



## AÇIK KAYNAK MEDİKAL YARDIMCI ROBOT KOLUN PYTHON İLE İLERİ KİNEMATİK ANALİZİ

Mehmet GÜL

*Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Şırnak, TÜRKİYE*  
[mgul@sirnak.edu.tr](mailto:mgul@sirnak.edu.tr)

(Geliş/Received: 01.10.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.02.2021)

**ÖZ:** Günümüzde Covid-19 gibi pandemik hastalıkların tüm dünyayı hızla etkilemesi ve buna bağlı tüm dünyada yüzbinlerce kişinin hayatına mal olmuşken sağlık çalışanlarının dünya genelindeki özverili çalışmalarının önemi ortaya çıkmıştır. Çalışmada, sağlık çalışanlarının iş yükünün paylaşılması için süreç içerisinde destek elemanları olarak medikal yardımcı makineler üzerine inceleme yapılmıştır. Geliştirilen medikal yardımcı robotik kol, sağlık çalışanlarının iş yükünün paylaşılması açısından özellikle pandemi sürecinde son derece önem arz etmektedir. Geliştirilen robot kol açık kaynak ve de eklemelerinin model baz alınarak uyarlanabilir olması son derece önemli bir özelliktir. Robot kolun açık kaynak olması oluşabilecek telif haklarından kaynaklı sorunlarında giderilmesi açısından son derece önemlidir. Robot kol profesyonel özellikte endüstriyel boyutlarda kullanıma uygun özelliklere sahiptir. Çalışmada kullanılan robot kol 3D yazıcıdan basılmış ve robot kol 5 serbestlik derecesine (5 DoF) sahip mafsalı robot koldur. 3D yazıcıdan basılabilir olması bu tür profesyonel robot kollar açısından maliyet olarak ciddi tasarruf sağlamaktadır. Robot kolun çalışma uzayının belirlenmesi ve ayrıca kontrolü açısından kinematik analiz önemlidir. Bu makalede, çalışma uzayının belirlenmesi, erişebilir noktalarının tespiti için ileri kinematik analizi derin öğrenme ile yapıldı.

**Anahtar Kelimeler:** Açık Kaynak Robot Kol, Python, İleri Kinematik Analiz

### Forward Kinematic Analysis of Open Source Medical Assistant Robot Arm with Python

**ABSTRACT:** Today, pandemic diseases like Covid-19 affect the entire world rapidly, and due to this, the significance of the devoted work of healthcare professionals worldwide has emerged while it has cost the lives of a huge number of individuals around the world. In the study, so as to share workload of healthcare professionals, in the process, medical assistant machines were analyzed as support staff. The developed medical assistant robotic arm is extremely important especially within the pandemic process in terms of sharing burden of healthcare professionals. It is an extremely important feature that the developed robot arm is open source and its joints can be adjusted based on the model. The fact that the robot arm is open source is extremely important in terms of the issues that may emerge from copyrights. The robot arm has features appropriate for use in industrial dimensions with professional features. The robot arm utilized in the study is printed with a 3D printer and also the robot arm is articulated with 5 degrees of freedom (5 DoF). The fact that it can be printed from a 3D printer provides significant cost savings for such professional robot arms. Kinematic analysis is significant regarding determining and controlling the working space of the robot arm. In this study, forward kinematic analysis was done with deep learning for determination of working space and accessible points.

