

## Döner Tablalı Endüstriyel Boyama Robot Kol Tasarımı ve İmalatı

Mehmet ARİN<sup>1\*</sup> (Orcid ID: 0000-0002-3488-1147), Yusuf BAŞOĞUL<sup>2</sup> (Orcid ID: 0000-0002-9668-6654)

<sup>1</sup>Adıyaman Üniversitesi, Makine Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Programı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Adıyaman

<sup>2</sup>Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adıyaman

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): mehmet-arin@hotmail.com

**Geliş Tarihi (Received):** 30.10.2022

**Kabul Tarihi (Accepted):** 28.11.2022

### Özet

Bu çalışmada; endüstriyel olarak üretilen ürünlerin boyama kalitesini ve boyama işlemlerinde ortaya çıkan işçi hatalarını minimize etmek için döner tablalı, beş serbestlik derecesine (5DoF) sahip robot kol tasarlanıp imal edilmiştir. Robot kolun ileri kinematik analizi Denavit Hartenberg yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Robot kolun tasarımında, geri beslemeli servo motorlar kullanılmıştır. Arduino Uno mikroişlemcisinden üretilen PWM (sinyal genişlik modülasyonu) sinyalleri kullanılarak robot eksenlerinin hareketleri gerçekleştirilmiştir. Boyama işlemi, üründen ürüne çok fazla değişiklik gösterdiği için robot kolun hareket verileri Arduino IDE’de kayıt alma ve kayıt çalıştırma yapacak şekilde programlanmıştır. Böylelikle robot kolun manuel olarak hareketini sağlayan joystickler yardımıyla on farklı pozisyona götürülen robot kolun uç işlevcisinin konumları kayıt edilmiştir. Bu çalışma kapsamında koordinatları rastgele belirlenen 10 farklı pozisyonu, robot kolunun uç işlevcisinin takip etmesi uygulaması gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Endüstriyel, robotik kol, sprey boya, döner tabla, robot

## Industrial Painting Robot Arm Design and Manufacturing with Rotary Table

### Abstract

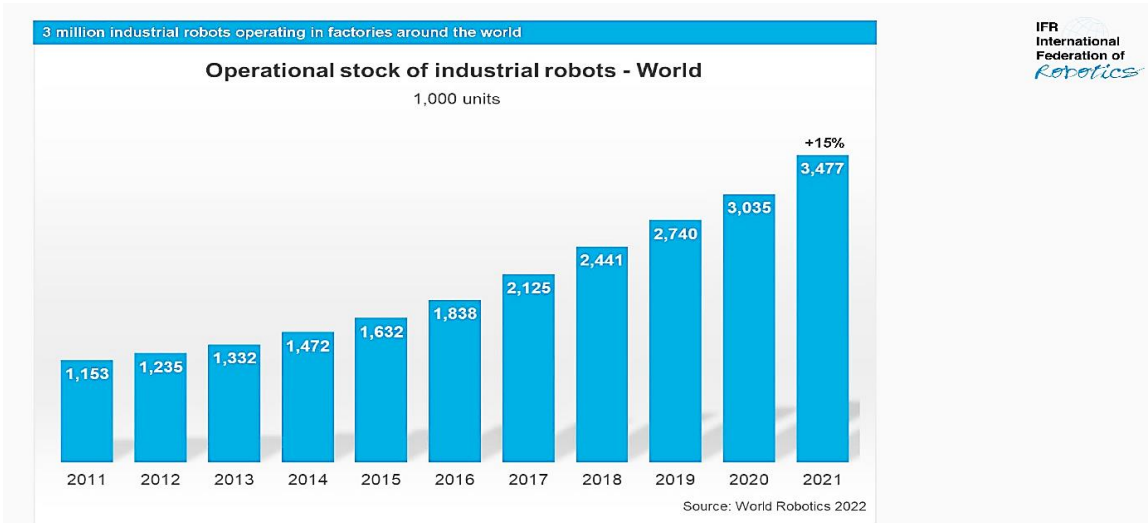
In this study; In order to minimize the dyeing quality of industrially produced products and the worker errors that occur in dyeing processes, a robot arm with a rotary table and five degrees of freedom (5DoF) was designed and manufactured. Advanced kinematic analysis of the robot arm was obtained using the Denavit Hartenberg method. In the design of the robot arm, feedback servo motors are used. The movements of the robot axes are realized by using PWM (signal width modulation) signals produced from Arduino Uno microprocessor. Since the painting process varies a lot from product to product, the motion data of the robot arm is programmed in the Arduino IDE to record and run. Thus, the positions of the end function of the robot arm, which was moved to ten different positions with the help of joysticks that enable the robot arm to move manually, were recorded. Within the scope of this study, 10 different positions, whose coordinates are determined randomly, are followed by the end function of the robot arm.

**Keywords:** Industrial, robotic arm, spray paint, turntable, robot

## GİRİŞ

Günümüz sanayi hayatında üretilen ürünler; genellikle işlenebilirlik özellikleri yüksek olan metal ve ahşap malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Bu ürünlerin üretilmesinden sonra çevrenin korozif etkilerine karşı korunmaları ve görsel olarak ürün satışına uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı ürünler boyama veya kaplama yöntemleri kullanılarak istenilen koruma ve görsellik sağlanır. Krom kaplama, galvaniz kaplama gibi çeşitli kaplama yöntemleri bulunmaktadır. Kaplama işleminin uygulanmasında, ürünün büyüklüğü, kaplama ekipman yetersizliği gibi bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Bundan dolayı kaplama işlemi zorunlu durumlarda kullanılmaktadır. Oysaki boyama işlemi oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Boyama işleminden önce ürünün boyamaya hazır hale getirilmesi işlemlerinde ve boyama işlemlerinde kullanılan kimyasallar, aşındırıcı tozlar gibi malzemeler çalışan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Boyama işleminin çalışan

