

## Simulink Üzerinden Medikal Yardımcı Açık Kaynak Robot Kolun İleri ve Ters Kinematik Analizinin Simülasyonu

### Simulation of the Forward and Inverse Kinematic Analysis of Medical Assistant Open-Source Robot Arm via Simulink

Mehmet Gül



Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Şırnak Üniversitesi, Şırnak, Türkiye

[mgul@sirnak.edu.tr](mailto:mgul@sirnak.edu.tr); [mehmetgul@ymail.com](mailto:mehmetgul@ymail.com)

#### Özet

Teknolojinin her geçen gün baş döndüren bir hızla insan hayatına etki etmesi, özellikle teknoloji çıktılarının günlük hayatta kullanımlarının artması kaçınılmaz bir gelişmedir. Robotik sistemlerin yaygınlaşması buna örnek olarak gösterilebilir. Gelişen teknoloji ürünlerinden 3D yazıcılar ile basılan model çalışmalar ve dahi basılabilir robotik sistemler önemli derecede bütçe tasarrufu sağlamaktadır. Bu kapsamda çalışmada 3D yazıcılar ile basılan açık kaynak robot kol ile telif hakkı sorununun üstesinden gelinmesi amaçlandı. Bu sayede telif hakkından kaynaklı yaptırımlardan da kaçınılmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen 5 serbestlik derecesine (DoF) sahip olan robot kol özellikle COVID-19 gibi pandemi hastalıklarında hastane çalışanlarının kullanımı için önerilmektedir. Kullanıcı arayüzü ile simülasyon üzerinden robot kolun ileri ve ters kinematik analizleri incelendi. Kinematik analizi kullanılan robotun çalışma uzayının belirlenmesi açısından önemlidir. Çalışma uzayı belirlenen robot kolun kontrolü de bir o ölçüde çalışma uzayına bağlıdır. Çalışmada kinematik analiz yazılımı da açık kaynak olarak paylaşılacak ve bu durumun açık kaynak geliştirilebilir robotik sistemlerin yaygınlaştırılmasına ön ayak olması umut edilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Simulink, MATLAB, Açık Kaynak Robot Kol, İleri Kinematik Analizi, Ters Kinematik Analizi

#### Abstract

Technology impacts human life at a dizzying speed, especially, the increase of the use of technological outputs in daily life is an inevitable development. The widespread use of robotic systems can be shown as an

example. The model works printed with 3D printers, among the developing technology products, and even printable robotic systems provide significant budget savings. In this study, it was aimed to overcome the copyright problem with an open-source robot arm printed with 3D printers in this scope. In this way, sanctions arising from copyright are avoided. The robot arm with 5 degrees of freedom (DoF) developed within the scope of the study is especially recommended for the use of hospital staff in pandemic diseases such as COVID-19. The forward and inverse kinematic analyzes of the robot arm were examined through the simulation with the user interface. Kinematic analysis is important in determining the working space of the robot used. The control of the robot arm whose working space is determined is also shared as open-source, and it is hoped that this situation will lead to the spread of open-source developable robotic systems.

**Keywords:** Simulink, MATLAB, Open-Source Robot Arm, Forward Kinematic Analysis, Inverse Kinematic Analysis

#### I. Giriş

Gelişen teknoloji çıktılarının günlük hayatta artan kullanımlarına her geçen daha fazla rastlamak mümkündür. Bu çıktılar arasında robotik sistemlerin artan etkisini görmekteyiz. Uluslararası robot federasyonu (IFR) verilerine göre, bu kullanım 2018 ile 2021 yılları arasında dünya genelinde 2 milyon adedi aşacağı öngörülmektedir [1]. Yapılan çalışmada açık kaynak profesyonel ölçülerde ve endüstriyel kullanıma uygun bir robotik sistem geliştirilip, robotun kinematik analizi çalışmada incelendi. Çalışmada geliştirilen robotik kolun eklemeleri, Thingiverse web sayfasında

paylaşılan açık kaynak bir robot kolun referans ölçüleri dikkate alınarak tekrar tasarlandı ve 3D yazıcı üzerinden basıldı. Çalışmanın icra edilmesinin bir önemi, günümüzde özellikle insan sağlığını tehdit eden bulaşıcı hastalıklarda önemli görev alan sağlık personelleri için çalışma ortamında yardımcı bir ekipman olacak robotik sistemler tasarlamaktır.