**Key Words:** Open-Source Robot Arm, Python, Forward Kinematic Analysis

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde insan sağlığının korunması ayrıca insan sağlığını tehdit eden pandemiler ile etkili mücadelelerin gerçekleştirilmesinde sağlık çalışanlarının önemli rolü bulunmaktadır. Bu sebeple sağlık çalışanlarının pandemi gibi durumlar için süreç içerisinde iş yüklerinin mümkün olduğunca azaltılması önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında, endüstriyel boyutlarda ve profesyonel kullanıma uygun açık kaynak robot kollar üzerine inceleme yapıldı. Çalışma kapsamında açık kaynak robot kolun seçilmesinin bazı kazanımları mevcuttur. Kazanımlar arasında robot kolun telif hakkının olmaması ve buna bağlı oluşabilecek zorlukların giderilmesidir. Bir diğeri, robot kolun eklemelerinin 3D yazıcı ile basılabilir olması maliyet açısından ciddi tasarruf sağlamaktadır. Özellikle öne çıkan kazanım, referans alınan açık kaynak robot kolun eklemelerinin istenildiği oranda revize edilebilir olması ve bunun sonucunda çalışma uzayının genişletilebilir olmasıdır. Çalışma kapsamında 3D yazıcıdan elde edilen robotik kolun kinematik analizi incelendi. Robotik sistemlerin kinematik modelinin analizi amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir, Cayley-Klein parametreleri, Gibbs vektörü, Euler açıları ve ortonormal matrisler gibi.

Robotik sistemlerin kinematik problemlerin çözümü için üç boyutlu Kartezyen uzayı ve dört boyutlu Kauterniyon uzayı olmak üzere iki farklı uzayda gerçekleştirilir. Matris veya vektörler gibi dönüşüm operatörleri Kartezyen uzayda tanımlanır ise nokta dönüşüm metodu olarak tanımlanır iken, Kauterniyon uzayında tanımlandığında ise doğrusal dönüşüm metodu olarak tanımlanır (Aspragathos 1988). Funda ve Paul doğrusal dönüşümü, doğrusal vektörler ve dönüşüm operatörleri (quaternion) kullanacak şekilde ifade ederken (Funda, 1988), Kim ve Kumar ise doğrusal vektörleri ve dönüşüm operatörleri robot kinematiğine uygulamayı başardı (Kim, 1990). Maxwell (Maxwell, 1900) Kartezyen uzayında nokta vektörlerinin dönüşümlerini kullanarak 4x4 homojen dönüşüm matrisini tanımlar iken, Denavit-Hartenberg homojen dönüşüm matrisini kullanarak bir koordinat sistemi oryantasyonunun başka bir koordinat sistemine göre tanımladı (Denavit, 1955). Koordinat sistemleri arasında dönüşüm matrisleri vida değiştirmesiyle (screw displacement) ya da doğrusal dönüşüm ile ifade edilir. Doğrusal dönüşüm metodu ile hem öteleme hem de dönme gerçekleştirilmektedir (Ball, 1900).

## LİTERATÜR ÖZETİ (LITERATURE SUMMARY)

Robotik sistemlerde kinematik iki bölüme ayrılır, ileri ve ters kinematik. İleri kinematik analiz, ters kinematik analizinin aksine denklemlerin karışıklığı zor değildir. Ters kinematik problemlerinin karmaşıklığının bir nedeni özellikle doğrusal olmayan denklemlerden kaynaklanmaktadır. Doğrusal olmayan denklemler ayrıca birleştirilemez ve benzersiz çözümleri de yoktur. Diğeri bir değişle fiziksel olarak çözümlenemeyen matematiksel denklemler ortaya çıkabilir. Liu ve diğ. 2015 6 serbestlik dereceli robot kolun ters kinematik analizi için geometrik yaklaşımı benimsemiştir (Nubiola, 2014). Qiao ve diğ., 2010 ters kinematik problemine çözüm bulmak için çift quaternion kullandı (Nubiola, 2014). Nubiola ve Boney, ise robotik sistemler için daha basit ve etkili bir çözüm yolu kullandılar (Almusawi, 2016). Özellikle yakın zamanda yapılan çalışmalarda yapay zekâ (AI) yöntemleri robotik sistemlerin ters kinematik çözümlerinde kullanıldığı görülmektedir (Köker, 2013; Duka, 2014; Uchiyama, 1987).