sağlığını etkilememesi ve ürünlerde her zaman aynı standartlarda korozif etkilere karşı koruma ve görselliğin sağlanabilmesi için boyama işleminde robot kol teknolojisinin kullanılması en uygun olan yöntemdir. Robot kolun boyama işleminde kullanılmasıyla sürdürülebilir kaliteli ürünlerin üretilmesi mümkündür. Bununla birlikte üretilen ürünlerin muadillerinin çok sayıda olması, firmalar arasında rekabeti üst düzeye çıkarmaktadır. Bu rekabette kalıcı olmanın yolu üretilen ürünlerin her zaman aynı kalitede piyasaya arzı ile mümkündür. Standartların sürekliliği ise insan hatalarının ortadan kaldırılmasıyla elde edilebilir. Bu durum robot kol teknolojisinin dünya çapında kullanım sayılarındaki artışın başlıca göstergesidir. 2021 yılı dünya robotik raporuna göre; dünya ölçeğinde fabrikalarda halı hazırda faaliyet gösteren endüstriyel robot sayısı 3,000,000 adedi geçerek rekor kırdı. IRF (International federation of Robotick) tarafından hazırlanan rapora göre 2021 yılında %15'lik bir artış gerçekleşmiştir (IRF,2022).



Şekil 1. Dünya genelinde faaliyet gösteren robot sayısı (IRF, 2022)

Boyama robotu için literatüre bakıldığında;

- Boyama yapılacak ürünlerin serbest yüzey profiline sahip olması durumunda noktaya dayalı boyama robotu, boyama yörüngesinin lazer taraması yardımıyla elde edilip, noktalar arasında enterpolasyon algoritması kullanılarak boyama robotu

yörüngesinin oluşturulmasıyla boyama işlemi gerçekleştirilmiştir (Chen et al., 2020).

- İnşaat sektöründe iç mekânların boyama işleminin yapılabilmesine yönelik, mobil bir platform üzerine yerleştirilen robot kol mekanizmasının ultrasonik sensörlerin

yardımla hareket yörüngesinin belirlenip mekân içi boyama işlemini gerçekleştiren robot kol çalışması yapılmıştır (Abdellatif, 2012).

• Otomobil gibi araçların boyama işlemi otomasyon sistemin de aynı anda birçok robot kolun çalışmasıyla gerçekleştirilir. Bu robot kolların beraber çalışması ve çalışma esnasında her hangi bir çakışmanın olmaması gerekmektedir. Birçok robot kolun birlikte çalışma yörüngelerinin entegrasyonu ile ilgili çalışma gerçekleştirilmiştir (Zbiss, et al. 2022).

Boyama işlemine yönelik bazı çalışmalar yapılmıştır. Bununla birlikte Türkiye özelinde robot kollarla ilgi yapılan bazı çalışmalar şu şekilde sıralanabilir;

• “Endüstriyel robot kolu modelinin hedef konum ekleme açılarının yapıcı sinir ağı ile kestirimi ve kontrollü yörünge uygulaması” (Özüdoğru, 2020).

• “3 boyutlu nesne algılama ile çalışan robot kolu otonom taşıma sistemi tasarımı” (Makomo, 2020).

• “ Cisimleri renklerine göre seçen PLC kontrollü robot kol tasarımı ve uygulaması” (Hız, 2019).

• “Dört serbestlik dereceli robot kolun 2-DOF PID ile kontrolü” (Yüksel, 2018).

• “Gerçek zamanlı görüntü işleme temelli al-bırak yapabilen endüstriyel robot kol” (Yıldırım, 2019).

• “5 eksenli endüstriyel robot kol”(Sarıaltın, 2017).

• “Endüstriyel robot kolları için kolay programlama yöntemi geliştirme” (Seçil, 2015).

• “EMG işaretleri ile kontrol edilen robot kol tasarımı”(Aboodi, 2022).

• “3 eksenli bir robot kolun kontrol metotların incelenmesi ve verimlilik analizi” (Yıldırım, 2021).

• “Derin pekiştirmeli öğrenme ile robot kol tork kontrolü” (Evdüzen, 2021).

• “Endüstriyel amaçlı küresel robot kolu ve tutucunun tasarımı ve kontrolü” (Karaca, 2020).

• “Altı serbestlik dereceli robot kolu tasarım, modelleme ve imalatı” (Azizi, 2020).

• “Endüstriyel robot kollarının tasarımından kaynaklanan ölü yüklerin sonlu elemanlar yöntemi ile optimize edilmesi ve işletme maliyetlerine etkisinin incelenmesi” (Buğday, 2018).

• “Cerrahi amaçlı bir robot kolunun tasarımı ve uzaktan kontrolü” (Yalvaç, 2015).

• “4 serbestlik dereceli robot kolu kinematik denklemlerinin destek vektör makinesi ile çözümü” (Dokuzlu, 2015).

gibi çalışmalar sıralanabilir. Ancak ülkemizde çalışmamıza benzer boyama robot manipülatörü üzerine yapılmış bir akademik çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu nedenle boyamaya yönelik bir çalışma yapmak ve endüstriyel olarak orta büyüklükteki işletmelere katkıda bulunmak amacıyla döner tablalı endüstriyel robot kol tasarımı yapılarak, bu alandaki açığın giderilmesine katkıda bulunulmuştur. Ayrıca bu tasarımda robot kolun programlanmasında, kodlama işleminin daha kolay yapılabilmesi için öğretim metodu kullanılmıştır. Öğretim metodu; boyanacak ürünlerden birinin operatör tarafından boyanması işlemi yapılırken, robot kolun üç boyutlu yörünge koordinatlarının kayıt edilmesidir. Böylelikle yapılacak işlemin robot kola öğretilmesi gerçekleştirilmiştir. Öğretim metodunun kullanılmasıyla değişik ürünlerin boyanmasında robot kolun hızlı bir şekilde adapte edilmesi sağlanır. Döner tablanın kullanılmasıyla da boyamada işçi hatalarının önüne geçilerek kaliteli ürünler üretilmiştir. Aynı zamanda döner tabla kullanılarak robot kolun, ürünün arka tarafına daha kolay ulaşması ile robot kolun çalışma uzayının etkin bir şekilde kullanılması sağlanmıştır. Bu öğretim yöntemiyle belirlenen kayıt noktası sayısı artırılarak bu noktaların takibi sağlanabilmektedir. Çünkü ürün değişiminde boyama yörüngesinin değişimi pratik bir şekilde sağlanabilmektedir.

