



KILAVUZ ÇEKME MAKİNASI TASARIMI VE İMALATI

Güllü AKKAŞ

DOKTORA TEZİ

İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2017

Güllü AKKAŞ tarafından hazırlanan “KILAVUZ ÇEKME MAKİNASI TASARIMI VE İMALATI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İhsan KORKUT

İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Abdulkadir EKŞİ

Makine Mühendisliği Konstrüksiyon ve İmalat, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Doç. Dr. Hakan DİLİPAK

İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

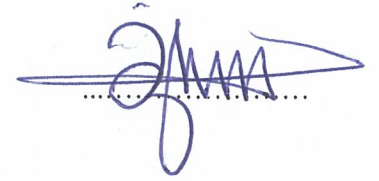
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Doç. Dr. M. Tolga ÖZKAN

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 18/05/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Güllü AKKAŞ

18/05/2017

KILAVUZ ÇEKME MAKİNASI TASARIMI VE İMALATI
(Doktora Tezi)

Güllü AKKAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2017

ÖZET

Kılavuz çekme makinası, tasarım detaylarındaki farklılıklarla, günümüz teknolojisinin imkanlarını kullanarak özel işlevi olan endüstriyel robotlar sınıfında kılavuz çekme işlemine çözüm üreten bir makinadır. Kılavuz çekme makinası sayesinde insan faktörünün yapılan işe etkisi azaltılarak zamandan kazanım sağlanması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada günümüzde metal talaşlı işlemlerinin yaklaşık olarak %22'sini oluşturan kılavuz çekme işleminin otomasyon yoluyla gerçekleştirilmesine imkan sağlayacak fonksiyona sahip bir makine tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Kılavuz çekme makinası 5 serbestlik derecesine sahip bir manipülatör olarak tasarlanmıştır. İlk dört uzuv servo motorlar aracılığıyla, uç işlevci ise hidrolik motor ile kontrol edilmiştir. Sistemin; konum, hız-ivme analizinde robotiğin temel prensiplerinden faydalanılmıştır. Hareket analizi MATLAB-SimMechanics programı ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin mekanik tasarımı ve statik yük analizleri için SolidWorks analiz programı kullanılmıştır.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Kılavuz Çekme Makinası, Makina Tasarımı, Makine İmalatı

Sayfa Adedi : 105

Danışman : Prof. Dr. İhsan KORKUT

DESIGN AND MANUFACTURING OF TAPPING MACHINE

(Ph. D. Thesis)

Güllü AKKAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2017

ABSTRACT

Tapping machine is a machine that produces solutions to the tapping process in the type of industrial robots with special function, using the possibilities of today's technology, with the differences in design details. Thanks to the tapping machine, it is intended to save time by reducing the human factor effect of the work done. In this study, the machine design and prototype production with function that enables the tapping process, which constitutes almost %22 of the metal machining operations, to be realized through automation has been realized. The tapping machine has been designed as a manipulator with five degrees of freedom. Initial four links are controlled by servo motors and the end effector is controlled by a hydraulic motor. The basic principles of the robotics have been utilized in position, velocity, acceleration analysis of the system. Motion analysis was performed with the MATLAB-SimMechanics program. SolidWorks 3D design and analysis programs were used for the mechanical design and state load analysis of the system.

Science Code : 91438

Key Words : Tapping Machine, Design of Machine, Manufacturing of Machine

Page Number : 105

Supervisor : Prof. Dr. İhsan KORKUT

TEŞEKKÜR

Çalışmam esnasında katkılarıyla doğru yönde ilerlemem için emeğini esirgemeyen sayın danışmanım Prof. Dr. İhsan KORKUT'a, tez izleme komitesi üyeleri sayın Doç. Dr. Hakan DİLİPAK'a ve Doç. Dr. Murat Tolga ÖZKAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmam süresince yardımlarıyla yanımda olan Dr. Gültekin UZUN ve Saltuk Alper YAŞAR öncülüğünde bütün mesai arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim. Çalışmamın ve hayatımın her vaktinde yanımda olan eşim Ahmet Hulusi AKKAŞ'a, kızım Fatma İdil AKKAŞ'a ve aileme teşekkür ederim. Kılavuz Çekme Makinası Tasarımı ve İmalatı sırasında proje ortağı olarak katkılarından dolayı Kılavuzsan A.Ş.'ye ve firma yöneticisi Mustafa TAŞKIN'a teşekkür ederim.

Çalışmayı 0353.STZ.2013-2 kodlu SANTEZ projesi ile destekleyen T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü'ne teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. KURAMSAL TEMELLER	13
3.1. Kılavuz ile Vida Açma Yöntemi	13
3.2. Robotik ve Endüstriyel Robot Kavramı	14
3.2.1. Serbestlik derecelerine göre robotlar	16
3.3. Manipülatörün Kontrolü ve Mekaniği	22
3.3.1. Konum ve yönelim kavramlarının tanımlanması	22
3.3.2. Robotların kinematik analizi	22
3.3.3. Manipülatör dinamiği	35
4. SİSTEM TASARIMI, ANALİZİ, SİMÜLASYONU ve PROTOTİP İMALATI	41
4.1. Tasarım	42
4.2. Statik ve Dinamik Analiz.....	45
4.2.1. Statik analiz	45
4.2.2. Dinamik analiz.....	50

Sayfa

4.2.3. Kılavuz çekme manipölatörünün MATLAB Simmechanics modülü ile modellenmesi	71
4.3. Kılavuz Çekme Manipölatörü İçin İmalat Süreci	80
4.3.1. Kılavuz çekme manipölatörü için kullanıcı makine arayüz programı.....	87
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	95
EKLER.....	99
EK-1. Kılavuz çekme makinası imalatı ve prototip resimleri.....	100
ÖZGEÇMİŞ	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kılavuz çekme makinasının imal edildiği malzeme ve bu malzemenin mukavemet özellikleri ve analiz parametreleri	46
Çizelge 4.2. Kılavuz çekme makinası için Denavit Hartenberg parametreleri	52
Çizelge 4.3. MM50C tipi hidrolik motor.....	84



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Kılavuz ve elemanları	10
Şekil 3.2. Makine kılavuzu bileme formları	14
Şekil 3.3. Endüstriyel robot tasarım basamakları	16
Şekil 3.4. XYZ Kartezyen Robot	17
Şekil 3.5. Silindirik robot kolun çalışma alanı	18
Şekil 3.6. Küresel robot kolun çalışma alanı	19
Şekil 3.7. SCARA robot kolu ve çalışma uzayı	20
Şekil 3.8. Antropomorfik robot kolun kol ve eksen hareketleri ile X-X arası hareket alanı	21
Şekil 3.9. Robot kolun çevreyle kendisi arasındaki koordinat sistemi	20
Şekil 3.10. Kinematik denklemler ortak değişkenlerin bir fonksiyonu olarak temel eksenin durumu	25
Şekil 3.11. Denavit-Hartenberg parametreleri	26
Şekil 3.12. Uç işlevcinin belli bir konum ve rotasyonu için açısal değerlerinin ne olduğu ters kinematik yoluyla hesaplanır	28
Şekil 3.13. İleri ve ters kinematik problemin şematik gösterimi	29
Şekil 3.14. Mafsal değerleri ve uç işlevcisinin hızı arasındaki geometrik ilişki jakobyen adı verilen bir matrisle tanımlanır	32
Şekil 3.15. I. Dünya Savaşında bir pilot ile arka topçusu. Arka topçu mekanizması tekil nokta durumuna sonuna kadar maruz kalmaktadır	33
Şekil 3.16. i uzvuna etkiyen kuvvet ve momentler	34
Şekil 3.17. Motor torku ve robot kolun sonuç hareketi arasındaki ilişki hareketin dinamik denklemlerinden elde edilir.	36
Şekil 3.18. i. uzvun Lagrange formülü için kinematik tanımı	38
Şekil 4.1. Kılavuz çekme makinası için elde edilen çalışma uzayı sınırları	41
Şekil 4.2. Kılavuz çekme makinası için önemli ölçüler	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Kılavuz çekme makinası için eksenlerin yerleşimi, dönüş açıları ve parametrik ölçüleri.....	43
Şekil 4.4. Kılavuz çekme makinası.....	45
Şekil 4.5. Kılavuz çekme makinası için kapalı konum gerilme analizi grafiği	47
Şekil 4.6. Kılavuz çekme makinası kapalı konum yer değiştirme analizi grafiği.....	47
Şekil 4.7. Kılavuz çekme makinası ara konum için gerilme analizi	48
Şekil 4.8. Kılavuz çekme makinası için ara konum yer değiştirme analizi	48
Şekil 4.9. Kılavuz çekme makinası için ara konumda birinci kalite mesh uygulaması	49
Şekil 4.10. Kılavuz çekme makinası için açık konum gerilme analizi	49
Şekil 4.11. Kılavuz çekme makinası için açık konum yer değiştirme analizi	50
Şekil 4.12. Kinematik analizde kullanılacak olan değişken açı değerleri.....	51
Şekil 4.13. MatLab Simulink kurulumu için MatLab'ın yönetici olarak çalıştırılması.	72
Şekil 4.14. MatLab çalışma klasörü.....	72
Şekil 4.15. Simulink kurulum komutu	72
Şekil 4.16. Solidworks-Simulink bağlantı komutu	72
Şekil 4.17. SimMechanics aktive etmek için eklentiler sayfası.....	73
Şekil 4.18. SolidWorks'ta montajı yapılmış sistemden bir görüntü ve SimMechanics'e montajın aktarılması	73
Şekil 4.19. Montaj resminin current folderdaki xml uzantılı formatı	74
Şekil 4.20. Montaj verisini SimMechanics bloklarına dönüştüren komut.....	74
Şekil 4.21. SimMechanics'te mekanik yapının blokları	75
Şekil 4.22. Dönel mafsala girdi olarak verilen tahrik elemanı ve çıktısı olan sensör....	75
Şekil 4.23. Tahrik elemanı (joint actuator) için hangi verilerle kontrol edileceğinin seçildiği ekran.....	76
Şekil 4.24. Tahrik elemanını besleyen Matlab fonksiyonları	77
Şekil 4.25. Ters kinematik (inversekn) fonksiyon bloğu programı	77
Şekil 4.26. Açısal konum türevi (turev) foksiyon bloğu programı	78

Şekil	Sayfa
Şekil 4.27. Hız (açısal hız) fonksiyon bloğunun programı	78
Şekil 4.28. Kılavuz çekme manipölatörünün genel simülasyonu için blok şeması	79
Şekil 4.29. $P_x=549.3\text{mm}$, $P_y=460.9\text{mm}$ ve $P_z=-325.1\text{mm}$ konumu için simülasyon esnasında farklı zaman dilimleri içerisindeki görüntüleri.....	79
Şekil 4.30. Birinci ikinci ve üçüncü eklemlerin açısal konum-zaman grafikleri.....	79
Şekil 4.31. Uç işlevcinin konum değişiminin zamana bağlı grafiği	80
Şekil 4.32. SFUR 2505 tip milin teknik özellikler.....	83
Şekil 4.33. Mach3 Usb Kontrol kartı basit bağlantı şeması.....	85
Şekil 4.34. Servo motorların ve eksenlerin kontrol kartında tanıtılması	86
Şekil 4.35. Mach3 CNC yazılımı ana ekranı	88
Şekil 4.36. Örnek bir program için takım yolu	89

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Teco 400 Servo motor takımı.....	81
Resim 4.2. Kılavuz çekme makinası üzerinde motor hareketini manipülatöre ileten 5 mm hatveli sağ diş mil	82
Resim 4.3. 5 mm hatveye sahip SFUR 2505 tip mil	83
Resim 4.4. Mach3 kablolu el çarkı	87
Resim 4.5. Uç işlevcinin kayar kızağa yay ile bağlanmasından kaynaklanan salınımlı hareketi.....	90
Resim 4.6. Kılavuz çekme makinası ile vida dişi açılan test parçasının uygun vida ile denenmesi.....	91
Resim 4.7. Kılavuz çekme makinası ile vida dişi açılan test parçasının uygun vida ile denenmesi yandan görünümü.....	91

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

$${}^{i+1}_iT \text{ (} {}^0_6T \text{ vb. gibi)}$$

Transformasyon matrisleri

$${}^i f_i$$

Kuvvet

$${}^i n_i$$

Moment

$${}^{i+1}_iR$$

Rotasyon matrisi

$$I_m$$

Atalet tensörü

$$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$$

Eklemlerdeki açısal değişimler

$$J_i$$

Jakobiye matrisi

$$P_x, P_y, P_z$$

Uç işlevci konum denklemleri

$${}^{i+1}_i w_{i+1}$$

Geçerli uzuv için açısal hız

$${}^{i+1}_i v_{i+1}$$

Geçerli uzuv için çizgisel hız

$$\tau$$

Eklemlerde oluşan tork değeri

$$s_2$$

$\sin(\theta_2)$

$$c_2$$

$\cos(\theta_2)$

Kısaltmalar

Açıklamalar

NDT

Non-Destructive Testing

1. GİRİŞ

Günümüzde üreticiler sürekli artan talebi karşılamak için düşük maliyetlerde, hızlı ve verimli çözümler aramaktadır. Bunların başında işçilik giderlerinin düşürülmesi gelir. Bunun yanında ise kaliteli ürün şartının ve bu kalitede standartlaşma şartının sağlanması gerekmektedir. Bütün bunlar sağlanırken zamandan da kazanmak esas beklentidir. Bütün bu koşullar otomasyonu daha değerli hale getirmiştir. Otomasyon sistemleri sayesinde işçilik giderlerinden, zamandan kazanç elde edilirken yapılan işte de belli bir standart yakalanabilir. Robotikte otomasyon sistematik olarak kullanılmaktadır. Günümüzde makinaların otomasyon sistemleriyle bütünleşmesinde prosesler robotik bilimiyle kesişmektedir.

Robotik insanların yaptığı işleri bilgisayar destekli otomasyon sistemleriyle kontrol edilmekte olan makinelerle yaptırılmasıyla ilgilenen bilim dalıdır. Bilimin gelişmesiyle ve özellikle bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemelerle 1960'lardan bu yana en büyük gelişmeyi göstermiştir [1]. Robotik bilimi disiplinler arası çalışmalar sonucu ortaya koyulmuş bir bilim dalıdır. Bir robotun imalatı için birçok temel bilim dalının kesişebilmesi gerekmektedir. Bu disiplinler arası çalışmada esas olan bilimler elektrik- elektronik mühendisliği, endüstri mühendisliği, makina mühendisliği, imalat mühendisliği ve matematik olarak özetlenebilir [2, 3].

Robotların yorulmayan işçiler olması, üretim kapasitelerinin planlanabilir olması, fiziki şartlardan etkilenmemeleri, işçilik maliyetlerini düşürmesi, ürün kalitesinde standardı yakalayabilme ve koruyabilme yeteneğinin yüksek olması, programlanabilmesi neticesinde esnek üretim şartları sağlayabilmeleri gibi pek çok pozitif yönü endüstride hızla yaygın bir kullanım alanı bulmasına sebep olmuştur.

Sanayide kullanılan robotlar üretim maliyetlerini düşürmelerinin yanı sıra üretim kalitesini artırarak kendilerini vazgeçilmez kılmışlardır. Aynı zamanda robotlar insan sağlığına zararlı olan kimyasalların kullanıldığı, yüksek ısıya maruz kalınan ürünlerin verildiği kısaca insan fizyolojisinin dayanamayacağı şartlardaki üretimlerin vazgeçilmez işçileri olmuşlardır.

Robotlar birçok farklı görevi yapmak üzere programlanabilmektedirler. Robotları sıradan bir makineden ayıran en büyük fark, robotların birçok kez programlanabilmelerinden ve

bünyelerinde mekanik sistemlerin yanında birde denetleyici içermesinden kaynaklanmaktadır [3].

Endüstride en çok kullanılan makineler robotlardır. Robotlar her fabrikanın olmazsa olmazı haline gelmiştir. Her robot bir ana iskeletten ve ana iskelete bağlı kollardan meydana gelmektedir. Robotlar programlanarak, hatasız ve yorulma olmaksızın bir insana göre bin kat daha hızlı çalışabilmektedir. Robot kolların kabiliyetleri meydana geldiği eklem sayıları ile doğru orantılıdır. Ne kadar çok eklemi varsa o kadar hassas işlemler yapabilir. Ancak programlanması da aynı oranda daha zordur. Robot kollar eklemlerden ve her bir eklemi hareket ettiren motorlardan meydana gelmektedir. Motorlar kullanım alanlarına göre farklı türde olabilmektedir. Kontrol edilmeleri ve programlanmaları eklem sayısı arttıkça zorlaştığından robot kollar için motor sürücü devreleri yani kontrol devreleri tasarlanması zorunlu hale gelmiştir. Böylece kontrol işlemi çok daha basite indirgenmiş ve kullanıcıların sadece basit komutlar vererek robot kolları hareket ettirebilmeleri sağlanmıştır [4].

Makine imalatı sürecinde yeni bir prototipin ortaya çıkmasında birçok bileşen bir araya getirilmektedir. Makineleri oluşturan temel parçalardan detay parçalara kadar bütün bileşenler bir arada çalışabilmek için montaj edilmek zorundadır. Bu kadar çok bileşenin bir arada bulunduğu imalat sektöründe montaj için kullanılan başlıca yöntemlerden biri cıvata ve somun bağlantı şeklidir. Cıvata-somun bağlantılarının kullanım oranı düşünüldüğünde talaşlı imalatla kılavuz çekme işleminin ne denli yoğun kullanıldığı hakkında ve aslında imalat sürecinde ne kadar çok zaman aldığı hakkında bir genel yargıya ulaşılabilir.

Ülke üretiminde Dünya standartlarını yakalayabilmek ve uluslararası pazarda rekabet edebilmek için robota dayalı işlem planlaması yapılması bir zorunluluk olmuştur. Bu zorunluluk esnek üretim hattı ihtiyacına, müşteri odaklı üretim esasına dayanan müşteri beklentilerindeki değişikliklere hızlı cevap verebilme kapasitesi ihtiyacına cevap olarak ortaya çıkmıştır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında yeni bir işleve sahip özel bir robot kazandırılmıştır. Kılavuz çekme makinesi olarak adlandırılan robot kol sayesinde fiziki şartların insanları zorladığı açılı yüzeylerin dış açma önünde engel teşkil ettiği ürünler için kılavuz çekme işleminin bilgisayar kontrollü bir sistem tarafından gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Robotiğin esasları gözetilerek mekanik tasarımı gerçekleştirilen robot kol bilgisayar ortamında SolidWorks analiz modülü ile statik analize tabi tutulmuştur. Sonrasında kinematik analiz ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bir yazılım firmasından destek alınarak kontrolcü tasarımı ve kontrol arayüzü oluşturulmuştur. Robot çalışır konuma getirildikten sonra izleyeceği yol (trajectory-yörünge) tasarımı yapılarak testleri gerçekleştirilmiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Makine tasarımı günümüzde elde edilen teknolojik gelişmelerle birlikte otomasyon sistemleriyle yakından ilişkilendirilebilmektedir. Otomasyon sistemleri için kullanılan temel yöntemler içinde de robotik bilimi yer almaktadır. Robotikte ulaşılan teknolojiye ışık tutması amacıyla literatüre geçmiş olan çalışmalar incelenmiştir.

Adlı ve Akdoğan “Alt bacak rehabilitasyonu için terapatik egzersiz robotu dizayn ve kontrolü: Fizyoterobot” isimli çalışmada omurilik yaralanması sonrası felç, kas bozukluğu veya cerrahi operasyonda rehabilitasyona ihtiyacı olan hastaların alt bacakları için 3 serbestlik dereceli terapatik egzersiz robotu tasarladılar ve kontrolünü yaptılar. Bu robotu kontrol etmek için temel kontrol yapısı üzerine “insan-makine arayüzü” geliştirilmiştir. Robot manipülatörü fizyoterapist olmaksızın aktif ve pasif egzersizleri hemde özel hareketleri uygulayabilmektedir. Ayrıca hasta egzersiz sırasında robot manipülatörüne karşı tepki gösterirse robot manipülatörü geribesleme datasına göre konum değiştirebilmektedir. Böylece robot manipülatörü hem terapatik egzersiz ekipmanı hemde fizyoterapist olarak hareket kapasitesi ölçüsünde hizmet vermektedir [5].

Messay ve arkadaşlarının yaptığı “Verimlilik hesaplama ve sağlam kinematik kalibrasyon metodolojilerinin endüstriyel robotlara uygulanması” isimli çalışmada kısmi ölçümleri yapılan endüstriyel robotlar için verimlilik hesaplama ve sağlam kinematik kalibrasyon algoritmaları üzerinde çalışmışlardır. Bu işlem kalibrasyon noktalarının Kartezyen koordinatlarının bulunmasını ve bazı referans noktalarına kalibrasyon noktalarından radyal ölçüm ihtiyacı olan başka kalibrasyon teknikleri uygulamayı içermektedir. Yöntem, ne yönelim metodlarına ihtiyaç duyar, nede referans eksenin nerede olduğu hakkında açık bilgiye. Çoğu benzer çalışmaların aksine her iki yöntem kullanılarak orijinal Denavit-Hartenberg kinematik modeli basitleştirmiştir. Basitleştirilmiş Denavit Hartenberg modeli sadece endüstriyel manüplatörlerin verimli ve sağlamlığı kanıtlanmış kalibrasyonu değil, aynı zamanda görüş noktası verimliliği hesaplama avantajlıdır çünkü karşılaştırmalı daha az parametreden oluşur. Ekip parametrik devamlılığı olan ve yedeksiz olan Denavit Hartenberg modelini uygun şekilde inşa etmek ihtiyacıyla kurallar kümesini geliştirmek için analitik yaklaşımla çalışmışlardır. Yöntemde hatalı parametrelerin karakterizasyonunu sağlamak için otomasyon metodu önerildi, böylece manipülatörün Denavit Hartenberg hata

modeli doğru olarak anlaşıldı. Bu metod için uygunluğu gösteren hata parametrelerinin istatistiksel analizini yönlendirmek için yeni hibrid optimizasyonu kullanılmıştır [6].

Jin ve Gans'ın yapmış oldukları Endüstriyel robotlar için hızlı ve güçlü yörünge tasarımı yaklaşımı için parametre tanımlama isimli çalışmalarında model tabanlı tork seviyesi kontrolü robot kontrolünde konum seviyesi ve hız seviyesi üzerinde hassas ve hız avantajları olarak önermişlerdir. Ancak robotun dinamik parametreleri tam olarak tanımlanmak zorundadır. Birçok adım, sistem dinamiği modellemeyi, bağlantı pozisyonu/torku datası hakkında veri toplamayı ve filtrelemeyi, deneysel dizaynı, dinamik parametre tahmini ve onaylamayı içeren dinamik parametre tanımlanmasıyla ilişkilendiriliyor. Bu çalışmada, robotun izlemesi için uyarma yörünge tasarımı yeni, verimlilik hesaplama ve sezgisel optimalite kriteri tavsiye edilmektedir. Deneyler 6 serbestlik dereceli Staubli TX-90 robotunda gerçekleştirildi. Araştırmacılar, tork tahmini doğrulamayı kullanarak ve eski metodları karşılaştırarak dinamik parametreleri onayladılar. RMS hataları tahminden az çıktı ve optimum fonksiyon büyüklüğü eski yöntemlerden az belirlendi [7].

Kaltsoukalas ve diğerleri yapmış oldukları Endüstriyel robot manüplatörünün hareketlerinin üretilmesi isimli çalışmada endüstriyel robot manüplatörünün uç işlevcisinin istenen konum ve yönelimini yöneten yolun tanımlanması için akıllı arama algoritmasını önerdiler. Arama algoritması kademeli olarak seçen tarafından istenen ve alternatif robotların konfigürasyonlarının sayısının değerlendirilmesidir. Robotların alternatif konfigürasyonlarının sistemi, hesaplanan zamanı minimize etmek için arama boşluğunu indirgeyen bir takım parametreler kullanarak inşa edilir. Alternatiflerin değerlendirilmesinde, çoklu kriterler değişik gereksinimlerin gerçekleştirilebilmesi için sırasıyla kullanılır. Alternatif konfigürasyonlar uç işlevcisinin konumunu esas etkileyen için önem verilen robot bağlantılarıyla türetilmektedir. Sistem çözünürlüğü ve ölçü parametreleri istenen çıktının temelidir. Yüksek çözünürlük pürüzsüz yol için, hedef konumuna ara noktaları sadece bir dizi sağlayarak kaba bir tahmin için daha düşük kullanılır. Bu yol bir dizi robot konfigürasyonlarından türetilir. Bu metod deneyimsiz robot programcısının istenen kriterlerde hedef konum için orta noktaları kaydetmeksizin yerine gitirebilen otomatik yol türetmek için esneklik sağlamaktadır [8].

Pedersen ve diğerleri yayınladıkları Üretim için robot becerileri: Endüstriyel yayılma konseptinden isimli çalışmalarında üretim için kendini savunan robot becerilerinin genel

konsepti üzerinde durmuşlar. Yazarlar kısmen küçük bir takım becerileri fabrika çalışanları talimatlarından nasıl türetileceğini ve bu becerilerin nasıl robot manüpülatörüne transfer edileceğini anlattılar. Genel robot becerileri sadece bu robotlarda uygulanmadı, aynı zamanda basit görev seviyesinde programlama metodları boyunca çeşitli görevlerin uygulanmasında robotların programlarının sezgisel olarak sıralanmasında uygulandı. Çalışmada bunun için farklı yöntemler robotikte deneyimsiz çeşitli insanlarla kapsamlı testler yapılarak ispat edildi. Çalışmacılar bulgularını çeşitli açılımlarla çalışan üretim tesislerinde endüstriyel iş ortaklarıyla değerlendirdiler. Buradanda anlaşıldığı gibi robot becerilerinin kullanılması ve birleşmiş görev seviyesi programlama çerçevesi, fabrika çalışanları tarafından sezgisel ve anında programlanabilen robotların tanıtımında geçerli bir çözümdür [9].

Mineo ve diğerleri yapmış oldukları Tahribatsız testler için robotik yol planlaması-Özel bir MATLAB araç yaklaşımı isimli çalışmalarına göre kompozit roket parçalarının tahribatsız muayene testi için test hızının artırılması gereksinimi çoğu üreticide yaygındır. Bu endüstride karmaşık eğrisel yüzeylerin yaygın olması bu testlerde 6 eksenli robotların kullanılması için teşvik sağlamaktadır. Bu çalışmada NDT otomasyon sistemli KUKA robot manüpülatörünün gelişimi için çalışma üstlenilmesi tavsiye edilmiş. Yeni yazılım çözümü mühendislik ürünlerinde karşılaşılan kompleks eğrisel yüzeylerin muayenesinin yerine getirilmesinde esnek yörünge planlamasının uygulanmasına olanak verir. Teknikler ve sorunlar arasındaki ilişki büyük kompleks yüzeylerin muayenesi için geleneksel manuel test teknikleri ve otomasyon sistemleri ile gözlemlendi. Bu yaklaşım doğrudan hedeflenen NDT otomasyonu, yetenekli kompleks yol planlaması, engel kaçınması ve robotlar ve dış NDT sistemler ile ilgili dış senkronizasyon için MATLAB araçlarının gelişmesinden doğrudan etkilenmiş. Bu çalışma, NDT ölçümleri uygulanırken konvansiyonel kapalı hat programlama yaklaşımları üzerinde bu yazılımın avantajlarına ışık tutmaktadır. Büyük ve eğrisel kompozit kanat bileşenlerinde deneysel yörünge yolu üretilmesi sunuldu. KUKA KR16 L6-2 robot kullanılarak $0.5m^2$ ve $1.6m^2$ eğrisel yüzeyler test edilirken araçların gerçek yol doğruluğu değerlendirilmesi için karşılaştırmalı metroloji deneyleri üstlenildi. Sonuçlar gösterdiği TCP'nin komutası ve geribesleme konumu arasındaki mesafenin sapması 2.7 mm içinde kaldı. Prob ve taranan yüzeyler arasındaki uzaklaşma varyansı,

ticari yol planlama yazılımı üzerinden elde edilen varyanstan daha küçüktür. Takım yolları Analitik yüzeyi andırması için ihtiyaç olmaksızın test edilen bileşenlerin CAD

modellerinden alınan üçgen şeklinde ağ üzerinden doğrudan türetilir. Robotik donanım tam dış denetim uygulayarak, yol boyunca tüm noktalarda konumları ile NDT data koleksiyonunun senkronizasyonuna imkan verir ve yazarların yaklaşımı NDT (*Non-destructive testing*) test problemlerinde spesifik olan gelecekteki ek fonksiyonların gelişimine izin verir. Geçerli NDT uygulaması için, CAD tasarımdan sapmalar ve hem kaba hem ince iki denetim için gereksinimler, NDT verilerindeki ölçümlere bağlıdır [10] .

Staretu 8 eksenli endüstriyel robotlar için seri kinematik zincirinin yapısal sentezi, çalışma alanları ve doğrudan kinematiği isimli çalışmada faydalı bir temel için, yeni gereksiz yapıların tanıtımı için de dahil olmak üzere, zaten uygulanan ötesinde 8 eksenli kinematik zincir yapılarının sistemizasyonunu ele almıştır. İlgili çalışma alanının temsili, tasarımcıya verilen uygulama için fonksiyonel bir yapı seçiminde yardımcı olabilir. Gereksiz yapıların kullanımını örneklendiren, yani 8 eksenli yapı, mümkün 8 eksenli robot CLOOS'un sunulmasıdır. Bu versiyon için çalışma alanı temsil edilir, ilk sırayla, arka arkaya her bağlantı için, kinematik zincir tabanından bağlantı ile başlayarak temsil edilir ve daha sonra çalışma alanı, her bağlantı için elde edilen örtüşen çalışma alanları ile tamamen temsil edilir. Çalışmada kinematik zincir için homojen operatörler metodu kullanılarak kinematik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu metod homojen translasyon veya mobil referans sistemi ile ucunda karakteristik noktaya tabanından kinematik zincirini kapsayan yönelim operatörleri kullanımına dayanmaktadır. Bir bağlantıdan diğerine geçiş homojen operatör matrisin transformatör ile, rotasyonu ile, transformatör-transformatörü ile, rotasyon-rotasyonu ile veya kombini ile ilişkilidir. Homojen operatörlerin yerini tutan matrislerde lineer ve açısal ölçülerle esaslandırılır, sabit referans sistemde robotun karakteristik koordinat noktalarının matrisi robotun esasıyla ilişkili olduğu sonucuna ulaşıldı. Böylece doğrudan kinematiği niteliksel olarak çözüldü [11].

Küçük 2004 yılında hazırlamış olduğu Endüstriyel robotların modellenmesi ve çevrimdışı programlanması isimli tez çalışması Huang ve Milenkovic tarafından sınıflandırılan temel on altı adet endüstriyel robot manipülatörünün kinematik modellenmesi, çalışma uzayının en iyilenmesi, iki farklı bilek düzleşimli ters kinematiği, dinamiği ve benzetiminden oluşmaktadır. Kartezyen ve Kartonyum olmak üzere olmak üzere iki farklı uzayda toplam

altı değişik robot kinematik modelleme yöntemi karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler arasındaki farklılıkları incelemek amacıyla her bir yöntem PUMA-560 robotuna uygulanmıştır. Bu

temel on altı adet endüstriyel robot manipülatörünün çalışma uzayları, üç farklı yerel ve evrensel başarı göstergesi referans alınarak eniyilenmiştir. Eniyileme sonucunda her bir başarı göstergesine göre robotların geniş çaplı hareket yapabilme kabiliyeti ve kol uzunlukları tablolar şeklinde verilmiştir. Temel on altı adet endüstriyel robotun bölgesel yapısına eklenen on altısı Euler, diğer on altısı eklem kaçıklıklı bilekten oluşan 32 adet endüstriyel robotun ters kinematiği, analitik ve sayısal olarak çözülmüştür. Temel on altı adet robot manipülatörünün dinamik modeli Lagrange-Euler yöntemi kullanılarak çıkarılmıştır [12].

Durmuş'un 2008 yılında yayınlamış olduğu Altı eklemlı robot kolunun genetik algoritma ve eleman ağ uyarlamalı genelleştirilmiş öngörölü kontrolü isimli tez çalışmasında Model Tabanlı Öngörölü Kontrol sınıfına ait olan Genelleştirilmiş Öngörölü Kontrol, Basit Genetik Algoritma uyarlamalı Genelleştirilmiş Öngörölü Kontrol, Newton-Raphson uyarlamalı Yapay Sinir Ağı Genelleştirilmiş Öngörölü Kontrol ve Yinelenen Eleman Yapay Sinir Ağ uyarlamalı Genelleştirilmiş Öngörölü Kontrol algoritmaları altı eklemlı endüstriyel bir robot manipülatöre eklem esaslı yörünge kontrolü için uygulanmıştır. Robotun manipülatörün dinamik modellenmesinde Lagrange-Euler yöntemi kullanılmıştır. Dinamik modellemeye sürtünme etkileri, yük taşıma ve taşınan yükün taşıma esnasında düşmesi durumları da ilave edilmiştir. Tasarlanan kontrol algoritmalarının performansı eklemlere ait tork, açısal yörünge, açısal hız, açısal hız hataları grafikleri ile eklemlere ait açısal konum hataları, açısal hız hatalarının kareleri ve uç nokta konum hataları üzerinden hem grafiksel hem de nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır [13].

Rocha ve diğerlerinin yapmış olduğu "Robot kol mekanizmalarının kinematik modellemesinde kullanılan Denavit-Hartenberg ve vida temelli yöntemler arasında karşılaştırma" isimli çalışmada Denavit-Hartenberg yöntemiyle vida esaslı kinematik analiz yöntemleri karşılaştırılarak robotik bilimine katkı sağlanması hedeflendi. Manipülatör analizinde, kinematik çoğu robot mekanizmasının hareketi için tasarlanmıştır, çünkü hareketi anlamak için temel bir kavramdır. Kinematik modeli manipülatörün kinematik zincirini oluşturan uzuvlarla eklemler arasındaki ilişkiyi açıklar. Bunu yapmak için Denavit-Hartenberg yöntemi ve varyasyonları pek çok yazar tarafından ve yayınevi

tarafından çeşitli kongrelerde sunuldu. Bu yöntem kinematik zincirin en az parametre ile gösterilenidir ancak bazı sınırlamalar vardır. Ardışık vida deplasman yöntemi, bu klasik

yaklaşımına bir alternatiftir. Bu yöntem minimum parametre kullanmamasına rağmen Denavit-Hartenberg yöntemine göre bazı avantajları vardır. Her iki yöntemde makalede tartışılmıştır. Diferansiyel kinematikte tartışılmıştır. Her iki yöntemde de kinematik modelleme örnekleri karşılaştırmanın sağlanması açısından sunulmuştur [14].

