

5 Eksenli Manipülâtörün Eklem Uzayında Yörünge Planlaması

Sabri UZUNER¹, Nihat AKKUŞ^{2*}, Metin TOZ³

¹Düzce Üniversitesi, Cumayeri Meslek Yüksekokulu, 81700, Düzce, TÜRKİYE

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 34722, İstanbul, TÜRKİYE

³Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 81620, Düzce, TÜRKİYE

(Geliş/Received : 21.03.2016 ; Kabul/Accepted : 03.08.2016)

ÖZ

Bu çalışmada eğitim amaçlı kullanılmak üzere dönel eklemlere sahip 5 Serbestlik Dereceli (SD) bir seri robot manipülâtörü gerçekleştirilmiştir. Robot 150 gr taşıma kapasiteli ve eklem hareketleri rahat, sürtünmesiz ve titreşimsiz olarak hareket edebilmesine imkân sağlayacak özelliklerde, radyo kontrollü R/C Servo motorlar kullanılmıştır. Eklem uzayında yörünge planlaması yapabilmek için robotun ters kinematik problemi çözülmüş ve yörünge planlaması üçüncü dereceden bir polinom kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan 5 eksenli manipülâtörün kullanıcı tarafından rahat ve basit bir şekilde kullanılması amacıyla Visual BASIC programında görsel bir arayüz hazırlanmıştır. Son olarak geliştirilen mekanizmanın öğrenciler tarafından yapılan robotlarla ilgili uygulamalarda başarıyla kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Manipülâtör, Yörünge Planlaması, Ters Kinematik, Üçüncü Dereceden Polinomlar.

Trajectory Planning of a 5-DOF Serial Robot Manipulator in Joint-Space

ABSTRACT

In this study, a five Degrees of Freedom (DOF) serial robot manipulator with revolute joints was designed and realized to be used for educational purposes. The robot has 150 gr payload and the motions of the joints were provided by using radio controlled R/C servo motors with smooth and vibration-free movement. In order to perform the trajectory planning in the joint space the inverse kinematics problem of the robot was solved and a third order polynomial was used for the trajectory planning. So as to present a simple and efficient way to the user for controlling the robot, a visual user interface was also designed by utilizing Visual Basic Programming Language. Finally, it was observed that the designed mechanism has been successfully used by the students for the projects involving robots.

Keywords: Manipulator, Trajectory Planning, Inverse Kinematics, Third Degree Polynomial.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yörünge planlama ve engellerden sakınma problemleri robot uygulamaları konusunda önemli araştırma alanlarından birisi olmuştur. [1] Uç efektörü bulunduğu konumdan arzu edilen konuma götürmek, bir robot manipülâtörün en temel sorunudur. Uç efektörün bu hareketi gerçekleştirirken yönelimi ve konumu ana çerçeveye göre değişir ve aynı zamanda bir takım ara noktalardan geçer. Aslında, uç efektörün başlangıç ve bitiş noktaları da birer ara nokta sayılır. Uç efektörü bu noktalardan geçerken, zamana bağlı olarak değişen belli bir hıza ve ivmeye sahiptir. Bu değişken ivmeli hareket titreşime neden olabilir. Robotun titreşimden uzak, çalışma uzayındaki herhangi bir cisme çarpmadan, eyleyicilerin sınırlarını zorlamadan kontrollü ve yumuşak bir şekilde hareket edebilmesi için yörünge planlaması yapılır [2]. Bu, her an için, istenilen uç efektörün hızını ve dolayısıyla istenilen eklem hızlarını hesaplayarak yapılabilir. Manipülâtörün serbestlik derecesi; uç efektörün istenen koşullarda arzu

edilen yörüngeyi takip etme becerisini, denklem sayısını ve zorluğunu etkilemektedir. Eklem uzayında yörünge planlaması yapılırken üç veya daha yüksek dereceli polinomlar kullanılır. [2-3]. Bu çalışmaların öğrenciler tarafından eğitim amaçlı incelenmesi ve uygulama yapılabilmesi için eğitim amaçlı robotlara ihtiyaç vardır. Bu bağlamda, Duran ve arkadaşları [4] üç serbestlik dereceli PUMA tipi robot kolunun uç elemanının PID yöntemi ile yörünge kontrolü gerçekleştirmiştir. Sarıtaş ve arkadaşları [5] beş eksenli bir Edubot robotun; pozisyonda, hızda ve ivmede süreklilik sağlamak için, beşinci dereceden polinomlar kullanarak yörünge planlaması gerçekleştirmiştir. Çırak [6] iki eklemlili bir scara robot manipülâtörünün hesaplanmış tork yöntemi ile yörünge kontrolünü ve simülasyon yazılımını gerçekleştirmiştir. Robotların eğitim amaçlı olarak kullanılmasına veya geliştirilen yazılımlarla robot eğitiminin simülasyonlar yolu ile verilmesine olan ilgi son zamanlarda oldukça artmıştır. Bu konuda literatürde yer alan çalışmalara bazı örnekler şu şekilde verilebilir. Kucuk ve Bingul [7] çalışmalarında eğitim amaçlı bir yazılım geliştirmişlerdir. Yazarların ROBO LAB ismini verdikleri ve MATLAB programı ile birlikte çalışan bu yazılımda 6 SD ne sahip 16 adet temel