Böylelikle boyama işlemine adapte edilebilir esnek bir yapı elde edilmiştir.

## MATERYAL ve YÖNTEM

### Mekanik tasarım

Mekanik tasarımda öncelikle çalışma uzayının belirlenmesi için, eklem boyutlarına göre tutucunun konumunu

veren ileri kinematik denklemleri Denavit-Hartenberg (DH) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir (Özgören,2015). Elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir.

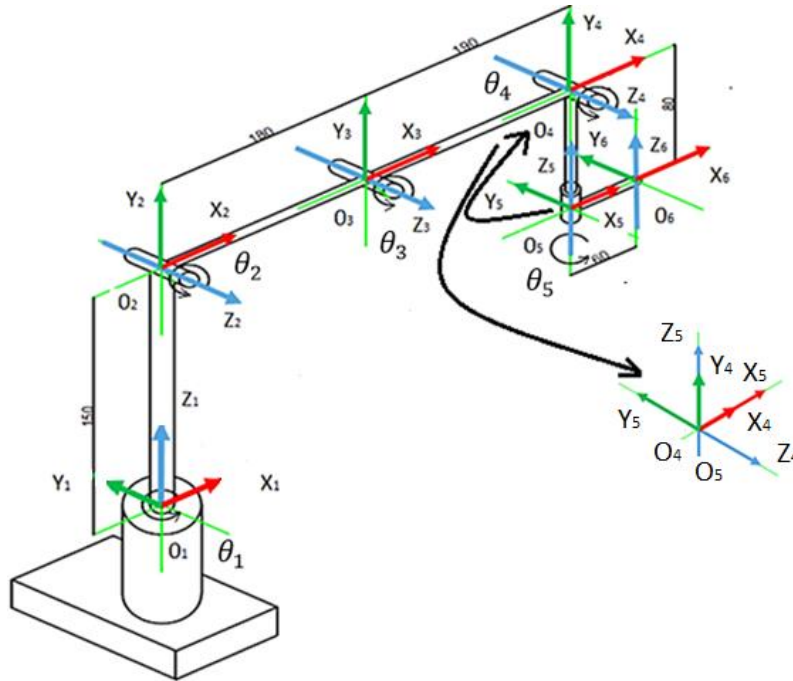
Homojen dönüşüm matrisi;

$$A_i = Rot(z, \theta_i).Trans(0,0,d_i).Trans(a_i,0,0).Rot(x,\alpha_i) \quad (1)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Homojen dönüşüm matrisi, DH değişkenlerine bağlı olarak elde edilen veriler eşitlik 2. de yerine yazılarak elde

edilir. DH yöntemine göre eksen takımları (Şekil 2) yerleştirilip, DH parametre tablosu (Çizelge 1) oluşturulmuştur.



Şekil 2. Robot kol eksen takımlarının yerleştirilmesi

Çizelge 1. DH parametre tablosu

	$\theta_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$a_i$
1	$\theta_1$	150	90	0
2	$\theta_2$	0	0	180
3	$\theta_3$	0	0	190
4	$\theta_4$	0	-90	0
5	$\theta_5$	-80	0	60

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Birinci eklem için homojen dönüşüm matrisini ( $A_1$ ), çizelge 2 için düzenlersek;

**Çizelge 2.** DH birinci eklem parametreleri

	$\theta_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$a_i$
1	$\theta_1$	150	90	0

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos 90 & \sin \theta_1 \sin 90 & 0 \cdot \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cos 90 & -\cos \theta_1 \sin 90 & 0 \cdot \sin \theta_1 \\ 0 & \sin 90 & \cos 90 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Eşitlik 5.'te yer alan matrisi elde edilir.

İkinci eklem için homojen dönüşüm matrisini ( $A_2$ ), çizelge 3 için düzenlersek;

**Çizelge 3.** DH ikinci eklem parametreleri

	$\theta_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$a_i$
2	$\theta_2$	0	0	180

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \cos 0 & \sin \theta_2 \sin 0 & 180 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \cos 0 & -\cos \theta_2 \sin 0 & 180 \sin \theta_2 \\ 0 & \sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 180 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 180 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Eşitlik 7.'de yer alan matrisi elde edilir.

Üçüncü eklem için homojen dönüşüm matrisini ( $A_3$ ), çizelge 4 için düzenlersek;

**Çizelge 4.** DH üçüncü eklem parametreleri

	$\theta_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$a_i$
3	$\theta_3$	0	0	190

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 \cos 0 & \sin \theta_3 \sin 0 & 190 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \cos 0 & -\cos \theta_3 \sin 0 & 190 \sin \theta_3 \\ 0 & \sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 190 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 190 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Eşitlik 9.'da yer alan matrisi elde edilir.

Dördüncü eklem için homojen dönüşüm matrisini ( $A_4$ ), çizelge 5 için düzenlenirse;

**Çizelge 5.** DH dördüncü eklem parametreleri

	$\theta_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$a_i$
4	$\theta_4$	0	-90	0

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 \cos(-90) & \sin \theta_4 \sin(-90) & 0 \cdot \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 \cos(-90) & -\cos \theta_4 \sin(-90) & 0 \cdot \sin \theta_4 \\ 0 & \sin(-90) & \cos(-90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Eşitlik 11.'de yer alan matrisi elde edilir.