Siciliano, Tricept robotların ters kinematiğini, uygulanabilirliği analizini kapalı döngü ileri kinematik algoritmasını incelediği çalışmada üç serbestlik dereceli paralel yapıya sahip triseps robotun kinematiği hakkında çalışmayı hedeflemiştir. Robotun çalışma alanı karakteristiktir ve ters kinematik denklemler küresel koordinatlar kullanılarak elde edilmiştir. Ters kinematik ve statik analitik ve geometrik jakobyenin her iki yönünden türetilmiştir ve kuvvet ve hız elipsoidleri konsepti kullanılarak çeşitli çalışma yönleri boyunca uygulanabilirliği analizi geliştirilmiştir. Jakobyen tabanlı kapalı çevrim kinematik algoritması verilen bir yörünge boyunca doğrudan kinematik problemi çözmek için sunulmuştur. Simülasyon sonuçları triseps ailesinden bir endüstriyel robot için gösterilmiştir [15].

Ünver, Artık robot kollarının ters kinematik problemlerinin çözümü ve gerçekleşmesini incelediği çalışmada, iteratif yaklaşımla artık robot kollarının ters kinematik probleminin çözümünde kullanılan yöntemler incelenmiş ve bu yöntemlerle elde edilen sonuçlar Mitsubishi PA 10 robot koluna uygulanmıştır. Adaptif çarpanlı sönümlendirilmiş en küçük kareler yöntemi araştırılan metodlar arasında hata başarımı en iyi olan metod olarak tespit edilmiştir. Mitsubishi PA 10 robot kolunun mekanik sınırları içerisinde kalarak veya konumu belli bir engelden sakınarak farklı eklem konfigürasyonları ile belirlenen yörüngeyi takip etmesi, robotların hareket kabiliyetini geliştirmede kullanılan artık serbestlik dereceleri sayesinde sağlanmıştır. Engellerden sakınma uygulaması literatürde genellikle düzlemsel robotlar üzerinde gerçekleşmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar sayesinde, üç boyutlu uzayda hareket eden robotlarda da gerçekleşmesi oldukça anlamlıdır [16].

Literatüre geçmiş olan çalışmalar gösteriyor ki, günümüz teknolojisi bir tasarımcının hedef işi farklı otomasyon sistemleriyle ve robotik bilimiyle yerine getirilebilecek düzeydedir.

Yapılan araştırmalar özellikle mekanik sistemin kinematik olarak incelenmesiyle yakından ilgilenmişlerdir. Çalışmalarda kullanılan temel kinematik analiz yöntemlerinden

faydalanarak tezin kinematik denklemleri ortaya koyulmuştur. Dinamik analizler için de incelenen çalışmalar tez çalışmasına ışık tutmuştur.



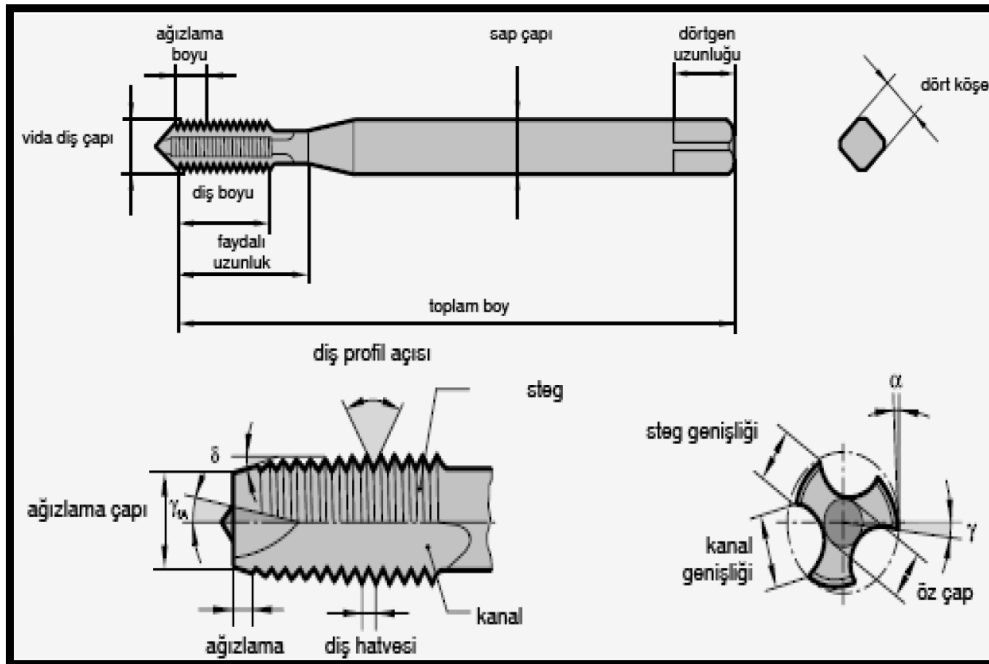


3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Kılavuz ile Vida Açma Yöntemi

Kılavuzların, çevresinde arzu edilen formda dişler bulunur ve bir veya birden fazla kesici elemandan meydana gelirler. Şekilleri silindirik veya konik kesici takım olarak farklılık gösterir [17]. Türk Standartları Enstitüsü'ne göre, kılavuz (Şekil 3.1); metal, plastik vb. malzemelere matkap uçları ile açılan veya tornalama sureti ile belirli bir ölçüye getirilen deliklere vida açmak için kullanılan, üzerinde vida dişleri oluşturulmuş kesici takımlar olarak tanımlanmaktadır [17, 18].

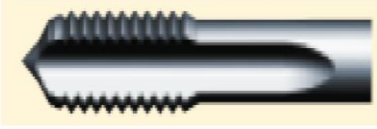
Esasında delik işlemlerin bir operasyonu olan kılavuz ile vida açma, takımın dönme ile ilerleme hareketlerinin birleşmesi ile açılır. Kılavuz açma işlemi farklı metodlarla yapılabilir, bunlardan bazıları şöyledir: delme tezgahlarında, işleme merkezlerinde, dönel kafalarla donatılmış torna merkezlerinde konvensiyonel tornalarda ve elle. Takım olarak kılavuzlar silindirik ve konik ve ayrıca yekpare ve takmalı olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Yekpare kılavuzlar saplı veya sapsız, takmalılar ise takmalı veya açılır kapanır şekilde olabilir [19].



Şekil 3.1. Kılavuz ve elemanları (δ : Dayama Açısı, γ_{fA} : Ağızlama Konik Açısı, α : Boşluk Açısı, γ : Talaş Açısı, steg: kesici ağız) [17]

Yekpare saplı kılavuz, vidalı kısım ve saptan oluşan bir takımdır. Vidalı kısım, konik şeklinde olan ağızlama ve boyuta getirme kısımlarından meydana gelir. Ağızlama kısmı kaba şeklinde kaba vida açar, boyuta getirme kısmı çok ince bir talaş kaldırarak vidayı tam boyuta getirir. Kesme ağızlarını oluşturmak için, kılavuzun vidalı kısmında kanallar açılır. Şöyle ki, kılavuzun kesiti çekirdek ve etrafında kanallarla ayrılmış vida bölgesinden meydana gelir. Boyuta getirme kısmından vida bölgesi çekirdek merkezi ile eş eksenlidir. Ağızlama kısmında ise serbest açısı oluşturacak tarzda boşaltılmış şeklinde yapılır [19].

Kılavuzlama yöntemi esasına göre iki tür kılavuz vardır, bunlar el kılavuzları ve makine kılavuzlarıdır. Kullanıldıkları yere göre değişiklik gösterirler. El kılavuzları farklı ve eşit ölçülü kılavuzlar olarak kendi içinde iki gruba ayrılırlar. Farklı vida ölçülü el kılavuzlarının hem ağızla hem de vida yan çap ölçüleri birbirinden farklıdır. Talaş yükü ön, orta ve son kılavuzlarda belirli oranlarla paylaştırılmıştır. Eşit vida ölçülü el kılavuzların ise sadece ağızlama boyları farklıdır [17, 20]. Makine kılavuzları ise tek parçalıdır bununla birlikte ağız bileme şekilleri ve kanal yapıları vida açma işlemi esnasında oluşan talaşı dışarı atmaya yönelik üretilirler. Bu tip kılavuzlar kendi içinde bileme şekline göre (Şekil 3.2) gruplandırılmaktadır [17].

	
a) Düz kanallı	b) Eğik ağız bilemeli düz kanallı
	
c) Kanallı 15° helis açılı	d) Kanallı 40° helis açılı

Şekil 3.2. Makine kılavuzu bileme formları [17]

3.2. Robotik ve Endüstriyel Robot Kavramı

Endüstriyel otomasyonun tarihçesi popüler metodlardaki hızlı değişimin periyotlarıyla karakterize edilir. Otomasyon tekniklerindeki değişimin periyotları dünya ekonomisine

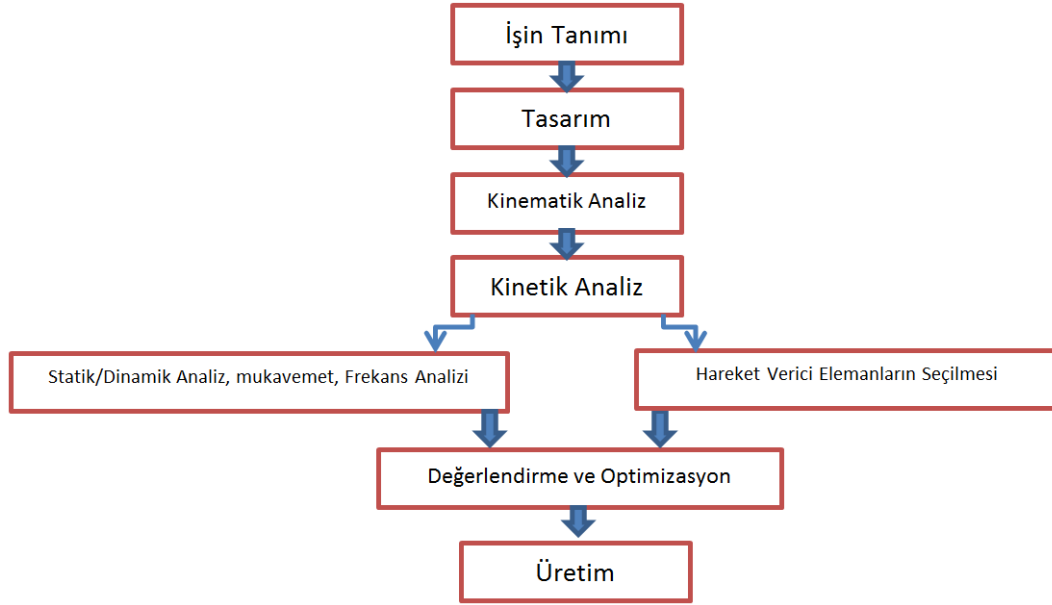
bağlı görülmektedir. 1960’larda eşsiz bir cihaz olarak tanımlanan endüstriyel robotun kullanılması, bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli üretim sistemleri ile birlikte, imalat proseslerinin otomasyonunda son trend olarak karakterize edilmiştir. Bu teknolojiler endüstriyel otomasyonu kapsamı halen bilinmeyen başka bir geçiş yoluyla endüstriyel otomasyonu yönetmektedir [21].

Kuzey Amerika’da 1980’lerin başında robotik ekipmanlar oldukça benimsenmiştir, 1980’lerin sonuna doğru kısa bir gerileme yaşandı. Bu zamandan beri, sektör bütün sektörler gibi ekonomik dalgalanmalar yaşamasına rağmen büyümüştür. Endüstriyel robotların kullanımının artmasının en büyük nedeni fiyatlarındaki düşüş olmuştur. Robotlar sadece daha ucuz hale gelmedi aynı zamanda daha verimli (daha hızlı, daha doğru, daha esnek) hale gelmişlerdir. Robotlar işlerinde daha verimli hale geldikçe ve insan emeği daha pahalı olmaya devam ettikçe daha fazla endüstriyel kuruluşlar robotik otomasyon için aday haline gelir. Endüstriyel robot pazarının tek ve en önemli trendi itici büyümedir. Ekonomi bir yana diğer bir trend robotlar yapabileceklerinin daha üzerinde kapasiteye sahip oldukça ve daha fazla görev aldıkça bu insan işçilerin performansı için tehlikeli veya imkansız hale gelebilir [22].

Gelişmeler sonucu endüstriyel robotların performansı daha komplike hale gelmiş ama bu durumda hala 2000 yılında Amerika’da robot kurulumunun yaklaşık %78’i kaynak ve malzeme yükleme robotlarıydı. Kurulumların %10’u, daha zorlu alan olan endüstriyel robotlar tarafından yapılan montaj üzerine olmuştur [22].

ISO 8373’te belirtilen endüstriyel robot tanımı şu şekildedir: Üç veya daha fazla programlanabilir eksenli olan, otomatik kontrollü, programlanabilir, çok amaçlı, bir yerde sabit duran veya tekerlekleri olan endüstriyel uygulamalarda kullanılan manipülatördür [23, 24].

Endüstride robot kullanımı yaygındır. İşçilik maliyetinin azaltılması, tehlikeli ve riskli yerlerde çalışanların yerine işleri robotların yapması, üretim hattında daha esnek üretim sistemi sağlamak, daha tutarlı kalite kontrol imkanlarının sağlanması, çıktı miktarını artırmak, vasıflı işçi ihtiyacını azaltmak, yüksek kar elde edilmesi gibi sebepler endüstride robotlara olan talebi artırmıştır [24].



Şekil 3.3. Endüstriyel robot tasarım basamakları [25]

Endüstriyel robotlar için sıralanan olumlu nedenlerin yanı sıra bazı sakıncalı durumlarda vardır; robotlar düşünemezler, yalnızca kendilerine öğretilen cisimleri görebilirler, programlanmadan çalışamazlar, kendisine öğretilenleri yapabildiğinden hareketleri kısıtlıdır, yatırım maliyeti yüksektir [24].

Şekil 3.3'te bir robot kolun hangi aşamalardan geçerek imalata gireceğini ifade eden bir şema verilmiştir. Buna göre süreç makine için iş tanımla başlar ve makinanın imalatıyla biter [25].

3.2.1. Serbestlik derecelerine göre robotlar

Endüstride kullanılan robotlar genellikle 6 serbestlik derecesine sahip robotlardır. İlk üç uzvun özelliği robotların serbestlik derecesine göre hangi sınıfta olduğunu belirleyen en önemli etkidir. İlk üç uzuvda prizmatik eklem kullanılmışsa bu robot kartezyen robot (Prismatic Prismatic Prismatic-PPP) olarak tanımlanır. Silindirik robotlarda ise ilk uzuv dönel, ikinci ve üçüncü uzuvlar prizmatiktir (Revolute Prismatic Prismatic-RPP). SCARA tipi robotlarda ise ilk iki uzuv dönel ve üçüncü uzuv prizmatiktir (Revolute Revolute Prismatic-RRP) ve bütün eklemler birbirine paraleldir. İlk iki uzuv döner ve üçüncü uzuv prizmatik ekleme sahipse bu robota küresel robot denir. İlk üç uzuv dönel ekleme sahipse bu tip robotlarda antropomorfik robotlar olarak isimlendirilir [26].

Kartezyen robotlar

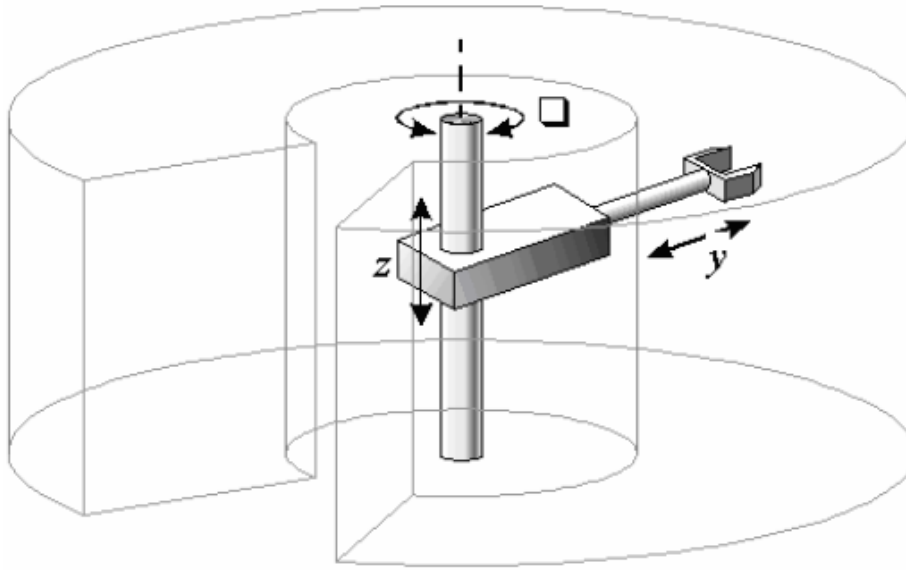


Şekil 3.4. XYZ Kartezyen Robot [27]

İmalat aşamasında ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan kartezyen robotlar üç doğrusal eksenenden oluşmaktadır. Kullanım alanları genellikle paketleme, lojistik, freze, lazer, plazma, oksijen aetilen kesme makinaları, su jeti ile kesme, elektro erezyon gibi cihazlardır [27].

Kartezyen robotlar (Şekil 3.4) özellikle X,Y,Z eksenlerinde doğrusal hareket etme yeteneğine sahiptirler. Hareketlerinin planlaması basit bir yapıya sahip olmalarından dolayı oldukça kolaydır. Bu tür robotlarda, konum hesaplamaları, robot uç işlevcisinin bulunduğu konum yani ileri kinematik ve ters kinematik işlemleri sonucu elde edilen veriler, mafsalların o anda olduğu yerde bulunduğundan dolayı çok kolaydır [24].

Silindirik robotlar

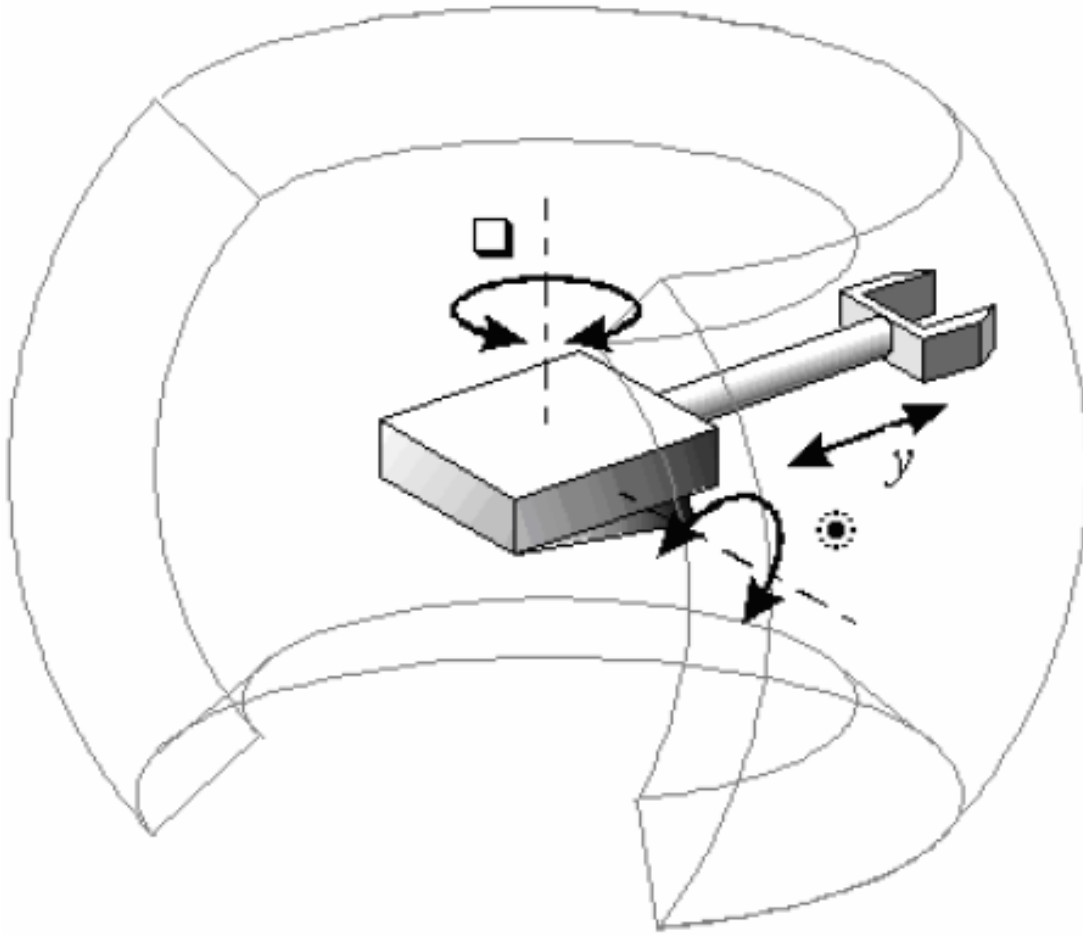


Şekil 3.5. Silindirik robot kolun çalışma alanı [24]

Silindirik robotların temel mantığı kendi etrafında dönebilen bir mafsal üzerinde yapılan X,Y,Z koordinat düzlemlerinde doğrusal hareket elde edilebilmesine dayanır. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi esnek olmayan silindirik bir koordinat sistemine sahiptirler. Hareket serbestisi kartezyen robota göre daha fazladır. Çalışma alanı içerisindeki noktalara ulaşımı çok iyidir. Programlanması kolaydır, bunun temel nedeni hareket kabiliyetinin az olmasıdır [24].

Silindirik robotların geometrisi kartezyen robota göre ilk prizmatik mafsalın dönel mafsala dönüştürülmesiyle ayrışıyor. Silindirik yapısı iyi bir mekanik sağlamlık sunuyor. Bilek Konumlama hassasiyeti yatay hareket arttıkça azalır. Çalışma alanı içi boş bir silindirin iç kısmıdır. Silindirik robotlar büyük oranda büyük boyutlarda nesnelerin taşınması için kullanılır. Bu nedenle hidrolik motorlar elektrik motorlarına tercih edilir [28].

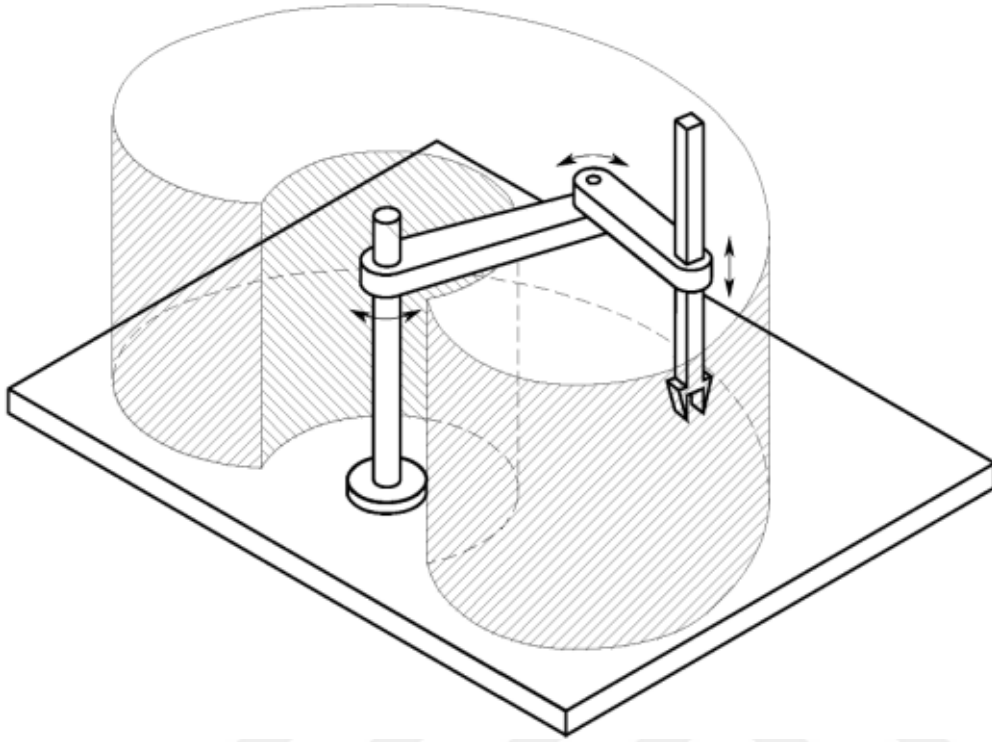
Küresel robotlar



Şekil 3.6. Küresel robot kolun çalışma alanı [24]

Küresel robotlar (Şekil 3.6) bel, omuz ve dirsek mafsallarından oluşan bir yapıya sahiptirler. Çalışma prensibi bel ve omuz mafsallarının kendi etrafında dönmesi sırasında dirsek mafsalının kola uzama ve kısalma hareketi yaptırması prensibine dayanır. Kol yapılarından dolayı eklemlili robot kollarına benzemektedir. Kartezyen ve silindirik robot kollara göre daha karmaşık bir kinematik yapıya sahiptir. Hidrolik tahrik sistemine sahip olan küresel robot kollar eğme, bükme işlerinde, kameralı izleme işlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca sarkaç robot olarakta küçük bir moment ile hareketlerini devam ettiren bu robotlar kaynak ve zamklama işlemlerinde kullanılırlar [24].

Scara robotlar



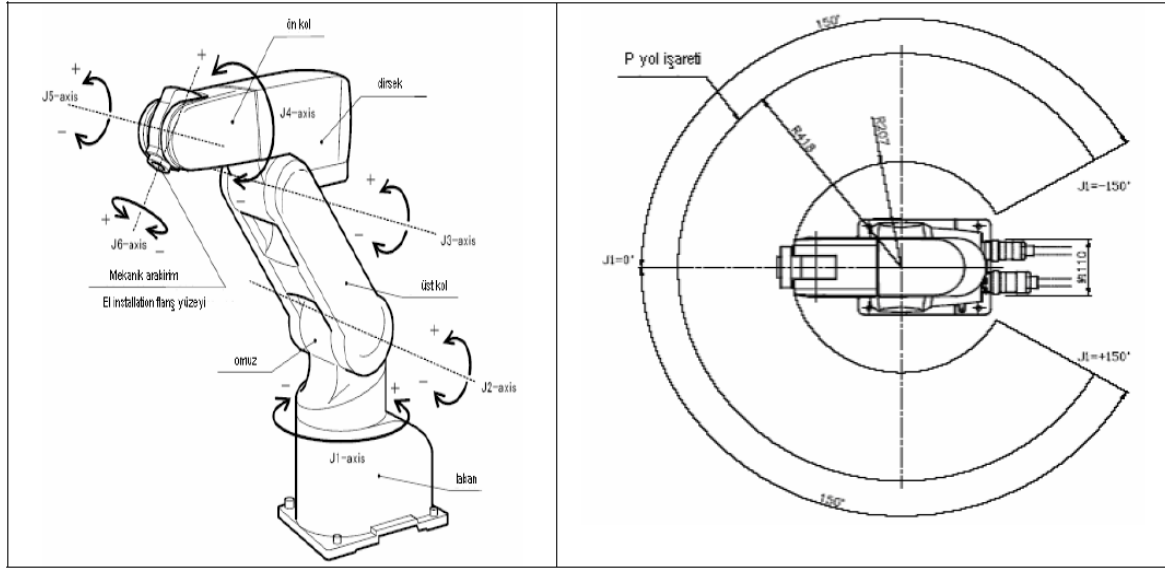
Şekil 3.7. SCARA robot kolu ve çalışma uzayı [28]

Özel bir geometri olan SCARA robotu iki dönel mafsallın ve hareketin eksenlerine paralel olan bir prizmatik mafsallın ek yerleştirilmesiyle gerçekleşir. SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) seçici uyum derleme robot kol ifadesinin kısaltmasıdır ve yatay yüklere yüksek dikey yüklere sertlik ve uyum sunan bir yapının mekanik özelliklerini karakterize etmektedir. Bu nedenle SCARA dikey montaj işlemleri için uygundur. Hareketlilik derecesi ve serbestlik derecesi arasındaki uygunluk kartezyen koordinatlarda açıklanan bir görevin dikey bileşeni için korunur. Tipik bir SCARA'nın çalışma uzayı Şekil 3.7'de gösterilmiştir [28].

SCARA'lar iki eklem yerinde elektrik motoru ve aşağı yukarı hareket edebilen pnömatik koldan oluşmuştur. Elektrik motorlarının görevi eksenlerin kendi etrafında dönmesini sağlamaktır. Pnömatik tahrikli olan tutucu ağız Z ekseninde hareket etme kabiliyetine sahiptir ve dolayısıyla robot kol esnek hareket imkanı kazanmıştır. Hız ve konum performansı çok iyidir. Bu avantajları sayesinde elektronik sanayinde, elektronik kartlara malzemelerin montajını gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. Maliyetinin ucuz olması ve

programlanabilirliğinin kolay olması tutma ve taşıma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmasına sebebiyet vermektedir [24].

Antropomorfik robotlar



Şekil 3.8. Antropomorfik robot kolun kol ve eksen hareketleri ile X-X arası hareket alanı [24]

Antropomorfik robotlar birinci dönel mafsala birbiriyle paralel olan iki dönel mafsala dikey olduğu üç dönel mafsaldan oluşur. İnsan koluna olan benzerliği nedeniyle ikinci mafsala omuz eklemi olarak ve üçüncü mafsalda kolu ve ön kolu bağladığı için dirsek olarak adlandırılır. Antropomorfik robotlar bütün eklemleri dönel olduğu için en hünarli manipölörlerden bir tanesidir. Öte yandan, hareketlilik derecesi ve serbestlik derecesi arasındaki uygunluk kaybolur ve bilek konumlandırma doğruluğu çalışma alanı içerisinde değişir. Çalışma alanı yaklaşık olarak kürenin bir kısmıdır ve hacmi manipölör kapasitesinden büyüktür. Eklemler tipik olarak elektrik motorları tarafından tahrik edilirler. Bu tip robotların endüstriyel uygulama alanları geniştir [28].

Antropomorfik robotlar çalışma alanı içerisinde tanımlanan bir hedefe en kısa zamanda ve en kısa yoldan ulaşma şansına sahiptirler. Bu tip robotlar mafsala hareketleri ve X,Y,Z koordinatları doğrultusunda hareket ederek hedefe ulaşım imkanı tanımaktadır. Karmaşık yapısı diğer robot türlerine göre daha zor programlanabiliyor olması sonucunu ortaya çıkarmaktadır [24].

3.3. Manipülatörün Kontrolü ve Mekaniği

3.3.1. Konum ve yönelim kavramlarının tanımlanması

Robotiğin çalışma alanında objelerin konumunu 3 boyutlu uzayda ele alırız. Bu objeler manipülatörün bağlantıları, parçaları, takımları ve manipülatörün çevresindeki diğer objelerdir. Bu basit ama önemli aşamada objeler iki temel öznelikle tanımlanır: Konum ve yönelim. Doğal olarak çalışmada bu özelliklerin ve manipülasyonun matematiksel olarak ifade edilmesi üzerinde özellikle durulur [22].

Kütlenin uzaydaki konumunu ve yönelimini tanımlamak için sırasıyla, her zaman koordinat sistemiyle veya eksen takımıyla ilişkilendirilir. Sonra bu eksen takımının bir referans koordinat sistemine göre konumunu ve yönelimini tanımlamaya devam edilir [22].

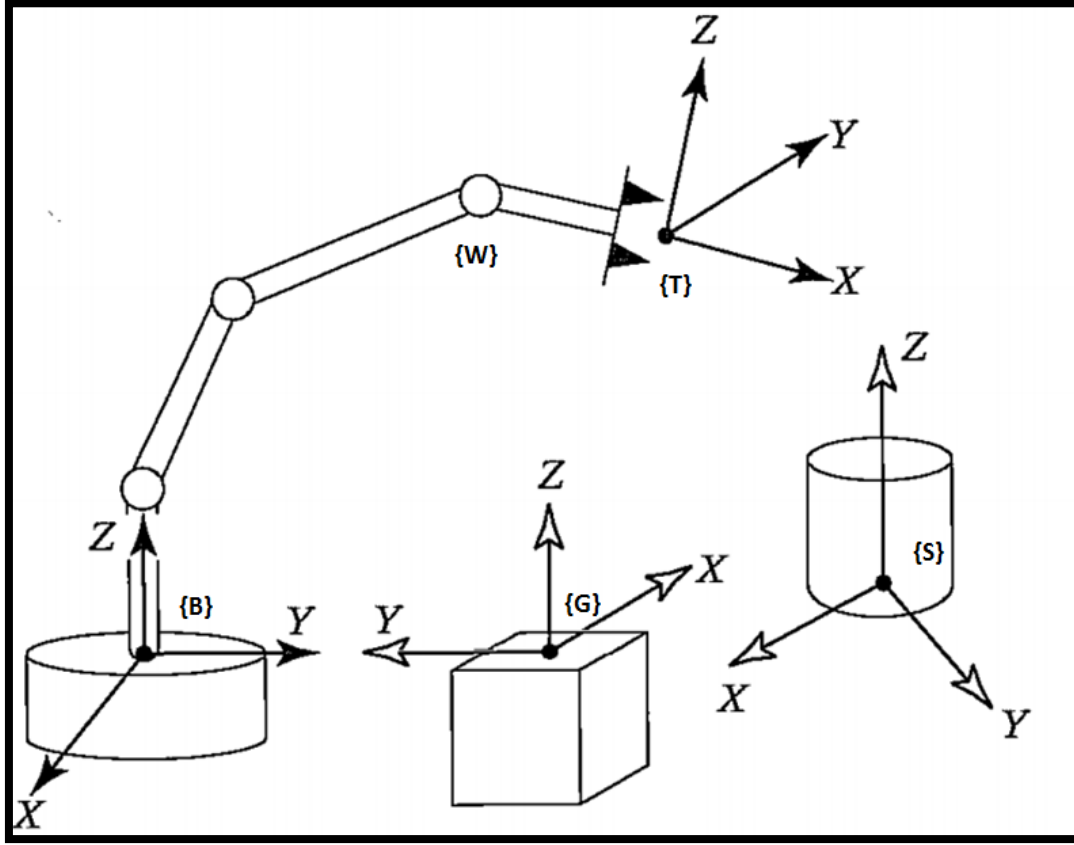
Matematiksel olarak nesnelerin konumu bir konum vektörüyle, yönelimi ise bir yönelim(rotasyon) matrisiyle belirlenir. Bir nesnenin merkezine bir koordinat sistemi yerleştirilerek üç boyutlu uzayda yönelimi ve konumu tanımlanır. Şekil 3.9’da robotun eklemlerine ve çalışma uzayındaki nesnelere koordinat sistemlerinin nasıl yerleştirileceği gösterilmiştir [3].

Hiçbir eksen kütlenin konumu ve yönelimi açık olan referans sistemi içinde hizmet edemez, bu yüzden kütlenin bu nitelikleri bir eksen den diğerine dönüştürölür veya tanımı değıştirilir. Manipülatörün mekaniği ve dinamiği için bu temeller esas alınmıştır [22].