Çalışmada referans alınan açık kaynaklı robot kolun eklemleri referans alınarak tekrar tasarlandı ve robot kolun çalışma uzayı istenildiği ölçülerde genişletilebilir duruma getirildi. Çalışma alanı, erişilebilir 3B uzay ortamında bulunan uç efektörün erişim alanını ifade eder. Tasarım aslına uygun şekilde açık kaynak olarak paylaşmakta ve ayrıca açık kaynaklı robot kolun kullanımından kaynaklı bazı avantajları bulunmaktadır. Açık kaynaklı robot kolun en büyük avantajı, telif hakkının olmaması ve hatta düşük maliyetidir. Endüstriyel ölçekteki robot kolların telif hakkı olması ve bakım sorunları robotik sistemler için ciddi sorunlara neden olabilir. Üstelik 3D yazıcılardan istenilen filament türü ile, karbon fiber gibi, baskı yapılabilmesi masrafları tamamen düşürmekte ve dayanıklılığını da artırmaktadır.

Çalışmada kullanılan robot kolun çalışma alanını belirlemek için ileri ve ters kinematik analiz incelemeleri yapıldı. Robotik sistemlerin çalışma alanını ortaya çıkarmak için kinematik modeller oluşturulmalıdır. Kartezyen uzay ve quaternion uzayı, kinematik analiz çalışmalarında kullanılan iki farklı uzay modelidir. Kartezyen uzayda koordinat sistemindeki iki koordinatın dönüşümü tek bir dönüşüme ve bir çeviriye indirgenebilir. Rotasyonu temsil etmek için kullanılan yaklaşımlar arasında Gibbs vektörü, Euler açıları, Cayley-Klein parametreleri ve ortonormal matrisler kullanılır. Robot sistemlerinde ağırlıklı olarak 4x4 gerçek matrislere dayanan homojen dönüşümler baskın olarak kullanılır [2].

Özellikle hastane koşullarının iyileştirilmesi amaçlı 3D yazıcıdan basılan mafsallı robot kol 5 serbestlik derecesine (DoF) sahiptir. Robotik kolun ileri ve ters kinematik analizi, robotik kolu kontrol etmek için çalışma kapsamında incelenmiştir ve çalışma alanının belirlenmesi açısından önemlidir. İleri kinematik, robotik kollarla verilen görevleri yerine getirirken yapmış olduğu ileri yönlü hareket olarak bilinir ve bu hareketin incelenmesine ileri kinematik analiz denir. Ters kinematik analiz ise ileri yönlü yapılan hareketin ilk başlangıç konumuna geri döndürülmesi için yapılan analize denir. Özellikle ters kinematik modelleme, günümüzde halen robot araştırmalarında ciddi sorunlardan birini oluşturmaya devam etmektedir. Öte

yandan, robotik kollarla kontrolün sağlanması açısından kullanılan en popüler yöntem hala manuel olarak tasarlanan tarama tablolarına dayanmaktadır [3 – 6]. Çalışmada ileri kinematik analizde Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemi uygulanmıştır. D-H yönteminin anahtarı, tüm eklemlerinin koordinat sisteminin ilişkisini göstermektir. Yöntem kapsamında, bir dizi D-H parametresi oluşturulmuştur [7]. Çalışma kapsamında ilerleyen bölümlerde, materyal metot bölümünde kinematik analiz çalışması incelenmiş, tartışma ve sonuç bölümünde ise kinematik analizin yapıldığı yazılımın tasarlanması ve uygulama aşamaları ve elde edilen sonuçlar tartışıldı.

## II. MATERYAL METOT

Kinematik analiz, koordinat sistemine referansla zaman fonksiyonuna bağlı hareket geometrisinin analizidir. Oluşan belirli bir manipülatörün eklem açıları ve vektörü

$$q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))^T \quad (1)$$

Diğer bir deyişle, kinematik analiz uç efektörünün 3 boyutlu uzaydaki konumu ve yönünün belirlenmesidir. Tanımlanan parametreler dikkate alındığında robot koldaki tüm manipülatörlerin sabit eksen setleri, uç efektörüne bağlıdır.

