

Seri Manipulatörlerin Dönüşüm Matrislerinin Elde Edilmesinin Kolay Yolları

Samet YAVUZ^{1*}

^{1*} University of Turkish Aeronautical Association, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, İzmir/Türkiye.

ORCID No: 0000-0003-2513-3267, e-mail: syavuz@thk.edu.tr

(Alınış/Arrival: 05.09.2023, Kabul/Acceptance: 23.11.2023, Yayınlanma/Published: 15.12.2023)

Özet

Bu çalışmada, Mathematica yazılımı kullanılarak Denavit-Hartenberg yöntemi için seri manipulatörlerin konum analizinde genel dönüşüm matrislerini elde etmek amacıyla bir dönüşüm matrisleri modülü sunulmuştur. Bu modüle ek olarak ChatGPT tarafından yazılan ekstra bir Mathematica kodu verilmiştir. Çalışmanın sonunda iki yöntemin karşılaştırılması yapılmıştır. Her iki metotta da D-H parametrelerini önerilen kod içerisinde tanımladıktan sonra dönüşüm matrisinin kolayca elde edildiği görülmüştür. Burada metotlar arasındaki tek fark D-H parametrelerini tanımlama yöntemine dayanmaktadır. Çalışmada sunulan ilk modülde her bir ekleme için ayrı ayrı D-H parametrelerinin girilmesi gerekmektedir. ChatGPT tarafından elde edilen modülde ise D-H parametreleri bir tablo halinde verilmelidir. Halihazırda iki modül karşılaştırıldığında öncelikle D-H parametrelerinin elde edilmesinin gerektiği açıktır, D-H parametreleri modüllere tanımlandıktan sonra kısa sürede istenilen seri robotun ileri ve ters dönüşüm matrisleri elde edilecektir.

Anahtar Kelimeler: Dönüşüm matris modülü, Seri manipulatörlerin pozisyon analizi, Denavit-Hartenberg Metodu, ChatGPT.

Simple Ways for Obtaining Transformation Matrices of Serial Manipulators

Abstract

In this paper, a transformation matrices module was presented to obtain overall transformation matrices in position analysis of serial manipulators for Denavit-Hartenberg method with Mathematica software. In addition to this module an extra Mathematica code was given which is written by ChatGPT. At the end of the study, a comparison of the two methods was made. In both methods, it is seen that the transformation matrix is easily obtained after defining the D-H parameters in the proposed code. Here, the only difference between the methods is based on the way of defining the D-H parameters. In the first module presented in the study, D-H parameters must be entered separately for each joint. In the module obtained by ChatGPT, D-H parameters should be given in a table. When the two modules are compared, it is clear that the D-H parameters should be obtained first. After the D-H parameters are introduced to the modules, the forward and inverse transformation matrices of the desired serial robot will be obtained in a short time.

Keywords: Transformation matrices module, position analysis of serial manipulators, Denavit-Hartenberg Method, ChatGPT.

1. GİRİŞ

Robotların kinematik modelini türetmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, Denavit-Hartenberg gösterimini kullanan homojen dönüşüm yöntemidir [4]. Bu yaklaşımda robot kinematiği dört ana değişkene bağlıdır. Bu değişkenler, iki eksen arasındaki eklem uzunluğu, eklemler arasındaki açı, çakışan eklemler arasındaki yer değiştirme (eklem ötelenmesi) ve iki eklem arasında oluşan eklem açısından oluşur. Denavit-Hartenberg dönüşümünde, manipülörün taban ve son eklemi dışındaki her eklemine bir kartezyen koordinat sistemi eklenir [1]. Z ve x eksenleri boyunca öteleme ve z ve x eksenleri etrafında dönüş için dönüşüm matrisleri sırasıyla gösterilir. Burada i , eklemlerin koordinat sistemini göstermektedir (Şekil 1.1). Koordinat eksenleri belirlenirken döner eksenler için dönme yönü z, buna dik olan uzunlukları x eksenini kabul edilir [4]. Y eksenini sağ el kuralıyla tespit edilir.

$$T(z, d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(x, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

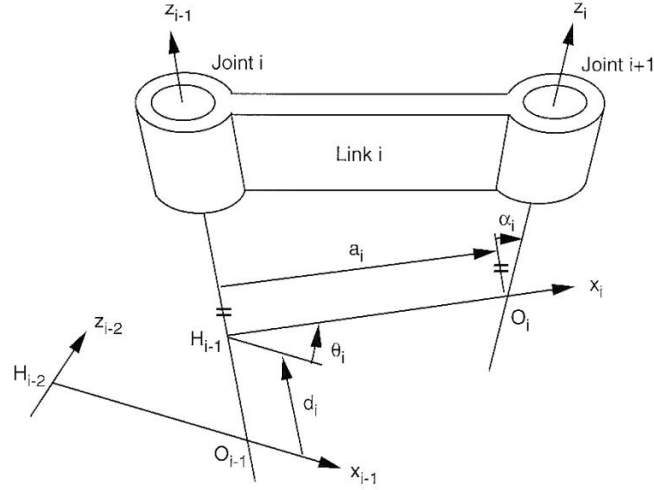
$$T(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Elde edilen son dönüşüm matrisi denklem 1.1’de verilmiştir.