3.3.2. Robotların kinematik analizi

Her bir robot ekleminin konumu ve yönelimi bir öncekine veya bir sonrakine göre ifade edilir. Arka arkaya oluşturulan bu ilişkiye açık kinematik zincir denir. Robotun konum ve yönelim bilgisini içeren 4x4 matrisler (transformation matrix) kinematik zinciri oluştururlar. Her bir eklem için bir homojen dönüşüm matrisi oluşturulur. Robotun serbestlik derecesi ise oluşturulacak olan bu homojen dönüşüm matrislerinin sayısını doğrudan belirler. Üç boyutlu uzayda herhangi bir noktaya herhangi bir yönelimle ulaşmak için 6 serbestlik derecesi yeterlidir. Eğer serbestlik derecesi 6’dan fazla ise artıklık durumu oluşur. Artıklık, bir eklem taradığı alanın diğer eklem taradığı alanla

çakışması durumudur. Bu olay özel koşullar için tasarlanmış özel amaçlı robotlarda görülür [3] .



Şekil 3.9. Robot kolun çevreyle kendisi arasındaki koordinat sistemi [22]

Ana Eksen {B} (Base Frame): Robotun referans koordinat sistemidir. Sabit olduğu kabul edilir.

İstasyon Eksen {S} (Station Frame): Robotun bütün hareketleri bu ekseninde gerçekleşir. İstasyon eksenini ana eksene göre ${}^B_S T$ şeklinde tanımlanır.

Bilek Eksen {W} (Wrist Frame): Bilek eksenini robotun uç işlevcisinden önceki son bağlantısına yerleştirilmiştir. Bu eksen ana eksene göre ${}^B_W T$ şeklinde tanımlanır.

Araç Eksen {T} (Tool Frame): Bu eksene robotun herhangi bir işlemi gerçekleştirmesi için eleman yerleştirilir. Robotun uç işlevcisidir. Bilek eksenine göre ${}^W_T T$ şeklinde tanımlanır.

Hedef Eksen {G} (Goal Frame): Robotun işlem yapacağı nesnenin üzerinde var olduğu kabul edilen eksendir. İstasyon eksenine göre ${}^S_G T$ şeklinde tanımlanır.

Manipülatörün ileri kinematığı

Kinematik harekete neden olan güçler olmaksızın hareket davranışı olan hareketin bilimidir. Kinematik biliminin içinde; konum, hız, ivme ve konum değişkeninin yüksek mertebeden türevleri (zamana bağlı olarak veya herhangi diğer değişkenler) vardır. Bundan dolayı manipülatörlerin kinematığı çalışması hareketin bütün geometrik ve zaman esaslı özelliklerine ışık tutuyor [22].

Manipülatörler komşu uzuvların bağıl hareketine izin veren bağlantılarla birbiriyle ilişkili rijit uzuvlardan meydana gelirler. Bu bağlantılar bazen komşu eklemlerin bağıl konumunu ölçen sensörlerle donatılır. Bu durumda dönel bağlantılar (rotational joint) daki bu değişimler bağlantı açısı olarak anılır. Bazı manipülatörler prizmatik (kayar) mafsal içerir, burada eklemler arası bağıl değişim translasyondur bazen eklem ofseti olarak anılır [22].

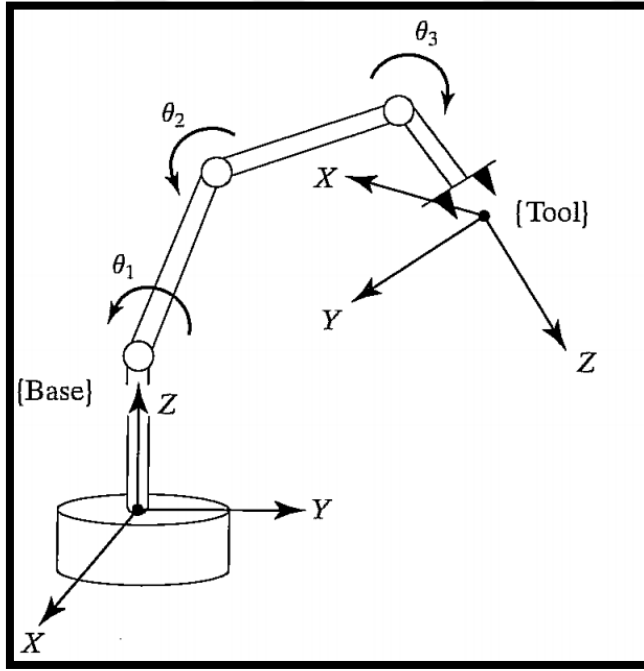
Bir robotun araç ekseni ile ana ekseni arasında prizmatik veya dönel eklemler vardır. İki unsur arasındaki ilişki homojen dönüşüm matrisiyle açıklanır. Eklem dönüşüm matrislerinin art arda çarpılmasıyla, ana çerçeveye araç çerçevesi arasındaki ilişki tanımlanır. Bu ilişki araç çerçevesinin yönelimini ve konumunu ana çerçeveye göre verir. Yani ileri kinematik denklemler eklem değişkenlerinin (eklem açıları, eklem boyutları veya uzuv uzama mesafesi gibi) verilmesiyle uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini ana çerçeveye göre hesaplar [3].

Manipülatör prosesinin serbestlik derecesi mekanizmanın bütün parçalarının yerleştirilmesi için belirtilmesi gereken bağımsız konum değişkenlerinin sayısıdır. Bu mekanizmalar için kullanılan genel bir terimdir. Örnek olarak 4 çubuk mekanizmasının sadece bir serbestlik derecesi vardır (3 hareket eden elemanı olmasına rağmen). Bu durumda tipik endüstriyel robotlar, manipülatörün kinematik zincirin genellikle açık olması nedeniyle ve her bağlantı konumunun genellikle tekil değişken ile tanımlanması nedeniyle eklemlerin sayısı serbestlik derecesinin sayısı ile eşittir [22].

Manipülatörün kinematik zincirinin açık ve serbest olan kısmı işi yapan kısımdır ve uç işlevci olarak anılır. Robotun amaçlanan uygulamaya bağlı olarak, uç işlevcisi gripper, kaynak ucu, elektromıknatıs veya başka cihazlar olarak seçilebilir. Manipülatörün konumunu genellikle uç işlevcinin bağlı olduğu takım ekseninin tanımı ile manipülatörün hareketsiz temeliyle birleşik olan temel eksenle karşılaştırılarak tanımlarız (Şekil 3.10) [22].

Mekanik manipölasyon çalışmasının oldukça basit olan bu problemi ileri kinematik olarak anılır. Manipölatorün uç işlevcinin konumunu ve yönelimini hesaplamak statik geometrik bir sorundur. Özellikle verilen bir takım eklem açıları, ileri kinematik problemi ile temel eksene bağıl olarak uç işlevcinin ekseninin konumunu ve yönelimini hesaplar [22].

Eğer her eklem bir koordinat sistemi yerleştirilirse, komşu iki eklem arasındaki ilişki bir ${}^{i-1}_iT$ dönüşüm matrisiyle ifade edilir. Son eklemle ait dönüşüm matrisi uç işlevciyle son eklem arasındaki ilişkiyi tanımlamaktayken, ilk eklemle ait dönüşüm matrisi, ilk eklemle ara eksen arasında bir ilişki tanımlamaktadır. Ana çerçeve ile araç eksen arasındaki ilişkinin tanımlanması arka arkaya sıralanan bu dönüşüm matrisleri yardımıyla gerçekleşir. İşte bu ilişki ileri kinematiği oluşturur ve ifade edilişi aşağıdaki denklemde gösterilmiştir [3].



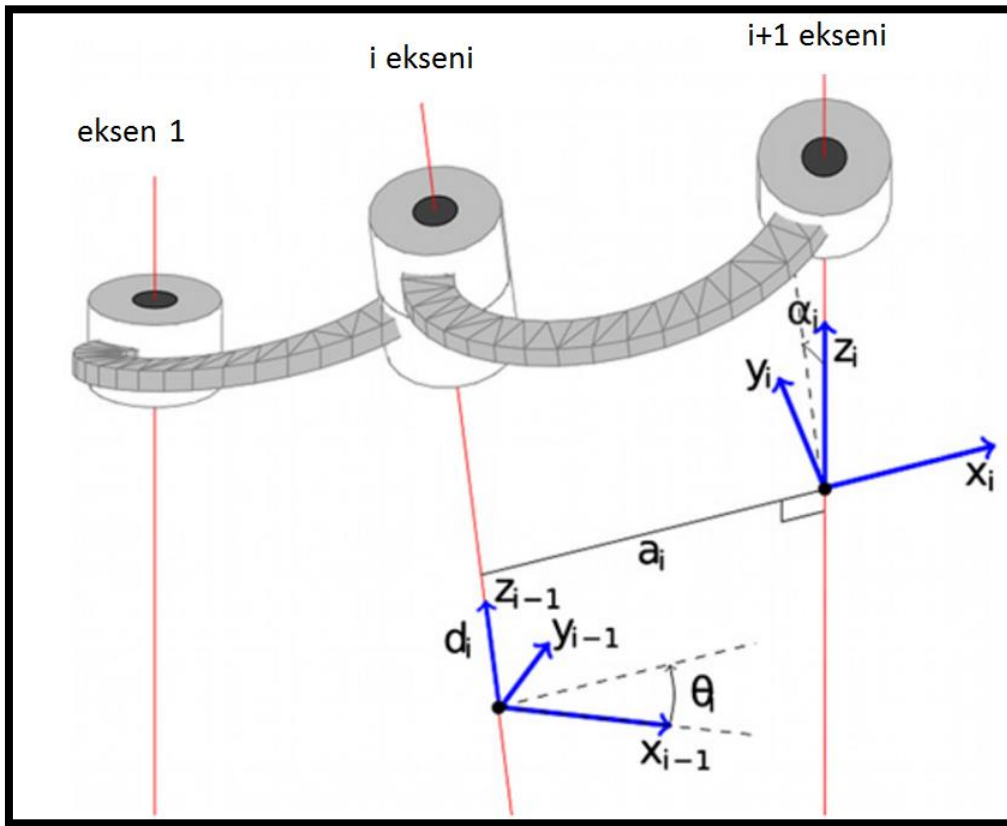
Şekil 3.10. Kinematik denklemler ortak değişkenlerin bir fonksiyonu olarak temel eksenin durumu [22]

$${}^0_N T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \dots {}^{N-1}_N T$$

Robotların ileri kinematik analizinde farklı yöntemlerin var olmasının yanında en yaygın kullanılan yöntem Denavit-Hartenberg yöntemidir [3]. Bu nedenle kuramsal kısımda bu yöntem üzerinde durularak tez çalışmasında bahsi geçen kılavuz çekme makinası içinde aynı yöntem yardımıyla kinematik analizler gerçekleştirilmiştir.

Denavit-Hartenberg yöntemi bir derece serbestlikle birbirine bağlanan alt eklemler çiftlerinin kinematik zincir içerisinde kinematik ilişkilerinin tutarlı ve özlü olarak açıklanmasıdır [14]. Yöntemin işleyebilmesi için 4 adet parametreye ihtiyaç vardır [29]. Açık kinematik zincirli bir parametre setini elde etmek için sistematik prosedür aşağıdaki gibidir. Bu prosedür birçok yazar tarafından benimsenmiştir [3, 14, 30, 31].

Parametre tanımlama prosedürü ana çerçeveden uzvun kinematik zincirine özel bir tanımlama gerektirir. Bu tanımlama Şekil 3.11’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Denavit-Hartenberg parametreleri [14]

Prosedür şu adımlardan oluşmaktadır [3, 14, 30, 31].

1. Bağlantıların ve mafsalların tespit edilmesi: Bağlantılar 0 (ana eksen)’den n (uç işlevci)’e kadar numaralandırılır. Mafsallar 1’den n’e kadar numaralandırılır. Prosedürün bu yönteminde i mafsalı i-1 ve i bağlantısını yapar.
2. İç bağlantılar için referans eksenlerin tanımlanması: Ortak i+1 eksenini boyunca z_i eksenini bulunur. O_i ekseninin orijini i+1 mafsali eksenini boyunca konumlanır. Z eksenleri paralel

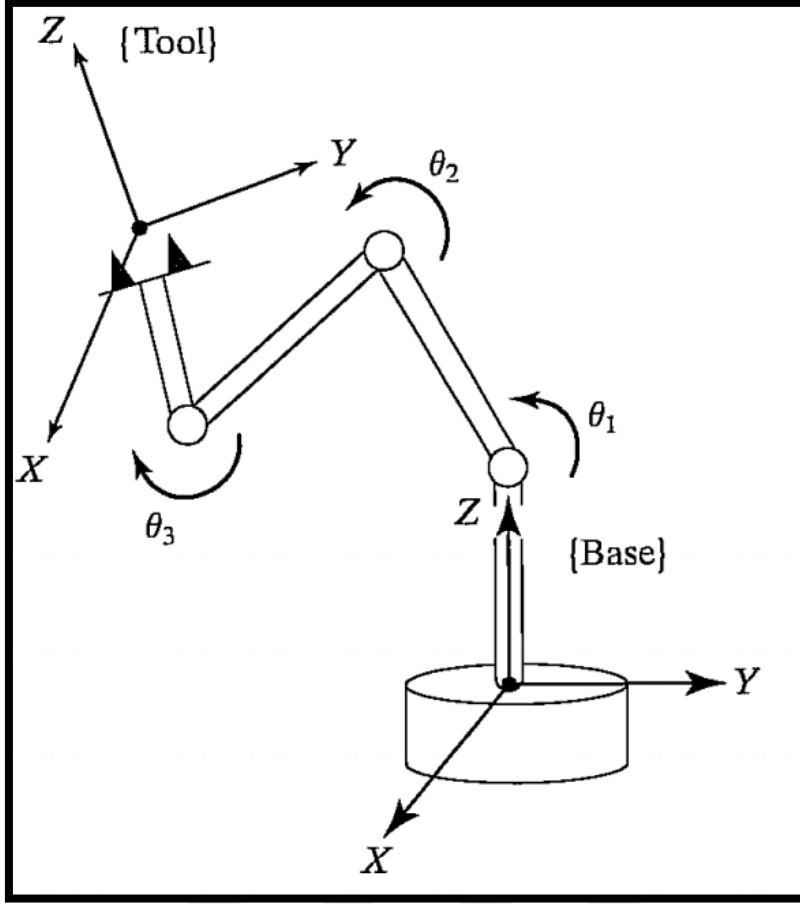
- ise O_i keyfi seçilir. Aksi takdirde, bu z_i ile z_{i-1} ve z_i normalinin arasında kesişmede yer alır. Y_i eksenini sağ el kuralına göre belirlenir.
3. Uzunların uzantıları için referans eksenler tanımlanır: z_0 1 mafsallının eksenini boyunca yer almaktadır. x_0 ve y_0 keyfidir. X_n , y_n ve z_n keyfi tanımlandığında x_n eksenini n mafsallı eksenine diktir.
 4. Her bağlantı için Denavit-Hartenberg parametreleri tanımlanır: a_i , z_{i-1} ve z_i arasındaki mesafedir. d_i , x_{i-1} ve x_i arasındaki mesafedir. α_i , x_i boyunca ölçülen z_{i-1} ve z_i arasındaki açıdır. θ_i , x_{i-1} ile x_i arasında z_i boyunca ölçülen açıdır.
 5. Her eklem için homojen dönüşüm matrisleri belirlenir.
 6. Tekil dönüşüm matrislerinin ön çarpımlarıyla genel homojen dönüşüm matrisleri belirlenir.

Manipülatörün ters kinematiği

Bir diğer aşamada kılavuz çekme makinasının ters kinematiğini işlendi. Aşağıdaki gibi sorun ortaya atılır: manipülatörün uç işlevcisinin konumu ve yönelimi verilir ve bir dizi olası mafsallı açıları hesaplanır bu verilen konum ve yönelim elde edilmek için kullanılabilir (Şekil 3.12). Bu manipülatörlerin pratik kullanımında temel problemidir [22].

İnsanda ve diğer biyolojik sistemlerde günlük rutin olarak binlerce kez çözülen geometrik problem oldukça karmaşıktır. Bu durumda, robot gibi yapay sistemde bu hesaplamayı yapabilen bilgisayar kontrollü bir algoritma geliştirmeye ihtiyaç vardır. Bazı şekillerde manipülatör sisteminde bu problemin çözümü en önemli detaydır [22].

Bu sorunu robotun iç bağlantı uzayında konumların 3 boyutlu Kartezyen uzaydaki konumlara eşleştirilmesi olarak düşünebiliriz. Bu ihtiyaç doğal olarak hedef harici üç boyutlu uzay koordinatları belirtilen her zaman ortaya çıkar. Bazı eski robotlar bu algoritmadan yoksundur. Onlar sadece daha önceden sonra oynatmak için bir takım bağlantı değerleri ile kaydedilen belirli yerlere basit hareket ettirildiler. Belliki, eğer robot sadece kayıt modunda ve hareketlerin ve eklem konumlarının tekrarı şeklinde kullanılıyorsa eklemlerin Kartezyen uzayda algoritmayla ilgili olması gerekmez. Bu günlerde halbuki bu temel ters kinematik algoritmadan yoksun bir sanayi robotu bulmak zordur [22].



Şekil 3.12. Uç işlevcinin belli bir konum ve rotasyonu için açısal değerlerinin ne olduğu ters kinematik yoluyla hesaplanır

Ters kinematik problemi, belirli bir son konumu ve yönelimine karşılık gelen ortak değişkenlerin belirlenmesi ile oluşur. Bu sorunun çözümü, uç işlevcisinin işlem uzayındaki hareket özelliklerini, harekete izin veren mafsalsal hareketine dönüştürmek için temel bir öneme sahiptir [28].

Ters kinematik problem ileri kinematik kadar kolay değildir. Çünkü kinematik eşitlikler doğrusal değildir ve bunların çözümleri kapalı formda her zaman kolay değildir. Ayrıca bir çözümün varlığı hakkında ve birden fazla çözümleri hakkında sorular ortaya çıkmaktadır [22]. Aşağıdaki nedenlerden dolayı ters kinematik işlemleri oldukça karışıktır [28]:

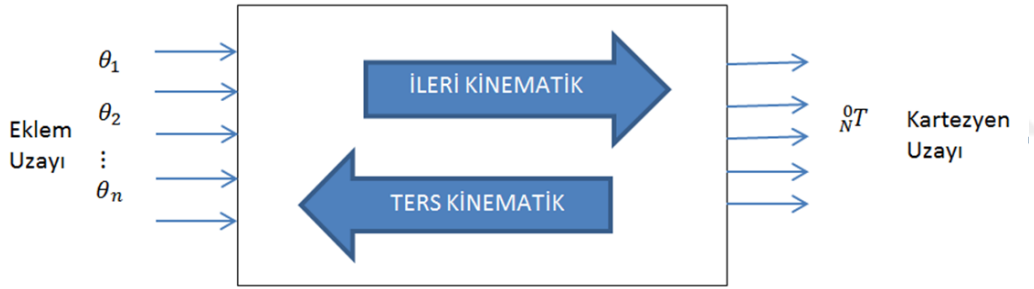
- Eşitlikler genelde doğrusal olmayan şartlar içerisindedir ve bu nedenle, çözüm için kapalı bir form bulmak her zaman mümkün değildir.
- Çoklu çözümler bulunabilir.
- Kinematik fazlalığa sahip olan durumlarda olduğu gibi sonsuz çözümler bulunabilir.

- Kinematik yapı görünümünde kabul edilemeyen çözümler ortaya çıkabilir.

Şuurlu düşünmeden kollarımızla ve ellerle hareket ve objeleri manipüle etmenin başarısını gördüğümüzde bu konuların çalışılması insan beyninin ve sinir sisteminin başarısının ne olduğu anlaşıldığı için şükür hissi vermektedir [22].

Kısaca özetlenecek olursa ters kinematik işlemi temel çerçeveye göre uç işlevcinin kartezyen koordinat konumu ve yönelimi bilinen manipülatörün eklem koordinat sistemi içerisindeki açısal konumların elde edilmesidir [3, 32].

Şekil 3.13'te ileri ve ters kinematik problemin şematik gösterimi verilmiştir. Ters kinematik problem ve bu problemin çözümü, gerçek zamanlı kontrol, eyleyicilerin eklem torklarının hesaplanması, kaynak, boyama ve yörünge planlaması gibi birçok uygulama için oldukça önem arz eder [3,33-35].



Şekil 3.13. İleri ve ters kinematik problemin şematik gösterimi [3]

Kinematik çözümün varlığı veya yokluğu verilen manipülatörün çalışma alanını tanımlar. Çözümün olmaması manipülatörün istenen konumu ve yönü elde edemeyeceği anlamına gelir. Çünkü o manipülatör çalışma alanının dışında yer alır [22].

Ters kinematik problemlerin çözümünde doğrusal olmayan denklemler mevcuttur. Robotun prizmatik veya dönel ekleme sahip olması problemin çözümünü doğrudan ilgilendirir. Kolay çözümler prizmatik eklem yapısıyla sağlanabilirken dönel eklem sayısı arttıkça çözüm zorlaşmaktadır. Sonuçta elde edilen her matematiksel ifade fiziksel olarak anlam ifade etmeyebilir yani fiziksel sonuçtur denilemez veya uç işlevcisinin istenen konuma gitmesi birden fazla çözümü ortaya koyabilir. Bu demek oluyor ki, istenilen konuma farklı çözümler ile farklı şekillerde ulaşılabilir [3, 36]. Ters kinematik denlemleri analitik veya sayısal

yöntemler kullanılarak çözülebilir. Özellikle ard arda üç eklemin paralel olması durumlarında analitik çözüm yöntemi ön plana çıkmaktadır [36].

Ters kinematikte paralel yapılı eklemlerin ardarda gelmesi durumunda etkin kullanıma sahip olan analitik çözüm yaklaşımı, aşağıdaki denklemde görüldüğü gibi ileri kinematikte elde edilen konum ve yönelim matrisinin eklem konum ve yönelim matrislerinin tersleriyle çarpılması esasına dayalı olarak uygulanır [3, 22].

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[{}^0_1T]^{-1} {}^0_6T = [{}^0_1T]^{-1} {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T$$

Denklem daha basit şekilde ifade edilecek olursa;

$$[{}^0_1T]^{-1} {}^0_6T = {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T$$

Ters kinematik problemin çözümü eşitliğin her iki tarafında birbirine denk gelen matris elemanları kendi içerisinde eşitlenerek gerçekleştirilir [3, 22].

$$[{}^0_1T {}^1_2T]^{-1} {}^0_6T = {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T$$

$$[{}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T]^{-1} {}^0_6T = {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T$$

$$[{}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T]^{-1} {}^0_6T = {}^4_5T {}^5_6T$$

$$[{}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T]^{-1} {}^0_6T = {}^5_6T$$

Eğer tasarlanan robotun gerçek zamanlı çalışması isteniyorsa ters kinematik problemin kesin çözümü esas alınmalıdır. Ters kinematik problemin kesin çözümü analitik çözümden faydalanmaktan geçer. Analitik çözümün ağırlıklı olarak tercih edildiği durumlar üç eksenin bir noktada kesiştiği durumlardır [3, 37, 38]. Endüstriyel robot tasarımlarında analitik çözüm gerçekleştirilecek şartlar için tasarım yapılmasına dikkat edilir. Özel durumlar için tasarlanan endüstriyel robotlarda, özellikle endüstride ağır yükleri taşıması için tasarlananlar

gibi, euler bileğinin kullanılmadığı diğer bir ifadeyle üç eklemin bir noktada kesişmediği durumlarla karşılaşılabılır. Bu tip durumlarda kısmi olarak analitik çözüm kullanılabilir ancak kısmi olarak bu yöntem geçersiz kalabilir. Analitik çözümün geçersiz kaldığı durumlarda Pashkevich'in geliştirdiği sayısal yöntemden faydalanılır [3, 39].

Paskevich'in çalışmasına göre bilinen sayısal çözümleme metodlarının ötesinde Jakobyen matrisi kullanılmadan tek boyutlu iteratif araştırma yapılarak ters kinematik problemi çözülür [3].

Euler bilekli robotlarda bilek merkezinin konumu için aşağıdaki denklem kullanılır [3].

$$P_4 = P_6 - d_6 a_6$$

P_4 ilk dört dönüşüm matrisinin çarpımıyla elde edilen matrisin 4. kolonudur. P_6 ana koordinat sistemine göre uç işlevcinin konumudur. a_6 ${}^0_6T$ matrisinin 3. kolonudur. d_6 ise robota ait bir Denavit Hartenberg parametresidir [3].

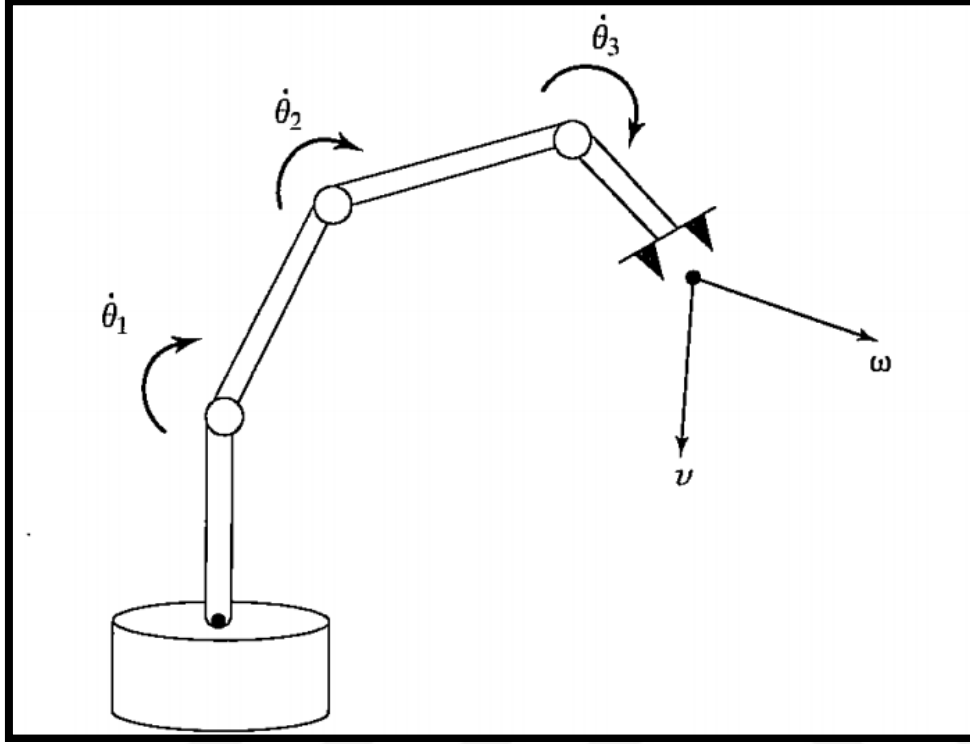
Hız, statik kuvvetler, tekil nokta

Robot kola bir iş yaptırabilmek için, özellikle bir iş parçasını kaldırabilmek veya bir noktaya kuvvet uygulamayı gerektiren bir işi yaptırabilmek gibi, uç işlevciyle yapılan işe temas noktasında bir kuvvet ve gene aynı noktada bir moment oluşur. Eksenel robotlarda hareket vericilerin kuvveti açık çevrim zinciriyle temas noktasına aktarılır [25].

Her bir mafsal üzerine yüklenen kuvvetlerin karakteristiğini belirlemek için statik analiz oldukça önemlidir. Uzuvarların boyutlandırılması, rulmanların seçimi ve tahrik elemanlarının seçimi bu analizler sonucu ortaya çıkar [25].

Statik konumlandırma problemleri ile ilgili ek olarak, harekette manipülatörleri analiz etmek isteyebiliriz. Bazen mekanizmanın hız analizini icra ederken o manipülatör Jakobyen adında bir matris miktarını tanımlamak için uygundur. Jakobyen Kartezyen uzaydaki hızlarla bağlantı uzayındaki hızlar arasında eşleşme belirtir. Bu eşleşme doğal olarak manipülatör verilerinin konfigürasyonu olarak değişir. Tekil nokta denilen belirli

noktalarda eşleşme gerçekleşmez. Bu noktanın bilinmesi tasarımcılar ve manipülatör kullanıcıları için oldukça önemlidir (Şekil 3.14) [22].

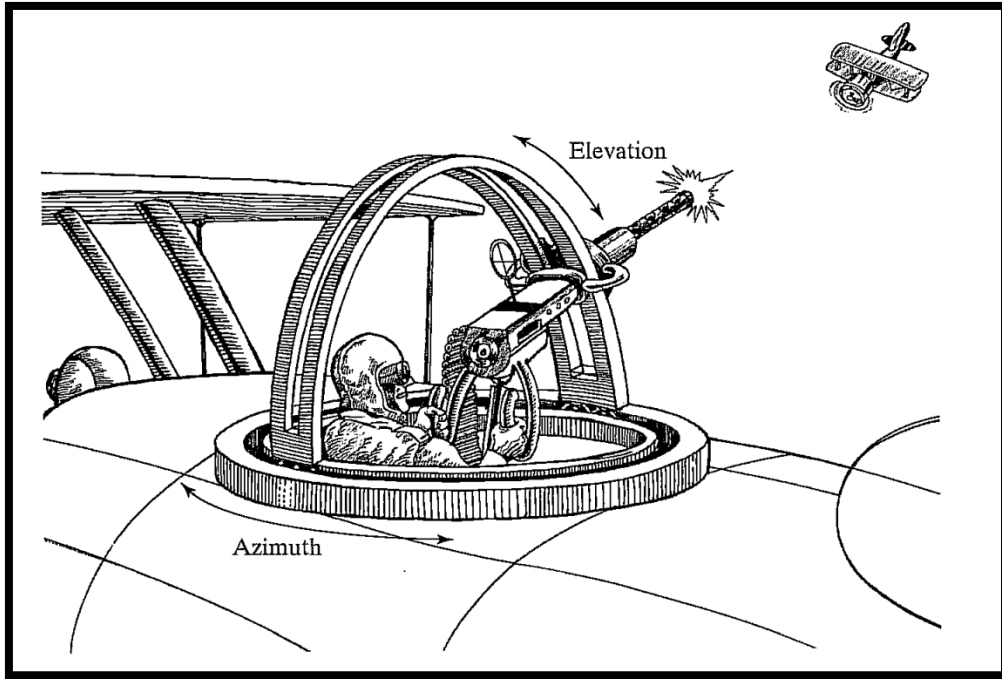


Şekil 3.14. Mafsal değerleri ve uç işlevcisinin hızı arasındaki geometrik ilişki jakobyen adı verilen bir matrisle tanımlanır [22]

Birinci Dünya Savaşı-eski çift kanatlı savaş uçağı arka ağır silahını ele aldığımızda, pilot ön kokpitten uçağı kullanırken, arka topçunun işi düşman uçaklarına ateş etmektir (Şekil 3.15). Bu görevi gerçekleştirmek için, iki eksen etrafında dönen bir mekanizma monte edilmiştir, hareketleri azimut ve irtifa olarak anılır. Bu iki hareketin kullanımıyla (iki serbestlik dereceli), topçu o üst yarımkürede dilediği yöne merminin akışını yönlendirebilir [22].

Topçu 25° açıdan uçağı yaklaşan düşman uçaklarını vurabilirken düşman uçağı 70° açıyla yaklaşan düşman uçaklarına aynı hızda müdahale edememiştir. Bu sırada düşman uçağı topçunun tam üzerinden geçmiştir ve topçu düşman uçağına müdahale edememiştir. Burada düşman uçağının kurtulma sebebi topçunun tekil noktaya düşmesi olmuştur. Silahın yönlendirme mekanizması her hangi bir açıda kolaylıkla çalışabilirken azimuth açısı 90° 'ye yaklaştığında çalışamaz duruma gelmiştir.

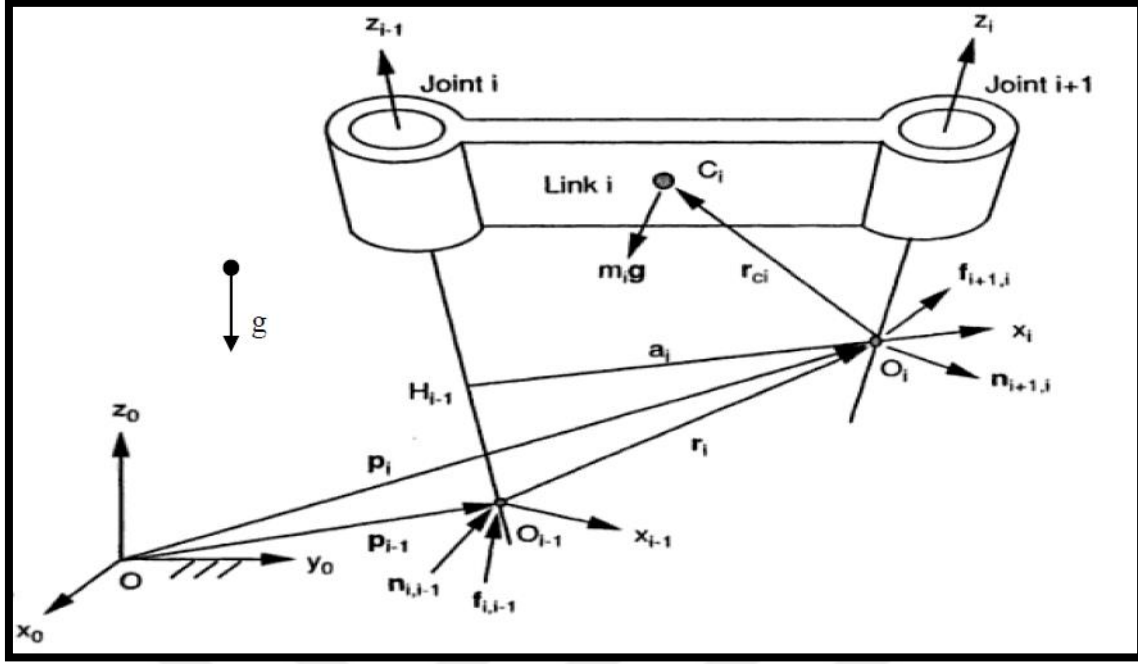
Bu fenomen mekanizmanın tekil noktası olarak anılan tekil noktaya sebep olur. Robotları da kapsayan bütün mekanizmalar bu zorluğa eğilimlidir. Tıpkı arka topçu mekanizmaları ile bu tekil nokta şartları robot kolun konumlanmasında çalışma alanı içerisinde herhangi bir yere gitmesine engel olmaz. Bununla birlikte kolun hareketlerinde problemlere sebep olur [22].



Şekil 3.15. I. Dünya Savaşında bir pilot ile arka topçusu. Arka topçu mekanizması tekil nokta durumuna sonuna kadar maruz kalmaktadır [22]

Manipülörler her zaman uzayda hareket etmez, bazen iş parçasına veya iş yüzeyine dokunması gerekir ve statik kuvvet uygular. Bu durumda sorun ortaya çıkar: Verilen gerekli kontak kuvvetinin ve momentin ve ne tür bir eklem torkuna ihtiyaç olacağı gibi. Bir kere daha Jakobyen matrisi bu sorunun çözümünde doğal olarak ortaya çıkar [22].

