

T.C.
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN DÖNER TABLALI
BOYAMA ROBOT KOL TASARIMI VE İMALATI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET ARİN

DANIŞMAN
DOÇ. DR. YUSUF BAŞOĞUL

ADİYAMAN, 2023

ÖZET

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN DÖNER TABLALI BOYAMA ROBOT KOL TASARIMI VE İMALATI

Mehmet ARİN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Adıyaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 09/2023

Danışman: Doç. Dr. Yusuf BAŞOĞUL

Bu çalışmada, endüstriyel olarak seri üretimi yapılan ürünlerin dekoratif veya korozyona karşı koruma amaçlı boyama işleminde işçi hatalarını ortadan kaldırmak ve ürün çıktılarını belli standartlara sahip olmasını sağlamak amacıyla döner tablalı, toplamda altı serbestlik dereceli (6DoF) robot kol tasarım ve imalatı yapılmıştır. Robot kolun ileri ve ters kinematik analizlerinde Denavit-Hartenberg yönteminden faydalanılmıştır. Robot kolun tasarım ve imalatında iç yapısında kendine ait sürücü devresine sahip servo motorlar kullanılmıştır. Böylelikle robot kolun istenilen konuma gitmesini sağlayan geri bildirimi servo motor sürücüsü aracılığıyla sağlanmıştır. Motorların hareketleri Arduino Uno mikroişlemcisi kullanılarak sağlanmıştır. Servo motorların kontrolü PWM (sinyal genişlik modülasyonu) sinyalleri kullanılarak elde edildiği için servo motorlar Arduino Uno'nun PWM pinlerine bağlanarak eksen hareketleri sağlanmıştır. Endüstriyel olarak üretilen ürünlerde çeşitlilik çok fazla olduğundan ürünlerin boyanmasında robot kolun boyama işlemine uyum sağlayabilmesi için Arduino IDE'de robot kolun hareket yörüngesini, öğren ve uygula şeklindeki alt iki program aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Öğrenme işlemi boyanacak ilk ürünün uygulama operatörünün kumanda kolu yardımıyla yapılan hareketlerinin kayıt edilmesiyle gerçekleştirilir. Kayıt edilen hareket yörüngesi sonraki ürünlere uygulanarak boyama işlemi gerçekleştirilir. Bu robot kolla boyama özelinde iki işlemin kolaylaştırılması sağlanmıştır. Birincisi döner tabla kullanılarak boyanacak ürünün döndürülme işlemi tabla aracılığıyla gerçekleştirilerek, böylelikle ürünün arka yüzüne erişimin kolaylaşması sağlanmıştır. İkincisi ise ürün değiştiğinde, yeni ürün için operatörün sadece bir ürünü boyayarak hareket yörüngesinin elde edebilmesidir. Böylelikle operatörün kod yazma gibi karmaşık bir işlemi yapmasına ihtiyaç duymaması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel; Robotik kol; Sprey boya; Döner tabla; Robot.

ABSTRACT

DESIGN AND MANUFACTURING OF TURNABLE PAINTING ROBOT ARM FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS

Mehmet ARİN

Department of Mechanical Engineering

Adıyaman University, Graduate School of Education, 09/2023

Advisor: Doç. Dr. Yusuf BAŞOĞUL

In this study, a total of six degrees of freedom (6DoF) robot arm with a rotary table was designed and manufactured in order to eliminate worker errors in the decorative or corrosion protection paint process of industrial mass-produced products and to ensure that the product outputs have certain standards. Denavit-Hartenberg method was used in the forward and inverse kinematic analysis of the robot arm. In the design and manufacture of the robot arm, servo motors with its own driver circuit are used in its internal structure. Thus, the feedback that enables the robot arm to go to the desired position is provided by the servo motor driver. The movements of the motors are provided by using Arduino Uno microprocessor. Since the control of servo motors is achieved by using PWM (signal width modulation) signals, axis movements are provided by connecting servo motors to PWM pins of Arduino Uno. Since there is a lot of variety in industrially produced products, the robot arm's trajectory of motion in the Arduino IDE has been realized through two sub-programs as learn and apply, so that the robot arm can adapt to the painting process in painting the products. The learning process was carried out by recording the movements of the application operator of the first product to be painted with the help of joysticks. The dyeing process was carried out by applying the recorded motion trajectory to the next products. Two processes are facilitated for painting with this robot arm. First, the product to be dyed is rotated using a rotary table, thus facilitating access to the back of the product. The second is that when the product changes, the operator can obtain the trajectory of movement for the new product by painting only one product. Thus, it is ensured that the operator does not need to perform a complex operation such as writing code.

Keywords: Industrial; Robotic arm; Spray paint; Turntable; Robot.

ÖNSÖZ

“ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN DÖNER TABLALI BOYAMA ROBOT KOL TASARIMI VE İMALATI” adlı tez çalışmasında endüstriyel hayatın birçok noktasında yer alan robot kolların boyama özelinde, işlem kolaylaştırma ve ürün kalitesini arttırmayı amaçlamıştır. Bu çalışmayla bir robot kolun nasıl tasarlanacağı, tasarımın nasıl imal edileceği, imalatı yapılan robot kolun programlanma mantığının nasıl olması gerektiği ve elde edilen tecrübe ve bilgi ışığında robot kol geliştirmenin nasıl yapılabileceğinin aşamaları tecrübe edilmiştir.

Bu tezin hazırlanmasında bana yardımlarını esirgemeyen değerli tez danışman hocam Doç. Dr. Yusuf BAŞOĞUL ve bu çalışma boyunca hep yanımda olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Burak TATAR olmak üzere bu süreçte büyük küçük katkı sağlayan herkese şükranlarımı sunarım.

Adıyaman-2023

Mehmet ARİN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Adıyaman Üniversitesi tarafından kullanılan “ bilimsel intihal tespit programı ” ile tarandığını ve hiç bir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Mehmet ARİN

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI.....	İ
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	İİ
ÖZET	İİİ
ABSTRACT	İV
ÖNSÖZ.....	V
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XII
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	2
2.1. Literatür	2
2.2. Robot ve Tarihi.....	8
2.3. Endüstriyel Robot.....	8
2.3.1. Sürücü teknolojilerine göre endüstriyel robotlar	11
2.3.2. Çalışma uzayı geometrilerine göre endüstriyel robotlar	11
2.3.2.1. Kartezyen robot (PPP)	12
2.3.2.2. Silindirik robot (RPP).....	13
2.3.2.3. Küresel robot kol (RRP)	14
2.3.2.4. Mafsallı robot kol (RRR).....	14
2.3.2.5. Scara robot kol (RRP).....	15
2.3.3. Hareket kontrol metotlarına göre endüstriyel robotlar	16
2.3.3.1. Noktadan noktaya hareket eden robotlar	16
2.3.3.2. Sürekli yörüngede hareket eden robotlar	16
3. MATERYAL VE METOT.....	17
3.1. Materyal.....	17
3.1.1. Döner tablalı robot kolun mekanik imalat aşamaları	17
3.1.2. Elektronik kontrol ünitesi bağlantı tasarım ve imalatı	20
3.2. Metot	23
3.2.1. Robot kol tasarım basamakları	23
3.2.2. Mekanik Tasarım.....	24

3.2.2.1. Robot kolun hareket tip ve kinematiki.....	24
3.2.2.2. Robotlarda temel dönme hareketi	25
3.2.2.3. Homojen dönüşümler.....	26
3.2.2.4. Yalnız öteleme hareketi	27
3.2.2.5. Yalnız dönme hareketi	27
3.2.2.6. Robot kolun ileri yön (düz) kinematik denklemleri.....	28
3.2.2.7. Denavit-Hartenberg yöntemi (D-H yöntemi)	29
3.2.2.8. Denavit-Hartenberg yönteminin dönel tablalı endüstriyel boyama robot kola uygulanması.....	32
3.2.2.9. Robot kolun geri yön (ters) kinematik denklemleri.....	44
4. BULGULAR	59
5. TARTIŞMA	60
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
6.1. Sonuçlar.....	61
6.2. Öneriler.....	62
KAYNAKÇA	63
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Eklem hareket tipleri [30]	11
Tablo 2.2. İlk üç eksenin çalışma uzayına göre sınıflandırılması [30].....	12
Tablo 3.1. Robot kol uzuvlarının boy ve kütle değerleri.....	17
Tablo 3.2. Robot kolda kullanılan servo motorlar.....	18
Tablo 3.3. D-H yöntemine göre parametre tablosu	33
Tablo 3.4. D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri.....	34
Tablo 3.5. D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri.....	34
Tablo 3.6. D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri.....	35
Tablo 3.7. D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri.....	36
Tablo 3.8. D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri.....	36
Tablo 3.9. İleri kinematik analiz sonuçları (a)	42
Tablo 3.10. İleri kinematik analiz sonuçları (b)	42
Tablo 3.11. İleri kinematik analiz sonuçları (c)	43
Tablo 3.12. İleri kinematik analiz sonuçları (d)	43
Tablo 3.13. İleri kinematik analiz sonuçları (e)	43
Tablo 3.14. İleri kinematik analiz sonuçları (f).....	44
Tablo 3.15. İleri kinematik analiz sonuçları (g)	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Dünya genelinde faaliyet gösteren robot sayısı [1]	1
Şekil 2.1. Kartezyen robot kolun çalışma alanı[5].....	12
Şekil 2.2. X, Y, Z, eksenli kartezyen robot [32]	13
Şekil 2.3. X, Y, Z, eksenli kartezyen robot(köprü tipi CNC freze)	13
Şekil 2.4. Silindirik robot kolun çalışma alanı [32].....	13
Şekil 2.5. Küresel koordinat sistemi [34]	14
Şekil 2.6. Küresel robot kolun çalışma alanı [33].....	14
Şekil 2.7. Mafsallı robot kol [5].....	15
Şekil 2.8. Scara robot kol çalışma alanı [5]	15
Şekil 3.1.Robot kol SolidWorks montajı(a).....	19
Şekil 3.2. Robot kol SolidWorks montajı(b)	19
Şekil 3.3. Döner tabla ile boyama pozisyonlama.....	19
Şekil 3.4. Robot kol genel görünüm	20
Şekil 3.5. Elektronik devre[39].....	21
Şekil 3.6. Dörtlü kumanda kolu	22
Şekil 3.7. Tekli kumanda kolu [33]	22
Şekil 3.8. Kontrol panosu	22
Şekil 3.9. İleri ve geri yön kinematik girdi-çıkı büyüklükleri [35]	25
Şekil 3.10. Sabit ve hareketli eksen takımları [36]	25

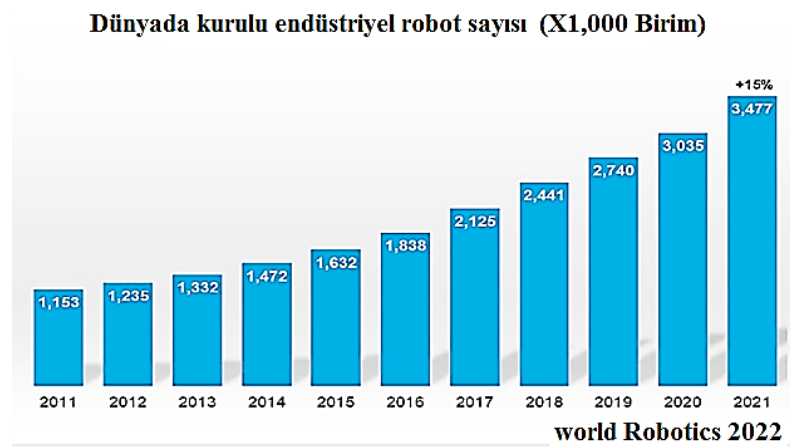
Şekil 3.11. D-H değişkenlerinin belirlenmesi [37]	29
Şekil 3.12. Sağ el kuralı [38]	30
Şekil 3.13. D-H yöntemine göre eksen takımlarının yerleştirilmesi.....	32
Şekil 3.14. D-H yöntemine göre eksen takımlarının düzeltilmesi	33
Şekil 3.15. İleri kinematik analiz sonucu (a)	42
Şekil 3.16. İleri kinematik analiz sonucu (b)	42
Şekil 3.17. İleri kinematik analizi sonucu (c)	43
Şekil 3.18. İleri kinematik analiz sonucu (d)	43
Şekil 3.19. İleri kinematik analiz sonucu (e)	43
Şekil 3.20. İleri kinematik analiz sonucu (f).....	44
Şekil 3.21. İleri kinematik analiz sonucu (g)	44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

DoF	: Serbestlik derecesi (Degrees of Freedom)
D-H	: Denavit-Hartenberg
PWM	: Sinyal Genişlik Modülasyonu
Arduino IDE	: Arduino için entegre geliştirme ortamı
IFR	: International Federation of Robotics
R^3	: Üç boyutlu uzayı temsil eder
MATLAB	: Matematik analiz programı
DKP	: Soğuk olmasına rağmen kolay şekil alabilen, düşük karbon oranına sahip sıcak çeliğe verilen addır.

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel olarak üretilen ürünlerin büyük çoğunluğu çelik, bakır ve ahşaptan üretilmektedir. Bu ürünleri aşındırıcı dış etkilere korumak ve dış görseelliği sağlamak amacıyla boyama veya kaplama işlemlerine tabi tutulmaktadır. Genellikle zorlu doğa ve ortam şartlarından dolayı kaplama işlemi tercih edilir. İmalat sanayide ürünlerin büyük çoğunluğu boyama işlemine tabi tutulur. Boyama işleminde, öncelikle üretilen ürünün boyamaya hazır hale getirilmesi gerekir. Bu ön hazırlık ve boyama işleminde kullanılan kimyasallar ve aşındırıcı malzemeler çalışan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Bu etkileri azaltmak ve ürünün her zaman aynı standartlarda üretilebilmesi için robot kol teknolojisinin üretime dâhil edilmesi günümüz sanayi hayatında zorunlu bir hal almıştır. Endüstriyel olarak üretilen ürünler genellikle birçok firma tarafından üretilmektedir. Böylelikle muadil ürünler arasında bir rekabet oluşmaktadır. Bu rekabet içinde kalıcı olabilmek için ürünlerin her zaman aynı kalitede üretilmesi gerekmektedir. Bu standartları yakalamak ve rekabette kalıcı olabilmek için robotik kol teknolojisinin kullanılması zaruridir. Dünyadaki halihazırda kullanılan robot koldaki artış bu zarureten kaynaklanmaktadır. IFR (International Federation of Robotick)'nın hazırladığı rapora bakıldığında 2021 yılında %15 artışla kullanılan robot kol sayısının 3.500.000 adete dayandığı görülmektedir [1].



Şekil 1.1. Dünya genelinde faaliyet gösteren robot sayısı [1]

Robot kol, boyama işleminde kullanılarak çalışanların hataları ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Boyama işleminde başlıca hatalar, dokunma ve boya akma izlerinin kalması olarak söylenebilir. Tasarımını yaptığımız döner tablalı robot kol, boyama işleminde ürün çevirme işlemlerinde oluşabilecek dokunma izlerinin oluşmasını engellediğinden ürünün daha kaliteli boyanmasını sağlar. Döner tabla ürünün pozisyonunu değiştirerek robot kolun boyama esnasında ürünün dört bir yanına ulaşmasını kolaylaştırmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Literatür

Literatürde robotik boyama ve robotik boyamada kullanılabilecek bazı çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- Boyanacak üç boyutlu, değişken yüzeyli bir ürünün lazer tarayıcı vasıtasıyla yüzeyinden alınan yörünge noktalarının enterpolasyon analiz yöntemi kullanılarak boyama yörüngesine dönüştürülerek üç boyutlu robotik kol boyama işlemi gerçekleştirilmiştir [2].
- Binaların iç mekânlarının boyanmasına yönelik hareket serbestisine sahip mobil araçların üzerine yerleştirilen robotik kolun lazer veya ultrasonik sensörlerle içyapının haritalandırılmasıyla oluşturulan yörünge vasıtasıyla robot kolla boyama işlemi gerçekleştirilmiştir [3].
- Araba gibi büyük ürünlerin boyanmasında birden fazla robotun aynı anda çalışması gerekmektedir. Bu çalışmalarda robotların çalışma uzaylarının çakışmaması gerekmektedir. Boyama işleminde aynı anda kullanılacak birçok robotun yörüngelerinin entegrasyonuna yönelik çalışmalar yapılmıştır [4].
- Robot kol yörünge eldesin de kullanılan ileri ve geri (ters) kinematik analizlerinde elde edilen denklemlerin sayısı serbestlik derecesine bağlı olarak artmaktadır. Bundan dolayı serbestlik derecesi fazla olan yörünge çözümlemelerinde hata yapma riski artmaktadır. Bu riski ortadan kaldırmak için ters kinematik analiz yapmadan robot kol yörünge tespiti için yapıcı sinir ağı yaklaşımı kullanılarak giriş ve çıkış değerlerinin elde edilmesiyle robot kol motorlarına verilmesi gereken eklem açı değerlerin kestirimi ve kontrolü sağlanmıştır. Bu yöntem ile elde edilen yörünge mantığı boyama robot kollar içinde kullanılabilir niteliktedir [5].
- Üç boyutlu nesnelerin 3B görüntüleme sistemi ile hareketli bir band üzerinden algılayarak nesnelerin şekil ve renklerine göre ayırabilen robot kol istifleme, ayırma gibi işlemlerde kullanılmıştır. Bu işlemler görüntüleme ve robot kolun ortaklaşa çalışmasıyla elde edilmiştir. Kamera aracılığıyla elde edilen görüntüler MATLAB programıyla işlenerek robot kolun cisme yönelmesi ve istenilen istifleme, ayırma, paketleme gibi işlemlerin yapılması sağlanmıştır. Bu çalışma mantığının bir hareketli band üzerinde hareket halindeki karışık olarak bulunan nesnelerin algılanarak boyama işleminde kullanılabileceği öngörülebilir [6].

- Bir robot kolun çalışma sınırlarında bulunan cisimlerin renklerine göre algılayıp bu nesneleri birbirinden ayırarak tasnifleme işlemi yapabilen robot kol çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile boyanacak ürünlerin boyama standına karışık gelmesi durumunda boyanacak ürünlerin seçiminde kullanılabileceği öngörülebilir [7].
- Boyama işlemlerinde kullanılabilecek bir diğer robot kol çalışmasında; robot kolun uç tutucusunu kartezyen koordinat sisteminde bulunduğu konum ve pozisyonun doğruluğu için, robot kolda kullanılan doğru akım motorlarının stabil bir çalışma sergilemesiyle mümkündür. Bu çalışmada PID ve 2-DOF PID kontrol yöntemlerinin kıyaslanması sonucunda 2-DOF PID kontrolün daha doğru sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Motorların stabil çalışmasıyla boyama işleminin daha kaliteli olacağından bu çalışmadaki veriler boyama robotlarında kullanılabilir [8].
- Belirlenmiş bir alanda bulunan nesnelerin anlık görüntülerinin stereo kamera sistemiyle cisimlerin üzerinden yansıyan ışınları algılayarak optik görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntüler kamera içerisinde elektriksel sinyallere çevrilerek analog görüntülere dönüştürülür. Analog görüntüler çeşitli işlemlere tabi tutularak sayısal görüntüler elde edilir. Böylelikle görüntüler yardımıyla renk ve konum bilgilerine ulaşılarak robot kolun hareket yörüngesi elde edilerek nesnelerin renklerine göre istenilen konuma taşınması sağlanmış olur. Bu çalışmadaki renk algılama işleminden faydalanarak boyama işleminde boyama kalitesi arttırabilir. Böylelikle ürün üzerindeki boya tonunun daima aynı olması sağlanabilir [9].
- Beş serbestlik derecesine sahip bir robot kolun tasarlanmasında yapılan işlemlerin anlatıldığı bu çalışmada; fiziksel olarak imalat aşamalarının ve imalatla kullanılan mekanik ve elektronik parçaların genel olarak özelliklerine değinilmiştir. Bu tür bir robot kolun birçok alanda rahatlıkla kullanılabileceği üzerinde durulmuştur. Endüstriyel olarak kullanılan robot kollar çoğunlukla beş serbestlik derecesine sahiptir. Böyle bir robot kolun uç işlevcisinin değiştirilmesiyle istenilen boyama, yer değiştirme, kaynak, montaj gibi birçok işlem için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [10].
- Genelde robot kollarda ileri ve geri(ters) kinematik analizden elde edilen yörüngeler kullanılmıştır. Yörüngelerin oluşturulması işlemi robot kol operatörlerinin yapabileceği bir işlemdir. Dolayısıyla işletmelere ek bütçeler getirdiğinden tercih edilmemektedir. Bu sorunun ortadan kaldırılması için işlem yapılacak ürünün lazer algılayıcı yardımıyla üç boyutlu dijital görseli çıkarılarak ürün üzerinde işlem yapılacak noktalar belirlenerek

kontrol algoritması yardımıyla yörünge tasarımı yapıp, robot kol yörüngesi kolay bir şekilde elde edilmiştir [11].

- Bir robot kolun verimliliği robot kolun istenilen pozisyona en hızlı ve hatasız olarak ulaşmasının bir ölçüsüdür. Robot kolun hızlı ve hatasız olarak çalışmasında kullanılan PID kontrol yöntemidir. Yapılan bu çalışmada PID kontrol yöntemi geniş bir çerçevede incelenmiştir. Bu kontrol sisteminin robot kola uyarlanmasıyla boyama robotlarında hata miktarının azalmasına neden olacağından ürünlerin kalitesinin artmasına yardımcı olacaktır [12].
- İki eksenli bir küresel robot kola, pnömatik tutucu yardımıyla silindirik ve kulaklı cisimleri kavrama özelliğine sahip robot kol tasarlanmıştır. Bu tasarımda ikinci eklem ve tutucu arasına kayış kasnak ikilisi kullanılarak taşınacak nesnenin kavrandığı pozisyonu ile taşınacak yere taşınabilmesiyle üçüncü bir ekleme ihtiyaç duyulmamıştır. Bu robot kolda eklem açı değerleri düz ve ters kinematik analiz yöntemi ile bulunmuştur. Lagrange-Euler yöntemi ile robot kolun eklem torku, kütle matrisi, atalet tensörü dinamik denklemleri MATLAB'ta işlenerek, kontrol programına tanımlanıp simülasyonu yapılmıştır. Böylelikle sistemin çalışabilirliği test edilmiştir [13].
- Robot kolların imalatında kullanılan motor ve malzemenin karakteristik değerleri maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Bu etki göz önüne alınarak malzeme ve motorlarda optimizasyona gidilmesi gerekmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında robot kolda kullanılan üç farklı malzemenin kıyaslaması yapılmıştır. Bu kıyaslamada Ansys Shape Optimizasyon modülü kullanılarak robot kol üzerinde muhtelif yerlere kanallar açılarak robot kol ağırlık yönünden hafifletilmiştir. Böylelikle motor seçiminde daha küçük motorlar kullanılabileceği görülmüştür. Sonuç olarak robot kol üretiminde maliyetlerin düşürülmesi sağlanmıştır [14].
- Sağlık alanında kullanılan robot kollar cerrahi operasyonları daha titiz bir şekilde yapabilmektedir. Ameliyatlarda iki adet robot kol kullanılır. Birincisi operatör doktorun kullandığı usta (master) kol diğeri ise ameliyathanede operasyon yapan slave (köle) kol olmak üzere iki unsurdan oluşur. Doktor tarafından ameliyathaneden gelen gerçek zamanlı görüntülerden faydalanarak operasyon komutlarının köle kola gönderilerek ameliyatın yapılması gerçekleştirilir. Bu tarz bir çalışma tehlikeli alanlarda boyama işleminin yapılması gereken yerlerde kullanılabilir [15].

- Kablosuz olarak bir robot kolun kontrolünü gerçekleştirildiği bu çalışmada robot kolun uzaktan kontrolü için bir eldiven üzerine yerleştirilen eğim sensörleri yardımıyla, robot kolu hareket ettiren operatörün eklem hareketlerini algılayan uzaktan erişim modülünün robot kol üzerindeki servo motorları hareket ettirerek operatörün hareketlerinin taklit edilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, boyama işlemlerinde robot kola boyanacak ürünün sisteme tanıtılması için kullanılabilir [16].
- HPKON yarışması için tasarlanan boyama robot kol; boyamada maksimum kaliteyi gerçekleştirmek için boya akış debisini değiştirebilen, boyanacak yüzeye her zaman eşit mesafede işlem yapabilen bir tasarım uygulaması olarak yapılmıştır. Bu tasarımda hareket pnömatik tahrik sürücüler ile sağlanmıştır. Yörünge kodları ise CNC'lerde kullanılan G kodları kullanılmıştır [17].
- Otomotiv boyahanelerinde PLC ve PID kontrol sistemlerinin kullanıldığı, karteyen boyama robotunun entegre edildiği ve sisteme dahil edilen tüm unsurların birbiriyle radyo dalgaları aracılığıyla haberleşebildiği bütünlük bir boyama sistemi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmayla boyama robotunun ortam verilerine bağlı ve otonom olarak gerekli analizleri yapıp boyama kalitesinin daima aynı standartta olması hedeflenmiştir [18].
- Bir ürünün alt basamağı olarak kabul edilebilecek bir çalışmada resim çizibilme özelliğine sahip bir robot kol tasarlanmıştır. Bilgisayara aktarılan bir resmin MATLAB programı aracılığıyla işlenip karakalem formatına dönüştürülmüştür. Çizgiler halinde olan veriler Arduino kontrol kartı işletim sistemi aracılığıyla algılanıp, takip edilerek sisteme aktarılan resmin kopyasının elde edilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir [19].
- Ultrasonik sensörler yerleştirilen hareketli bir tabla üzerine monte edilen robot kolun bina iç mekânlarında kullanılmasına uygun hale getirilmiştir. Hareketli tabla ve robot kolun yörünge takibini gerçekleştiren bir kontrol sistemi kullanılmış olup boyama işleminin otonom olarak yapılmasına olanak sağlanmıştır [20].
- Altı serbestlik derecesine sahip bir robot kol boyama işleminde kullanılmak üzere ileri ve geri kinematik analizleri yapılarak manipulatörün kartezyen koordinatlarda konum ve yönelimine uygun bir robot kol SolidWorks programı yardımıyla ölçülendirilmiştir. Elde edilen robot kol birçok parametreyi içerdiğinden hesaplamalar MATLAB programı yardımıyla basitleştirilerek, düzenli şekilli iş parçasının yüzey denklemleri bulunmuştur. Böylelikle bu denklemler aracılığıyla boyama işlemi gerçekleştirilmiştir [21].

- Düşük maliyetli bir robot kol yapabilmek için, robot kola yaptırılması düşünülen işleme uygun en düşük serbestlik derecesine (DOF) sahip bir tasarım gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada 4 serbestlik derecesine sahip bir robot kolun imalatı ve simülasyonu gerçekleştirilerek ileri ve geri kinematik analizde elde edilen verilerin karşılaştırılmasında doğruluk değeri ve hataların nereden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Boyama sektöründe küçük işletmeler için maliyeti düşük bir tasarım ortaya konmuştur [22].
- Farklı tahrik sistemleri kullanılan robot kolların; elektrikli ve pnömatik tahrikler arasındaki kıyaslamada boyama ortamında patlayıcı gazlar nedeniyle elektrikli tahrik kullanıldığında robot kola ekstra mali yükler getirdiğinden robot kolun ağırlığını, güç kaynağı tüketimini, üretim ve işletme maliyetlerinin artması yönünde olumsuz katkı sağladığı fakat pnömatik tahrik kullanıldığında bu parametrelere olumlu katkı sağladığı vurgulanmıştır [23].
- Duvar boyama işleminin çoğu zaman tehlikeli ve çeşitli nedenlerden dolayı yorucu bir işlem olduğundan, bu işlemin robotlar yardımıyla yapılması uygun görülmüştür. Bu durumu ortadan kaldırmak için iki boyutlu çalışabilen ve aynı zamanda iki farklı renkte boyayı uygulayabilen bir robot tasarlanıp uygulanmıştır. Bu tasarım sistem bazında %83,98 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada robot aynı zamanda hareketli bir platforma yerleştirildiği için boyama işlemi büyük yüzeylerde de rahat bir şekilde uygulanabilmesi sağlanmıştır [24].
- Mafsallı bir boyama robotunda mafsallarını hareket ettiren sürücü çeşidi genellikle elektrikli sürücülerdir. Boyama işleminin daha hassas olabilmesi için bu sürücülerin kontrollerinin istenilen toleranslarda olması gerekmektedir. Mafsallı robot kolun istikrarlı bir hareket yapabilmesi için motorların kontrolünde PID kullanılmıştır. Böylelikle robot kolun daha kararlı ve hassas bir konumlamaya sahip olması sağlanarak boyamanın kaliteli olması sağlanmıştır [25].
- Büyük yapılı uçak ve roketler için tasarlanan 7-DOF sahip spreyci boyama robotu kalibrasyonu için robot kol ileri ve ters kinematik analiz sonucunda elde edilen geometrik yaklaşımlı denklemler yeterli gelmediğinden robot kolu oluşturan yapısal materyallerin ağırlıklarından kaynaklanan hedef yörünge sapmalarını önlemek için robot kolun kalibrasyonunda yerçekimi deformasyonun oluşturduğu hataların dikkate alınmasıyla boyama işleminin iyileştirilmesi için yapılan çalışmayla yörünge sapmalarına etki eden hataların azaltılması sağlanmıştır [26].