Öte yandan, Uchiyama ve ark. konum / kuvvet kontrol politikasını (policy) ikili robot sisteminin kontrolü dahil ettiler (introduce). Yaptıkları analiz sonucunda iki 4-DOF B-Hand robotlarının eş güdüm halinde çalışabilmesi açısından ihtiyaç duydukları konum/kuvvet değerlerini hesapladılar. Kopf ve Yabuta yaptıkları çalışmada yukarıda belirtilen master / slave pozisyon prensibine dayalı sistem ile konum / kuvvet eşgüdüm politikasını karşılaştırdılar. Tarn ve ark. ise yaptıkları çalışma kapsamında çift kollu robot sistemlerinde iş birliği için gerekli olan dinamik kontrol yöntemlerini önerdi. Yaptıkları çalışmada Tarn ayrıca bir nesnenin çalıştırılırken çift kollu robotun dinamik denklemi de inceledi.

Çalışma alanı, insansı robot kolun hareket esneklik derecesi sonucu oluşacak uç efektrörünün uzayda oluşturacağı nokta koordinatını ifade eder. Robotik kolun çalışma uzayındaki konumunun belirlenmesi için geliştirilen çözüm yöntemleri temel olarak grafik yöntem, analitik ve sayısal olarak sıralanır. Grafik yöntem ve analitik yöntem, eklem sayısı ile sınırlı olmak ile beraber robotik kollar için doğru bir tanımlanmamak ile beraber bazı sınır yüzeyleri için güvenilirliği garanti edilemez (Corke, 1996 ve Kelmar,

1990). Çalışma kapsamında 5 serbestlik derecesine sahip robotik kolun ileri kinematik modeli D-H yöntemi ile analizi yapıldı. Çalışma alanı analizinde Python programlama dili kullanıldı.

### İLERİ KİNEMATİK ANALİZİ VE HOMOJEN TRANSFORM (FORWARD KINEMATIC ANALYSIS AND THE HOMOGEN TRANSFORM)

Robot manipülatörünün her bir eklemine alacağı pozisyon ve yön, uç efektörünün çalışma uzayındaki konumunu doğrudan etkiler. Revolut veya prizmatik eklemler arasındaki bağlantılar ile prizmatik veya kayan eklemler arasındaki bağlantılarına eklem değişkenleri denir. Revolut linkler ya da prizmatik linkler arasındaki açı değerleri eklem değişkenleridir (Wu ve diğ., 2014).

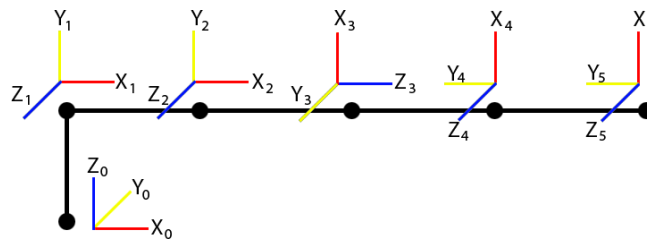


**Şekil 1.** 5 serbestlik dereceli (DoF) robot kol

*Figure 1. Robot arm with 5 degree of freedom (DoF)*

Robotik sistemin belirli durumlarda nasıl hareket ettiğinin analizi için o sistemin kuvvet, atalet ve enerji gibi dinamik büyüklüklerinin bilinmesi gerekmektedir. Robotik sistemlerde ileri kinematik robot bağlarının konumları, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkiyle tanımlanır. Robotik sistemler birbirine bağımlı dönel ve prizmatik eklemler ile tutturulmuştur. Her eklem koordinat sistemi üzerinde bir sonraki eklem ile olan ilişkisi dönüşüm matrisleri olarak tanımlanır. İleri kinematik belirlenen eklem değişkenlerine göre uç efektörünün Kartezyen uzaydaki konumunun belirlenmesi işlemine denir.

