

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KOMPOZİT ÜRETİMİNDE DELTA MANİPÜLATÖR
KULLANIMI: YÖRÜNGE PLANLAMASININ KUVVET
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

**Hazırlayan
Ekrem AYAZ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN**

Yüksek Lisans Tezi

**Haziran 2024
KAYSERİ**

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KOMPOZİT ÜRETİMİNDE DELTA MANİPÜLATÖR
KULLANIMI: YÖRÜNGE PLANLAMASININ KUVVET
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Ekrem AYAZ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

Haziran 2024
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Ekrem Ayaz

İmza

“Kompozit Üretiminde Delta Manipölatör Kullanımı: Yörünge Planlamasının Kuvvet Üzerindeki Etkileri” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Ekrem AYAZ

İmza

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

İmza

Mekatronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN danışmanlığında **Ekrem AYAZ** tarafından hazırlanan **“Kompozit Üretiminde Delta Manipülatör Kullanımı: Yörünge Planlamasının Kuvvet Üzerindeki Etkileri”** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Mekatronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

/ /

JÜRİ:

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Sertaç SAVAŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi. İsmail Öztürk

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / /

Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bana hayatım boyunca her türlü yardımı ve fedakârlığı ve desteği sağlayan, kıymetli aileme, bu çalışmanın meydana gelmesi için gerekli bilgi ve tecrübesini daima paylaşan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Erdem Arslan'a, çalışmamda kullandığım bilgilerini sunan kaynaklara ve çalışmalarımızı ülkemizde güven ve emniyet içerisinde gerçekleştirebilmemizi sağlayan kahraman şehitlerimize ve gazilerimize en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı arz ederim.

Ekrem AYZ

Haziran 2024, KAYSERİ

KOMPOZİT ÜRETİMİNDE DELTA MANİPÜLATÖR KULLANIMI: YÖRÜNGE PLANLAMASININ KUVVET ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Ekrem AYAZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2024
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

ÖZET

Kompozitler, yüksek mukavemet ve hafiflikleriyle üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır. İmalatında el ile serim yönteminin zaman alıcı ve yoğun emek gerektirmesi nedeniyle otomatik elyaf yerleştirme (AFP) gibi gelişmiş üretim tezgâhları imalat süreçlerinde yaygınlaşmaktadır. AFP tezgâhlarında, kuvvet kontrolü oldukça önemlidir. Antropomorfik robotlar üzerine monte edilen baskı makaraları, yüzeye uygulanan kuvveti kontrol eder fakat kuvvet kontrolü, robot dinamiği, hareket yörüngesi, hızları gibi durumları yeterince dikkate almayan bağımsız kontrolörlerle gerçekleştirilmektedir, kullanılan gürültülü kuvvet sensörleri nedeniyle, veriler filtrelenmektedir ve bu durum, işlenen parça yüzeyinde uniform olmayan kuvvet dağılımlarına neden olabilmektedir. Delta robotlar, son yıllarda kuvvet odaklı uygulamalar için tercih edilmeye başlanmıştır. Bu tezde, delta robotların kompozit imalatında etkin şekilde nasıl kullanılabileceği incelenmiş, robotun kinematik, dinamik, kuvvet kontrol stratejileri ve yörünge planlama hesaplamaları detaylandırılmaya çalışılmıştır. Yörüngedeki değişimlerin robot-parça etkileşiminde oluşturacağı kuvvetleri simüle etmek için Matlab/Simmechanics simülatörü kullanılmıştır. Tutucu ucuna entegre edilen kuvvet sensörü kullanılarak üç farklı yörünge planlama algoritmasının dört farklı tarama hareketi üzerindeki performansları incelenmiştir. Bu analizde üç farklı parça yerleşimi dikkate alınmış ve algoritmaların kuvvet uniformluğu açısından performansları karşılaştırılmıştır. Bulgular, delta robot kullanımında yörünge planlamasında dikkat edilmesi gereken noktaları belirlemek için kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Üretimi, Baskı Makarası, Delta Robot, Yörünge Planlama, Kuvvet Kontrolü

USAGE OF DELTA MANIPULATOR IN COMPOSITE PRODUCTION: EFFECTS OF TRAJECTORY PLANNING ON FORCE

Ekrem AYAZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, June 2024

Supervisor: Assis. Prof. Erdem ARSLAN

ABSTRACT

Composites are widely used in production due to their high strength and lightness. Since the manual laying method in manufacturing is time-consuming and labor-intensive, advanced production benches such as automatic fiber placement (AFP) are becoming widespread in manufacturing processes. In AFP machines, force control is very important. Pressure rollers mounted on anthropomorphic robots control the force applied to the surface, but force control is carried out with independent controllers that do not take into account situations such as robot dynamics, movement trajectory, speeds, etc. Due to the noisy force sensors used, the data is filtered and this situation causes non-uniformity on the surface of the processed part, may cause force distributions. Delta robots have started to be preferred for force-oriented applications in recent years. In this thesis, how delta robots can be used effectively in composite manufacturing has been examined and the kinematics, dynamics, force control strategies and trajectory planning calculations of the robot have been tried to be detailed. Matlab/Simmechanics simulator was used to simulate the forces that changes in orbit would create in the robot-part interaction. Using the force sensor integrated into the gripper tip, the performances of three different trajectory planning algorithms on four different scanning movements were examined. In this analysis, three different part placements were taken into account and the performances of the algorithms were compared in terms of force uniformity. The findings were used to determine the points to be considered in trajectory planning when using delta robots.

Keywords: Composite Production, Press Roller, Delta Robot, Trajectory Planning, Force Control

İÇİNDEKİLER

KUVVET KONTROLLÜ BİR DELTA MANİPÜLATORÜN KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANILMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Problem Durumu	6
1.2. Araştırmanın Amacı	7
1.3. Araştırmanın Önemi ve Literatürde Yapılan Çalışmalar.....	8

2. BÖLÜM

KOMPOZİTLER

2.1. Kompozit Üretim Yöntemleri	19
2.1.1. El ile Serme Yöntemi.....	20
2.1.2. İleri Teknoloji Üretim Yöntemleri AFP ve ATL	21
2.2. Fiber Serme Robotlarında Baskı Kuvveti Hesabı.....	23
2.3. El İşçiliği ile Üretim Tekniğinde Karşılaşılan Zorluklar	24
2.4. Otomatik Üretim Tekniklerindeki Problemler	25

3. BÖLÜM

DELTA ROBOTLAR

3.1. Seri ve Paralel Robotlar.....	28
3.2. Delta Robotlar Kullanım Alanları.....	30
3.3. Robot Kinematığı	31
3.3.1. Serbestlik Derecesi	32
3.3.2. İleri Kinematik	35
3.3.3. Ters Kinematik	36
3.4. Hızlar Kinematığı ve Jakobiyen Matrisi.....	42
3.5. Robot Dinamiğı	46
3.5.1. Euler-Lagrange Dinamiğı.....	48
3.6. Kuvvet Kontrolü	54
3.6.1. İdeal Kuvvet Kontrolü	57
3.6.2. Empedans Kontrolü	58
3.7. Delta Robot Simülasyon Modeli	60

4. BÖLÜM

YÖRÜNGE PLANLAMA

4.1. Yörünge Planlama Teknikleri ve Sınıflandırılması	69
4.2. Eklem-Uzayında Kübik Fonksiyonlar ile Yörünge Planlama	71
4.2.1. Delta Robot için Kübik Yörünge Planlama	73
4.3. Lineer Segmentler ile Parabolik Blend Yörünge Planlama	76
4.4. Minimum Jerk Yörünge Planlama.....	78

