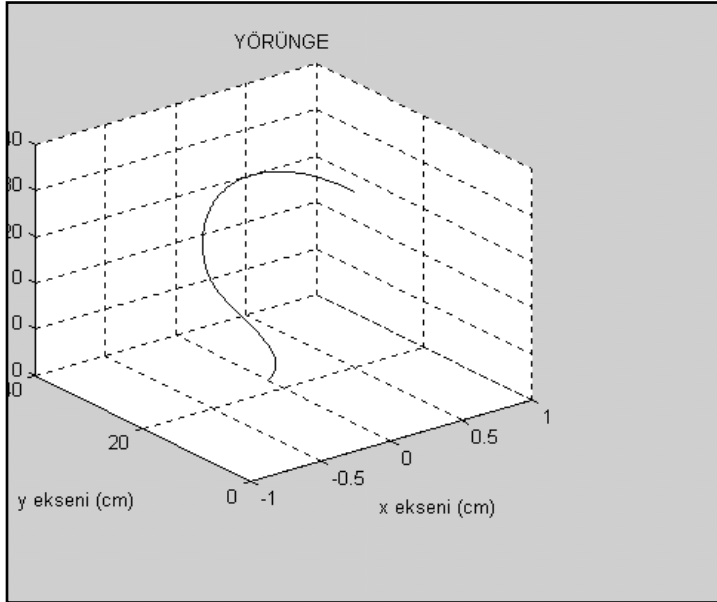
Şekil 9-(b). Örnek 3 için robot eklemlerinde açısal hız-zaman grafikleri

Şekil 9-(c)'de, robotun ara noktadaki ivme değerlerinin sıfır seçildiği; Şekil 9-(b)'de ise robotun ara noktalardan sabit hızla geçtiği görülmektedir. Bu değerlere göre beşinci dereceden polinomun katsayıları bulunmuştur. Ancak, polinomun kendisi ve türevi de sürekli olduğundan bu profillerle sürülen Edubot robot titreşimsiz ve sakin hareketler yapmıştır.

Şekil 7 ile Şekil 10 karşılaştırıldığında; robotun, aynı uç nokta konfigürasyonuna farklı yollar izleyerek ulaştığı görülmektedir.



Şekil.9-(c). Örnekleme için robot eklemlerinde açısal ivme-zaman grafikleri



Şekil 10. Örnekleme için robot uç noktasının, Şekil 8'de verilen iki ara noktadan geçerek hedefe giderken, üç boyutlu uzayda izlediği yol

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, endüstriyel robotların en önemli sorunlarından birisi olan ‘‘Yörünge Planlaması’’na 5. dereceden zaman polinomları ile çözüm getirilmiştir. Polinomlar, matematik olarak basit, anlaşılması kolay ve bilgisayar hesaplamaları kısa zaman sürelerinde yapılan ifadeler olduğundan noktadan noktaya (PTP) tipi yörünge planlamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 5.derecen polinomlarla, ara noktadaki konum ve hızda süreklilik sağlanmıştır. Ara noktadaki ivme değerleri sıfır seçilerek robotun, ara noktadaki hızı sabit varsayılmıştır. Ayrıca polinomların kendileri ve türevleri de sürekli olduğundan bu profillerde sürülen Edubot robot titreşimsiz ve sakin hareketler yapmıştır. 5.dereceden polinomların robot yörünge planlamasında kullanılması orijinal değildir. Ancak bu metodun Edubot’un kendi yazılımı olan ‘‘Robotica’’ya aktarılarak çalıştırılması Edubot robotu daha sofistike bir robot haline getirmiştir.

İleri kinematik problem, eklem açıları verilen bir robotun uç noktasını ve yönünü belirlemek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, verilen uç nokta konfigürasyonu için eklem açılarını belirleyen ters kinematik problemi, exponansiyellerin çarpımı şeklinde ifade edilmiştir. Bu ifadeyi elde etmek için, önce robotun ilk eklemi, temel çerçeve olarak belirlenmiştir. Daha sonra, her defasında robot eklemlerinden sadece birisi hareket ettirilip, diğerleri sabit tutulmuş ve temel çerçeveyi, dönen eklem çerçevesine dönüştüren dönüşüm matrisleri bulunmuştur. Elde edilen dönüşüm matrislerinin çarpımı ile uç noktanın verilen konfigürasyonu eşitlenerek, ters kinematik problemi formüle (Eşitlik 5) edilmiştir.