Hazırlanan mafsallı robot kol BCN3D Moveo referans alınarak geliştirildi. Adı geçen robot kol açık kaynaklı olması ve de 3D yazıcıdan basılabilir olması robot kolun avantajları arasındadır. Öte yandan robot kolun eklemleri referans robot kolun eklemlerine bağlı kalarak tekrar SolidWorks yazılımı üzerinden tasarlandı. Bu işlemin yapılmasının amacı, var olan geliştirilmiş, alanında profesyonel amaçlara uygun tasarlanmış robot kolun tasarım deneyimlerinden faydalanmaktır. Referans alınan eklemlerin tekrar tasarlanmasının amacı ise robot kolun çalışma uzayının istenildiği ölçülerde genişletilip daraltılabilmesine imkân tanınmasıdır. Robot kolun çalışma uzayı, robot kolun uç efektörünün erişebildiği çalışma uzayındaki noktaları ifade etmektedir. Robot kol sabit bir tabana yerleştirilmiş (Şekil 1) ve robot kolun kinematik analizinin yapılabilmesi için gerekli olan koordinat çerçevesi ataması Şekil 2'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Robot kol koordinat çerçevesi

*Figure 2. Robot arm in coordinate frame*

Şekil 2’de gösterildiği gibi mafsallı açık kaynak robot kolun 3 ve 4 eklemleri birbirine twisting joint ile bağlıdır. Uç efektörün konumunun robotik sistemlerde serbestlik derecesine bağlıdır. Uç efektörün konumunun bulunması analizine ileri kinematik analizi denir. Uç efektörünün koordinat eksenindeki konumunun belirlenmesi, robot kolun çalışma uzayının ortaya çıkartılması açısından önemlidir. Analitik yöntem ya da Denavit-Hartenberg yöntemi ileri kinematik analizi için uygulanan en sık yöntemdir (Denavit ve Hartenberg, 1955). 5 DoF serbestlik derecesine sahip robotik kolun her ekseninin dönel eklemleri Şekil 1’de gösterilmektedir ve devamında her bir eklemin koordinat sistemi üzerindeki komşu eklemleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan dönüşüm matrisi verilmiştir. Birbirine bağlı iki eklemler arasındaki ilişkinin dönüşüm matrisi  ${}^{i-1}_i T$  olarak gösterilir. “i” uzuv numarasını simgeler iken birbirine bağlı eklemlerin oluşturduğu homojen dönüşüm matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} {}^{i-1}_i R & D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ardından, elde edilen tüm matris çarpımları

$${}^0_5 T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_e T \quad (2)$$

“e” karakteri koordinat ekseninde uç efektörünü simgeler,  ${}^{i-1}_i T$  i’den i-1 arasındaki koordinatlar arasındaki dönüşüm ilişkisini ifade ederken,  ${}^{i-1}_i R$  i’den i-1 arasındaki koordinatlar arasındaki devinim ilişkisini ifade eder. Homojen dönüşüm matrisi içerisindeki diğer matrisler hesaplanır iken uç efektörü koordinatından taban koordinatı elde edilir (Wu ve diğ., 2014). Hesaplama işlemi gerçekleştirilir iken taban koordinatından transformasyon matrisi uç efektörünün koordinatı elde edilir.