5. BÖLÜM

SONUÇ TARTIŞMA ÖNERİLER

5.1. Performans Kriteri.....	84
5.2. Delta Robota Uygulanan Test Yörüngeleri ve Sonuçları	85
5.2.1. Robot Merkezi, Sağ ve Sol Konumlu İç Kare Parça Tarama Yörüngesi	86
5.3. Sonuçlar	90
5.4. Tartışma	91
5.5. Öneriler	93

KAYNAKÇA	94
EKLER.....	98
ÖZGEÇMİŞ.....	99



KISALTMALAR

ℓ_1	: Her üst kol uzunluğu
ℓ_2	: Her alt kol uzunluğu
Q_i	: Harici Kuvvetler
S_A	: Sabit platform eşkenar üçgen uzunluğu
S_p	: Hareketli platform eşkenar üçgen uzunluğu
m_1	: Üst Kol Kütlesi
m_2	: Alt Kol Kütlesi
m_3	: Hareketli Platform Kütlesi
m_{Bi}	: B Noktasında kütle dağılım oranı
m_e	: Dirsek Pim Bağlantı Kütlesi
p_1	: Her üst kol için kütle dağılım oranı
p_2	: Her alt kol için kütle dağılım oranı
$\dot{q}$	: Genelleştirilmiş Eklem Hızı
$\ddot{q}$	: Genelleştirilmiş Eklem İvmesi
u_A	: Sabit platform orijinden köşe noktasına uzunluk
u_P	: Hareketli platform orijinden köşe noktasına uzunluk
w_A	: Sabit platform orijinden yakın kenara uzunluk
w_P	: Hareketli platform orijinden yakın kenara uzunluk
$C(q, \dot{q})$	: Coriolis ve Merkezci İvme Matrisi
E	: Elastisite Sabiti
$G(q)$	: Yerçekimi Kuvveti Matrisi
g	: Yerçekimi ivmesi
$I(.)$	: Atalet Momenti
$M(q)$	: Kütle Matrisi
v	: Elastik Sabit
θ	: Eklem Açısı
L	: Lagrange Fonksiyonu
l	: Alt Kol uzunluğu
q	: Genelleştirilmiş Eklem Açısı
L	: Üst Kol uzunluğu
τ	: Tork Vektörü

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Fiber Matris Yapısının Tipik Kullanım alanları.....	18
Tablo 2.2. İşleme Teknikleri.....	19
Tablo 3.1. Seri ve Paralel Robot Özellikleri.....	31
Tablo 4.1. Kartezyen Yörünge Noktaları	74
Tablo 4.2. Minimum Jerk Algoritması Kısıt Şartları.....	79



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Üretim Teknikleri.....	19
Şekil 2.2.	El ile Serme Yöntemi	20
Şekil 2.3.	Otomatik Fiber Serme Robotu	21
Şekil 2.4.	Fiber Serme Robot Başlık Mekanizması.....	22
Şekil 2.5.	Temas Teorisi Parametreleri	23
Şekil 3.1.	Seri ve Paralel Eklem Bağlantıları	29
Şekil 3.2.	Delta Robot ve Uçuş Simülatörü.....	30
Şekil 3.3.	Robot Platform İsimlendirmesi ve Eklem Aktüatör Konumları	34
Şekil 3.4.	Delta Robot Diyagram	36
Şekil 3.5.	Delta Robot Kinematik Diyagram.....	37
Şekil 3.6.	Delta Robot Hareketli Platform Eşkenar Üçgen	38
Şekil 3.7.	Delta Robot Sabit Platform Eşkenar Üçgen.....	38
Şekil 3.8.	Delta Robot CAD Görseli	49
Şekil 3.9.	Dinamik Çözüm Yöntemleri Karşılaştırma.....	50
Şekil 3.10.	Kuvvet Kontrol Diyagramı	59
Şekil 3.11.	Matlab Simscape Multibody Sistem Oluşturma	62
Şekil 3.12.	Matlab Genel Simülasyon Görseli	63
Şekil 3.13.	Yörünge ve Robot Simülasyon Bloğu.....	63
Şekil 3.14.	Yörünge Veri Giriş Bloğu	64
Şekil 3.15.	Robot Simülatörünün Multibody Modeli	64
Şekil 3.16.	Temas Kuvvetleri Ölçüm Sensörü	65
Şekil 3.17.	Delta Robotun Ucuna Temas Küresinin Bağlantısı	65
Şekil 3.18.	ITAE Performans Bloğu.....	66
Şekil 4.1.	Kartezyen ve Eklem Uzayı Yörünge Planlama.....	70
Şekil 4.2.	Kübik Polinom Yörünge Planlama	73
Şekil 4.3.	Delta Robot CAD Görseli ve İş Parçası Yörünge Tasarımı.....	74
Şekil 4.4.	Delta Robot Kübik Yörünge Planlama.....	74
Şekil 4.5.	Kübik Yörünge $\theta 1$ Konum Konum-Hız-İvme Yörüngeleri	75
Şekil 4.6.	Kübik Yörünge $\theta 2$ Konum Konum-Hız-İvme Yörüngeleri	75
Şekil 4.7.	Kübik Yörünge $\theta 3$ Konum Konum-Hız-İvme Yörüngeleri	76
Şekil 4.8.	Lineer Segmentli Parabolik Blend Yörünge (LSPB)	78

Şekil 4.9.	Yörünge Planlama Akış Diyagramı	82
Şekil 5.1.	Delta Robot Tabla Üzerinde İş Parçası	85
Şekil 5.2.	Test İş Parçaları	86
Şekil 5.3.	İç Kare Tarama Yörüngesi İş Parçası	86
Şekil 5.4.	İç Kare Merkez Konum Kübik Planlama Eklem Torkları	87
Şekil 5.5.	İç Kare Merkez Konum Kübik Planlama Z eksenli Temas Kuvvetleri	87
Şekil 5.6.	İç Kare Merkez Konum Trapez Planlama Eklem Torkları	88
Şekil 5.7.	İç Kare Merkez Konum Trapez Planlama Temas Kuvvetleri	89
Şekil 5.8.	İç Kare Merkez Konum Minimum Jerk Planlama Eklem Torkları	89
Şekil 5.9.	İç Kare Merkez Konum Minimum Jerk Planlama Temas Kuvvetleri	90
Şekil 5.10.	ITAE Performans Sonuçları	91

GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, üretim süreçlerine pek çok yenilik getirmekte ve bu yenilikler, kullanılan malzemelerin özelliklerinde de ileri düzeyde ihtiyaçlar doğurmaktadır. Bu artan ihtiyaçlara yanıt olarak farklı malzeme türlerinin bir araya getirilmesiyle, kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozitler, yüksek mukavemet, üstün mekanik ve elektriksel özellikleri gibi çeşitli parametreler ile endüstriyel üretim gerekliliklerini karşılamada önemli avantajlar sunar. Bu avantajlar, özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayisi gibi sektörlerde kompozit malzemelerin kullanımını hızla artırmaktadır. Sundukları benzersiz özellikler sayesinde, bu malzemeler daha dayanıklı, hafif ve verimli ürünlerin tasarlanıp üretilmesine olanak sağlamaktadır, bu da onları modern mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez kılmaktadır.

Malzeme üretimi, temelde insan gücüne ve makine gücüne dayalı olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. İnsan gücüne dayalı üretim teknikleri, genellikle hızlı üretilmesi gereken, küçük üretim hacimleri için uygundur. Bu yöntemler, düşük yatırım maliyetleri ile karakterize edilirken, yoğun el emeği gerektirir ve zaman alıcı süreçler sonucunda nihai ürünler elde edilir. Bu tür tekniklerde, üretim süreci büyük ölçüde insan el becerisine ve tecrübesine bağlıdır; bu durum, sürecin kalitesi ve tutarlılığı açısından bazı zorluklar ve problemler doğurabilir. İnsan faktörüne bağlı değişkenlik, üretimdeki tutarlılığı ve ölçeklenebilirliği sınırlayabilir, bu nedenle bu yöntemler genellikle benzersiz, özelleştirilmiş veya kısa seri ürünler için tercih edilir.