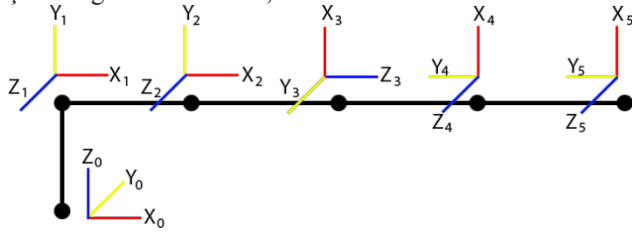


Şekil 1: 5 serbestlik derecesine sahip robotik kol

3D yazıcılar üzerine basılan robotik kol, 5 DoF, mafsallı tip, endüstriyel ölçekli ve profesyonel özelliklere sahiptir. Robot kolu sabit bir temele yerleştirilir (şekil 1) ve robot kolunun kinematik analizi için gerekli koordinat çerçevesi ataması şekil 2'de gösterilmektedir.

## 2.1. Homojen Dönüşüm Metoduna Bağlı İleri Kinematik Analiz İncelemesi

Uç fektörün konumu, robotik sistemlerdeki serbestlik derecesine bağlıdır. Uç fektörün konumunun belirlenmesi için yapılan ileri kinematik analiz denir. Robotik kol çalışma alanını tespit etmek, koordinasyon eksenleri üzerindeki uç fektörün konumunu belirlemektir. Analitik yöntem veya D-H yöntemi, ileri kinematik analiz için kullanılan en yaygın yöntemlerdir [7]. Robotik kolun her ekseninin 5 DoF olan rotasyonel eklemleri şekil 1'de gösterilmiş ve her eklemin koordinat sistemi üzerindeki bitişik eklemler arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir dönüşüm matrisi verilmiştir. Dönüşüm matrisi, birbirine bağlı iki eklemler arasındaki ilişkiyi ve  ${}^{i-1}T_i$  olarak gösterilir. "i" eklemler sayısını temsil ederken, birbirine bağlı eklemlerin oluşturduğu homojen matris şu şekilde gösterilmektedir;



Şekil 2: Açık kaynak robotik kolun koordinat sistemindeki eklemler dizilimi

Homojen dönüşüm metodu

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R_i & D \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

tüm matrislerin çarpımı sonucunda elde edilecek sonuç matrisi

$${}^0T_5 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_e \quad (3)$$

"e" karakteri koordinat eksenindeki uç fektörü temsil eder,  ${}^{i-1}T_i$  değeri "i" ve "i-1" arasındaki koordinatlar arasındaki dönüşüm ilişkisini ifade ederken "i" ve "i-1" arasındaki koordinatlar arasındaki hareket ilişkisi ise  ${}^{i-1}R_i$  şeklinde ifade edilir. Homojen dönüşüm matrisindeki diğer matrisler hesaplanırken, taban koordinatı uç fektör koordinatından elde edilir. Dönüşüm matrisinin son fektörünün koordinatı, hesaplama sırasında tabanın koordinatından türetilir.

Birbirine bağlı eklemlerin konumu ve sabit bağlantı yönelimleri, eklemlere göre sabitlenmiş koordinat

sistemleri ile tanımlanabilir [8]. Sonuç olarak, her aktif eklemler koordinat sistemine belirlenen konumlarda yerleştirilmelidir [7] ve koordinat sistemine yerleştirilen sabit bağlantılar şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2'de gösterilen robot kol BCN3D Moveo açık kaynak robot koludur ve 3D yazıcıdan basılarak elde edilmiştir [9]. Koordinat sisteminde 0 tabanı simgelemek, 1 ise ilk eklemler ifade etmektedir. "i" nolu eklemler bir önceki eklemler ile çakışır. Z eksenleri her dönme eksenine paraleldir, ayrıca Z dönme eksenleri geleneksel sağ el kuralı belirlenir. Sistemin son eksenleri sağ el kuralı ile belirlenirken, koordinat sistemindeki ölçü sınırları da belirlenmelidir.