- Boyama robotlarında boyama işleminde seçilen yörünge maliyet ve zamanlamaya etkisi göz önüne alındığında, boyama işleminin daha optimal seviyelere taşınması gerektiğinden yörünge hareketinin optimize edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu optimizasyonun yapılmasında matematiksel bir model oluşturularak boyama esnasında; boyanın katmanlar oluşturması engellenerek yüzeydeki boya kalınlıkları minimuma indirgenip zaman, boya ve enerjiden tasarruf sağlanmıştır [27].
- Boyamada işlemler her zaman iki boyutlu yüzeylerde uygulanmaz. Boyanacak ürünlerin yüzeyleri genellikle eğrilerden oluşur. Bu eğrileri yörünge olarak boyama işleminde kullanılabilmesi için bu yörüngelerin matematiksel olarak oluşturulması gerekir. Bu amaçla karmaşık kavisli yüzeylerde B'ezier üçgen yüzey modelleme yöntemi kullanılarak spreyl boyama yörüngesi optimize edilmiştir. B'ezier ayrık nokta dizisi, mekânsal boyama yolu, üstel ortalamaya dayalı B'ezier eğrisi yaklaşımları kullanılarak uygulanmıştır [28].
- Bina dış duvar boyama robotu olarak tasarlanan iki eksenli mekanizma iki farklı sistemin birbiriyle çalışmasını amaçlamaktadır. İki Arduino kontrol kartı ile çalıştırılan robot binanın çatısından bodrumuna kadar alanı boyama için tasarlanmıştır. Bu tasarımda birinci kontrol kartı, sağa sola hareket eden spreyl püskürtücü ile boyama işlemi gerçekleştirirken diğer kart ise boyama ünitesini düşey olarak yukarı aşağı hareket ettirerek boyama işlemine yardımcı olmaktadır. Burada spreyl haznesinin küçüklüğünden dolayı sistem büyük yüzeyler için yetersiz kalmaktadır. Kullanılan ultrasonik sensörün düzlemsel yüzeylerde yeterli olduğu fakat bina girinti ve köşelerinde tutarsızlığı nedeniyle bu sistemin geliştirilebilir olduğu sonucuna varılmıştır [29].

Ülkemizde robot kol üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda direkt olmasa da robot kolun boyamada kullanılmasına yardımcı olacak bilgiler içermektedir. Yukarıdaki atıf yapılan çalışmalarda bu bilgilere değinilmiştir. Bu bilgiler ışığında endüstriyel boyamaya yönelik bir çalışma yapmak, küçük ve orta ölçekli işletmelerin boyama iş yükünü hafifletmek amacıyla robot kola adapte edilmiş döner tablaya sahip bir tasarım yapılarak bu alandaki eksikliğin giderilmesine katkı sağlanmıştır. Bu çalışmayla işletmelerde robot kolun daha kolay kullanılması için öğrenme metodu kullanılarak programlama işlemine gerek duyulmadan boyama gerçekleştirildiğinden işletmede herhangi bir çalışanın kolay bir şekilde boyama işlemini gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Öğrenme yöntemiyle beraber döner tablanın da kullanılmasıyla işletmelerde

boyama özelinde kaliteli iş gücüne gereksinim duyulmayacak ve her zaman öğrenme metoduyla yapılan boyama ile aynı kalitede ürün elde edilmiştir. Böylelikle işçi yorgunluğundan veya dikkatsizliğinden kaynaklanacak hataların ortadan kaldırılması sağlanmıştır. Bu sistemle işletmede ürün değişikliği gerçekleştiğinde robot kol kısa bir sürede sisteme adapte edilebilir. Bu boyama sistemiyle işletmelerin fonksiyonel olması sağlanabilir.

2.2. Robot ve Tarihi

Robot kelimesi; tarihsel süreç içinde “ çalışmak, işçi, ağır sıkıcı iş, köle, esir ” gibi anlamlara gelen “ robota ” kelimesinden türetilmiştir. Robotik kelimesi ilk defa Isaac Asimov tarafından kullanılmıştır. Robotiğin temellerini 1136-1208 yılları arasında yaşamış olan Ebul İz El-Cezeri atmıştır [30]. Robot olarak tanımlanan makineler genel anlamda bir işi yapabilen, gerektiğinde tekrar programlanabilen, dış ortamla çeşitli algılayıcılar vasıtasıyla temas halinde olan ve bu temaslar sonucunda elde ettiği verileri kullanabilme yeteneğine sahip mekanik veya elektro-mekanik makineler olarak tanımlanır. Bu şekilde çalışan makinelerin tarihi 3000 yıl öncesine kadar dayanır [30]. Eski Mısır, Yunan, Anadolu ve Çin medeniyetlerinde çeşitli robot uygulamalarına ve yazılı bilgilere rastlanmaktadır. M.Ö.1000 yıllarında bir Çin belgesinde Yan Shi adlı bir mucidin insan boyutunda ve görünümünde bir robot yapıp hükümdara sunduğu anlatılır. El-Cezeri suyun kaldırma kuvvetini kullanarak yeni bir sistem ve teknik kurmuştur. Birbirini takip eden ve tekrarlanan hareketler elde etmiştir. El-Cezeri’ye ait 50 cihazın çiziminin verildiği, Beyn’el İlmi ve El-Ameli’ en Nafi fi Sına’ati’l Hiyel adlı kitabın kopyaları Avrupa ve İstanbul kütüphanelerinde korunmaktadır [31].

Robot tarihi kronolojik olarak incelendiğinde; mekanik, elektrik-elektronik ve bilgisayar gibi bilimsel disiplinler de gerçekleşen gelişmeler ışığında ve endüstriyel olarak oluşan ihtiyaçların etkisi ile geliştiği görülür.

2.3. Endüstriyel Robot

Endüstriyel gelişmelerin ve benzer ürünleri üreten firma sayılarının artmasıyla rekabetçi bir ortam oluşur. Bu ticari ortamda, firmaların ayakta kalabilmesinin en etkili silahı teknolojiyi en etkin şekilde kullanmaktır. Teknolojinin kullanılmasıyla üretimi yapılan ürünlerin kaliteli ve uygun fiyatlı olması hedeflenir. Bu kaliteye ulaşmak her ne kadar kalifiye elemanla sağlansa da, kalifiye elemanın meydana getireceği ürün adedi çok küçük

miktarlarda olduğundan gerekli rekabeti sağlamak mümkün değildir. Bu ikilemin çözümü her zaman aynı kalitede ve seri üretim yapabilen makinelerle mümkündür. Bu makineler endüstride olarak robot olarak tanımlanır. Endüstriyel (sanayi) robot, şu şekilde tanımlanır:

Sanayi robotunun en kapsamlı tanımı ve robot tiplerinin sınıflandırılması “ Endüstriyel uygulamalarda kullanılan, sabit veya hareketli olabilen, üç veya daha fazla programlanabilir eksenine sahip, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir çok amaçlı manipulatör ” **ISO 8373** standartına göre yapılmıştır [30]. **EN 10218-1** Avrupa standartlarına göre ise “ Robot / Endüstriyel Robot, üç veya daha fazla aksta programlanabilen ve otomasyon teknolojisinde kullanım için sabit yere takılarak veya hareketli olarak kullanılabilen, serbest olarak programlanabilen çok amaçlı manipulatör ” olarak belirtilmiştir [30].

Robotların diğer makinelerden ayıran başlıca özellikleri; programlanabilmesi, kontrol sistemlerine sahip olması, uç işlevcisi ve programının değiştirilmesiyle farklı işlere kısa sürede yapılacak işleme adapte edilebilmesi, dış ortamdan verileri alıp yazılımında bulunan algoritmalar aracılığıyla işleyebilmesi ve karar verebilmesi olarak sıralanabilir. Endüstride kullanılan robotlar daha çok robot kol olarak tanımlanır. Robot tasarımında makine mühendisliği, bilgisayar mühendisliği, elektrik mühendisliği ve elektronik mühendisliği aktif olarak yer alır. Makine mühendisliği, robot kolun dinamik ve statik yapısıyla, elektronik mühendisliği kontrol kartları ve sensörleriyle, bilgisayar mühendisliği yazılımıyla ve elektrik mühendisliği motorlarıyla ilgilenir.

İnsanlar bedensel yapıları gereği bütün işleri her zaman aynı hassasiyetle yapabilme özellik ve gücüne sahip olmadıklarından, insan gücünün yetmediği işleri yapmak için çeşitli özellikte makineler geliştirmişlerdir. Bu geliştirilen düzenekler, ilk başlarda ilkel olmasına karşın, teknolojinin gelişmesiyle insan becerisine yakın becerilere sahip makineler elde edilmiştir. İlk önceleri mekanik olarak insanlar tarafından hareket ettirilirken diğer beşeri disiplinlerin de kullanılmasıyla bu makinelerin kendi başlarına otomatik olarak çalışması sağlanmıştır.

Sanayide kullanılmak üzere tasarlanıp imal edilen robotların, üretimde maliyetleri düşürmek, ürünlerin kalitesini ve ürün sayısını arttırmak aynı zamanda ürünlerin sürdürülebilir kalitede ve standartta üretmek olarak sıralanabilir. Çünkü insan gücü ve becerisi ile yaptığımız üretimlerde, üretimden çıkan ürünlerin her zaman aynı kalitede olması mümkün değildir. İnsanın; yorulma, dalgınlık, bıkkınlık göstermesinden kaynaklı özelliklerinden dolayı belirli standartlarda ürün çıkmasının önündeki en büyük engellerdendir. Bununla birlikte ürünlerin üretilmesi sırasında izlenen yöntemler, çalışan

sağlığını olumsuz etkilediğinden, bu gibi üretim aşamalarında makineleşmenin yani robotik sistemlerin kullanılmasının vazgeçilmez olduğu görülmektedir [30].

Robotların sanayide kullanılmasının başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir [30]:

- İşçilik maliyetlerini azaltılması ve yeni iş imkânlarının oluşturulması,
- Tehlikeli işlerde kullanılarak çalışanların korunması,
- Üretim sisteminde esneklik sağlamaı,
- Sürdürülebilir kalite kontrolün sağlamaı,
- Üretilen ürün miktarının arttırılması,
- Kalifiyeli eleman gereksiniminin azaltılması,
- Çalışmanın kesintisiz olarak devamının sağlamaı,
- İnsan gücünden daha fazla yük taşıyabilmesi,
- Üretimin daha hızlı gerçekleştirilmesi,
- Tekrarlı işlerin sürekli yapılabilmesi,
- Ürünlerde insan hatalarının azaltılması,
- Yüksek hassasiyete sahip olması,
- İşletmeye büyük oranda kâr getirmesi.

Yukarıdaki birçok faydalarının yanında bazı dezavantajları da sıralanabilir [30]:

- Program algoritmalarının dışına çıkamazlar,
- Sadece kendilerine öğretilen işlemleri yaparlar,
- Yatırım maliyetleri yüksektir,
- Bakım ve onarım maliyetleri yüksektir,
- Hatalı programlamalarda, sürekli aynı hatayı yapacağından ürün kaybına neden olurlar,
- Program hatalarında çalışanlara zarar verebilir.

Endüstriyel robotlar birçok başlık altında sınıflandırılabilir. Bunlardan bazılarını şu şekilde sıralanabilir:

1. Sürücü teknolojilerine,
 2. Çalışma uzayı geometrilerine,
 3. Hareket kontrol metotlarına göre,
- olmak üzere üç başlık altında incelenir.

2.3.1. Sürücü teknolojilerine göre endüstriyel robotlar

Genelde en yaygın üç sürücü teknolojisi kullanılır. Bunlar elektrikli tahrik, hidrolik tahrik ve pnömatik tahrik olmak üzere üç tip teknoloji kullanılır [30]. Elektrik tahrik sistemlerinde DC servo motorlar veya DC step motorlar kullanılır. Hidrolik tahrik sistemlerinde hidromotorlar veya piston silindirler kullanılır. Pnömatik tahrik sistemlerinde airmotorlar veya piston silindirler kullanılır. Söz konusu teknolojiler robotun hareketi için gerekli güç kaynaklarıdır.

Endüstriyel robotlarda hidrolik sürücü, ağır işlerin yapılacağı uygulamalarda kullanılır. Fakat yağ sızdırmaları, kontrollerinin zor olması gibi nedenlerden dolayı fazla tercih edilmezler. Pnömatik sürücü sistemleri genelde hafif işlerde, al-bırak işlemlerinde kullanılır. Bu sürücü tipini ara değerlerde çalıştırmak ve kontrol etmek zor olduğundan genelde robot kolların uç işlevcilerinde kullanılır [30]. Robot kollarda genelde elektrik tahrikli sistemler kullanılır. Elektrik tahrikli motorlar sürücü devreler vasıtasıyla hassas işlem yapmaya olanak sağlar. Bundan dolayı en çok tercih edilen tahrik sistemidir [30].

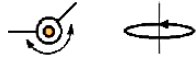
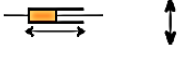
2.3.2. Çalışma uzayı geometrilerine göre endüstriyel robotlar

Robot manipülatörünün mekanik olarak üç boyutlu uzayda ulaşabildiği hacme çalışma uzayı denir. Bu çalışma uzayının şekli, eklemlerin yapısına ve robot kol üzerinde sıralanmasına bağlı olarak değişir.

Bu çalışma uzayı, iki tip hareketle sağlanır. Bu hareketler [30]:

- Dönme (R): Bir eksen etrafında dönme hareketidir,
- Prizmatik(P): Bir eksen boyunca öteleme hareketidir.

Tablo 2.1. Eklem hareket tipleri [30]

Eklem Tipi	Sembolik Gösterim		Eklem Tanımı
	Harf sel	Şekilsel	
Rotational - Revolute (Dönel)	R		Eksen etrafında dönme hareketi
Prismatic - Translational (Prizmatik - Ötelemeli)	P (veya T)		Eksen boyunca lineer hareket

Robotlar genellikle serbestlik derecesine göre sınıflandırılır. Ancak çalışma uzayına göre sınıflandırıldığında ilk üç uzvun eklem özelliğine bakılarak sınıflandırılır [30].

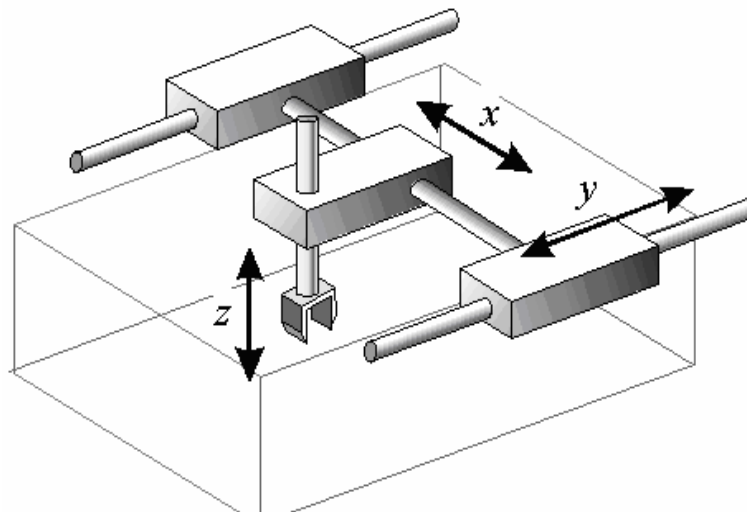
İlk üç eksen ana eksenler olarak bileğin pozisyonunu belirlerken, daha sonraki eksenler tutucunu pozisyonunu belirler. Aşağıdaki sınıflandırma ana eksenler göre yapılmıştır.

Tablo 2.2. İlk üç eksenin çalışma uzayına göre sınıflandırılması [30]

Eksen	Kartezyen	Silindirik	Küresel	SCARA	Mafsallı
1.Eksen	P	R	R	R	R
2.Eksen	P	P	R	R	R
3.Eksen	P	P	P	R	R
Eksen Tipi	PPP	RPP	RRP	RRR	RRR

2.3.2.1. Kartezyen robot (PPP)

Robotun ilk üç ekseninin prizmatik (öteleme) hareket yaptığı sistemlerdir. Bu tip hareket yapan sistemlere CNC frezeler örnek olarak verilebilir. Bu robotlar üç boyutlu uzayda X, Y ve Z eksenlerinde doğrusal hareket yapabilmektedir [30]. Mekanik yapıları sağlam olmasına rağmen çalışma uzayı robotun hacminden küçüktür. Bu robotların hareketleri genellikle vidalı mil-kızak ikilisiyle sağlanır. Güç kaynağı olarak servo veya step motorlar kullanılır. Bu tahrik sistemi kolay kontrol edilebilir olduğunda çok hassas işlemler yapılmasına olanak sağlar.



Şekil 2.1. Kartezyen robot kolun çalışma alanı [5]



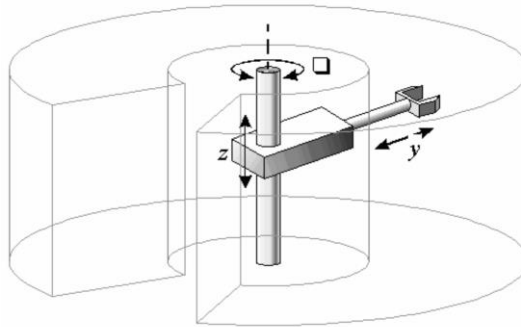
Şekil 2.2. X, Y, Z, eksenli kartezyen robot [32]



Şekil 2.3. X, Y, Z, eksenli kartezyen robot(köprü tipi CNC freze)

2.3.2.2. Silindirik robot (RPP)

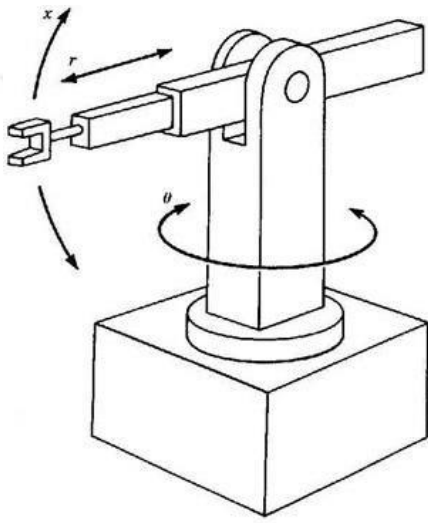
Bu tip robotlarda birinci ana eksen dönme (rotasyon), ikinci ve üçüncü eksen prizmatik hareket yapar. Mekanik olarak sağlam yapıları olduklarından büyük boyutlu nesnelerin taşınmasında kullanılır. Silindirik robotlarda çalışma uzayı robotu meydana getiren eklemler arası mesafeye bağlı olarak değişir. Yapıları gereği çalışma uzayı 360°'lik bir silindir olması beklenir; fakat çalışma uzayının güvenliği nedeniyle bu dönüş, 300° ile sınırlı tutularak bir ölü alan oluşturulur. Bu alan, robotun çalışması sırasında iş ve iş güvenliğini sağlamada yardımcı olur. Bu robotlar, yapacağı işe bağlı olarak her üç tahrik sistemi ile de çalıştırılabilir. Kartezyen robotlara göre hareket serbestlikleri daha yüksektir. Yapıları basit olduğundan programlanmaları da basittir. Kirli ve rutubetli ortamlarda rahatlıkla kullanılabilir.



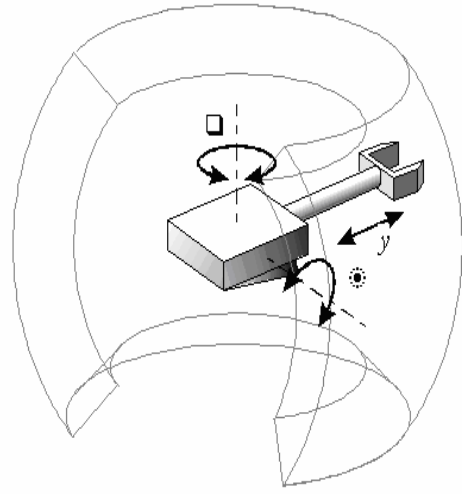
Şekil 2.4. Silindirik robot kolun çalışma alanı [33]

2.3.2.3. Küresel robot kol (RRP)

Bu robotlarda ilk iki eksenle dönme hareketi, üçüncü eksenle prizmatik hareket gerçekleşir. Bu eksenlerin hareketine bağlı olarak küresel bir çalışma uzayı oluşur. Küresel robotlar oldukça işlevseldir. Yapımı oldukça kolay yapılardır. Programlanmaları silindirik ve kartezyen robotlara göre daha karmaşıktır. Çalışma uzayında mekanik kısıtlamalardan dolayı ölü hacimler oluşur. Bu kısıtlamalardan dolayı, robotun sabitlendiği zemine ulaşması mümkün değildir. Bu durum küresel robotlar için bir dezavantajdır. Çalışma uzayı, iç içe geçen iki küresel hacmin arasında kalan hacimdir.



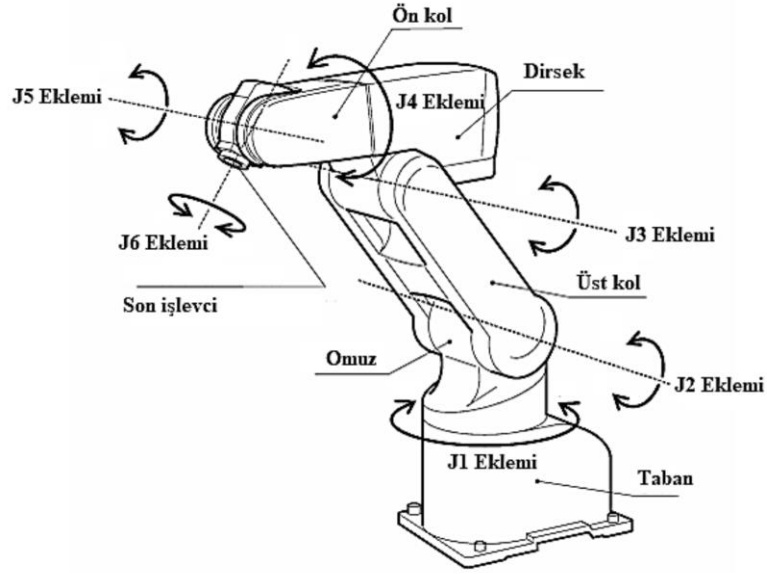
Şekil 2.5. Küresel koordinat sistemi [34]



Şekil 2.6. Küresel robot kolun çalışma alanı [32]

2.3.2.4. Mafsallı robot kol (RRR)

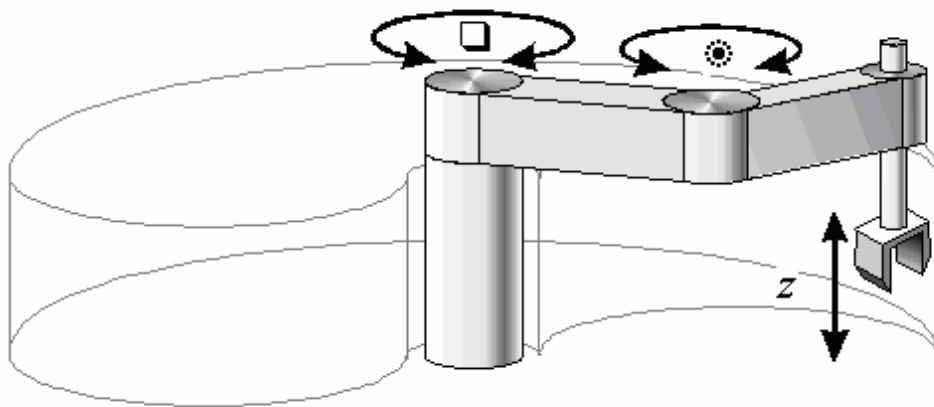
Yapı olarak insan kolunun örnek alındığı bir sistemdir. Bu tip robotların bütün mafsalları, döner tip olduğundan çalışma uzayında esnek çalışma yeteneğine sahiptir. Bu özelliğinden dolayı boyama, punta kaynak, montaj, cnc tornalarda, istifleme, v.b. birçok işlemde kullanılır. Genelde bu robot tipinde 5-7 (DOF) serbestlik derecesine sahip robotlar olarak üretilip kullanılmaktadır [13-33-34]. Eklem hareketleri servo veya step motorlar kullanılarak sağlanır. Bu motorlar yardımcı ekipmanlar ile konum, hız ve ivme gibi verilerin geri bildirimleri ile robot kolun hareketi kontrol edilir. Hareketleri çok sayıda değişkene bağlı olduğundan yörünge analizleri zordur. Programlanmaları karmaşık ve zordur. Bundan dolayı tasarlanacak robot kolun işe en uygun minimum serbestlik sağlayacak şekilde dizayn edilmesi bir nebze bu karmaşıklığı ortadan kaldırabilir.



Şekil 2.7. Mafsallı robot kol [5]

2.3.2.5. Scara robot kol (RRP)

Genelde ilk iki eklemi döner mafsallı, üçüncü mafsallı prizmatik olan robot kollara denir. Bu yapı ilk mafsallı prizmatik iki ve üçüncü döner mafsallı olarak da tasarlanabilir. Her iki durumda da hafif ve seri işler için kullanılan bir robot kol tipidir. Bütün hareket eksenleri birbirine paralel olarak konumlandırılmıştır. Scara robot kol hız ve konum performansı iyi olduğundan daha çok elektronik kart üretiminde tercih edilir.



Şekil 2.8. Scara robot kol çalışma alanı [5]

2.3.3. Hareket kontrol metotlarına göre endüstriyel robotlar

Hareket yöntemine göre robotlar iki gruba ayrılır [30]:

- Noktadan noktaya hareket eden robotlar,
- Sürekli yörüngede hareket eden robotlar.

2.3.3.1. Noktadan noktaya hareket eden robotlar

Robotun uç işlevcisinin planlanan bir işi yapması için R^3 'te belirlenen bir dizi noktaya belli bir sıra ile hareket ederek işlemi gerçekleştirmesine denir. Bu işlem gerçekleşirken robot kolun motorlarının hareketi iki şekilde gerçekleşir: Birinci hareket motorların belli bir sıra ile pozisyon alması, ikincisi motorların aynı anda hareket etmesidir. Bu iki hareket program ile elde edilir. Tutarlı hareket tipi bütün motorların aynı zaman diliminde pozisyon almasıdır. Böylelikle senkronize bir hareket gerçekleşmiş olur. Noktadan noktaya hareket, iki koordinat arasında hareket ederken yörünge ve hızın öneminin olmadığı durumlarda kullanılır. Burada işlem sırasında çarpma işlemi gerçekleşebilir. Çarpmanın olmaması için çalışma uzayında, daha uzun yörünge işlemleri gerçekleştirmek gerekir, bu da süreci uzatır. Bu yöntemde işlem yapılacak koordinatlar için gerekli motor pulsları oluşturularak motorların hareketi sağlanır. Bu tip hareket yapan robotlar; genellikle punta kaynak, parça taşıma, yükleme ve istifleme basit montaj işlemlerinde kullanılır.

2.3.3.2. Sürekli yörüngede hareket eden robotlar

Bu tip robotlarda yapılacak işlem için gerekli yörünge, birçok koordinat bir araya getirilerek oluşturulur. Bu koordinatlar arasında robot kolun uç işlevcisinin hareketi için bütün eklemlerin pozisyonlamaları farklı hızlarda ve aynı zamanda gerçekleştirilir. Böylelikle uç işlevcisinin hareketi düzgün ve kesiksiz olarak elde edilir. Bu da daha hassas bir işlem gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Noktadan noktaya hareket eden robotlar için gerekli koordinatlardan çok daha fazla koordinat verisine ihtiyaç duyulduğundan büyük veri kayıt belleğine ihtiyaç duyulur. Bu tip robotlar kesintisiz işlem basamaklarına sahip işlerde kullanılır. Ark kaynağında, spreyci boyamada, metal parçaların yüzey işlemlerinde, karmaşık montaj işlemlerinde, frezeleme gibi işlemlerde kullanılır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Döner tablalı robot kolun mekanik imalat aşamaları

Döner tablalı robot kol, zemin kaidesine sabitlenecek ana gövde ve ana gövdeye bağlı beş serbestlik derecesine sahip hareketli robot koldan oluşturulmuştur. Robot kolda altıncı serbestliği sağlayan döner tabla, ana gövdeye bağlı olup boyanacak ürünün boyama esnasında ürünün pozisyon almasını sağlamaktadır. Ana gövde hareket etmediği için sistemin hareketini sağlayan motorlara herhangi bir yük getirmemektedir. Ana gövdenin tasarımı AUTOCAD çizim programı yardımıyla çizilmiştir. Ana gövde DKP levha sac kullanılarak CNC lazer kesim makinesinde kesilerek montaja hazır halde imal edilmiştir. Kesimi yapılan ana gövde parçaları gaz altı kaynak yöntemiyle parçaların birleştirilmesi sağlanmıştır. Robot kol kısmının şasesi, motorlara binen yükün azaltılması amacıyla düşük yoğunluklu alüminyum profil ve motor montaj yerlerinde, L bükümlü 1 mm kalınlığına sahip sac levha kullanılmıştır. Alüminyum ve çelik sac levha birbirine kaynatılamadığından bu parçaların birleştirilmesi diğer bir imalat yöntemi olan perçinli birleştirme kullanılmıştır. Ağırlık dağılımını dengelemek için omuz bölgesine karşıt ağırlık kullanılmıştır. Böylece omuz motoruna ağırlık nedeniyle gelen yüklerin bir kısmının etkisi azaltılmıştır.