Beşinci eklem için homojen dönüşüm matrisini ( $A_5$ ), çizelge 6 için düzenlenirse;

**Çizelge 6.** DH beşinci eklem parametreleri

	$\theta_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$a_i$
5	$\theta_5$	-80	0	60

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 \cos 0 & \sin \theta_5 \sin 0 & 60 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 \cos 0 & -\cos \theta_5 \sin 0 & 60 \sin \theta_5 \\ 0 & \sin 0 & \cos 0 & -80 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 60 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 60 \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & -80 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

eşitlik 13.'te yer alan matrisi elde edilir.

Şimdi temel transformasyon matrisi (T) bulunursa;

$${}^1_2T = A_1 \quad {}^1_2T = A_1 \quad (14)$$

$${}^2_3T = A_2 \quad {}^1_3T = A_1A_2 \quad (15)$$

$${}^3_4T = A_3 \quad {}^1_4T = A_1A_2A_3 \quad (16)$$

$${}^4_5T = A_4 \quad {}^1_5T = A_1A_2A_3A_4 \quad (17)$$

$${}^5_6T = A_5 \quad {}^1_6T = A_1A_2A_3A_4A_5 \quad (18)$$

Homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak temel transformasyon matrisi eşitlik 18. elde edilir. Elde edilen homojen matrislerin çarpma işlemi yapılarak temel transformasyon matrisi eşitlik 28.'deki gibi

elde edilir. Eşitlik 28.'deki iki matrisin çarpımının daha rahat yapılabilmesi için eşitlik 29.'daki sonuç matrisi tanımlanarak matrisin satır ve sütun denklemlerinin hesaplamaları yapılmıştır.

$${}^1_3T = A_1A_2$$

$${}^1_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 180 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 180 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

İşlemlerin daha rahat yazabilmek için,  $\sin \theta_i = S_i$  ve  $\cos \theta_i = C_i$  olarak yazacağız.

$${}^1_3T = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 180C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & 180S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$${}^1_3T = \begin{bmatrix} C_1C_2 & -C_1S_2 & S_1 & 180.C_1C_2 \\ C_2S_1 & -S_1S_2 & -C_1 & 180C_2S_1 \\ S_2 & C_2 & 0 & 180S_2 + 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$${}^1_4T = {}^1_3T \cdot {}^3_4T$$

$${}^1_4T = \begin{bmatrix} C_1C_2 & -C_1S_2 & S_1 & 180.C_1C_2 \\ C_2S_1 & -S_1S_2 & -C_1 & 180C_2S_1 \\ S_2 & C_2 & 0 & 180S_2 + 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 190 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 190 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$${}^1_4T = \begin{bmatrix} C_1C_2 & -C_1S_2 & S_1 & 180 \cdot C_1C_2 \\ C_2S_1 & -S_1S_2 & -C_1 & 180C_2S_1 \\ S_2 & C_2 & 0 & 180S_2 + 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 190C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & 190S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$${}^1_4T = \begin{bmatrix} C_1C_2C_3 - C_1S_2S_3 & -C_1C_2S_3 - C_1C_3S_2 & S_1 & 190C_1C_2C_3 - 190C_1S_2S_3 + 180C_1C_2 \\ C_2C_3S_1 - S_1S_2S_3 & -C_2S_1S_3 - C_3S_1S_2 & -C_1 & 190C_2C_3S_1 - 190S_1S_2S_3 + 180C_2S_1 \\ C_3S_2 + C_2S_3 & -S_2S_3 + C_2 \cdot C_3 & 0 & 190C_3S_2 + 190C_2S_3 + 180S_2 + 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$${}^4_6T = A_4A_5$$

$${}^4_6T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 60 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 60 \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & -80 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$${}^4_6T = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 60C_5 \\ S_5 & C_5 & 0 & 60S_5 \\ 0 & 0 & 1 & -80 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$${}^4_6T = \begin{bmatrix} C_4C_5 & -C_4S_5 & -S_4 & 60C_4C_5 + 80S_4 \\ C_5S_4 & -S_4S_5 & C_4 & 60C_5S_4 - 80C_4 \\ -S_5 & -C_5 & 0 & -60S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$${}^1_6T = {}^1_4T {}^4_6T$$

$${}^1_6T = \begin{bmatrix} C_1C_2C_3 - C_1S_2S_3 & -C_1C_2S_3 - C_1C_3S_2 & S_1 & 190C_1C_2C_3 - 190C_1S_2S_3 + 180C_1C_2 \\ C_2C_3S_1 - S_1S_2S_3 & -C_2S_1S_3 - C_3S_1S_2 & -C_1 & 190C_2C_3S_1 - 190S_1S_2S_3 + 180C_2S_1 \\ C_3S_2 + C_2S_3 & -S_2S_3 + C_2 \cdot C_3 & 0 & 190C_3S_2 + 190C_2S_3 + 180S_2 + 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_4C_5 & -C_4S_5 & -S_4 & 60C_4C_5 + 80S_4 \\ C_5S_4 & -S_4S_5 & C_4 & 60C_5S_4 - 80C_4 \\ -S_5 & -C_5 & 0 & -60S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Bu iki matrisin çarpımı aşağıdaki gibi tanımlanıp elemanları ayrı ayrı yazılırsa;

$${}^1_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$r_{11} = C_1C_2C_3C_4C_5 - C_1C_4C_5S_2S_3 - C_1C_2C_5S_3S_4 - C_1C_3C_5S_2S_4 - S_1 \cdot S_5 \quad (30)$$

$$r_{12} = -C_1C_2C_3C_4S_5 + C_1C_4S_2S_3S_5 + C_1C_2S_3S_4S_5 + C_1C_3S_2S_4S_5 - C_5S_1 \quad (31)$$

$$r_{13} = -C_1C_2C_3S_4 + C_1S_2S_3S_4 - C_1C_2C_4S_3 - C_1C_3C_4S_2 \quad (32)$$