Robotik kolun homojen dönüşüm matrisleri aşağıda gösterilmektedir;

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_3 + a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & a_5 C_5 \\ S_5 & C_5 & 0 & a_5 S_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

## 2.2. Geometrik Yaklaşım Modeline Göre Ters Kinematik Analiz İncelemesi

Robotik sistemlerde en önemli sorun ters kinematik hesaplamaların yapılmasındaki zorluktur, özellikle robotun konumu ve konuma karşılık gelen tüm eklemler açıların hesaplanması ciddi problemleri ortaya çıkarır [12]. Belirlenen uç noktanın istenilen konuma sabit referans eksen takımı üzerinde kol parametreleri ile ulaşılabilirliği ve dahi ulaşabilir ise kaç farklı konfigürasyon ile ulaşılabilirliğinin analizine ters kinematik analiz denir. Diğer bir deyişle, eğer n, o, a ve p

değişkenleri ve geometrik değişkenler bilinmesi durumunda eklem değişkenleri  $\theta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) kinematik hesaplamalarında bağlı çözülebilir [13]. Ters kinematik denkleminin çözümü için gerekli olan denklem aşağıdaki gibidir. Medikal yardımcı robotik kolun ters kinematik çözümü için geometrik metot kullanılmıştır (şekil 3).

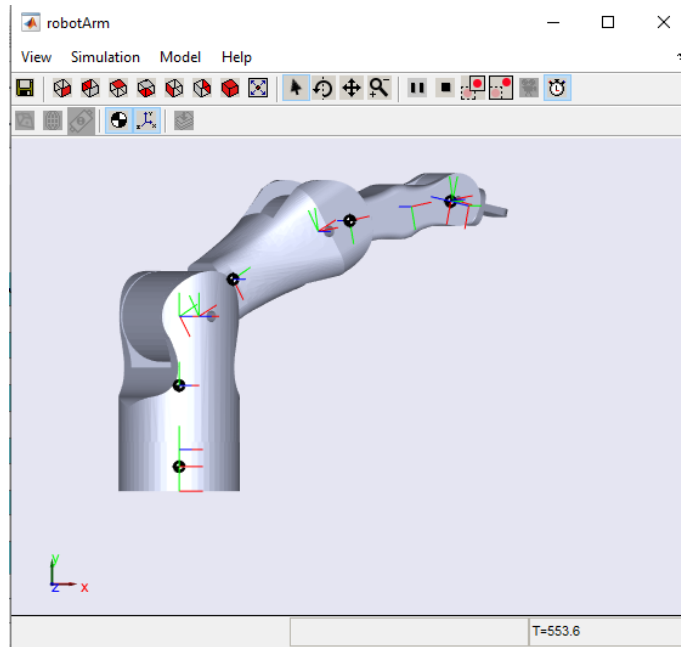
### III. TARTIŞMA VE SONUÇ

#### 3.1. İleri ve Ters Kinematik analizi incelemesi

İleri ve ters kinematik analiz MATLAB yazılımı üzerinden incelendi. Ters kinematik analizi işleminde geometrik yaklaşım kullanılmıştır. İleri kinematik analizine kıyasla ters kinematik analizinde birçok zorluk bulunmaktadır. Çalışma kapsamında geometrik metot ile

robot kolun ters kinematik analizi yapılarak çok eksenli mafsallı robot kollar için örnek oluşturacak bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