Robot kolun şasesi, ince sac levhadan elde edildiği için rulman yuvaları birkaç sac plaka bir araya getirilip cıvatalı birleştirmeye elde edilmiştir. Bu yöntemle ağırlıklar azaltılmıştır. Şasede kullanılan parçaların yaklaşık ağırlık değerleri aşağıdaki tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Robot kol uzuvlarının boy ve kütle değerleri

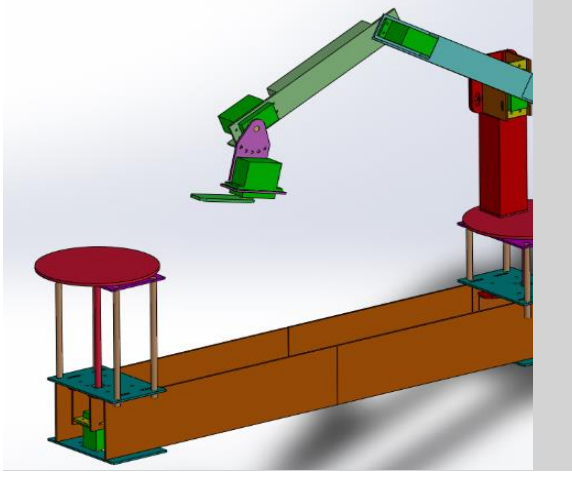
Uzuv	Boy(mm)	Kütle (g)
Sabit gövde – omuz arası (gövde)	150	350
Omuz – dirsek arası (üst kol)	180	200
Dirsek – bilek arası (alt kol)	190	170
Bilek – tutucu arası (bilek)	80	120
Tutucu	60	50

Bu tabloya uygun olarak robot kol parçaları elde edilip montajı yapılmıştır. Bu kütle değerlerine bağlı olarak omuzda oluşacak tork değerini karşılamak üzere, tork değeri 20 kgcm olan servo motor belirlenmiştir. Bu tork değeri maksimum 47 cm uzanım için gerekli tork değeridir.

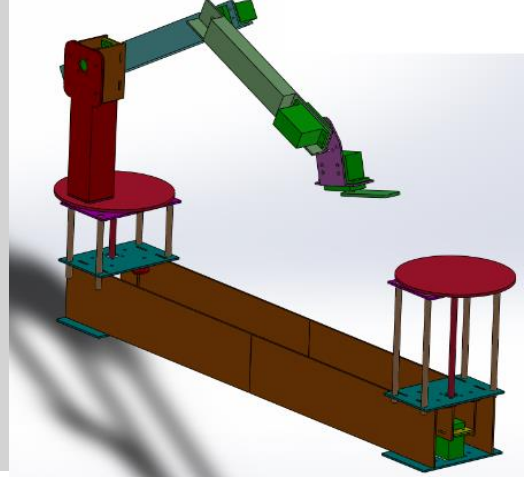
Tablo 3.2. Robot kolda kullanılan servo motorlar

Marka	Kullanıldığı uzuv	Tork	Adet
Feetech FT5330M	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

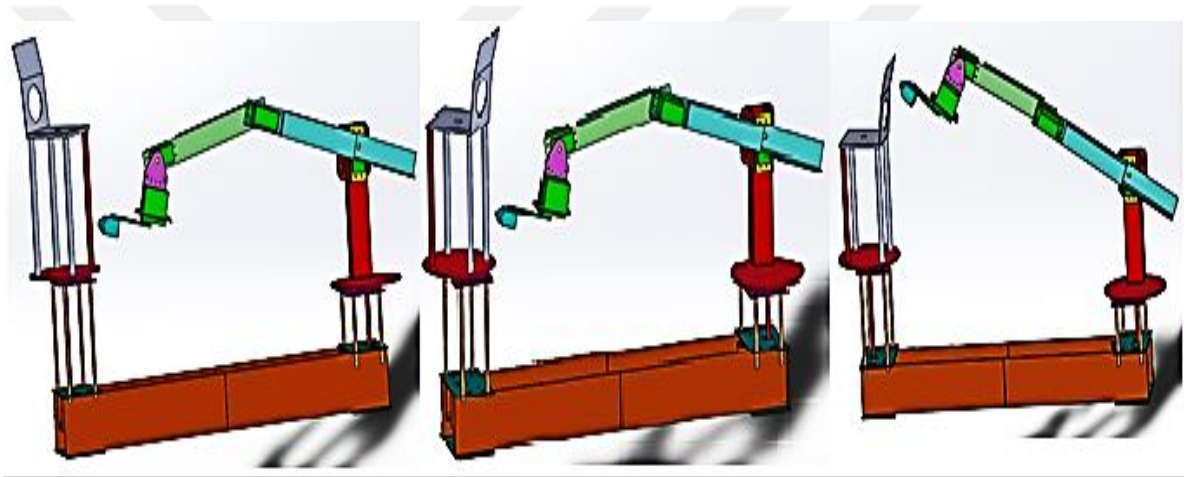
Servo motorlar, yapıları itibarıyla içlerinde bulunan elektronik sürücü kartları sayesinde kontrol kartından gelen analog sinyalleri algılayıp motoru istenilen pozisyona götürme yeteneğine sahip motorlardır. Ayrıca yapılarında bulundurdıkları dişli redüktör sistemi sayesinde küçük yapılarına rağmen yüksek tork üretme kabiliyetine sahip oldukları için robot kol çalışmasında kullanılmıştır. Servo motor içinde yer alan enkoder sayesinde kendi içinde geribildirim alarak kontrol karttan gelen sinyallere uygun pozisyonlama yapabilmektedir. Bu tür çalışmada hassasiyet, kullanılan enkoderin kabiliyetine bağlıdır. Bu çalışmada imalattan önce herhangi bir aksaklığa meydan vermemek için tablo 3.1.'de belirtilen ölçülere uygun robot kol şase parçaları SOLIDWORKS katı modelleme programında çizilerek bilgisayar ortamında montajı gerçekleştirilmiştir. Böylelikle imalat esnasında ortaya çıkabilecek aksaklıkların önüne geçilmiştir.



Şekil 3.1. Robot kol SolidWorks montajı(a)



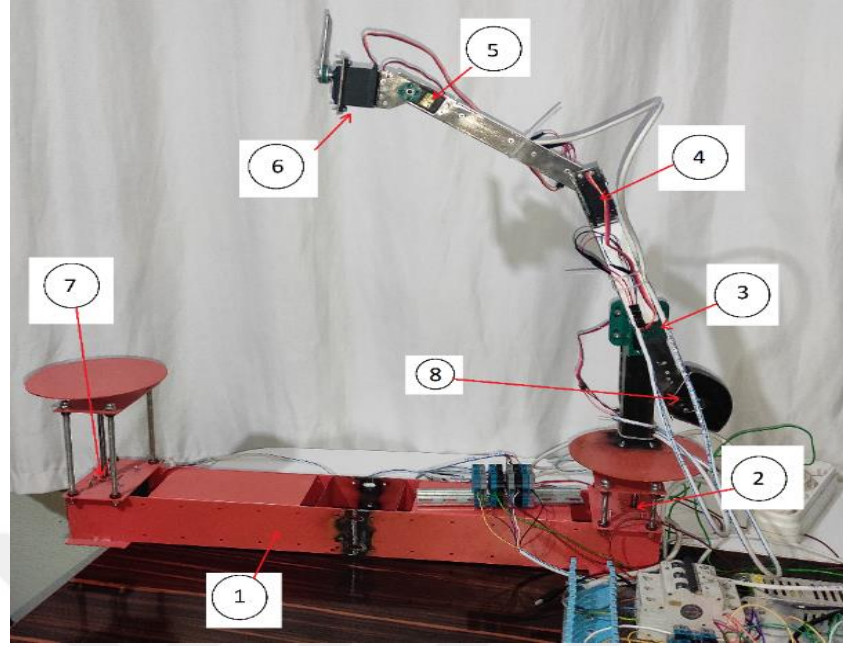
Şekil 3.2. Robot kol SolidWorks montajı(b)



Şekil 3.3. Döner tabla ile boyama pozisyonlama

Şekil 3.3.'te görüldüğü üzere döner tabla kendi eksenini etrafında 360 derece dönebilme kabiliyetine sahip olduğu ve boya esnasında boyanacak parçanın her tarafına robot kolun erişimi sağlandığı için düzgün bir boyama işlemi gerçekleştirmeye imkan sağlanmıştır. Bu tasarım ile boyama işleminde boyama operatöründen kaynaklanacak hataların önüne geçilmiştir. Böylelikle boya uygulaması sırasında operatörün boyama mahlinde olmaması nedeniyle sağlık açısından ciddi bir katkı sağlayacaktır.

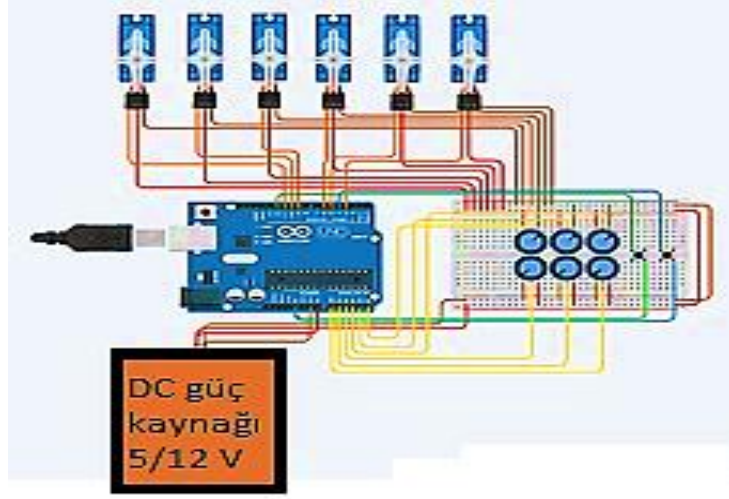
Yukarıdaki tablo 3.1.'de ölçülere uygun olarak temin edilen robot kol, şekil 3.4.'teki gibi montajı sağlanarak imal edilmiştir.



Şekil 3.4. 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 ağırlık)

3.1.2. Elektronik kontrol ünitesi bağlantı tasarım ve imalatı

Robot kol, kontrol ünitesinde servo motorları kontrol etmek için uygulanması gereken PWM (Sinyal Genişlik Modülasyonu) sinyalleri Arduino UNO kontrol kart kullanılarak elde edilmiştir. Arduino UNO kontrol kartı açık kod kaynaklı bir sistem olduğu ve robot kol için yeteri miktarda giriş ve çıkışa sahip olduğu için tercih edilmiştir. Bu kart üzerinde yer alan analog çıkışlar, servo motorları sürmeye ve analog girişlerde servo motorları manuel olarak hareket ettirebilmek için kullanılan kumanda kolu bağlantılarında kullanılmıştır. Servo motor, Arduino UNO, güç kaynağı ve kumanda kolunu temsilen kullanılan potansiyometrelerden oluşan elektronik bağlantı tasarımı şekil 3.5.'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.5. Elektronik devre [39]

Kullanılan kumanda kolları X-Y olmak üzere iki adet eksene sahiptir. Kumanda kolu içinde bulunan potansiyometrelerin oluşturduğu analog sinyaller aracılığıyla servo motorların hareketini gerçekleştirir. Dört adet Kumanda kolundan yararlanarak oluşturulan sekiz eksenli Kumanda kolu bloğu robot kol ve döner tablanın hareketinin sağlanmasında kullanılmıştır (şekil 3.6.). Robot kolun kumanda kolu vasıtasıyla hareketi esnasında izlediği yörünge veya noktaların arduino UNO kontrol kartının hafızasına kayıt etmek için bir adet, kayıt edilen bilgilerin tekrar çağırıp robot kolun otomatik olarak yörüngeyi tekrarlaması için bir adet ve hareket programını sıfırlayarak robot kolun başlangıç noktasına götürmek için de bir adet olmak üzere üç adet buton kullanılmıştır.

Arduino UNO kontrol kartına çeşitli ilave ekipmanlar bağlanarak farklı özellikler kazandırarak robot kolun fonksiyonerliği artırılabilir. Bu da robot kolun daha esnek bir hareket kabiliyeti kazanmasına olanak sağlar. Böylelikle boyama işleminde ürünlerin istenilen nitelikte elde edilmesini kolaylaştırır.

Dört Kumanda kolundan oluşan manuel kontrol kumanda bloğu Şekil 3.6.'da görülmektedir. Kumanda kolları sac malzemeden meydana getirilmiş muhafaza ile daha kolay kullanılabilir hale getirilmiştir. Şekil 3.7.'de görülen Kumanda kolu beş adet bağlantı pinine sahiptir. Bu pinler +5V, GND, X-ekseni, Y-ekseni ve buton için kullanılmaktadır.

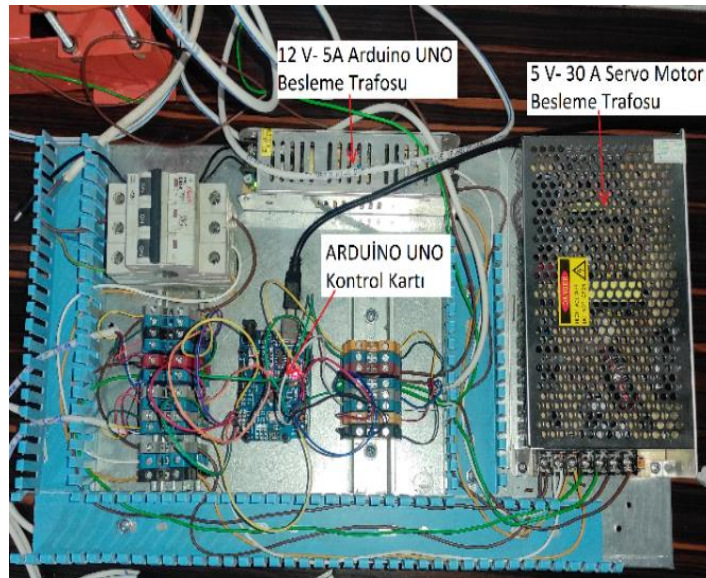


Şekil 3.6. Dörtlü kumanda kolu



Şekil 3.7. Tekli kumanda kolu [33]

Kontrol panosunda (Şekil 3.8.) güç kaynağı olarak 5V-30A ve 12V-5A olmak üzere iki adet led trafosu kullanılmıştır. Bu trafolardan 5V'luk trafo ile servo motor enerji beslemesi, 12V'luk trafo ile de arduino UNO enerji beslemesi gerçekleştirilmiştir. Kablo bağlantılarının daha pratik bir şekilde yapılabilmesi için ray klamensler kullanılmıştır. Servo motorların siyal uçları Arduino UNO'nun PWM özellikli 3, 5, 6, 9, 10 ve 11 nolu çıkış pinlerine bağlanmıştır. Kumanda kolu çıkışları ise A0, A1, A2, A3, A4 ve A5 nolu giriş pinlerine bağlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan servo motorlar, Kumanda kolu ve led trafoları hakkındaki teknik bilgiler EK 4'te verilmiştir.



Şekil 3.8. Kontrol panosu

Döner tabla, robot kol çalışmasında yörünge planlaması Arduino için geliştirilen arayüz programı Arduino IDE’le elde edileceğinden yörünge planlamasında matematiksel işlemler gerçekleştirilmemiştir. Arduino IDE’de yazılan program (EK 5)’teki kodları vasıtasıyla boyanacak ürün değıştikçe yeni ürün için yörüngede değışeceğinden hesap yapmak yerine program ile yörüngeyi değıştirilmesi daha pratik bir işlem gerçekleştirilmiştir.

3.2. Metot

3.2.1. Robot kol tasarım basamakları

Robot kol tasarımına geçmeden önce tasarlanacak robot kolun özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Robot kol tasarımını etkileyecek başlıca kriterler şu şekilde sıralanabilir:

- Robot kolun hangi iş için ve hangi ortamda kullanılacağı, taşıyacağı maksimum ağırlığın ne kadar olacağı, taşıma kapasitesinin hangi oranda esneyebileceği, kullanıcı operatörün eğitim düzeyi, robot kolun çalışma süresi gibi tasarımı doğrudan etkileyen faktörler belirlenmelidir,
- Robot kolun çalışma şekli ve ortamına uygun sensörler belirlenmelidir,
- Tasarımda robot kolun çalışma şekline uygun algoritmalar düzenlenmelidir,
- Robot kolun çalışma uzayına, taşıma kapasitesine uygun mekanik tasarımı gerçekleştirilmelidir,
- Elde edilen verilere uygun ve ileride oluşabilecek ilave işlemleri de göz önünde bulundurularak elektronik devre tasarımı gerçekleştirilmelidir,
- Elde edilen tasarım ve veriler ışığında robot kol üç boyutlu programlar vasıtasıyla tasarım çizimleri gerçekleştirilerek imalatı yapılmalıdır,
- İmalatı gerçekleştirilen robot için çalıştırma programı tasarlanmalıdır,
- Son olarak çalıştırılan robot kolda varsa hataların tespit edilip ve eksiklikler giderilmelidir.

Robot kollar endüstriyel olarak hemen hemen her alanında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Boyama ve istifleme işlemlerinde, montaj hatlarında, ürün veya atık ayırma işlemlerinde, elektronik kart imalatında, askeri olarak birçok alan için kullanılacak tasarımlar yapılarak insanları hizmetine sunulmuştur.

Bu çalışmada, döner tablalı endüstriyel robot kol tasarımında amaçlanan başlıca hedef; sürekli rotada hareket edebilen, ana beş serbestlik derecesine sahip robot kola bir serbestlik dereceli dönel tabla ilavesiyle altı serbestlik derecesine sahip bir boyama robotu tasarlamak ve gerçekleştirmektir.

Burada dönel tabla uygulamasıyla amaçlanan, robot kolun ürünün her tarafına ulaşmasını sağlamak ve böylece boyama esnasında oluşabilecek dokunma izlerinden ve boya akımlarından kaynaklanan boyama hatalarının önüne geçmektir.

Tasarım aşamaları şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

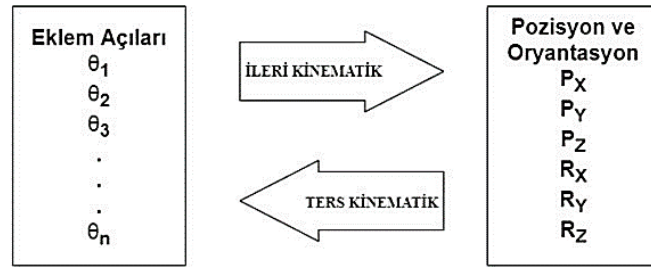
- Tasarımda kullanılacak servo motor belirlendi ve temin edildi,
- Temin edilen motorların robot kola montaj şekli belirlendi,
- Montaj şekline göre şase boyutlandırıldı,
- Boyutlandırması yapılan şasenin Autocad programında çizimi yapıldı,
- Çizimi yapılan şase 2 mm DKP sac levhalardan kesilmek üzere lazer kesime gönderildi,
- Motor-şase bağlantıları tersine montaj (demontaj) esasına göre yapıldı,
- Temin edilen motor ve şase malzemesinin montajı yapılarak eksik malzemeler tamamlandı,
- Montajı yapılan robot kol demonte edilerek; çapak, yağ gibi temizlenmesi gereken unsurlardan temizlendi,
- Montajı yapılan şaseye motorların montajı yapıldı,
- Elektrik ve elektronik malzeme için temin edilen, elektrik ve elektronik malzemenin montajı yapıldı,
- Robot kolun istenilen yörüngeyi takip etmesi için gerekli program algoritması Arduino ID’de hazırlanarak robot kolun çalıştırılması sağlanmıştır.

3.2.2. Mekanik Tasarım

3.2.2.1. Robot kolun hareket tip ve kinematiği

Kinematik, hareketli bir sistemin hareketini oluşturan sebep ve etkilerinden bağımsız sistemin hareketini inceleyen mekaniğin bir bölümüdür. Kinematik Yunancada kinema (hareket) kelimesinden türetilmiştir. Kinematiğin kavranabilmesi için hareketin ve hareketten doğan hız ve ivmenin anlaşılmasıyla mümkündür. Hareket, bir cismin bir noktadan başka bir noktaya olan yer değiştirmesine denir [34].

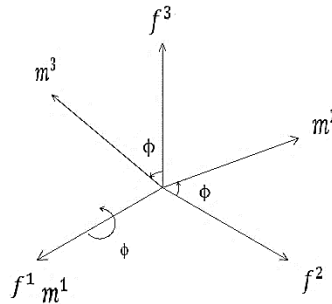
Robotik kol kinematik analizi, ileri ve geri yön kinematik analiz olmak üzere iki başlık altında incelenir. Robotik kol, ileri yön kinematik analizinde elde edilen denklemlerde değişkenlere verilen değerlere göre robot kol tutucu uç koordinatının kartezyen koordinat sisteminde bulunduğu yerin tespit etme işlemidir. Geri yön kinematik analizinde ise kartezyen koordinat sisteminde bilinen robot kol tutucu uç koordinatlarından yola çıkarak robot kolu oluşturan motorlara verilmesi gereken açı değerlerinin bulunması işlemidir.



Şekil 3.9. İleri ve geri yön kinematik girdi-çıkı büyüklükleri [35]

3.2.2.2. Robotlarda temel dönme hareketi

Hareketli eksen takımı, sabit eksen takımına göre, bir ekseninde dönme hareketi ϕ açısı kadar yaptırıldığında o eksene göre rotasyon matrisleri elde edilir. Rotasyon matrisi 3X3 boyutunda bir matris olup aşağıdaki gibi bulunur.



Şekil 3.10. Sabit ve hareketli eksen takımları [36]

$$R_1(\phi) = \begin{bmatrix} f^1.m^1 & f^1.m^2 & f^1.m^3 \\ f^2.m^1 & f^2.m^2 & f^2.m^3 \\ f^3.m^1 & f^3.m^2 & f^3.m^3 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Skaler çarpım, denklem (3.2)'deki gibi elde edilir.

$$|f^1|. |f^2|. \cos \phi \quad (3.2)$$

M koordinat sistemi: Hareketli koordinat sistemi (m^1, m^2, m^3)

F koordinat sistemi: Sabit eksen takımı (f^1, f^2, f^3) [36]

Eğer m^1 eksenini f^1 eksenini etrafında ϕ kadar döndürüldüğünde;

$$R_1(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & f^2.m^2 & f^2.m^3 \\ 0 & f^3.m^2 & f^3.m^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \\ 0 & \cos(\phi - \frac{\pi}{2}) & \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$R_1(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Eğer m^2 eksenini f^2 eksenini etrafında ϕ kadar döndürülürse;

$$R_2(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Eğer m^3 eksenini f^3 eksenini etrafında ϕ kadar döndürülürse;

$$R_3(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.2.2.3. Homojen dönüşümler

Üç boyutlu bir uzay vektörü

$$\vec{V} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k}$$

olarak gösterilir. Bu vektör matris formda şu şekilde gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Burada w büyütme faktörü (ölçek) olarak alınmaktadır.

$$(a=\frac{x}{w}, b=\frac{y}{w}, c=\frac{z}{w})$$

$$U=H.V$$

$\vec{V}$ vektörü, $\vec{U}$ vektörüne; $H_{4 \times 4}$ dönüşüm operatörüyle dönüştürülür [36].

3.2.2.4. Yalnız öteleme hareketi

$$H = Trans(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

dönme matrisi (birim dönme matrisi)

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

öteleme matrisi

a; x yönünde öteleme miktarı, b; y yönünde öteleme miktarı, c; z yönünde öteleme miktarı

3.2.2.5. Yalnız dönme hareketi

$$R(x, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

(X eksenini etrafında dönme) [36]

$$R(y, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

(Y eksenini etrafında dönme) [36]

$$R(z, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

(Z eksenini etrafında dönme) [36]

3.2.2.6. Robot kolun ileri yön (düz) kinematik denklemleri

Düz kinematik analiz yapılırken, robotun pozisyon ve oryantasyonunun nasıl belirlendiği ve bu belirlemenin eklem (joint) koordinatları cinsinden nasıl yapılacağı gösterilir. Bilindiği gibi herhangi bir manipülatör, birbirine eklemler ile bağlanmış bir seri uzuvdan (elemandan) oluştuğu düşünülebilir. Manipülatörün her bir elemanına bir koordinat sistemi yerleştirilir ve bu koordinat sistemleri arasındaki bağıl pozisyon ve oryantasyonu homojen transformasyonları kullanarak belirlenir. Bir link (koordinat düzlemi) ile bir sonraki link arasındaki ilişkiyi gösteren homojen transformasyon matrisi, “A” ile gösterilirken, temel dönüşüm matrisi ise “T” ile gösterilir. Ele alınan robotun eksen sayısı kadar homojen dönüşüm matrisi bulunur [36].

Robotlara düz kinematik analizi yapılmasının temel nedeni, robotun her bir ekseninin belirlenen açılarda hareketi ile robotun uç noktasının ulaştığı konumun koordinatlarını elde etmektir. Bu konum koordinatları elde edilirken Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılır. Robotun uç noktasının pozisyonunu belirleyen ana homojen dönüşüm matrisi T_n ile gösterilir. T_n aşağıdaki şekilde tanımlanır [36]:

A_1 ; birinci elemanın pozisyon ve oryantasyonunu gösterir.

A_2 ; ikinci elemanın birinci elemana göre pozisyon ve oryantasyonunu gösterir.

A_3 ; üçüncü elemanın ikinci elemana göre pozisyon ve oryantasyonunu gösterir.

.....

Buna göre 2. elemanın ana koordinat sistemine göre pozisyon ve oryantasyonu

$$T_2 = A_1 \cdot A_2 \quad (3.13)$$

ile bulunur.

Benzer bir şekilde 3. elemanın, ana koordinat sistemine göre pozisyon ve oryantasyonu

$$T_3 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (3.14)$$

ile bulunur.

n elemanlı bir sistem için transformasyon matrisi

$$T_n = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \dots A_n \quad (3.15)$$

şeklinde bulunur[36].

3.2.2.7. Denavit-Hartenberg yöntemi (D-H yöntemi)

Bu yöntemle ileri yön kinematik robot analizinde, bilinen robot eklem açıları kullanılarak, bulunmak istenen robotun uç işlevcinin (manipülator) üç boyutlu pozisyon değerlerine homojen transformasyon matrisini kullanarak ulaşmaktır [36]. Bu yöntemin uygulanmasında;

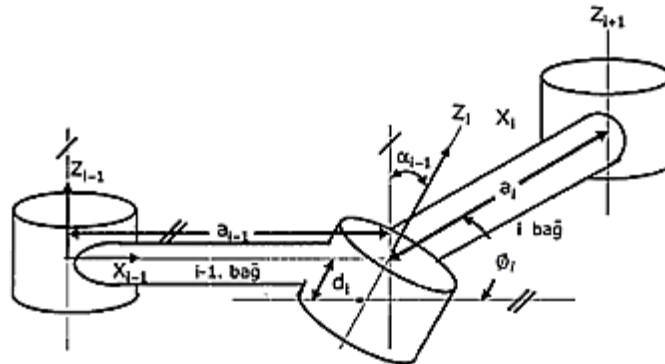
θ_i : x_{i-1} ekseninden x_i eksenine geçişte z_{i-1} eksenini etrafındaki dönme açısı

d_i : (i-1) koordinat sisteminin orijininden x_i ile z_{i-1} ekseninin kesim noktası arasında z_{i-1} eksenini üzerindeki mesafe

a_i : i. Koordinat sisteminin orijini ile x_i ile z_{i-1} kesişim noktası arasındaki mesafe

α_i : z_{i-1} eksenini ile z_i eksenini arasındaki açı (x_i eksenini etrafında dönmesinden kaynaklanan açı değeri)

parametreleri kullanılır. Bu parametreler herhangi bir dönel ya da prizmatik eklemi tam olarak belirler [36].



Şekil 3.11. D-H değişkenlerinin belirlenmesi [37]

D-H yöntemine göre her ekleme koordinat eksenleri (çerçeveler) şu şekilde yerleştirilir [36]:

- Z eksenleri, dönel mafsallarda; dönme eksenine, kayar mafsallarda; kayma eksenine yerleştirilir.
- $X(X_i)$ eksenini bir önceki koordinat sisteminin Z (Z_{i-1}) eksenine dik olacak şekilde yerleştirilir. Aynı zamanda (Z_{i-1}) eksenini ile dik kesişmelidir.
- Y eksenini, Z ve X eksenleri yerleştirildikten sonra sağ el kuralına göre yerleştirilir.