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: nihatakkus@marmara.edu.tr

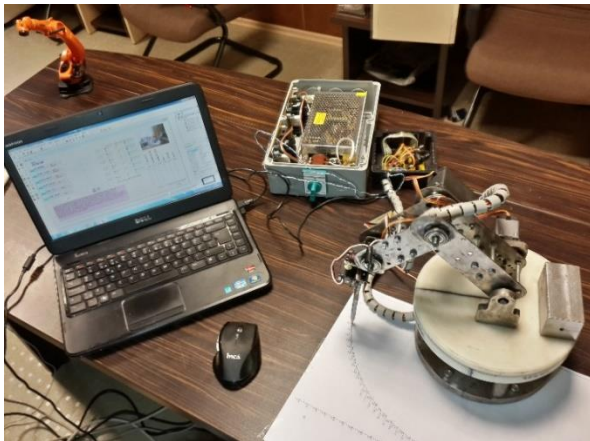
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 151-157

seri robot mekanizmasının simülasyonu, kinematik analizi ve yörünge planlanması gerçekleştirilebilmektedir. Toz ve Kucuk ise ROBOLAB'ın bir üst versiyonu geliştirmişlerdir. Bu yazılım sayesinde ROBOLAB'ın tüm yeteneklerine ek olarak 16 seri robot mekanizması için iki farklı yöntem ile dinamik analiz gerçekleştirilebilmektedir [8]. Toz ve Kucuk [9] bir diğer çalışmalarında ise 5 SD'ne sahip paralel robot mekanizmalarının tasarımı, kinematik analizi, simülasyonu, yörünge planlaması, tekil nokta analizi vb işlemlerin yapılabildiği ve GSPDAP adını verdikleri bir yazılım geliştirmişlerdir. Benzer bir diğer çalışmada, Inner ve Kucuk [10], genelleştirilmiş Stewart Platform mekanizmalarının tasarımı, analizi simülasyonu için STEWSIM ismini verdikleri bir yazılım geliştirmişlerdir. Cardeira ve Costa [11], mühendislik öğrencilerinin robotlara olan ilgisini arttırmak amacıyla bir mobil robot geliştirmişlerdir. Tanzawa ve arkadaşları [12], dış hekimliği eğitiminde kullanılmak üzere bir hasta robot geliştirmişlerdir. Bu robot kafatasını, dilini, çenesini ve gözlerini hareket ettirme kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Görüldüğü gibi robotlar eğitimin hemen her alanında kullanılabilir. Bu çalışmada da eğitim amacıyla kullanılmak üzere 5 SD'ne sahip bir seri robot manipülatörü gerçekleştirilmiştir. Ters kinematik denklemleri robot geometrisine uygun bir şekilde çıkartılmıştır. Robotun hassas ve titreşimsiz bir şekilde hareket etmesi için eklem uzayında yörünge planlaması yapılarak kontrol sağlanmış ve istenilen şartlarda hareketi gerçekleştirdiği görülmüştür. Eklem uzayında yörünge planlaması için üçüncü dereceden polinomlardan yararlanılmıştır.

2. YÖNTEM (METHOD)

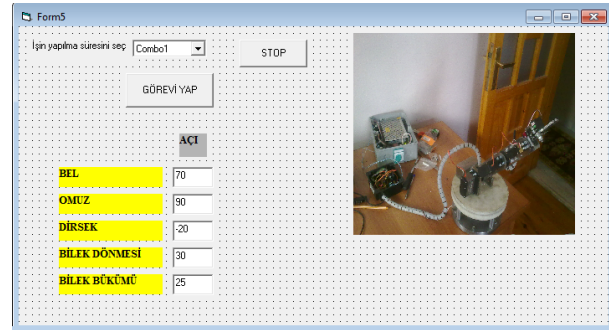
Yörünge planlaması için eğitim amacıyla kullanılmak üzere 5 SD'ne sahip bir seri robot manipülatör kullanılmıştır. Bu robot mekanizması birbirine 5 tane dönel eklemlerle bağlı katı cisimlerden oluşturulmuştur (Şekil 1). Eklemlerde kullanılan motorlar için RC servo motorlar tercih edilmiştir. Son olarak kontrol işlemleri için POLOLU Micro Maestro Servo kontrolör kullanılmış, güç katı ise kontrol kartına uygun olarak tasarlanmıştır. [13]



Şekil 1. 5 SD manipülatör sistem parçaları (The Platform of 5 DOF manipulator)

Yörünge planlamasında kullanılan ters kinematik denklemleri, robot geometrisine uygun bir şekilde analitik çözüm yöntemi ile basit arama yönteminin birlikte kullanıldığı bir algoritma tarafından gerçekleştirilmiştir. Seri robotun uç efektörünün başlangıçtan hedefe doğru sarsıntısız bir yörüngede hareket etmesini ve tüm eklemlerin aynı anda hareketi bitirmesi için üçüncü dereceden bir polinom kullanılarak eklem uzayında yörünge planlaması gerçekleştirilmiştir.