$$r_{14} = 60C_1C_2C_3C_4C_5 + 80C_1C_2C_3S_4 - 60C_1C_4C_5S_2S_3 - 80C_1S_2S_3S_4 - 60C_1C_2C_5S_3S_4 + 80C_1C_2C_4S_3 - 60C_1C_3C_5S_2S_4 + 80C_1C_3C_4S_2 - 60S_1S_5 + 190C_1C_2C_3 - 190C_1S_2S_3 + 180 \cdot C_1C_2 \quad (33)$$



$$r_{21} = C_2 C_3 C_4 C_5 S_1 - C_4 C_5 S_1 S_2 S_3 - C_2 C_5 S_1 S_3 S_4 - C_3 C_5 S_1 S_2 S_4 + C_1 S_5 \quad (34)$$

$$r_{22} = -C_2 C_3 C_4 S_1 S_5 + C_4 S_1 S_2 S_3 S_5 + C_2 S_1 S_3 S_4 S_5 + C_3 S_1 S_2 S_4 S_5 + C_1 C_5 \quad (35)$$

$$r_{23} = -C_2 C_3 S_1 S_4 + S_1 S_2 S_3 S_4 - C_2 C_4 S_1 S_3 - C_3 C_4 S_1 S_2$$

$$r_{24} = 60C_2 C_3 C_4 C_5 S_1 - 60C_4 C_5 S_1 S_2 S_3 + 80C_2 C_3 S_1 S_4 - 80S_1 S_2 S_3 S_4 - 60C_2 C_5 S_1 S_3 S_4 - 60C_3 C_5 S_1 S_2 S_4 + 80C_2 C_4 S_1 S_3 + 80C_3 C_4 S_1 S_2 + 60C_1 S_5 + 190C_2 C_3 S_1 - 190S_1 S_2 S_3 + 180C_2 S_1 \quad (36)$$

$$r_{31} = C_3 C_4 C_5 S_2 + C_2 C_4 C_5 S_3 - C_5 S_2 S_3 S_4 + C_2 \cdot C_3 C_5 S_4 \quad (37)$$

$$r_{32} = -C_3 C_4 S_2 S_5 - C_2 C_4 S_3 S_5 + S_2 S_3 S_4 S_5 - C_2 \cdot C_3 S_4 S_5 \quad (38)$$

$$r_{33} = -C_3 S_2 S_4 - C_2 S_3 S_4 - C_4 S_2 S_3 + C_2 C_3 C_4 \quad (39)$$

$$r_{34} = 60C_3 C_4 C_5 S_2 + 60 C_2 C_4 C_5 S_3 + 80C_3 S_2 S_4 + 80C_2 S_3 S_4 - 60C_5 S_2 S_3 S_4 + 60 C_2 C_3 C_5 S_4 + 80C_4 S_2 S_3 - 80C_2 C_3 C_4 + 190C_3 S_2 + 190C_2 S_3 + 180S_2 + 150 \quad (40)$$

$$r_{41} = 0 \quad (41)$$

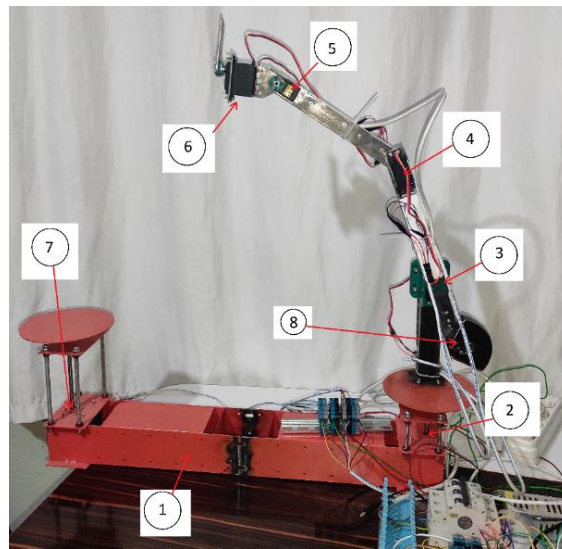
$$r_{42} = 0 \quad (42)$$

$$r_{43} = 0 \quad (43)$$

$$r_{44} = 1 \quad (44)$$

Elde edilen bu sonuçlara göre; eşitlik 33.'ten elde edilecek koordinat, robot kolun tutucusunun X eksenindeki değeri, eşitlik 36.'da elde edilecek koordinat, robot kolun tutucusunun Y eksenindeki değeri ve eşitlik 40.'ta elde edilecek koordinat robot kolun

tutucusunun Z eksenindeki değerini, denkleme girilecek açılara bağlı olarak hesaplanmasını sağlamaktadır. Böylelikle robot kolun verilen açılara bağlı olarak tutucu ucun üç boyutlu pozisyonu hesaplanmıştır.



Şekil 3. Robot kol genel görünüm (1-Sabit gövde, 2- Döner gövde servo motoru, 3- Omuz servo motoru, 4- Dirsek servo motoru, 5- Bilek servo motoru, 6- Tutucu servo motoru, 7- Döner tabla servo motoru 8- Karşıt ağı

Robotun ana gövde parçası, motorlara herhangi bir yük binmediği için 2mm kalınlığında DKP sac levhadan seçilerek imal edilmiştir. Ana gövdenin tasarımı AUTOCAD paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Böylelikle montaj esnasında çıkabilecek hataların önüne geçilerek tasarımların lazer kesim makinesinde kestirilip montaja hazır hale getirilmiştir. Tırnak geçmeli çizim yöntemi kullanıldığı için herhangi gönye kullanılmadan, kaynaklı birleştirme ile

montaj gerçekleştirilmiştir. Motorlara binen ağırlıkları azaltmak için şasenin diğer kısımlarında alüminyum dörtgen profil ve profil bağlantı yerlerinde 1mm DKP sacdan elde edilen L profiller kullanılarak ağırlıklar minimize edilmiştir. Sac levhalar ve profiller birbirinden farklı malzemeler (alüminyum ve çelik) olduğundan perçinli birleştirme kullanılmıştır. Omuz eklemine motoruna gelen yüklerin etkisini azaltmak için asansör mantığına benzer bir mantıkla 200 gr karşıt kütle kullanılmıştır.