Sağ el kuralı şu şekildedir [38]:



Şekil 3.12. Sağ el kuralı [38]

Eksen yerleşimde şunlara dikkat edilmelidir [36]:

- Sıfırıncı eksenle birinci eksen çakıştırılabilir. Z eksenini dönme ekseninde olmak koşuluyla X eksenini keyfi yerleştirilebilir.
- Son çerçeve tutucuya yerleştirilir. Z eksenini, bir önceki çerçevenin Z eksenini ile aynı doğrultu ve yönde seçilir. X eksenini ise keyfi yerleştirilebilir.
- $X(X_i)$ eksenini bir önceki koordinat sisteminin Z (Z_{i-1}) eksenine dik olacak şekilde yerleştirilemezse $X(X_i)$ çerçevesinin orijini, (X_{i-1}) çerçeve orijiniyle çakıştırılır.

Homojen dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi hesaplanır [36]:

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

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

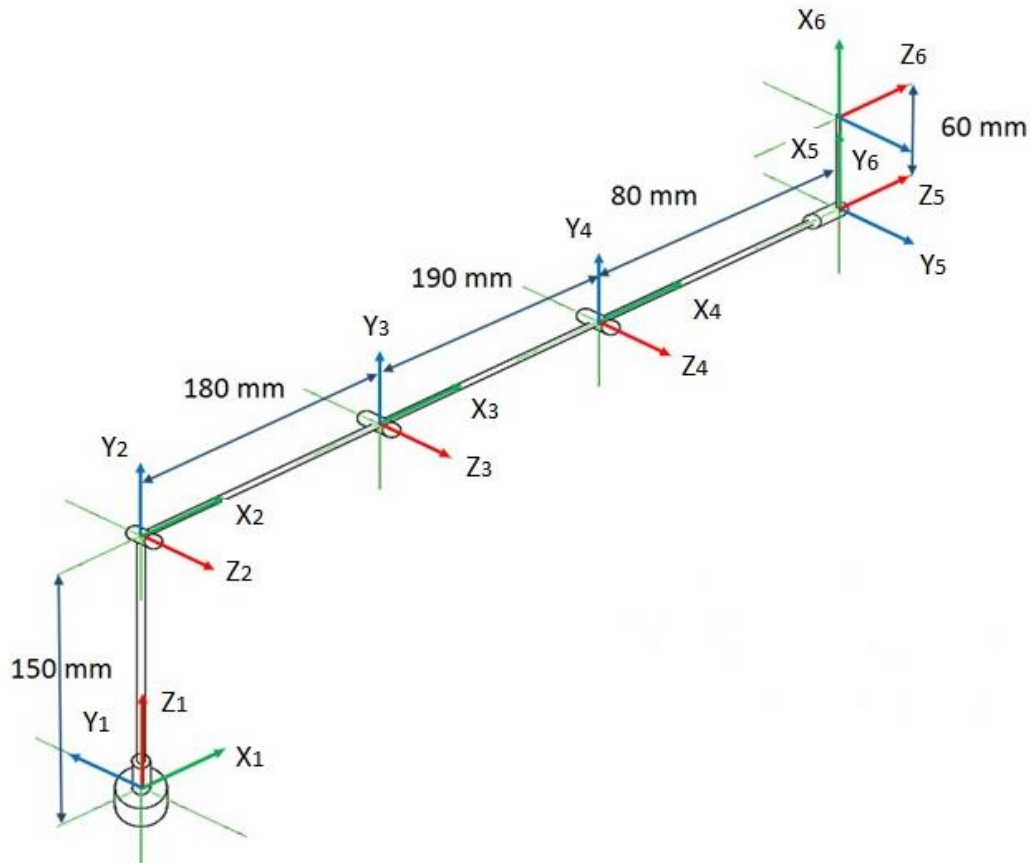
$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Homojen dönüşüm matrisi D-H değişkenlerine bağlı bir şekilde bulunur [36].

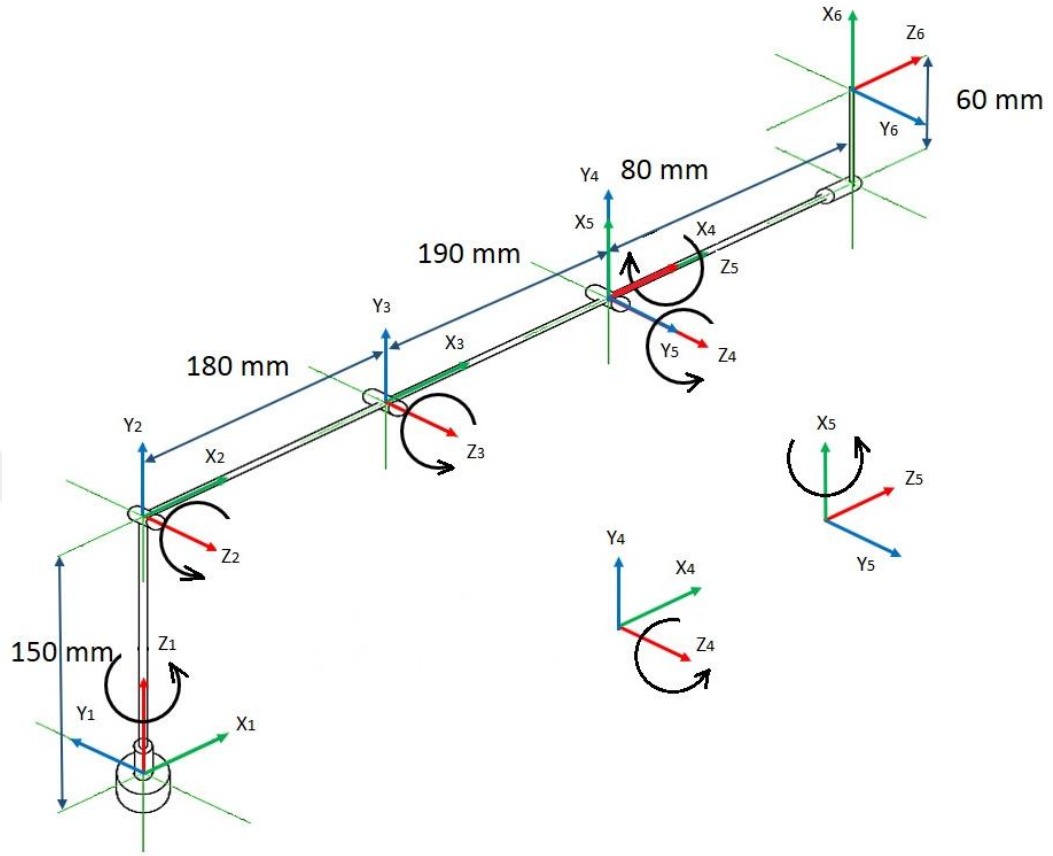
3.2.2.8. Denavit-Hartenberg yönteminin dönel tablalı endüstriyel boyama robot kola uygulanması

Burada D-H yöntemi döner tablalı endüstriyel boyama robot kola uygulanırken, döner tablanın robot kol kinematiğinde herhangi bir etkisi olmadığından hesaplamaya katılmayacaktır. Çünkü döner tablanın görevi sadece boyanacak ürünün konumlanmasını sağlamaktır. Bu işlem için yazılım kodları, robot kol programının uygun yerlerine gerekli komutlar yazılarak boyama işlemine dâhil edilecektir.

D-H yöntemine göre eksen takımlarını yerleştirilmesi ve D-H parametre tablosu;



Şekil 3.13. D-H yöntemine göre eksen takımlarının yerleştirilmesi



Şekil 3.14. D-H yöntemine göre eksen takımlarının düzeltilmesi

Tablo 3.3. D-H yöntemine göre parametre tablosu

	θ_i	d_i	α_i	a_i
1	θ_1	150	90	0
2	θ_2	0	0	180
3	θ_3	0	0	190
4	$\theta_4 + \pi/2$	0	90	0
5	θ_5	80	0	60

Denklem (3.16)'deki homojen dönüşüm matrisi, D-H parametre değerleri kullanılarak her ekleme için homojen dönüşüm matrisleri elde edilmiştir. Bu matrisler:

Denklem (3.16)'deki homojen dönüşüm matrisini tablo 3.3.'teki birinci motor için düzenlendiğinde;

Tablo 3.4. D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri

	θ_i	d_i	α_i	a_i
1	θ_1	150	90	0

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos(\frac{\pi}{2}) & \sin \theta_1 \sin(\frac{\pi}{2}) & 0 \cdot \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cos(\frac{\pi}{2}) & -\cos \theta_1 \sin(\frac{\pi}{2}) & 0 \cdot \sin \theta_1 \\ 0 & \sin(\frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Birinci servo motor için homojen dönüşüm matrisi denklem (3.18)'deki gibi elde edilir.

Denklem (3.16)'deki homojen dönüşüm matrisini tablo 3.3.'teki ikinci motor için düzenlendiğinde;

Tablo 3.5. D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri

	θ_i	d_i	α_i	a_i
2	θ_2	0	0	180

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \cos(0) & \sin \theta_2 \sin(0) & 180. \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \cos(0) & -\cos \theta_2 \sin(0) & 180. \sin \theta_2 \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 180. \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 180. \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

İkinci servo motor için homojen dönüşüm matrisi denklem (3.20)'deki gibi elde edilir.

Denklem (3.16)'deki homojen dönüşüm matrisini tablo 3.3.'teki üçüncü motor için düzenlendiğin de;

Tablo 3.6. *D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri*

	θ_i	d_i	α_i	a_i
3	θ_3	0	0	190

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 \cos(0) & \sin \theta_3 \sin(0) & 190. \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \cos(0) & -\cos \theta_3 \sin(0) & 190. \sin \theta_3 \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 190. \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 190. \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Üçüncü servo motor için homojen dönüşüm matrisi denklem (3.22)'deki gibi elde edilir.

Denklem (3.16)'deki homojen dönüşüm matrisini tablo 3.3.'teki dördüncü motor için düzenlendiğin de;

Tablo 3.7. *D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri*

	θ_i	d_i	α_i	a_i
4	$\theta_4 + \pi/2$	0	90	0

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4 + \pi/2) & -\sin(\theta_4 + \pi/2) \cos(\pi/2) & \sin(\theta_4 + \pi/2) \sin(\pi/2) & 0 \cdot \cos(\theta_4 + \pi/2) \\ \sin(\theta_4 + \pi/2) & \cos(\theta_4 + \pi/2) \cos(\pi/2) & -\cos(\theta_4 + \pi/2) \sin(\pi/2) & 0 \cdot \sin(\theta_4 + \pi/2) \\ 0 & \sin(\pi/2) & \cos(\pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4 + \pi/2) & 0 & \sin(\theta_4 + \pi/2) & 0 \\ \sin(\theta_4 + \pi/2) & 0 & -\cos(\theta_4 + \pi/2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Dördüncü servo motor için homojen dönüşüm matrisi denklem (3.24)'deki gibi elde edilir.

Denklem (3.16)'deki homojen dönüşüm matrisini tablo 3.3.'teki beşinci motor için düzenlendiğin de;

Tablo 3.8. *D-H yöntemine göre birinci eksen parametre değerleri*

	θ_i	d_i	α_i	a_i
5	θ_5	80	0	60

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 \cos(0) & \sin \theta_5 \sin(0) & 60 \cdot \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 \cos(0) & -\cos \theta_5 \sin(0) & 60 \cdot \sin \theta_5 \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 80 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 60 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 60 \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 80 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Beşinci servo motor için homojen dönüşüm matrisi denklem (3.26)'deki gibi elde edilir.

Elde edilen homojen transformasyon matrislerinden, temel transformasyon matrisi (T) aşağıdaki işlem basamakları izlenerek elde edilmiştir:

$${}^1_1T = A_1$$

$${}^1_2T = A_1A_2$$

$${}^1_3T = A_1A_2A_3$$

$${}^1_4T = A_1A_2A_3A_4$$

$${}^1_5T = A_1A_2A_3A_4A_5$$

Temel transformasyon matrisi (${}^1_5T$) olarak bulunur. Bu matristen aşağıdaki ara işlem matrisler elde edilerek ters kinematik analize zemin hazırlanır.

$${}^1_5T = A_1A_2A_3A_4A_5$$

$${}^2_5T = A_2A_3A_4A_5$$

$${}^3_5T = A_3A_4A_5$$

$${}^4_5T = A_4A_5$$

Temel transformasyon matrisinin en genel hâlini elde etmek için ${}^1_5T$ 'nin bulunması gerekmektedir. Ancak ters kinematik analizde kullanılmak üzere gerekli dönüşüm matrislerinin elde edilebilmesi için sırasıyla ${}^4_5T$, ${}^3_5T$, ${}^2_5T$ ve ${}^1_5T$ matrisleri aşağıdaki gibi bulunmuştur. Böylelikle elde edilen bu matrisler ters alma işleminde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir.

$${}^4_5T = A_4A_5$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4 + \pi/2) & 0 & \sin(\theta_4 + \pi/2) & 0 \\ \sin(\theta_4 + \pi/2) & 0 & -\cos(\theta_4 + \pi/2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 60 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 60 \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 80 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

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

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} -C_5S_4 & S_4S_5 & C_4 & 80C_4 - 60C_5S_4 \\ C_4C_5 & -C_4S_5 & S_4 & 60S_4 + 60C_4C_5 \\ S_5 & C_5 & 0 & 60S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$${}^3_5T = A_3A_4A_5$$

$${}^3_5T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 190 \cdot \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 190 \cdot \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -C_5S_4 & S_4S_5 & C_4 & 80C_4 - 60C_5S_4 \\ C_4C_5 & -C_4S_5 & S_4 & 60S_4 + 60C_4C_5 \\ S_5 & C_5 & 0 & 60S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

İşlemleri daha rahat yazabilmek için,

$$\sin(\theta_i + \theta_j) = S_{ij}, \quad \cos(\theta_i + \theta_j) = C_{ij}$$

olarak yazacağız.

$${}^3_5T = \begin{bmatrix} -S_{34}C_5 & S_{34}S_5 & C_{34} & 190C_3 + 80C_{34} - 60S_{34}C_5 \\ C_{34}C_5 & -C_{34}S_5 & S_{34} & 190S_3 + 80S_{34} + 60C_{34}C_5 \\ S_5 & C_5 & 0 & 60S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$${}^2_5T = A_2A_3A_4A_5$$

$${}^2_5T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 180 \cdot \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 180 \cdot \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -S_{34}C_5 & S_{34}S_5 & C_{34} & 190C_3 + 80C_{34} - 60S_{34}C_5 \\ C_{34}C_5 & -C_{34}S_5 & S_{34} & 190S_3 + 80S_{34} + 60C_{34}C_5 \\ S_5 & C_5 & 0 & 60S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

İşlemleri daha rahat yapabilmek için,

$$\sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k) = S_{ijk} \text{ ve } \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k) = C_{ijk} ,$$

$$\sin(\theta_i + \theta_j - \theta_k) = S_{ij-k} \text{ ve } \cos(\theta_i + \theta_j - \theta_k) = C_{ij-k}$$

olarak yazacağız.

Ancak işlemlerde elde edilen matrislerin uzun terimlere sahip olmasından dolayı denklem (3.32)'deki matris tanımlanarak, matrisin terimleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$${}^2_5T = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$u_{11} = (-S_{2345} - S_{234-5})/2 \quad (3.33)$$

$$u_{12} = (-C_{2345} + C_{234-5})/2 \quad (3.34)$$

$$u_{13} = C_{234} \quad (3.35)$$

$$u_{14} = 190C_{23} - 30S_{2345} - 30S_{234-5} + 180C_2 + 80C_{234} \quad (3.36)$$

$$u_{21} = (C_{2345} + C_{234-5})/2 \quad (3.37)$$

$$u_{22} = (-S_{2345} + S_{234-5})/2 \quad (3.38)$$

$$u_{23} = S_{234} \quad (3.39)$$

$$u_{24} = 190S_{23} + 30C_{2345} + 30C_{234-5} + 180S_2 + 80S_{234} \quad (3.40)$$

$$u_{31} = S_5 \quad (3.41)$$

$$u_{32} = C_5 \quad (3.42)$$

$$u_{33} = 0 \quad (3.43)$$

$$u_{34} = 60S_5 \quad (3.44)$$

$$u_{41} = 0 \quad (3.45)$$

$$u_{42} = 0 \quad (3.46)$$

$$u_{43} = 0 \quad (3.47)$$

$$u_{44} = 1 \quad (3.48)$$

$${}^1_5T = A_1A_2A_3A_4A_5$$

$${}^1_5T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

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

$${}^1_5T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$r_{11} = S_1S_5 - (C_5(S_{1234} - S_{1-2-3-4}))/2 \quad (3.51)$$

$$r_{12} = S_5 \left(\frac{(S_{1234} - S_{1-2-3-4})}{2} \right) + C_5S_1 \quad (3.52)$$

$$r_{13} = \frac{(C_{1234} + C_{1-2-3-4})}{2} \quad (3.53)$$

$$r_{14} = 180C_1C_2 - 30C_5(S_{1234} - S_{1-2-3-4}) + 60S_1S_5 + 80C_{23}C_1C_4 + 80C_{23}C_1C_4 + 190C_1C_2C_3 - 190C_1S_2S_3 \quad (3.54)$$

$$r_{21} = \frac{C_5(C_{1234} - C_{1-2-3-4})}{2} - C_1S_5 \quad (3.55)$$

$$r_{22} = -\left(\frac{S_5(C_{1234} - C_{1-2-3-4})}{2}\right) - C_1C_5 \quad (3.56)$$

$$r_{23} = \frac{(S_{1234} + S_{1-2-3-4})}{2} \quad (3.57)$$

$$r_{24} = 180C_2S_1 + 30C_5(C_{1234} - C_{1-2-3-4}) - 60C_1S_5 + 80C_{23}C_4S_1 - 80S_{23}S_1S_4 + 190C_2C_3S_1 - 190S_1S_2S_3 \quad (3.58)$$

$$r_{31} = (C_{2345} + C_{234-5})/2 \quad (3.59)$$

$$r_{32} = (S_{234-5} - S_{2345})/2 \quad (3.60)$$

$$r_{33} = S_{234} \quad (3.61)$$

$$r_{34} = 30C_{2345} + 30C_{234-5} + 190S_{23} + 180S_2 + 80S_{234} + 150 \quad (3.62)$$

$$r_{41} = 0 \quad (3.63)$$

$$r_{42} = 0 \quad (3.64)$$

$$r_{43} = 0 \quad (3.65)$$

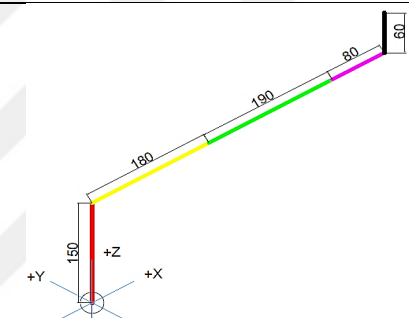
$$r_{44} = 1 \quad (3.66)$$

Böylece ters kinematik analiz için gerekli bütün transformasyon matrisleri elde edilmiştir.

İleri kinematik analizde elde edilen homojen dönüşüm matrisleri, MATLAB analiz programından (EK 1) faydalanarak ve analiz edilerek tasarımı yapılan robot kolun D-H yöntemine göre elde edilen tablo 3.3.'teki parametrelerin doğruluğu aşağıdaki gibi test edilmiştir. Çeşitli açı değerlerinde yapılan analizlerde, görüldüğü üzere elde edilen parametrelerin robot kol uzuv boyutlarına uygun ölçülerde sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (tablo 3.9., tablo 3.10., tablo 3.11., tablo 3.12., tablo 3.13., tablo 3.14., tablo 3.15.).

Tablo 3.9. İleri kinematik analiz sonuçları (a)

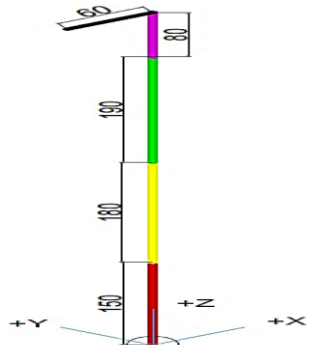
$\theta_1 = 0; \theta_5 = 0; \theta_2 = 0; \theta_3 = 0; \theta_4 = 0$			
Transformasyon Matrisi			
0.0000	0	1.0000	450
0	-1.0000	0	0
1.0000	0	-0.0000	210
0	0	0	1.0000



Şekil 3.15. ileri kinematik analiz sonucu(a)

Tablo 3.10. İleri kinematik analiz sonuçları (b)

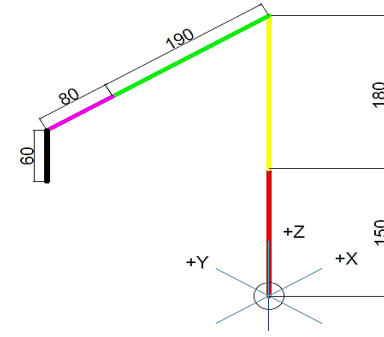
$\theta_1 = 0; \theta_5 = 0; \theta_2 = \pi/2; \theta_3 = 0; \theta_4 = 0$			
Transformasyon Matrisi			
-1.0000	0	0.0000	-60.000
0	-1.0000	0	0
0.0000	0	1.0000	600.0000
0	0	0	1.0000



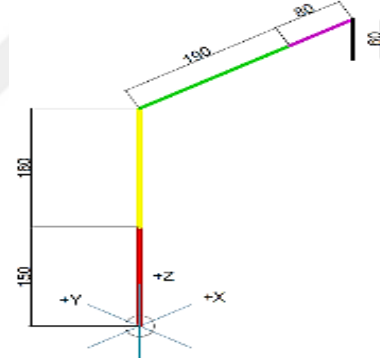
Şekil 3.16. ileri kinematik analiz sonucu(b)

Tablo 3.11. İleri kinematik analiz sonuçları (c)

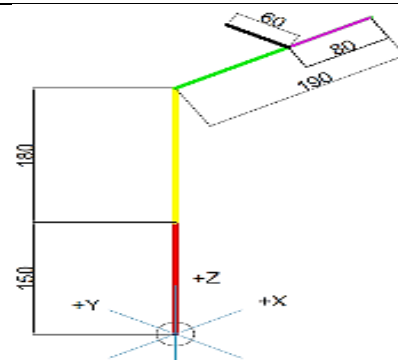
$\theta_1 = 0; \theta_5 = 0; \theta_2 = \pi/2; \theta_3 = \pi/2; \theta_4 = 0$			
Transformasyon Matrisi			
-0.0000	0	-1.0000	-270.0000
0	-1.0000	0	0
-1.0000	0	0.0000	270.0000
0	0	0	1.0000

**Şekil 3.17.** ileri kinematik analizi sonucu (c)**Tablo 3.12.** İleri kinematik analiz sonuçları (d)

$\theta_1 = \pi; \theta_5 = 0; \theta_2 = \pi/2; \theta_3 = \pi/2; \theta_4 = 0$			
Transformasyon Matrisi			
0.0000	0.0000	1.0000	270.0000
-0.0000	1.0000	-0.0000	-0.0000
-1.0000	0	0.0000	270.0000
0	0	0	1.0000

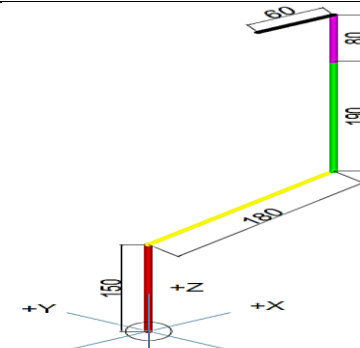
**Şekil 3.18.** ileri kinematik analiz sonucu(d)**Tablo 3.13.** İleri kinematik analiz sonuçları (e)

$\theta_1 = \pi; \theta_5 = \pi/2; \theta_2 = \pi/2; \theta_3 = \pi/2; \theta_4 = \pi$			
Transformasyon Matrisi			
0.0000	0.0000	-1.0000	110.000
1.0000	0.0000	0.0000	60.0000
0.0000	-1.0000	-0.0000	330.0000
0	0	0	1.0000

**Şekil 3.19.** ileri kinematik analiz sonucu(e)

Tablo 3.14. İleri kinematik analiz sonuçları (f)

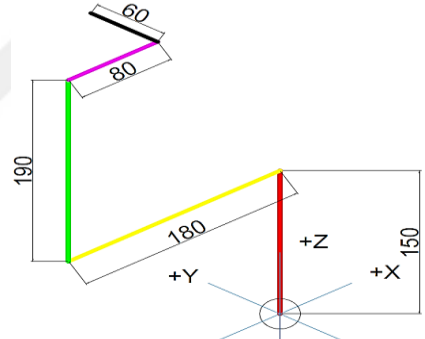
$\theta_1 = \pi/4; \theta_5 = 0; \theta_2 = 0; \theta_3 = \pi/2; \theta_4 = 0$			
Transformasyon Matrisi			
-0.7071	0.7071	0.0000	84.8528
-0.7071	-0.7071	0.0000	84.8528
0.0000	0	1.0000	420.0000
0	0	0	1.0000



Şekil 3.20. İleri kinematik analiz sonucu(f)

Tablo3.15. İleri kinematik analiz sonuçları (g)

$\theta_1 = \pi; \theta_5 = -\pi/2; \theta_2 = 0; \theta_3 = \pi/2; \theta_4 = \pi/2$			
Transformasyon Matrisi			
0.0000	-0.0000	1.0000	-100.0000
1.0000	0.0000	-0.0000	60.0000
-0.0000	1.0000	0.0000	340.0000
0	0	0	1.0000



Şekil 3.21. ileri kinematik analiz sonucu(g)

3.2.2.9. Robot kolun geri yön (ters) kinematik denklemleri

İleri kinematik analizde robotun eklemlerini hareketlendiren motorlara açı değerleri verilerek uç işlevcinin üç boyutlu çalışma uzayında birinci referans sisteminin orijinine göre konumu belirlenmiştir; fakat ters kinematik analizde üç boyutlu çalışma uzayında uç işlevcinin gitmesi istenilen konum belli olup bu konum için gerekli motor açılarının bulunması işlemidir. Burada yapılacak işlem, ileri kinematik analizde bulunan transformasyon matrisinden yararlanarak motor açı değerlerini bulmaktır [36]. Transformasyon matrisi beş adet homojen dönüşüm matrisinin çarpılmasıyla bulunmuştur.

Transformasyon matrisi,

$${}^1_5T = A_1A_2A_3A_4A_5 \quad (3.67)$$

Denklem (3.67) olarak bulunur.

${}^1_5H = {}^1_5T$ olacak şekilde bir H transformasyon matrisi tanımlanarak, bu eşitliğin her iki tarafı homojen A_1 matrisinin tersi ile çarpılırsa

$${}^2_5H = [A_1]^{-1} * {}^1_5H \quad (3.68)$$

($[A_1]^{-1} * A_1 = I$, I: birim matris)

Matrislerin çarpımında, bir matrisin kendi ters matrisiyle çarpımı birim matrisi verdiğiinden eşitlik

$${}^2_5H = A_2A_3A_4A_5 = {}^2_5T \quad (3.69)$$

Denklem (3.69)'deki matrisine dönüşür.

Buradan elde edilen eşitliklerden yararlanarak bulunmak istenilen açı değerlerine ulaşılır. Eğer istenilen açı değerleri için yeteri miktarda eşitlik sağlanamazsa ters alma işlemine devam edilir. Yapılması gereken ters alma işlemleri şu şekildedir.

$${}^3_5H = [A_2]^{-1} * {}^2_5H \quad (3.70)$$

$${}^3_5H = A_3A_4A_5 = {}^3_5T \quad (3.71)$$

$${}^4_5H = [A_3]^{-1} * {}^3_5H \quad (3.72)$$

$${}^4_5H = A_4A_5 = {}^4_5T \quad (3.73)$$

Burada bilinmeyen açı değerleri elde edildikten sonra ters alma işlemi sonlandırılır. Bu işlemlerin yapılabilmesi için homojen dönüşüm matrislerinin tersleri gerekmektedir. 4X4 bir B matrisinin tersi şu şekilde bulunur:

$$B = \begin{bmatrix} l_x & m_x & v_x & P_x \\ l_y & m_y & v_y & P_y \\ l_z & m_z & v_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

$$B^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T \cdot P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

Denklem (3.75)'deki 4X4 bir matris olup R^T , $R_{3 \times 3}$ matrisinin transpozesidir. Bir 3X3 matrisin transpozesi,

$$B = \begin{bmatrix} l_x & m_x & v_x \\ l_y & m_y & v_y \\ l_z & m_z & v_z \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

Denklem (3.76) matrisinin satır ve sütunlarının yerleri değiştirilerek,

$$B^T = \begin{bmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ v_x & v_y & v_z \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Denklem (3.77)'deki gibi bir matris elde edilir.