Eksenel robotlarda uzuvlar değişik mafsallarla bir ya da iki uzuva bağlanmıştır. Kuvvetler ve momentler $i-1$ uzvundan i mafsalıyla bağlı olan i uzvuna ve $i+1$ mafsalı ile $i+1$ uzvuna iletilir. $i+1$ mafsalıyla i uzvundan $i+1$ uzvuna uygulanan kuvvetler, (x_i, y_i, z_i) koordinat sistemindeki O_i noktasına bileşke kuvvet $f_{i+1,i}$ ve bileşke moment $n_{i+1,i}$ olarak indirgenebilir. Benzer şekilde, i mafsalıyla $i-1$ uzvundan i uzvuna uygulanan kuvvetler, $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ koordinat sistemindeki O_{i-1} noktasına bileşke kuvvet $f_{i,i-1}$ ve bileşke moment $n_{i,i-1}$ olarak indirgenebilir [40].



Şekil 3.16. i uzvuna etkiyen kuvvet ve momentler [31, 40]

$f_{i+1,i}$: i uzvu tarafından i+1 uzvuna O_i noktasında uygulanan bileşke kuvvettir. $f_{i+1} = -f_{i,i+1}$
 $n_{i+1,i}$: i uzvu tarafından i+1 uzvuna O_i noktasında uygulanan bileşke momenttir. $n_{i+1,i} = -n_{i,i+1}$
 r_{ci} : i uzvunun kütle merkezi ile i. uzvun koordinat sistemini arasındaki konum vektörüdür.
 r_i : O_i ile (i-1). uzvun koordinat sistemi arasındaki konum vektörüdür.

Statik analizde çerçeveleri atamak için aynı kurallar kullanılır. Kuvvetler ve momentler toplamı ele alınırsa yapılan işlemler sonucu statik analizin bel kemiği olan aşağıdaki kuvvet ve moment matematiksel ifadesine ulaşılır [22].

$${}^i f_i = {}^i f_{i+1}$$

$${}^i n_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} n_{i+1} + {}^i p_{i+1} \times {}^i f_i$$

Son olarak bu statik kuvvet ve momenti dengelemek için eklemlere ihtiyaç duyulan torkların ne olduğunu tespit etmek gerekmektedir. Bu tork ise aşağıdaki matematiksel ifadeler ile elde edilir [22].

$$\tau_i = {}^i n_i^T {}^i \hat{z}_i$$

Eklem i 'nin prizmatik olması durumunda ortak torkun hesaplanması için ise şu denklem kullanılır [22].

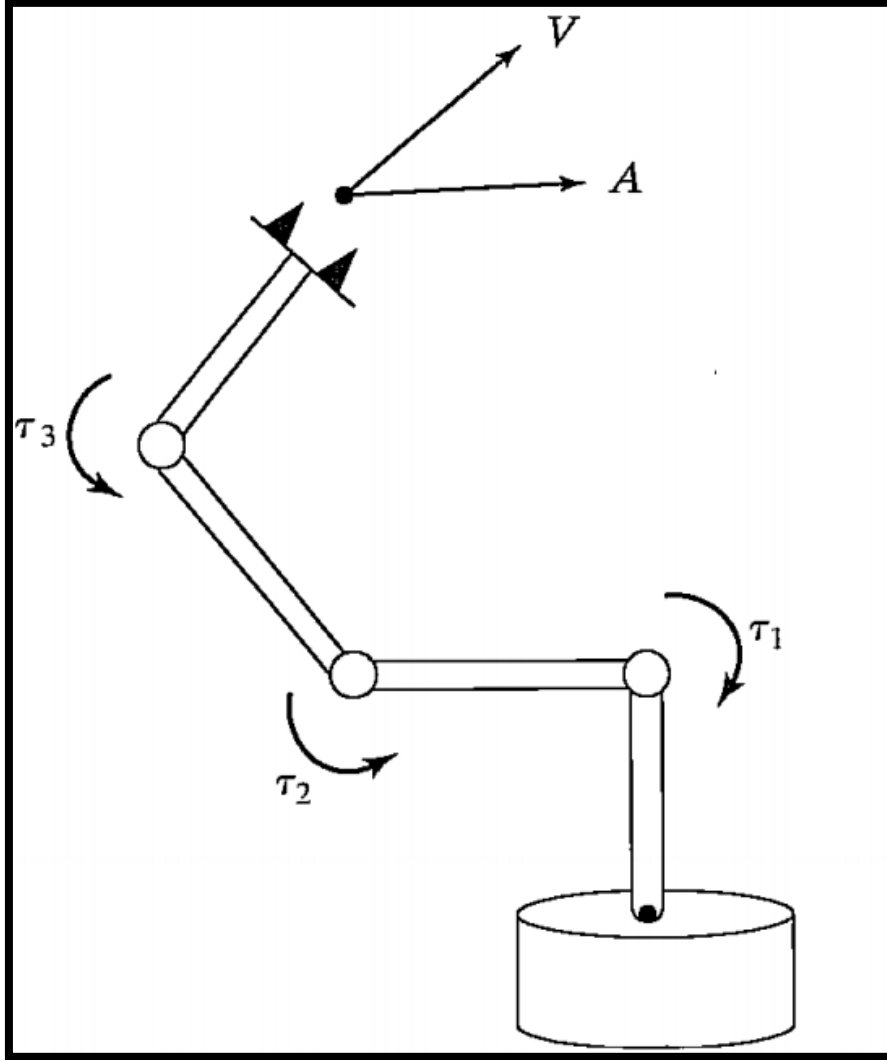
$$\tau_i = {}^i f_i^T {}^i \hat{Z}_i$$

Doğrusal mafsal kuvveti içinde τ kullanılmaktadır [22].

3.3.3. Manipülatör dinamiği

Dinamik hareket için ihtiyaç duyulan kuvvet çalışması için adanmış çalışmanın büyük bir alanıdır. Sırasıyla manipülatörü hareketsiz konumdan ivmelendirmek için, sabit uç işlevci hızında havada hareket ettirmek için, son olarak durdurmak için yavaşlamak amacıyla bir dizi karmaşık tork fonksiyonları eklem aktuatörleri tarafından uygulanmalıdır. Uç işlevcinin ihtiyaç duyulan fonksiyonlarının tam şekli uç işlevcinin aldığı yolun mekansal ve zamansal niteliklerine ve yükün ve eklemlerin kütle özelliklerine bağlıdır. Manipülatörün istenen yolu takip ederek kontrolünün bir metodu aktuatörün tork fonksiyonlarının manipülatörün hareketinin dinamik eşitlikleri kullanılarak hesaplanmasını içerir [22].

Birçoğumuz görüldüğünde daha ağır olduğunu düşündüğümüz ama görüntüsünden daha hafif olan (buzdolabında dolu zannettiğimiz ama aslında içi boş olan süt kutusu gibi) objeleri kaldırmayı deneyimlemiştir. Bunun gibi bir yanlış hüküm alışılmadık bir kaldırma hareketine neden olabilir. Bu tür bir gözlem insan kontrol sisteminin sadece bir kinematik düzenden daha sofistike olduğunu gösterir. Aksine bizim manipülasyon kontrol sistemimiz kütle bilgisini ve diğer dinamik etkilerin kullanımını uyguluyor. Benzer şekilde robot manipülatörünün hareket kontrolünü inşa eden algoritmalar dinamik hesapta alınmalı [22].



Şekil 3.17. Motor torku ve robot kolun sonuç hareketi arasındaki ilişki hareketin dinamik denklemlerinden elde edilir.

Hareketin dinamik eşitliklerinin ikinci kullanımı ise simülasyondur. Dinamik denklemlerin yeniden formüle göre böylece aktuatör torkunun fonksiyonu olarak ivmelenme hesaplanır, bir dizi aktuatör torku uygulaması altında manipülatörün nasıl hareket edeceğinin simüle edilmesi mümkündür. İşlem gücü daha etkin olur, simülasyonun kullanımı gelişir ve birçok alanda önemli hale gelir [22].

Bir endüstriyel robotun dinamik modelinin türetilmesi hareketin simülasyonunu düzenlemek, robot kol yapısının analizi ve kontrol algoritmalarının tasarımı için oldukça önemlidir. Robot kolun hareketinin simülasyonu fiziksel benzer sistem kullanmaksızın test kontrol stratejilerini ve hareket planlamaya imkan sağlar. Dinamik modelin analizi prototip kollarının mekanik tasarımı için yararlı olmaktadır. Dinamik hesaplamalarda birinci yöntem Lagrange sistemidir. İkinci bir yöntem ise Newton-Euler formülasyonudur. Bu yöntem

tekrarlamalı bir şekilde model elde edilmesine izin verir ve manipülatörün kinematik zincirini açık bir yapıya patlatır çünkü hesaplama daha verimlidir [28].

Lagrange formülasyonu ile, referans koordinat çerçevesinden bağımsız bir yolla hareket denklemleri elde edilebilir. Genel koordinatlar olarak adlandırılan $i=1\dots n$ 'e kadar değişen bir dizi λ_i değişkenleri seçilerek bir n hareketlilik dereceli manipülatörün uzuv konumları verimli bir şekilde tanımlanır, mekanik bir sistemin Lagrange'ı genelleştirilmiş koordinatların bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir [28]:

$$\mathcal{L} = K - P$$

K ve P sırasıyla toplam kinetik enerjiyi ve sistemin potansiyel enerjisini ifade etmektedir [3].

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\lambda}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_i} = \xi_i \quad i=1, \dots, n$$

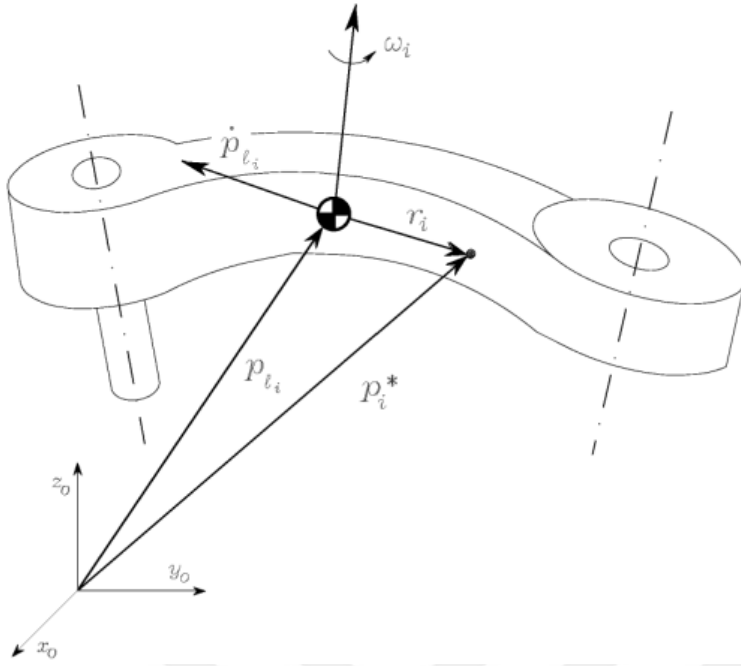
ξ_i , λ_i genelleştirilmiş koordinat sistemi ile ilişkilendirilmiş genelleştirilmiş kuvvet ifadesidir [28].

$K(q, \dot{q})$ ifadesi robot kolun toplam kinetik enerjisini veren ifadedir aynı zamanda lagrange fonksiyonunun en karmaşık terimidir. Robot kolunun toplam kinetik enerjisini elde etmek

için $1 \leq i \leq n$ olduğu durumda i ve n pozitif tam sayı olması halinde, i sayısında bağ varsa i . Bağın kinetik enerjisinin incelenmesi gerekir. İ. Bağ üç boyutlu uzayda hem doğrusal hem de açısal hızla hareket etmektedir. Bu şartlar altında v_i ve w_i sırasıyla i . Bağın kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre doğrusal ve açısal hızını göstermektedir. Toplam kinetik enerji her bir eklemin kinetik enerjileri toplamına eşittir [41].

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (v_i)^T m_i v_i + (w_i)^T I_i w_i$$

Denklemden m_i , i . bağın kütle, I_i ise i . bağın kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre 3x3 boyutlu bir matris olan atalet tensörünü ifade etmektedir [41].



Şekil 3.18. i. uzvun Lagrange formülü için kinematik tanımı [28]

Bir bağın atalet tensörü, katı bir nesnenin kütle dağılımını gösteren 3x3 boyutlu bir matristir. Katı bir nesnenin atalet tensörünü ana koordinat sistemine göre tanımlayabilmek için ilk önce aynı nesnenin kütle merkezine göre atalet tensörünün tanımlanması gerekir [41].

$$I_m = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Atalet tensörü için koordinat sistemi kütle merkezine yerleştirilecek olursa prensip eksenler kuralı kapsamında atalet çarpanları sıfırlanıyor. Sadece köşegen matrisler anlamlı değerler ifade ediyor [41].

Bir manüpülâtörde atalet tensörü I_i , i. uzvun kütle merkezinin, robotun ana koordinat sistemine göre tanımlanmasıyla bulunur. Bir eklemin dönüşüm matrisi ise şöyledir [41]:

$$\begin{bmatrix} {}^0_iR & P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matris içerisindeki elemanlar birinci satır soldan sağa doğru gidildiğinde sırasıyla yönelim ve konumu ifade etmektedir [41].

$$I_i = {}^0R I_m {}^0R^T$$

Toplam kinetik enerjiyi bulmaya giden yolda yapılması gereken ikinci işlem bağ Jakobiyen matrisi J_i 'nin bulunmasıdır. Bunun için i . bağın kütle merkezi sanki iüç işlevcisi gibi kabul edilir. h_i , vektörü yani i . bağın kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre konumu kullanılarak tanımlanır [41].

$$h_i = {}^0T \Delta h_i$$

i . bağın kütle merkezinin konumu belirlendikten sonra jakobiyen matrisi aşağıdaki gibi tanımlanır [41].

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial q_1} \dots & \frac{\partial h_i}{\partial q_i} & 0 \\ \xi_i z^1 \dots & \xi_i z^i & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix}$$

Denklemden A_i doğrusal, B_i açısal hızlardan kaynaklanan matrisleri, ξ_i ise eklem tip değişkenini göstermektedir. Bu değişken dönel eksenler için 1 alınır [41].

$$z^i = {}^0R i^3$$

Denklemden $i^3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ dir. Bütün bu işlemlerin sonucunda bir robot kolunun toplam kinetik enerjisini q ve $\dot{q}$ cinsinden ifade etmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılır.

$$v_i = A_i \dot{q}$$

$$w_i = B_i \dot{q}$$

Bu denklemler kütle merkezi doğrusal hızını ve açısal hızını ifade etmektedir. Kinetik enerji denkleminde bu değerler yerine yazılır ve :

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [(A_i)^T m_i A_i + (B_i)^T I_i B_i] \dot{q}$$

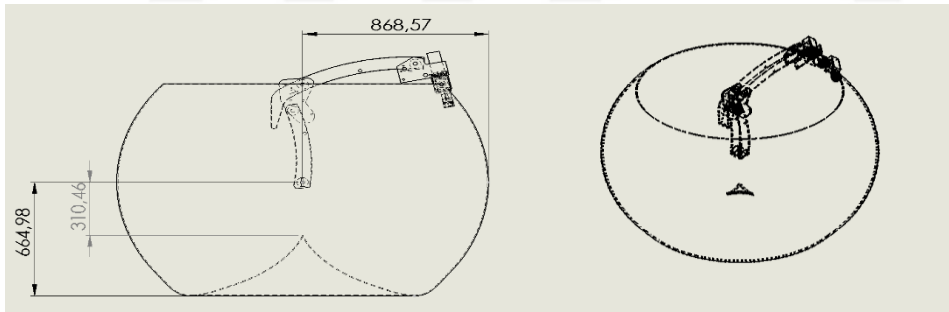
denklemini elde edilir.



4. SİSTEM TASARIMI, ANALİZİ, SİMÜLASYONU VE PROTORİP İMALATI

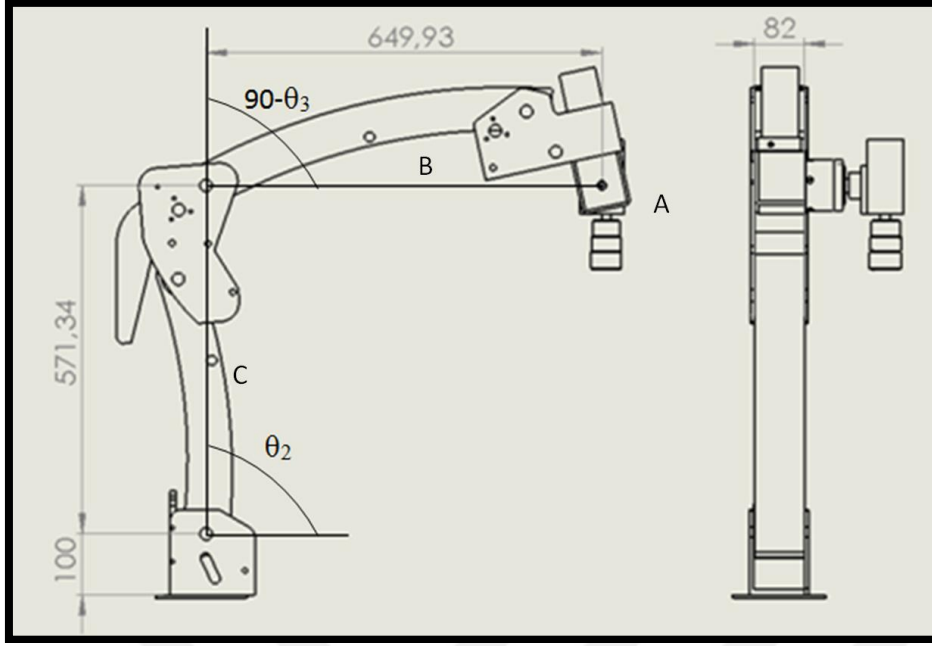
Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından SAN-TEZ projesi kapsamında desteklenmiş olan tez çalışmasında sayısal kontrollü kılavuz çekme makinası imal edilmiştir. Kılavuz çekme makinası imalatı ile özellikle piyasada elle kontrol edilen kılavuz çekme makinalarına alternatif olarak servo motorlarla tahrik edilebilen ve kontrolünün bilgisayar desteğiyle yapılabildiği cihazları piyasaya sürmek hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda bir prototip imal edilmiştir.

Tez çalışmasında ortaya çıkarılan kılavuz çekme makinası bilek kısmına kadar üç serbestlik derecesine sahip aynı zamanda üç eksene sahip bir manipülatör olarak tasarlanmıştır. Bilekte bir servo motor ve bir hidrolik motor yardımıyla iki hareket daha elde edilmiştir. Temel eksen den bileğe kadar yerleştirilen üç servo motorla bileğin konumlandırılması ve istenen yörüngeyi takip etmesi sağlanmıştır. Bilekteki servo motorla yörüngeyi takip ederken uç işlevcinin eksen kaymalarının engellenmesi sağlandı. Uç işlevciye yerleştirilen hidrolik motor sayesinde ise kılavuz başlığına dönel hareket verilmiştir.



Şekil 4.1. Kılavuz çekme makinası manipülatörünün orijin noktasına göre elde edilen çalışma uzayı sınırları

Şekil 4.1’de kılavuz çekme makinası için uygun olan çalışma uzayı görülmektedir. Bu çalışma uzayında birinci uzuv için geometrik kısıtlamalardan dolayı θ_2 açısı (Şekil 4.3) 90° ’yi geçmemelidir. Bu sınır aşıldığı takdirde zemine yerleştirilmiş olan döner tablaya çarpması durumu oluşur ve cihazın zarar görmesi durumu ortaya çıkar. İkinci uzuvda ise θ_3 açısı -90° ile -160° arasında olmalıdır. Böylece ikinci uzvun denge unsuru olan kuyruk kısmı ile birinci uzvun çarpışması engellenmiş olur. Bu sınırlar korunarak maksimum hangi sınırlar içerisinde hareket edeceği şekilden anlaşılabilmektedir. Şekil 4.2’de kılavuz çekme makinası için önemli ölçüler ve manipülatör tasarım detayları verilmiştir.

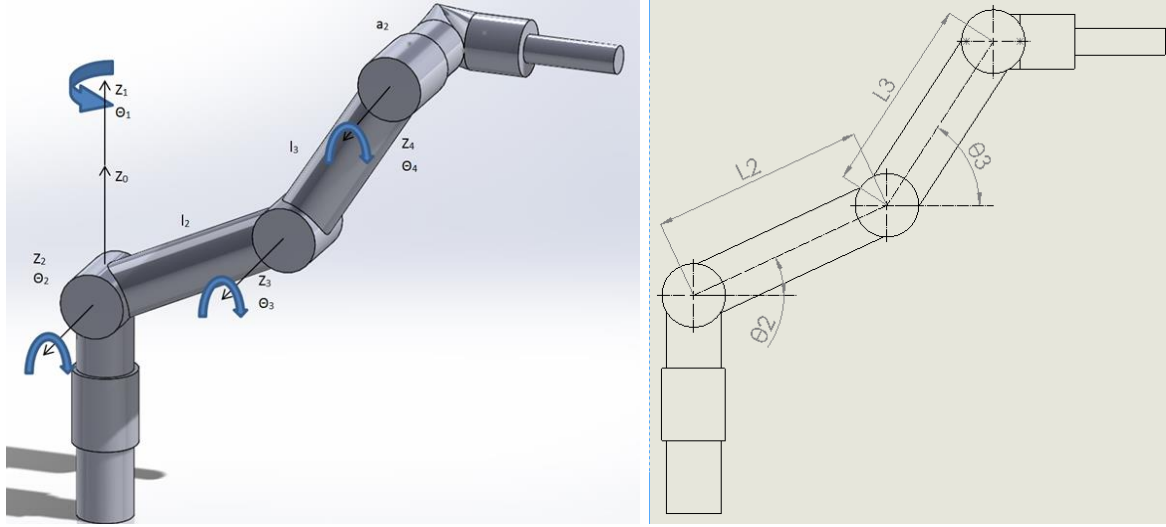


Şekil 4.2. Kılavuz çekme makinası için önemli ölçüler (A:uç işlevci, B:üst kol, C:alt kol)

4.1. Tasarım

Tasarım için öncelikle ideal çalışma alanı belirlenmiştir. Genel bir kılavuz çekme işlemi için cihaza ne kadar uzaklıkta olmak yeterlidir? Manuel kılavuz çekme makinalarında nasıl bir çalışma şartı sağlanıyor? Bunlar detaylı olarak incelenmiştir. İkinci sayfada kılavuz çekme işlemi için ihtiyaç duyulan olan hareket kaç eklemlerle, kaç eksenle verebilir bu sorunun cevabı araştırılmıştır.

Kılavuz çekme işlemi izleyeceği yol bakımından iki boyutlu düz bir çizgidir. Böyle bir çizgiyi takip etmek için iki eklemlerli bir robot kol yeterli olabilmektedir. Ancak kılavuz çekme işlemi ile vida dişi açılacak olan delikler her zaman geometrik olarak aynı düzlemde yer almayabilir. İki eklemlerli bir robot kol tasarımı ise düzlemsel iş kabiliyeti sunmaktadır. Bu nedenle ana gövdenin en altına yerleştirilen bir dönel mafsalla çalışma uzayı düzlemsellikten çıkarılmıştır. Robot kol, antropomorfik robotların tasarım esaslarından esinlenilerek tasarlanmıştır. Şekil 4.3'te eklemler ve bu eklemlere verilen dönme hareketleri gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Kılavuz çekme makinası için çubuk mekanizma üzerinde eksenlerin yerleşimi, dönüş açıları ve parametrik ölçüleri

Kılavuz çekme makinası için antropomorfik robot tasarımı benimsendi. Bu tasarımın benimsenmesindeki esas sebep küçük bir cihazla geniş bir çalışma alanı oluşturabilmektir. Ayrıca tasarımın, düzlemsel konumda yer almayan farklı deliklere rahatlıkla kılavuz çekebilmesi için yani düzlemsellikten çıkarılması için geçerli ve pratik bir çözüm olmuştur.

Bu tasarımla, çalışma mesafesi eksenlerin hareketleriyle daha büyük hale gelebilirken daha kısa mesafeler içerisinde de kılavuz çekme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Uç işlevcinin konumlandırması tamamıyla ilk üç eklemden, yani θ_1 , θ_2 ve θ_3 açılarıyla ifade edilen eklemlerle sağlanmaktadır. θ_4 ile ifade edilen eklem yardımıyla uç işlevcinin izlemesi için tanımlanan yörüngeyi takip etmesi esnasında eksenden kaçma gibi veya uç işlevcide salınım gibi riskli durumlardan kaçınmak hedeflenmiştir. Uç işlevciye bağlanacak olan kılavuz çekme başlığı haricen kontrol edilecek olan bir hidrolik motorla tahrik edilmiştir.

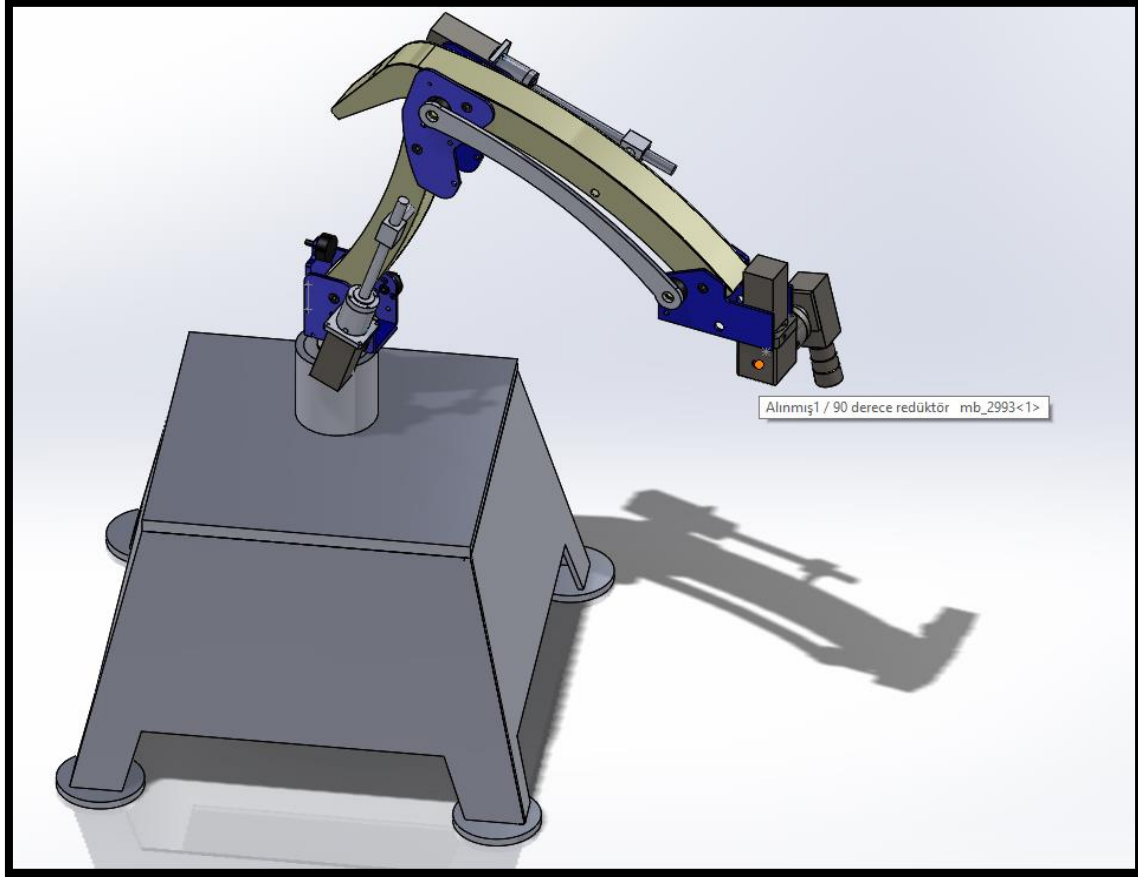
Dördüncü servo motor diğer üç servonun haricinde ayrı bir konumda kontrol edilmiştir. Bunun nedeni dördüncü servo motorun bulunduğu eklem diğer iki eklemle aynı dönüş hareketini veriyor olması bileğin konumlanması yönünden anlamsız bir fazlalık (redundancy) ortaya koyuyor olmasındandır. Ancak, açılı bir deliğe de kılavuz ile vida açılması durumu da vardır. Böyle durumlarda kılavuzun açısı dördüncü eklem θ_4 açısıyla verilebilir. Özellikle bu eklem kılavuzun eksantrikliğini önlemek açısından faydalıdır. Ancak kılavuz çekme işleminde dalgalanmalı bir yörünge olamayacağı için dördüncü eklem uç işlevcinin takip edeceği yol anlamında görev düşmemektedir.

Boyutlandırmalar yapılırken esas oluşturan unsurlardan biri de böyle bir işlemi yapmak için kullanılacak olan servo motor özelliklerinin belirlenmesi olmuştur. İşlem esnasında oluşan yaklaşık yük dikkate alınarak bir servo seçimi uygulanmıştır. Bu servoların hareketini iletebilecek özellikte dişli miller seçilmiştir. Dişli milin adımına göre servodan alınan açı ile hareket aktarılmıştır. Şekil 4.4'te tamamlanmış tasarım net bir şekilde görülmektedir.

Tasarımda kaynak edilebilme ve işlenebilirlik özelliklerinin iyi olmasından dolayı AISI 1045 çelik malzeme kullanılmıştır. Sac metal esasına dayalı bir tasarım ve imalat süreci gelişmiştir. Manipülatör gövde uzuvları özellikle alt ve üst kol olarak sınıflandırılan parçalar 3 mm kalınlığında AISI 1045 çelik malzemeden imal edilmiştir. Bu tip çelikler iyi kaynaklanabilirlikleri, iyi işlenebilirlikleri, yüksek mukavemet ve darbe özellikleri ile öne çıkmaktadırlar. AISI 1045 çeliğin daha fazla aşınma direnci ve güç gerektiren uygulamalarda yaygın kullanımı tez çalışmasında da bu yönde malzeme seçimi yapılmasına sebebiyet vermiştir [42].

Tasarım için üç boyutlu modellemede günümüzde yaygın olarak kullanılan SolidWorks programı kullanılmıştır. Katı model tasarımı sayesinde kılavuz çekme makinasının geometrik özellikleri servoların bağlanacağı konumlar, servoların bağlanacağı noktaya gelmesi gereken delikler, servonun hareketi aktarma sistemi net bir şekilde görülmektedir.

Kılavuz çekme makinasının tasarımında parametrik tasarım esasları dikkate alınmıştır. Bu yöntem sayesinde değişken parametreler belirlenerek ihtiyaç anında parametrelerde değişiklik yapılarak farklı bir probleme benzer ancak değişik bir çözüm yöntemi sağlanabilmektedir. Parametrik tasarım sayesinde kılavuz çekme makinasının geliştirme sürecinde değişken koşullar için tasarımda ortaya çıkan değişimlere hızlı müdahale edebilme imkanı yakalanmıştır. Mevcut tasarımın yeniden şekillendirilmesi konusunda pratik çözümler ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.4. Kılavuz çekme makinası

4.2. Statik ve Dinamik Analiz

Mekanik biliminden köklerini alan statik ve dinamik yapı bir cihazın fiziksel özelliklerini anlamak ve çalışma şartlarına oluşturacağı tepkileri değerlendirmek ve kontrolünü sağlayabilmek açısından oldukça önemlidir.

4.2.1. Statik analiz

Katı modelde parametreler netleştirildikten sonra statik analiz safhasına geçilmiştir. Statik analiz farklı kuvvet etkileri altında sistemin hareketsiz denge konumunu koruyabilmesi ile ilgilenmektedir. Bu esasa dayanarak kılavuz çekme işleminde oluşabilecek olan kuvvetler araştırılmıştır. Kılavuz çekme işleminde oluşan maksimum kuvvetler altındaki davranışı analiz edilmiştir. Sistem esasında hareketli olmasına rağmen mukavemet analizler statik durum için gözlemlenmiştir.

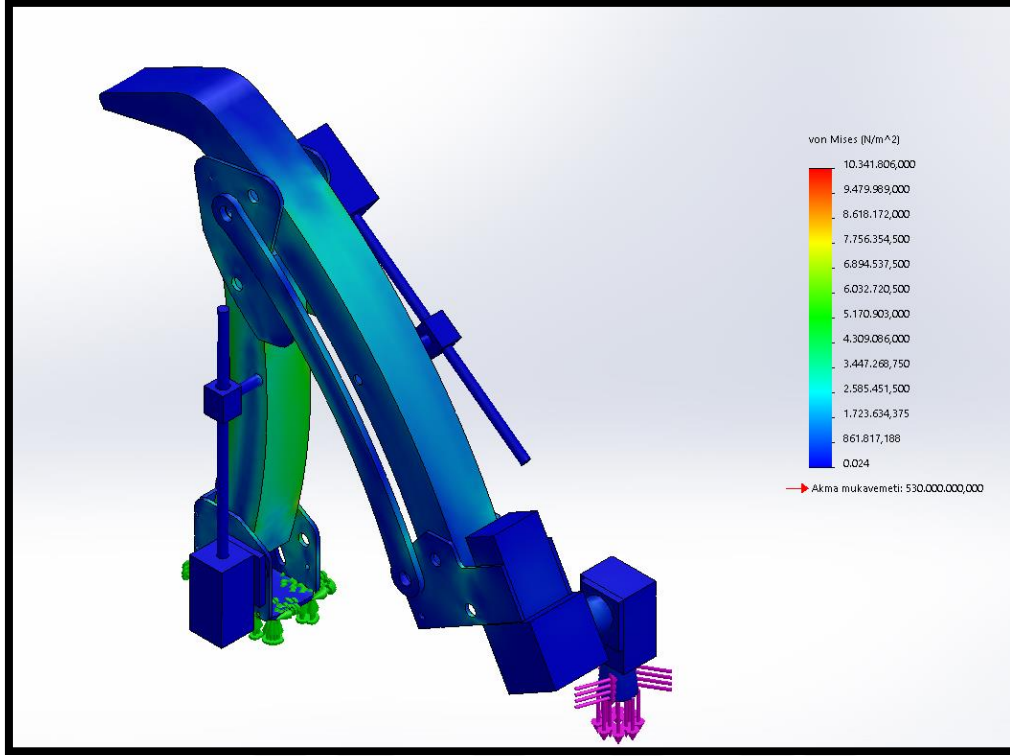
Statik analiz için SolidWorks yazılımının statik analiz modülü kullanılmıştır. Kılavuz çekme işlemi ile hazırlanmış “Ti6Al4V Titanyum Alaşımında Kılavuz ile Vida Açma Problemlerinin Araştırılması” isimli tezden alınan sonuçlara göre kılavuz çekme işlemi esnasında ortaya çıkan yüklerin ne olduğu tespit edilmiştir [43]. Buna göre kılavuz çekme işlemi için yaklaşık maksimum 100 N civarında yük ortaya çıkacağı tespit edilmiştir. % 50 ‘lik bir artış yapılarak 150 N’luk bir yük altında tasarımın güvenli olup olmadığı hakkında karar verilmiştir.