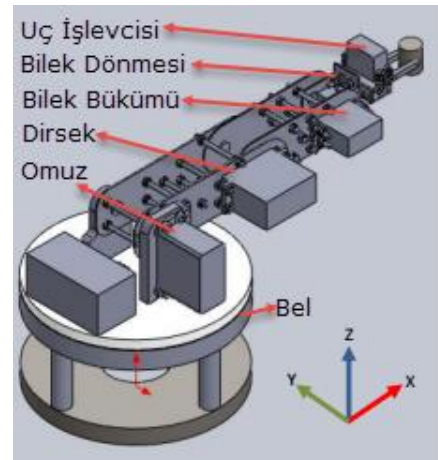
Eklem uzayındaki yörünge planlamasında; yol-zaman, hız-zaman, ivme-zaman grafikleri MATLAB programı aracılığı ile gerçekleştirilen ve birebir robotun aynı modeli olan seri robotun simülasyonundan elde edilmiştir. Ayrıca üçüncü derece polinomlardan elde edilen yol, hız ve ivme değerleri Visual Basic programı ile gerçekleştirilen arayüz sayesinde gerçek robota uygulanmış ve simülasyondaki gibi sarsıntısız bir hareket gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Yörünge planlaması arayüz programı (User interface of trajectory analysis)

2.1. Mekanik Tasarım (Mechanical Design)

Temel olarak eğitim amacıyla kullanılması planlanan seri robot mekanizmasının katı gövde yapısı tasarlanırken robotun uç işlevcisinin maksimum 150gr ağırlık taşımasının yeterli olacağı değerlendirilmiş ve katı gövde bu seçime göre tasarlanmıştır. Mekanik kısmın tasarımı yapılırken SolidWORKS programından yararlanılmıştır. Mekanizmanın bu program kullanılarak modellenen katı gövde yapısı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. 5SD'li manipülatörün SolidWORKS görüntüsü (SolidWORKS drawing of 5 DOF manipulator)

Mekanizmanın mekanik tasarımı yapılırken uç efektörün kaldırabileceği maksimum yük miktarı, motor ve bağların ağırlıkları hesaplanarak optimum mekanik tasarım gerçekleştirilmeye çalışılmıştır ve mekanik kısımların malzeme seçiminde bu sınırlamalar dikkate alınmıştır. Bu kısımlar sırasıyla, alt tabla, ağır malzeme olan 1040 çelik, hareketli tabla motora yük bindiğinden ve sürtünmenin az olması istendiğinden poliamit, robot kol kısımları ise hafif olması için 1040 çelik yerine çelik sac malzemeden üretilmiştir. Ayrıca robotun ağırlık merkezinin orijinden kaymaması için dengeleyici yük kullanılmıştır. Mekanizmanın her bir eklemindeki açısal sınırlar Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. 5SD Manipülör eksen dönüş açıları (Rotation angles of 5 DOF manipulator)

Eksen	Açısal İsmi	Dönme Açısı
Uç Efektör	-	0 ~ 330mm
Bilek Dönmesi	(θ_5)	86,75° ~ -83,34°
Bilek Bükümü	(θ_4)	47,32° ~ -47,64°
Dirsek	(θ_3)	95,07° ~ -84,36°
Omuz	(θ_2)	146,831° ~ -3,19°
Bel	(θ_1)	107,26° ~ -102,8°

Sistemimizde robotun hareketini sağlamak için RC servo motorlar tercih edilmiştir. Motorların tork değerleri belirlenirken her bir motorun bulunduğu yere göre o motora etki edebilecek en büyük tork değerlerinin olduğu robot kol pozisyonları dikkate alınmıştır. Bunun nedeni bu pozisyonlarda ağırlık merkezlerinin motorlara dik olarak oluşmasıdır. Sistemde kullanılan motor özellikleri Çizelge 2’de verildiği gibi belirlenmiştir.[13]

Çizelge 2. Sistemde kullanılan RC servoların tork değerleri (Torque values of RC servos used in the system)

Eksen	Tork(Nm)
Uç Efektör Motoru	0.42168 Nm
Bilek Dönmesi Motoru	0.4903325 Nm
Bilek Bükümü Motoru	1.2552512 Nm
Dirsek Motoru	3.9 Nm
Omuz Motoru	2.941995 Nm
Bel Motoru	2.941995 Nm

2.2. Ters Kinematik (Inverse Kinematics)

Ters kinematik çözümü, ileri kinematik çözümü gibi tasarlanan her robot için kolayca çözülebilen bir problem değildir. Bu nedenle ters kinematik probleminin çözümünde analitik yöntemler kullanılabildiği gibi analitik çözümün mümkün olmadığı tasarımlarda farklı iteratif

yöntemler de uygulanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan seri robotun geometrisinden dolayı analitik ve iteratif yöntemler birlikte kullanılarak ters kinematik çözümüne gidilmiştir.