Edubot robot, altı eklem sahiptir. Bu eklemlerden iki tanesi, robot elini kontrol etmektedir ve uç noktanın gideceği yeri etkilememektedir. Edubot robot için hazırlanan programda, robotun sadece dört eklem açısı üzerine hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Eşitlik 5, önce eşitlik 8’e indirgenmiş; daha sonra Paden ve Kahan alt problemleri kullanılarak iki farklı şekilde (çözüm1 ve çözüm2) çözülmüştür.

Yörünge planlaması, robot, bir başlangıç noktasından bir hedef noktaya giderken, hareketinin zamana göre değişiminin planlanması olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, ters kinematik problemi çözüldükten sonra, robota titreşimsiz ve düzgün bir hareket yaptırabilmek için yörünge planlaması yapılmıştır. Pozisyonda, hızda ve ivmede süreklilik sağlayan beşinci dereceden polinomlar kullanılmıştır. Yapılan çalışmada hesaplamalar, Matlab 5.02’de yazılan bir programla gerçekleştirilmiştir. Matlab, grafiklerin çizdirilmesi ve menülerin hazırlanmasında kolaylıklar sağlamıştır.

Örnek 1’de, ters kinematik problem, verilen x , y , z ve ϕ değerleri için, alt problemler kullanılarak iki farklı çözüm (çözüm 1 ve çözüm 2) yolu ile çözülmüş; sonuçlar, Şekil 3 ve 4’de verilmiştir. Bu şekillerde robotun aynı hedef noktaya farklı eklem açılarıyla ulaştığı gözlenmiştir. Örnek 2 ve Örnek 3’de, verilen x , y , z ve ϕ değerleri

için çözüm 1 kullanılmış; yörünge planlaması yapılırken, ara noktaların tanımlanmadığı ve ara noktaların tanımlandığı durumlar için iki farklı çözüm elde edilmiştir. Her iki çözüm için, elde edilen eklem açılarının ($\theta(t)$), açısal hızların ($\dot{\theta}(t)$) ve açısal ivmelerin ($\ddot{\theta}(t)$) zamana göre değişim grafikleri Şekil 6-(a-c) ve Şekil 9-(a-c)'deki gibi bulunmuştur. Şekillerden, pozisyon, hız ve ivme eğrilerinde süreklilik olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, ara nokta tanımlanmadığı ve tanımlandığı durumlar için, robotun uç noktasının izlediği yol, üç boyutlu uzayda, sırası ile Şekil 7 ve 10'daki gibi bulunmuştur. Bu iki şekil karşılaştırıldığında, robotun aynı uç nokta konfigürasyonuna farklı yollar izleyerek ulaştığı görülmüştür.

Son olarak, Selcen programında elde edilen veriler bir dosya haline getirilip 'Robotica' kontrol yazılımına aktarılmıştır. Hesaplanan veriler bu yazılım ile robot üzerinde denendiğinde, robotun bazı hareketleri tam olarak gerçekleştiremediği gözlenmiştir. Meydana gelen hatanın sebebi, Edubot eklemlerindeki hareketlendiricilerin, sınırlı dönme ($\pm 95^\circ$) sağlayabilmesidir. Bu değerler dışındaki eklem açılarının gerçekleştirilmesi istendiğinde motorlar zorlanmaktadır. Ayrıca hareketlendiriciler üzerindeki yük miktarı da robot hareketini kısıtlayıcı bir etken olmuştur.

Bu çalışmanın devamında, robotun eklem açılarını genişletmek için eklemlerdeki hareketlendiricilerin sağladıkları açılar arttırabilir. Ayrıca robotun, hareketi en az hata ile gerçekleştirmesi için; robotun dinamik yapısı üzerine yapılan hesaplamalar, yörünge planlaması yapılırken dikkate alınabilir. Robotun hareketi esnasında meydana gelen titreşimler, PID (oransal+integral+türevsel) kontrolcüler kullanılarak azaltılabilir.