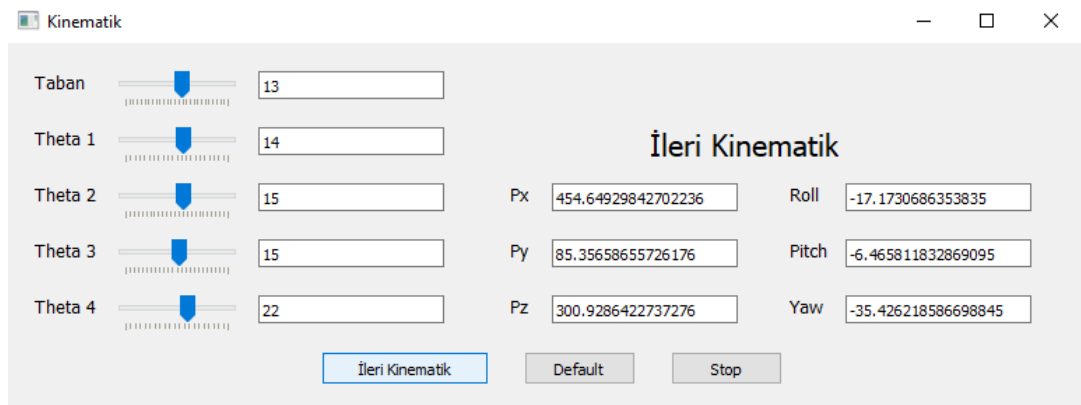
Birbirine bağlı eklemlerin konumu ve rijit eklemlerin yönelimleri birleşim yerlerine göre sabitlenmiş koordinat sistemleri ile tanımlanabilir (Wu ve diğ., 2014). Bu nedenle her aktif eklemler koordinat sistemi üzerinde yerleştirilmesi gerekmektedir (Denavit ve Hartenberg, 1955) ve koordinat sistemi üzerine yerleştirilen rijit eklemler Şekil 2’de resmedilmiştir. Şekil 2’de gösterilen robot kol 3D yazıcılar üzerinden basılabilen profesyonel BCN3D Moveo açık kaynak robot koludur (Github). Koordinat sistemi 1 ile oluşturulur ve temel koordinat sistemi 0 ile çakışır. Z eksenini her dönel eklemin eksenine paralel olmak ile beraber Z ekseninin yönü dönme yönü ile belirlenir ve geleneksel olarak sağ el kuralı ile sabitlenir. İlk eksenin devamındaki her eksen bir önceki eksen ile birebir tutarlı olmak zorundadır. Sistemin son eksenini sağ el kuralı ile belirlenir iken ayrıca koordinat sistemindeki boyut parametrelerinin de belirtilmesi gerekmektedir.

Aşağıda homojen dönüşüm matrisinin tüm bileşenleri gösterilmektedir.

$${}^0_e T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_e T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

## BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Çalışma kapsamında açık kaynak medikal yardımcı robot kolun kinematik analizi python yazılım dilinde hazırlandı. İleri ve geri kinematik analiz, python yazılımı üzerinde grafik ara yüzü geliştirilerek test edildi.



Şekil 3. Python ile hazırlanan ileri kinematik analiz kullanıcı modülü

Figure 1. Forward kinematic analysis user module prepared in Python

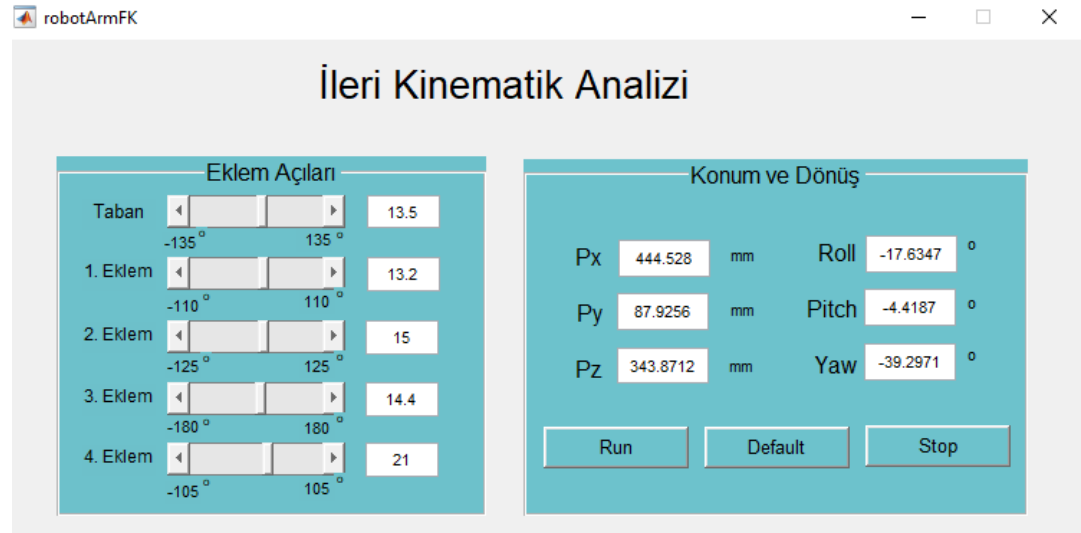
Şekilde gösterildiği gibi model sistem tasarlanmış GUI tarafından kontrol edilen sistem simüle edildi. Şekilde 5 aktif eklem bulunmaktadır. 3 ve 4 eklemler twisting joint şekli ile birbirine bağlı.