Bu makalede kullanılan seri robotun ileri kinematik denklemleri Uzuner tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tezinden alınmıştır [13]. Ters kinematik çözümü için ise ilk aşamada analitik olarak tüm çözümler denenmiş ve “ θ_1 ” için analitik çözüm elde edilmiş ancak diğer açıların çözümlerine manipülörün geometrisi yüzünden ulaşılamamıştır. Bu nedenle iteratif yöntemlerden olan basit arama yöntemi kullanılarak “ θ_2 ” değeri bulunmuştur (Şekil 4). Uç işlevcinin konumunu etkileyen diğer iki açı “ θ_3 ”, “ θ_4 ” tekrar analitik yöntemle bulunmuştur. Böylelikle her iki metottan yararlanarak sadece analitik yöntemle çözülemeyen ters kinematik çözümü gerçekleştirilmiştir. Ters kinematik analiz arayüz programı Visual Basic ortamında gerçekleştirilmiştir.

θ_1 açısı analitik olarak bulmak için, ${}^0T_9 = {}_{end_effector}^{base}T$ eşitliğini aşağıdaki Eş. 1’deki gibi yazabiliriz.

$${}^0T_9 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada; r_{ij} $i, j = 0, 1, 2$ transformasyon matrisinin yönelim değerlerini temsil etmektedir ve x, y, z değerleri ise uç işlevcinin konum bilgisini vermektedir. Ters kinematik denklemleri Eş. 2’deki gibi ileri kinematik denklemin her iki tarafını transformasyon matrisinin tersi alınıp çarpılarak bulunur. Bu işlem tüm açılar buluna kadar devam eder.

$$[{}^0T_9]^{-1} {}^0T_9 = [{}^0T_1]^{-1} {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 {}^7T_8 {}^8T_9 \quad (2)$$

Burada, $[{}^0T_1]^{-1}$ aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[{}^0T_1]^{-1} = \begin{bmatrix} c(\theta_1) & s(\theta_1) & 0 & 0 \\ -s(\theta_1) & c(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -98 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Denklemden “s” ve “c” sembolleri sırası ile sinüs ve kosinüsün kısaltmasıdır. Eş. 2 içerisinde Eş. 3’ü yerleştirip denklemi düzenlikten sonra oluşan denklemden aşağıdaki gibi θ_1 açısını veren eşitliliği bulabiliriz.

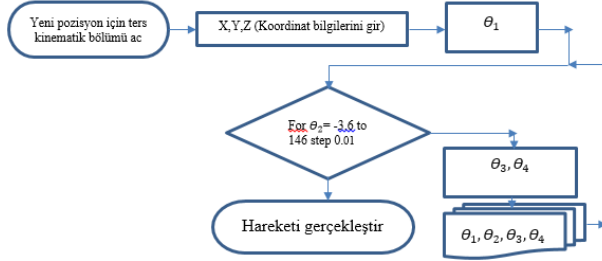
$$yc(\theta_1) - xs(\theta_1) = \frac{181}{50} \quad (4)$$

θ_1 açısı değeri trigonometrik denklemlerden yararlanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\theta_1 = \arctan2(-x, y) \quad (5)$$

$$\mp \sqrt{x^2 + y^2 - (181/50)^2} \cdot (181/50)$$

θ_2 açısı için analitik yöntemle bulunamadığı için basit arama yönteminden yararlanılmıştır (Şekil 4). θ_2 açısının alabileceği minimum değer -3.19° , maksimum değer ise 146.831° ve ilgili ekleme bağlanan servo motorun en küçük dönme açısı 0.01° dir.