Bu çalışmada, 5.derecen polinomlar kullanılarak, ara noktadaki konum ve hızda süreklilik sağlanmıştır. Ara noktalarda, ivme değerleri sıfır seçilerek robotun, ara noktalardan sabit hızla geçtiği varsayılmıştır. Ayrıca polinomların kendileri ve türevleri de sürekli olduğundan bu profillerde sürülen Edubot robot titreşimsiz ve sakin hareketler yapmıştır. Ancak daha ileri bir çalışma için ivmenin türevinde de süreklilik sağlanabilir. Bunun için yörünge planlamasında, yedinci dereceden polinomların kullanılması gerekmektedir.

Robot için yörünge planlaması yapılırken, robotun çalışma alanı içerisinde engeller konulabilir. Robot, bu engelleri hissedebilecek sensörlerle donatılabilir ve yörünge planlaması, robotun, karşılaştığı engellere çarpmadan hareketini sağlayacak şekilde geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Tonbul T. Selcen, **Beş Eksenli bir Robot Kolunun Ters Kinematik Hesaplamalarının ve Yörünge Planlamasının Yapılması**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, F.B.E., 2002.

2. Kirecci A. ve Gilmartin M.J., “Improved Trajectory Planning Using Arbitrary Power Polynomials”, **Proceedings of I.Mech.E.**, vol. 208, s 3-13, 1994.
3. Jones J.R., “Vibration Due to Motion Discontinuities in Hydraulically Actuated Robots”, **Robotica** vol.1, s 211-215, 1993.
4. Dorf, R.C., **Modern Control Systems**, Addison-Wesley, s 97-102, Massachusetts, 1983.
5. Denavit J. and Hartenberg R. S., “A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices”, **Journal of Applied Mechanics**, s 215-221, 1955.
6. Engelberger J.F., **Robotics in Practice**, AMACOM, New York, 1980.
7. Ernst H.A., **MH-1 A Computer-Operated Mechanical Hand**, Ph.D.thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1961.
8. Sutherland J.M., **Robot Applications**, IIT Research Institute, Chicago, 1970.
9. Roberts L.G., **Homogeneous Matrix Representation and Manipulation of N-Dimensional Constructs**, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Document no. MS1045, Cambridge, 1965.
10. Munson J.H., **The SRI Intelligent Automation Program**, Stanford Research Institute, s 113-117, Stanford, 1981.
11. Scheinman V.C., **Design of a Computer-Controlled Manipulator**, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, Stanford, 1969.
12. Duda R.O. and Hart P.E., **Experiments in Science Analysis**, Stanford Research Institute, s 113-117, Stanford, 1970.
13. Paul R.P., “Modelling”, **Trajectory Calculation and Servoing of a Computer-Controlled Arm**, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, 1972.
14. Whitney D.E., “The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators”, **Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control**, s 303-309, 1972.
15. Nitzan D. and Rosen C.A., “Programmable Industrial Automation”, **IEE Transactions on Computers**, s 1259-1270, 1976.
16. Saveriano J.W., “Interview with Charles Rosen”, **Robotics Age**, vol3, no.3, s 16-26, 1981.
17. Lozano-Perez T., “Robot Programming”, **Proceedings of the IEEE**, vol. 71, no.7, s 821-841, 1983.
18. <http://trueforce.com/Robot Gallery/robot gallery3.htm#DanteII>.
19. <http://trueforce.com/New/Sony20001121.htmhumanoid>.
20. <http://trueforce.com/Space/ISS/SSRMS.htm>
21. Paul, R., **Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control**, MIT, Cambridge, 1981.
22. Somle J., Lantos and Cat P.T., “Advanced Robot Control”, **Akademiai Kiada**, s 4-176, Budapest, 1997.
23. Murray, Richard M., **A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation**, CRC , s 78-124, Boca Raton, 1994.

24. Paden B., **Kinematics and Control Robot Manipulators**, PhD. Thesis, University of California, Berkeley, 1986.
25. Kahan W., **Lectures on Computational aspects of Geometry**, Unpublished manuscripts, 1983.
26. <http://www.rhinorobotics.com/scara.html>
27. <http://www.robotica.co.uk/>
28. Selig, J.M., **Geometrical Methods in Robotics**, Springer, s 52-61, New York, 1996.
29. Bayseç S. And Alici G., “Two Dimensional Step Guidance of a Dynamic Load Avoiding Residual Vibrations by a Point Positioning Robot Manipulator”, **Computer Simulation Conference**, s 425-428, Boston, 1993.
30. Gupta A. and Kamal D., **Practical Motion Planning in Robotics: Current Approches and Future**, Wiley, s 172-205, 1998.