İnsan gücüne dayalı el ile serim yöntemlerinde ortaya çıkan problemlerin çözümü amacıyla, bu yöntemler otonom hale getirilerek otomatik elyaf yerleştirme (AFP) gibi gelişmiş üretim tezgâhları kullanılmaya başlanmıştır. AFP tezgâhları, genellikle gantry sistemleri veya antropomorfik robotların uç ekipman bölümlerine özel olarak imal edilmiş baskı makaraları eklenmesiyle oluşturulur. Bu baskı makaraları, kompozit katmanlarının birbirine yapışmasını sağlayan baskı kuvvetini etkin bir şekilde kontrol

etmek için tasarlanmıştır. Ancak, AFP tezgahlarında kuvvet kontrolü, robotun dinamiği, hareket yörüngesi ve hızları gibi önemli faktörleri yeterince dikkate almayan bağımsız kontrolörlerle gerçekleştirilmektedir. Bu bağımsız kontrolörlerde kullanılan gürültülü kuvvet sensörleri, verilerin filtrelenmesini zorunlu kılar, bu da işlenen parçaların yüzeyinde uniform olmayan kuvvet dağılımlarına yol açabilir. Bu sorunların üstesinden gelmek ve üretim süreçlerini daha verimli hale getirmek için, daha gelişmiş sensör teknolojileri ve entegre kontrol sistemleri geliştirilmesi gerekmektedir.

Delta robotlar kinematik yapılarından dolayı, yüksek hareket hızı ve kuvvet kapasitesi sayesinde son yıllarda kuvvet odaklı uygulamalar için giderek tercih edilmeye başlanmıştır. Seri robotların kuvvet ve kompians kontrolü konuları üzerinde uzun zamandır çalışılmış olup bu alanda kayda değer ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak, paralel robotlar için bu konu hala aktif bir araştırma alanıdır. Paralel robotların yapısal özellikleri, bu robotların yüksek hızlara erişmesini ve seri robotlara kıyasla daha yüksek etkinlik oranlarına sahip olmalarını mümkün kılar. Özellikle, paralel robotların mekanik yapıları, hareketi doğrudan ve eş zamanlı olarak birden fazla aktüatörle kontrol edilerek gerçekleştirildiğinden, yük aktarımı ve hareketin senkronizasyonu daha verimli bir şekilde sağlanır. Bu durum, paralel robotların daha az enerji harcayarak daha yüksek hızlara ulaşabilmesine olanak tanır.

Paralel robotların yüksek kuvvet üretim kapasitesi, özellikle yüksek kuvvet gerektiren uygulamalarda önemli avantajlar sunar. Robotun paralel yapısı, yükü eşit olarak dağıtarak daha fazla stabilite ve kuvvet kontrolü sağlar. Bu yapısal avantaj, özellikle hassas montaj işlemleri, yüksek hız gerektiren dinamik uygulamalar ve büyük kuvvetlerin uygulandığı işlemlerde kritik öneme sahiptir.

Diğer bir taraftan seri robotlarda, çalışma uzayının geometrik özelliklerinden dolayı kuvvet üretiminde uniformluğun sağlanması zordur. Bunun aksine, paralel robotlarda birbirine simetrik kolların bulunmasından dolayı, kuvvetin ve hareketin daha dengeli bir şekilde dağıtılması mümkündür. Bu simetrik yapı, kuvvetin çalışma uzayının her bir noktasında daha uniform bir şekilde uygulanmasını kolaylaştırır. Bu özellik, paralel robotların, özellikle yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik gerektiren uygulamalarda, seri robotlara göre üstün performans sergilemesine imkân tanır.

Bu özellikler dikkate alındığında, delta robotunun end-efektörüne doğrudan parçaya temas edecek bir küresel takımın eklenmesiyle, kompozit malzeme üretiminde baskı makarasına duyulan ihtiyacın ortadan kaldırılabilceği anlaşılmaktadır. Delta robotun yüksek hız ve kuvvet kapasitesi, bu tür uygulamalarda kritik öneme sahiptir ve kompozit katmanlar arasında uniform baskı uygulama yeteneği, malzeme bütünlüğü ve ürün kalitesi açısından belirleyici bir rol oynar. Bu avantajlar, delta robotları, özellikle yüksek performans gerektiren kompozit imalatı uygulamaları için ideal bir seçim haline getirir.

Diğer yandan, AFP tezgahlarında baskı makaraları kullanılırken, robotun hareketi sırasında oluşan dinamik etkiler genellikle göz ardı edilmektedir. Üretim sürecinde yüksek hızlara ulaşıldığında, bu hızlar robotun yörünge takip performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Gelişmiş robot kontrol algoritmaları, hareketin hızını ve ivmesini hesaba katma yeteneğine sahiptir ve hatta parça ile takım arasındaki kuvvet etkileşimini dikkate alabilir. Bu süreç, seri robotlar için çeşitli yöntemlerle başarıyla gerçekleştirilmişken, paralel robotlar için bu tür bir kontrol oldukça zorlu bir işlemdir.

Bu tezde, delta robotların kompozit malzeme üretim sürecinde nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceği üzerinde durulmuştur. Çalışmada, robotun kinematik yapıları, dinamiği, kuvvet kontrol stratejileri ve yörünge planlama algoritmaları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca, delta robotların kompozit üretim sürecindeki temel gereksinimlerinden biri olan baskı kuvvetinin belirlenmesi, Hertzian temas teorisi ile açıklanmıştır. Bu teorik çerçeve içinde, robotun kinematik ve dinamik denklemleri derinlemesine analiz edilmiştir. Tez, delta robotlarının bu alandaki avantajlarını ve potansiyel iyileştirmeleri ortaya koymak amacıyla deneysel veriler ve simülasyon sonuçlarıyla desteklenmiştir.

Fiber katmanların birbirine düzgün bir kuvvetle yapışmasını sağlamak ve hava kabarcıklarının oluşumunu engellemek için baskı kuvvetlerinin değişimi en aza indirgenmelidir. Bu amaçla, delta robotun hareketi esnasında oluşacak baskı kuvvetlerini detaylı bir şekilde incelemek için MATLAB / Simulink programında geliştirilen bir simülasyon kullanılmıştır. Bu simülasyon, delta robotunun end-efektörüne entegre edilen temas kuvveti sensörü aracılığıyla, kübik, trapez ve minimum jerk yörünge planlama algoritmalarının kullanılması durumunda oluşan baskı kuvvetlerinin değişimlerini ölçmeye olanak tanır. Böylece, bu algoritmaların baskı kuvveti üzerindeki etkileri

doğrudan gözlemlenebilir ve bu kuvvetlerin fiber katmanları arasında nasıl bir etkileşim yarattığı analiz edilebilir.