$${}^{i-1}A_i = T(z, d)T(z, \theta)T(x, a)T(x, \alpha) \quad (1.1)$$

Denklem 1’i matris formunda yazdığımızda denklem 1.2’yi elde ederiz.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$



Şekil 1.1. Uzun parametrelerinin tanımlanması [1].

Literatüre bakıldığında, Faria ve ark. seri manipülatörlerin standart Denavit-Hartenberg parametrelerini belirlemek için otomatik bir algoritma önermişlerdir [5]. Yöntem, standart Denavit-Hartenberg (DH) parametrelerinin (a_i , α_i , d_i , θ_i) hesaplandığı görelî dönüşüm matrislerini işlemek ve belirlemek için geometrik işlemlere ve ikili vektör cebirine dayanmaktadır. Yazarlar algoritmayı çeşitli kinematik yapılarla ve eklem tiplerine sahip seri robotlarda denemişler ve önerilen algoritmanın bir dizi D-H parametresini doğru bir şekilde tanımladığını görmüşlerdir. Žlajpah ve Petrič ise [6] optik bir ölçüm sistemi kullanarak robot eklemlerinin dönme eksenlerini hesaplamışlardır. Sonrasında D-H parametreleri de işleme dahil ederek tam kinematik modelin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Senwal ve Gupta [7] derin öğrenme metodunu kullanarak tek adımda D-H parameter tablosu verilmiş robotların dönüşüm matrislerini elde etmeyi içeren bir yöntem önermişlerdir. Elde ettikleri sonuçların doğruya çok yakın olduğunu ifade eden yazarlar derin öğrenmenin bu tür farklı problemlerde de kullanılabileceğine dikkat çekmektedirler. GÎLCĂ ise [8] 6 serbestlik dereceli bir robot kolun ileri ve ters kinematik analizini MATLAB kullanarak gerçekleştirmiştir. Robot kolun D-H parametrelerini çıkartarak bu tarz manipülatörlerin otomatik kontrol problemlerinden kullanılan hareket denklemlerini türetecek bir yöntem önermiştir. Güncel literature bakıldığında Faria ve ark. [5] tarafından önerilen yöntem direct D-H parametrelerini elde etmeye yöneliktir. Elde edilen D-H parametrelerinden oluşturulacak bir tablo ile de bu çalışmada sunulan yöntem kullanıldığında kolaylıkla dönüşüm tablosu elde edilebilecektir. Diğer güncel çalışmalara [6,8] ve seri manipülatörlerin analizi konusunda yapılan eski çalışmalara [4] bakıldığında ise D-H parametrelerini kullanmanın çok yaygın bir yöntem olduğu görülebilmektedir.

Bu çalışma seri manipülatörlerin dönüşüm matrislerini elde etmenin basit yollarını göstermektedir. Aşağıdaki bölüm modülün elde edilmesini içermektedir. 3. bölümde modülün ChatGPT ile yazılan versiyonu verilmiştir. Bir sonraki bölümde verilen modülün çalıştığını ve zaman maliyetinin kısa olduğunu gösteren bir örnek çözülmüştür.

2. MODÜLÜN KURULMASI

Dönüşüm matrisleri modülünü oluşturmak için Mathematica yazılımının modül aracı kullanılmıştır. Modül aracı, kullanıcıların modül için yerel adlarla yerel değişkenler ayarlamasına olanak tanır ve her çağrıldığında yerel değişkenlerin her birini temsil edecek yeni semboller oluşturur [2]. Oluşturulan modüller aşağıdaki bloklarda gösterilmiştir.