Tez çalışmasında statik analizin mukavemet açısından ön plana çıkmış olmasının nedeni kılavuz çekme işleminde dinamik değişkenlerin yeterince etkili olmayışdır. Kılavuz çekme işlemi genellikle sabit hızla gerçekleştirilen bir işlem olduğu için ve bu şartlar altında ivmenin sıfır olarak sabitlenmesi durumu dinamik faktörlerin etkisini minimize etmektedir.

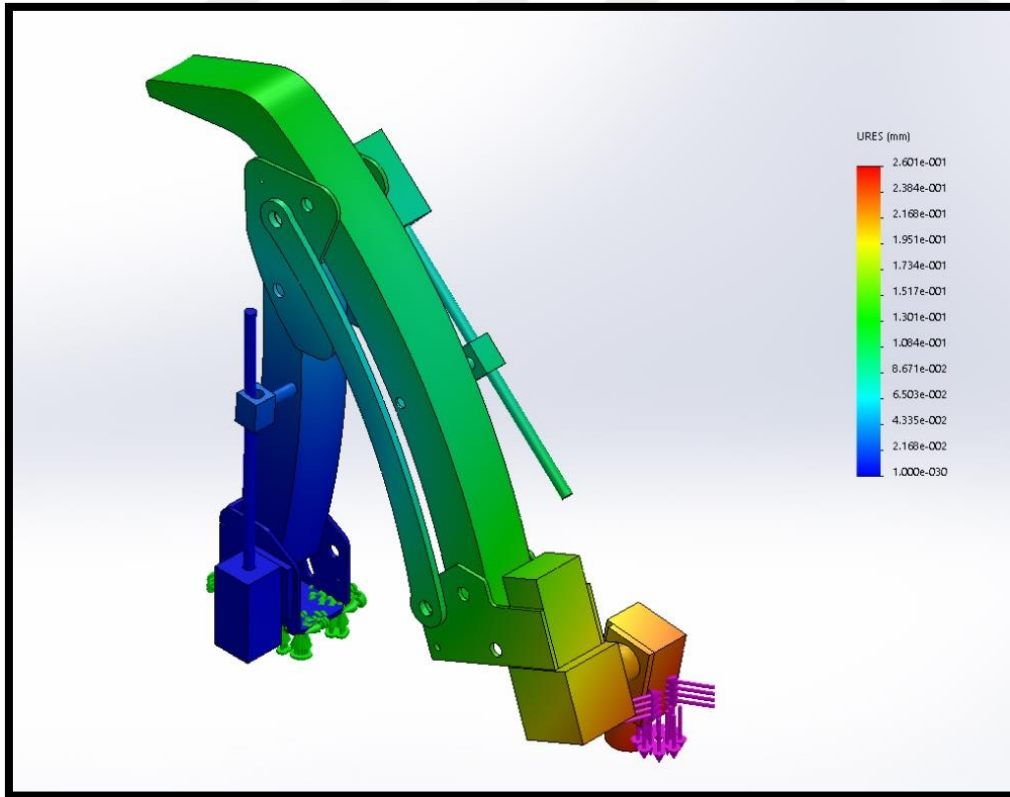
Şekil 4.5’te kılavuz çekme makinası için kapalı konumda maksimum yük altında gerilme analiz sonuçları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi belirlenen analiz şartlarında belirlenen konumda güvenli çalışma şartları sağlanmıştır. Şekil 4.6’da aynı şartlar altındaki yerdeğiştirme grafiği görülmektedir. Çizelge 4.1’de deney şartlarını oluşturan parametreler detaylı olarak incelendi. Analizde montaj halindeki davranış gözlemlenmiştir, uyumlu katı yüksek kalite mesh seçilerek on dokuz parçalı bileşene ve bunların temasları üzerinde etki oluşturularak işlem gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. Kılavuz çekme makinasının imal edildiği malzeme ve bu malzemenin mukavemet özellikleri ve analiz parametreleri

Malzeme Cinsi	AISI 1045 Çelik (soğuk çekilmiş)
Analiz Model Tipi	İzotropik Doğrusal Elastik Analizi
Varsayılan Hata Kriteri	Maks. Von Misses Gerilimi
Akma Mukavemeti	$5.3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
Gerilme Mukavemeti	$6.25 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
Elastik Modülü	$2.05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Poisson Oranı	0,29
Yırtılma Modülü	$8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Termal Genleşme Katsayısı	$1.15 \times 10^{-5} / \text{Kelvin}$

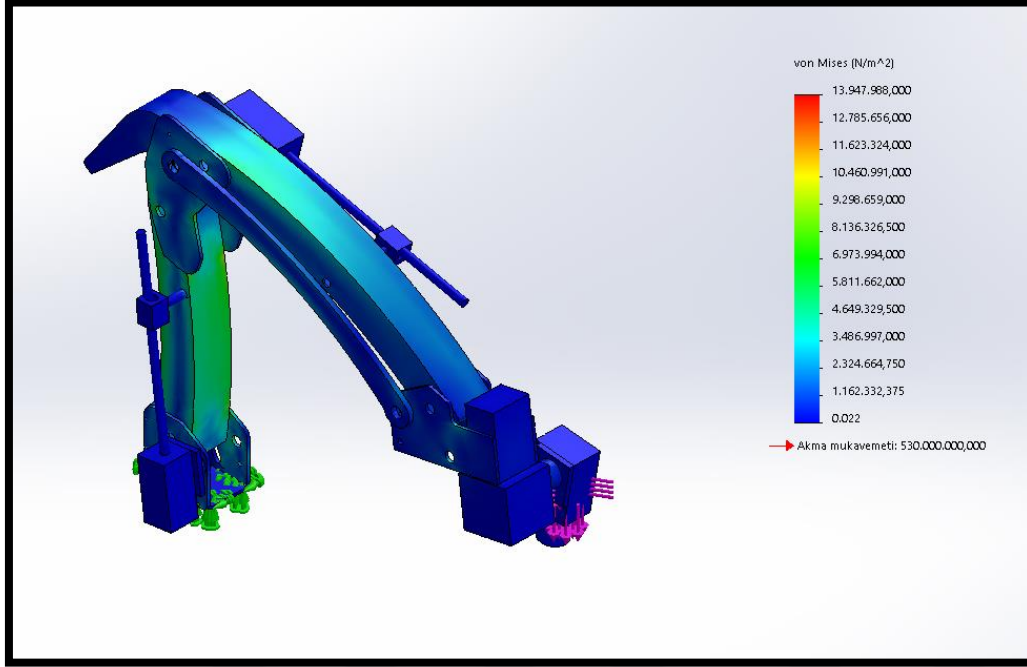


Şekil 4.5. Kılavuz çekme makinası için kapalı konum gerilme analizi grafiği

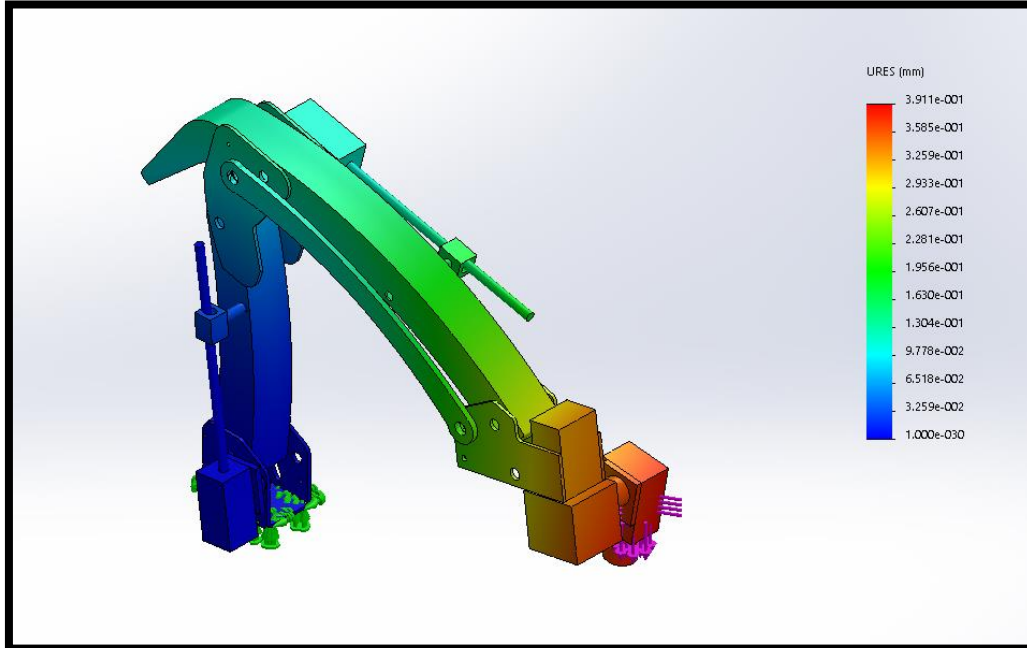


Şekil 4.6. Kılavuz çekme makinası kapalı konum yer değiştirme analizi grafiği

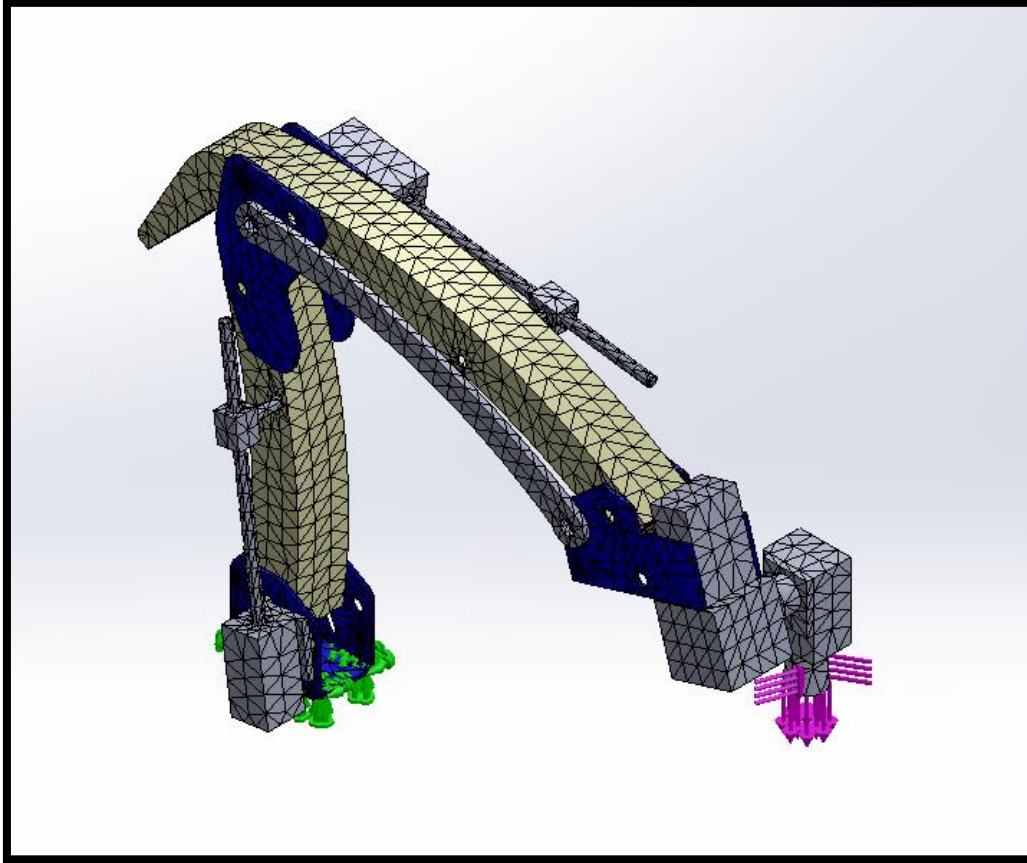
Kılavuz çekme makinasında manipülâtörün ara konumu için gerilme analizi, yer değıştirme analizi ve bu analizlerde kullanılan birinci kalite mesh uygulaması Şekil 4.7, 4.8, ve 4.9’da görölmektedir.



Şekil 4.7. Kılavuz çekme makinası ara konum için gerilme analizi

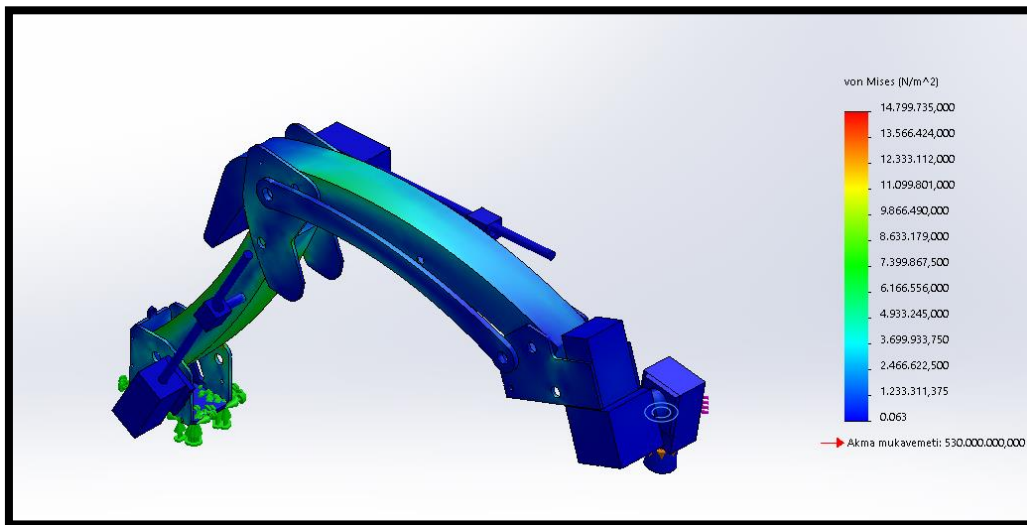


Şekil 4.8. Kılavuz çekme makinası için ara konum yer değıştirme analizi

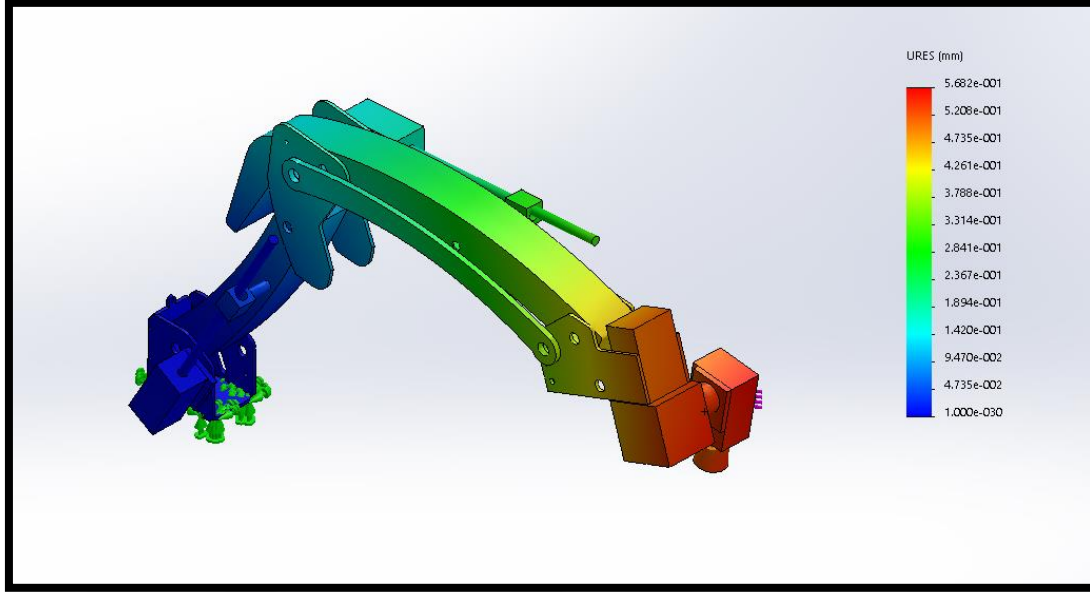


Şekil 4.9. Kılavuz çekme makinası için ara konumda birinci kalite mesh uygulaması

Şekil 4.10 ve 4.11’de ise cihazın fiziki imkanlarının belirlemiş olduğu maksimum konumunda gerilim analizi ve yer değiştirme analizi verilmiştir.



Şekil 4.10. Kılavuz çekme makinası için açık konum gerilme analizi



Şekil 4.11. Kılavuz çekme makinası için açık konum yer değiştirme analizi

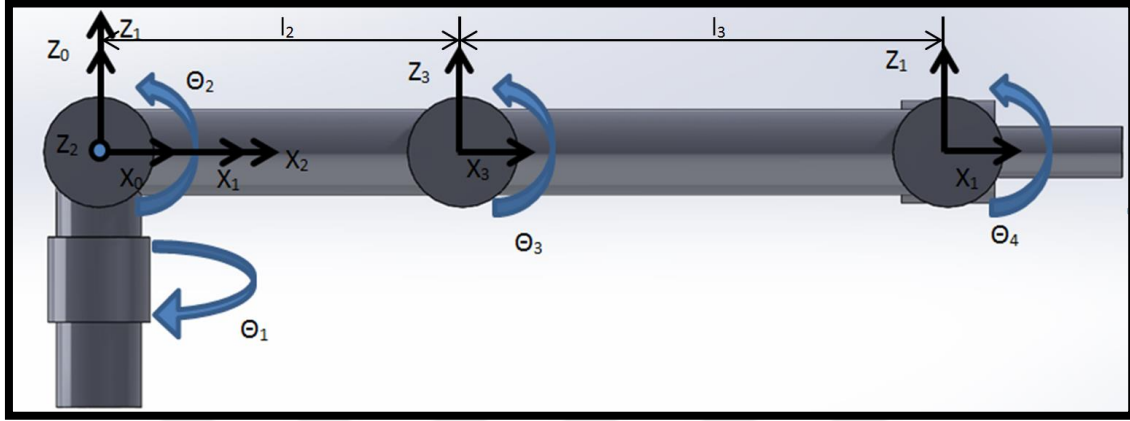
Solidworks analiz renklendirme sisteminde kırmızı ile ifade edilen renkler kritik gerilme altındaki bölgelerdir. Manipülatörün üç farklı konumu için incelenen gerilme analizlerinde kritik bölgeye yaklaşma gerçekleşmemiştir. Renklendirmeden de anlaşıldığı gibi yeşil ve mavi renklerde güvenli bölgede kalınmıştır. Yerdeğiştirme analizlerinde uygulanan kuvvet altında en yoğun yer değiştirme açık konumda uç kısımda ortaya çıkmıştır. Yer değiştirme miktarı mikron boyutundadır. Tolerans aralıkları içinde olduğu söylenebilir.

4.2.2. Dinamik analiz

Mekanizmaların hareketlerini, hareket karakteristiklerini, hız eğilimini, kuvvetin harekete tesirinin incelendiği analiz metodu dinamik analiz olarak ifade edilmektedir [41]. Robotikte bu daha özelleşmiş bir hale gelir. Çünkü robotikte eklemlerin birbirinden bağımsız hareket edebilme kabiliyetleri değişken parametrenin artmasına neden olur ve dinamik hesaplamalarda vektör ve matrislerin işleme dahil olduğu özel bir yaklaşımla sonuca ulaşılabilir. Tez çalışmasında robotiğin temel ilkeleri sağlanarak manipülatörün mekanik yapısı Denavit-Hartenberg parametreleri ile analiz edilmiştir. Eksen takımları bu prensibe uygun olarak yerleştirildi ve eksenlerin değişken parametreleri belirlendi. Bu prensip esas alınarak düz kinematik denklemleriyle açıdan konum elde etmek için ihtiyaç duyulan matematik modele ulaşıldı. Ters kinematik denklemleriyle ise konumdan açı elde etmek için ihtiyaç duyulan matematik model ortaya konmuştur.

Kılavuz çekme makinası için kinematik analiz

Şekil 4.12’de manipülatörün Denavit-Hartenberg parametrelerinin başlangıç konumu yani eklem açılarının sıfır olduğunda ki konumu verilmiştir.



Şekil 4.12. Kinematik analizde kullanılacak olan değişken açı değerleri (Şekilde cihazın eklem açı değerlerinin sıfır olduğu konum görülmektedir)

Düz kinematik denklemlerin oluşturulması

Düz kinematik işlemlerde esas hedef manipülatörün açı değerlerinde hedef noktaya, yani girdi olarak verilen açılarla hangi noktaya ulaşacağı hakkında bilgi sağlanmasıdır. Bir başka deyişle düz kinematik işlemler ters kinematikte elde edilen verilerin kontrolcüsüdür. Ters kinematiğin girdi olarak verildiği yerde ters kinematik geri besleme olarak kullanılmaktadır. Manipülatörün uç işlevcisinin bulunduğu konum aslında vektörel bir değerdir. Bu nedenle her bir eksenin bulunduğu nokta için ayrı vektörel ifadeler ve her bir vektörel ifade için tanımlanmış matrisler mevcuttur. Bu matrisler Denavit Hartenberg prensibine göre belirlenir. Çizelge 4.2’de kılavuz çekme makinası için tanımlanmış Denavit Hartenberg parametreleri tablosu görülmektedir.

Denavit Hartenberg parametrelerine bağlı olarak transformasyon matrisleri oluşturuldu. Çizelgenin sabit parametresi olan $l_2=571.34$ mm ve $l_3=649.97$ mm olarak işlemlerde kullanılmıştır. Oluşturulan matrisler aşağıdaki gibidir ve

${}^i_{i+1}T = \text{screw}_x(a_{i-1}, \alpha_{i-1}) \text{screw}_z(d_i, \theta_i)$ ifadesi ile hesaplanır.

Çizelge 4.2. Kılavuz çekme makinası için Denavit Hartenberg parametreleri [44]

Eksen	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	$\frac{\pi}{2}$	0	0	θ_1
2	0	l_2	0	θ_2
3	0	l_3	0	θ_3
4	0	0	0	θ_4

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c1 & 0 & s1 & 0 \\ s1 & 0 & -c1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 & l2 * c2 \\ s2 & c2 & 0 & l2 * s2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c3 & -s3 & 0 & l3 * c3 \\ s3 & c3 & 0 & l3 * s3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c4 & -s4 & 0 & 0 \\ s4 & c4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Matrisler dört eksen için hesaplandı. Üçüncü ve dördüncü eksenlerin rotasyonel hareketinin aynı olması nedeniyle dördüncü eksen fazlalık konumuna gelmektedir. Bu nedenle düz kinematikle konum analizinde dördüncü eksenin transformasyon matrisinin kullanılması gereksizdir. İlk üç eksen dikkate alınarak beşinci denklem yöntemi kullanılmıştır ve konum hesabı yapılmıştır.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \quad (4.5)$$

4.5 numaralı denklemde 4.1, 4.2 ve 4.3 numaralı transformasyon matrisleri yerine yazıldığında aşağıdaki matris birleşimleri ortaya çıkmaktadır [45]. Burada Px, Py ve Pz uç işlevcinin konumunu ifade ederken, $r_{11}, r_{12}, r_{13}, \dots, r_{33}$ ifadeleri ise rotasyon matrisi bileşenlerini ifade etmektedir. $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ değişken ifadeleri de uzuvların rotasyon açısını ifade eder. l_2 ve l_3 değerleriyse sırasıyla alt kol uzunluğu ve üst kol uzunluğunu ifade etmektedir.

$$r_{11} = \cos(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_1) \quad (4.6)$$

$$r_{12} = -\sin(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_1) \quad (4.7)$$

$$r_{13} = \sin(\theta_1) \quad (4.8)$$

$$P_x = \cos(\theta_1) * (l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 * \cos(\theta_2)) \quad (4.9)$$

$$r_{21} = \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_1) \quad (4.10)$$

$$r_{22} = -\sin(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_1) \quad (4.11)$$

$$r_{23} = -\cos(\theta_1) \quad (4.12)$$

$$P_y = \sin(\theta_1) * (l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 * \cos(\theta_2)) \quad (4.13)$$

$$r_{31} = \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (4.14)$$

$$r_{32} = \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (4.15)$$

$$r_{33} = 0 \quad (4.16)$$

$$P_z = l_3 * \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 * \sin(\theta_2) \quad (4.17)$$

Ters kinematik denklemlerin oluşturulması

Kılavuz çekme makinası için konuma bağlı açı denklemleri ters kinematik metodu kullanılarak elde edilmiştir. 4.18 numaralı denklemde temel eklemler uç işlevcinin bulunduğu

eksen arasında mevcut olan transformasyon matrisi verilmiştir. Değişkenleri sayısal değerler cinsinden ifade edebilmek için gereklidir.

$${}^B_W T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Denklem 4.18'deki matris denklem 4.19'daki formatta da yazılabilmektedir [46].

$${}^B_W T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \quad (4.19)$$

19 numaralı denklem ise düz kinematikte elde edilen temel eksen ile uç işlevci arasındaki rotasyon matrisidir. 4.9, 4.13 ve 4.17 numaralı denklemlerde P_x , P_y ve P_z konumu değişken ve değişken olmayan parametrelere bağlı olarak verilmiştir. Esasında sayısal konum değerlerine bağlı olarak değişken açılı değerlerinin elde edilmesi 4.18 ve 4.19 numaralı denklemlerin ihtiva etmiş oldukları matrislerin birbirine eşitlenmesiyle sağlanmıştır.

4.18 ve 4.19 numaralı matrisler birbirine eşitlenir ve eşitliğin her iki tarafıda ${}^0_1 T$ matrisinin tersi olan ${}^0_1 T^{-1}$ matrisi ile çarparak her iki taraf birbirine eşitlenmiştir.

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ denklemlerini elde etmek için denklem 4.20 kullanılmıştır[30]. Denklem 4.25, 4.28 ve 4.31 elde edilmiştir.

$${}^0_1 T^{-1} {}^B_W T = {}^1_0 T^{-1} {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \quad (4.20)$$

$${}^0_1 T^{-1} = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \cos(\theta_1) * (l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 * \cos(\theta_2)) \\ \dots & \dots & \dots & \sin(\theta_1) * (l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 * \cos(\theta_2)) \\ \dots & \dots & \dots & l_3 * \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 * \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Denklem 4.22'den elde edilen sonuç matrisinin (3,4) elemanı için

$$P_y C_1 - P_x S_1 = 0 \quad (4.23)$$

eşitliği yazıldı. Bu eşitlik kullanılarak θ_1 açısı denklem 4.24'teki gibi hesaplanır.

$$\frac{S_1}{C_1} = \frac{P_y}{P_x} \Rightarrow \theta_1 = \arctan 2(P_y, P_x) \quad (4.24)$$

Uç işlevcinin aynı noktaya iki farklı açıyla gideceği düşünüldüğünde aynı trigonometrik değeri ifade eden iki farklı denklem ortaya çıkar. Bu ifade denklem 4.25'te verilmiştir.

$$\theta_1 = \pi + \arctan 2(P_y, P_x) \quad (4.25)$$

4.22 denklemdeki çarpım matrislerinin (1,4), (2,4) ve (3,4) elemanlarının kareleri alındı ve $\cos(\theta_3)$ denklemi elde edildi.

$$C_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_2 l_3} \quad (4.26)$$

$$s_3 = \pm \sqrt{1 - c_3^2} \quad (4.27)$$

$$\theta_3 = \arctan 2(s_3; c_3) \quad (4.28)$$

θ_2 açısal değerinin konuma bağlı denklemi ise denklem 4.29'daki gibi Sciavicco ve Siciliano'nun "Modelling and Control of Robot Manipulators" isimli yayınlarında antropomorfik manipülatörler için ters kinematik bölümünde kullanılan denklemlerle de

onaylanacak şekilde denklem 4.29 ve 4.30'a bağlı olarak denklem 4.31'deki gibi bulunmuştur.

$$s_2 = \frac{(l_2 + l_3 c_3)P_z - l_3 s_3 \sqrt{P_x^2 + P_y^2}}{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} \quad (4.29)$$

$$c_2 = \frac{(l_2 + l_3 c_3) \sqrt{P_x^2 + P_y^2} + l_3 s_3 P_z}{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} \quad (4.30)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(s_2; c_2) \quad (4.31)$$

θ_4 açısı haricen kontrol edileceği için ters kinematik analizde hesaplanmadı.

Hız analizi

Bilindiği gibi bir sistemin dinamik olarak ele alınmasında hareket muhakkak incelenmesi gereken bir durumdur. Hareket ise en başta hız ile ve ivme ile tanımlanır. Dönel eklemler manipülatörlerde açısal hızın ve çizgisel hızın eklemler arasında aktarılması rotasyonel hareketler yardımıyla olmaktadır. Bu nedenle her bir eksen için oluşturulan rotasyon matrisleri hareket denklemlerin oluşturulması için önemlidir. Rotasyon matrisleri aşağıda verilmiştir.

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} c1 & 0 & s1 \\ s1 & 0 & -c1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^1_0R = \begin{bmatrix} c1 & s1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ s1 & -c1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$${}^1_2R = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 \\ s2 & c2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^2_1R = \begin{bmatrix} c2 & s2 & 0 \\ -s2 & c2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$${}^2_3R = \begin{bmatrix} c3 & -s3 & 0 \\ s3 & c3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^3_2R = \begin{bmatrix} c3 & s3 & 0 \\ -s3 & c3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$${}^3_4R = \begin{bmatrix} c4 & -s4 & 0 \\ s4 & c4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^4_3R = \begin{bmatrix} c4 & s4 & 0 \\ -s4 & c4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Rotasyon matrisleri yardımıyla ilk açısal hızı diğer uzuvların açısal hızına çeviren denklem ifadesi 36. denklemdeki gibidir [3].

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}_i z_{i+1} \quad (4.36)$$

Lineer hız bağıntısı ise denklem 37'deki gibi ifade edilmiştir [3].

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R \left({}^i v_i + {}^i\omega_i x^i P_{i+1} \right) \quad (4.37)$$

4.36 ve 4.37 denklemlerde ${}^{i+1}_i R$: rotasyon matrisinin tersini, ${}^i\omega_i$: açısal hızın incelendiği eklemden bir önceki eklemin açısal hızı, $\dot{\theta}_{i+1}$: açısal hızın incelenmekte olduğu eklemin açısal konumunun türevi, ${}^i v_i$: çizgisel hızı incelenen eklemden bir önceki eklemin çizgisel hızı, ${}^i P_{i+1}$: hızı incelenen eklemlerle bir önceki eklemin arasındaki konum farkı

$${}^1w_1 = {}^1_0 R {}^0w_0 + \dot{\theta}_1 {}^1_0 z_1 = \begin{bmatrix} c1 & s1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ s1 & -c1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\theta}_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_1]^T \quad (4.38)$$

$${}^1v_1 = {}^1_0 R \left({}^0v_0 + {}^0w_0 * {}^0P_1 \right) = \begin{bmatrix} c1 & s1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ s1 & -c1 & 0 \end{bmatrix} ([0 \quad 0 \quad 0]^T + 0) = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (4.39)$$

$${}^2w_2 = {}^2_1 R {}^1w_1 + \dot{\theta}_2 {}^2_1 z_2 = \begin{bmatrix} c2 & s2 & 0 \\ -s2 & c2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_1]^T + \dot{\theta}_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2]^T \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} {}^2v_2 &= {}^2_1 R \left({}^1v_1 + {}^1w_1 * {}^1P_2 \right) = \begin{bmatrix} c2 & s2 & 0 \\ -s2 & c2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left([0 \quad 0 \quad 0]^T + [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_1]^T * \begin{bmatrix} l_2 c_2 \\ l_2 s_2 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \\ &= [0 \quad l_2 \dot{\theta}_1 \quad 0]^T \end{aligned} \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} {}^3w_3 &= {}^3_2 R {}^2w_2 + \dot{\theta}_3 {}^3_2 z_3 = \begin{bmatrix} c3 & s3 & 0 \\ -s3 & c3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2]^T + \dot{\theta}_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &[0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3]^T \end{aligned} \quad (4.42)$$

$${}^3v_3 = {}^3R({}^2v_2 + {}^2w_2 * {}^2P_3) = \begin{bmatrix} c3 & s3 & 0 \\ -s3 & c3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left([0 \quad l_2\dot{\theta}_1 \quad 0]^T + [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2]^T * \begin{bmatrix} l_3c3 \\ l_3s3 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} s3(l_2\dot{\theta}_1 + l_3c2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) - l_3c3s2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ c3(l_2\dot{\theta}_1 + l_3c2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) - l_3s3s2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Temel eksen olarak isimlendirdiğimiz hareketsiz eksene göre uç işlevcinin hızını belirlemek için denklem 4.44'deki ifade kullanılır.

$${}^0R = {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 {}^3R \quad (4.44)$$

$${}^0v = {}^0R {}^3v_3$$

$${}^0R = \begin{bmatrix} c3c2 & -c1s2 & s1 \\ c2s1 & -s1s2 & -c1 \\ s2 & c2 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Denklem 4.45'teki matrisle ${}^3v_3$ hız matrisinin çarpımı sonuca ulaştırmaktadır.

$${}^0v = \begin{bmatrix} c1c2(s3(l_2\dot{\theta}_1 + l_3c2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) - l_3c3s2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) - c1s2(c3(l_2\dot{\theta}_1 + l_3c2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) + l_3s2s3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \\ c2s1(s3(l_2\dot{\theta}_1 + l_3c2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) - l_3c3s2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) - s1s2(c3(l_2\dot{\theta}_1 + l_3c2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) + l_3s2s3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \\ c2(c3(l_2\dot{\theta}_1 + l_3c2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) + l_3s2s3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) + s2(s3(l_2\dot{\theta}_1 + l_3c2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) - l_3c3s2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Jakobiyen matrisinin belirlenmesi

Jakobiyen matrisi sistemin karakteristiğini belirleyen bir matristir. Özellikle sistemde her bir ekleme ortaya çıkan torkun tespit edilmesi ve her bir ekleme yüklenen kuvvetlerin hesaplanması için kullanılır.

İlk üç eklem için jakobiyen matrisini oluşturmak için aşağıdaki adımlar takip edilir [3].

$$Y = F(x) \quad (4.47)$$

Burada Y ile ifade edilen değer denklem 4.48'de verilmiştir.

$$Y = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) * (l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 * \cos(\theta_2)) \\ \sin(\theta_1) * (l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 * \cos(\theta_2)) \\ l_3 * \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 * \sin(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

X ise denklem 4.49’da verilmiştir.