Tez çalışması kapsamında, bu simülatör aracılığıyla elde edilen veriler, delta robotun end-efektörüne entegre edilen kuvvet sensörü kullanılarak yapılan deneylerle desteklenmiştir. Üç farklı yörünge planlama algoritmasının dört farklı tarama hareketi üzerindeki performansları, her bir algoritma için üç farklı parça yerleşimi ile kombine edilerek detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analiz sonucunda, bu algoritmaların kuvvet dağılımındaki uniformluğu açısından performansları karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular, delta robotların yörünge planlamasında dikkate alınması gereken kritik noktaları belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

Bu tez çalışması toplamda beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde delta robotlar üzerinde kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. İkinci bölümde kompozit malzemeler ve üretim teknikleri ile ilgili bilgiler verildikten sonra imalat için bir ister olan baskı kuvvetinin Hertzian temas teorisine göre nasıl belirleneceği açıklanmaya çalışılmıştır. Üçüncü bölümde delta robotların teorik altyapısını ortaya koyabilmek adına kinematik, dinamik ve kuvvet kontrol algoritmaları sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde yörüngedeki değişimlerin robot-parça etkileşiminde oluşturacağı kuvvetleri simüle etmek için kullanılan Matlab/Simmechanics simülatörü tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde ise robotun yörünge planlamasında kullanılacak; kübik, trapez ve minimum jerk yörünge planlama algoritmaları açıklanmıştır. Beşinci bölümde tutucu ucuna entegre edilmiş bir kuvvet sensörü aracılığıyla, üç farklı yörünge planlama algoritmasının dört farklı tarama hareketi üzerindeki performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu inceleme sürecinde, üç farklı parça yerleşimi esas alınarak algoritmaların kuvvet dağılımındaki uniformluğu değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, delta robotların kullanımında yörünge planlaması sırasında dikkat edilmesi gereken kritik noktaların belirlenmesinde kullanılmıştır.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemelerin geliştirilmesi, endüstriyel üretimde yüksek mukavemet, mekanik ve elektriksel özellikler gibi çeşitli avantajlar sunarak özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayisi gibi sektörlerde kullanımını artırmaktadır. Malzeme üretimi insan gücüne ve makine gücüne dayalı iki ana kategoriye ayrılarak, özellikle küçük hacimli ve özelleştirilmiş üretimler için insan gücüne dayalı yöntemler tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemlerin sınırlamaları nedeniyle otomatik elyaf yerleştirme (AFP) gibi gelişmiş teknolojiler devreye alınmıştır.

AFP tezgâhları, robotik sistemler ve baskı makaraları kullanarak kompozit katmanların birleşimini sağlar. Ancak, bu sistemlerde kuvvet kontrolü yeterince dikkate alınmadan gerçekleştirildiği için, ürün kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşabilmektedir. Bu sorunları aşmak için entegre kontrol sistemleri ve daha hassas sensörlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Öte yandan, delta robotlar yüksek hız ve kuvvet kapasiteleri sayesinde, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu robotlar, paralel yapıları sayesinde yükü eşit olarak dağıtarak daha fazla kararlılık ve kontrol sağlar. Kuvvet ve hareketin uniform dağılımı, özellikle hassas montaj işlemleri ve yüksek hız gerektiren uygulamalarda kritik rol oynar. Delta robotlar, sabit bir platforma göre tutucu ucu yönlendirmek için seri kinematik zincirleri bilgisayar tarafından kontrol edilen, temelinde paralel mekanizmaya dayanan robotlardır. Uzayda üç serbestlik derecesine sahiptirler ve sadece kartezyen uzayda hareket gerçekleştirerek Rot_X, Rot_Y, Rot_Z eksenleri etrafında dönme hareketine sahip değildir. Delta robotlar seri robotlara kıyasla 15G'ye ulaşan yüksek ivmelenme değerlerine sahiptirler. Üretim sektöründe tut-bırak

işlemleri üzerinde son 10 yılda yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve akademik anlamda yükselen bir eğilimle üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada, kompozit malzemelerin üretim süreçlerinde kullanılan geleneksel ve modern teknikler ile ilgili kritik faktörler ve bunların endüstriyel uygulamalardaki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. AFP sistemlerindeki mevcut sorunlar, bu sorunların üretim sürecine ve nihai ürün özelliklerine olan etkileri ile birlikte değerlendirilerek, daha etkin kuvvet kontrolü sağlayabilecek teknolojik çözümlerin geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Bununla birlikte, delta robotlarının kompozit malzeme üretiminde nasıl bir fark yaratabileceği ve bu sistemlerin geleneksel yöntemlere göre sunduğu avantajlar öne çıkarılacaktır. Delta robotlarının yüksek hız ve kuvvet kapasitesinin, kompozit üretiminde nasıl değerlendirilebileceği ve bu kapasitenin üretim süreçlerindeki etkinliği, literatürdeki çeşitli çalışmalarla desteklenerek sunulacaktır. İleri teknolojiye dayalı bu robot sistemlerinin, endüstriyel imalat pratiklerinde karşılaşılan zorlukları nasıl aşabileceği ve üretim süreçlerini nasıl dönüştürebileceği konusunda detaylı bilgiler verilecektir.

Bu bağlamda, bu bölümde literatürde yer alan çeşitli akademik çalışmalar ve endüstriyel uygulamalar incelenerek, delta robotlarının kompozit malzeme üretimindeki potansiyeli hakkında bilgi birikimi sunulacak ve bu robotların sahip olduğu kinematik yapının, kuvvet dağılımı ve kontrolü açısından nasıl bir avantaj sağladığı tartışılacaktır. Araştırma ve geliştirme çalışmalarının sonucunda elde edilen bulgular, delta robotlarının üretim süreçlerindeki rolünü yeniden tanımlayacak ve bu alandaki teknolojik ilerlemelerin önünü açacaktır. Bu şekilde, bu çalışma kompozit malzeme üretimi alanında bilgi sınırlarını genişletmeyi ve endüstriyel uygulamalarda yenilikçi çözümler sunmayı hedeflemektedir.

1.1. Problem Durumu

Klasik kompozit imalatında katmanlar ya el ile serilmekte ya da seri manipülatörler kullanan otomatik katman yerleştirme tezgahları (AFP) tarafından kalıba serilmektedir. El ile serme yönteminde çıkan ürün kalitesi operatörün kabiliyetlerine bağlıdır. Modern üretim sistemlerinde hassas bir parça üretilmek istendiğinde, kompozit boyutu, gerilme

gibi önemli imalat verileri, operatör yerine karmaşık robot sistemler tarafından belirlenmektedir.

Üretilen kompozitin standardizasyonu açısından bu serme işlemi oldukça önemlidir. Her ne kadar AFP tezgahlarında kullanılan antropomorfik robotlar kuvvet kontrolü gerçekleştirilebilseler de el ile serme işleminde kalıba uygulanan kuvvetin kontrolü gerçekleştirilememektedir. AFP tezgahlarda genelde uygulanan kuvvetin yüksek olabilmesi için oldukça büyük faydalı yüke (payload) sahip seri manipülatörler tercih edilmektedir. Seri manipülatörler yapısı gereği kuvvet üretimi için oldukça verim sağlayan sistemler değildirler.

Antropomorfik robotlar üzerine monte edilen baskı makaraları, yüzeye uygulanan kuvveti kontrol eder fakat kuvvet kontrolü, robot dinamiği, hareket yörüngesi, hızları gibi durumları yeterince dikkate almayan bağımsız kontrolörlerle gerçekleştirilmektedir, ve kullanılan gürültülü kuvvet sensörleri nedeniyle, veriler filtrelenmektedir ve bu durum, işlenen parça yüzeyinde uniform olmayan kuvvet dağılımlarına neden olabilmektedir.