$P_{3 \times 1}$ matrisi ise uç işlevcinin konum vektörünü göstermektedir. Bu bilgiler ışığında ileri kinematik analizini yaptığımız robot kolun ters kinematik analizi şu şekilde yapılabilir.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Denklem (3.78)'deki matrisin tersi alınırsa,

$$A_1^T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 150 \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

$$-R^T * P = - \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 150 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 \\ 150 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -150 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

$$A_1^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -150 \\ \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

A_1 matrisinin tersi denklem (3.81)'deki gibi bulunmuştur. Bu matris denklem (3.82)'deki gibi gösterilebilir.

$$A_1^{-1} = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -150 \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

A_1 homojen transformasyon matrisine uygulanan ters alma işlemi diğer matrislere uygulandığında, denklem (3.83), denklem (3.84), denklem (3.85) ve denklem (3.86)'deki gibi homojen dönüşüm matrislerinin tersleri elde edilir.

$$A_2^{-1} = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & -180 \\ -S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

$$A_3^{-1} = \begin{bmatrix} C_3 & S_3 & 0 & -190 \\ -S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

$$A_4^{-1} = \begin{bmatrix} -S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ C_4 & S_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

$$A_5^{-1} = \begin{bmatrix} C_5 & S_5 & 0 & -60 \\ -S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -80 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

$${}^1_5H = \begin{bmatrix} k_x & d_x & n_x & P_x \\ k_y & d_y & n_y & P_y \\ k_z & d_z & n_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

Denklem (3.87)'deki gibi tutucu (gripper) için bütün değerleri bilinen referans transformasyon matrisini tanımlayarak ters kinematik analizi şu şekilde yapılır:

$${}^2_5H = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -150 \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} k_x & d_x & n_x & P_x \\ k_y & d_y & n_y & P_y \\ k_z & d_z & n_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

$${}^2_5H = \begin{bmatrix} k_x C_1 + k_y S_1 & d_x C_1 + d_y S_1 & n_x C_1 + n_y S_1 & P_x C_1 + P_y S_1 \\ k_z & d_z & n_z & P_z - 150 \\ k_x S_1 - k_y C_1 & d_x S_1 - d_y C_1 & n_x S_1 - n_y C_1 & P_x S_1 - P_y C_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

$${}^3_5H = A_2^{-1} * {}^2_5H \quad (3.90)$$

$${}^3_5H = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & -180 \\ -S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} k_x C_1 + k_y S_1 & d_x C_1 + d_y S_1 & n_x C_1 + n_y S_1 & P_x C_1 + P_y S_1 \\ k_z & d_z & n_z & P_z - 150 \\ k_x S_1 - k_y C_1 & d_x S_1 - d_y C_1 & n_x S_1 - n_y C_1 & P_x S_1 - P_y C_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

$${}^3_5H = \begin{bmatrix} k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1 & d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1 & n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1 & P_z S_2 - 150 S_2 + P_x C_1 C_2 + P_y C_2 S_1 - 180 \\ k_z C_2 - k_x C_1 S_2 - k_y S_1 S_2 & d_z C_2 - d_x C_1 S_2 - d_y S_1 S_2 & n_z C_2 - n_x C_1 S_2 - n_y S_1 S_2 & P_z C_2 - 150 C_2 - P_x C_1 S_2 - P_y S_1 S_2 \\ k_x S_1 - k_y C_1 & d_x S_1 - d_y C_1 & n_x S_1 - n_y C_1 & P_x S_1 - P_y C_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

$${}^4_5H = A_3^{-1} * {}^3_5H \quad (3.93)$$

$${}^4_5H = \begin{bmatrix} C_3 & S_3 & 0 & -190 \\ -S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1 & d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1 & n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1 & P_z S_2 - 150 S_2 + P_x C_1 C_2 + P_y C_2 S_1 - 180 \\ k_z C_2 - k_x C_1 S_2 - k_y S_1 S_2 & d_z C_2 - d_x C_1 S_2 - d_y S_1 S_2 & n_z C_2 - n_x C_1 S_2 - n_y S_1 S_2 & P_z C_2 - 150 C_2 - P_x C_1 S_2 - P_y S_1 S_2 \\ k_x S_1 - k_y C_1 & d_x S_1 - d_y C_1 & n_x S_1 - n_y C_1 & P_x S_1 - P_y C_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

$${}^4_5H = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix} \quad (3.95)$$

Denklem (3.95)'deki matris elemanları uzun terimler içerdiğinden (b_{ij}) şeklinde tanımlanıp terimler aşağıya çıkarılmıştır:

$$b_{11} = C_3(k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1) - S_3(k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2) \quad (3.96)$$

$$b_{12} = C_3(d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) - S_3(d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2) \quad (3.97)$$

$$b_{13} = C_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - S_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2) \quad (3.98)$$

$$b_{14} = C_3(P_z S_2 - 150 S_2 + P_x C_1 C_2 + P_y C_2 S_1 - 180) - S_3(150 C_2 - P_z C_2 + P_x C_1 S_2 + P_y S_1 S_2) - 190 \quad (3.99)$$

$$b_{21} = -S_3(k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1) - C_3(k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2) \quad (3.100)$$

$$b_{22} = -S_3(d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) - C_3(d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2) \quad (3.101)$$

$$b_{23} = -S_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - C_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2) \quad (3.102)$$

$$b_{24} = -C_3(150 C_2 - P_z C_2 + P_x C_1 S_2 + P_y S_1 S_2)$$

$$-S_3(P_z S_2 - 150S_2 + P_x C_1 C_2 + P_y C_2 S_1 - 180) \quad (3.103)$$

$$b_{31} = k_x S_1 - k_y C_1 \quad (3.104)$$

$$b_{32} = d_x S_1 - d_y C_1 \quad (3.105)$$

$$b_{33} = n_x S_1 - n_y C_1 \quad (3.106)$$

$$b_{34} = P_x S_1 - P_y C_1 \quad (3.107)$$

$$b_{41} = 0 \quad (3.108)$$

$$b_{42} = 0 \quad (3.109)$$

$$b_{43} = 0 \quad (3.110)$$

$$b_{44} = 1 \quad (3.111)$$

Ters kinematik analiz denklemleri ve ileri kinematik analiz denklemleri kullanılarak endefektörün istenen konum vektörünü elde etmek için servo motorlara verilmesi gereken açı değerleri, ileri ve geri analizde elde edilen matrislerden gerekli denklemlerin eşitlenmesiyle bulunur. Bu çözümlemede elde edilen ifadeler atan2 fonksiyonuna ait çözümleme yaklaşımı aşağıdaki gibi kullanılmıştır:

$$a.\sin\theta + b.\cos\theta = 0 \quad (3.112)$$

Çözümlemede elde edilen eşitlikler denklem (3.112)'deki gibi bir formatta ise atan2 fonksiyonu iki farklı değer alır. Bu iki değer denklem (3.113)'deki gibi tanımlanır.

$$\theta_1 = \text{atan2}(-b, a), \quad \theta_2 = \text{atan2}(b, -a) \quad (3.113)$$

değerlerini alır.

Denklem(3.32) ve denklem (3.89)'de yer alan matrislerin (3,3) indisli elemanları birbirine eşitlendiğinde,

$${}^2_5T(3,3) = 0 \quad (3.114)$$

$${}^2_5H(3,3) = n_x S_1 - n_y C_1 \quad (3.115)$$

$$n_x S_1 - n_y C_1 = 0 \quad (3.116)$$

Denklem(3.116) elde edilir. Bu denklem, denklem (3.112)'in formatında olduğu için $a1 = n_x$, $b1 = -n_y$ ifadeleri, denklem (3.113)teki eşitliklerde yazıldığında denklem(3.117) elde edilir.

$$\theta_{11} = \text{atan2}(n_y, n_x), \theta_{12} = \text{atan2}(-n_y, -n_x) \quad (3.117)$$

Birinci motorun dönme acısı θ_1 için, denklem (3.17)'deki gibi iki farklı sonuç elde edilmiştir.

Denklem (3.44) ve denklem (3.89)un (3,4) indisli elemanı eşitlenip, denklem(3.42) ve denklem (3.89)un (3,2) indisli elemanının eşitliğiyle taraf tarafa oranlandığında, denklem (3.126) elde edilir.

$${}^2_5T(3,4) = 60S_5 \quad (3.118)$$

$${}^2_5H(3,4) = P_x S_1 - P_y C_1 \quad (3.119)$$

$$60S_5 = P_x S_1 - P_y C_1 \quad (3.120)$$

$${}^2_5T(3,2) = C_5 \quad (3.121)$$

$${}^2_5H(3,2) = d_x S_1 - d_y C_1 \quad (3.122)$$

$$C_5 = d_x S_1 - d_y C_1 \quad (3.123)$$

$$\frac{60S_5}{C_5} = \frac{P_x S_1 - P_y C_1}{d_x S_1 - d_y C_1} \quad (3.124)$$

$$60(d_x S_1 - d_y C_1)S_5 = (P_x S_1 - P_y C_1)C_5 \quad (3.125)$$

$$60(d_x S_1 - d_y C_1)S_5 - (P_x S_1 - P_y C_1)C_5 = 0 \quad (3.126)$$

$$a_5 \sin \theta + b_5 \cos \theta = 0 \quad (3.127)$$

Denklem (3.126), denklem (3.127) formatında olduğu için atan2 fonksiyon çözüm yaklaşımından faydalanarak denklem (3.130) ve denklem (3.131) sonuçlarına ulaşılmıştır.

$$a_5 = 60(d_x S_1 - d_y C_1) \quad (3.128)$$

$$b_5 = -(P_x S_1 - P_y C_1) = -P_x S_1 + P_y C_1 \quad (3.129)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(P_x S_1 - P_y C_1, 60(d_x S_1 - d_y C_1)) \quad (3.130)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(-P_x S_1 + P_y C_1, -60(d_x S_1 - d_y C_1)) \quad (3.131)$$

Beşinci motorun dönme acısı θ_5 için, denklem (3.130) ve denklem (3.131)'deki gibi iki farklı sonuç elde edilmiştir.

Denklem (3.30) ve denklem (3.92)'nin (1,1) indisli elemanları eşitlenip, denklem (3.30) ve denklem (3.92)'lerin (1,2) indisli elemanlarının eşitliğinden elde edilen ifadeler taraf tarafa oranlandığında denklem (3.141) elde edilir.

$${}^3_5T(1,1) = -S_{34}C_5 \quad (3.132)$$

$${}^3_5H(1,1) = k_zS_2 + k_xC_1C_2 + k_yC_2S_1 \quad (3.133)$$

$$-S_{34}C_5 = k_zS_2 + k_xC_1C_2 + k_yC_2S_1 \quad (3.134)$$

$${}^3_5T(1,2) = S_{34}S_5 \quad (3.135)$$

$${}^3_5H(1,2) = d_zS_2 + d_xC_1C_2 + d_yC_2S_1 \quad (3.136)$$

$$S_{34}S_5 = d_zS_2 + d_xC_1C_2 + d_yC_2S_1 \quad (3.137)$$

$$\frac{-S_{34}C_5}{S_{34}S_5} = \frac{k_zS_2 + k_xC_1C_2 + k_yC_2S_1}{d_zS_2 + d_xC_1C_2 + d_yC_2S_1} \quad (3.138)$$

$$(k_zS_2 + k_xC_1C_2 + k_yC_2S_1)S_5 = -(d_zS_2 + d_xC_1C_2 + d_yC_2S_1)C_5 \quad (3.139)$$

$$k_zS_2S_5 + k_xC_1C_2S_5 + k_yC_2S_1S_5 + d_zC_5S_2 + d_xC_1C_2C_5 + d_yC_2C_5S_1 = 0 \quad (3.140)$$

$$(k_zS_5 + d_zC_5)S_2 + (k_xC_1S_5 + k_yS_1S_5 + d_xC_1C_5 + d_yC_5S_1)C_2 = 0 \quad (3.141)$$

$$a_2 \cdot \sin\theta + b_2 \cdot \cos\theta = 0 \quad (3.142)$$

Denklem (3.141), denklem (3.142) formatında olduğundan atan2 fonksiyonun çözüm yaklaşımından faydalananarak denklem (3.144) ve denklem (3.145) elde edilir.

$$a_2 = k_zS_5 + d_zC_5 \quad b_2 = k_xC_1S_5 + k_yS_1S_5 + d_xC_1C_5 + d_yC_5S_1 \quad (3.143)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(-(k_x C_1 S_5 + k_y S_1 S_5 + d_x C_1 C_5 + d_y C_5 S_1), k_z S_5 + d_z C_5) \quad (3.144)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(k_x C_1 S_5 + k_y S_1 S_5 + d_x C_1 C_5 + d_y C_5 S_1, -k_z S_5 - d_z C_5) \quad (3.145)$$

İkinci motorun dönme açısı θ_2 için, denklem (3.144) ve denklem (3.145)'deki gibi iki farklı sonuç elde edilmiştir.

Denklem (3.28)in (1,1) indisli elemanı ve denklem (3.96)ler eşitlenip, denklem (3.28)in (1,2) indisli elemanı ve denklem (3.97)in eşitliğinden elde edilen ifadeler taraf tarafa oranlandığına da denklem (3.155) elde edilir.

$${}^4_5T(1,1) = -C_5 S_4 \quad (3.146)$$

$${}^4_5H(1,1) = C_3(k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1) - S_3(k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2) \quad (3.147)$$

$$-C_5 S_4 = C_3(k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1) - S_3(k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2) \quad (3.148)$$

$${}^4_5T(1,2) = S_4 S_5 \quad (3.149)$$

$${}^4_5H(1,2) = C_3(d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) - S_3(d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2) \quad (3.150)$$

$$S_4 S_5 = C_3(d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) - S_3(d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2) \quad (3.151)$$

$$\frac{-C_5 S_4}{S_4 S_5} = \frac{C_3(k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1) - S_3(k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2)}{C_3(d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) - S_3(d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2)} \quad (3.152)$$

$$\frac{-C_5}{S_5} \frac{C_3(k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1) - S_3(k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2)}{C_3(d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) - S_3(d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2)} \quad (3.153)$$

$$C_3 S_5(k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1) - S_3 S_5(k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2) =$$

$$-C_3 C_5 (d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) + C_5 S_3 (d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2) \quad (3.154)$$

$$\begin{aligned} & [C_5 (d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2) + S_5 (k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2)] S_3 \\ & - [C_5 (d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) + S_5 (k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1)] C_3 = 0 \end{aligned} \quad (3.155)$$

$$a_3 \sin \theta + b_3 \cos \theta = 0 \quad (3.156)$$

Denklem (3.155), denklem (3.156) formatında olduğundan atan2 fonksiyon çözüm yaklaşımından faydalanarak denklem (3.159) ve denklem (3.160) elde edilir.

$$a_3 = C_5 (d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2) + S_5 (k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2) \quad (3.157)$$

$$b_3 = -[C_5 (d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) + S_5 (k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1)] \quad (3.158)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(C_5 (d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) + S_5 (k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1),$$

$$C_5 (d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2) + S_5 (k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2)) \quad (3.159)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(-C_5 (d_z S_2 + d_x C_1 C_2 + d_y C_2 S_1) - S_5 (k_z S_2 + k_x C_1 C_2 + k_y C_2 S_1),$$

$$-C_5 (d_x C_1 S_2 - d_z C_2 + d_y S_1 S_2) - S_5 (k_x C_1 S_2 - k_z C_2 + k_y S_1 S_2)) \quad (3.160)$$

Üçüncü motorun dönme acısı θ_3 için, denklem (3.159) ve denklem (3.160)'deki gibi iki farklı sonuç elde edilmiştir.

Denklem (3.28)in (1,3) indisli elemanı ve denklem (3.98)ler eşitlenip, denklem (3.28)in (2,3) indisli elemanı ve denklem (3.102)in eşitliğinden elde edilen ifadeler taraf tarafa oranlandığında denklem (3.169) elde edilir:

$${}^4_5T(1,3) = C_4 \quad (3.161)$$

$${}^4_5H(1,3) = C_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - S_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2) \quad (3.162)$$

$$C_4 = C_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - S_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2) \quad (3.163)$$

$${}^4_5T(2,3) = S_4 \quad (3.164)$$

$${}^4_5H(2,3) = -S_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - C_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2) \quad (3.165)$$

$$S_4 = -S_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - C_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2) \quad (3.166)$$

$$\frac{C_4}{S_4} \frac{C_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - S_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2)}{-S_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - C_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2)} \quad (3.167)$$

$$\begin{aligned} & [C_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - S_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2)] S_4 = \\ & -[S_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) + C_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2)] C_4 \end{aligned} \quad (3.168)$$

$$\begin{aligned} & [C_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - S_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2)] S_4 + \\ & [S_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) + C_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2)] C_4 = 0 \end{aligned} \quad (3.169)$$

$$a_4 \sin \theta + b_4 \cos \theta = 0 \quad (3.170)$$

Denklem (3.169), denklem (3.170) formatında olduğundan atan2 fonksiyon çözüm yaklaşımından faydalanarak denklem (3.173) ve denklem (3.174) elde edilir.

$$a_4 = C_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - S_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2) \quad (3.171)$$

$$b_4 = S_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) + C_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2) \quad (3.172)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(-S_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - C_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2),$$

$$C_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) - S_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2)) \quad (3.173)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(S_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) + C_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2),$$

$$-C_3(n_z S_2 + n_x C_1 C_2 + n_y C_2 S_1) + S_3(n_x C_1 S_2 - n_z C_2 + n_y S_1 S_2)) \quad (3.174)$$

Dördüncü motorun dönme açısı θ_4 için, denklem (3.173) ve denklem (3.174)'deki gibi iki farklı sonuç elde edilmiştir.

Yapılan ileri ve geri (ters) kinematik analizde elde edilen dönüşüm matrislerinden faydalanarak elde edilen açı değerleri, robot kolun tutucu ucunun istenilen pozisyona gitmesi için servo motorlara verilmesi gereken açılardır. Fakat ters kinematik analizle elde edilen açı, fonksiyonlarına istenilen pozisyonun değerleri yazılıp program (EK 2) çalıştırıldığında açı ve tutucu uç pozisyon matrislerindeki sonuçların ileri kinematik analiz sonucunu karşılamadığı EK 3'te görülmektedir. İşlemler incelendiğinde işlemlerde elde edilen çözüm kümesinin elemanlarının bazısının sanal sonuçlar olmasından kaynaklanmaktadır. Buradan anlaşıldığına göre tasarlanan robot kolun gerçek (fiziksel) olarak bazı matematiksel sonuçları karşılamadığı görülmüştür. Bazı sonuçların sanal olması çözümün yanlış olduğu anlamına gelmez. Robot kolun çalışması elde edilen gerçek sonuçlarla sağlanır.

4. BULGULAR

Yapılan bu robot kol çalışmasında uzuv boyutlarının boyama işlemine uygun bir uzay alanı oluşturacak şekilde elde edildi. Elde edilen boyutlar tablo 3.1.'deki gibidir. Bu uzuv boyutları kullanılarak Solidworks üç boyutlu katı model programıyla elde edilen robot kol uzuvları programın montaj ekranında birleştirilerek şekil 3.1. ve şekil 3.2. robot kol elde edildi. Robot kolun çalışma şeklinin ortaya konulması için şekil 3.3.'deki görsel elde edildi. Elde edilen uzuv boyutlarına uygun olacak şekilde imalatı yapılan robot kol şekil 3.4.'te görüldüğü gibi imalatı yapıldı.

Uzuv boyutlarına uygun olarak oluşturulan robot kolun, ileri kinematik analiz için D-H parametreleri tablo 3.3.'teki gibi elde edildi. Bu parametreler kullanılarak homojen dönüşüm matrisleri denklem (3.18), denklem (3.20), denklem (3.22), denklem (3.24) ve denklem (3.26)'deki gibi elde edildi. Bu matrisler kullanılarak robot kolun kartezyen koordinat sisteminde robot kolun başlangıç eksenin orijinine göre bulunduğu koordinatlar; X-ekseni için denklem (3.54)'te ,Y-ekseni denklem (3.58)'de ve Z-ekseni denklem (3.62)'deki gibi elde edildi. Elde edilen denklemlerin doğruluğu test edilerek tablo (3.9.), tablo (3.10.), tablo (3.11.), tablo (3.12.), tablo (3.13.), tablo (3.14.) ve tablo (3.15.)'teki doğrulama sonuçlarına ulaşıldı. Ters kinematik analiz için yapılan matematiksel çözümler sonucunda robot kolun eklem motorlarına verilmesi gereken açı değerlerinin istenilen koordinat ve yönelim değerlerine bağlı bağıntıları, denklem (3.117), denklem (3.130), denklem (3.131), denklem (3.144), denklem (3.145), denklem (3.159), denklem (3.160), denklem (3.173) ve denklem (3.174)'deki gibi elde edildi.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada yapılan ileri ve ters kinematik analizlerde; robot kolun serbestlik derecesinin artmasından dolayı elde edilmesi gereken açı değerlerinin bulunmasının zorlaştığı görüldü. Bu sıkıntılı durumun aşılmasında Fuat Özüdoğru'nun tez çalışmasında kullandığı yapıcı sinir ağı yaklaşımının kullanılarak istenilen motor açı değerlerinin daha kolay bir şekilde bulunabileceği ortaya konmuştur [5].

Yapılan bu çalışmada robot kolda kullanılan servo motorlar analog olarak geri beslemeli olup istenilen konuma hareketleri çok hızlı olduğundan robot kol tutucu ucu istenilen sonuçlardan sapmaktadır. Bu sorunun ortadan kaldırılması için Gamze Yüksel, Gökhan Yıldırım, Oruç Aksoy'un robot kollar üzerinde yaptıkları PID kontrol yaklaşımı kullanılarak robot kolun pozisyonlama eksikliği giderilebilir [8-12-18].

Bu çalışmada robot kolun uzuv ağırlıkları ve bundan kaynaklı atalet momenti göz önünde bulundurulmadığı için yörüngeden sapmalar meydana gelmektedir. Yutian Wang'ın çalışmasında ağırlıktan kaynaklanan yerçekimi etkisinin de hesaplamalara katılması gerektiği ve Mustafa Buğdayın yaptığı çalışmada öngörülen atıl yüklerin atılarak robot kolun şasesinin optimize edilerek hem daha küçük motor kullanılabileceği ve aynı zamanda yörünge sapmalarının önüne geçilebileceği değerlendirilmiştir [14-26].

Değerlendirilen çalışmalarda robot kolun hareketinin genellikle kodlama yöntemiyle sağlandığı görülmüştür. Fakat yapılan bu çalışmada robot kolun boyama yörüngesinin; robot kol operatörünün bir ürünü manuel olarak boyaması esnasında kontrol ünitesi tarafından hareketlerin kayıt edilmesiyle elde edildiği için bu sistemin daha kullanılabilir olduğu ortaya konmuştur.

Diğer bir hususta boyama esnasında robot kolun boyanacak ürünün etrafında dolanması öngörülmüştür. Döner tablalı boyama robot kol çalışmasında kullanılan döner tabla ürünü kendi ekseninde dönmesini sağlayarak boyama işleminin daha kolay yapılabilmesini öngörmüştür.

Ters kinematik analizde sonuçlar incelendiğinde; robot kol motorları için elde edilen açı değerlerinin her zaman gerçek değerlere karşılık gelmediği anlaşılmıştır. Bundan dolayı robot kol işlem yörüngesinin enkoder ve diğer geri besleme kanalları yardımıyla alınan verilerin kullanılarak oluşturulması daha uygundur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Yapılan bu döner tablalı robot kol çalışmasında, robot kolun uzuv boyutlarına ve hareket şekline bağlı olarak elde edilen verilerle D-H tablosu oluşturulmuştur(Tablo 3.3.). İleri kinematik analizde robot kolun hareketini belirleyen homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak DH parametrelerine bağlı olarak tutucu uçun üç boyutlu uzayda birinci sabit eksene göre bulunacağı konum belirlenmiştir(denklem(3.54), denklem(3.58), denklem(3.62)). Tasarlanan robot kolda, robot kolun üç boyutlu uzayda maksimum uzanımı sabit eksene göre maksimum uzanım 601 mm, minimum uzanım 100 mm olarak belirlenmiştir. Robot kolun eklemlerinde kullanılan servo motorlar; gövde, omuz ve dirsekte 180°'lik, bilek ve tutucu ise 270°'lik dönüş açılarına sahip olduğundan robot kolun bu açı değerlerine göre dönüşleri kısıtlanmıştır. Döner tablada boyanacak ürünün daha kolay boyanabilmesi için 360° dönen servo motor kullanılmıştır. Robot kolun kontrol ünitesi oluşturulurken bağlantı elemanı olarak ray klamenslerle montaj kolaylığı sağlanmıştır. Böylece arızalara müdahalelerde kolaylık sağlanmıştır. Arduino UNO (7-12V) kontrol kartının enerji beslemesi amacıyla 12V'luk, servo motorların enerji beslemesi için 5V'luk doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır. Bu şekilde kullanılan güç kaynaklarıyla motor ve kontrol kartının zarar görmesi engellenmiştir. Ayrıca mikro denetleyici ve servo motorların aynı referansta çalışabilmesi için güç kaynaklarının GND'leri birleştirilmiştir. Yazılan hareket kontrol programıyla robot kolun boyama işlemi esnasında manuel olarak hareket yörüngesi kayıt edilerek yörünge oluşturma işlemi kolaylaştırılmıştır. Böylece ürün değişiminde yeni program oluşturulması için gereken kodların pratik bir şekilde elde edilmesi sağlanmıştır.

Sonuç olarak yapılan bu çalışmayla küçük ve orta büyüklükteki iş yerlerinde programlama işlemine gereksinim duyulmadan boyama işleminin yapılabileceği görülmüştür. Robot kol kullanımında işlem kolaylığı sağlayan bu yaklaşım erişilebilir ve kullanılabilir bir sistem olarak önerilmiştir. Bu tez çalışmasında elde edilen robot kol tasarım ve programlama mantığı, yeni robot kol çalışmalarında kullanılması amaçlanmıştır.

6.2. Öneriler

- Elde edilen ileri ve ters kinematik analiz çalışması, diğer robot kol analizlerin de bir örnek olarak kullanılabilir.
- Yapılan program algoritmasında zaman faktörünü de göz önünde bulundurarak robot kolun daha uyumlu çalışması sağlanabilir.
- Tartışmada değinildiği üzere robot kolun daha istikrarlı olabilmesi için PID kontrolün robot kola uygulanmasının gerektiği öngörülmüştür.
- Elde edilen bu yaklaşımla boyama haricinde delme, istifleme, montaj, ayıklama gibi birçok çalışmaya adapte edilerek kullanılabilir.

KAYNAKÇA

- [1] IFR. (2022). "Dünya robotik Raporu", Frankfurt, https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf , (01.10.2022).
- [2] 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.
- [3] Abdellatif, M. (2012, August). Design of an autonomous wall painting robot. In *First International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems*. Okayama, Japan.
- [4] Zbiss, K., Kacem, A., Santillo, M., & Mohammadi, A. (2022). Automatic collision-free trajectory generation for collaborative robotic car-painting. *IEEE Access*, 10, 9950-9959.
- [5] Özudoğru, 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.
- [6] Makomo, T. J. (2020). "3 boyutlu nesne algılaması ile çalışan robot kollu otonom taşıma sistemi tasarımı." Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] Hız, O. (2019). "Cisimleri renklerine göre seçen PLC kontrollü robot kol tasarımı ve uygulaması." Yüksek Lisans Tezi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] 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.
- [9] Yıldırım, M. Y. (2019). "Gerçek zamanlı görüntü işleme temelli al-bırak yapabilen endüstriyel robot kol." Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [10] Sarıaltın, E. (2017). "5 Eksenli Endüstriyel Robot Kol." Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [11] Seçil, S. (2015). “Endüstriyel robot kolları için kolay programlama yöntemi geliştirme.” Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] Yıldırım, G. (2021). “Üç eksenli bir robot kolun kontrol metodların incelenmesi ve verimlilik analizi” Yüksek Lisans Tezi. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü eğitim Enstitüsü.
- [13] Karaca, M. M. (2020). “Endüstriyel amaçlı küresel robot kolu ve tutucunun tasarımı ve kontrolü.”, Yüksek Lisans Tezi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [14] 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.
- [15] Yalvaç, M. (2015). “Cerrahi amaçlı bir robot kolunun tasarımı ve uzaktan kontrolü.” Yüksek Lisans Tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] Yüzgeç, U., Büyüktepe, H. E., & Karakuzu, C. (2016). Kablosuz eldiven sistemi ile kontrol edilen robot kol tasarımı. Türkiye bilişim vakfı bilgisayar bilimleri ve mühendisliği dergisi, 9(2), 35-42.
- [17] Demircan, O., Karakuş, R., & Abacı, B., “ Bir katı modeli boyayabilen bir mekanizma geliştirilmesi ”, V. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi, Hidrolik Pnömatik 2008 Program Bildirileri-34, Makine Mühendisleri Odası, İzmir, 23-26 Ekim 2008, s.419-425.
- [18] Aksoy O. ve Akbulut A. (2020). "Bir Otomotiv Tesisinde Boya Kabininin Otomasyonu ve Boya Prosesinin Robot Kullanılarak İyileştirilmesi." Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi C Bölümü: Tasarım ve Teknoloji, 8.2 245-261.
- [19] Önel D. S. ve Kandemir Ç. “ Resim Çizen Robot Kol Tasarımı ve Uygulaması”, Gürel A. E., Biçen Y., Koyuncu İ., Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu: 11-13 Eylül 2017-Düzce, Bildiriler Kitabı, (s.92-100), 2017.