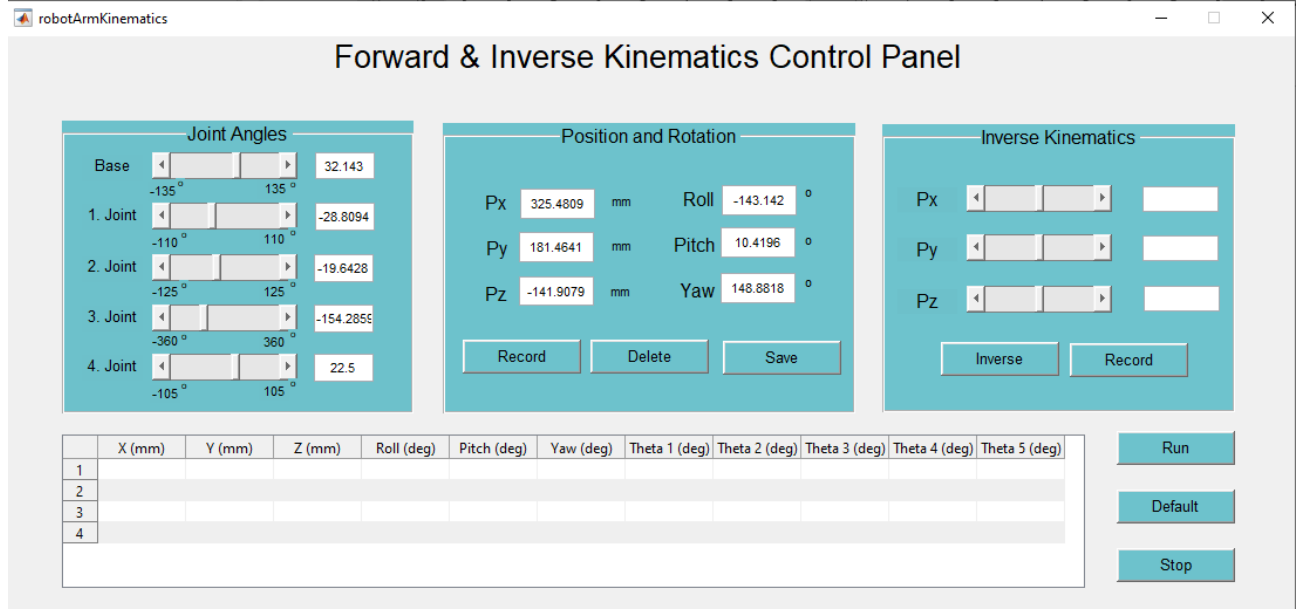
İnceleme MATLAB yazılımı ile beraber çalışan Simulink yazılımı kullanıldı. Simülasyon Simulink yazılımı kullanılarak oluşturuldu. Simülasyonun gerçekleştirilmesi aşamasında robotik kolun eklemleri SolidWorks yazılımı üzerinden, kaynak referanslara bağlı kalarak tekrar tasarlandı. Bu tür bir girişim sonucunda robot kolun çalışma uzayı istenildiği ölçülerde genişletildi. Modellenen eklemler şekil 3'te gösterilmektedir. Simülasyon ayrıca MATLAB yazılımı ile kontrol edildi. Robot kolunun ileri ve ters kinematiklerinin simülasyon kontrol modülü şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 3: SolidWorks modelleme yazılımı ile modellenen robot kol

Simulink, mekanik yapısal bileşenleri ile zengin veritabanı [10, 11] kontrolü sağlanmasına yardımcı olan son derece kullanışlı bir yazılımdır. Simulink [12, 14] üzerinde çok sayıda sürücü ve sensör çeşidi

bulunmaktadır. Şekil 4'te gösterilen model kullanıcı arayüz sistemi (GUI), Simulink yardımı ile geliştirilmiştir. Robot kolunun 3. ve 4. mafsalları, bükümlü eklem modeli ile ilişkilendirilmiştir.



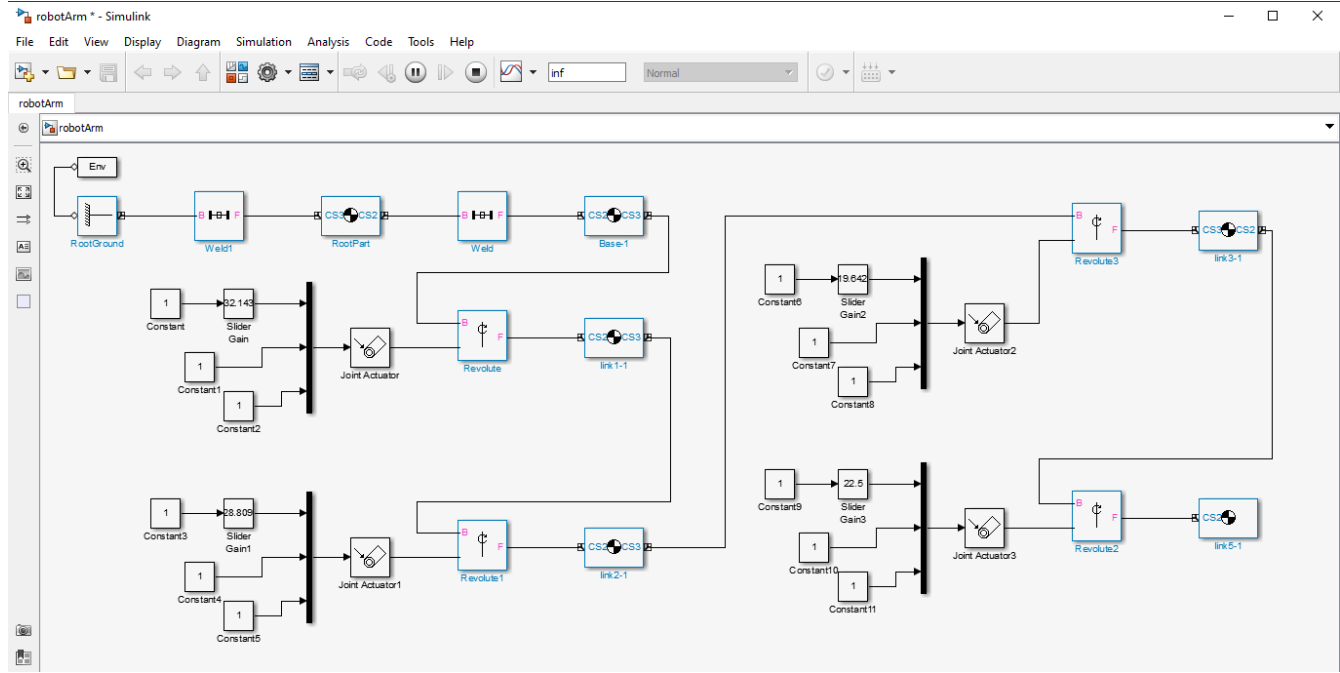
Şekil 4: Simulink üzerinden geliştirilen kontrol modülü