**Çizelge 7.** Robot kol uzuvlarının boy ve kütle değerleri

Uzuv	Boy(mm)	Kütle (g)
Sabit gövde – omuz arası (gövde)	150	350
Omuz – dirsek arası (üst kol)	180	200
Dirsek – bilek arası (alt kol)	190	170
Bilek – tutucu arası (bilek)	80	120
Tutucu	60	50

Robot kol uzuvlarının boy ve kütle değerleri çizelge 7’de olup imalat bu değerlere göre gerçekleştirilmiştir. Bu kütlelerin oluşturacağı tork değerine karşı

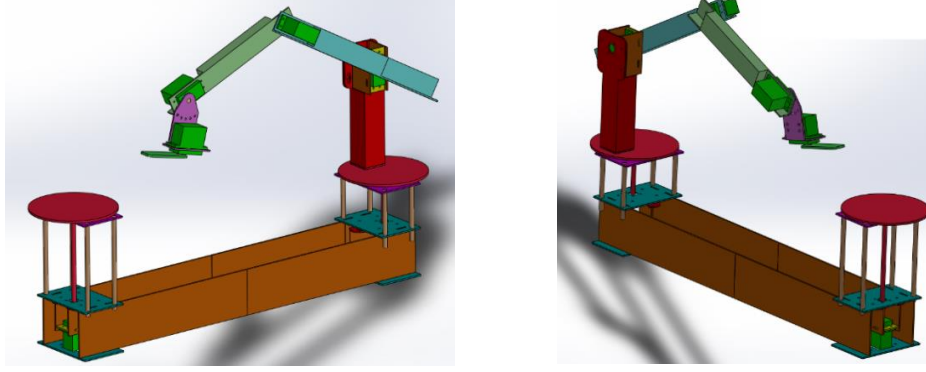
kullanılacak omuz servo motorun tork değeri 20 kgcm olarak belirlenmiştir. Bu tork değeri robot kolun 47 cm olan maksimum uzanımı için gerekli değerdir.

**Çizelge 8.** Robot kolda kullanılan servo motorlar

Marka	Kullanıldığı uzuv	Tork	Adet
Feetech	Omuz eklemi	Tork: 6V/16,5 kg.cm- 7.4V/20kg.cm	1
Power HD 1501 MG	Dirsek eklemi	Tork : 4.8V/15,5kg.cm – 6V/17kg.cm	1
Tower pro MG995	Gövde, Bilek, tabla ve tutucu eklemleri	Tork: 4.8V/ 9,4kg.cm – 6V/11kg.cm	4

Servo motorların kullanılmasındaki amaç, servo motorların küçük yapılarına rağmen yüksek torklara (Çizelge 8) sahip olması ve içlerinde bulunan pozisyon geri beslemeli kontrol sisteminin olmasıdır. Böylelikle robot kolu istenilen pozisyona daha hassas bir şekilde gitmesi sağlanmıştır. Ayrıca

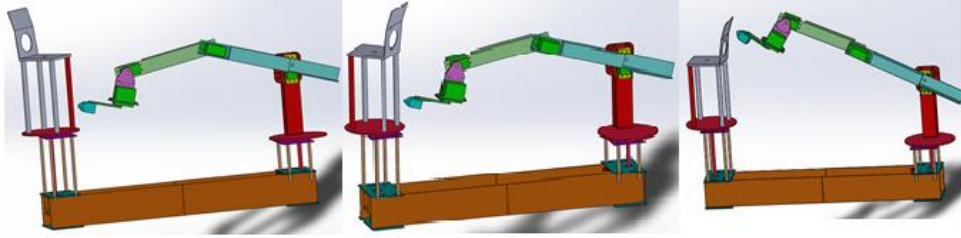
SOLIDWORKS katı modellemeyle montajlanarak uygulamadaki olası montaj problemlerinin önüne geçilmiştir (Şekil 4a), (Şekil 4b). Yukarıdaki ölçülere göre temin edilen malzemelerle robot kolun imalatı yapılmıştır (Şekil 3).



(a)

(b)

Şekil 4. (a), (b) Robot kol SolidWork montajı



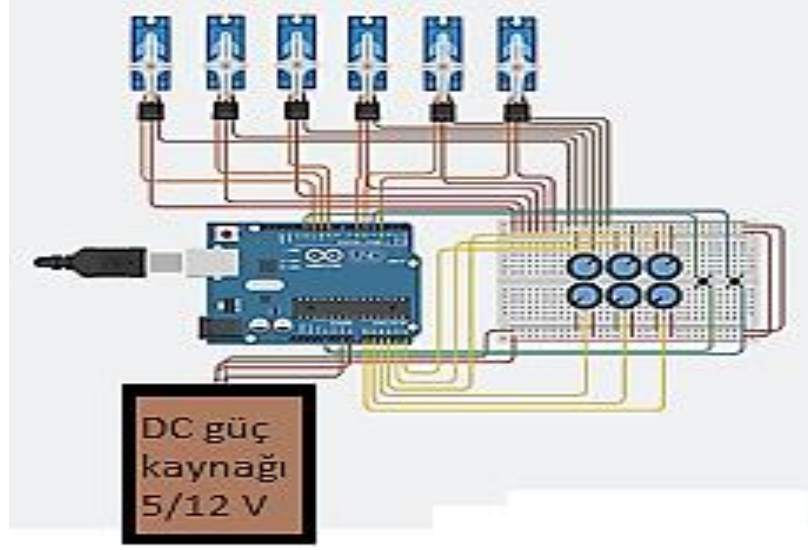
Şekil 5. Döner tabla ile boyama pozisyonlama

Şekil 5'te görüldüğü üzere çalışma kapsamında yapılan robot platformunda yer alan döner tabla sayesinde boyanacak parçanın tüm yüzeyine ulaşılabilecektir. Böylelikle ürünün boyanma işleminde zamandan tasarruf edilerek enerji maliyetleri düşürülmüş olacaktır. Ayrıca bu boyama platformu sayesinde boyama operatörüne ihtiyaç olmadan tüm süreç tamamlanmış olacak ve insan sağlığının korunmasına katkı sağlanacaktır.