- Dönüşüm matrisi modülü

```
(*TM burada D-H dönüşüm matrisini temsil etmektedir.*)
(*Denklem (1.2)'den,*)
TM[θ_, d_, α_, a_] := Module[{t},
  (Cos[θ] -Cos[α]Sin[θ] Sin[α]Sin[θ] aCos[θ]
  Sin[θ] Cos[α]Cos[θ] -Cos[θ]Sin[α] aSin[θ]
  0 Sin[α] Cos[α] d
  0 0 0 1)];
```

- Ters dönüşüm matrisi modülü

```
(*ITM burada ters D-H dönüşüm matrisini temsil etmektedir.*)
(*ITM denklem (1.2)'nin tersine eşittir.*)
ITM[θ_, d_, α_, a_] := Module[{t},
  (Cos[θ] Sin[θ] 0 -a
  -Cos[α]Sin[θ] Cos[α]Cos[θ] Sin[α] -dSin[α]
  Sin[α]Sin[θ] -Cos[θ]Sin[α] Cos[α] -dCos[α]
  0 0 0 1)];
```

3. CHATGPT TARAFINDAN YAZILAN DÖNÜŞÜM MODÜLÜ

ChatGPT açık kaynaklı bir yapay zeka modelidir ve GPT-3.5 mimarisi kullanılarak eğitilmiştir [3]. Doğal dil işleme tekniklerini kullanan bu model, insanlara benzer şekilde dil üretip ona yanıt verebilmektedir. Dil modeli çeviri, metin üretme, soru-cevap sistemleri, kod derleme ve chatbotlar gibi birçok alanda kullanılabilir. Bu araştırmada seri manipülatörlerin Denavit-Hartenberg parametrelerinin kolaylıkla elde edilebilmesi için Mathematica kodunun elde edilmesi amacıyla ChatGPT kullanılmıştır. Aşağıdaki satırlar ChatGPT tarafından yazılmıştır.

```
(*Öncelikle seri manipülatörün Denavit-Hartenberg parametrelerini veren bir tablonun oluşturulmuş olması gerekmektedir.*)
dhTable = {
  {θ1, 0, d1, a1},
  {θ2, π/2, d2, a2},
  {θ3, 0, d3, a3},
  {θ4, π/2, d4, a4},
  {θ5, -π/2, d5, a5},
  {θ6, π/2, d6, a6} };
(*Denavit-Hartenberg matrisini hesaplamak için kullanılan fonksiyonun tanımı.*)
dhMatrix[θ_, α_, d_, a_] := {
  {Cos[θ], -Sin[θ]*Cos[α], Sin[θ]*Sin[α], a*Cos[θ]},
  {Sin[θ], Cos[θ]*Cos[α], -Cos[θ]*Sin[α], a*Sin[θ]},
  {0, Sin[α], Cos[α], d},
  {0, 0, 0, 1} };
(*Her bir eklemin Denavit-Hartenberg Matrisi hesaplanarak seri manipülatörün kinematik matrisinin elde edilmesi.*)
T = Simplify[dhMatrix[dhTable[[1, 1]], dhTable[[1, 2]], dhTable[[1, 3]], dhTable[[1, 4]]];
For[i = 2, i <= Length[dhTable], i++,
  T = Simplify[T . dhMatrix[dhTable[[i, 1]], dhTable[[i, 2]], dhTable[[i, 3]], dhTable[[i, 4]]];
(* Matris forma dönüştürülmesi *) T // MatrixForm
```

4. BİR ÖRNEK: STRANFORD KOLUNUN MATHEMATICA MODÜLÜYLE DÖNÜŞÜM MATRİSLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Stanford Kolu, Victor Scheinman tarafından 1969 yılında tasarlanan 6 serbestlik derecesine sahip bir seri manipülatördür. Stanford Kolunun üçüncü eklemi hariç tüm eklemleri döner eklemdir ve üçüncü eklemi ise prizmatik eklemdir (Şekil 4.2). Şekil 4.1'de her bağlantının D-H eksenleri görülebilir. Şekil 4.1'den Stanford Kolunun D-H parametreleri aşağıdaki gibi yazılabilir (Tablo 4.1.).

Tablo 4.1. Stanford kolunun D-H parametreleri

	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$-\pi/2$	0	d_1	θ_1
2	$-\pi/2$	0	d_2	θ_2
3	0	0	d_3	0
4	$-\pi/2$	0	0	θ_4
5	$\pi/2$	0	0	θ_5
6	0	0	d_6	θ_6

Tablo 4.1'deki parametreler kullanılarak aşağıdaki kodu elde edebiliriz.

(*Bu eylem manipülatörün son uzvu için dönüşüm matrisini verecektir.*) (*A06= 0A_6 *)

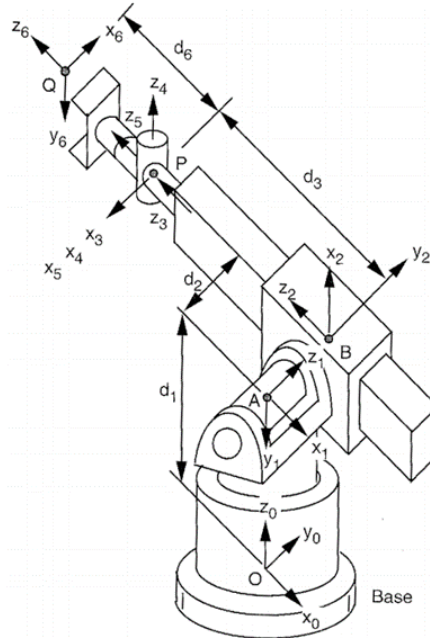
A06=TM[$\theta_1, d_1, -\pi/2, 0$].TM[$\theta_2, d_2, \pi/2, 0$].