1.2. Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın ana amacı, kompozit malzeme üretiminde delta robotların kullanımı üzerinden yörünge planlamasının kuvvet kontrolüne olan etkilerini derinlemesine analiz etmektir. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet ve hafiflik özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv ve savunma sanayisi gibi pek çok sektörde tercih edilen malzemelerdir. Geleneksel el ile serim yöntemlerinin zaman alıcı ve yoğun iş gücü gerektirmesi, otomatik üretim sistemlerinin, özellikle otomatik elyaf yerleştirme (AFP) tezgahlarının, kompozit malzeme üretiminde daha yaygın kullanılmasına yol açmıştır. Ancak AFP tezgahlarında karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, kuvvet kontrolünün yeterince hassas yapılamamasıdır. Bu kontrol, genellikle robotun dinamiği, hareket yörüngesi ve hızlarını yeterince dikkate almayan bağımsız kontrol sistemleri tarafından gerçekleştirilmekte ve kullanılan gürültülü kuvvet sensörleri nedeniyle elde edilen verilerin filtrelenmesi gerekmektedir. Bu durum, işlenen parçaların yüzeyinde uniform olmayan kuvvet dağılımlarına yol açarak ürün kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir.

Son yıllarda, özellikle yüksek kuvvet ve hız ihtiyacı duyulan uygulamalar için paralel manipülatörler, yani delta robotlar giderek daha fazla tercih edilmektedir. Delta robotlar,

serme işlemlerinde yüksek kuvvet üretebilme ve hızlı hareket edebilme kapasiteleri sayesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, delta robotlarının kompozit malzeme imalatındaki kullanımını detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmanın odak noktası, robotun kinematik yapıları, dinamik özellikleri, kuvvet kontrol stratejileri ve özellikle yörünge planlama algoritmalarının kuvvet dağılımı üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir. Çalışma kapsamında, Matlab/Simmechanics simülatörü kullanılarak farklı yörünge planlama algoritmalarının robot-parça etkileşimine ve sonuç olarak oluşan kuvvet dağılımına olan etkileri simüle edilecektir. Robotun tutucu ucuna entegre edilen kuvvet sensörü, üç farklı yörünge planlama algoritması kullanılarak gerçekleştirilen dört farklı tarama hareketinin performansını ölçmek için kullanılacak ve elde edilen veriler, bu algoritmaların kuvvet uniformluğu açısından karşılaştırmalı bir analizi sağlayacaktır.

Bu değerlendirmeler, delta robotların kompozit üretiminde nasıl daha etkin kullanılabileceğini ortaya koyarken, yörünge planlamasının kuvvet kontrolü üzerindeki kritik etkilerini belirlemek ve bu bilgileri kullanarak daha optimize edilmiş üretim süreçleri geliştirmek araştırmanın temel hedeflerindendir. Sonuç olarak, bu çalışma, delta robot kullanımının potansiyelini maksimize etmeyi ve kompozit üretim süreçlerinde karşılaşılan mekanik ve operasyonel zorlukları minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu sayede, endüstriyel üretim pratiklerinde verimlilik ve ürün kalitesinde önemli iyileşmeler sağlanması hedeflenmektedir.

1.3. Araştırmanın Önemi ve Literatürde Yapılan Çalışmalar

Kompozit malzemeler, sanayinin pek çok alanında yüksek faydaya ve verime sahip ürünlerin orta konmasında önemli noktalar ortaya koymaktadırlar. Bu malzemelerin üretimi de pek çok farklı şekillerde istenilen kriterlere uygun şekilde gerçekleştirilmesi, gelişen teknoloji sayesinde kolaylaşmaktadır. Kompozit malzemelerin en temel üretim tekniklerinden bir tanesi de el ile serme tekniğidir.

Elkington ve arkadaşları sundukları çalışmada[1] önceden emprenye edilmiş dokuma malzemelere (prepreg) odaklanarak kompozit imalatında kullanılan manuel el yerleştirme sürecini araştırmaktadır. Elle yerleştirme, karmaşık şekiller oluşturmak için çok önemlidir, ancak değişken ve pahalı bir işlemdir. Çalışma, belirli teknikleri farklı geometrik özelliklere bağlamak için laminatörler tarafından kullanılan sekiz farklı tekniği

tanımlamaktadır. Bu araştırma, ilgili manuel tekniklerin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak yerleştirme sürecini iyileştirmeyi, eğitimi geliştirmeyi ve otomatik çözümlerin geliştirilmesini amaçlamaktadır.

Skramstad [2] yaptığı çalışma ile türbin bıçaklarının üretiminde el ile serme yöntemindeki dezavantajları belirtmiş ve reçine kalıplama tekniği kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada incelenen geometriler için laminat kalınlığı, fiber hacmi ve ağırlıkta prosesin önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. Reçine transfer metodunun tüm altyapılarda kalınlıkları azalttığı ve ağırlıkları iyileştirdiği sonucunu belirtmektedir. El ile serme yöntemi kullanıldığında ve reçine transfer tekniği ile üretim gerçekleştirildiği zaman kumaş kesimi, temizlik, kalıp temizliği ve üretim zamanı gibi parametreleri karşılaştırdığı tabloları sonuçlarda sunmaktadır.

Direk[3] el ile serme yöntemini kullanarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir bu çalışmada epoksi, titanyum dioksit ve talk maddelerinin ağırlıkça 5 farklı karışım oranlarında birleştirilerek karbon fiber üretimini gerçekleştirmiştir. Sonuçta elde ettiği ürünün mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testine tabi tutmuştur ve sonuçta en iyi çekme mukavemetinin %0.5 talk ve %1 titanyum dioksit malzemeden elde ettiğini belirtmiştir. Çalışmasında karbon fiber kompozitlerin mukavemetinin nasıl iyileştirilebileceğine yönelik açıklamaları sunmaktadır.

Güldü[4] yaptığı tez çalışmasında otomatik fiber serme tekniğini açıklayarak, fiber yönelim açıları tasarım gereksinimlerine göre değiştirilebileceğini belirterek, bu açı değişimlerinin optimizasyonlar ile iyileştirilerek daha yüksek yapısal sonuçlar alınabileceğini belirtmektedir. Çalışmasında sonlu elemanlar programı ve Matlab ile parçaçık sürü optimizasyonu yapmış ve değişken sertlikli silindirlerin sabit sertlikteki silindirlerle karşılaştırıldığında daha yüksek burulma yük faktörü elde edilebileceğini göstermiştir.

Halbritter, tez çalışmasında[5] bilgisayar destekli süreç tasarım yazılımı geliştirilmiştir. Yazılım içerisine ek olarak kapsamlı şekilde fiber serme listesi, fiber bozuklukları ve ayrık planlama fonksiyonları listelenmiştir, yazılımın amacı ise serme stratejisinin seçilmesi ve başlama noktalarının belirlemek olduğu yazılmaktadır.

Joseph Q. Oberhauser, Lineer Delta Robot Tasarımı, Yapımı, Kontrolü ve Analizi adlı yüksek lisans tezinde[6], lineer girişli bir delta robotun tasarımını, yapımını, kontrolünü ve analizini içeren bir çalışma yapmıştır. Mevcut tasarımları iyileştirebilecek birkaç yeni tasarım değişikliği yapıldığı, düşük maliyetli donanımın (Arduino) ile 5. dereceden polinom yörünge kontrolünü kullanarak yüksek kaliteli hareket elde etmesine izin veren kontrol çalışması yapmıştır. Çalışmasında delta robotun hız, doğruluk ve hareket analizini yerine getirdiğini belirtmiştir.

Bozok çalışmasında[7], delta robota ait entegre tasarım ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda daha önceden belirlenen robota göre kinematik model Matlab programı ile tanımlanmış ve bu model sayesinde hedeflenen uç nokta hareketi için motor açısal konumları ve hızları hesaplanmıştır. ANSYS programı sayesinde robotun ve eklemlerinin eşdeğer basit uzuvları tanımlayabilmek için tasarım ve analiz çalışması yapılmıştır. robotun tahriğinde kullanılan motor ve redüktör sistemi için de etkin atalet hesaplamaları yapılmış, sistem üzerinden ölçümler alınarak rijitliği tespit edilmiş, tahrik sistemi için de eşdeğer bir model sunulmuştur. Elde edilen uzuv ve tahrik sistemi modelleri birleştirilerek delta robot için eşdeğer bir analiz modeli kurulmuştur. Bu modelden elde edilen doğal frekans ve statik çökme değerleri, robot üzerinden alınan ölçümlerle kıyaslanmıştır.