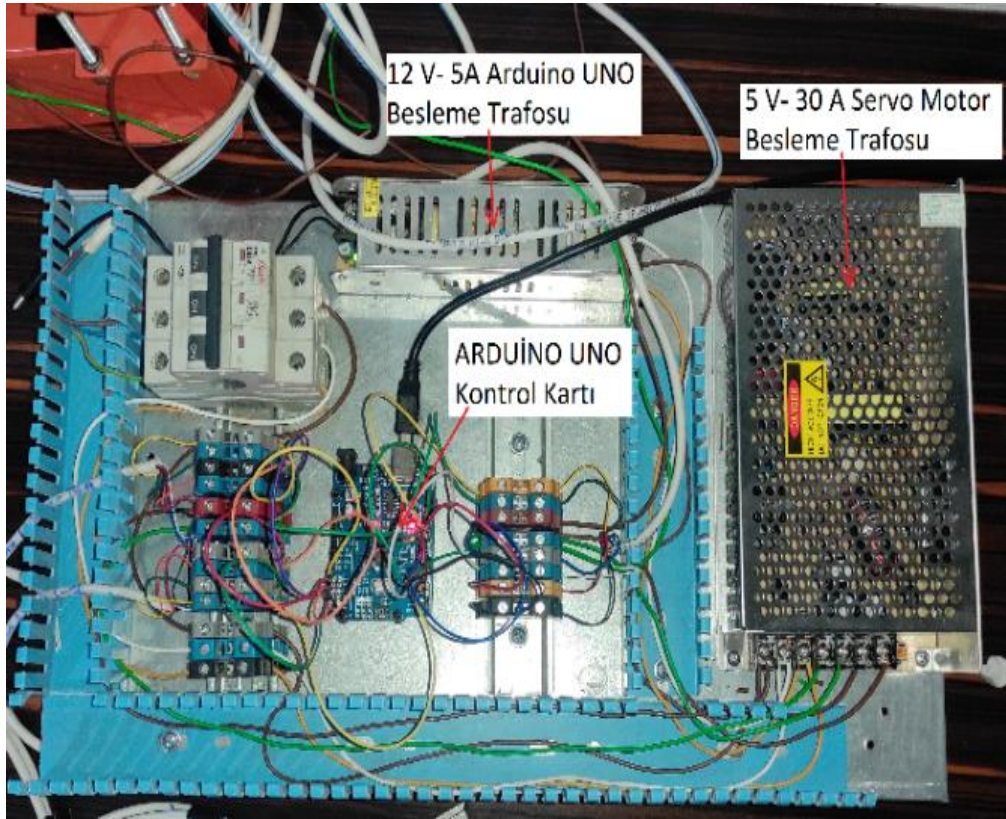
#### **Elektronik devre tasarımı**

Robot kolda kullanılan servo motorların (Çizelge 8) manuel olarak hareket ettirmek için X-Y eksenlere sahip iki eksenli joystickten dört adet kullanılmıştır. Joystickler aracılığıyla robot kolun tutucu uzvuna monte edilmiş boyama nozulunun istenilen koordinata gitmesi sağlanmıştır.

Belirlenen konumdaki nozulun pozisyonunu bütün servo motorların açılma değerlerini kayıt etmek ve bu kayıt edilen dataların tekrar çalıştırılmasında kullanılmak üzere iki adet buton kullanılmıştır. Bu işlemleri kontrol etmek için açık kaynaklı Arduino UNO serisi kart kullanılmıştır. Arduino, açık kod kaynaklı olduğu için programlama bilgilerine kolay bir şekilde erişim sağladığından tercih edilmiştir. Bu kartlara çeşitli ilaveler yapılarak robot kola farklı özellikler kazandırmak mümkündür. Bu projemizdeki platformda robot kol kısmı 5 serbestlik derecesine ilave olarak döner tabla ile birlikte 6 serbestlik derecesine sahip bir yapıdır. Böylelikle daha fonksiyonel bir yapı elde edilmiştir.



Şekil 6. Elektronik devre (Tinkercad, 2022).



Şekil 7. Kontrol panosu



Şekil 8. Dörtlü joystick



Şekil 9. Tekli joystick (direnç.net, 2022)

Devre şemasında görüldüğü gibi Arduino Uno, servo motorlar, güç kaynağı ve joysticklerin içindeki potansiyometreler kullanılarak kontrol devresi oluşturulmuştur. Sinyal uçları ise Arduino'nun sinyal genişlik modülasyonuna (PWM) sahip 3, 5, 6, 9, 10 ve 11 numaralı pinlere bağlanarak servo motorların PWM ile kontrolü sağlanmıştır. Potansiyometreler A0, A1, A2, A3, A4 ve A5 analog pinlere bağlanarak giriş pini olarak tanımlanmıştır (Şekil 6). Oluşturulan devreye göre malzemeler temin edilerek kontrol panosu (Şekil 7) imal edilmiştir. Robot kolun kullanımını kolaylaştırmak için iki eksenli joystickler (Şekil 9) bir araya getirilip, tasarlanan dörtlü (Şekil 8) joystick imal edilmiştir.