Aşağıda tasarlanan fonksiyonlar GUI'ye dahil edildi (Şekil 3)

- simülasyon sürecini kontrol etmek
- eklem açısı bilgilerinin iletilmesi ve gözden geçirilmesi
- manipülatörün poz bilgilerinin elde edilmesi

şekilde açık kaynak medikal robotun resmi gösterilmektedir.

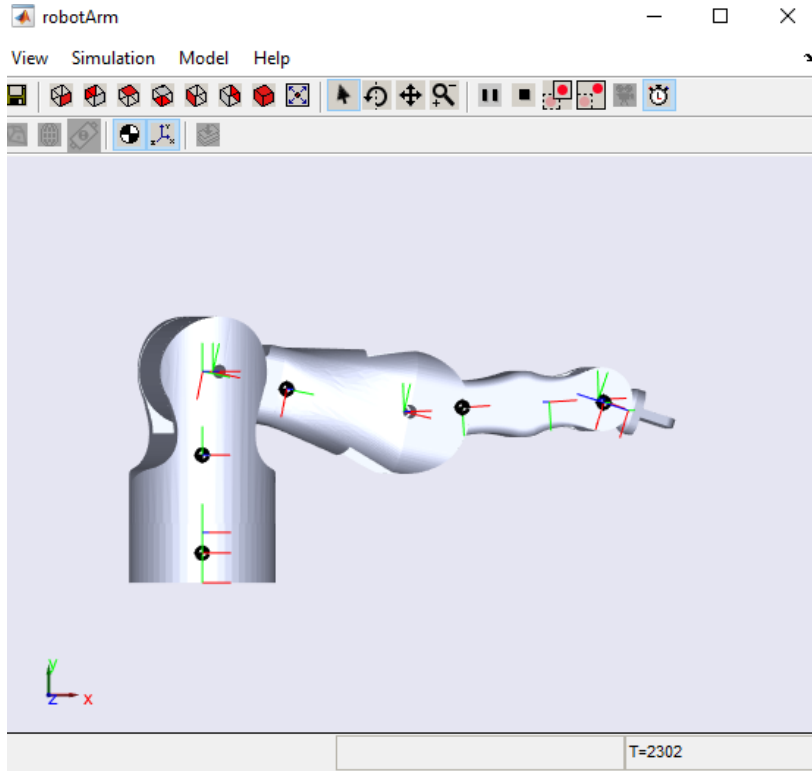
Python yazılım dili ile hazırlanan modülün avantajları arasında yazılım dilinin açık kaynaklı olmasıdır. Açık kaynaklı mafsallı robot kol için Matlab yazılım dili ile hazırlanmış modülü ise Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Matlab ile hazırlanan ileri kinematik analiz kullanıcı modülü

Figure 2. Forward kinematic analysis user module prepared in Matlab

Her iki modülde elde edilen değerler scrollbardan kaynaklı olabildiğince yakın belirlenmeye çalışıldı ve Px, Py ve Pz sonuçlarının da birbirlerine yakın elde edildiği görülmektedir. Python yazılım dilinde hazırlanan modül açık kaynaklı ve yazılımdan kaynaklı telif hakkının istenmemesinden kaynaklı Matlab yazılım dilinde hazırlanan modüle kıyasla öne çıkan avantajları bulunmaktadır. Python ile hazırlanan ileri kinematik analizi modülünde elde edilen robotun muhtemel şekli aşağıdaki Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5'te elde edilen simülasyon Matlab üzerinde çalışan Simülink yazılımı sayesinde elde edilmektedir.