Yıldırım bu çalışmasında,[8] üç derece serbestlik derecesine sahip bir Delta Robotun görüntü işleme tabanlı yörünge kontrolü gerçekleştirilmiştir. Delta Robot tasarımı incelenmiştir. Robotu oluşturan bileşenlerin tanımlanmış ve görevleri anlatılmıştır.

Gül [9] çalışmasında teleskopik mast Sistemi incelenmiş ve Delta Robot'un bu sisteme katkısı analiz edilmiştir. Delta Robot'un "Çalışma Alanı Analizi" yapılmıştır. Yörünge kontrolü ve bu yörünge kontrolünün nasıl yapılacağı anlatılmıştır. En verimli yol seçilmiş ve belirlenen bir yolda bir yörünge kontrolü yapılmıştır. MATLAB Simulink Multibody ortamında bir simülasyon oluşturulmuş, ters kinematik kodları sisteme yerleştirilmiş ve bir PID kontrol sistemi eklenmiştir. PID optimizasyonu, Toolbox kullanılarak yapılmıştır. Bu montaj sistemi MATLAB Simulink programı ile simüle edilmiştir.

Alashqar bu çalışmada,[10] paralel delta robotun tasarım ve yüksek hassasiyetli şekilde kontrol işlemi gerçekleştirmeye çalışılmıştır. Delta robot çok girişli-çok çıkışlı doğrusal

olmayan bir sistemdir, dolayısıyla robotun performansını artırmak amacıyla PID ve MPC olarak iki farklı kontrol yönteminin uygulandığı bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada sistemin dinamik modelde ki değişimlerden dolayı, en uygun kontrolcü tasarımı yapmanın neredeyse imkansıza yakın olduğu belirtilmiştir. Bundan dolayı çalışmada iki farklı kontrol algoritması, PID ve MPC olarak, simüle edilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Hu daha önce gerçekleştirmiş olduğu bir yüksek lisans tezinde,[11] sistem rijitliği odağında yeni bir paralel kinematik makine tasarımı amaçlanmıştır. Paralel kinematik makine, üretim sektörünün farklı alanlarından kullanılabilme imkanına sahip üç serbestlik dereceli bir robottur. Çalışmada ilk olarak robotun CAD tasarımı oluşturulmuştur, ters kinematik analizleri yapılmış jakobiyen ve hız matrisleri türetilmiş ve yapıya ait iki adet tekillik incelenmiştir. Yeni tasarıma ait çalışma-uzayı simülasyonu sunulmuş ve robota ait statik dengeleme koşulları araştırılarak gerekli parametreler verilmiştir. Bu çalışmaya ait önemli noktalardan birisi ise, istenen sertliği elde etmek için kinematik parametreleri ayarlayarak ve yörüngeyi yeniden planlayarak paralel bir kinematik makinenin nasıl yeniden yapılandırılacağına çözümünü sunar. PKM'ye(paralel kinematik makine) ait genel rijitliğinin optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve optimal tasarım parametreleri önerilmiştir. 3-DOF PKM'nin, dinamik modelleme ve dinamik simülasyonlarda ihtiyaç duyulacak olan hareket denklemleri, Lagrange Metodu kullanılarak elde edilmiştir. Tez ait sonuçlar kısmında yapılan araştırma çalışmasının bölümler olarak hedeflerine ulaştığı belirtilmiştir.

Liu ve arkadaşları daha önce yapmış oldukları bir araştırma makalesinde [12], bir Delta robotunun küresel mafsallarının istenen çalışma alanını ve salınım aralığını dikkate alan yeni bir tasarım yöntemi sunulmaktadır. Yeni tasarım, bu çalışmada önerilen maksimum dairesel çalışma alanı (*the maximum inscribed workspace*) olan yeni bir konsepte dayanmaktadır. İlk olarak, bir DELTA robotu için çalışma alanının geometrik tanımı tartışılmış, özellikle robot için maksimum dairesel çalışma alanı kavramı önerilmiştir. Uygulama örneği olarak, belirli bir çalışma alanına sahip DELTA robotunun bir tasarım sonucu sunulmuştur ve kabul edilebilirliği, koşullandırma indeksi ile kontrol edilmiştir. Makalenin sonuçları paralel robot tasarımı ve gerçekleşmesi açısından oldukça faydalı olduğu belirtilmiştir.

Şanlıtürk tez çalışmasında [13] görerek işlem yapabilen Delta robotun tasarımının yapılması ve performans karakteristiklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda robotun analitik modeli oluşturulmuş ve bu model kullanılarak paket program yardımıyla robot eklemlerinin boyutları optimize edilmiştir. Sonra sonlu elemanlar yöntemi temelinde, paket programlar aracılığı ile gerilme analizleri yapıp istenen şartlarda çalışıp çalışamayacağı belirlenmiştir. Atalet ve yerçekimi kuvvetleri de bu modele uygulandığı araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Robotun görme, sınıflandırma ve kontrol yazılımları hazırlandıktan sonra sistemin imalatı yapılmıştır ve son olarak deneysel çalışmalar tamamlanmıştır. Çalışmanın sonucunda görerek işlem yapabilen robotik bir sistem hazırlanmıştır.

Olsson çalışmasında[14] delta robot hakkında modelleme ve kontrol üzerine deneysel ve simülatif çalışma gerçekleştirerek, robot kinematiği ve dinamiği olarak ikiye ayırmaktadır. Jakobiyen matrisin hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. ELAU GmbH firmasına ait yazılımı ile farklı yörüngeler oluşturarak simülasyonlar gerçekleştirmiş ve çıkan verileri fiziksel sistem sonuçları ile karşılaştırmaktadır.

Baran ve arkadaşları[15],[16] 3-serbestlik dereceli delta robot üzerinde, robotun serbestlik derecesine ilave dönme serbestliğine sahip eksen eklenerek elde edilen 5-serbestlik dereceli delta robot ile inceleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında Matlab/Simmechanics simülatörü kullanarak, robota ait dinamik denklemleri çıkarmış ve simülatör sensörlerinden alınan veriler ile dinamik denklemlerin hesaplanmasından alınan verileri karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında yörüngeye bağlı kütle dağılımına ve sanal iş ilkesine dayalı, kontrol uygulamalarında daha az hesaplama maliyetiyle avantajlı olacak dinamik bir model önerilmiştir. Hem kinematik hem de dinamik modeller, temel 3-DoF Delta ve koaksiyel veya paralel teleskopik şaftlara sahip diğer 4-DoF ve 5-DoF genişletilmiş Delta robotları için kullanılabileceği belirtilmektedir. Yaptıkları çalışma neticesinde kuramsal katkıların yanı sıra, oluşturulan simülatör modeli, yörünge planlaması, kontrol stratejileri, yeni modelleme yaklaşımları ve robotun belirli görevler için yeteneğinin araştırılması için bir araştırma ve test platformu görevi göreceğini belirtmişlerdir.