## SONUÇLAR

Yapılan çalışmada robot kolun yörünge takibinde gerekli olan değişkenler ve sabit değerler belirlenerek DH tablosu oluşturulmuştur (Çizelge 1). İleri kinematik analiz yapılarak, değişken açılara ve sabit değerlere bağlı olan tutucu ucun üç boyutlu uzayda konumu belirlenmiştir (eşitlik 33. , eşitlik 36. , eşitlik 40.). İmal edilen robot kolda, tutucu ucun maksimum uzanımının 470 mm, minimum uzanım 60 mm olduğu belirlenmiştir. Robot kolun eklem dönüşlerine bakıldığında, gövde, omuz ve dirsek uzuvlarının 180°, bilek ve tutucunun 270° dönmesinin sebebi servo motorların dönüşlerinin kısıtlanmasından dolayıdır. Döner tablada ürünlerin tam tur atabilmesi için

360° dönebilen servo motor kullanılmıştır. Kontrol panosu oluşturulurken ray tipi klemensler kullanılarak arıza tespitinde ve kabloların montajında oluşabilecek güçlüklerle karşı kolaylık sağlanmıştır. Arduino Uno'nun enerji beslemesinde (7-12V) 12V'luk DC adaptör, servo motorların enerji beslemesinde 5V'luk DC adaptör kullanılmıştır. Böylelikle motor ve mikro denetleyicinin zarar görmesi engellenmiştir. Güç kaynaklarının GND'leri birleştirilerek mikro denetleyicinin ve servo motorların referans noktasının birleştirilmesi sağlanmıştır. Yapılan programla robot kol tutucu ucunun istenilen belirlenen pozisyonları kaydetmesi sağlanmıştır. Böylelikle ürün değişiminde çok fazla değişikliğe ihtiyaç duyulmadan robot kolun çalışmaya adapte edilmesi sağlanır.

Sonuç olarak yapılan bu uygulamalar sonucunda küçük ve orta işletmeler içinde robotik sistemlerin boyama robotu olarak erişilebilir ve uygulanabilir bir sistem olduğu ortaya konulmuştur. İleriki çalışmalarda, bu robot kolun tutucu ucu değiştirilerek farklı amaçlar için kullanılan bir robot platformu üzerine çalışılması amaçlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

Abdellatif, M. 2012. Design of an autonomous wall painting robot. In First International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems. Okayama, Japan.



- Aboodi, S. A. K. 2022. “Emg işaretleri ile kontrol edilen robot kol tasarımı.” Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Azizi, U. 2020. “Altı serbestlik dereceli robot kolu tasarım, modelleme ve imalatı” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü eğitim Enstitüsü.
- Buğday, M. 2018. “Endüstriyel robot kollarının tasarımından kaynaklanan ölü yüklerin sonlu elemanlar yöntemi ile optimize edilmesi ve işletme maliyetlerine etkisinin incelenmesi.”, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chen, W., Li, X., Ge, H., Wang, L., & Zhang, Y. (2020). Trajectory planning for spray painting robot based on point cloud slicing technique. *Electronics*, 9(6): 908.
- Direnç.net, 2022. [Erişim tarihi: 12.10.2022], <https://www.direnc.net/arduino-xy-joystick-modul-1>
- Dokuzlu, S. 2015. “4 Serbestlik Dereceli Robot Kolu Kinematik Denklemlerinin Destek Vektör Makinası ile Çözümü.”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Evdüzen, M. R. 2021. “Derin pekiştirmeli öğrenme ile robot kol tork kontrolü.” Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hız, O. 2019. “Cisimleri renklerine göre seçen PLC kontrollü robot kol tasarımı ve uygulaması.” Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- IRF, 2022. “Dünya robotik Raporu” [Erişim tarihi: 01.10.2022], [https://ifr.org/downloads/press2018/2022\\_WR\\_extended\\_version.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf)
- Karaca, M. M. 2020. “Endüstriyel amaçlı küresel robot kolu ve tutucunun tasarımı ve kontrolü.” Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Makomo, T. J. 2020. “3 boyutlu nesne algılaması ile çalışan robot kolu otonom taşıma sistemi tasarımı.” Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özğören, M. 2015. “Robot kinematiği, seri ve paralel manipülatörlerin analitik ve yarı-analitik yöntemlerle konum ve hız analizleri”, Çalıştay 31.08.-03.09.2015 Gaziantep s:23-26
- Özüdoğru, F. 2020. “Endüstriyel robot kolu modelinin hedef konum eklem açılarının yapıcı sinir ağı ile kestirimi ve kontrollü yörünge uygulaması” Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sarıaltın, E. 2017. “5 Eksenli Endüstriyel Robot Kol.” Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Seçil, S. 2015. “Endüstriyel robot kolları için kolay programlama yöntemi geliştirme.” Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tinkercad, 2022. [Erişim tarihi: 12.10.2022], <https://www.tinkercad.com/dashboard>

- Yalvaç, M. 2015. “Cerrahi amaçlı bir robot kolunun tasarımı ve uzaktan kontrolü.” Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldırım, G. 2021. “Üç eksenli bir robot kolun kontrol metodların incelenmesi ve verimlilik analizi” Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü eğitim Enstitüsü.
- Yildirim, M. Y. 2019. “Gerçek zamanlı görüntü işleme temelli al-bırak yapabilen endüstriyel robot kol.” Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yüksel, G. 2018. "Dört serbestlik dereceli robot kolun 2-DOF PID ile kontrolü/2-DOF PID control of four degrees of freedom robotic arm." Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zbiss, K., Kacem, A., Santillo, M., & Mohammadi, A. (2022). Automatic Collision-Free Trajectory Generation for Collaborative Robotic Car-Painting. IEEE Access, 10, 9950-9959.