Şekil 5. Matlab ile elde edilen robot kol simülasyonu

Figure 2. Simulation of robot arm obtained by Matlab

Öte yandan Python yazılımı üzerinden hazırlanan modülde sonuçlar harici bir yazılımın çalıştırılmasına gerek duyulmadığı için hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Sonuçların doğruluğu Matlab yazılımı ile karşılaştırıldığında örtüştüğü görülmektedir. Matlab yazılımında sonuçlar Matlab yazılımı üzerinde çalışan Simülink yazılımı ile robot kolun çalışma uzayında alması muhtemel şeklin elde edilmesine imkân verdiği için referans kabul edilirse, Python yazılımı ile hazırlanan modüldeki sonuçların örtüşmesi sonuçların doğruluğunu göstermektedir. Homojen matrix hesaplaması sonucunda elde edilen sonuçlar Matlab yazılımında çalıştırılması için Simülink yazılımının aktive edilmesi simülasyonun çalıştırılması gerekmektedir. Bu durumda Matlab yazılımında hazırlanan modülden sonuçların elde edilmesi, kullanılan bilgisayarın hızına bağlı olarak belirli bir zaman almaktadır. Öte yandan Python yazılımı üzerinden hazırlanan modül ise yukarı da değinildiği üzere harici bir yazılımın çalıştırılmasına ihtiyaç duymadığı için daha hızlı hesaplama sonuçlarını vermektedir.

Bu makalede medikal yardımcı 5 DoF serbestlik derecesine sahip, açık kaynak robot kol örneği 3D yazıcıdan basıldı ve kinematik analizi yapıldı. Robot kolun ileri ve ters kinematik analizi simülasyon modülü üzerinden test edildi. Kinematik denklemi homojen dönüşüm teorisi ile çözüldü. Python yazılımı ile çalışmanın GUI ara yüzü hazırlandı. Çalışma kapsamında hazırlanan robot kolun profesyonel düzeyde 5 DoF serbestlik derecesine sahip ve de açık kaynak olmasının en büyük ayrıcalığı üretim maliyetinin düşük olmasıdır. Sağlık çalışanlarının iş yükünün az da olsa giderilmesi hedeflenmektedir. Örneğin ilaç hazırlama ünitesinde sesli mesajlara göre üzerinde bulunan barkodların görüntü işleme ile tanınması ilgili ilacın sağlık çalışanına robot kol ile verilmesi. Laboratuvar ortamında ilgili materyallerin robot kol ile belirlenen ortama yerleştirilmesi vb. gibi çalışmalarda kullanılabilir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında birden fazla robotun kolun paralel çalışması ile oluşturulacak robotik sistemler ve yapay zekâ tabanlı uygulamalar akıllı robotik sistemler tasarlanacaktır.

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (CONCLUSION AND DISCUSSIONS)

Açık kaynak 5 DoF serbestlik derecesine sahip robot kolun kinematik analizi yapıldı. Yapılan kinematik analiz işlemi ile robot kolun çalışma uzayı belirlendi. Buna dayanarak D-H parametre tablosu oluşturuldu ve buna bağlı homojen dönüşüm teorisine bağlı analiz yapıldı. Açık kaynak robot kolun ileri ve geri kinematik analizi Python yazılımı üzerinden yapıldı. Analiz işlemi için Python üzerinden GUI arayüz oluşturuldu. Çalışmanın ilerleyen safhalarında ileri kinematik analizin yanı sıra ters kinematik analizinde yapılması ve Python yazılım dili robot kolun simülasyonunun elde edilmesi olacaktır. Python yazılım dilinin Matlab gibi kendi açısından profesyonel çalışmaların yapıldığı yazılım diline kıyasla en büyük avantajı açık kaynak olmasıdır. Ayrıca Python yazılım dili hazırlanan kinematik analizleri ile çalışma uzayının belirlenmesi ve olası çarpma risklerinin görülmesi açısından train-test edilebilme imkânı taşımaktadır. Python yazılımının bu özelliği sayesinde kinematik analizi makine öğrenmesi metotları ile iyileştirilebilir. Bu makalenin özellikle açık kaynak profesyonel ölçeklerde çalışabilen robot kolların kinematik analizi işleminin yapılması ve kullanılması açısından ilham vermesini umuyorum.