- [20] Kumtola, S., Suryawanshi, P., Pawar, R., Sayyed, A., & Liyakat, K. K. S. (2022). Automatic wall painting robot Automatic wall painting robot. *Journal of Image Processing and Intelligent Remote Sensing (JIPIRS)* ISSN 2815-0953, 2(06), 11-22.
- [21] Gujela, O. P., Gujela, V., & Gujela, D. P. (2015). Six DOF spray painting robot analysis. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4, 7721-7731.
- [22] Adzeman, M. A. M., Zaman, M. H. M., Nasir, M. F., Faisal, M., & Ibrahim, S. M. M. (2020). Kinematic modeling of a low cost 4 DOF robot arm system. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10).
- [23] Balara A. and Pasko J. , (2010). “ Pneumatic Painting Robot ”. *Annals Of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal*. Cilt VIII (2010 Yılı). Fasikül 2 (ISSN 1584 – 2665)
- [24] Yahya A., Abdulla R. , Bahrin S. Mohd. (2020). “Automatic Wall Painting Robot with Multiple Colors” . *Journal of Applied Technology and Innovation*. vol. 4, no. 3, (2020) (e – ISSN: 2600-7304)
- [25] Zin T. P. And Nyein A. K.. (2019). “ DC Gear – Motor Position control for 3-DOF Articulated Painting Robot arm”. *International Conference on Science and Technology for Sustainable Development*.
[https://www. Researchgate . net /profile/Aung-Nyein/publication/335001054_DC_Gear-Motor_Position_Control_for_3DOF_Articulated_Painting_Robot_arm](https://www.Researchgate.net/profile/Aung-Nyein/publication/335001054_DC_Gear-Motor_Position_Control_for_3DOF_Articulated_Painting_Robot_arm), (03.10.2023)
- [26] Wang, Y., Li, M., Wang, J., Zhao, Q., Wu, J., & Wang, J. (2022). Kinematic Calibration Method for Large-Sized 7-DoF Hybrid Spray-Painting Robots. *Machines*, 11(1), 20.

- [27] Usmanov V. and Michal B. (2016). "Optimizing the trajectory of the painting robot." ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Vol. 33.. P.1.
- [28] Chen, W., Liu, J., Tang, Y., Huan, J., & Liu, H. (2017). Trajectory optimization of spray painting robot for complex curved surface based on exponential mean Bézier method. Mathematical Problems in Engineering. Article ID 4259869.
- [29] Muneer A. and Dairabayev Z. (2021). “ Design and implementation of automatic Painting mobile robot”. IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA) V.10 No.1, : 68-74.
- [30] Dişlitaş, S. (2015). “ endüstriyel robot programlama ” Çorum Endüstriyel Robot Programlama Eğitimi ile Mesleki ve Teknik Eğitim Güçlendirilmesi (ERPE-METEG), Çorum
- [31] Akbulut U., “Robotlar 3000 Yıllık Hayalin Ürünleri”,(07.05.2014)
<https://www.uralakbulut.com.tr/wp-content/uploads/2014/05/ROBOTLAR-3000-YILLIK-> (27.11.2022)
- [32] Sarıaltın, E. (2017). "5-Eksenli Endüstriyel Robot Kol", Yüksek Lisans tezi. İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [33] Alp, O.E. (2012). "Genel Amaçlı Robot Kol Tasarımı", Yüksek Lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [34] Wikipedia, “Kinematik “,(19.01.2022) <https://tr.wikipedia.org/wiki/Kinematik> (10.05.2022).

- [35] Duymazlar, O. (2020).“ Altı Serbestlik Dereceli Seri Robot Kolunun Ters Kinematik Analizi İçin Hızlı Algoritma Geliştirilmesi ve Uygulanması” Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [36] Alli H. “ Robotik ders notu”, Fırat Üniversitesi, 2008
- [37] Bingöl Z. ve Küçük S., (2017). Robot Kinematiği. Kocaeli: Umuttepe yayınları
- [38] Roborduino, “Denavit-Hartenberg kavramı: 3DOF Küresel RRP Eklem”, (02.02.2022) <https://www.youtube.com/@roborduino253>, (15.05.2023).
- [39] Açık kaynak online devre çizimi, “elektronik devre çizim simülasyon programı”, (07.11.2022) <https://www.tinkercad.com/dashboard> (30.11.2022).
- [40] Promodelhobby, “Feetech 35 kg servo motor”, <https://www.promodelhobby.com/urun/feetech-ft5330m-35-kg-celik-disli-dijital-rc-servo-motor>, (13.05.2023).
- [41] fldepo, “power hd 1501 mg servo motor”, <https://www.fldepo.com/urun/powerhd-yuksek-torklu-bakir-dislili-standart-analog-servo-motor-hd-1501mg> (13.05.2023).
- [42] robolinkmarket, “tower pro mg995 servo motor”, <https://www.robolinkmarket.com/tower-pro-mg995-servo-motor> (13.05.2023).
- [43] Robotzade, “arduino Uno kontrol kartı” <https://www.robotzade.com/Arduino-UNO-R3-Klon-USB-Kablo-Hediyeli-USB-Chip-CH340,PR-7.html> (13.05.2023).
- [44] Hepsiburada, “5V led adaptörü” <https://www.hepsiburada.com/ledwell-lw-150-5-5-volt-30-amper-metal-kasa-adaptor-5v-30a-adaptor-pm-HBC00000C47EV> (13.05.2023).
- [45] n11.com, “12V led adaptör” <https://www.n11.com/urun/ack-led-trafosu-5-amper-60w-35036151> (17.05.2023).
- [46] kompent.com, “x-y eksenli jostick modül”, <https://www.kompent.com/xy-joystick-modulu> (17.05.2023).

EKLER

EK 1: İleri kinematik analiz transformasyon matrisleri MATLAB program kodları

```
clc;
clear;
clear all;
syms H T1 T2 T3 T4 T5 T6 A11 A12 A13 A14 A15 A16 a1 a2 a3 a4 a5 a6 d1 d2 d3 d4 d5 d6
kx dx nx px ky dy ny py kz dz nz pz
a1=0; a2=180; a3=190; a4=0; a5=60; d1=150; d2=0; d3=0; d4=0; d5=80;
% T1=0; T2=0; T3=0; T4=0; T5=pi/2;
A11=90; A12=0; A13=0; A14=90; A15=0;

A1=[cos(T1) -sin(T1)*cosd(A11) sin(T1)*sind(A11) a1*cos(T1); sin(T1) cos(T1)*cosd(A11) -
cos(T1)*sind(A11) a1*sin(T1); 0 sind(A11) cosd(A11) d1; 0 0 0 1];

A2=[cos(T2) -sin(T2)*cosd(A12) sin(T2)*sind(A12) a2*cos(T2); sin(T2) cos(T2)*cosd(A12) -
cos(T2)*sind(A12) a2*sin(T2); 0 sind(A12) cosd(A12) d2; 0 0 0 1];

A3=[cos(T3) -sin(T3)*cosd(A13) sin(T3)*sind(A13) a3*cos(T3); sin(T3) cos(T3)*cosd(A13) -
cos(T3)*sind(A13) a3*sin(T3); 0 sind(A13) cosd(A13) d3; 0 0 0 1];

A4=[cos(T4+pi/2) -sin(T4+pi/2)*cosd(A14) sin(T4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(T4+pi/2);
sin(T4+pi/2) cos(T4+pi/2)*cosd(A14) -cos(T4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(T4+pi/2); 0 sind(A14)
cosd(A14) d4; 0 0 0 1];

A5=[cos(T5) -sin(T5)*cosd(A15) sin(T5)*sind(A15) a5*cos(T5); sin(T5) cos(T5)*cosd(A15) -
cos(T5)*sind(A15) a5*sin(T5); 0 sind(A15) cosd(A15) d5; 0 0 0 1];

K15=A1*A2*A3*A4*A5;
T15=simplify(K15)
% kx=K15(1,1); dx=K15(1,2); nx=K15(1,3); px=K15(1,4); ky=K15(2,1); dy=K15(2,2);
ny=K15(2,3); py=K15(2,4); kz=K15(3,1); dz=K15(3,2); nz=K15(3,3); pz=K15(3,4);
H=[kx dx nx px; ky dy ny py; kz dz nz pz; 0 0 0 1]
K25=A2*A3*A4*A5;
T25=simplify(K25)
H25=simplify(inv(A1)*H)
K35=A3*A4*A5;
T35=simplify(K35)
H35=simplify(inv(A2)*H25)
K45=A4*A5;
T45=simplify(K45)
H45=simplify(inv(A3)*H35)
```

EK 2: Geri (ters) kinematik analiz transformasyon matrisleri MATLAB program kodları

```
clc;
clear;
clear all;
format

syms H T1 T2 T3 T4 T5 T6 A11 A12 A13 A14 A15 A16 a1 a2 a3 a4 a5 a6 d1 d2
      d3 d4 d5 d6 kx dx nx px ky dy ny py kz dz nz pz qx qy qz vx vy vz ux
      uy uz Qx Qy Qz

a1=0; a2=180; a3=190; a4=0; a5=60; d1=150; d2=0; d3=0; d4=0; d5=80;

T1=pi/4; T5=pi/2; T2=pi/2; T3=pi/6; T4=pi/4;

A11=90; A12=0; A13=0; A14=90; A15=0;

A1=[cos(T1) -sin(T1)*cosd(A11) sin(T1)*sind(A11) a1*cos(T1);sin(T1)
    cos(T1)*cosd(A11) -cos(T1)*sind(A11) a1*sin(T1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;
    0 0 0 1];

A2=[cos(T2) -sin(T2)*cosd(A12) sin(T2)*sind(A12) a2*cos(T2);sin(T2)
    cos(T2)*cosd(A12) -cos(T2)*sind(A12) a2*sin(T2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;
    0 0 0 1];

A3=[cos(T3) -sin(T3)*cosd(A13) sin(T3)*sind(A13) a3*cos(T3);sin(T3)
    cos(T3)*cosd(A13) -cos(T3)*sind(A13) a3*sin(T3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;
    0 0 0 1];

A4=[cos(T4+pi/2) -sin(T4+pi/2)*cosd(A14) sin(T4+pi/2)*sind(A14)
    a4*cos(T4+pi/2);sin(T4+pi/2) cos(T4+pi/2)*cosd(A14) -
    cos(T4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(T4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];

A5=[cos(T5) -sin(T5)*cosd(A15) sin(T5)*sind(A15) a5*cos(T5);sin(T5)
    cos(T5)*cosd(A15) -cos(T5)*sind(A15) a5*sin(T5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;
    0 0 0 1];

K15=A1*A2*A3*A4*A5;

% T15=simplify(K15)

kx=K15(1,1); dx=K15(1,2); nx=K15(1,3); px=K15(1,4); ky=K15(2,1); dy=K15(2,2);
ny=K15(2,3); py=K15(2,4); kz=K15(3,1); dz=K15(3,2); nz=K15(3,3); pz=K15(3,4);

H=[kx dx nx px; ky dy ny py; kz dz nz pz;0 0 0 1]
```

```

c11=atan2(ny, nx);
tta11=atan2(ny, nx)*180/pi

c12=atan2(-ny,-nx);
tta12=atan2(-ny,-nx)*180/pi

.....
c51c11=atan2(px*sin(c11)-py*cos(c11), 60*dx*sin(c11)-60*dy*cos(c11));
ttac51c11=atan2(px*sin(c11)-py*cos(c11), 60*dx*sin(c11)-60*dy*cos(c11))*180/pi

c51c12=atan2(px*sin(c12)-py*cos(c12), 60*dx*sin(c12)-60*dy*cos(c12));
ttac51c12=atan2(px*sin(c12)-py*cos(c12), 60*dx*sin(c12)-60*dy*cos(c12))*180/pi

c52c11=atan2(-px*sin(c11)+py*cos(c11), -60*dx*sin(c11)+60*dy*cos(c11));
ttac52c11=atan2(-px*sin(c11)+py*cos(c11), -60*dx*sin(c11)+60*dy*cos(c11))*180/pi

c52c12=atan2(-px*sin(c12)+py*cos(c12), -60*dx*sin(c12)+60*dy*cos(c12));
ttac52c12=atan2(-px*sin(c12)+py*cos(c12), -60*dx*sin(c12)+60*dy*cos(c12))*180/pi

.....
c21c51c11=atan2(-kx*cos(c11)*sin(c51c11)-ky*sin(c11)*sin(c51c11)-dx*cos(c11)*cos(c51c11)
               -dy*cos(c51c11)*sin(c11), kz*sin(c51c11)+dz*cos(c51c11));

ttac21c51c11=atan2(-kx*cos(c11)*sin(c51c11)-ky*sin(c11)*sin(c51c11)-dx*cos(c11)*cos(c51c11)
                  -dy*cos(c51c11)*sin(c11), kz*sin(c51c11)+dz*cos(c51c11))*180/pi

c21c51c12=atan2(-kx*cos(c12)*sin(c51c12)-ky*sin(c12)*sin(c51c12)-dx*cos(c12)*cos(c51c12)
               -dy*cos(c51c12)*sin(c12), kz*sin(c51c12)+dz*cos(c51c12));

ttac21c51c12=atan2(-kx*cos(c12)*sin(c51c12)-ky*sin(c12)*sin(c51c12)-dx*cos(c12)*cos(c51c12)
                  -dy*cos(c51c12)*sin(c12), kz*sin(c51c12)+dz*cos(c51c12))*180/pi

c21c52c11=atan2(-kx*cos(c11)*sin(c52c11)-ky*sin(c11)*sin(c52c11)-dx*cos(c11)*cos(c52c11)
               -dy*cos(c52c11)*sin(c11), kz*sin(c52c11)+dz*cos(c52c11));

ttac21c52c11=atan2(-kx*cos(c11)*sin(c52c11)-ky*sin(c11)*sin(c52c11)-dx*cos(c11)*cos(c52c11)
                  -dy*cos(c52c11)*sin(c11), kz*sin(c52c11)+dz*cos(c52c11))*180/pi

```

```

c21c52c12=atan2(-kx*cos(c12)*sin(c52c12)-ky*sin(c12)*sin(c52c12)-dx*cos(c12)*cos(c52c12)
-dy*cos(c52c12)*sin(c12),kz*sin(c52c12)+dz*cos(c52c12));

ttac21c52c12=atan2(-kx*cos(c12)*sin(c52c12)-ky*sin(c12)*sin(c52c12)-dx*cos(c12)*cos(c52c12)
-dy*cos(c52c12)*sin(c12),kz*sin(c52c12)+dz*cos(c52c12))*180/pi
.....
c22c51c11=atan2(kx*cos(c11)*sin(c51c11)+ky*sin(c11)*sin(c51c11)+dx*cos(c11)*cos(c51c11)+dy*cos(c51c11)*sin(c11),
-kz*sin(c51c11)-dz*cos(c51c11));

ttac22c51c11=atan2(kx*cos(c11)*sin(c51c11)+ky*sin(c11)*sin(c51c11)+dx*cos(c11)*cos(c51c11)+dy*cos(c51c11)*sin(c11),
-kz*sin(c51c11)-dz*cos(c51c11))*180/pi

c22c51c12=atan2(kx*cos(c12)*sin(c51c12)+ky*sin(c12)*sin(c51c12)+dx*cos(c12)*cos(c51c12)+dy*cos(c51c12)*sin(c12),
-kz*sin(c51c12)-dz*cos(c51c12));

ttac22c51c12=atan2(kx*cos(c12)*sin(c51c12)+ky*sin(c12)*sin(c51c12)+dx*cos(c12)*cos(c51c12)+dy*cos(c51c12)*sin(c12),
-kz*sin(c51c12)-dz*cos(c51c12))*180/pi

c22c52c11=atan2(kx*cos(c11)*sin(c52c11)+ky*sin(c11)*sin(c52c11)+dx*cos(c11)*cos(c52c11)+dy*cos(c52c11)*sin(c11),
-kz*sin(c52c11)-dz*cos(c52c11));

ttac22c52c11=atan2(kx*cos(c11)*sin(c52c11)+ky*sin(c11)*sin(c52c11)+dx*cos(c11)*cos(c52c11)+dy*cos(c52c11)*sin(c11),
-kz*sin(c52c11)-dz*cos(c52c11))*180/pi

c22c52c12=atan2(kx*cos(c12)*sin(c52c12)+ky*sin(c12)*sin(c52c12)+dx*cos(c12)*cos(c52c12)+dy*cos(c52c12)*sin(c12),
-kz*sin(c52c12)-dz*cos(c52c12));

ttac22c52c12=atan2(kx*cos(c12)*sin(c52c12)+ky*sin(c12)*sin(c52c12)+dx*cos(c12)*cos(c52c12)+dy*cos(c52c12)*sin(c12),
-kz*sin(c52c12)-dz*cos(c52c12))*180/pi
.....
% D=( (px-80*nz-150)*cos(c2)+(80*nx-px)*cos(c1)*sin(c2)+(80*ny-py)*sin(c1)*sin(c2)-
60*cos(c5)*(nz*sin(c2)+nx*cos(c1)*cos(c2)+ny*cos(c2)*sin(c1))/190;

Ac21c51c11=cos(c51c11)*(dx*cos(c11)*sin(c21c51c11)-dz*cos(c21c51c11)+dy*sin(c11)*sin(c21c51c11))
+sin(c51c11)*(kx*cos(c11)*sin(c21c51c11)-kz*cos(c21c51c11)+ky*sin(c11)*sin(c21c51c11));

Ac21c51c12=cos(c51c12)*(dx*cos(c12)*sin(c21c51c12)-dz*cos(c21c51c12)+dy*sin(c12)*sin(c21c51c12))
+sin(c51c12)*(kx*cos(c12)*sin(c21c51c12)-kz*cos(c21c51c12)+ky*sin(c12)*sin(c21c51c12));

Ac21c52c11=cos(c52c11)*(dx*cos(c11)*sin(c21c52c11)-dz*cos(c21c52c11)+dy*sin(c11)*sin(c21c52c11))

```

```

+sin(c52c11)*(kx*cos(c11)*sin(c21c52c11)-kz*cos(c21c52c11)+ky*sin(c11)*sin(c21c52c11));

Ac21c52c12=cos(c52c12)*(dx*cos(c12)*sin(c21c52c12)-dz*cos(c21c52c12)+dy*sin(c12)*sin(c21c52c12))
+sin(c52c12)*(kx*cos(c12)*sin(c21c52c12)-kz*cos(c21c52c12)+ky*sin(c12)*sin(c21c52c12));

Ac22c51c11=cos(c51c11)*(dx*cos(c11)*sin(c22c51c11)-dz*cos(c22c51c11)+dy*sin(c11)*sin(c22c51c11))
+sin(c51c11)*(kx*cos(c11)*sin(c22c51c11)-kz*cos(c22c51c11)+ky*sin(c11)*sin(c22c51c11));

Ac22c51c12=cos(c51c12)*(dx*cos(c12)*sin(c22c51c12)-dz*cos(c22c51c12)+dy*sin(c12)*sin(c22c51c12))
+sin(c51c12)*(kx*cos(c12)*sin(c22c51c12)-kz*cos(c22c51c12)+ky*sin(c12)*sin(c22c51c12));

Ac22c52c11=cos(c52c11)*(dx*cos(c11)*sin(c22c52c11)-dz*cos(c22c52c11)+dy*sin(c11)*sin(c22c52c11))
+sin(c52c11)*(kx*cos(c11)*sin(c22c52c11)-kz*cos(c22c52c11)+ky*sin(c11)*sin(c22c52c11));

Ac22c52c12=cos(c52c12)*(dx*cos(c12)*sin(c22c52c12)-dz*cos(c22c52c12)+dy*sin(c12)*sin(c22c52c12))
+sin(c52c12)*(kx*cos(c12)*sin(c22c52c12)-kz*cos(c22c52c12)+ky*sin(c12)*sin(c22c52c12));

.....
Bc21c51c11=-cos(c51c11)*(dz*sin(c21c51c11)+dx*cos(c11)*cos(c21c51c11)+dy*cos(c21c51c11)*sin(c11))
-sin(c51c11)*(kz*sin(c21c51c11)+kx*cos(c11)*cos(c21c51c11)+ky*cos(c21c51c11)*sin(c11));

Bc21c51c12=-cos(c51c12)*(dz*sin(c21c51c12)+dx*cos(c12)*cos(c21c51c12)+dy*cos(c21c51c12)*sin(c12))
-sin(c51c12)*(kz*sin(c21c51c12)+kx*cos(c12)*cos(c21c51c12)+ky*cos(c21c51c12)*sin(c12));

Bc21c52c11=-cos(c52c11)*(dz*sin(c21c52c11)+dx*cos(c11)*cos(c21c52c11)+dy*cos(c21c52c11)*sin(c11))
-sin(c52c11)*(kz*sin(c21c52c11)+kx*cos(c11)*cos(c21c52c11)+ky*cos(c21c52c11)*sin(c11));

Bc21c52c12=-cos(c52c12)*(dz*sin(c21c52c12)+dx*cos(c12)*cos(c21c52c12)+dy*cos(c21c52c12)*sin(c12))
-sin(c52c12)*(kz*sin(c21c52c12)+kx*cos(c12)*cos(c21c52c12)+ky*cos(c21c52c12)*sin(c12));

Bc22c51c11=-cos(c51c11)*(dz*sin(c22c51c11)+dx*cos(c11)*cos(c22c51c11)+dy*cos(c22c51c11)*sin(c11))
-sin(c51c11)*(kz*sin(c22c51c11)+kx*cos(c11)*cos(c22c51c11)+ky*cos(c22c51c11)*sin(c11));

Bc22c51c12=-cos(c51c12)*(dz*sin(c22c51c12)+dx*cos(c12)*cos(c22c51c12)+dy*cos(c22c51c12)*sin(c12))
-sin(c51c12)*(kz*sin(c22c51c12)+kx*cos(c12)*cos(c22c51c12)+ky*cos(c22c51c12)*sin(c12));

Bc22c52c11=-cos(c52c11)*(dz*sin(c22c52c11)+dx*cos(c11)*cos(c22c52c11)+dy*cos(c22c52c11)*sin(c11))
-sin(c52c11)*(kz*sin(c22c52c11)+kx*cos(c11)*cos(c22c52c11)+ky*cos(c22c52c11)*sin(c11));

```

$$\begin{aligned} Bc22c52c12 = & -\cos(c52c12) * (dz * \sin(c22c52c12) + dx * \cos(c12) * \cos(c22c52c12) + dy * \cos(c22c52c12) * \sin(c12)) \\ & - \sin(c52c12) * (kz * \sin(c22c52c12) + kx * \cos(c12) * \cos(c22c52c12) + ky * \cos(c22c52c12) * \sin(c12)); \end{aligned}$$

.....
$$\begin{aligned} c31c21c51c11 &= \text{atan2}(-Bc21c51c11, Ac21c51c11); \\ ttac31c21c51c11 &= \text{atan2}(-Bc21c51c11, Ac21c51c11) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c31c21c51c12 &= \text{atan2}(-Bc21c51c12, Ac21c51c12); \\ ttac31c21c51c12 &= \text{atan2}(-Bc21c51c12, Ac21c51c12) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c31c21c52c11 &= \text{atan2}(-Bc21c52c11, Ac21c52c11); \\ ttac31c21c52c11 &= \text{atan2}(-Bc21c52c11, Ac21c52c11) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c31c21c52c12 &= \text{atan2}(-Bc21c52c12, Ac21c52c12); \\ ttac31c21c52c12 &= \text{atan2}(-Bc21c52c12, Ac21c52c12) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c31c22c51c11 &= \text{atan2}(-Bc22c51c11, Ac22c51c11); \\ ttac31c22c51c11 &= \text{atan2}(-Bc22c51c11, Ac22c51c11) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c31c22c51c12 &= \text{atan2}(-Bc22c51c12, Ac22c51c12); \\ ttac31c22c51c12 &= \text{atan2}(-Bc22c51c12, Ac22c51c12) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c31c22c52c11 &= \text{atan2}(-Bc22c52c11, Ac22c52c11); \\ ttac31c22c52c11 &= \text{atan2}(-Bc22c52c11, Ac22c52c11) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c31c22c52c12 &= \text{atan2}(-Bc22c52c12, Ac22c52c12); \\ ttac31c22c52c12 &= \text{atan2}(-Bc22c52c12, Ac22c52c12) * 180 / \pi \end{aligned}$$

.....
$$\begin{aligned} c32c21c51c11 &= \text{atan2}(Bc21c51c11, -Ac21c51c11); \\ ttac32c21c51c11 &= \text{atan2}(Bc21c51c11, -Ac21c51c11) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c32c21c51c12 &= \text{atan2}(Bc21c51c12, -Ac21c51c12); \\ ttac32c21c51c12 &= \text{atan2}(Bc21c51c12, -Ac21c51c12) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c32c21c52c11 &= \text{atan2}(Bc21c52c11, -Ac21c52c11); \\ ttac32c21c52c11 &= \text{atan2}(Bc21c52c11, -Ac21c52c11) * 180 / \pi \end{aligned}$$

$$c32c21c52c12 = \text{atan2}(Bc21c52c12, -Ac21c52c12);$$

```
ttac32c21c52c12=atan2 (Bc21c52c12,-Ac21c52c12)*180/pi
```

```
c32c22c51c11=atan2 (Bc22c51c11,-Ac22c51c11);  
ttac32c22c51c11=atan2 (Bc22c51c11,-Ac22c51c11)*180/pi
```

```
c32c22c51c12=atan2 (Bc22c51c12,-Ac22c51c12);  
ttac32c22c51c12=atan2 (Bc22c51c12,-Ac22c51c12)*180/pi
```

```
c32c22c52c11=atan2 (Bc22c52c11,-Ac22c52c11);  
ttac32c22c52c11=atan2 (Bc22c52c11,-Ac22c52c11)*180/pi
```

```
c32c22c52c12=atan2 (Bc22c52c12,-Ac22c52c12);  
ttac32c22c52c12=atan2 (Bc22c52c12,-Ac22c52c12)*180/pi
```

```
.....  
% R41=cos (c3) * (nz*sin (c2)+nx*cos (c1) *cos (c2)+ny*cos (c2) *sin (c1)) -sin (c3) * (nx*cos (c1) *sin (c2) -  
nz*cos (c2)+ny*sin (c1) *sin (c2));
```

```
R41c31c21c51c11=cos (c31c21c51c11) * (nz*sin (c21c51c11)+nx*cos (c11) *cos (c21c51c11)+ny*cos (c21c51c11) *sin (c11))  
-sin (c31c21c51c11) * (nx*cos (c11) *sin (c21c51c11)-nz*cos (c21c51c11)+ny*sin (c11) *sin (c21c51c11));
```

```
R41c31c21c51c12=cos (c31c21c51c12) * (nz*sin (c21c51c12)+nx*cos (c12) *cos (c21c51c12)+ny*cos (c21c51c12) *sin (c12))  
-sin (c31c21c51c12) * (nx*cos (c12) *sin (c21c51c12)-nz*cos (c21c51c12)+ny*sin (c12) *sin (c21c51c12));
```

```
R41c31c21c52c11=cos (c31c21c52c11) * (nz*sin (c21c52c11)+nx*cos (c11) *cos (c21c52c11)+ny*cos (c21c52c11) *sin (c11))  
-sin (c31c21c52c11) * (nx*cos (c11) *sin (c21c52c11)-nz*cos (c21c52c11)+ny*sin (c11) *sin (c21c52c11));
```

```
R41c31c21c52c12=cos (c31c21c52c12) * (nz*sin (c21c52c12)+nx*cos (c12) *cos (c21c52c12)+ny*cos (c21c52c12) *sin (c12))  
-sin (c31c21c52c12) * (nx*cos (c12) *sin (c21c52c12)-nz*cos (c21c52c12)+ny*sin (c12) *sin (c21c52c12));
```

```
R41c31c22c51c11=cos (c31c22c51c11) * (nz*sin (c22c51c11)+nx*cos (c11) *cos (c22c51c11)+ny*cos (c22c51c11) *sin (c11))  
-sin (c31c22c51c11) * (nx*cos (c11) *sin (c22c51c11)-nz*cos (c22c51c11)+ny*sin (c11) *sin (c22c51c11));
```

```
R41c31c22c51c12=cos (c31c22c51c12) * (nz*sin (c22c51c12)+nx*cos (c12) *cos (c22c51c12)+ny*cos (c22c51c12) *sin (c12))  
-sin (c31c22c51c12) * (nx*cos (c12) *sin (c22c51c12)-nz*cos (c22c51c12)+ny*sin (c12) *sin (c22c51c12));
```

```
R41c31c22c52c11=cos (c31c22c52c11) * (nz*sin (c22c52c11)+nx*cos (c11) *cos (c22c52c11)+ny*cos (c22c52c11) *sin (c11))  
-sin (c31c22c52c11) * (nx*cos (c11) *sin (c22c52c11)-nz*cos (c22c52c11)+ny*sin (c11) *sin (c22c52c11));
```

```

R41c31c22c52c12=cos(c31c22c52c12)*(nz*sin(c22c52c12)+nx*cos(c12)*cos(c22c52c12)+ny*cos(c22c52c12)*sin(c12))-sin(c31c22c52c12)*(nx*cos(c12)*sin(c22c52c12)-nz*cos(c22c52c12)+ny*sin(c12)*sin(c22c52c12));
.....
% R42=cos(c3)*(nz*sin(c2)+nx*cos(c1)*cos(c2)+ny*cos(c2)*sin(c1))-sin(c3)*(nx*cos(c1)*sin(c2)-nz*cos(c2)+ny*sin(c1)*sin(c2));

R42c32c21c51c11=cos(c32c21c51c11)*(nz*sin(c21c51c11)+nx*cos(c11)*cos(c21c51c11)+ny*cos(c21c51c11)*sin(c11))-sin(c32c21c51c11)*(nx*cos(c11)*sin(c21c51c11)-nz*cos(c21c51c11)+ny*sin(c11)*sin(c21c51c11));

R42c32c21c51c12=cos(c32c21c51c12)*(nz*sin(c21c51c12)+nx*cos(c12)*cos(c21c51c12)+ny*cos(c21c51c12)*sin(c12))-sin(c32c21c51c12)*(nx*cos(c12)*sin(c21c51c12)-nz*cos(c21c51c12)+ny*sin(c12)*sin(c21c51c12));

R42c32c21c52c11=cos(c32c21c52c11)*(nz*sin(c21c52c11)+nx*cos(c11)*cos(c21c52c11)+ny*cos(c21c52c11)*sin(c11))-sin(c32c21c52c11)*(nx*cos(c11)*sin(c21c52c11)-nz*cos(c21c52c11)+ny*sin(c11)*sin(c21c52c11));

R42c32c21c52c12=cos(c32c21c52c12)*(nz*sin(c21c52c12)+nx*cos(c12)*cos(c21c52c12)+ny*cos(c21c52c12)*sin(c12))-sin(c32c21c52c12)*(nx*cos(c12)*sin(c21c52c12)-nz*cos(c21c52c12)+ny*sin(c12)*sin(c21c52c12));

R42c32c22c51c11=cos(c32c22c51c11)*(nz*sin(c22c51c11)+nx*cos(c11)*cos(c22c51c11)+ny*cos(c22c51c11)*sin(c11))-sin(c32c22c51c11)*(nx*cos(c11)*sin(c22c51c11)-nz*cos(c22c51c11)+ny*sin(c11)*sin(c22c51c11));

R42c32c22c51c12=cos(c32c22c51c12)*(nz*sin(c22c51c12)+nx*cos(c12)*cos(c22c51c12)+ny*cos(c22c51c12)*sin(c12))-sin(c32c22c51c12)*(nx*cos(c12)*sin(c22c51c12)-nz*cos(c22c51c12)+ny*sin(c12)*sin(c22c51c12));

R42c32c22c52c11=cos(c32c22c52c11)*(nz*sin(c22c52c11)+nx*cos(c11)*cos(c22c52c11)+ny*cos(c22c52c11)*sin(c11))-sin(c32c22c52c11)*(nx*cos(c11)*sin(c22c52c11)-nz*cos(c22c52c11)+ny*sin(c11)*sin(c22c52c11));

R42c32c22c52c12=cos(c32c22c52c12)*(nz*sin(c22c52c12)+nx*cos(c12)*cos(c22c52c12)+ny*cos(c22c52c12)*sin(c12))-sin(c32c22c52c12)*(nx*cos(c12)*sin(c22c52c12)-nz*cos(c22c52c12)+ny*sin(c12)*sin(c22c52c12));
.....