TM[0, $d_3, 0, 0$].TM[$\theta_4, 0, -\pi/2, 0$].

TM[$\theta_5, d_5, \pi/2, 0$].TM[$\theta_6, d_6, 0, 0$]

(*Diğer uzuvlar için, örneğin 3. uzvun dönüşüm matrisini elde ederken sadece ilk 3 terimi çarpmak yeterli olacaktır.*)

(*//MatrixForm operatörünü eklemek sonuçların matris formunda verilmesini sağlar.*)



Şekil 4.1. Her bir linkin D-H parametreleri [1].

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dönüşüm matrislerinin Mathematica yazılımı aracılığıyla kolayca elde edilebilmesi için dönüşüm matrisleri modülü önerilmiş ve bir örnek çözülmüştür. Ayrıca ChatGPT'den aynı amaç için bir Mathematica kodu elde edilmiş ve bu iki kodun etkinliği karşılaştırılmıştır. Her kodu kullanırken de öncelikle D-H parametrelerinin tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada verilen kod ile kullanıcının her eklem için modüle D-H parametrelerini girmesi ve ChatGPT'den elde edilen kodu kullanırken de D-H parametreleri için bir tablo tanımlaması gerekmektedir. Bu açıdan bakıldığında, iki yol neredeyse aynı zaman maliyetine sahiptir. Seri manipülatörlerin konum-hız-ivme analizlerinin yapılmasında ve kontrollerinin sağlanmasında en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi D-H parametreleridir [6, 8]. Literatürde direkt bu parametrelerin elde edilmesine yönelik [5] çalışmalarla birlikte dönüşüm matrislerinin elde edilmesine [7] yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Özellikle Faria ve ark. [5] tarafından önerilen yöntemle birlikte bu çalışmada önerilen yöntemler kullanıldığında seri manipülatörlerin analizinin yapılması oldukça kolaylaşacaktır. Literatür incelendiğinde [7] seri robotların ileri ve ters dönüşüm matrislerinin elde edilmesine yönelik fazla çalışmaya rastlanmamaktadır. Elde yapılan çözümlerde dönüşüm matrisleri elde edilirken hata yapmak oldukça olasıdır. Yine elde yapılan çözümlerde işlemler uzun sürmektedir. Fazla ekleme sahip olan seri manipülatörlerde en uç eklem dönüşüm matrisini elde ederken eklem sayısı kadar matrisi birbiriyle çarpmak gerekmektedir. Bu işlemler de dikkat ve zaman gerektiren işlemlerdir. Özellikle D-H parametrelerinin elde edilmesinden sonraki aşamada dönüşüm matrislerini kolay elde edebilmek için bu çalışmada önerilen yöntemler bu alanda çalışan öğrenci ve araştırmacılar için zaman kazandırıcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Tsai L. W. Robot analysis: The mechanics of serial and parallel manipulators. John Wiley & Sons, Inc: New York; 1999.
- [2] Wolfram S. The mathematica. Cambridge university press: Cambridge; 1999.
- [3] ChatGPT [Internet]. OpenAI;2021[cited 2023 Sep 26]. Available from: <https://openai.com/chat-gpt/>
- [4] Küçük S, Bingül Z. Robot sistemlerinde kinematik yöntemlerin karşılaştırılması. Politeknik Dergisi. 2004;7(2):107-17.
- [5] Faria C, Vilaça J. L, Monteiro S, Erlhagen W, Bicho E. Automatic denavit-hartenberg parameter identification for serial manipulators. 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2019. Lisbon, Portugal; 2019. p. 610-17.
- [6] Žlajpah L, Petrič T. Geometric identification of denavit-hartenberg parameters with optical measuring system. International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region. Cham: Springer International Publishing; 2022. p. 3-10.
- [7] Semwal V. B, Gupta Y. Determining homogenous transformation matrix from DH parameter table using deep learning techniques. Research Reports on Computer Science. 2023;2(3):23–34.

- [8] G Gilca. Kinematic modeling of 6 dof robotic arm with matlab. *Fiability & Durability/Fiabilitate si Durabilitate* 1. 2023:137-43.