Şekil 4. Basit arama algoritması (Simple search algorithm)

θ_2 'nin her bir değeri için θ_4 and θ_3 aşağıdaki eşitliklerden yararlanılarak bulunur.

$$\theta_4 = \arctan2 \left(\left(\sqrt{1 - \frac{((xc(\theta_1) + ys(\theta_1) - 125c(\theta_2)))^2 + (z - 163 - 125s(\theta_2))^2 - 21017)}{2.101.104}} \right), \frac{((xc(\theta_1) + ys(\theta_1) - 125c(\theta_2)))^2 + (z - 163 - 125s(\theta_2))^2 - 21017)}{2.101.104} \right) \quad (6)$$

θ_1 değerini aşağıdaki Eş. 7'deki gibi tanımlarsak, θ_3 açısı değeri Eş. 8'deki gibi olur.

$$\theta_1 = \arctan2 \left(\frac{((z - 163)c \theta_4 + (xc(\theta_1) + ys(\theta_1))) ((z - 163) - 125s(\theta_2)) - 101s(\theta_4) ((xc(\theta_1) + ys(\theta_1)) - 125c(\theta_2))}{((z - 163)c \theta_4 + (xc(\theta_1) + ys(\theta_1))) ((xc(\theta_1) + ys(\theta_1)) - 125c(\theta_2)) + 101s(\theta_4) ((z - 163) - 125s(\theta_2))} \right) \quad (7)$$

$$\theta_3 = \arctan2 \left(\frac{(101c(\theta_4) + 104)101s(\theta_1 + \theta_4) + 104s(\theta_1) - 101s(\theta_4)101c(\theta_1 + \theta_4) + 104c(\theta_1)}{(101c(\theta_4) + 104)101c(\theta_1 + \theta_4) + 104c(\theta_1) + 101s(\theta_4)101s(\theta_1 + \theta_4) + 104s(\theta_1) - \theta_2} \right) \quad (8)$$

2.3. Yörünge Planlaması (Trajectory Analysis)

Bir Robot kolunun bir noktadan başka bir noktaya gerçekleştirdiği hareketini sarsıntısız, tüm eklemlerinin aynı anda görevini tamamladığı ve etrafındaki cisimlere çarpmadığı şekilde bitirmesi istenir. Bu amaçla o robot kolu için yörünge planlaması yapılır. Eğer yörünge planlaması yapılmazsa robot kola hedef pozisyon verdiğimizde robotun nasıl bir hareket sonucunda o konuma geleceğini bilemeyiz. Dolayısıyla, robot kolu bu hareketini gerçekleştirirken zemine, etrafındaki bir cisme veya kendisine çarpabilir. Bu da robot kola zarar verir. Bu nedenle kartezyen uzayda veya eklem uzayında yörünge planlaması yapılır. Bu çalışmada geliştirilen sistemde eklem uzayında yörünge planlaması üçüncü dereceden polinomlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Eş. 9).

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (9)$$

Eklem uzayında yörünge planlaması yapabilmek için verilen koordinat bilgileri kullanılarak ters kinematik denklemlerinden eksen açısı bilgilerinin bulunması gerekir. Belirlenen ters kinematik değerler kullanılarak yörünge planlaması gerçekleştirilebilir. Buna göre;

Robot kolun başlangıç ve bitiş pozisyonundaki hız değerleri sıfır (Durgun halden belli mesafe sonra durağan hale geçtiği için) olmak üzere; üçüncü dereceden bir polinomla yörünge planlaması yapabilmek için ilk olarak aşağıdaki dört değer belirlenir.

$$Q(0) = Q_0 \quad (10)$$

$$Q(tf) = Q_f \quad (11)$$

$$\dot{Q}(0) = 0 \quad (12)$$

$$\dot{Q}(tf) = 0 \quad (13)$$

Burada Q_0 başlangıç konumu, Q_f hedef konumu, $\dot{Q}(0)$ başlangıç hızı $\dot{Q}(tf)$ bitiş hızıdır. Daha sonra bu değerler Eş. 14,15,16'daki gibi yol, hız, ivme denklemlerinde yerlerine yazılarak yol-zaman, hız-zaman, ivme-zaman değerleri elde edilir.

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (14)$$

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \quad (15)$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3t \quad (16)$$

Burada a_0, a_1, a_2, a_3 denklemin katsayı değerleridir ve robot hareketinin başlangıç ve bitiş hızlarını sıfır aldığımız için denklemdaki katsayıların değerleri aşağıdaki gibidir.