Okasha ve Bartoff,[17] Modelica tabanlı simülatör üzerinden delta robot kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında delta robotun dinamik modellerini elde etmişler,

robot a ait iki jakobiye matrisi elde ederek singular konumdan bağımsız ve bir indekse sahip diferansiyel cebirsel denklemleri model tabanlı kontrol ve bilgisayar simülasyonu için kullandıklarını belirtmektedirler. Geri besleme lineerleştirme kontrol algoritmasını gerçekleştirdikleri simülasyon modeli kullandıklarını belirterek, modelin yörünge takibi, empedans kontrolü gibi temas ve çarpışma içeren durumlarda kullanılabileceğini açıklamaktadırlar. Çalışma içeriklerinde, robot kinematiği, manipülatör jakobiye matrisi, diferansiyel cebirsel denklemleri ve robot kontrolü üzerinde yaptıkları bilgileri paylaşmaktadırlar.

Şimşek[18] yaptığı tez çalışmasında, 6 serbestlik dereceli bir kaynak robotu tasarlayarak elektrikli tramvay imalatında yapılacak kaynak işlemine yönelik ileri ve ters kinematik denklemleri kullanarak beşinci dereceden yörünge planlama işlemlerini gerçekleştirmiştir. Planlanan yörünge için takip ve kontrolü için simülasyon çalışması gerçekleştirdiği ve sonuçlarda tasarladığı robotun imalatını uygun olduğunu belirtmektedir.

Beyhan çalışmasında [19] üç serbestlik derecesine sahip robotun bilgisayar destekli tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiş olup pozisyon tabanlı empedans kontrolü gerçekleştirilmiştir. Çalışma içeriğinde robot kinematik denklemleri elde edilmiş yörünge planlama işlemleri gerçekleştirilerek robot dinamiği kısmında kütle atalet, merkezci ivme ve yerçekimi matrisleri elde edilerek robot hareketi için gerekli tork denklemleri elde edilmiştir. Sonrasında robotun fiziksel tasarım ve imali gerçekleştirilerek gerçek zamanlı kontrol yapılmıştır. Çalışmada robotun matematiksel modeli aracılığıyla PID kat sayıları elde edildiği belirtilmektedir.

Dirin tez çalışmasında[20] 3-UPS, 1-RU paralel robot üzerine kinematik denklemlerinin incelendiği ve, ters kinematik aracılığıyla belirlenen yörünge planlama algoritmaları gerçekleştirilmiş ve yeni bir model önerildiğini belirtmektedir. Paralel robotların halihazırda bulunmayan yeni kullanım alanlarını önermektedir.

Çetin tez çalışmasında [21] insansız hava araçları için optimum uzaysal yörünge planlama üzerinde faaliyetler gerçekleştirmiştir. Çalışma içeriğinde dört adet rotora sahip insansız hava aracı için uygun yörünge planlama algoritmasının seçilmesi, uygulanması ve kararlı bir şekilde takip edebilmesi için gerekli kontrolcü tasarımlarını içerdiğini belirtmektedir.

Ünlüel endüstriyel robotlarda zaman optimal yörünge kontrolü ile gerçekleştirmiş olduğu çalışmada [22] minimum zamana ulaşmayı eniyileme amacı olarak belirlemiş ve geliştirdiği uygulamalarda robota dairesel yörünge ve lineer yörünge takibini gerçekleştirmiştir. Çalışmasının neticesinde yörünge tamamlanma zamanını 3.6 sn'den 1.5 sn'ye indirdiğini belirtmektedir.

Ünsal çalışmasını [23] yörünge planlama üzerinde gerçekleştirmiş ve tekilliklerden geçmekte olan paralel robotlar için optimal parçalı 5.dereceden polinom yörünge planlama tekniği geliştirdiğini belirtmektedir ve tutarlılık koşulunu sağladığını ifade etmiştir.

Belirtilen çalışmalar, kompozit malzemelerin ve imalat süreçlerinin çeşitli kaynaklar üzerinden incelenmesiyle başlar. Burada, mevcut teknikler arasında öne çıkanlar ve teknik bazda eksiklik gösteren yöntemler belirlenerek, yenilikçi çözümler geliştirme yönünde araştırmalar yapılmıştır. Bu süreçte, endüstriyel imalat alanında ve akademik çevrelerde giderek artan bir ilgiyle karşılaşılan delta robotlar üzerinde önemli boşluklar tespit edilmiştir. Özellikle, antropomorfik robotlarda yaygın olarak kullanılan dinamik denklemlerin delta robotlar üzerindeki uygulanabilirliği ve bu robotların kompozit imalat süreçlerinde baskı kuvvetlerinin etkin bir şekilde kontrol edilmesi konusundaki potansiyeli araştırılmıştır. Bu bağlamda, yörünge planlama algoritmalarının ve iş parçalarının farklı pozisyonlarda uygulandığında kuvvet dağılımının sürekliliği üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu alanda mevcut bilgi boşluğuna katkı sağlanması hedeflenmiştir. Bu tez konusunun seçilmesinin ardında yatan nedenler, mevcut literatürde yapılan detaylı incelemeler sonucunda belirlenen belirgin akademik ve teknolojik boşluklardır. Kompozit malzemelerin üretim süreçleri, yüksek mukavemet ve hafiflik gibi özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmekte, bu süreçlerde verimlilik ve kaliteyi artırmak amacıyla sürekli yeni yöntemler araştırılmaktadır. Ancak, geleneksel el ile serme yöntemleri ve otomatik elyaf yerleştirme (AFP) tezgahlarında kullanılan antropomorfik robotlar arasındaki performans farklılıkları, özellikle kuvvet kontrolü ve yüzey kalitesi açısından önemli sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu robotlar, özellikle kuvvet dağılımı ve yörünge takibi konularında yetersiz kalmakta, bu da kompozit parçaların homojen olmayan yapısına yol açmaktadır.

Delta robotlar, son yıllarda özellikle yüksek hız ve kuvvet ihtiyacı olan uygulamalarda tercih edilmeye başlanmıştır. Bu robotların kompozit üretim süreçlerinde kullanılması, yüksek hız ve doğruluk gerektiren imalat işlemlerinde önemli avantajlar sunabilir. Ancak, delta robotların kinematik ve dinamik yapıları, mevcut antropomorfik robot sistemlerinde kullanılan kontrol algoritmalarıyla tam olarak uyumlu değildir. Bu uyumsuzluk, delta robotlarının potansiyelini tam olarak kullanılamamasına sebep olmakta ve bu da akademik araştırmalarda dikkate değer bir boşluk oluşturmaktadır.

Bu tezin odaklandığı ana konu, delta robotların kompozit malzeme imalatında nasıl daha etkin kullanılabileceğinin araştırılmasıdır. Özellikle yörünge planlama ve kuvvet kontrol stratejileri üzerine yoğunlaşarak, bu robotların kompozit üretim süreçlerindeki performansını maksimize etmek amaçlanmaktadır. Bu çalışma, delta robotların daha önce ele alınmamış dinamik ve kinematik özelliklerini kullanarak, kompozit serme işlemlerinde karşılaşılan temel sorunlara çözüm getirebilir. Ayrıca, yörünge planlama algoritmalarının bu robotlar üzerindeki etkinliğini test ederek, iş parçalarının pozisyonlarına göre değişen kuvvet dağılımlarını analiz etmekte ve bu sayede delta robot teknolojisinin bu alanda nasıl optimize edilebileceğini göstermekte önemli bir katkı sunmaktadır. Bu bakış açısıyla, tez, kompozit üretimi alanında teknolojik ve metodolojik ilerlemeler sağlama potansiyeline sahiptir ve bu alandaki boşlukları doldurmayı hedeflemektedir.