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

4.47. denklem,

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (4.50)$$

olarak ya da;

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = J(x) \frac{\partial x}{\partial t} \quad (4.51)$$

olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla P_x , P_y ve P_z ‘nin zamana göre türevleri alındığında sırasıyla aşağıdaki denklemler oluşmuştur.

$$\frac{\partial y_1}{\partial t} = \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} \delta \theta_2 + \frac{\partial f_1}{\partial \theta_3} \delta \theta_3 \quad (4.52)$$

$$\frac{P_x}{\partial \theta_1} = V_{x1} = (-l_3 s_1 c_2 c_3 + l_3 s_1 s_2 s_3 - l_2 s_1 c_2) \dot{\theta}_1 = (-l_3 s_1 c_2 c_3 - l_2 s_1 c_2) \dot{\theta}_1 \quad (4.53)$$

$$\frac{P_y}{\partial \theta_1} = V_{y1} = (l_3 c_1 c_2 c_3 + l_2 c_1 c_2) \dot{\theta}_1 \quad (4.54)$$

$$\frac{P_z}{\partial \theta_1} = V_{z1} = (0) \dot{\theta}_1 \quad (4.55)$$

$$\frac{P_x}{\partial \theta_2} = V_{x2} = (-l_3 c_1 s_2 c_3 - l_2 c_1 s_2) \dot{\theta}_2 \quad (4.56)$$

$$\frac{P_y}{\partial \theta_2} = V_{y2} = (-l_3 s_1 s_{23} - l_2 s_1 s_2) \dot{\theta}_2 \quad (4.57)$$

$$\frac{P_z}{\partial \theta_2} = V_{z2} = (l_3 c_{23} + l_2 c_2) \dot{\theta}_2 \quad (4.58)$$

$$\frac{P_x}{\partial \theta_3} = V_{x3} = -l_3 c_1 s_{23} \dot{\theta}_3 \quad (4.59)$$

$$\frac{P_y}{\partial \theta_3} = V_{y3} = -l_3 s_1 s_{23} \dot{\theta}_3 \quad (4.60)$$

$$\frac{P_z}{\partial \theta_3} = V_{z3} = l_3 c_{23} \dot{\theta}_3 \quad (4.61)$$

4.53, 4.54 ...4.61 denklemlerinden elde edildiğine göre jakobiyen matrisi denklem 4.62’de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-l_3 s_1 c_{23} - l_2 s_1 c_2) & (-l_3 c_1 s_{23} - l_2 c_1 s_2) & -l_3 c_1 s_{23} \\ (l_3 c_1 c_{23} + l_2 c_1 c_2) & (-l_3 s_1 s_{23} - l_2 s_1 s_2) & -l_3 s_1 s_{23} \\ 0 & (l_3 c_{23} + l_2 c_2) & l_3 c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (4.62)$$

$${}^0 J = \begin{bmatrix} (-l_3 s_1 c_{23} - l_2 s_1 c_2) & (-l_3 c_1 s_{23} - l_2 c_1 s_2) & -l_3 c_1 s_{23} \\ (l_3 c_1 c_{23} + l_2 c_1 c_2) & (-l_3 s_1 s_{23} - l_2 s_1 s_2) & -l_3 s_1 s_{23} \\ 0 & (l_3 c_{23} + l_2 c_2) & l_3 c_{23} \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

Jakobyen matrisi denklem 4.63’teki gibi bulunmuştur. Sciavicco ve Siciliano’nun “Modelling and Control of Robotic Manipulators” isimli kitaplarında bulunduğu gibi Jakobyen matrisi denklem 4.64’deki gibi yazılır [28].

$$J = \begin{bmatrix} (-l_3 s_1 c_{23} - l_2 s_1 c_2) & (-l_3 c_1 s_{23} - l_2 c_1 s_2) & -l_3 c_1 s_{23} \\ (l_3 c_1 c_{23} + l_2 c_1 c_2) & (-l_3 s_1 s_{23} - l_2 s_1 s_2) & -l_3 s_1 s_{23} \\ 0 & (l_3 c_{23} + l_2 c_2) & l_3 c_{23} \\ 0 & s_1 & s_1 \\ 0 & -c_1 & -c_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

Tekil nokta analizi

Tekil nokta olarak ifade edilen konum esasında kinematik denklemlerin çözümünde çözümün sonsuza gittiği noktalarlardır. Robot tasarımında bu noktalardan kaçınmak dikkat edilmesi gereken temel konulardandır. Bu noktalardan kaçınmak için takip edilmesi gereken bir yöntem vardır. Jakobiyen matrisinin determinantının sıfıra eşit olması durumunda singülarite meydana gelir. Bu eşitliğin çözümü tasarımcıya hangi noktalardan kaçınması gerektiği hakkında bilgi vermektedir [47].

$$|{}^0J| = \begin{vmatrix} (-l_3s1c23 - l_2s1c2) & (-l_3c1s23 - l_2c1s2) & -l_3c1s23 \\ (l_3c1c23 + l_2c1c2) & (-l_3s1s23 - l_2s1s2) & -l_3s1s23 \\ 0 & (l_3c23 + l_2c2) & l_3c23 \\ (-l_3s1c23 - l_2s1c2) & (-l_3c1s23 - l_2c1s2) & -l_3c1s23 \\ (l_3c1c23 + l_2c1c2) & (-l_3s1s23 - l_2s1s2) & -l_3s1s23 \end{vmatrix} \quad (4.65)$$

$$\det(J) = -l_2l_3s3(l_2c2 + l_3c23) \quad (4.66)$$

Tekil noktadan kaçınmak için determinanı sıfıra eşitleyerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

l_2 ve l_3 değerleri hiçbir zaman sıfırlanamayacağına göre burada $s3=0$ veya $l_2c2 + l_3c23 = 0$ olması gerekir. Bu esaslar dikkate alındığında, $\theta_3=0$ ve $\theta_3=\pi$ değerlerini almamalıdır. Bunun yanı sıra $P_x=P_y=0$ değerlerinden kaçınılmalıdır. Bu duruma manipülatörün geometrisi de izin vermeyecektir.

Kinematik anlamda benimsenmesi gereken tekil nokta değerleri böyledir. Buna ek olarak teknik anlamda ulaşılmaması gereken açı değerleri vardır. Bu değerler tamamıyla manipülatörün geometrik özelliklerine göre belirlendi. Geometrik kısıtlamalara göre θ_2 ve θ_3 'ün çalışma aralıkları şöyledir:

$$\theta_2=0 \sim 89^\circ \text{ ve } \theta_3=-90^\circ \sim -160^\circ \quad (4.67)$$

Bu aralıklar kabul edilerek buna göre manipülatörün programlanması gerçekleştirildi. Bu değerlerin dışına çıkılması durumunda manipülatör eklemleri arasında çarpma meydana gelmektedir.

Ters hız analizi

Hız analizinde jakobiyen matrisiyle açısıl konumun türevinin çarpılması işlemiyle her bir eklemin çizgisel hız değerleri tespit edildi. Ters hız analizinde çizgisel hız ve jakobiyenin tersinin çarpılmasından açısıl konum türevi bulunur [22, 48].

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = J(x) \frac{\partial x}{\partial t} \rightarrow \begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \end{bmatrix} = J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = J(x)^{-1} \frac{\partial Y}{\partial t} \rightarrow \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = J(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

$$J(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{s_1}{l_2 l_3 s_3} & \frac{(2c_1(l_3 s_{23} + l_2 s_2))}{(l_2 l_3 (l_2 s_{23} - l_3 s_2 - l_2 s(\theta_2 - \theta_3) + l_3 s(\theta_2 + 2\theta_3)))} & \frac{(2s_{23}c_1)}{(l_2 (l_2 s_{23} - l_3 s_2 - l_2 s(\theta_2 - \theta_3) + l_3 s(\theta_2 + 2\theta_3)))} \\ \frac{-(2c_1(l_3 c_{23} + l_2 c_2))}{(l_2 l_3 (l_2 s_{23} - l_3 s_2 - l_2 s(\theta_2 - \theta_3) + l_3 s(\theta_2 + 2\theta_3)))} & \frac{(2s_1(l_3 s_{23} + l_2 s_2))}{(l_2 l_3 (l_2 s_{23} - l_3 s_2 - l_2 s(\theta_2 - \theta_3) + l_3 s(\theta_2 + 2\theta_3)))} & \frac{(2s_{23}s_1)}{(l_2 (l_2 s_{23} - l_3 s_2 - l_2 s(\theta_2 - \theta_3) + l_3 s(\theta_2 + 2\theta_3)))} \\ 0 & \frac{-1}{l_2 l_3 s_3} & \frac{-c_{23}/(l_2 ((l_2 s_{23})}{2 - (l_3 s_2)/2 - (l_2 s(\theta_2 - \theta_3))/2 + (l_3 s(\theta_2 + 2\theta_3))/2))} \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

Gerekli işlemler uygulandıktan sonra $\dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$, $\dot{\theta}_3$ değerleri aşağıdaki denklemlerde görüldüğü gibi bulunur. Burada V_x , V_y ve V_z değerleri uç işlevcinin çizgisel hızını ifade etmektedir.

$$\dot{\theta}_1 = \frac{(V_x l_3 s(\theta_2 + 2\theta_3)s_1 - V_x l_2 s(\theta_2 - \theta_3)s_1 + V_x l_2 s_{23}s_1 - V_x l_3 s_1 s_2 + 2V_y l_3 s_{23}c_1 s_3 + 2V_z l_3 s_{23}c_1 s_3 + 2V_y l_2 c_1 s_2 s_3)}{(l_2 l_3 s_3 (l_2 s_{23} - l_3 s_2 - l_2 s(\theta_2 - \theta_3) + l_3 s(\theta_2 + 2\theta_3)))} \quad (4.71)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{(2(V_y l_2 s_1 s_2 - V_x l_2 c_1 c_2 - V_x l_3 c_1 c_2 c_3 + V_x l_3 c_1 s_2 s_3 + V_y l_3 c_2 s_1 s_3 + V_y l_3 c_3 s_1 s_2 + V_z l_3 c_2 s_1 s_3 + V_z l_3 c_3 s_1 s_2))}{(l_2 l_3 (2l_2 c_2 s_3 - 2l_3 s_2 + 2l_3 c_3^2 s_2 + 2l_3 c_2 c_3 s_3))} \quad (4.72)$$

$$\dot{\theta}_3 = \frac{-V_y}{(l_2 l_3 s_3)} - \frac{(V_z c_{23})}{(l_2 ((l_2 s_{23})/2 - (l_3 s_2)/2 - (l_2 s(\theta_2 - \theta_3))/2 + (l_3 s(\theta_2 + 2\theta_3))/2))} \quad (4.73)$$

Statik kuvvet analizi

Statik analizde önemli olan kuvvet ve tork değerlerinin belirlenmesidir ve bunun için kullanılan içe iterasyon yöntemi yardımıyla gerekli inceleme yapılmıştır. Uç işlevciye uygulanan kuvvet nedeniyle vektörel bir büyüklük ortaya çıkar. Bu vektörün tanımını üç eksen üzerinde yani x,y ve z eksenlerinde yapılabilir [22, 41].

$$\begin{aligned} {}^i f_i &= {}^i R \begin{bmatrix} {}^{i+1} f_{i+1} \end{bmatrix} \\ {}^i n_i &= {}^i R \begin{bmatrix} {}^{i+1} n_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^i P_{i+1} \end{bmatrix} \times {}^i f_i \end{aligned} \quad (4.74)$$

Burada ${}^{i+1} f_{i+1}$ değeri kuvvet değeri incelenmekte olan eklemden sonraki eklemden oluşan statik yükü ifade etmektedir. ${}^{i+1} n_{i+1}$ değeri ise tork incelemesi yapılan eklemden bir sonraki eklemin tork değerini ifade etmektedir. ${}^i R$: rotasyon matrisi, ${}^i P_{i+1}$: iki eklemler arasındaki konum matrisidir.

$${}^4 F_4 = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad {}^4 N_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

Uç işlevcinin üzerine binen yük ve tork parametrik olarak verildiğinde denklem 4.75'deki gibi kabul edilmelidir. Bu değerlere göre üçüncü eklemden oluşan kuvvet ve tork denklemleri denklem 4.76 ve 4.77'de görülmektedir.

$${}^3 f_3 = {}^3 R {}^4 f_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x c_4 - F_y s_4 \\ F_y c_4 + F_x s_4 \\ F_z \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

$${}^3 n_3 = {}^3 R {}^4 n_4 + {}^3 P_4 \times {}^3 f_3 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_x c_4 - F_y s_4 \\ F_y c_4 + F_x s_4 \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.77)$$

Üçüncü eklemden oluşan tork ve kuvvet etkisine bağlı olarak ikinci eklemden oluşan tork ve kuvvet denklemleri 4.78 ve 4.79'a göre belirlendi.

$${}^2 f_2 = {}^2 R {}^3 f_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x c_4 - F_y s_4 \\ F_y c_4 + F_x s_4 \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x c_3 c_4 - F_y s_3 c_4 \\ F_y c_3 c_4 + F_x s_3 c_4 \\ F_z \end{bmatrix} \quad (4.78)$$

$${}^2 n_2 = {}^2 R {}^3 n_3 + {}^2 P_3 \times {}^2 f_2 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_3 c_3 \\ l_3 s_3 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_x c_3 c_4 - F_y s_3 c_4 \\ F_y c_3 c_4 + F_x s_3 c_4 \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_z l_3 s_3 \\ l_3 c_3 (F_y c_3 c_4 + F_x s_3 c_4) \\ l_3 (F_y c_3 c_4 + F_x s_3 c_4) \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

Elde edilen verilere göre eklemlerin başlangıç noktasında olan ve esas en büyük torka ve yüke maruz kalan birinci eklemin kuvvet ve tork denklemleri denklem 4.80 ve 4.81’de belirtildi.

$${}^1f_1 = {}^2R {}^2f_2 = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 \\ s2 & c2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x c34 - F_y s34 \\ F_y c34 + F_x s34 \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c2(F_x c34 - F_y s34) - s2(F_y c34 + F_x s34) \\ c2(F_y c34 + F_x s34) + s2(F_x c34 - F_y s34) \\ F_z \end{bmatrix} \quad (4.80)$$

$${}^1n_1 = {}^2R {}^2n_2 + {}^1P_2 \times {}^1f_1 = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 \\ s2 & c2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_z l_3 s3 \\ l_3 c3(F_y c34 + F_x s34) \\ l_3(F_y c34 + F_x s34) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c2(F_x c34 - F_y s34) - s2(F_y c34 + F_x s34) \\ c2(F_y c34 + F_x s34) + s2(F_x c34 - F_y s34) \\ F_z \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} l_3 s1(F_y c34 + F_x s34) + F_z l_2 s2 + F_z l_3 c1 s3 \\ F_z l_3 s1 s3 - l_2 c2 c2(F_y c34 + F_x s34) + s2(F_x c34 - F_y s34) - l_3 c1(F_y c34 + F_x s34) \\ F_y c34 + F_x s34(l_2 + l_3 c3) \end{bmatrix} \quad (4.81)$$

Bu yöntemle bulunmuş olan kuvvetler sistemin durağan halde eklemlerde oluşacak olan kuvvetlerdir.

Kuvvet analizi için jakobiye matrisinin farklı bir kullanım alanı vardır. Esasında jakobiye matrisinin transpozunu ve kuvvet tork matrisinin çarpımını eklemlerde oluşan tork değerlerini vermektedir.

Bu esas dikkate alınarak denklem 4.82 uygulandı [28].

$$\tau = {}^0J^T {}^0F \quad (4.82)$$

Burada kullanılan jakobiye matrisi denklem 4.83’te verildi.

$${}^0J^T = \begin{bmatrix} -l_3 \cdot c23 \cdot s1 - l_2 \cdot c2 \cdot s1 & l_3 \cdot c23 \cdot c1 + l_2 \cdot c1 \cdot c2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -l_3 \cdot s23 \cdot c1 - l_2 \cdot c1 \cdot s2 & -l_3 \cdot s23 \cdot s1 - l_2 \cdot s1 \cdot s2 & l_3 c23 + l_2 c2 & s1 & -c1 & 0 \\ -l_3 \cdot s23 \cdot c1 & -l_3 \cdot s23 \cdot s1 & l_3 \cdot c23 & s1 & -c1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.83)$$

Burada l_3 :ikinci uzvun uzunluk değeri, l_2 :birinci uzvun uzunluk değeri, $c23:\cos(\theta_2+\theta_3)$, $s23:\sin(\theta_2+\theta_3)$, $s1:\sin(\theta_1)$, $c1:\cos(\theta_1)$ değerlerini ifade etmektedir.

Uç işlevci için oluşan F kuvveti denklem 4.84'teki gibi parametrik olarak değişebilen bir değer olarak kabul edilmiştir.

$${}^0F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.84)$$

Böylece her bir eklemden ulaşılması gereken konum değerinde ihtiyaç duyulan tork denklemi elde edilmiştir.

$$\tau = \begin{bmatrix} F_y \cdot (l_3 \cdot c23 \cdot c1 + F_x(l_3 \cdot c23 \cdot s1 + l_2 \cdot c2 \cdot s1)) \\ F_z(l_3 \cdot c23 + l_2 \cdot c2) - F_y \cdot (l_3 \cdot s23 \cdot s1 + l_2 \cdot s1 \cdot s2) - F_x(l_3 \cdot s23 \cdot c1 + l_2 \cdot c1 \cdot s2) \\ F_z \cdot l_3 \cdot c23 - F_x \cdot l_3 \cdot s23 \cdot c1 - F_y \cdot l_3 \cdot s23 \cdot s1 \end{bmatrix} \quad (4.85)$$

Denklem 4.85 robotun istenen noktaya ulaşması için konum girdisine bağlı olarak ve açısal konumlara bağlı olarak o konuma ulaşmak için oluşan torkun denklem ifadesidir.

İvme ve açısal ivme analizi (dinamik analiz)

Bu bölümde, daha önceki bölümde hız analizi yapılan sistemin ivme analizi üzerinde çalışıldı. İvme analizinin temel problemi her bir eksenin uç işlevcinin seçilen bir hız değeri ile hareket etmesi için eklemlerde hangi ivmelenmelerin olması gerektiğini kontrol etmektir. Tez çalışmasına teorik olarak katkı sağlaması açısından ivme analizi üzerinde çalışılmıştır. Simülasyon işlemlerinde ivme analizleri kullanılmamıştır. Çünkü prototip üretim safhasında kılavuz çekme işlemi ve manipülatörün hareketi için sabit hızlar kullanılmıştır. En temel dinamik kavramlarından olan hızın türevinin ivmeye eşit olduğu düşünülürse, ilk etapta ivmelenmenin ve dinamik değişimlerin sistem üzerinde çok fazla etkisi olmamaktadır.

Bir robot kola ait hareket denklemi matris formunda denklem 4.86'daki gibi ifade edilmektedir [41].

$$M(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau_v + J^T F \quad (4.86)$$

Bu denklemde τ_v : sistemin toplam tork değerini, J^T : jakobiyen matrisinin transpozunu M: kütle matrisini, B:Corilois ve merkez kaç vektörünü ve G:yerçekimi vektörünü ifade etmektedir.

Newton-Euler metodu kullanılarak hareket denklemleri elde edilebilir. Denklem 4.87’de bu denklemler görülmektedir.

$$\begin{aligned} m_i \dot{v}_{ci} &= F_i \\ I_{ci} \dot{\omega}_i + \omega_i \times I_{ci} \omega_i &= N_i \end{aligned} \quad (4.87)$$

Denklem 4.87’de m: uzuv kütle değerlerini, I_{ci} : atalet matrisini, $\dot{\omega}_i$:açısal ivme değerini, ω_i :açısal hız değerini, $\dot{v}_{ci}$: çizgisel ivme değerini ifade etmektedir.

Bir manipülatörün hareket denklemleri elde edilmek isteniyorsa manipülatörün konum, hız ve ivmesinin belirlenmesi gerekmektedir. Konum için transformasyon matrisleri kullanılırken hız ve ivme için içe iterasyon metodu kullanılmaktadır.

Açısal hız, çizgisel hız ve kütle merkezinin çizgisel hızları için denklem 4.88, 4.89, 4.90, 4.91, 4.92, 4.93 ve 4.94 elde edilmelidir [41].

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^i R^{i+1} \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}z_{i+1} \quad (4.88)$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^i R^{i+1} \dot{\omega}_i + {}^i R^{i+1} \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}z_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}z_{i+1} \quad (4.89)$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^i R^{i+1} \left({}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1} \right) \quad (4.90)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^i R^{i+1} \left({}^i \dot{\omega}_i \times {}^i P_{i+1} + {}^i \omega_i \times \left({}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1} \right) + {}^i \dot{v}_i \right) \quad (4.91)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{c_{i+1}} = {}^i \dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{c_{i+1}} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times \left({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{c_{i+1}} \right) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \quad (4.92)$$

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}v_{c_{i+1}} \quad (4.93)$$

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{c_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} X^{c_{i+1}}I^{i+1}\omega_{i+1} \quad (4.94)$$

İvme analizinde kullanılmakta olan rotasyon matrisleri denklem 4.32, 4.33, 4.34 ve 4.35'te verilmiştir. Açısal hız ve çizgisel hız denklemleri, denklem 4.38, 4.40, 4.42 ve denklem 4.39, 4.41 ve 4.43'te verilmiştir.

Şekil 4.12'de sistemin çubuk mekanizması şeklinde sadeleştirilmiş hali ve uzuvları görülmektedir. Bu şekilde l_2 ile ifade edilen uzuv birinci uzuvdur. Birinci uzuv için ivme analiz denklemleri oluşturulmuştur.

Birinci uzuv için ($i=0$) açısal ivme denklemi, çizgisel ivme ve kütle merkezi denklemleri denklem 4.95...4.101'deki gibidir.

$${}^1\dot{\omega}_1 = {}^1_0R {}^0\dot{\omega}_0 + {}^1_0R {}^0\omega_0 \times {}^1_1z_1 + \ddot{\theta}_1 {}^1_1z_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (4.95)$$

$${}^1\dot{\omega}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix}^T \quad (4.96)$$

$${}^1\dot{v}_1 = {}^1_0R \left({}^0\dot{\omega}_0 \times {}^0P_1 + {}^0\omega_0 \times ({}^0\omega_0 \times {}^0P_1) + {}^0\dot{v}_0 \right) = [gs_1 \quad 0 \quad gc_1]^T \quad (4.97)$$

$${}^1\dot{v}_{c_1} = {}^1\dot{\omega}_1 \times {}^1P_{c_1} + {}^1\omega_1 \times ({}^1\omega_1 \times {}^1P_{c_1}) + {}^1\dot{v}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} gs_1 \\ 0 \\ gc_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} gs_1 \\ 0 \\ gc_1 \end{bmatrix} \quad (4.98)$$

$${}^1F_1 = m_1 {}^1\dot{v}_{c_1} = \begin{bmatrix} m_1 gs_1 \\ 0 \\ m_1 gc_1 \end{bmatrix} \quad (4.99)$$

$${}^1N_1 = {}^{c_1}I_1 {}^1\dot{\omega}_1 + {}^1\omega_1 X^{c_1}I^1\omega_1 \quad (4.100)$$

$${}^1N_1 = 0 \quad (4.101)$$

İkinci uzuv için ($i=1$) ivme denklemleri denklem 4.102...'deki gibidir. $i=1$ ise ${}^2\omega_2$, ${}^2\dot{\omega}_2$ ve ${}^2\dot{v}_{c_2}$ değerleri denklemlerde belirleyici elemanlardır.

$${}^2\dot{\omega}_2 = {}^2_1\dot{\omega}_1 + {}^2_1R^1\dot{\omega}_1 x {}^2_2\dot{\theta}_2 z_2 + \ddot{\theta}_2 {}^2_2z_2 \quad (4.102)$$

$${}^2\dot{\omega}_2 = \begin{bmatrix} c_2 & s_2 & 0 \\ -s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_2 & s_2 & 0 \\ -s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (4.103)$$

$${}^2\dot{v}_2 = {}^2_1R \left({}^1\dot{\omega}_1 x {}^1P_2 + {}^1\omega_1 x \left({}^1\omega_1 x {}^1P_2 \right) + {}^1\dot{v}_1 \right) \quad (4.104)$$

$${}^2\dot{v}_2 = \begin{bmatrix} c_2 & s_2 & 0 \\ -s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_2 c_2 \\ l_2 s_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_2 c_2 \\ l_2 s_2 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} g s_1 \\ 0 \\ g c_1 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} g c_2 x s_1 - l_2 \dot{\theta}_1^2 \\ l_2 \ddot{\theta}_1 - g s_1 s_2 \\ g c_1 \end{bmatrix} \quad (4.105)$$

$${}^2\dot{v}_{c_2} = {}^2\dot{\omega}_2 x^2 P_{c_2} + {}^2\omega_2 x \left({}^2\omega_2 x^2 P_{c_2} \right) + {}^2\dot{v}_2 \quad (4.106)$$

$${}^2\dot{v}_{c_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k m x \\ k m y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k m x \\ k m y \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} g c_2 x s_1 - l_2 \dot{\theta}_1^2 \\ l_2 \ddot{\theta}_1 - g s_1 s_2 \\ g c_1 \end{bmatrix} \quad (4.107)$$

$${}^2\dot{v}_{c_2} = \begin{bmatrix} g^* \frac{\sin(2\theta_2) - k m y^* (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) - k m x^* (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - l_2^* \dot{\theta}^2}{2} \\ k m x^* ((\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + l_2^* \ddot{\theta}_1 - k m y^* (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - g^* s_1 s_2) \\ g^* c_1 \end{bmatrix} \quad (4.108)$$

$${}^2F_2 = m_2 {}^2\dot{v}_{c_2} = \begin{bmatrix} m_2 g c_2 s_1 \\ m_2 g s_1 s_2 \\ m_2 g c_1 \end{bmatrix} \quad (4.109)$$

$${}^2N_2 = {}^{c_2}I_2 {}^2\dot{\omega}_2 + {}^2\omega_2 x {}^{c_2}I^2 \omega_2 \quad (4.110)$$

$${}^{c_2}I_2 = \begin{bmatrix} I_{xx_2} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy_2} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz_2} \end{bmatrix} \quad (4.111)$$

$${}^2\mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \text{Izz}_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \end{bmatrix} \quad (4.112)$$

Denklem 4.108’de kmx ve kmy değerleri uzvun merkez konumunu belirtmektedir.

Üçüncü uzuv için (i=2) ivme denklemleri denklem 4.113,...’deki gibidir.

$${}^3\dot{\omega}_3 = {}^3\mathbf{R}^2\dot{\omega}_2 + {}^3\mathbf{R}^2\omega_2 \dot{\theta}_3 {}^3\mathbf{z}_3 + \ddot{\theta}_3 {}^3\mathbf{z}_3 \quad (4.113)$$

$${}^3\dot{\omega}_3 = \begin{bmatrix} c_3 & s_3 & 0 \\ -s_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_3 & s_3 & 0 \\ -s_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (4.114)$$

$${}^3\dot{\omega}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (4.115)$$

$${}^3\dot{\mathbf{v}}_3 = {}^3\mathbf{R} \left({}^2\dot{\omega}_2 \mathbf{x}^2 \mathbf{P}_3 + {}^2\omega_2 \mathbf{x} \left({}^2\omega_2 \mathbf{x}^2 \mathbf{P}_3 \right) + {}^2\dot{\mathbf{v}}_2 \right) \quad (4.116)$$

$${}^3\dot{\mathbf{v}}_3 = \begin{bmatrix} c_3 & s_3 & 0 \\ -s_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} gc_2 x s_1 - l_2 \dot{\theta}_1^2 \\ l_2 \ddot{\theta}_1 - gs_1 s_2 \\ gc_1 \end{bmatrix} \right] \quad (4.117)$$

$${}^3\dot{\mathbf{v}}_3 = \begin{bmatrix} s_3 * (l_2 \ddot{\theta}_1 - l_3 s_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - gs_1 s_2 + l_3 c_3 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) - c_3 (l_2 \dot{\theta}_1^2 + l_3 c_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - gc_2 s_1 + l_3 s_3 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) \\ l_2 * s_3 \dot{\theta}_1^2 + l_3 \ddot{\theta}_1 + l_3 \ddot{\theta}_2 + l_2 \ddot{\theta}_1 c_3 - gc_2 s_1 s_3 - gc_3 s_1 s_2 \\ gc_1 \end{bmatrix} \quad (4.118)$$

$${}^3\dot{\mathbf{v}}_{c_3} = {}^3\dot{\omega}_3 \mathbf{x}^3 \mathbf{P}_{c_3} + {}^3\omega_3 \mathbf{x} \left({}^3\omega_3 \mathbf{x}^3 \mathbf{P}_{c_3} \right) + {}^3\dot{\mathbf{v}}_3 \quad (4.119)$$

$$\begin{aligned}
{}^3\dot{\mathbf{v}}_{c_3} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_{mx2} \\ k_{my2} \\ 0 \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_{mx2} \\ k_{my2} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \\
&+ \begin{bmatrix} s_3(l_2\ddot{\theta}_1 - l_3s_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - g s_1s_2 + l_3c_3(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) - c_3(l_2\dot{\theta}_1^2 + l_3c_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - g c_2s_1 + l_3s_3(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) \\ l_2^*s_3\dot{\theta}_1^2 + l_3\ddot{\theta}_1 + l_3\ddot{\theta}_2 + l_2\ddot{\theta}_1c_3 - g c_2s_1s_3 - g c_3s_1s_2 \\ g c_1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.120}$$

$${}^3\dot{\mathbf{v}}_{c_3} = \begin{bmatrix} s_3(l_2\ddot{\theta}_1 - l_3s_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - g s_1s_2 + l_3c_3(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) - k_{my2}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) \\ -c_3(l_2\dot{\theta}_1^2 + l_3c_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - g c_2s_1 + l_3s_3(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) - k_{mx2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \\ l_3\ddot{\theta}_1 + l_3\ddot{\theta}_2 + k_{mx2}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - k_{my2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + l_2\ddot{\theta}_1c_3 + l_2\dot{\theta}_1^2s_3 - g c_2s_1s_3 - g c_3s_1s_2 \\ g c_1 \end{bmatrix} \tag{4.121}$$

$$\begin{aligned}
{}^3\mathbf{F}_3 &= m_3 {}^3\dot{\mathbf{v}}_{c_3} = \begin{bmatrix} m_3 A_{F3} \\ m_3 B_{F3} \\ m_3 C_{F3} \end{bmatrix} \\
A_{F3} &= \begin{bmatrix} s_3(l_2\ddot{\theta}_1 - l_3s_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - g s_1s_2 + l_3c_3(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) - k_{my2}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - c_3(l_2\dot{\theta}_1^2 \\ + l_3c_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - g c_2s_1 + l_3s_3(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) - k_{mx2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \end{bmatrix} \\
B_{F3} &= [l_3\ddot{\theta}_1 + l_3\ddot{\theta}_2 + k_{mx2}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - k_{my2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + l_2\ddot{\theta}_1c_3 + l_2\dot{\theta}_1^2s_3 - g c_2s_1s_3 - g c_3s_1s_2] \\
C_{F3} &= [g c_1]
\end{aligned} \tag{4.122}$$

$${}^3\mathbf{N}_3 = {}^{c_3} \mathbf{I}_3 {}^3\dot{\boldsymbol{\omega}}_3 + {}^3\boldsymbol{\omega}_3 \times {}^{c_3} \mathbf{I}_3 \boldsymbol{\omega}_3 \tag{4.123}$$

$${}^{c_3} \mathbf{I}_3 = \begin{bmatrix} I_{xx3} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy3} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz3} \end{bmatrix} \tag{4.124}$$

$${}^3\mathbf{N}_3 = \begin{bmatrix} I_{xx3} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy3} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{xx3} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy3} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \tag{4.125}$$

$${}^3\mathbf{N}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{zz3}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) \end{bmatrix} \tag{4.126}$$

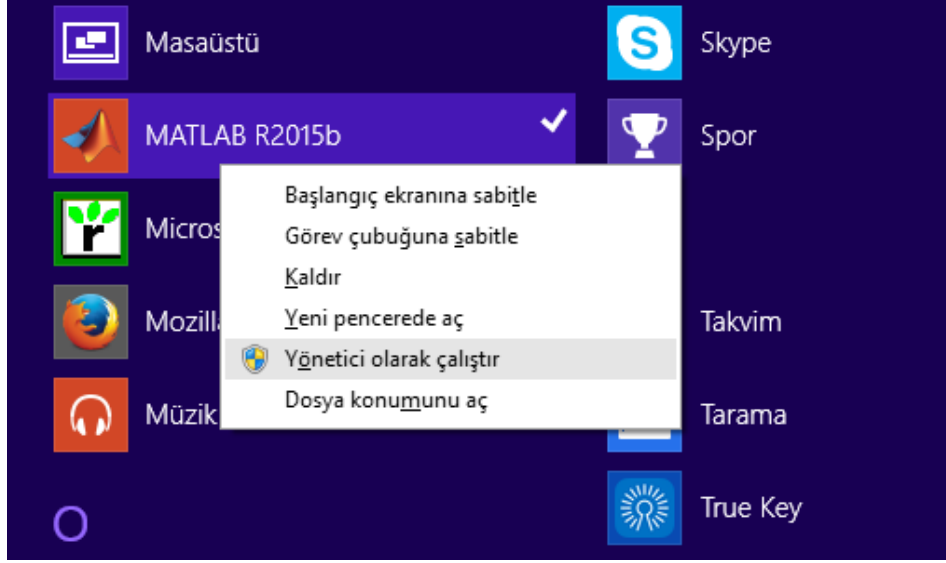
4.2.3. Kılavuz çekme manipölatörünün MATLAB Simmechanics modülü ile modellenmesi

Bu bölümde elde edilen denklemler MATLAB Simmechanics modülü ile simüle edilerek robot kolun hangi konuma ulaşması noktasında ne gibi problemlerle karşılaşılabilir analizi yapılmıştır.

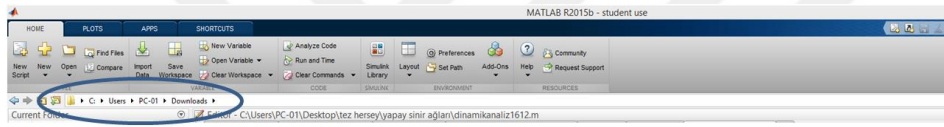
İlk olarak SolidWorks'ta gerekli sadeleştirmeler yapılarak katı model oluşturuldu, Simmechanics Link yardımıyla katı model MatLab üzerine aktarılmıştır. Burada mekanik sistemin mekanik yapısı elde edildi. Şekil 4.21'te Simmechanics'te elde edilen mekanik sistemin şeması görülmektedir.

Kılavuz çekme makinası mekanik tasarım montajı SolidWorks'tan SimMechanics'e aşağıdaki işlemlerle aktarılmıştır.