Hazırlanan simülasyon arayüzünde aşağıdaki fonksiyonlar yer almaktadır;

- Simülasyon sürecini kontrol etmek
- Eklem açısı bilgilerinin iletilmesi ve gözden geçirilmesi
- Manipülatörün son konum bilgilerinin alınması

5 serbestlik derecesine sahip profesyonel özellikteki robot kol, 3D yazıcıdan basılmış ve aynı zamanda açık

kaynaklıdır. Endüstriyel ölçekte kullanıma uygun olan robot kolun ileri ve ters kinematik analizi MATLAB yazılımı kullanılarak incelendi. Analiz aşamasında Simulink yazılımı kullanılarak GUI tasarlanmış ve robot kolun simülasyonu GUI aracılığıyla kontrol edildi. Simulink yazılımı üzerinde oluşturulan mekanik modelleme yapıldı. Mekanik modelleme aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 5: Simülük ile robot kolun mekanik tasarımı

### 3.2. Elde edilen sonuçlar

Simulink üzerinden mekanik modellemesi yapılan robot kolda hareket ettirilen her eklem, kullanıcı tarafından belirlenen açısal değerler ile kontrol edilmektedir. Kullanıcı tarafından belirlenen açısal değerler Slider Gain ile mekanik modellemeye yer alan Joint Actuator aktarılmakta ve hareket simülasyonu Revolute Joint ile sağlanmaktadır. Böylece gerçek hayatta yapılabilecek muhtemel hareketler var olan simülasyon üzerinden oluşturulabilmektedir. Simulink yazılımında modellemesi ve kontrol algoritmaları belirlenen robot kolun simülasyonu için gerekli olan bileşenler mekanizmaya uygulanmıştır.

Özellikle robotik sistemlerin tasarımı yapılırken öncesinde simülasyon yapılması genellikle çok kıymetlidir. Simülasyon kurulumu robotik sistemlerin tasarımında hem daha kolay, daha ucuz, daha hızlı ve kullanım noktasında da daha kolaydır. Özellikle robotik sistemlerin modellemeleri yapılsa ve deneyler yapılsa işlem birkaç saat sürer. Kinematik analizi yapılırken simülasyonun yapılmasının bir önemi de çalışma uzayının simülasyonda ortaya çıkartılır.

Simülasyon aşamasında robotik kurulum, gerçek robotlardan ve gerçek dünya kurulumlarından daha ucuz olsa da daha iyi tasarım değerlendirilmesini de sağlar.

Sonuç olarak simülasyon genellikle gerçek robotlardan daha hızlı çalışır ve tüm parametreler ekranda kolayca görüntülenebilir [15].

Simülasyonun önemi göz önünde alınarak, özellikle hazırladığımız geliştirilebilir açık kaynaklı mafsallı robot kolun Simulink sensörleri kullanılarak hazırlanan modül ile deneyi yapıldı. Simülasyon modülü üzerinde yapılan kinematik analizi incelemesi ve hazırlanan yazılım açık kaynak olarak hazırlandı. Tasarım sürecinin ilerleyen aşamalarında gerçek zamanlı simülasyonların icra edilmesi son derece önemlidir.