```

```
% T41=-sin(c3)*(nz*sin(2)+nx*cos(c1)*cos(c2)+ny*cos(c2)*sin(c1))-cos(c3)*(nx*cos(c1)*sin(c2)-  
nz*cos(c2)+ny*sin(c1)*sin(c2));
```

```
T41c31c21c51c11=  
-sin(c31c21c51c11)*(nz*sin(c21c51c11)+nx*cos(c11)*cos(c21c51c11)+ny*cos(c21c51c11)*sin(c11))  
-cos(c31c21c51c11)*(nx*cos(c11)*sin(c21c51c11)-nz*cos(c21c51c11)+ny*sin(c11)*sin(c21c51c11));
```

```
T41c31c21c51c12=  
-sin(c31c21c51c12)*(nz*sin(c21c51c12)+nx*cos(c12)*cos(c21c51c12)+ny*cos(c21c51c12)*sin(c12))  
-cos(c31c21c51c12)*(nx*cos(c12)*sin(c21c51c12)-nz*cos(c21c51c12)+ny*sin(c12)*sin(c21c51c12));
```

```
T41c31c21c52c11=  
-sin(c31c21c52c11)*(nz*sin(c21c52c11)+nx*cos(c11)*cos(c21c52c11)+ny*cos(c21c52c11)*sin(c11))  
-cos(c31c21c52c11)*(nx*cos(c11)*sin(c21c52c11)-nz*cos(c21c52c11)+ny*sin(c11)*sin(c21c52c11));
```

```
T41c31c21c52c12=  
-sin(c31c21c52c12)*(nz*sin(c21c52c12)+nx*cos(c12)*cos(c21c52c12)+ny*cos(c21c52c12)*sin(c12))  
-cos(c31c21c52c12)*(nx*cos(c12)*sin(c21c52c12)-nz*cos(c21c52c12)+ny*sin(c12)*sin(c21c52c12));
```

```
T41c31c22c51c11=  
-sin(c31c22c51c11)*(nz*sin(c22c51c11)+nx*cos(c11)*cos(c22c51c11)+ny*cos(c22c51c11)*sin(c11))  
-cos(c31c22c51c11)*(nx*cos(c11)*sin(c22c51c11)-nz*cos(c22c51c11)+ny*sin(c11)*sin(c22c51c11));
```

```
T41c31c22c51c12=  
-sin(c31c22c51c12)*(nz*sin(c22c51c12)+nx*cos(c12)*cos(c22c51c12)+ny*cos(c22c51c12)*sin(c12))  
-cos(c31c22c51c12)*(nx*cos(c12)*sin(c22c51c12)-nz*cos(c22c51c12)+ny*sin(c12)*sin(c22c51c12));
```

```
T41c31c22c52c11=  
-sin(c31c22c52c11)*(nz*sin(c22c52c11)+nx*cos(c11)*cos(c22c52c11)+ny*cos(c22c52c11)*sin(c11))  
-cos(c31c22c52c11)*(nx*cos(c11)*sin(c22c52c11)-nz*cos(c22c52c11)+ny*sin(c11)*sin(c22c52c11));
```

```
T41c31c22c52c12=  
-sin(c31c22c52c12)*(nz*sin(c22c52c12)+nx*cos(c12)*cos(c22c52c12)+ny*cos(c22c52c12)*sin(c12))  
-cos(c31c22c52c12)*(nx*cos(c12)*sin(c22c52c12)-nz*cos(c22c52c12)+ny*sin(c12)*sin(c22c52c12));
```

```
.....
```

```
% T42=-sin(c3)*(nz*sin(2)+nx*cos(c1)*cos(c2)+ny*cos(c2)*sin(c1))-cos(c3)*(nx*cos(c1)*sin(c2)-nz*cos(c2)+ny*sin(c1)*sin(c2));
```

```
T42c32c21c51c11=-sin(c32c21c51c11)*(nz*sin(c21c51c11)+nx*cos(c11)*cos(c21c51c11)+ny*cos(c21c51c11)*sin(c11))-cos(c32c21c51c11)*(nx*cos(c11)*sin(c21c51c11)-nz*cos(c21c51c11)+ny*sin(c11)*sin(c21c51c11));
```

```
T42c32c21c51c12=-sin(c32c21c51c12)*(nz*sin(c21c51c12)+nx*cos(c12)*cos(c21c51c12)+ny*cos(c21c51c12)*sin(c12))-cos(c32c21c51c12)*(nx*cos(c12)*sin(c21c51c12)-nz*cos(c21c51c12)+ny*sin(c12)*sin(c21c51c12));
```

```
T42c32c21c52c11=-sin(c32c21c52c11)*(nz*sin(c21c52c11)+nx*cos(c11)*cos(c21c52c11)+ny*cos(c21c52c11)*sin(c11))-cos(c32c21c52c11)*(nx*cos(c11)*sin(c21c52c11)-nz*cos(c21c52c11)+ny*sin(c11)*sin(c21c52c11));
```

```
T42c32c21c52c12=-sin(c32c21c52c12)*(nz*sin(c21c52c12)+nx*cos(c12)*cos(c21c52c12)+ny*cos(c21c52c12)*sin(c12))-cos(c32c21c52c12)*(nx*cos(c12)*sin(c21c52c12)-nz*cos(c21c52c12)+ny*sin(c12)*sin(c21c52c12));
```

```
T42c32c22c51c11=-sin(c32c22c51c11)*(nz*sin(c22c51c11)+nx*cos(c11)*cos(c22c51c11)+ny*cos(c22c51c11)*sin(c11))-cos(c32c22c51c11)*(nx*cos(c11)*sin(c22c51c11)-nz*cos(c22c51c11)+ny*sin(c11)*sin(c22c51c11));
```

```
T42c32c22c51c12=-sin(c32c22c51c12)*(nz*sin(c22c51c12)+nx*cos(c12)*cos(c22c51c12)+ny*cos(c22c51c12)*sin(c12))-cos(c32c22c51c12)*(nx*cos(c12)*sin(c22c51c12)-nz*cos(c22c51c12)+ny*sin(c12)*sin(c22c51c12));
```

```
T42c32c22c52c11=-sin(c32c22c52c11)*(nz*sin(c22c52c11)+nx*cos(c11)*cos(c22c52c11)+ny*cos(c22c52c11)*sin(c11))-cos(c32c22c52c11)*(nx*cos(c11)*sin(c22c52c11)-nz*cos(c22c52c11)+ny*sin(c11)*sin(c22c52c11));
```

```
T42c32c22c52c12=-sin(c32c22c52c12)*(nz*sin(c22c52c12)+nx*cos(c12)*cos(c22c52c12)+ny*cos(c22c52c12)*sin(c12))-cos(c32c22c52c12)*(nx*cos(c12)*sin(c22c52c12)-nz*cos(c22c52c12)+ny*sin(c12)*sin(c22c52c12));
```

```
.....
```

c411c31c21c51c11=atan2 (T41c31c21c51c11,R41c31c21c51c11);
ttac411c31c21c51c11=atan2 (T41c31c21c51c11,R41c31c21c51c11)*180/pi

c411c31c21c51c12=atan2 (T41c31c21c51c12,R41c31c21c51c12);
ttac411c31c21c51c12=atan2 (T41c31c21c51c12,R41c31c21c51c12)*180/pi

c411c31c21c52c11=atan2 (T41c31c21c52c11,R41c31c21c52c11);
ttac411c31c21c52c11=atan2 (T41c31c21c52c11,R41c31c21c52c11)*180/pi

c411c31c21c52c12=atan2 (T41c31c21c52c12,R41c31c21c52c12);
ttac411c31c21c52c12=atan2 (T41c31c21c52c12,R41c31c21c52c12)*180/pi

c411c31c22c51c11=atan2 (T41c31c22c51c11,R41c31c22c51c11);
ttac411c31c22c51c11=atan2 (T41c31c22c51c11,R41c31c22c51c11)*180/pi

c411c31c22c51c12=atan2 (T41c31c22c51c12,R41c31c22c51c12);
ttac411c31c22c51c12=atan2 (T41c31c22c51c12,R41c31c22c51c12)*180/pi

c411c31c22c52c11=atan2 (T41c31c22c52c11,R41c31c22c52c11);
ttac411c31c22c52c11=atan2 (T41c31c22c52c11,R41c31c22c52c11)*180/pi

c411c31c22c52c12=atan2 (T41c31c22c52c12,R41c31c22c52c12);
ttac411c31c22c52c12=atan2 (T41c31c22c52c12,R41c31c22c52c12)*180/pi

.....
c412c32c21c51c11=atan2 (T42c32c21c51c11,R42c32c21c51c11);
ttac412c32c21c51c11=atan2 (T42c32c21c51c11,R42c32c21c51c11)*180/pi

c412c32c21c51c12=atan2 (T42c32c21c51c12,R42c32c21c51c12);
ttac412c32c21c51c12=atan2 (T42c32c21c51c12,R42c32c21c51c12)*180/pi

c412c32c21c52c11=atan2 (T42c32c21c52c11,R42c32c21c52c11);
ttac412c32c21c52c11=atan2 (T42c32c21c52c11,R42c32c21c52c11)*180/pi

c412c32c21c52c12=atan2 (T42c32c21c52c12,R42c32c21c52c12);
ttac412c32c21c52c12=atan2 (T42c32c21c52c12,R42c32c21c52c12)*180/pi

c412c32c22c51c11=atan2 (T42c32c22c51c11,R42c32c22c51c11);
ttac412c32c22c51c11=atan2 (T42c32c22c51c11,R42c32c22c51c11)*180/pi

c412c32c22c51c12=atan2 (T42c32c22c51c12,R42c32c22c51c12);
ttac412c32c22c51c12=atan2 (T42c32c22c51c12,R42c32c22c51c12)*180/pi

c412c32c22c52c11=atan2 (T42c32c22c52c11,R42c32c22c52c11);
ttac412c32c22c52c11=atan2 (T42c32c22c52c11,R42c32c22c52c11)*180/pi

c412c32c22c52c12=atan2 (T42c32c22c52c12,R42c32c22c52c12);
ttac412c32c22c52c12=atan2 (T42c32c22c52c12,R42c32c22c52c12)*180/pi

.....
c421c31c21c51c11=atan2 (-T41c31c21c51c11,-R41c31c21c51c11);
ttac421c31c21c51c11=atan2 (-T41c31c21c51c11,-R41c31c21c51c11)*180/pi

c421c31c21c51c12=atan2 (-T41c31c21c51c12,-R41c31c21c51c12);
ttac421c31c21c51c12=atan2 (-T41c31c21c51c12,-R41c31c21c51c12)*180/pi

c421c31c21c52c11=atan2 (-T41c31c21c52c11,-R41c31c21c52c11);
ttac421c31c21c52c11=atan2 (-T41c31c21c52c11,-R41c31c21c52c11)*180/pi

c421c31c21c52c12=atan2 (-T41c31c21c52c12,-R41c31c21c52c12);
ttac421c31c21c52c12=atan2 (-T41c31c21c52c12,-R41c31c21c52c12)*180/pi

c421c31c22c51c11=atan2 (-T41c31c22c51c11,-R41c31c22c51c11);
ttac421c31c22c51c11=atan2 (-T41c31c22c51c11,-R41c31c22c51c11)*180/pi

c421c31c22c51c12=atan2 (-T41c31c22c51c12,-R41c31c22c51c12);
ttac421c31c22c51c12=atan2 (-T41c31c22c51c12,-R41c31c22c51c12)*180/pi

c421c31c22c52c11=atan2 (-T41c31c22c52c11,-R41c31c22c52c11);
ttac421c31c22c52c11=atan2 (-T41c31c22c52c11,-R41c31c22c52c11)*180/pi

c421c31c22c52c12=atan2 (-T41c31c22c52c12,-R41c31c22c52c12);
ttac421c31c22c52c12=atan2 (-T41c31c22c52c12,-R41c31c22c52c12)*180/pi

.....

```
c422c32c21c51c11=atan2(-T42c32c21c51c11,-R42c32c21c51c11);
ttac422c32c21c51c11=atan2(-T42c32c21c51c11,-R42c32c21c51c11)*180/pi
```

```
c422c32c21c51c12=atan2(-T42c32c21c51c12,-R42c32c21c51c12);
ttac422c32c21c51c12=atan2(-T42c32c21c51c12,-R42c32c21c51c12)*180/pi
```

```
c422c32c21c52c11=atan2(-T42c32c21c52c11,-R42c32c21c52c11);
ttac422c32c21c52c11=atan2(-T42c32c21c52c11,-R42c32c21c52c11)*180/pi
```

```
c422c32c21c52c12=atan2(-T42c32c21c52c12,-R42c32c21c52c12);
ttac422c32c21c52c12=atan2(-T42c32c21c52c12,-R42c32c21c52c12)*180/pi
```

```
c422c32c22c51c11=atan2(-T42c32c22c51c11,-R42c32c22c51c11);
ttac422c32c22c51c11=atan2(-T42c32c22c51c11,-R42c32c22c51c11)*180/pi
```

```
c422c32c22c51c12=atan2(-T42c32c22c51c12,-R42c32c22c51c12);
ttac422c32c22c51c12=atan2(-T42c32c22c51c12,-R42c32c22c51c12)*180/pi
```

```
c422c32c22c52c11=atan2(-T42c32c22c52c11,-R42c32c22c52c11);
ttac422c32c22c52c11=atan2(-T42c32c22c52c11,-R42c32c22c52c11)*180/pi
```

```
c422c32c22c52c12=atan2(-T42c32c22c52c12,-R42c32c22c52c12);
ttac422c32c22c52c12=atan2(-T42c32c22c52c12,-R42c32c22c52c12)*180/pi
```

```
.....
fprintf('1-c411c31c21c51c11\n')
```

```
c1=c11;
c5=c51c11;
c2=c21c51c11;
c3=c31c21c51c11;
c4=c411c31c21c51c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
```

```

a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];

B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];

B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];

M=B1*B2*B3*B4*B5;
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]

.....
fprintf('2-c411c31c21c51c12\n')
c1=c11;
c5=c52c11;
c2=c21c52c11;
c3=c31c21c52c11;
c4=c411c31c21c52c11;

B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];

B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];

B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];

B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];

B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];

M=B1*B2*B3*B4*B5;
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]

```

fprintf('3-c411c31c21c52c11\n')

c1=c11;
c5=c52c11;
c2=c21c52c11;
c3=c31c21c52c11;
c4=c411c31c21c52c11;

B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];

B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];

B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];

B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];

B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];

M=B1*B2*B3*B4*B5;

qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);

vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);

SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]

fprintf('4-c411c31c21c52c12\n')

c1=c12;
c5=c52c12;
c2=c21c52c12;
c3=c31c21c52c12;
c4=c411c31c21c52c12;

B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];

B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)

```

a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];

B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];

B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];

B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];

M=B1*B2*B3*B4*B5;
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]

.....
fprintf('5-c411c31c22c51c11\n')
c1=c11;
c5=c51c11;
c2=c22c51c11;
c3=c31c22c51c11;
c4=c411c31c22c51c11;

B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];

B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];

B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];

B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];

B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];

M=B1*B2*B3*B4*B5;

```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
fprintf('6-c411c31c22c51c12\n')
```

```
c1=c12;
c5=c51c12;
c2=c22c51c12;
c3=c31c22c51c12;
c4=c411c31c22c51c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
fprintf('7-c411c31c22c52c11\n')
```

```
c1=c11;
c5=c52c11;
c2=c22c52c11;
c3=c31c22c52c11;
c4=c411c31c22c52c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('8-c411c31c22c52c12\n')
```

```
c1=c12;
```

```
c5=c52c12;
```

```
c2=c22c52c12;
```

```
c3=c31c22c52c12;
```

```
c4=c411c31c22c52c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('9-c412c32c21c51c11\n')
```

```
c1=c11;
```

```
c5=c51c11;
```

```
c2=c21c51c11;
```

```
c3=c32c21c51c11;
```

```
c4=c412c32c21c51c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
```

```
fprintf('10-c412c32c21c51c12\n')
```

```
c1=c12;  
c5=c51c12;  
c2=c21c51c12;  
c3=c32c21c51c12;  
c4=c412c32c21c51c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)  
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)  
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)  
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)  
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)  
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
fprintf('11-c412c32c21c52c11\n')
```

```
c1=c11;  
c5=c52c11;  
c2=c21c52c11;  
c3=c32c21c52c11;  
c4=c412c32c21c52c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)  
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)  
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('12-c412c32c21c52c12\n')
```

```
c1=c12;
```

```
c5=c52c12;
```

```
c2=c21c52c12;
```

```
c3=c32c21c52c12;
```

```
c4=c412c32c21c52c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
fprintf('13-c412c32c22c51c11\n')
```

```
c1=c11;
c5=c51c11;
c2=c22c51c11;
c3=c32c22c51c11;
c4=c412c32c22c51c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
fprintf('14-c412c32c22c51c12\n')
```

```
c1=c12;
c5=c51c12;
c2=c22c51c12;
c3=c32c22c51c12;
c4=c412c32c22c51c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
fprintf('15-c412c32c22c52c11\n')
```

```
c1=c11;
```

```
c5=c52c11;
```

```
c2=c22c52c11;
```

```
c3=c32c22c52c11;
```

```
c4=c412c32c22c52c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('16-c412c32c22c52c12\n')
```

```
c1=c12;
```

```
c5=c52c12;
```

```
c2=c22c52c12;
```

```
c3=c32c22c52c12;
```

```
c4=c412c32c22c52c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
```

```
fprintf('17-c421c31c21c51c11\n')
```

```
c1=c11;
```

```
c5=c51c11;
```

```
c2=c21c51c11;
```

```
c3=c31c21c51c11;
```

```
c4=c421c31c21c51c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)  
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)  
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)  
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)  
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)  
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('18-c421c31c21c51c12\n')
```

```
c1=c12;
```

```
c5=c51c12;
```

```
c2=c21c51c12;
```

```
c3=c31c21c51c12;
```

```
c4=c421c31c21c51c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)  
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('19-c421c31c21c52c11\n')
```

```
c1=c11;
```

```
c5=c52c11;
```

```
c2=c21c52c11;
```

```
c3=c31c21c52c11;
```

```
c4=c421c31c21c52c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```

M=B1*B2*B3*B4*B5;
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
.....
fprintf('20-c421c31c21c52c12\n')
c1=c12;
c5=c52c12;
c2=c21c52c12;
c3=c31c21c52c12;
c4=c421c31c21c52c12;

B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];

B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];

B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];

B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];

B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];

M=B1*B2*B3*B4*B5;
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
.....
fprintf('21-c421c31c22c51c11\n')
c1=c11;
c5=c51c11;
c2=c22c51c11;
c3=c31c22c51c11;
c4=c421c31c22c51c11;

```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
fprintf('22-c421c31c22c51c12\n')
```

```
c1=c12;
```

```
c5=c51c12;
```

```
c2=c22c51c12;
```

```
c3=c31c22c51c12;
```

```
c4=c421c31c22c51c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('23-c421c31c22c52c11\n')
```

```
c1=c11;
```

```
c5=c52c11;
```

```
c2=c22c52c11;
```

```
c3=c31c22c52c11;
```

```
c4=c421c31c22c52c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
```

```
fprintf('24-c421c31c22c52c12\n')
```

```
c1=c12;  
c5=c52c12;  
c2=c22c52c12;  
c3=c31c22c52c12;  
c4=c421c31c22c52c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)  
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)  
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)  
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)  
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)  
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('25-c422c32c21c51c11\n')
```

```
c1=c11;  
c5=c51c11;  
c2=c21c51c11;  
c3=c32c21c51c11;  
c4=c422c32c21c51c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)  
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('26-c422c32c21c51c12\n')
```

```
c1=c12;
```

```
c5=c51c12;
```

```
c2=c21c51c12;
```

```
c3=c32c21c51c12;
```

```
c4=c422c32c21c51c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```

M=B1*B2*B3*B4*B5;
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
.....
fprintf('27-c422c32c21c52c11\n')
c1=c11;
c5=c52c11;
c2=c21c52c11;
c3=c32c21c52c11;
c4=c422c32c21c52c11;

B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];

B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];

B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];

B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];

B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];

M=B1*B2*B3*B4*B5;
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
.....
fprintf('28-c422c32c21c52c12\n')
c1=c12;
c5=c52c12;
c2=c21c52c12;
c3=c32c21c52c12;
c4=c422c32c21c52c12;

```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
fprintf('29-c422c32c22c51c11\n')
```

```
c1=c11;
```

```
c5=c51c11;
```

```
c2=c22c51c11;
```

```
c3=c32c22c51c11;
```

```
c4=c422c32c22c51c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('30-c422c32c22c51c12\n')
```

```
c1=c12;
```

```
c5=c51c12;
```

```
c2=c22c51c12;
```

```
c3=c32c22c51c12;
```

```
c4=c422c32c22c51c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
```

```
fprintf('31-c422c32c22c52c11\n')
```

```
c1=c11;
```

```
c5=c52c11;
```

```
c2=c22c52c11;
```

```
c3=c32c22c52c11;
```

```
c4=c422c32c22c52c11;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)  
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)  
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)  
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)  
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)  
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
```

```
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4);
```

```
SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....  
fprintf('32-c422c32c22c52c12\n')
```

```
c1=c12;
```

```
c5=c52c12;
```

```
c2=c22c52c12;
```

```
c3=c32c22c52c12;
```

```
c4=c422c32c22c52c12;
```

```
B1=[cos(c1) -sin(c1)*cosd(A11) sin(c1)*sind(A11) a1*cos(c1);sin(c1) cos(c1)*cosd(A11) -cos(c1)*sind(A11)  
a1*sin(c1);0 sind(A11) cosd(A11) d1;0 0 0 1];
```

```
B2=[cos(c2) -sin(c2)*cosd(A12) sin(c2)*sind(A12) a2*cos(c2);sin(c2) cos(c2)*cosd(A12) -cos(c2)*sind(A12)
a2*sin(c2);0 sind(A12) cosd(A12) d2;0 0 0 1];
```

```
B3=[cos(c3) -sin(c3)*cosd(A13) sin(c3)*sind(A13) a3*cos(c3);sin(c3) cos(c3)*cosd(A13) -cos(c3)*sind(A13)
a3*sin(c3);0 sind(A13) cosd(A13) d3;0 0 0 1];
```

```
B4=[cos(c4+pi/2) -sin(c4+pi/2)*cosd(A14) sin(c4+pi/2)*sind(A14) a4*cos(c4+pi/2);sin(c4+pi/2)
cos(c4+pi/2)*cosd(A14) -cos(c4+pi/2)*sind(A14) a4*sin(c4+pi/2);0 sind(A14) cosd(A14) d4;0 0 0 1];
```

```
B5=[cos(c5) -sin(c5)*cosd(A15) sin(c5)*sind(A15) a5*cos(c5);sin(c5) cos(c5)*cosd(A15) -cos(c5)*sind(A15)
a5*sin(c5);0 sind(A15) cosd(A15) d5;0 0 0 1];
```

```
M=B1*B2*B3*B4*B5;
```

```
qx=M(1,1); vx=M(1,2); ux=M(1,3); Qx=M(1,4); qy=M(2,1); vy=M(2,2); uy=M(2,3); Qy=M(2,4); qz=M(3,1);
vz=M(3,2); uz=M(3,3); Qz=M(3,4); SN=[qx vx ux Qx; qy vy uy Qy; qz vz uz Qz;0 0 0 1]
```