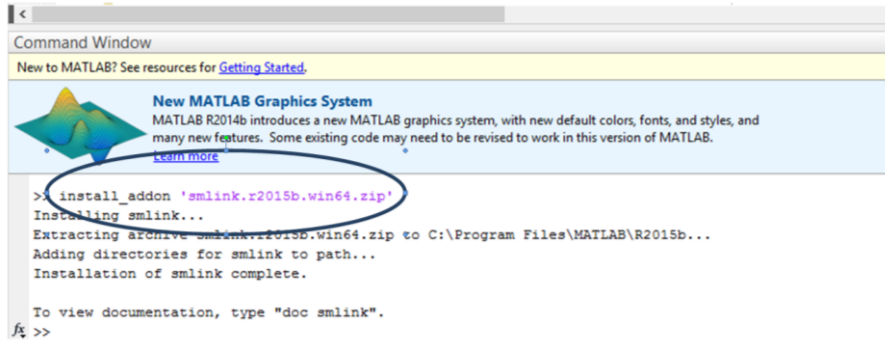
- İlk olarak MatLab yönetici olarak çalıştırılmıştır (Şekil 4.13).
- Çalışma klasörü install_addon.m kurulumunun bulunduğu klasöre getirilmiştir (Şekil 4.14).
- install_addon 'smlink.r2015a.win64.zip' komutu ile Simulink yüklenmiştir (Şekil 4.15).
- simulink_linksw komutu ile Simulink ile Solidworks arasındaki bağlantı kurulmuştur (Şekil 4.16).
- SolidWorks programı içinden Araçlar-Eklentiler sekmesi içerisinde SimMechanics aktif duruma getirilmiştir (Şekil 4.17).
- SolidWorks montajı hazırlanmış olan parça açılır. İhtiyaç durumunda daha önce montajı yapılmış olan sistem içerisinde birlikte hareket eden bölümler alt montaj olarak kayıt edilmelidir.
- Alt montaj işlemleri tamamlandıktan sonra SimMechanics Link-Export ile montajı SimMechanics'e gönderildi (Şekil 4.18). Bu sekme ile montaj dosyası MatLab dosyası olarak kayıt edilmiştir.
- MatLab-Current Folder kısmında SolidWorks'ten SimMechanics'e aktardığımız dosyanın bulunduğu klasör açılmıştır (Şekil 4.19).
- Command Window'da mech_import komutu kullanılarak montaj SimMechanics bloklarına dönüştürülmüştür (Şekil 4.20, Şekil 4.21)



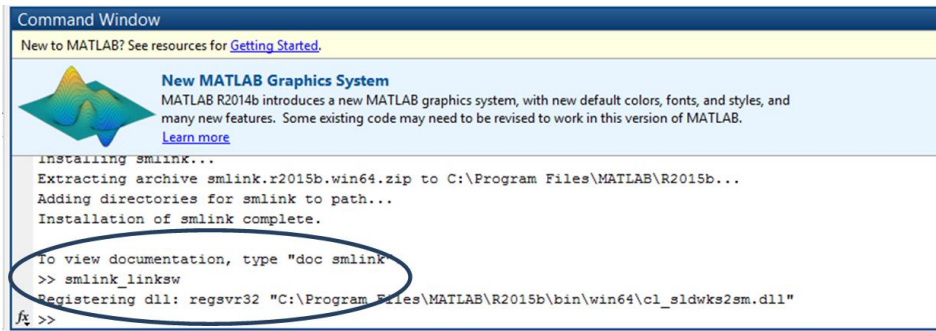
Şekil 4.13. MatLab Simulink kurulumu için MatLab'ın yönetici olarak çalıştırılması



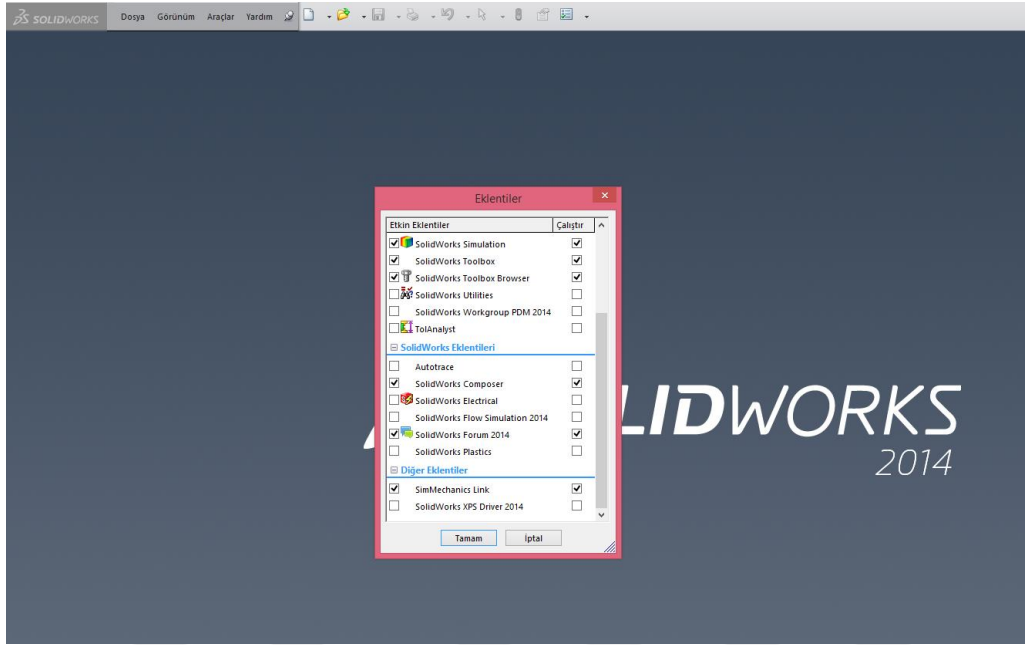
Şekil 4.14. MatLab çalışma klasörü



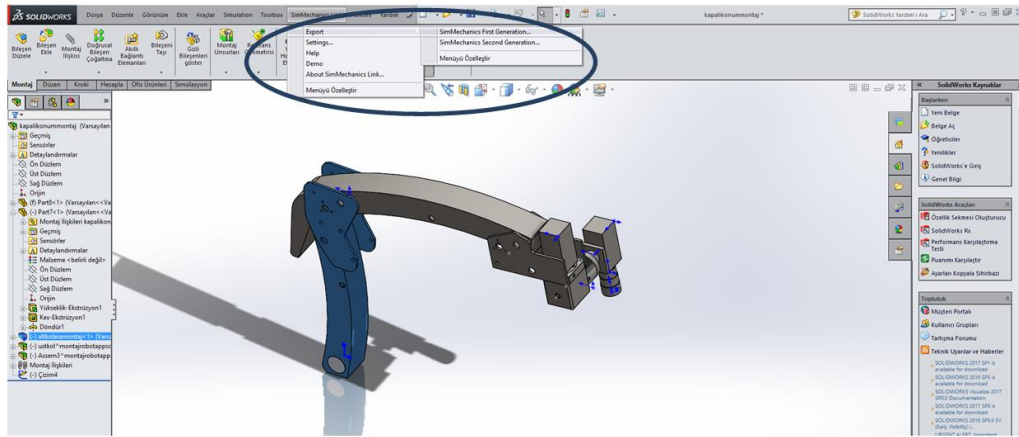
Şekil 4.15. Simulink kurulum komutu



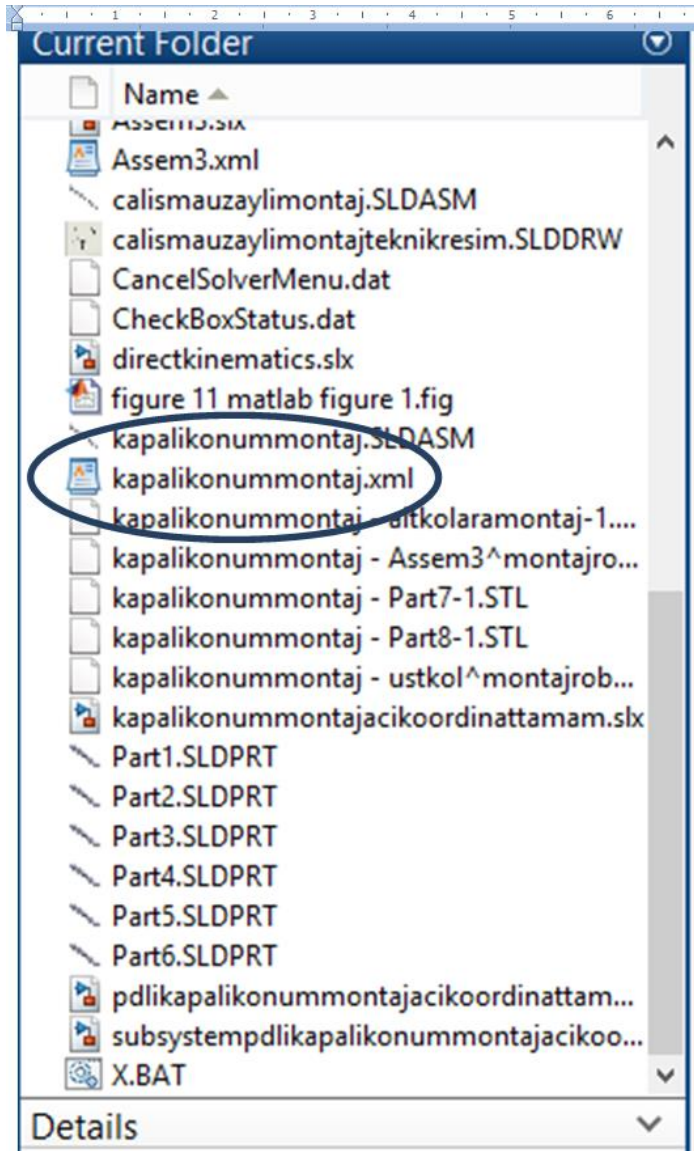
Şekil 4.16. Solidworks-Simulink bağlantı komutu



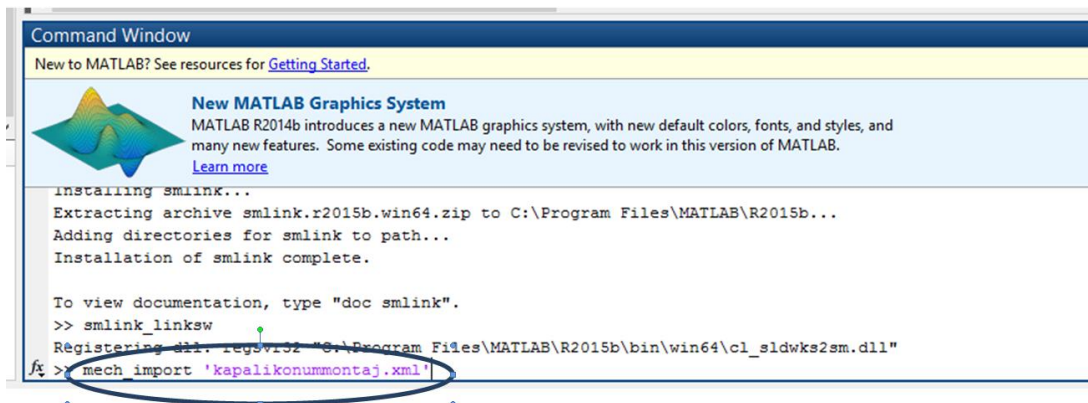
Şekil 4.17. SimMechanics aktive etmek için eklentiler sayfası



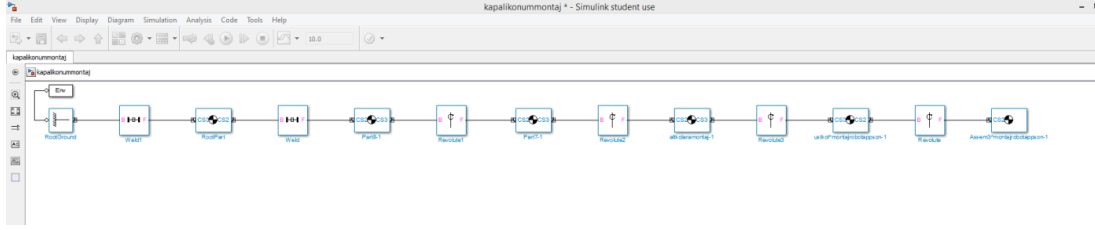
Şekil 4.18. SolidWorks'ta montajı yapılmış sistemden bir görüntü ve SimMechanics'e montajın aktarılması



Şekil 4.19. Montaj resminin current folderdaki xml uzantılı formatı



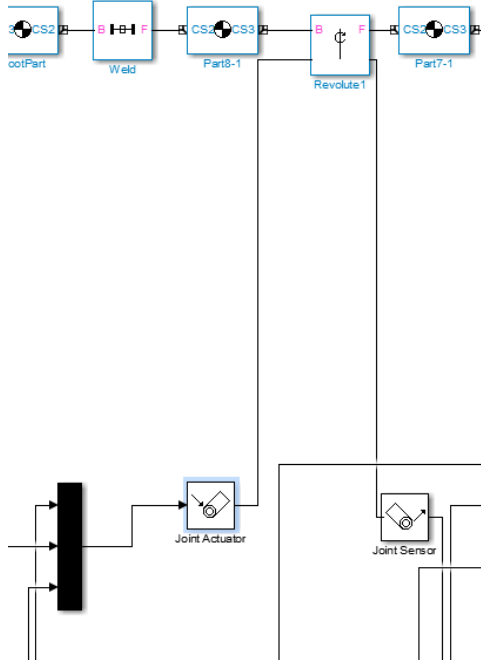
Şekil 4.20. Montaj verisini SimMechanics bloklarına dönüştüren komut



Şekil 4.21. SimMechanics'te mekanik yapının blokları

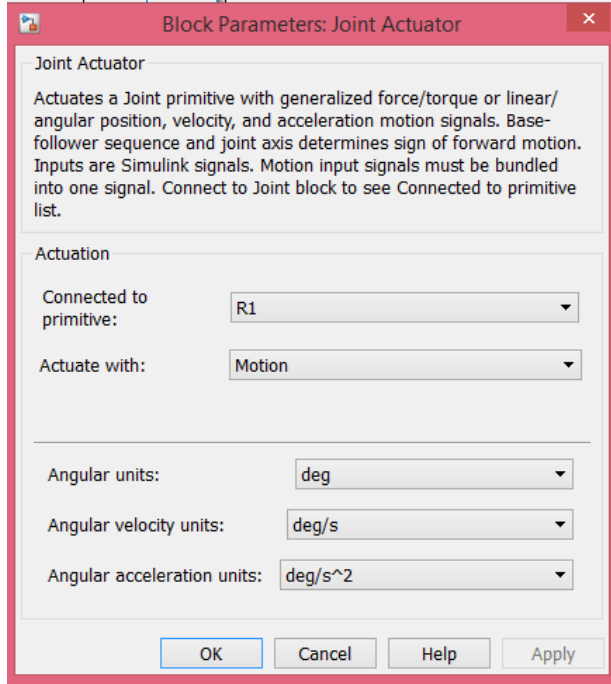
Şekil 4.21’de görüldüğü gibi robot seri olarak birbirine bağlanmış uzuvlardan ve eklemlerden oluşmaktadır. Şekilde Revolute 1, Revolute 2, Revolute 3 olarak isimlendirilen parçalar her bir dönel mafsalı ifade etmektedir. İki revolute arasında kalan kısım ise uzuvları ifade eder. Uzuvların tahriki mafsal (eklem) noktalarından sağlanacağı için uzuvlar üzerinde fazla işlem yapılmamıştır. Eklemlere yerleştirilmiş olan servo motorların kontrolü sistemin hareketinin esasını oluşturduğu için esas çalışma eklemler üzerinde yapılmıştır.

Her bir dönel mafsala birer tahrik elemanı (joint actuator) yerleştirilerek uzva dönel hareket verilmiştir. Dönel mafsala çıktı olarak da sensör bağlanmıştır. Böylece verilen hareketten elde edilen geri besleme yapılabilmiştir. Şekil 4.22’te bir dönel mafsalın girdisi ve çıktısı olan değerler görülmüştür.



Şekil 4.22. Dönel mafsala girdi olarak verilen tahrik elemanı ve çıktısı olan sensör

Burada dönel eklemin giriş bilgileri açısal konum, açısal hız ve açısal ivme cinsinden seçilmiştir. Bu seçimin yapıldığı ekran Şekil 4.23'te gösterildi ve hız esasına dayanarak kontrol sağlanmıştır.

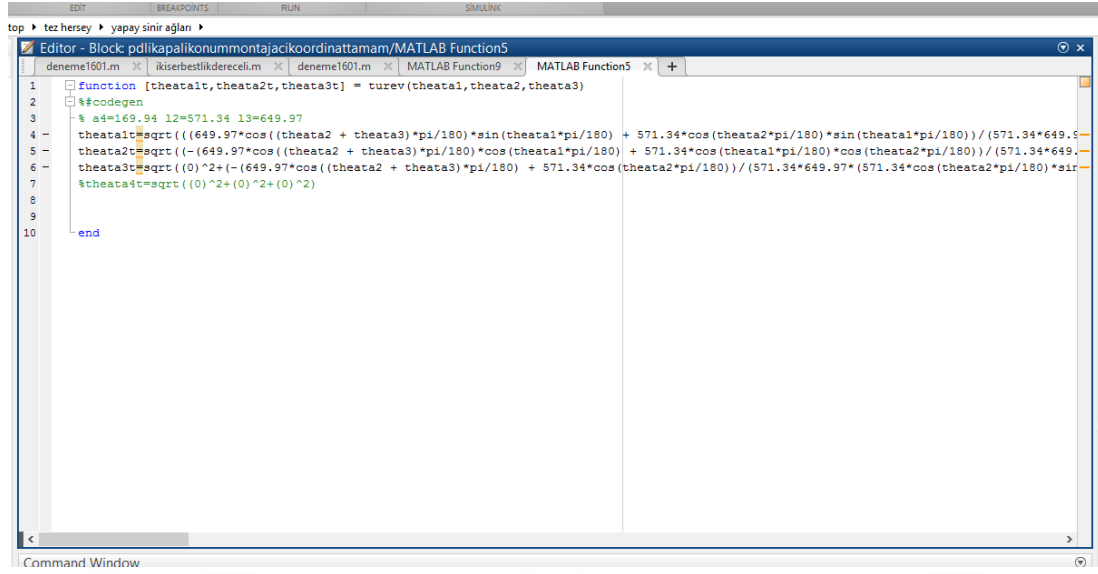


Şekil 4.23. Tahrik elemanı (joint actuator) için hangi verilerle kontrol edileceğinin seçildiği ekran

Girdi olarak şekildeki üç temel parametre esas alındı ancak manipülâtörün sabit hızlarla hareket ihtiyacı ve sabit hızın yapılan işlem için yeterliliği açısal ivmenin sıfırlanmasına sebep olmuştur. Bu değerlerin verileri hız analizi ve konum analizi ile ilgili bölümlerden alınmıştır.

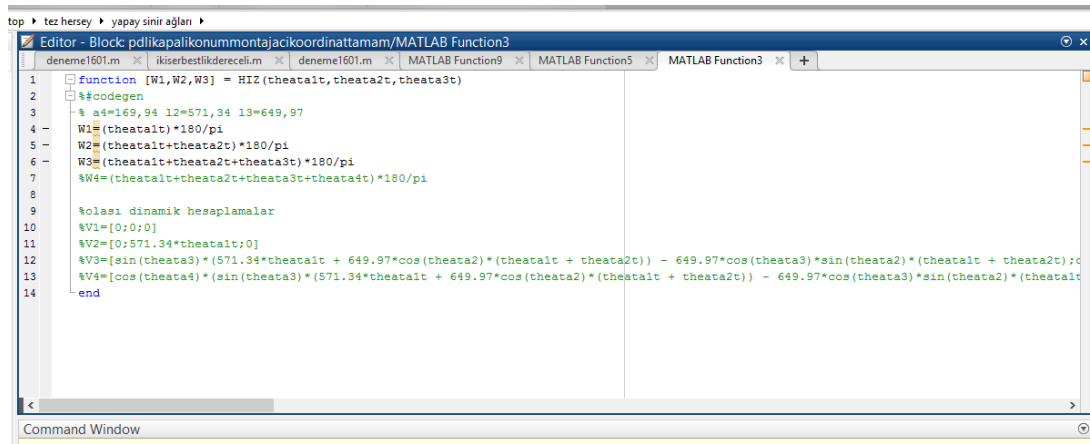
Şekil 4.24'te tahrik elemanı (joint actuator) girdi olarak besleyen matlab fonksiyonları görülmektedir. Bu fonksiyonlar içerik olarak ters kinematik denklemlerini, açısal konumun türevini, açısal hız denklemlerini içermektedir.

Şekilde görüldüğü gibi Px, Py ve Pz ifadeleri uç işlevcinin gitmesi istenilen konumun girdi bloklarıdır. Bu bloklardan ters kinematik (inversekn) fonksiyon bloğuna konum girdi olarak girer. Buradan theata1, theata2 ve theata3 açısal değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç değerleri tamamıyla konum girdisine bağlıdır ve ters kinematik ile ilgili bölümde elde edilen denklemlerin sonucunda ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.26. Açılal konum türevi (turev) fonsiyon bloğu programı

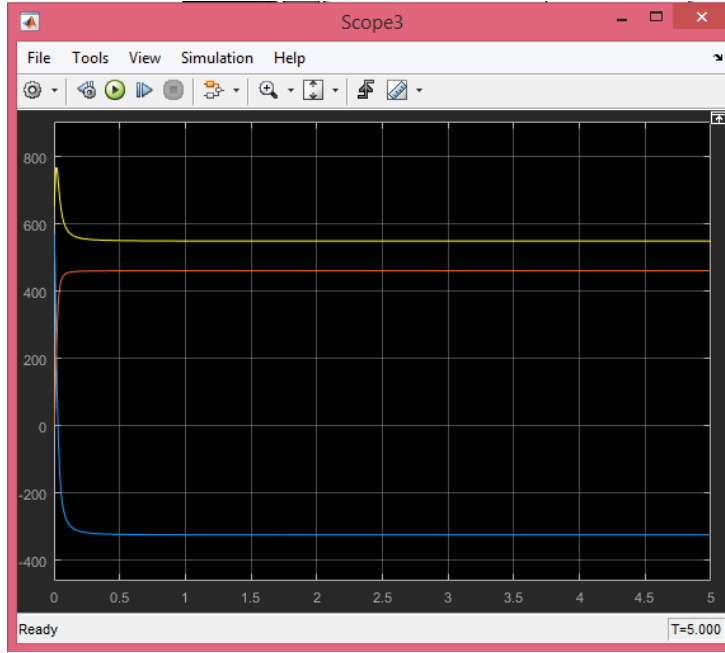
Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de fonksiyon bloklarının alt yapısındaki program verilmiştir. Bu programda program diline uygun olarak θ aç değeri yerine theata ifadesi kullanılmıştır. Programda uzuv uzunlukları parametrik ifadeyle değil sayısal değeriyle kullanılmıştır. Aç değeri ise radyan cinsine çevrilerek hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 4.27. Hız (açılal hız) fonksiyon bloğunun programı

Şekil 4.28’de manipölatör sisteminin tamamı verilmiştir. Bu sistem sayesinde konum değeri girdi olarak verilen manipölatörün uç işlevcisi istenilen konuma ulaştı, displayler yardımıyla sonuç değeri doğru olarak elde edilmiştir. Hareket zamana bağlı olarak verilmiştir. Hangi zamanda hangi konumda olması gerektiğini sınırlandıran yörünge denklemi de bu blok şeması içerisinde dikkate alınmıştır.

Şekil 4.31’de ise uç işlevcinin belirlenmiş olan açılara ulaşması esnasında zamana bağlı olarak konum değişimi verildi. Bu grafikte üstteki eğri Px konumunun zamana bağlı değişimini gösterirken, ortadaki değer Py ve alttaki değer Pz konumunun eğrisidir. Grafik uç işlevcide oluşturulmuştur, girdi konumlarla elde edilen konumların aynı oluşu denklemlerin doğruluğunu ispat etmiştir.



Şekil 4.31. Uç işlevcinin konum değişiminin zamana bağlı grafiği

4.3. Kılavuz Çekme Manipülâtörü İçin İmalat Süreci

Kılavuz çekme makinasında imalat sürecine yapılacak işin analizi ve buna bağlı tasarımın klasik robotik mantığına göre taslak tasarım çalışmaları gerçekleştirildi. Taslak tasarım ve standart tip kılavuz çekme işlemi için çalışma aralıkları düşünülerek SolidWorks katı model sac metal modülü ve montaj modülü yardımıyla katı model montaj resimleri oluşturulmuştur. Mekanik tasarım detayları “4.1. Tasarım” başlıklı bölümde detaylı olarak incelenmiştir. Bu tasarım esaslarına bağlı kalınarak mekanik aksamın ilgili tekniklerle imalatı ve montajı gerçekleştirilmiştir.

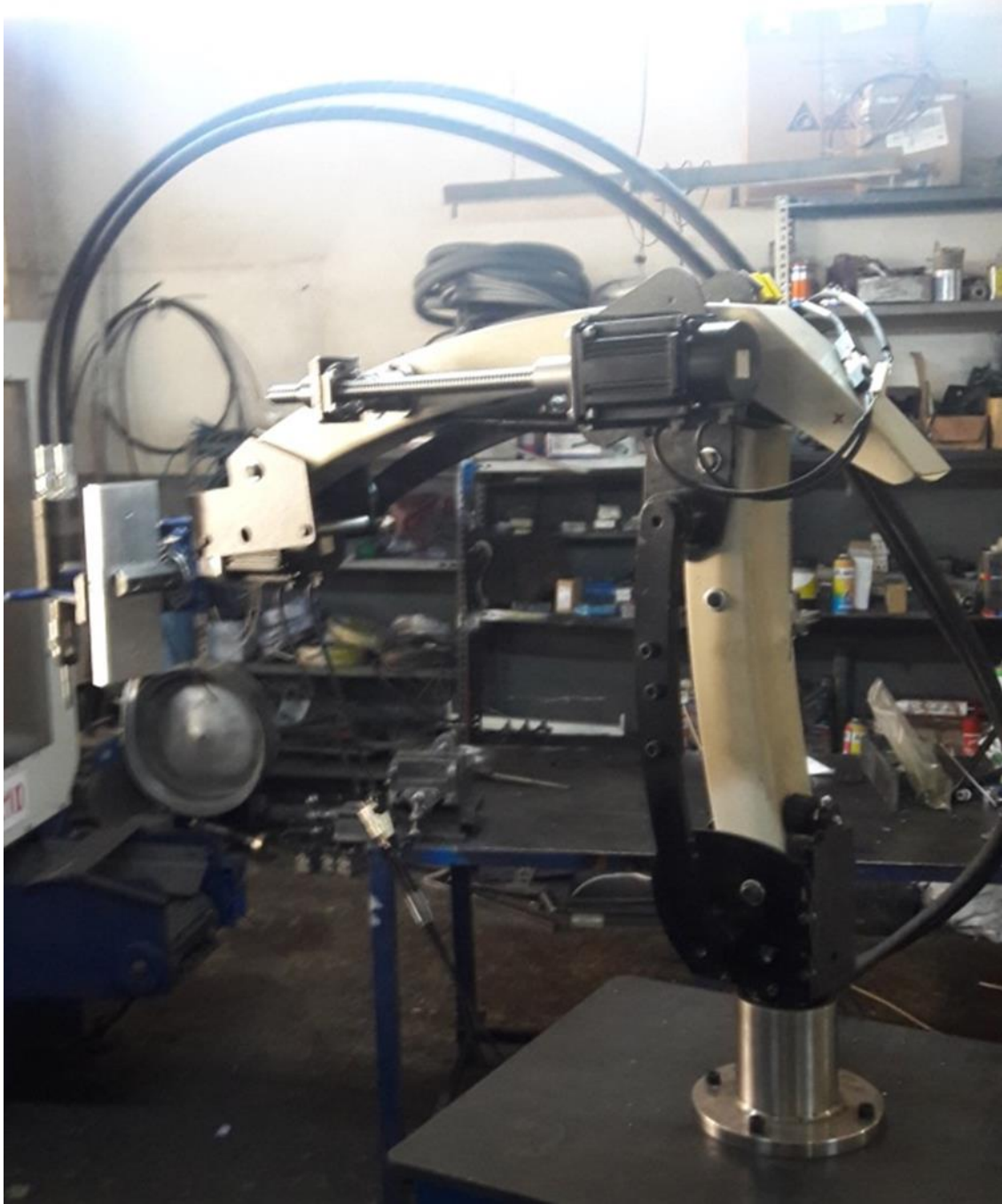
Kılavuz çekme makinasının tahrik elemanları olarak 400 wattlık Teco marka servo motor takımı kullanılmıştır. Bu servo motorun ulaşabileceği maksimum tork 1,3 Nm’dir, 3000 dev/dak kadar maksimum devir sayısına ulaşma imkanı vardır. Motor hız kontrolüyle, tork

kontrolüyle yada pozisyon kontrolüyle kontrol edilebilmektedir. Resim 4.1’te Teco-400 servo motor takımı görülmektedir.



Resim 4.1. Teco 400 Servo motor takımı [49]

Servo motorlardan alınan hareket Resim 4.2’te manipölatör üzerinde görülen mil yardımıyla mekanik sisteme aktarılmaktadır. Bu mil 25mm çapa ve 5mm adıma sahip vidalı bir mildir. SFUR 2505 model hatveli mil 51 mm uzunluğa sahiptir SCR serisi lineer rulman ile sabitlenen hareketlerde güvenilir bir tahrik unsurudur. Vidalar ovalama yöntemi ile imal edilmiştir ve 55 HRC seviyesinde yüzey sertliğine sahiptir.

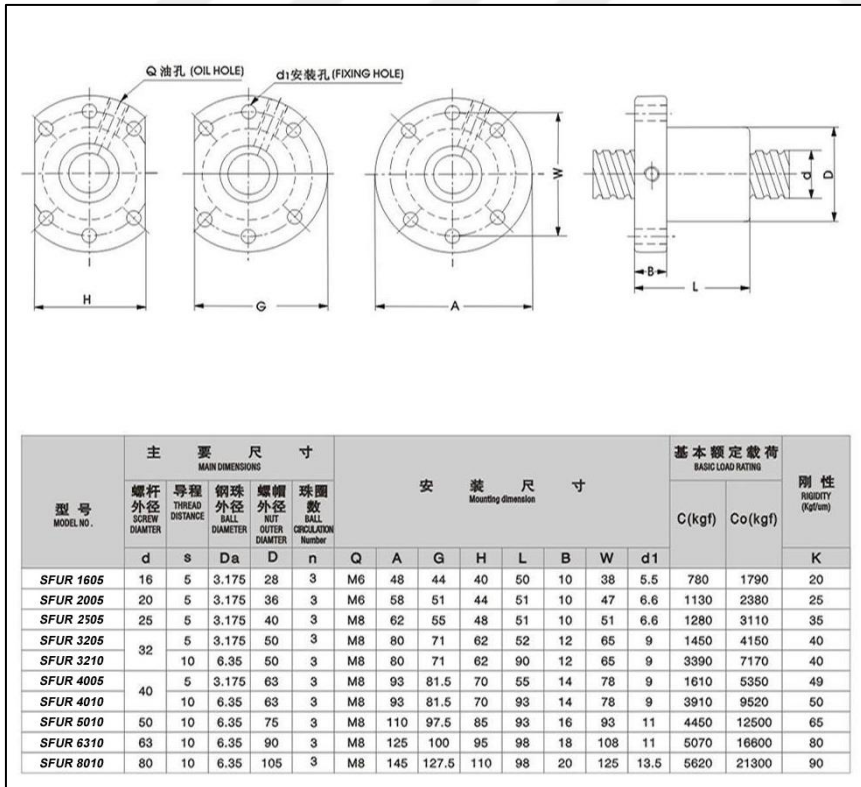


Resim 4.2. Kılavuz çekme makinası üzerinde motor hareketini manipülatöre ileten 5 mm hatveli sağ diş mil

Resim 4.3 5mm hatveye sahip SFUR 2505 tip mil görülmektedir. 5.35’da ise bu milin teknik özellikleri görülmektedir.



Resim 4.3. 5 mm hatveye sahip SFUR 2505 tip mil [50]



Şekil 4.32. SFUR 2505 tip milin teknik özellikler [50]

Uç işlevicide ise MM tip makara valfli bir hidrolik motor tercih edildi. Bu tip hidrolik motorda dağıtım valfi çıkış miline entegre edilmiştir. Kardan şaftı böylece dağıtım valfini ve jeneratörden gelen mekanik enerjiyi çıkış miline aktarır ve mili döndürmektedir. MM 50 C kodlu hidrolik motor çalışma şartları için uygun görülmüştür. Bu modelin seçilmesindeki en önemli belirleyici unsur MM 50 C tipi hidrolik motorun ulaşabildiği tork kapasitesidir. MM 50 C, 5.8 daNm maksimum torka ulaşabilen bir hidrolik motordur [51] .

MM tip hidrolik motorların kullanım alanları oldukça geniştir. Bu tip motorlar, konveyörlerden tekstil makinelerine, madencilik makinalarından makine parçalarına, vantilatörlerden inşaat makinalarına kadar geniş bir kullanım alanı bulurlar [51] .

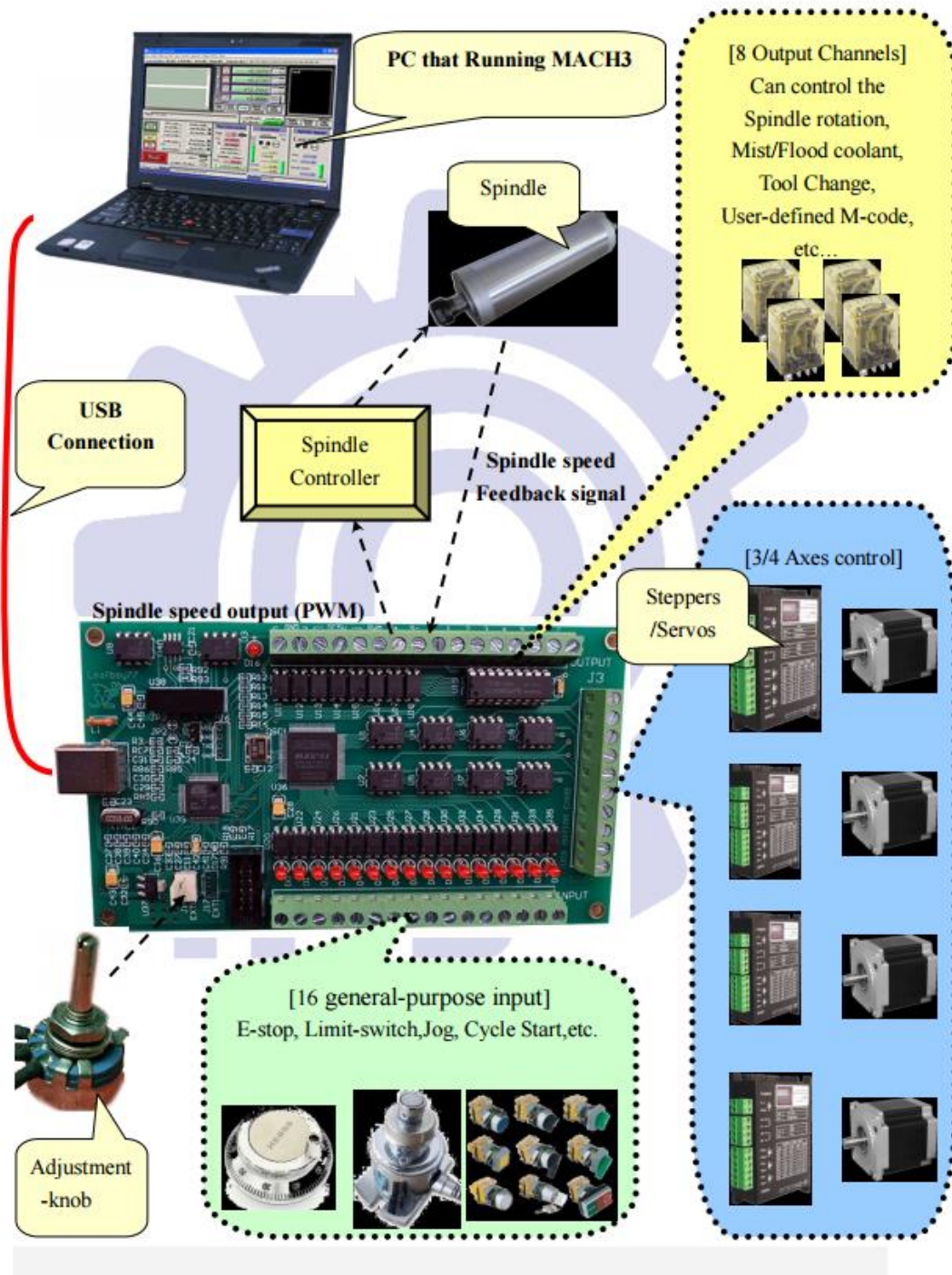
Çizelge 4.3 ‘te hidrolik motorun genel özellikleri hakkında teknik bilgiler verilmiştir [51] .