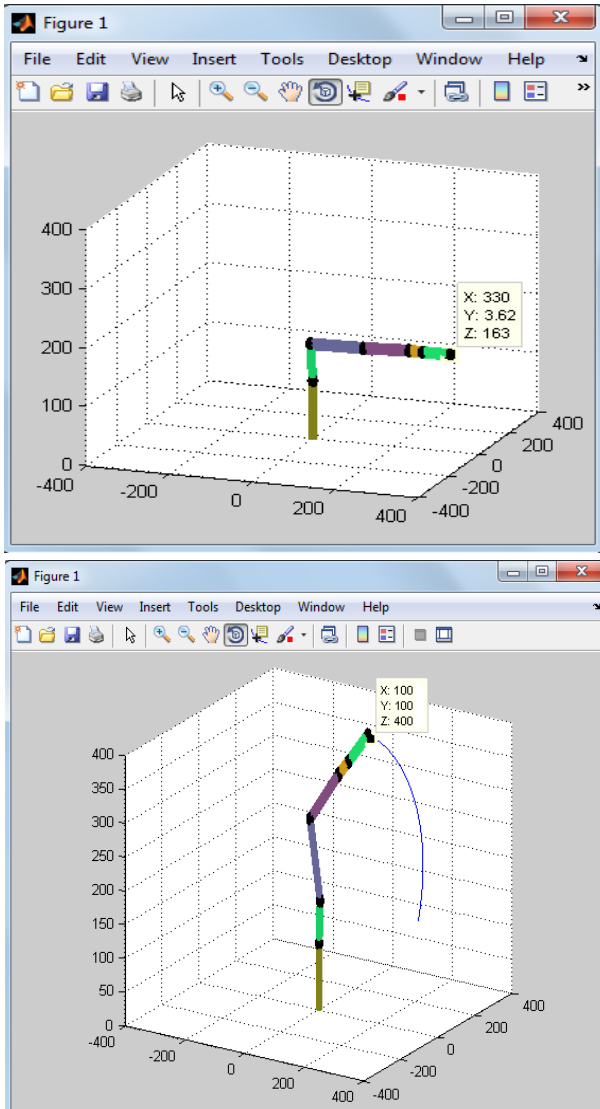
$$a_0 = \theta_0 \quad (17)$$

$$a_1 = 0 \quad (18)$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0) \quad (19)$$

$$a_3 = -\frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0) \quad (20)$$

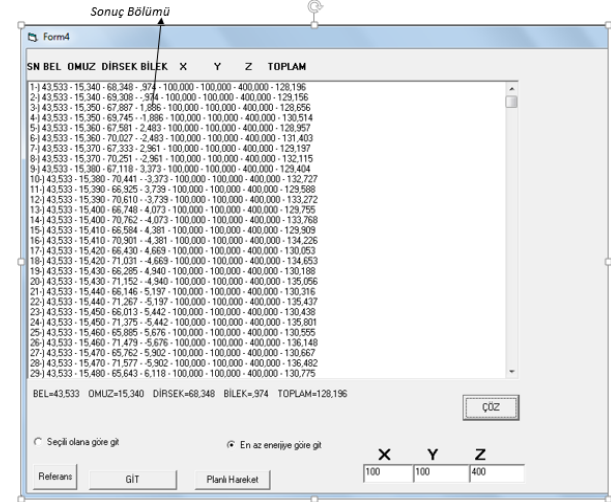
Örnek bir uygulama olarak tasarlanan robot kol uç efektörünün başlangıç pozisyonu $X=330\text{mm}$, $Y=3.62\text{mm}$, $Z=163\text{mm}$ ve hedef pozisyonu için ise $X=100\text{mm}$, $Y=100\text{mm}$ ve $Z=400\text{mm}$ olarak seçilmiştir. Seçilen konumlar için gerçekleştirilen simülasyon Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. a) Başlangıç pozisyonu (Referans position) b) Hedef pozisyonu (Target position)

Örnek uygulamanın gerçek sistem üzerinde gerçekleştirilebilmesi için ilk olarak geliştirilen kullanıcı arayüzü

programı sayesinde ters kinematik analiz yapılarak gerekli eksen açı değerleri bulunmuştur. Bu sonuçlardan bir tanesi seçilerek yörünge planlaması yapılmıştır.



Şekil 6. Ters kinematik analiz sonuçları (Result of inverse kinematics)

Ters kinematik analiz sonuçlarından seçilen bir çözümün açı değerleri aşağıdaki gibidir.

Elde edilen ters kinematik çözümlerine göre gerçekleştirilen yörünge planlaması sonucunda hesaplanan değişkenler her bir eklem için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tüm eklemler için aynı işlemler yapıldığı için aşağıda sadece θ_1 için yapılan hesaplamalar sunulmuştur.

	θ_1 (Bel açısı) = 43.533°
	θ_2 (Omuz açısı) = 103.020°
X=100mm, Y=100mm, Z=400mm	θ_3 (Dirsek açısı) = -68.348°
	θ_4 (Bilek dönme açısı) = -1.605°