Gelişen teknoloji imkanları kullanılarak hazırlanabilecek ve geliştirilmesi muhtemel profesyonel ölçekteki robotik sistemler yine ileri teknoloji ürünü olan 3D yazıcılar üzerinden basılabilir ve kullanılabilir. Thingiverse web sayfasından paylaşımı yapılan açık kaynaklı profesyonel robotik sistemin kaynak eklemeleri referans alınarak tekrar geliştirilip 3D yazıcı üzerinden basıldı (Thingiverse). Geliştirilen ve 3D yazıcı üzerinden basımı gerçekleştirilen robot kolun özellikle pandemi sürecinde sağlık çalışanları için iş yükü azaltıcı bir etki oluşturması umulmaktadır. Örneğin hastane ortamında materyal kabul bölümünde çalışan sağlık çalışanları, ilaç hazırlama ünitesinde çalışan hemşire ya da hemşireler ya da sağlık çalışanlarına ve dahi sağlık birimlerinde bulunan diğer ünitelerde kullanılması mümkündür. Kinematik analizi için hazırlanan Python dilindeki açık kaynaklı yazılım istenildiğinde paylaşımı gerçekleştirilecektir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aspragathos NA, Dimitros JK, 1988. A comparative study of three methods for robot kinematics. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part B: Cybernetics, vol. 28, no. 2.
- Funda J, Paul RP, 1988. Manipulator kinematics and epsilon algebra, IEEE J. Robot. Automat., vol. 4.
- Kim JH, Kumar VR, 1990. Kinematics of robot manipulator via line transformations, J. Robot. Syst., vol. 7. no. 4, pp. 649-674.
- Maxwell EA, 1900. General homogeneous coordinates in space of three dimensions, Cambridge. U. K.: Cambridge Univ. Press.
- Denavit J, Hartenberg RS, 1955. A kinematic notation for Lower-pair mechanisms based on matrices, ASME Jappl. Mechan. pp. 215-221.
- Ball RS, 1900. The theory of screws, Cambridge. U. K.: Cambridge Univ. Press.
- Liu Y, Wang D, Sun J, Chang L, Ma CX, Ge Y, Gao L. 2015. Geometric approach for inverse kinematics analysis of 6-dof serial robot, IEEE International Conference on Information and Automation, pages 852-855.
- Qiao S, Liao Q, Wei S, Su H, 2010. Inverse kinematic analysis of the general 6R serial manipulators based on double quaternions, Mechanism and Machine Theory 45, 193-199.
- Nubiola A, Bonev IA, 2014. Geometric approach to solving the inverse displacement problem of Calibrated decoupled 6R serial robots, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering 38, 31-44.
- Almusawi ARJ, Dülger LC, Kapucu S, 2016. A new artificial neural network approach in solving inverse kinematics of robotic arm (denso vp6242), Computational Intelligence and Neuroscience.
- Köker R, 2013. A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization, Information Sciences 222, 528-543.
- Duka AV, 2014. Neural network based inverse kinematics solution for trajectory tracking of a robotic arm, Procedia Technology 12, 20-27.

- Uchiyama M, Iwasawa N, Hakomori K, 1987. Hybrid position/force control for coordination of two-arm robot. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1242–1247.
- Kopf CD, Yabuta T, 1988. Experimental comparison of master/slave and hybrid two arm position/force control, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 1633–1637.
- Corke PI. 1996. “A robotics toolbox for matlab,” IEEE Robotics Automation Magazine, vol. 3, no. 1, pp. 24–32.
- Kelmar L, Khosla PK. 1990. Automatic generation of forward and inverse kinematics for a reconfigurable modular manipulator system. Journal of Robotic Systems, vol. 7, no. 4, pp. 599–619, 1990. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/rob.4620070406>.
- Wu Y, Cheng LH, Fan GF, Wang CD, 2014. Inverse kinematics solution and optimization of 6-DOF handling robot. Appl Mech Mater 635–637:1355–1359.
- Github: <https://github.com/BCN3D/BCN3D-Moveo> (10/06/2020).
- Thingiverse: <https://www.thingiverse.com/thing:1693444> (10/06/2020).