Çizelge 4.3. MM50C tipi hidrolik motor

Deplasman [cm ³ /rev]	8,2÷50
Max. Hız [RPM]	400÷1950
Max. Tork [daNm]	1,1÷4,5
Max. Üretim [kW]	1,8÷2,4
Max. Basınç [bar]	70÷100
Max. Yağ Debi [l/min]	16÷20
Min. Hız [RPM]	20÷50
Sıvı Basıncı	Mineral esaslı-HLP(DIN 515224) veya HM (ISO 6743/4)
Sıcaklık Aralığı [°C]	-30÷90
Optimal Viskozite Aralığı [mm ² /s]	20÷75
Filtreleme	ISO kod 20/16 (Min. tavsiye edilen sıvı filtrasyon 25 mikron)

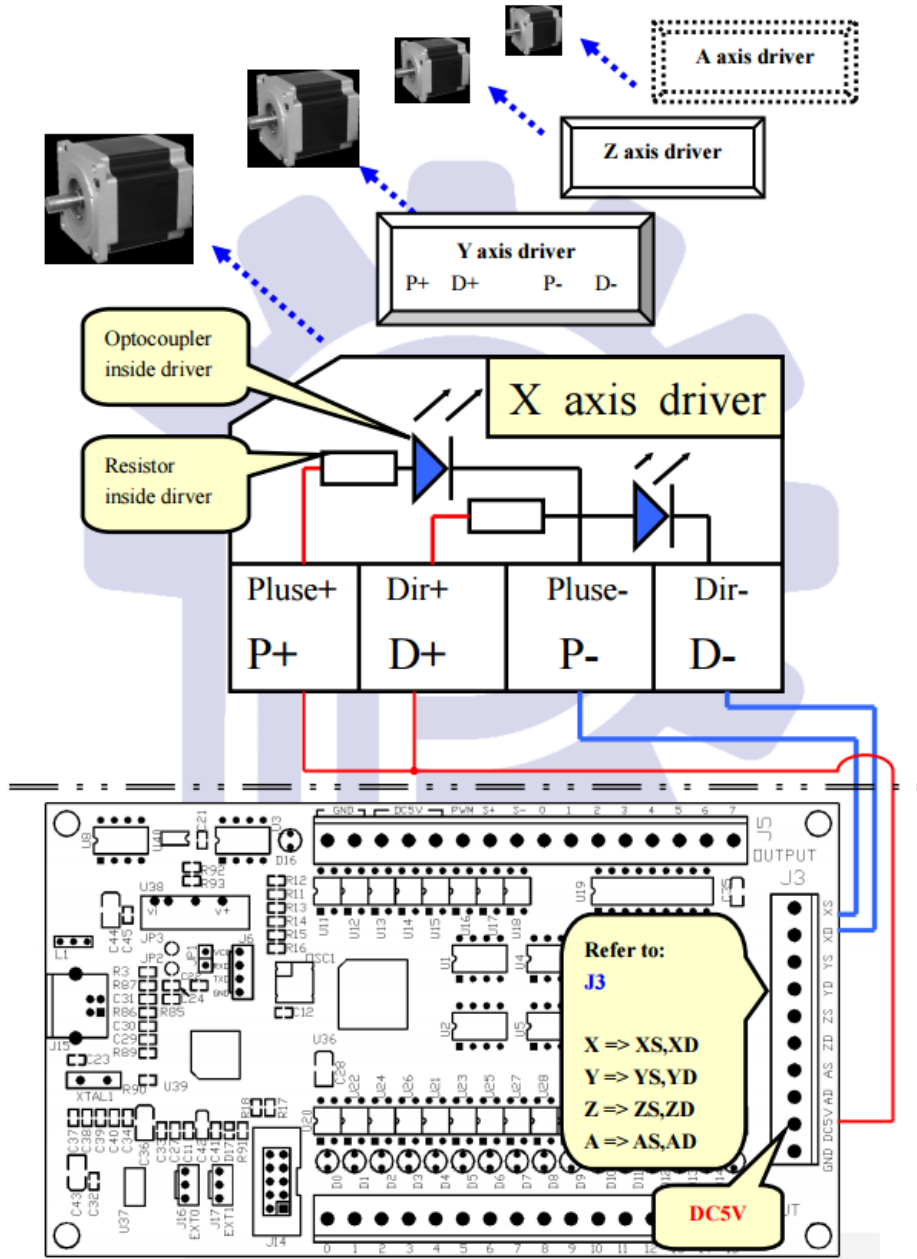
Kılavuz çekme manipülatörü için kontrol kartı kurulumu ve kontrol ekranı

Kılavuz çekme makinası manipülatörünün kontrol aşaması imalat ve prototip montaj sürecinin özel bir safhası olmuştur. Kontrol için 4 eksen Mach3 Usb Kontrol kartı tercih edildi. Burada amaç fonksiyonel ve pratik bir çözüm ile sistemin kontrolünü sağlamaktır. Şekil 4.33’de kontrol kartının basit bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 4.33. Mach3 Usb Kontrol kartı basit bağlantı şeması [52]

Her bir eksene bağlanmış olan servo motor birer kontrol kartına Şekil 4.33’de görüldüğü gibi bağlandı. Servo motorlar tek tek kontrol kartlarına Şekil 4.34’te görüldüğü gibi tanıtıldı.



Şekil 4.34. Servo motorların ve eksenlerin kontrol kartında tanıtılması [52]

Şekil 4.33 ve 4.34'ten de anlaşıldığı gibi her bir servo motor her bir eksenı ifade etmektedir. X, Y ve Z eksenı cihaz tasarımının özel durumu gereğı 1. , 2. ve 3. eksenler olarak ifade edilebilir. 4. eksen ise ayrıca açı değeri verilebilen özel bir eksenıdır.

Kontrol kartı Mach 3 programı yardımıyla bilgisayar ekranı üzerinden kontrol edilebilmektedir. Mach 3 kablosuz el çarkı ile kılavuz çekme makinasının servo motorları için manuel hareket kabiliyeti oluşturulmuştur. Resim 4.4'te Mach 3 kablosuz el çarkı görülmektedir.



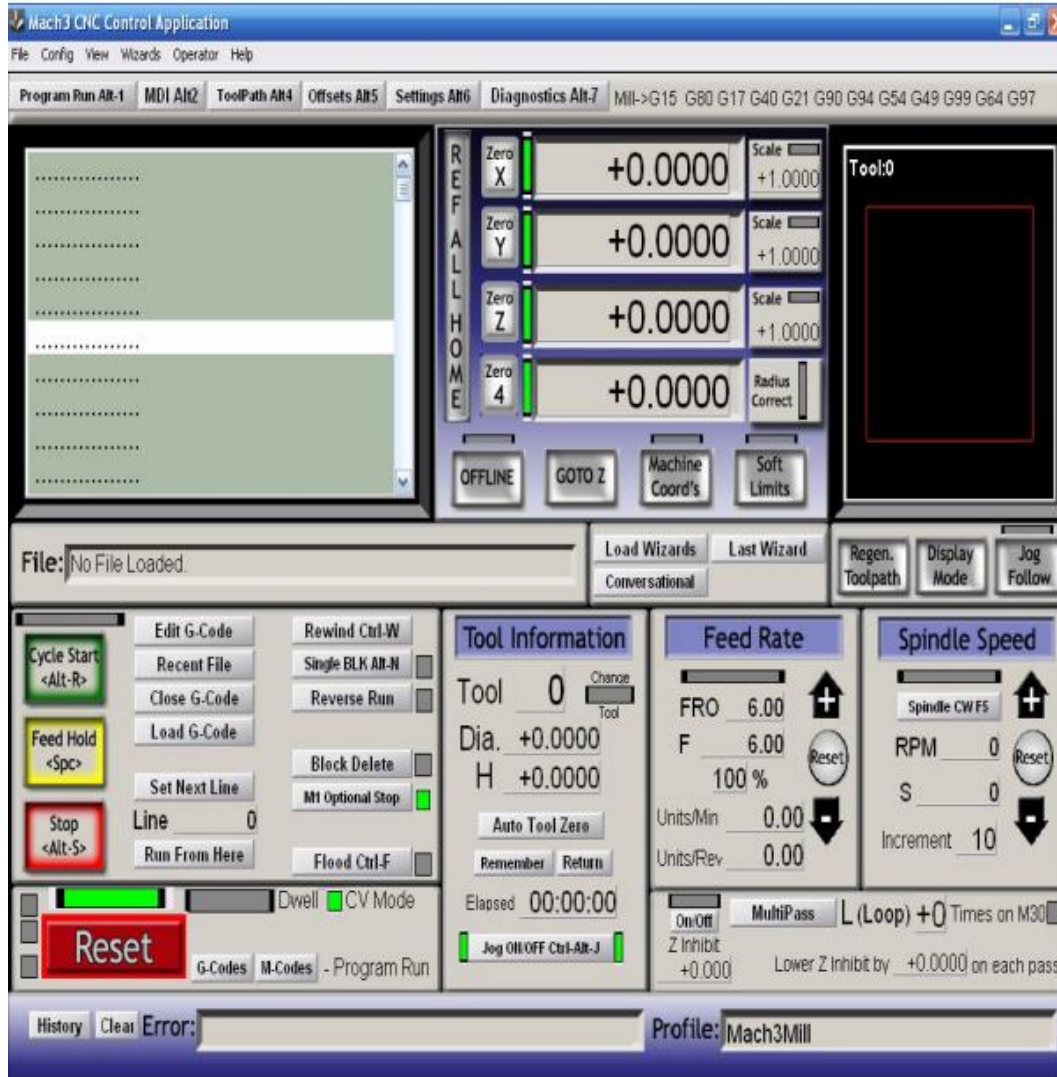
Resim 4.4. Mach3 kablosuz el çarkı [53]

İmalatı yapılan kılavuz çekme makinasında kullanılan kablosuz el çarkı CNC sistemlerinde kullanılabilir. Aynı zamanda kılavuz çekme makinası için manipülatörün manüel kontrolünde uygun bir çözüm olmuştur. Kablosuz kullanım makinadan belli bir mesafede tezgahı kontrol edebilmek adına fonksiyonel bir özelliktir. Mach 3 el çarkı, 4 eksene kadar kontrol imkanı sunabilen ve tüm butonları programlanabilen bir cihazdır. El çarkı ekranı, makine durumu, çalıştırma, duraklatma, boşta servo makine hareketi, adım değeri gibi özellikler içerir. Aynı zamanda uç işlevinin X, Y, Z konumlarını görebilme imkanı sunmaktadır.

4.3.1. Kılavuz çekme manipülatörü için kullanıcı makine arayüz programı

Proje kapsamında dört serbestlik dereceli kılavuz çekme makinası tasarımında kullanıcı arayüz programı olarak Mach3 hazır yazılımı tercih edilmiştir. Mach3 hazır yazılımıyla kullanıcı arayüzü tasarımı için ortaya çıkan programlama ihtiyacı bir derece ortadan kaldırılmıştır. Bu arayüz sayesinde kılavuz çekme makinası programlanabilir bir makina ve aynı zamanda bir robot manipülatörü haline dönüşmüştür.

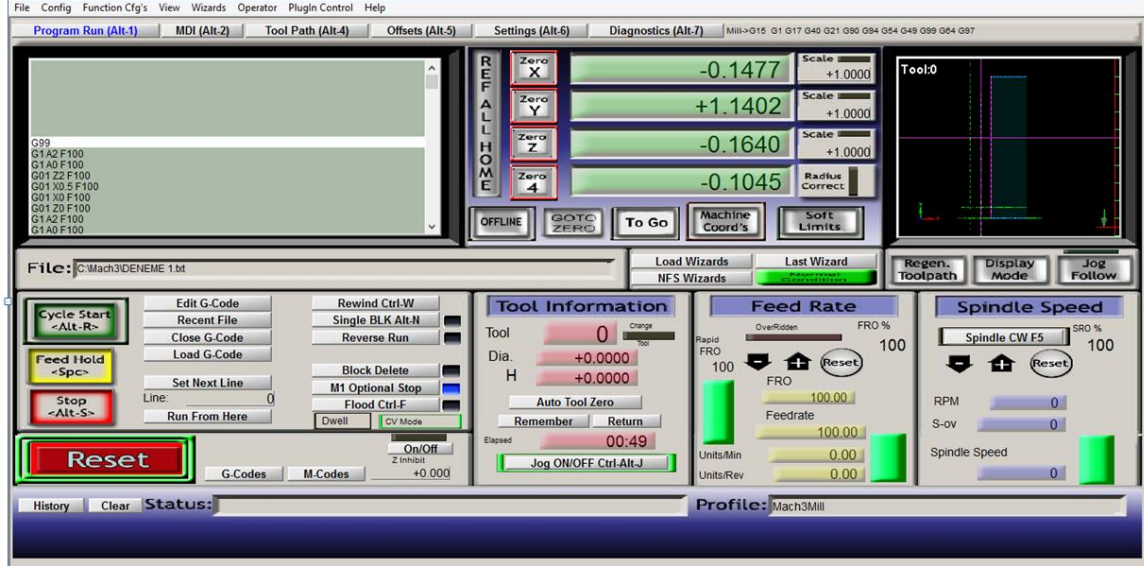
Şekil 4.35'te Mach3 yazılımının ana ekranı görülmektedir. Şekil 4.35'te görülen ekran üzerinden uç işlevcinin programlanması, servo motorların cihaz sıfırına gönderilmesi, yapılan programın düşük hızda denemesinin gerçekleştirilmesi veya programın kontrolünün ekran üzerinden yapılması bu ekran üzerinden gerçekleşmektedir. Config butonunda motor hızları ayarlanabilmektedir. Bu buton servo motorların çalışacağı maksimum hız kontrolünü yapar.



Şekil 4.35. Mach3 CNC yazılımı ana ekranı

X, Y ve Z olarak ifade edilen bölümde uç işlevcinin sıfır konumunu ve işlem anında bulunduğu konumlar verilmektedir. Mach 3 programı ile makinanın programlanmasında G kodları kullanılmaktadır. G kodları ile sistemin programlanabilmesi cihaz kullanımında evrensel bir dil yakalanmasına katkıda bulunmuştur. Şekil 4.36'da örnek bir program,

program ekranında (Program Run) çalıştırılmıştır. Takım yolunun çizgisel grafiği şekilde sağ üstte görülmektedir.



Şekil 4.36. Örnek bir program için takım yolu

Resim 4.5’de kılavuz çekme makinası uç işlevci bağlantısı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi uç işlevci bir kayar yatak üzerinde yukarı aşağı hareket ile işlem yapmaktadır. Uç işlevci kızakta iki yay yardımıyla salınım yapmaktadır. Bu sistemin cihaza katkısı hidrolik motordan rotasyonel hareket alan kılavuzun çıkması için dönüş yönünün değişmesi esnasında duraklama süresi boyunca kılavuzun kırılmadan beklemesi ve aynı zamanda kılavuz açma işlemi esnasında ise kılavuza aşırı yük binmesinin engellenmesidir.

Gerekli uygulama testleri yapıldıktan sonra makina M8’lik delik içi vida açma işlemleri yapılarak test edilmiştir. Yapılan testlerde ölçüdeki vidalarla vida dişlerinin uyumlu çalıştığı tespit edilmiştir (Resim 4.6 ve Resim 4.7).



Resim 4.5. Uç işlevcinin kayar kızağa yay ile bağlanmasından kaynaklanan salınımlı hareketi



Resim 4.6. Kılavuz çekme makinası ile vida dişi açılan test parçasının uygun vida ile denenmesi



Resim 4.7. Kılavuz çekme makinası ile vida dişi açılan test parçasının uygun vida ile denenmesi yandan görünümü



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Yapılan imalat prosesleri sonucunda kılavuz çekme makinası prototipi üretilmiştir.
- Bir makine üretimi için tasarım ve analiz proseslerinin önemi görülmüştür. Tasarım prosesleri ihtiyacın tanımlanması, konsept tasarım, gerçekçi tahminler, matematiksel modelleme ve prototip tasarım safhalarından oluşmaktadır[54]. Yeni bir makinenin ortaya çıkmasında bu sistematik yaklaşım hedefe en kısa yoldan yaklaşmayı sağlamaktadır ve bu nedenle önemlidir. Analiz prosesleri ise tasarımın prototipe dönüşmesi yolunda en doğru kararların verilmesi için gerçeğe yakın sonuçlar vermesi nedeniyle önem arz etmektedir.
- Tasarım ve analiz için SolidWorks 3D çizim ve analiz programı kullanılmıştır.
- Statik analizlerde kılavuz çekme işlemlerinde oluşan yaklaşık 100N'luk yük miktarına göre % 50 oranında çalışma koşulları zorlanarak, sistemin güvenli çalışabileceği saptanmıştır.
- Cihazın tasarımı esas alınarak, doğrudan ve ters kinematik analizleri, tekil nokta analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Mekanik tasarım esasına göre kılavuz çekme makinası eksenel endüstriyel robotlardan esinlenilerek tasarlanmıştır. Bu nedenle kinematik analizler için robotik biliminin temel prensiplerinden faydalanılmıştır.
- MatLab SimMechanics modülü kullanılarak kinematik analizler simülasyon haline dönüştürülmüştür. Böylece yapılan kinematik analizlerin doğruluğu kanıtlanmıştır. SimMechanics'te kullanılan ve uç işlevciye bağlanan displaylerden alınan sonuçların giriş bilgisi olarak sisteme yüklenen konum değerleriyle kontrol edilmesine bağlı olarak denklemlerin doğruluğu saptanmıştır.
- Tasarım ve analiz prosesleri tamamlandıktan sonra makine imalatı ve montajı gerçekleştirilmiştir.
- Yapılacak işe uygun servo motor takımı seçilmiştir.
- 4 eksen kontrol kartı ile servo motorlar Mach 3 hazır kullanıcı programına tanıtılmıştır.
- Mach 3 yazılımı program ekranı makinenin kolay kontrolünü sağlamıştır. Ekstradan yeni bir yazılım oluşturma gerekliliğini ortadan kaldıran bir çözümleme olmuştur. Böylece mekanik tasarım programlama bilgisine ihtiyaç duymadan hayat bulmuştur.
- Mekanik sistemde üç çubuk mekanizması kullanılmıştır. Bu makine için üç çubuk mekanizması oldukça yararlı sonuçlar doğurmuştur. Üç çubuk mekanizması sayesinde uç

işlevci daima çalışma düzlemine dik konumlanmaktadır. Bu durum, dördüncü eksenin bağımsız kontrolü açısından kolaylık sağlamaktadır.

- Günümüzde makine imalat proseslerinin yaklaşık %25 diş açma prosesleri oluşturmaktadır [43]. Kılavuz çekme makinası prototipi ile kılavuz çekme işlemi elle kılavuz çekme işlemine göre daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Bu durum bu cihazın seri üretimiyle imalat hatlarına kazandırılması durumunda imalat sürecinde zamandan kazanç sağlanabileceği sonucunu doğurmaktadır.
- Otomasyon desteği ile kılavuz çekme işleminde insan faktörü kılavuz çekme işlemi için devre dışı kalmaktadır. Bu durumda insan hatalarından ortaya çıkan hatalı ürün çıktısı minimize edilebilmektedir.
- Tolerans aralıklarına uyumlu hassas diş açma işlemleri gerçekleştirebilmek kılavuz çekme makinasıyla daha düşük maliyetlere ulaşabilmektedir.
- Genellikle piyasada bilindik markaların ürettikleri robot kolların yardımıyla kılavuz çekme işlemini montaj hattına dahil etmek yüksek maliyetli bir işlemdir. Oysa ki yazılım ihtiyacı duymadan proje ortağı firma ile imal edilen kılavuz çekme makinası, robotize bir makine olarak, montaj hatlarındaki otomasyon ihtiyacını yerli imalat şartlarını kullanarak, ilk yatırım maliyetlerinin düşmesine imkan vermektedir.
- Program dilinin G kodları gibi yaygın kullanıma sahip bir formatta uygulanması kılavuz çekme makinasının evrensel bir fonksiyonellik kazanmasına katkı sağlamıştır.
- Kılavuz çekme makinası tasarımı ve imalatı projesi kılavuz çekme işleminin verimli bir proses haline dönüştürülebilmesi adına uygun bir çalışma olmuştur.

Bu çalışmadan elde edilen veriler referans alınarak yeni çalışmalara vizyon katması açısından aşağıdaki öneriler getirilebilir:

- Tez çalışması, isminden de anlaşılacağı gibi bir makine imalatı prosesidir. Robotik temelleri atılmıştır ancak tam bir robot imalatı işlemi söz konusu değildir. Elde edilen veriler kullanılarak SimMechanics'te ki mekanik yapıdan faydalanılarak bir GUI arayüzü ile sistem tamamen MATLAB üzerinden kontrol edilebilir.
- Mevcut sistemde dördüncü eksen haricen kontrol edilmektedir. Uç efektörün tasarımında yapılan bazı değişikliklerle dördüncü eksen de program içerisinden kontrol edilebilir.
- Araştırma da esas olan makinanın imalatıdır. Yeni bir çalışma ile bu makine ile farklı malzemelere kılavuz çekerek mekanik özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Özyalçın, İ. (2006). *Kartezyen robot tasarımı*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, T.C. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.
2. Çay, S. (2010). *Gazaltı kaynağı yapabilen üç uzuvlu kartezyen robot kol tasarımı*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
3. Bingül, Z. ve Küçük, S. (2009). *Robot kinematiği*, İstanbul:Birsen Yayınevi.
4. Şenel, F. A. (2013). *Görüntü işleme ve beş eksenli robot kol ile üretim bandında nesne denetimi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
5. Akdoğan, E. and Adlı, M. A. (2011). The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation physiothrbot, *Mechatronics*, 21(3), 509-522
6. Messay, T., Ordóñez, R., Marcil, E. (2016). Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and their application to industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37(33), 33-48.
7. Jin, J. and Gans, N.(2014). Parameter identification for industrial robots with a fast and robust trajectory design approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31, 21-29.
8. Kaltsoukalas, K., Makris, S. ve Chryssolouris, G. (2014). On generating the motion of industrial robot manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 32, 65-71.
9. Pedersen, M. R., Nalpantidis, L., Andersen, R. S., Schou, C., Bogh, S., Krüger, V. ve Madsen, O. (2016). Robot skills for manufacturing: from concept to industrial deployment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 282-291.
10. Mineo, C., Pierce, S. G. , Nicholson, P. I. ve Cooper, I. (2016). Robotic path planning for non-destructive testing – A custom MATLAB Toolbox Approach, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 1-12.
11. Staretu, I. (2014). Stuructural synthesis, work spaces and direct kinematic of the one serial kinematic chain with 8 axes for industrial robots. *Procedia Technology*, 19, 207-214.
12. Küçük, S. (2004) *Endüstriyel robotların modellenmesi ve çevrimdışı programlanması*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
13. Durmuş, B. (2008). *Altı eklemlili robot kolunun genetik algoritma ve eleman uyarlamalı genelleştirilmiş öngörülü kontrolü*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

14. Rocha, C. R., Tonetto, C. P. and Dias, A. (2011). A comparison between the denavit-hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(4), 723-728.
15. Siciliano, B. (1999). The tricept robot: Inverse kinematics, manipulability analysis and closed-loop direct kinematics algorithm. *Robotica*, 17,437-445.
16. Ünver, B. (2004). *Artık robot kollarının ters kinematik problemlerinin çözümü ve gerçekleşmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
17. Uzun, G. ve Korkut, İ. (2012). *Kılavuz ile vida açma işlemine kesme yönteminin ve kesme parametrelerinin etkileri*. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 04-05 Ekim 2012, Ankara, Türkiye, 264-273.
18. Avuncan, G. (1998). *Talaş kaldırma ekonomisi ve kesici takımlar*. Gebze:Mavi Tanıtım ve Pazarlama Ltd. Şti, 195-249.
19. Akkurt, M. (2015). *Talaş kaldırma, CNC takım tezgahları ve üretim otomasyonu problemleri*, İstanbul: Birsan Yayınevi.
20. Akkurt, M. (1992). *Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgahları*, İstanbul: Birsan Yayınevi.
21. Brooks, R. (2002). *Flesh and machines*. New York: Pantheon Books.
22. Craig, J. J. (2005). *Introduction robotics mechanics and control*. New Jersey: Prentice.
23. Altınay Robotik ve Otomasyon A.Ş. (1998). Dünya robot nüfusu. *Makine Magazin Dergisi*, 23, 89-94.
24. Çengelci, B. ve Çimen, H. (2005). Endüstriyel robotlar. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 69-78.
25. Akdağ, M. (2008). *Design and analysis of robot manipulators by integrated CAE procedures*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Science, İzmir.
26. Çetinkaya, Ö. (2009). *Bir kolun hareketlerini takip eden dört dönel mafsallı robot kolu tasarımı ve deneysel araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
27. Balta, C., Oysu, C., Bingöl, Z. ve Öztürk, S. (2009). *XYZ kartezyen robot ve 2B CAD-CAM çizici yazılımı tasarımı*. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK 09, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
28. Sciavicco, L. and Siciliano, B. (2005). *Modelling and control of robot manipulators*, London: Springer.
29. Waldron, K. and Schmiedeler, J. (2008). *Kinematics*, in: Siciliano B, Khatib O, editors. *Springer Handbook of Robotics*. Heidelberg: Springer, 9–34.

30. Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. and Oriolo, G. (2009). *Robotics: Modelling, planning and control. Advanced textbooks in control and signal processing*, London: Springer.
31. Tsai, L. W., (1999). *Robot analysis the mechanics of serial and parallel manipulators*, New York: Wiley-Interscience.
32. Wang, L. and Chen, C. C. (1991). A combined optimization method for solving the inverse kinematics problem of mechanical manipulators. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 7(4), 489-499.
33. Asada, H. and Slotine, J. J. E. (1986). *Robot analysis and control*, USA: Wiley-Interscience Publication.
34. Wolovich, W. A. (1987). *Robotics: Basic analysis and design*, USA: CBS College Publishing.
35. Schilling, R. J. (1990). *Fundamentals of robotics*, USA: Prentice Hall.
36. Közkurt, C. ve Soyaslan, M. (2011). *Euler bilekli scara robot kolu için kinematik analiz yazılımı geliştirilmesi*. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ.
37. Raghavan, M. ve Roth, B. (1993). Inverse kinematic of the general 6R manipulator and related linkages. *Journal of Mechanical Design*, 115(3), 502-508.
38. Fu, K. S., Gonzales, R. C. ve Lee, C. S. G. (1987). *Robotics: Control, sensing, vision and intelligence*, New York: Mc. Graw-Hill. Inc.
39. Pashkevich, A. (1997). Real time inverse kinematics for robot with offset and reduced wrist. *Control Engineering Practice*, 5(10), 1443-1450.
40. Kant, Y. (2009). *Bir robot manipulatorün bilgisayar destekli mühendislik araçları ile çalışma uzayı analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
41. Bingül, Z. ve Küçük, S. (2008). *Robot dinamiği*, İstanbul: Birsen Yayınevi.
42. Liu, H., Li, J., Chai, Y., Wei, W. and Hu, J. (2016). Kinetics and enhancement mechanism of plasma oxynitriding for AISI 1045 steel. *Surface and Coatings Technology*, 302, 22-26.
43. Uzun, G. (2013). *Ti₆Al₄V Titanyum Alaşımında Kılavuz ile Vida Açma Problemlerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
44. Malek, K. A. and Othman, S. (1999). Multiple sweeping using the Denavit–Hartenberg representation method. *Computer-Aided Design*, 31(9), 567-583.
45. Balkan, T., Özgören, M. K., Arıkan, M. S. and Baykurt, H. M. (2000). A method of inverse kinematics solution including singular and multiple configurations for a class of robotic manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 35(9), 1221-1237.

46. Chikhaoui, M. T., Rabenorosoa, K. and Andreff, N. (2016). Kinematics and Performance Analysis of a Novel Concentric Tube Robotic Structure with Embedded Soft Micro-Actuation. *Mechanism and Machine Theory*, 104, 234-254.
47. Hijazi, A. , Brethé, J. F. and Lefebvre, (2015). Singularity analysis of a planar robotic manipulator: Application to an XY-Theata platform. *Mechanism and Machine Theory*, 100, 104-119.
48. Tsai, M. J. and Stone, D. J. (2009). Inverse velocity analysis for line guidance five-axis robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(4-5), 736-745.
49. İnternet: Poysan Otomasyon. (2017). *Teco 400 Servo motor takımı*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.poysanotomasyon.com%2Fteco-servo-motor&date=2017-03-29> Son Erişim Tarihi: 05. 01. 2017.
50. İnternet: Şahin Rulman. (2017). *Refur serisi* URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fsahinrulman.com%2Fsite%2Findex.php%3Foption%3Dcom_content%26view%3Darticle%26id%3D96%253Asfur-serisi%26catid%3D46%253Avidali-miller-ve-aksamlari%26Itemid%3D223%26lang%3Den.+&date=2017-03-29 Son Erişim Tarihi: 05. 05. 2017.
51. İnternet: Hidros. (2017). *MM type motors* URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.hydraulicproduct.com%2Fhidros%2Findex.php%2Fhydraulic-motor%2F283-mm-type-motors.+&date=2017-03-29> Son Erişim Tarihi: 05. 01. 2017.
52. İnternet: Poysan Otomasyon. (2017). *USB kart manuel*. URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.poysanotomasyon.com%2Fdosyalar%2F2015%2F03%2FUsbkart_manuel.pdf.&date=2017-03-29 Son Erişim Tarihi: 05. 01. 2017.
53. İnternet: Poysan Otomasyon. (2017). *Mach3 kablosuz el çarkı*. URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2F+http%3A%2F%2Fwww.poysanotomasyon.com%2Fmach3-kablosuz-el-carki.&date=2017-03-29> Son Erişim Tarihi:05. 01. 2017.
54. İnternet: Catia Türk. (2013). *Mühendislik Tasarımı*. URL:<http://www.catiaturk.com/arge/155/muhendislik-tasarimi-22.html> Son Erişim Tarihi:07.06.2017



EKLER

EK-1. Kılavuz çekme makinası imalatı ve prototip resimleri



Resim 1.1. Kılavuz çekme makinası kontrol panosu

EK-1. (devam) Kılavuz çekme makinası imalatı ve prototip resimleri



Resim 1.2. Kılavuz çekme makinası kontrol panosu



Resim 1.3. Kılavuz çekme makinası kontrol panosu

EK-1. (devam) Kılavuz çekme makinası imalatı ve prototip resimleri



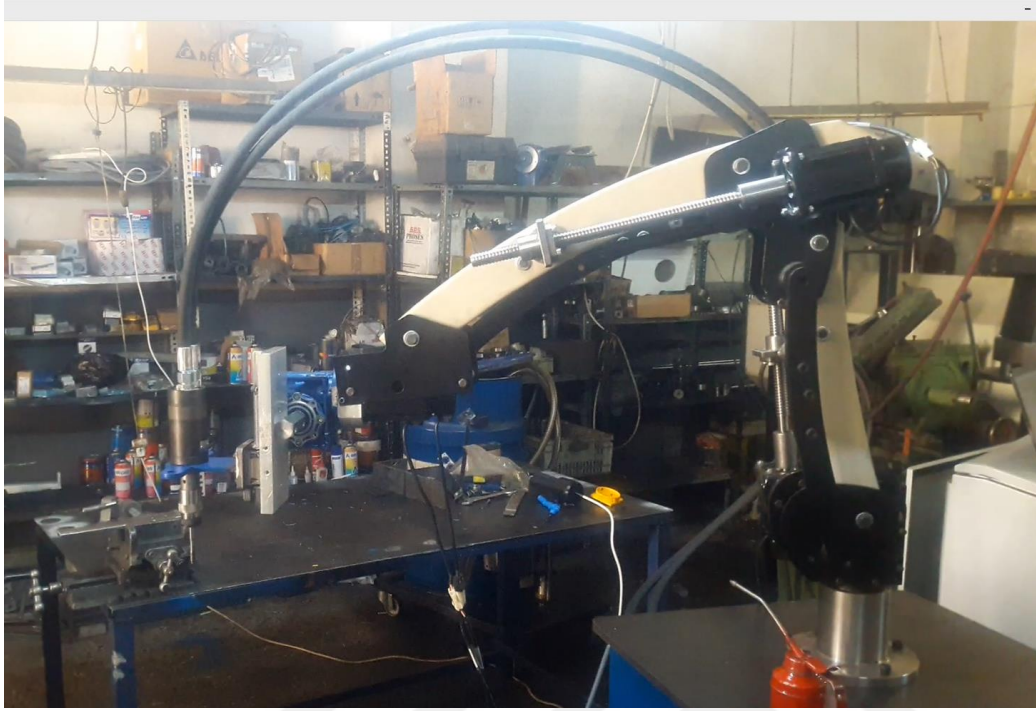
Resim 1.4. Kılavuz çekme makinası imalat aşaması uç işlevci eklenmeden önceki halinden bir kesit

EK-1. (devam) Kılavuz çekme makinası imalatı ve prototip resimleri



Resim 1.5. Kılavuz çekme makinası kontrol panosu, kablosuz el çarkı ve manipülâtör gövdesi

EK-1. (devam) Kılavuz çekme makinası imalatı ve prototip resimleri



Resim 1.6. Kılavuz çekme makinası prototipi çalışırken



Resim 1.7. Kılavuz çekme makinası prototipi hedef noktaya ulaşması esnasında bir görüntü

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKKAŞ, Güllü
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.07.1984, Kayseri
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 202 86 86
 Faks : 0 (312) 202 34 80
 e-mail : gulluakkas@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği	Devam Ediyor
Yüksek lisans	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği	2012
Lisans	Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği	2006
Lise	Nuh Mehmet Küçükçalık Anadolu Lisesi	2001

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Gazi Üniversitesi	Uzman

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

SCI, SCI-EXP., SSCI, AHCI Tarafından Taranan Makaleler

- Akkaş, G. ve Korkut, İ. (2016). Design and Kinematics Analysis of a Drilling robot. *International Journal of Innovative Research in Engineering&Management (IJIREM)*, 3(2), 85-90.



GAZİ GELECEKTİR..