2.3.1. θ_1 Eklemi için yörünge planlaması

$$Q(0) = 0 \quad (21)$$

$$Q(tf) = 43.533 \quad (22)$$

$$\dot{Q}(0) = 0 \quad (23)$$

$$\dot{Q}(tf) = 0 \quad (24)$$

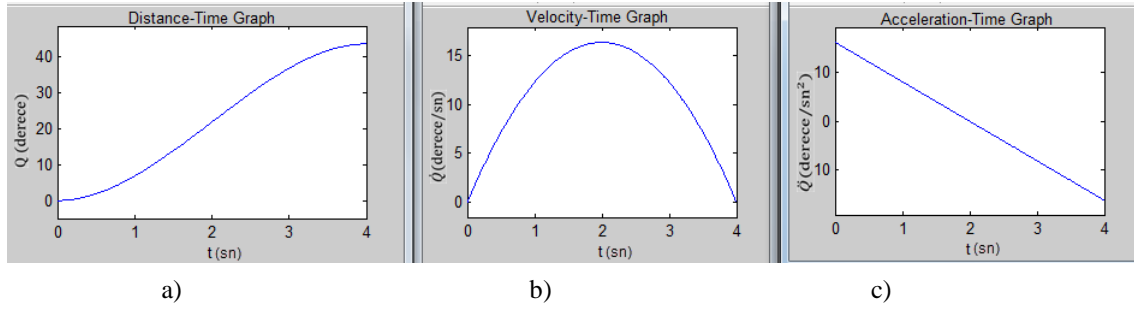
Robot kolun başlangıç pozisyonundan hedef pozisyonuna pürüzsüz bir şekilde 4sn'de götürülmesi amaçlanırsa yukarıdaki değerlere göre yol, hız ve ivme denklemleri aşağıdaki gibi olur.

$$Q(t) = 8.1624t^2 - 1.3604t^3 \quad (25)$$

$$\dot{Q}(t) = 16.3249t - 4.0812t^2 \quad (26)$$

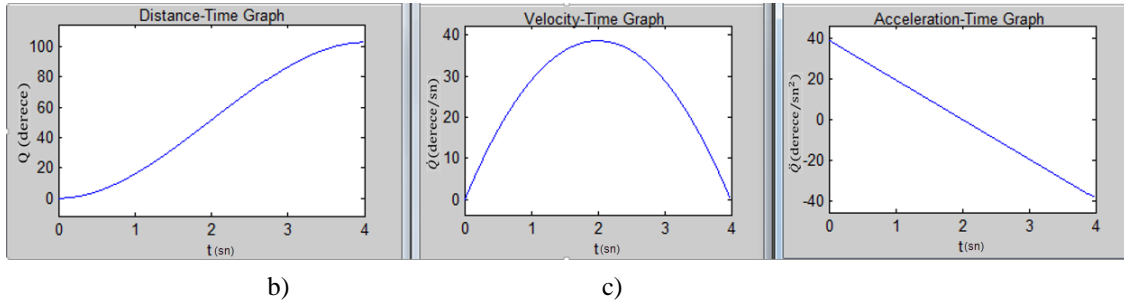
$$\ddot{Q}(t) = 16.3249 - 8.1624t \quad (27)$$

Bu denklemlere göre θ_1 için yol-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri de Şekil 7'de verildiği gibi elde edilmiştir.

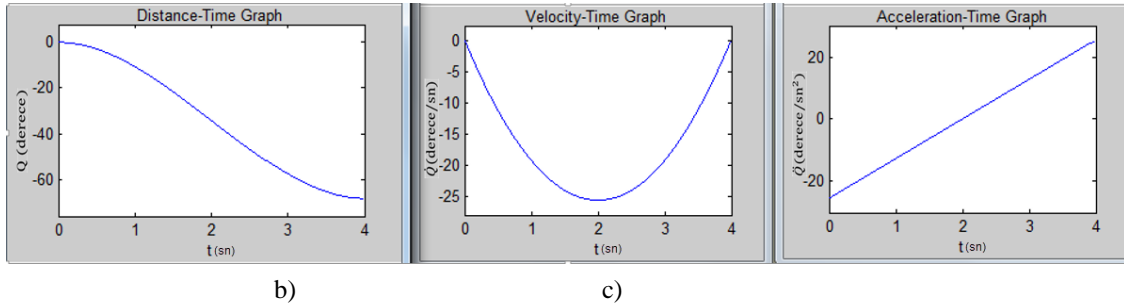


Şekil 7. θ_1 için; a)Yol-Zaman grafiği b) Hız-Zaman grafiği c)İvme-Zaman grafiği

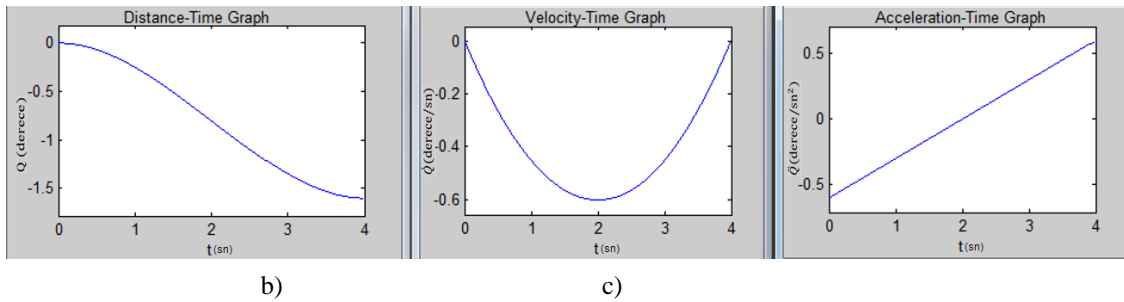
θ_1 için yapılan bu işlemler benzer şekilde diğer eklemler için tekrarlanmış ve aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 8. θ_2 için; a)Yol-Zaman grafiği b) Hız-Zaman grafiği c)İvme-Zaman grafiği