```
.....
```

EK 3: Geri (ters) kinematik analiz MATLAB sonuç çıktıları**Tablo Ek 3.1** *Başlangıç pozisyonu için ters kinematik analiz sonucu*

$\theta_1 = 0; \theta_5 = 0; \theta_2 = 0; \theta_3 = 0; \theta_4 = 0;$			
H			
0.0000	0	1.0000	450.0000
0	-1.0000	0	0
1.0000	0	-0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000
C1		C4	
ttac11=0		ttac411c31c21c51c11=-3.5084e-15	
ttac12=-180		ttac411c31c21c51c12=-173.0909	
C5		ttac411c31c21c52c11=180	
ttac51c11=0		ttac411c31c21c52c12=7.5946	
ttac51c12=-180		ttac411c31c22c51c11=-3.5084e-15	
ttac52c11=180		ttac411c31c22c51c12=-173.0909	
ttac52c12=5.2625e-14		ttac411c31c22c52c11=180	
C2		ttac411c31c22c52c12=7.5946	
ttac21c51c11=0		ttac412c32c21c51c11=-3.5084e-15	
ttac21c51c12=173.0909		ttac412c32c21c51c12=6.9091	
ttac21c52c11=-3.5084e-15		ttac412c32c21c52c11=0	
ttac21c52c12=-7.5946		ttac412c32c21c52c12=-172.4054	
ttac22c51c11=0		ttac412c32c22c51c11=-3.5084e-15	
ttac22c51c12=-6.9091		ttac412c32c22c51c12=6.9091	
ttac22c52c11=180		ttac412c32c22c52c11=-3.5084e-15	
ttac22c52c12=172.4054		ttac412c32c22c52c12=-172.4054	
C3		ttac421c31c21c51c11=180	
ttac31c21c51c11=0		ttac421c31c21c51c12=6.9091	
ttac31c21c51c12=-180		ttac421c31c21c52c11=-7.0167e-15	
ttac31c21c52c11=-180		ttac421c31c21c52c12=-172.4054	
ttac31c21c52c12=-180		ttac421c31c22c51c11=180	
ttac31c22c51c11=0		ttac421c31c22c51c12=6.9091	
ttac31c22c51c12=-1.3874e-15		ttac421c31c22c52c11=0	
ttac31c22c52c11=3.5084e-15		ttac421c31c22c52c12=-172.4054	
ttac31c22c52c12=-9.1459e-15		ttac422c32c21c51c11=180	
ttac32c21c51c11=0		ttac422c32c21c51c12=-173.0909	
ttac32c21c51c12=6.9371e-15		ttac422c32c21c52c11=180	
ttac32c21c52c11=0		ttac422c32c21c52c12=7.5946	
ttac32c21c52c12=0		ttac422c32c22c51c11=180	
ttac32c22c51c11=0		ttac422c32c22c51c12=-173.0909	
ttac32c22c51c12=180		ttac422c32c22c52c11=180	
ttac32c22c52c11=-180		ttac422c32c22c52c12=7.5946	
ttac32c22c52c12=180			

Tablo Ek 3.2. *SN =1-c411c31c21c51c11 sonucu*

0.0000	0	1.0000	450.0000
0	-1.0000	0	0
1.0000	0	-0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.3. *SN =2-c411c31c21c51c12 sonucu*

-0.0000	-0.0000	1.0000	70.0000
-0.0000	1.0000	0	-0.0000
-1.0000	-0.0000	-0.0000	90.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.4. *SN =3-c411c31c21c52c11 sonucu*

-0.0000	-0.0000	1.0000	70.0000
-0.0000	1.0000	0	-0.0000
-1.0000	-0.0000	-0.0000	90.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.5. *SN =4-c411c31c21c52c12 sonucu*

-0.0000	-0.0000	1.0000	89.9123
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
-1.0000	0.0000	0	91.3216
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.6. *SN =5-c411c31c22c51c11 sonucu*

0.0000	0	1.0000	450.0000
0	-1.0000	0	0
1.0000	0	-0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.7. *SN =6-c411c31c22c51c12 sonucu*

0.0000	0.0000	1.0000	-287.3131
-0.0000	-1.0000	0.0000	-0.0000
1.0000	-0.0000	-0.0000	165.4908
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.8. *SN =7-c411c31c22c52c11 sonucu*

-0.0000	-0.0000	1.0000	-290.0000
-0.0000	1.0000	0	-0.0000
-1.0000	-0.0000	-0.0000	90.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.9. *SN =8-c411c31c22c52c12 sonucu*

-0.0000	-0.0000	1.0000	446.7543
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
-1.0000	0.0000	-0.0000	138.9006
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.10. *SN =9-c412c32c21c51c11 sonucu*

0.0000	0	1.0000	450.0000
0	-1.0000	0	0
1.0000	0	-0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.11. *SN =10-c412c32c21c51c12 sonucu*

-0.0000	0.0000	1.0000	447.3131
-0.0000	-1.0000	0.0000	-0.0000
1.0000	-0.0000	0.0000	254.5092
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.12. *SN =11-c412c32c21c52c11 sonucu*

-0.0000	-0.0000	1.0000	450.0000
-0.0000	1.0000	0	-0.0000
-1.0000	-0.0000	-0.0000	90.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.13. *SN =12-c412c32c21c52c12 sonucu*

0.0000	-0.0000	1.0000	-286.7543
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
-1.0000	0.0000	0.0000	41.0994
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.14. *SN =13-c412c32c22c51c11 sonucu*

0.0000	0	1.0000	450.0000
0	-1.0000	0	0
1.0000	0	-0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.15. *SN =14-c412c32c22c51c12 sonucu*

0.0000	0.0000	1.0000	89.9274
-0.0000	-1.0000	0.0000	-0.0000
1.0000	-0.0000	-0.0000	211.2030
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.16. *SN =15-c412c32c22c52c11 sonucu*

-0.0000	-0.0000	1.0000	90.0000
-0.0000	1.0000	0	-0.0000
-1.0000	-0.0000	-0.0000	90.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.17. *SN =16-c412c32c22c52c12 sonucu*

0.0000	-0.0000	1.0000	70.0877
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
-1.0000	0.0000	0.0000	88.6784
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.18. *SN =17-c421c31c21c51c11 sonucu*

-0.0000	0	-1.0000	290.0000
0	-1.0000		0
-1.0000	0	0.0000	90.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.19. $SN = 18-c421c31c21c51c12$ sonucu

0.0000	0.0000	-1.0000	-89.9274
-0.0000	-1.0000	-0.0000	-0.0000
-1.0000	0.0000	-0.0000	88.7970
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.20. $SN = 19-c421c31c21c52c11$ sonucu

0.0000	0.0000	-1.0000	-90.0000
-0.0000	1.0000	0	-0.0000
1.0000	0.0000	0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.21. $SN = 20-c421c31c21c52c12$ sonucu

-0.0000	-0.0000	-1.0000	-70.0877
0.0000	1.0000	-0.0000	0.0000
1.0000	-0.0000	-0.0000	211.3216
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.22. $SN = 21-c421c31c22c51c11$ sonucu

-0.0000	0	-1.0000	290.0000
0	-1.0000	0	0
-1.0000	0	0.0000	90.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.23. $SN = 22-c421c31c22c51c12$ sonucu

0.0000	0.0000	-1.0000	-447.3131
-0.0000	-1.0000	-0.0000	-0.0000
-1.0000	0.0000	-0.0000	45.4908
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.24. $SN = 23-c421c31c22c52c11$ sonucu

0.0000	0.0000	-1.0000	-450.0000
-0.0000	1.0000	0	-0.0000
1.0000	0.0000	0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.25. $SN = 24-c421c31c22c52c12$ sonucu

-0.0000	-0.0000	-1.0000	286.7543
0.0000	1.0000	-0.0000	0.0000
1.0000	-0.0000	-0.0000	258.9006
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.26. $SN = 25-c422c32c21c51c11$ sonucu

-0.0000	0	-1.0000	290.0000
0	-1.0000	0	0
-1.0000	0	0.0000	90.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.27. $SN = 26-c422c32c21c51c12$ sonucu

-0.0000	0.0000	-1.0000	287.3131
-0.0000	-1.0000	-0.0000	-0.0000
-1.0000	0.0000	0.0000	134.5092
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.28. $SN = 27-c422c32c21c52c11$ sonucu

0.0000	0.0000	-1.0000	290.0000
-0.0000	1.0000	0	-0.0000
1.0000	0.0000	0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.29. $SN = 28-c422c32c21c52c12$ sonucu

0.0000	-0.0000	-1.0000	-446.7543
0.0000	1.0000	-0.0000	0.0000
1.0000	-0.0000	0.0000	161.0994
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.30. $SN = 29-c422c32c22c51c11$ sonucu

-0.0000	0	-1.0000	290.0000
0	-1.0000	0	0
-1.0000	0	0.0000	90.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.31. $SN = 30-c422c32c22c51c12$ sonucu

0.0000	0.0000	-1.0000	-70.0726
-0.0000	-1.0000	-0.0000	-0.0000
-1.0000	0.0000	-0.0000	91.2030
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.32. $SN = 31-c422c32c22c52c11$ sonucu

0.0000	0.0000	-1.0000	-70.0000
-0.0000	1.0000	0	-0.0000
1.0000	0.0000	0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.33. $SN = 32-c422c32c22c52c12$ sonucu

-0.0000	-0.0000	-1.0000	-89.9123
0.0000	1.0000	-0.0000	0.0000
1.0000	-0.0000	-0.0000	208.6784
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.34 *Tabloda verilen motor açılarına göre kinematik analiz sonucu*

$\theta_1 = \pi; \theta_5 = 0; \theta_2 = 0; \theta_3 = 0; \theta_4 = 0;$			
H			
-0.0000	0.0000	-1.0000	-450.0000
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
1.0000	0	-0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.35. *SN =1-c411c31c21c51c11 sonucu*

-0.0000	0.0000	-1.0000	-450.0000
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
1.0000	0	-0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.38. *SN =6-c411c31c22c51c12 sonucu*

-0.0000	0.0000	-1.0000	-450.0000
-0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
1.0000	0.0000	0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.36. *SN =5-c411c31c22c51c11 sonucu*

-0.0000	0.0000	-1.0000	-450.0000
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
1.0000	0	-0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.39. *SN =9-c412c32c21c51c11 sonucu*

-0.0000	0.0000	-1.0000	-450.0000
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
1.0000	0	-0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.37. *SN =13-c412c32c22c51c11 sonucu*

-0.0000	0.0000	-1.0000	-450.0000
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
1.0000	0	0.0000	210.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.40. *Tabloda verilen motor açılarına göre kinematik analiz sonucu*

$\theta_1 = \pi/4; \theta_5 = \pi/2; \theta_2 = \pi/2; \theta_3 = 0; \theta_4 = 0;$			
H			
0.7071	0.7071	0.0000	42.4264
-0.7071	0.7071	0.0000	-42.4264
0.0000	-0.0000	1.0000	600.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.41. *SN =6-c411c31c22c51c12 sonucu*

0.7071	0.7071	0.0000	42.4264
-0.7071	0.7071	0.0000	-42.4264
0.0000	-0.0000	1.0000	600.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.42. *SN =9-c412c32c21c51c11 sonucu*

0.7071	0.7071	0.0000	42.4264
-0.7071	0.7071	0.0000	-42.4264
-0.0000	-0.0000	1.0000	600.0000
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.43 *Tabloda verilen motor açılarına göre kinematik analiz sonucu*

$\theta_1 = \pi/4; \theta_5 = \pi/2; \theta_2 = \pi/2; \theta_3 = \pi; \theta_4 = \pi/4;$			
H			
0.7071	-0.5000	0.5000	82.4264
-0.7071	-0.5000	0.5000	-2.4264
0.0000	-0.7071	-0.7071	83.4315
0	0	0	1.0000

Tablo Ek 3.44. *SN =13-c412c32c22c51c11 sonucu*

0.7071	-0.5000	0.5000	82.4264
- 0.7071	-0.5000	0.5000	-2.4264
0.0000	-0.7071	-0.7071	83.4315
0	0	0	1.0000

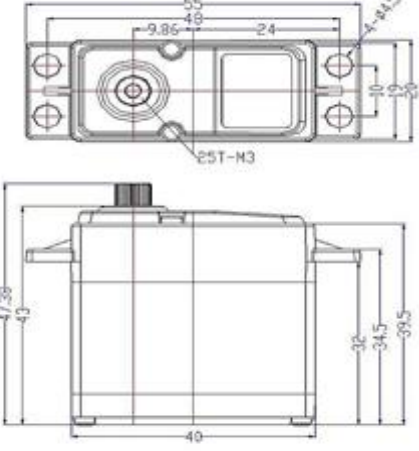
Tablo Ek 3.45. Tabloda verilen motor açılarına göre kinematik analiz sonucu

$\theta_1 = \pi/4; \theta_5 = \pi/2; \theta_2 = \pi/2; \theta_3 = \pi/6; \theta_4 = \pi/4;$			
H			
0.7071	0.6830	0.1830	-10.1077
-0.7071	0.6830	0.1830	-94.9605
0.0000	-0.2588	0.9659	571.8189
0	0	0	1.0000

Robot kollun $\theta_1 = \pi/4; \theta_5 = \pi/2; \theta_2 = \pi/2; \theta_3 = \pi/6; \theta_4 = \pi/4;$ giriş açı değerleri için gerçek(fiziksel) bir karşılığı bulunmamaktadır. Elde edilen bütün değerler sanal çözümlerdir.

SN: ters kinematikle elde edilen açı değerlerinin kullanılmasıyla bulunan Kartezyen koordinatta uç işlevcinin pozisyon ve koordinatlarını veren matris				
$SN = 1 - c_{411}c_{31}c_{21}c_{51}c_{11}$				
c_{411}	c_{31}	c_{21}	c_{51}	c_{11}
θ_3 birinci açı değeri için θ_4 birinci açı değeri	θ_3 birinci açı değeri	θ_2 birinci açı değeri	θ_5 birinci açı değeri	θ_1 birinci açı değeri
$SN = 22 - c_{421}c_{31}c_{22}c_{51}c_{12}$				
c_{421}	c_{31}	c_{22}	c_{51}	c_{12}
θ_3 ikinci açı değeri için θ_4 birinci açı değeri	θ_3 birinci açı değeri	θ_2 ikinci açı değeri	θ_5 birinci açı değeri	θ_1 ikinci açı değeri

EK 4: Elektronik devre elemanları özellikleri

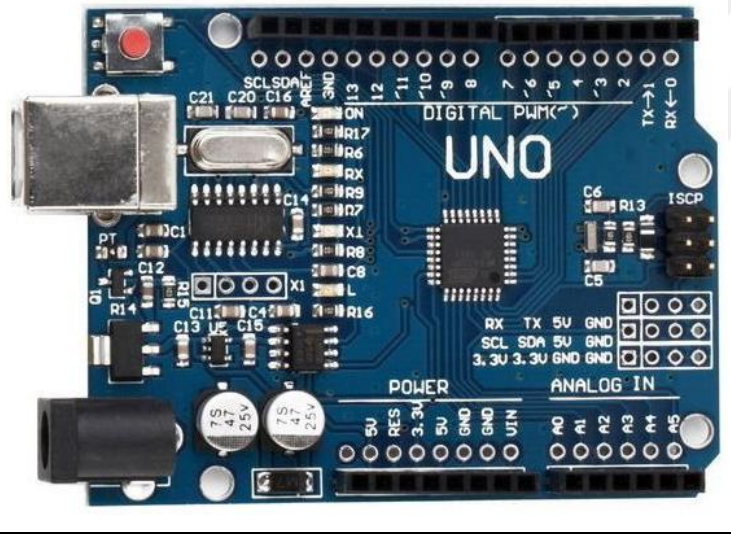
	
Çalışma voltajı: 6V -7.4V Bekleme akımı : 6mA@7.4V (Yüksüz) Hızız: 0.192sec/60°@7.4V (Yüksüz) Çalışma akımı : 180mA@7.4V (Yüksüz) Stall tork: 35.5kg.cm@7.4V Servo Gücü (Tork): 11.8kg.cm@7.4V Stall akım: 3.9A@7.4V Çalışma ısı aralığı: -20°C~60°C Ölçüler: 40mm x 20mm x 43mm Ağırlık: 67 (± 1g) Dişli Tipi: Çelik	Limit açısı: Yok Rulman: var Horn gear spline: 25T/5.9mm Horn tipi: Plastic,POM Kasa: PA+A aluminyum Kablo uzunluğu: 30CM Motor: Core Motor Sinyal darbe aralığı: 500~2500usec Maks çalışma açısı: 220° Dead band width: ≤4 µsec

Şekil Ek 4.1. Feetech FT5330M 35 Kg Çelik Dişli Dijital RC Servo Motor[40]

	Tork (4.8V): 15.5kg-cm Tork (6V): 17 kg-cm Motor Açısı : 180° ± 10° Hız: 0.18 saniye (4.8V) 0.16 saniye (6V) Çalışma Gerilimi: 4.8 ~ 6 DC Volt Ağırlık: 63 Gr Rulman Tipi: Bilyeli Rulman x 2 Motor Tipi: DCMotor Dişli Tipi: Bakır Çalışma Sıcaklığı: -20 °C ~ 60 °C Çalışma sıklığı: 1520µs / 333hz Boyut: 40.7 x 20.5 x 39.5 mm (1.60 x 0.80 x 1.47 inç)
---	--

Şekil Ek 4.2. PowerHD Yüksek Torklu Bakır Dişlili Standart Analog Servo Motor - HD-1501MG[41]

	Çalışma Voltajı: 4.8~ 6.6v Tutunma Torku: 9.4kg/cm (4.8v) Tutunma Torku: 11kg/cm (6v) Çalışma Hızı: 0.20sec/60degree (4.8v) Çalışma Hızı: 0.16sec/60degree (6.0v) Temperature range: 0- 55deg Ölçüler: 40.7×19.7×42.9mm Ağırlık: 55 gr Dişi Tipi: Metal Diş Kablo Uzunluğu: 32cm
Şekil Ek 4.3. Tower Pro MG995 Servo Motor[42]	

	Mikrodenetleyici: ATmega328 Çalışma Gerilimi: 5V Giriş Gerilimi 6-20V (önerilir) 7-12V Dijital I / O Pin: 14 Pin (PWM çıkışını sağlayan 6 Pin) Analog Giriş: 6 Pin Pin Başına Çıkış Akımı: 40 mA 3.3V Pin 50 mA DC Akım Bellek: Bootloader tarafından kullanılan 0.5 KB Flash Bellek 32 KB (ATmega328) SRAM: 2 KB (ATmega328) EEPROM: 1 KB (ATmega328) Frekans: 16 MHz Boyut: 68.6 mm x 53.4 mm Ağırlık: 25 g
Şekil Ek 4.4. Arduino UNO R3 Klon USB Kablo Hediye - (USB Chip CH340) [43]	



5 Volt 30 Amper

Ac Voltaj Aralığı: Ac88v-132v/Ac180-

264v (Ayarlanabilir Switch Özelliđi)

Kısa Devre / Aşırı Yük / Aşırı Sıcaklık /

Yüksek Gerilim Koruması

100 % Tam Yükte Çalışma

Şekil Ek 4.5. Ledwell Lw-150-5 5 Volt 30 Amper Metal Kasa Adaptör 5v 30a Adaptör [44]



Gücü 60 W'dır.

Giriş değerleri; 220-240 V AC, 0,45-0,55 A, 71 W
dır.

Çıkış değerleri; 12 V DC, 2 A, 60 W dır.

Çalışma ısı aralığı: -20 C / +60 C dir.

Şekil Ek 4.6. ACK LED Trafosu 5 Amper 60W [45]



X-Y eksenli analog joysticktır

İki adet 5 kohm potansiyometreye sahiptir.

Buton mevcuttur. Basıldığında ilettime geçer

Şekil Ek 4.7. Arduino XY Joystick Modülü Butonlu[46]

EK 5: Robot kol yürünge programı

```
#include<Servo.h>
Servo govde;
Servo omuz;
Servo dirsek;
Servo bilek;
Servo parmak;
Servo tabla;
int govde_aci=90;
int omuz_aci=90;
int dirsek_aci=90;
int bilek_aci=90;
int parmak_aci=90;
int tabla_aci=9;
int j_tabla=A0;
int j_omuz=A1;
int j_dirsek=A2;
int j_bilek=A3;
int j_parmak=A4;
int j_govde=A5;
int konum_kyt_omuz[10];
int konum_kyt_dirsek[10];
int konum_kyt_bilek[10];
int konum_kyt_parmak[10];
int konum_kyt_govde[10];
int konum_kyt_tabla[10];
int oynat_omuz[10];
int oynat_dirsek[10];
int oynat_bilek[10];
int oynat_parmak[10];
int oynat_govde[10];
int oynat_tabla[10];
int oynat=4;
int kyt=12;
int i=0;
```

```
int b=25;
int q=100;
int w=100;
int m=50;
int k=0;
int C;
int p;
int n;
int e;
int y;
int a;
int a1;
int a2;
int a3;
int a4;
int a5;
int a6;
int C1;
int C2;
int C3;
int C4;
int C5;
int C6;
int t=0;
int f=0;
int b1=0;
int r=0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(j_dirsek,INPUT);
  pinMode(j_omuz,INPUT);
  pinMode(j_bilek,INPUT);
  pinMode(j_parmak,INPUT);
  pinMode(j_govde,INPUT);
  pinMode(j_tabla,INPUT);
  pinMode(oynat,INPUT_PULLUP);
  pinMode(kyt,INPUT_PULLUP);
```

```
govde.attach(10);
omuz.attach(6);
dirsek.attach(9);
bilek.attach(5);
parmak.attach(3);
tabla.attach(11);
govde.write(govde_aci);
omuz.write(omuz_aci);
dirsek.write(dirsek_aci);
bilek.write(bilek_aci);
parmak.write(parmak_aci);
tabla.write(tabla_aci);
}
void konum_kyt()
{
  konum_kyt_omuz[i]=omuz_aci;
  konum_kyt_dirsek[i]=dirsek_aci;
  konum_kyt_bilek[i]=bilek_aci;
  konum_kyt_parmak[i]=parmak_aci;
  konum_kyt_govde[i]=govde_aci;
  // konum_kyt_tabla[i]=tabla_aci;
  Serial.print(i);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(konum_kyt_govde[i]);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(konum_kyt_omuz[i]);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(konum_kyt_dirsek[i]);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(konum_kyt_bilek[i]);
  Serial.print(" ");
  Serial.println(konum_kyt_parmak[i]);
  Serial.print(" ");
  // Serial.println(konum_kyt_tabla[i]);
  // Serial.print(" ");
  delay(150);
}
```

```

void oynt_omuz()
{
    int A_omuz=konum_kyt_omuz[i];
    int B_omuz=konum_kyt_omuz[i+1];
    delay(q);
    while(A_omuz<B_omuz)
    {
        A_omuz=A_omuz+1;
        omuz.write(A_omuz);
        int B_omuz=konum_kyt_omuz[i+1];
        delay(w);
        if(A_omuz!=B_omuz){A_omuz++;}
    }
    while(A_omuz>B_omuz)
    {
        A_omuz=A_omuz-1;
        omuz.write(A_omuz);
        int B_omuz=konum_kyt_omuz[i+1];
        delay(w);
        if(A_omuz!=B_omuz){A_omuz--;}
    }
}

void oynt_dirsek()
{
    int A_dirsek=konum_kyt_dirsek[i];
    int B_dirsek=konum_kyt_dirsek[i+1];
    delay(q);
    while(A_dirsek<B_dirsek)
    {
        A_dirsek=A_dirsek+1;
        dirsek.write(A_dirsek);
        int B_dirsek=konum_kyt_dirsek[i+1];
        delay(w);
        if(A_dirsek!=B_dirsek){A_dirsek++;}
    }
    while(A_dirsek>B_dirsek)
    {

```

```

        A_dirsek=A_dirsek-1;
        dirsek.write(A_dirsek);
        int B_dirsek=konum_kyt_dirsek[i+1];
        delay(w);
        if(A_dirsek!=B_dirsek){A_dirsek--;}
    }
}

void oynt_bilek()
{
    int A_bilek=konum_kyt_bilek[i];
    int B_bilek=konum_kyt_bilek[i+1];
    delay(q);
    while(A_bilek<B_bilek)
    {
        A_bilek=A_bilek+1;
        bilek.write(A_bilek);
        int B_bilek=konum_kyt_bilek[i+1];
        delay(w);
        if(A_bilek!=B_bilek){A_bilek++;}
    }
    while(A_bilek>B_bilek)
    {
        A_bilek=A_bilek-1;
        bilek.write(A_bilek);
        int B_bilek=konum_kyt_bilek[i+1];
        delay(w);
        if(A_bilek!=B_bilek){A_bilek--;}
    }
}

void oynt_parmak()
{
    int A_parmak=konum_kyt_parmak[i];
    int B_parmak=konum_kyt_parmak[i+1];
    delay(q);
    while(A_parmak<B_parmak)
    {
        A_parmak=A_parmak+1;

```

```

        parmak.write(A_parmak);
        int B_parmak=konum_kyt_parmak[i+1];
        delay(w);
        if(A_parmak!=B_parmak){A_parmak++;}
    }
    while(A_parmak>B_parmak)
    {
        A_parmak=A_parmak-1;
        parmak.write(A_parmak);
        int B_parmak=konum_kyt_parmak[i+1];
        delay(w);
        if(A_parmak!=B_parmak){A_parmak--;}
    }
}

void oynt_govde()
{
    while(r<1)
    {
        int A_govde=konum_kyt_govde[i];
        int B_govde=konum_kyt_govde[i+1];
        delay(q);
        while(A_govde<B_govde)
        {
            A_govde=A_govde+1;
            govde.write(A_govde);
            int B_govde=konum_kyt_govde[i+1];
            delay(w);
            if(A_govde!=B_govde){A_govde++;}
        }
        while(A_govde>B_govde)
        {
            A_govde=A_govde-1;
            govde.write(A_govde);
            int B_govde=konum_kyt_govde[i+1];
            delay(w);
            if(A_govde!=B_govde){A_govde--;}
        }
    }
}

```

```

Serial.print(A_govde);
}
}
void oynt_tabla()
{
int A_tabla=konum_kyt_tabla[i];
int B_tabla=konum_kyt_tabla[i+1];
delay(q);
while(A_tabla<B_tabla)
{
A_tabla=A_tabla+1;
tabla.write(A_tabla);
int B_tabla=konum_kyt_tabla[i+1];
delay(w);
if(A_tabla!=B_tabla){A_tabla++;}
}
while(A_tabla>B_tabla)
{
A_tabla=A_tabla-1;
tabla.write(A_tabla);
int B_tabla=konum_kyt_tabla[i+1];
delay(w);
if(A_tabla!=B_tabla){A_tabla--;}
}
}
void basla_govde()
{
while(k==0)
{
int A=konum_kyt_govde[0];
int B=konum_kyt_govde[9];
if(B>A)
{
for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{
int C1=B-n;
govde.write(C1);

```

```

delay(m);a1=C1;
}
}
else if(B<A)
{
for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{int C1=B+n;
govde.write(C1);
delay(m); a1=C1;
}
}
k++;
}
}
void basla_omuz()
{
while(n==0)
{
int A=konum_kyt_omuz[0];
int B=konum_kyt_omuz[9];
if(B>A)
{
for(int j=0;j<=abs(A-B);j++)
{
int C2=B-j;
omuz.write(C2);
delay(m);a2=C2;
}
}
}
else if(B<A)
{
for(int j=0;j<=abs(A-B);j++)
{int C2=B+j;
omuz.write(C2);
delay(m);a2=C2;
}
}
}

```

```

n++;
}
}
void basla_dirsek()
{
while(p==0)
{
int A=konum_kyt_dirsek[0];
int B=konum_kyt_dirsek[9];
if(B>A)
{
for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{
int C3=B-n;
dirsek.write(C3);
delay(m);a3=C3;
}
}
}
else if(B<A)
{
for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{int C3=B+n;
dirsek.write(C3);
delay(m);a3=C3;
}
}
}
p++;
}
}
void basla_bilek()
{
while(e==0)
{
int A=konum_kyt_bilek[0];
int B=konum_kyt_bilek[9];
if(B>A)
{

```

```

for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{
int C4=B-n;
bilek.write(C4);
delay(m);a4=C4;
}
}
else if(B<A)
{
for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{int C4=B+n;
bilek.write(C4);
delay(m);a4=C4;
}
}
e++;
}
}
void basla_parmak()
{
while(y==0)
{
int A=konum_kyt_parmak[0];
int B=konum_kyt_parmak[9];
if(B>A)
{
for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{
int C5=B-n;
parmak.write(C5);
delay(m);a5=C5;
}
}
else if(B<A)
{
for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{int C5=B+n;

```

```

parmak.write(C5);
delay(m);a5=C5;
}
}
y++;
}
}
void basla_tabla()
{
while(a==0)
{
int A=konum_kyt_tabla[0];
int B=konum_kyt_tabla[9];
if(B>A)
{
for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{
int C6=B-n;
tabla.write(C6);
delay(m);a6=C6;
}
}
else if(B<A)
{
for(int n=0;n<=abs(A-B);n++)
{int C6=B+n;
tabla.write(C6);
delay(m);a6=C6;
}
}
}
a++;
}
}
void loop()
{
int j_omuz_deger=analogRead(j_omuz);
if(j_omuz_deger>=800)

```

```

{
omuz_aci=omuz_aci+1;
delay(b);
omuz.write(omuz_aci);
}
else if(j_omuz_deger<=400)
{
omuz_aci=omuz_aci-1;
delay(b);
omuz.write(omuz_aci);
}
else if(400<j_omuz_deger<800){ }

int j_dirsek_deger=analogRead(j_dirsek);
if(j_dirsek_deger>=800)
{
dirsek_aci=dirsek_aci+1;
delay(b);
dirsek.write(dirsek_aci);
}
else if(j_dirsek_deger<=400)
{
dirsek_aci=dirsek_aci-1;
delay(b);
dirsek.write(dirsek_aci);
}
else if(400<j_dirsek_deger<800){ }

int j_bilek_deger=analogRead(j_bilek);
if(j_bilek_deger>=800)
{
bilek_aci=bilek_aci+1;
delay(b);
bilek.write(bilek_aci);
}
else if(j_bilek_deger<=400)
{

```

```

    bilek_aci=bilek_aci-1;
    delay(b);
    bilek.write(bilek_aci);
}
else if(400<j_bilek_deger<800){ }
int
j_parmak_deger=analogRead(j_parmak);
if(j_parmak_deger>=800)
{
    parmak_aci=parmak_aci+1;
    delay(b);
    parmak.write(parmak_aci);
}
else if(j_parmak_deger<=400)
{
    parmak_aci=parmak_aci-1;
    delay(b);
    parmak.write(parmak_aci);
}
else if(400<j_parmak_deger<800){ }
int j_tabla_deger=analogRead(j_tabla);
if(j_tabla_deger>=800)
{
    tabla.write(10.5);
}
else if(j_tabla_deger<=400)
{
    tabla.write(8.5);
}
else
if(400<j_tabla_deger<800){tabla.write(9); }
int j_govde_deger=analogRead(j_govde);
if(j_govde_deger>=800)
{
    govde_aci=govde_aci+1;
    delay(b);
    govde.write(govde_aci);

```

```

}
else if(j_govde_deger<=400)
{
    govde_aci=govde_aci-1;
    delay(b);
    govde.write(govde_aci);
}
else if(400<j_govde_deger<800){ }
while(i<=9 && digitalRead(kyt)==LOW)
{
    delay(20);
    konum_kyt();
    if(digitalRead(kyt)!=LOW){
        i++;
    }
}
while(i>=10 && t<1 &&
digitalRead(kyt)==LOW)
{
    basla_govde();
    Serial.print(a1);
    Serial.print(" ");
    basla_omuz();
    Serial.print(a2);
    Serial.print(" ");
    basla_dirsek();
    Serial.print(a3);
    Serial.print(" ");
    basla_bilek();
    Serial.print(a4);
    Serial.print(" ");
    basla_parmak();
    Serial.print(a5);
    Serial.print(" ");
    // basla_tabla();
    // Serial.println(a6);
    // Serial.print(" ");

```

```

t++;
}
while(f<1 && digitalRead(oynat)==LOW)
{
    while(i<=9)
    {
        oynt_govde();
        // oynt_omuz();
        // oynt_dirsek();
        // oynt_bilek();
        // oynt_parmak();
        // oynt_tabla();
        i++;
        delay(30);
    }
    f++;
}
}

```