3D yazıcıdan basılabilir özelliği ile maliyetinin düşük olması ve dahi yukarıda bahsedilen diğer özellikleri robot kolun öne çıkan özellikleri arasındadır. Çalışma kapsamında COVID-19 gibi pandemik durumlarda özverili çalışan hastane personelinin iş yükünün azaltılması hedefleniyor. Çalışma alanının analizi robotik sistemler için kritiktir.

Özellikle hazırlanan çalışmanın önemi bir kez daha vurgulanırken, hastane ortamında salgın hastalıklar ile mücadele eden sağlık çalışanlarına yardımcı olacak en ufak bir etkinin önemi çok etkilidir. Çalışma kapsamında bir sonraki aşamada robot kolunun ileri ve ters kinematik analizi derin öğrenme yöntemleri ile incelenecek ve daha

işlevsel bir kontrol mekanizması elde edilmeye çalışılacaktır.

Örneğin görüntü işleme ve ses işleme metotları ile gelen sesli komutlar ile beraber istenilen objenin barkodu okunarak sağlık personeline teslim edilmesi gibi. Bu çalışmanın, açık kaynaklı robotik sistemlerin geliştirilmesi, yazılımlarının açık kaynak ve geliştirilebilmesi açısından paylaşılması, birden fazla robotik kol tarafından oluşturulacak robotik sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlayacağı umulmaktadır.

#### KAYNAKLAR

- [1] A positioning paper by the International Federation of Robotics, Robots and the Workplace of the Future  
[https://ifr.org/downloads/papers/IFR\\_Robots\\_and\\_the\\_Workplace\\_of\\_the\\_Future\\_Positioning\\_Paper.pdf](https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Robots_and_the_Workplace_of_the_Future_Positioning_Paper.pdf)
- [2] J. Funda, R.H. Taylor, R.P. Paul, "On homogeneous transforms, quaternions, and computational efficiency," IEEE Trans. Robot. Automation 6, pages 382–388, 1990.
- [3] R. D. Klafter, T. A. Chmielewski and M. Negin. "Robotic Engineering: An Integrated Approach" 1989. Prentice Hall.
- [4] R K Mittal, J Nagrath. "Robotics and Control", 2005. Tata McGraw-Hill.
- [5] P. J. McKerrow. "Introduction to Robotics" 1991. Addison-Wesley.
- [6] S. B. Niku. "Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications" 2001. Prentice Hall.
- [7] J. Denavit, R.S. Hartenberg, "A kinematic Notation for Lower- Pair Mechanism Based on Matrices." ASME Journal of Applied Mechanics, 215-221, 1955
- [8] S.R. Kuo, Y.B. Yang, "A rigid-body-qualified plate theory for the nonlinear analysis of structures involving torsional actions." Eng Struct 47:2–15, 2013
- [9] İnternet: <https://github.com/BCN3D/BCN3D-Moveo>, 10.06.220
- [10] M. Gouasmi, M. Ouali, B. Fernini, M. Meghatria, "Kinematic Modelling and Simulation of a 2-R Robot Using SolidWorks and Verification by MATLAB/Simulink", International Journal of Advanced Robotic Systems, DOI: 10.5772/50203, 2012
- [11] J.A. Velarde-Sanchez, S.A. Rodriguez-Gutierrez, L.G. Garcia-Valdovinos, J.C. Pedraza-Ortega, "5-DOF Manipulator Simulation based on MATLAB-Simulink methodology", DOI: 10.1109/CONIELECOMP.2010.5440751, 2010
- [12] W.L. Xiao, S. Henning, L. Torsten et. Al., "Closed-form inverse kinematics of 6R milling robot with singularity avoidance." Prod Eng Devel 5:103–110, 2011
- [13] Y. Wu, L.H. Cheng, G.H. Fan et al. "Inverse kinematics solution and optimization of 6-DOF handling robot" Appl Mech Mater 635–637:1355–1359. 2014
- [14] M.H. Fatehi, A.R. Vali, M. Eghtesad et. al., "Modeling and control of 3-PRS parallel robot and simulation based on SimMechanics in MATLAB." In: 2nd international conference on control, instrumentation and automation, Shiraz, December 2011
- [15] K. Raza, T. A. Khan, N. Abbas, "Kinematic analysis and geometrical improvement of an industrial robotic arm." Journal of King Saud University – Engineering Sciences 30 (2018) 218–223