Şekil 9. θ_3 için; a)Yol-Zaman grafiği b) Hız-Zaman grafiği c)İvme-Zaman grafiği



Şekil 10. θ_4 için; a)Yol-Zaman grafiği b) Hız-Zaman grafiği c)İvme-Zaman grafiği

Analiz sonuçlarına göre tüm eklemlerin Yol-Zaman grafiğinde görüldüğü gibi eğrilerin başlangıç pozisyonuna ve bitiş pozisyonuna hatasız bir şekilde ulaştığı görülmüştür. Hız-Zaman grafiğinde ise eklemlerinin $t=0$ anında sıfır hızla başladığı ve gittikçe artan bir hızla hedeflenen sürenin yarısında maksimum hıza ulaştığı ve diğer kalan yarısında ise hızın aynı oranda azalarak ya-

vaş bir şekilde sıfıra değerine ulaştığı görülmektedir. İvmelenme ise hıza ters orantılı olarak değişmektedir. Bu sayede eklemlerdeki motorların, eklemler için farklı da olsa aynı anda görevlerini tamamlamakta ve motorlara uygun hız ve ivme değerleri verilerek sarsıntısız bir şekilde hareket sağlanmaktadır.

3. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Robot kolların tasarım farklılığından dolayı ters kinematik çözümleri sabit değildir. Bu çalışmada gerçekleştirilen robot kolu için bazı geometrik sıkıntılar ters kinematik çözümleri zorlaştırmış ve bu durum da analitik olarak ters kinematik çözümleri imkânsızlaştırmıştır. Bu nedenle çözüme ulaşmak için analitik çözümlerin yanında bilgisayar programından yararlanılmıştır. Geliştirilen basit arama ve analitik yöntemin birleştirildiği algoritma sayesinde analitik olarak çözümü olmayan 5 SD sahip robot kolun ters kinematik çözümüne ulaşılmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen robot kolun eklem uzayında yörünge planlaması yapılarak normal harekete göre daha hassas, titreşimsiz hareket etmesi sağlanmıştır. Yapılan analiz sonucunda istenilen şartlarda hareketlerin gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

BİLGİ (INFORMATION)

Bu makale Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumunda Özet Bildiri olarak (UMAS 2015) sunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kızıllan A., Toz M., Aliustaoğlu C. ve Bingül Z., "Gezgin robot tasarımı ve hareket planlaması", *TOK'07 Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 371-376, (2007).
2. Bingü, Z., Küçük S., "Robot tekniği 1", *Birsen Yayınevi*, ISBN:975-511-424-6, İstanbul, 275-282, (2005).
3. Kumar V., "Motion planning and control of robots", In handbook of industrial robotics, *John Wiley and Sons*, New York, (1999).
4. M.A. Duran, A. Ankaralı, "Üç serbestlik derceli PUMA tipi bir manipülatörün PID kontrolü", *Teknik Bilimler MYO Teknik-Online Dergi*, 9: 79-98, (2010).
5. Saritas M., Tonbul T. S., "Bes eksenli bir robot kolunda ters kinematik hesaplamalar ve yörünge planlaması", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002).
6. Çırak B., "İki eklemlili bir SCARA robot manipülatörünün hesaplanmış tork yöntemi ile yörünge kontrolü.", *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1): 77-91, (2014).
7. Kuçuk S., Bingul Z., "An off-line robot simulation toolbox", *Comput Appl Eng Edu.*, 18(1): 41 – 52, (2010).
8. Toz M., Kuçuk S., "Dynamics simulation toolbox for industrial robot manipulators", *Comput Appl Eng Edu.*, 18: 319-330, (2010).
9. Toz M., Kuçuk S., "Parallel manipulator software tool for design, analysis, and simulation of 195 Gsp mechanisms", *Comput Appl Eng Edu.*, 23(6): 805–966, (2015).
10. Inner B., Kuçuk S., (April 18, 2013), "A novel kinematic design, analysis and simulation tool for general stewart platforms", *The Society for Modeling and Simulation International*, 89(7): 876–897, (2013).
11. Cardeira C., Da Costa J. S., "A low cost mobile robot for engineering education", *32st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 2162-2167, USA, (2005).
12. Tanzawa T., Futaki K., Tani C., Hasegawa T., Yamamoto M., Miyazak, T. and Maki K., "Introduction of a robot patient into dental education", *European Journal of Dental Education*, 16: e195–e199, (2012).
13. Uzuner S., "Eksen kaçıklığı olan endüstriyel robotların ters kinematik çözümüne yeni bir yaklaşım", *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).