2. BÖLÜM

KOMPOZİTLER

Kompozit malzemeler endüstride teknolojinin hızlı gelişimi sonucunda ihtiyaç duyulan ileri seviyedeki ürünlerin elde edilmesi amacıyla ortaya çıkan malzeme türüdür. Bu malzemeler en az iki farklı tip malzemenin kendine has ileri özellikleri nedeni ile daha dayanıklı, hafif mukavim ve maliyet etkin malzemeler elde edebilmek amacıyla fiziksel seviyede bir araya getirilerek oluşturulurlar. Bu malzemeleri makroskobik muayene ile yapı bileşenlerinin insan gözü ile seçilip ayırt edilmesi mümkündür ve kompozitleri oluşturan bileşenler genellikle birbirleri içerisinde çözünmeyerek inert(asal) özellik gösterir. Kompozitlerin özellikleri, oluşturan bileşenlerin niteliklerine, boyut, şekil ve yönelim gibi parametrelere bağlı olmaktadır. Kompozitleri bir araya getiren bileşenleri de matris malzemeler, elyaf malzeme ve dolgu elemanı olarak adlandırılır. Elyaf malzemeler, farklı tip cam, karbon, kevlar elyafı gibi malzemeler, kompozitlerin mukavemetini artırmak için ince, uzun yapıdaki elemanlar kullanılır. Kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılarak yüksek dayanım, rijitlik, termal kararlılık ve iletkenlik gibi yapısal özellikler sağlar.

Matris malzemeler, elyafları bir arada tutan ve üzerindeki yükün elyaflara dağılımını sağlayan elemandır. Yapının şeklini koruyarak rijitliği meydana getiren bu malzemeler, elyafları birbirinde ayırarak herhangi bir bireysel lif kırılımı ya da çatlama durumunda kompozitin formunu korurlar. Elyaf malzemeleri kimyasal ve mekanik bozulmalara karşı muhafaza ederler.

Dolgu malzemeleri, bu malzemelerde dolgu elemanı olarak silika, talk kalsiyum karbonat gibi bileşenler kullanır ve matris ve elyafların arasına yerleştirilerek malzeme yüzeyinin pürüzsüz hale getirerek mukavim olmasını sağlar.

Kompozit malzemeler, takviye elemanlarına göre genel olarak sürekli-fiber takviyeli, kısa fiber whisker takviyeli ve parçacık kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Matris malzemelerine polimer matris, metal matris ve seramik matris kompozitler olarak sınıflandırılır. Ayrıca polimer matrisler termoplastik, termoset ve elastomerler olarak üç alt dala ayrılmaktadır. [24]

Kompozitlerin sağladığı artı özellikler olarak;

- Belirli bir ağırlık için daha yüksek performans verimi ve bu sayede yakıt tasarrufuna imkan sağlaması,
- Kompozit malzemelerle yüksek seviyede mukavemet / ağırlık ve sertlik / ağırlık oranları elde edilebilir. Bu terim genellikle yoğunluğa bölünen kuvvet ve yoğunluğa bölünen sertlik (modül) olarak ifade edilir. Bu terimlere spesifik kuvvet ve spesifik modül özellikleri olarak adlandırılır.
- Bir parçadaki laminat desenleri ve kat oluşumu, çeşitli yönlerde gerekli mekanik özellikleri verecek şekilde uyarlanabilir.
- Havacılık ve uzay sanayisine yönelik parça üretimden sürtünmeyi azaltmak için pürüzsüz aerodinamik profiller elde etmek daha kolaydır.
- Tek bir üretim işleminde pürüzsüz yüzey kaplamasına sahip karmaşık çift eğrilikli parçalar yapılabilir.
- Üretim maliyetleri azalır. Kompozitler çok çeşitli işlemlerle üretilebilir. Kompozitler korozyona, kimyasal saldırılara ve dış hava koşullarına karşı mükemmel direnç sunar, bununla birlikte, bazı boya ayırıcı gibi kimyasallar kompozitlere zarar verir. Termoplastikler bazı çözücülere karşı çok dayanıklı değildir. [24,25]

Yukarıda kompozitler üzerinde bahsedilen olumlu özelliklerin yanısıra olumsuz taraflarından da bahsedilecek olursa;

- Kompozitler dökme metallere göre daha kırılgandır ve bu nedenle daha kolay zarar görürler.

- Onarım ve tamir süreci aşağıdaki nedenlerden dolayı yeni sorunlar ortaya çıkarır. Malzemeler soğutulmuş taşıma ve depolama gerektirir ve sınırlı raf ömrüne sahiptir. Birçok durumda özel ekipman gerektiren sıcak kürleme gereklidir. Sıcak veya soğuk kürleme işlemleri zaman alır.
- Bağlantı elemanı olarak perçinler kullanılmış ve çıkarılması gerektiği durumlarda daha fazla hasara neden olmadan çıkarma konusunda yeni sorunları meydana getirir.
- Orijinal kür sıcaklığında onarım, takım aletleri ve basınç ihtiyaç duyar. Onarımdan önce kompozitler tüm toz vb. gibi kirlilerden iyice temizlenmelidir ve kompozitler onarım işleminden önce kurutulmalıdır çünkü tüm reçine matrisleri ve bazı lifler nemi emer.

Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de Fiber matris yapısının tipik kullanım alanları ve kullanılan işleme teknikleri verilmektedir.

Tablo 2.1. Fiber Matris Yapısının Tipik Kullanım alanları [26]

Fiber/Matris	Kullanım Alanları
Karbon(Grafit) / Epoksi	1. Yapısal kompozitler için en çok kullanılan malzeme 2. Kafeslerde, basınçlı kaplarda, optik tezgahlarda, raflarda kullanılır 3. Düşük, orta ve yüksek modüllü formlarda mevcuttur 4. Hasar toleransı tipik olarak modül ile ters değişir
Cam / Epoksiler	1. Basınçlı kaplarda ve kurban tabakalarında kullanılır 2. Karbon / epoksi yapılar için alev bariyeri olarak ve karbon / epoksi, karbon / fenolikler ile alüminyum bileşenler arasında galvanik korozyon bariyeri olarak kullanılır
Kevlar®/Epoksiler	1. Basınçlı kaplarda ve küçük katı roket motorlarında kullanılır 2. Mükemmel hasar toleransı 3. Düşük basınç dayanımı
Elyaf Takviyeli Termoplastikler	1. Mükemmel hasar toleransı 2. İyi tamir edilebilirlik 3. Daha düşük yapısal performanslı termosetler
Elyaf Takviyeli Bismaleimidler, Fenolikler	1. Mükemmel yüksek sıcaklık özellikleri 2. Yüksek ısı akısı alanlarında kullanılır (nozüller, kaplamalar, burun kapakları) 3. Daha yüksek işlem sıcaklıkları gerektirir

Tablo 2.2. İşleme Teknikleri[26]

SAĞLANAN FORMLAR	HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ	KÜRLEME YÖNTEMLERİ
Değişen genişliklerde prepreg bant - tek yönlü veya kumaş Prepreg tow - önceden emprenye edilmiş lif demetleri Kuru elyaf artı ıslak reçine Elyaf takviyeli dökme modül bileşiği	Filament sargısı / ıslak sargı veya Prepreg takımı El ile serme Bant sarma Bant serme Pultrüzyon Polar sarma Örgü Reçine transfer kalıplama Fiber Lif yerleştirme	Otoklav Hidroklav Fırın Presleme Sıkıştırma kalıplama

2.1. Kompozit Üretim Yöntemleri

Temel seviyede yaygın olarak kullanılan üretim tekniklerinin kalıplama metotlarına göre sınıflandırılması aşağıdaki şekilde sunulmaktadır [27]. Kompozit imalat yöntemleri açık kalıplama ve kapalı kalıplama olarak iki kısma ayrılmaktadır. Açık kalıplama tekniğinde üretim sürecinde lamine parçalar açık hava ile temas halindedir ve temel olarak el ile serme, spreyleme ve filament sarım tekniği olarak bölümlere ayrılır. Üretim tekniklerine ait görsel Şekil 2.1’deki diyagramda sunulmuştur.



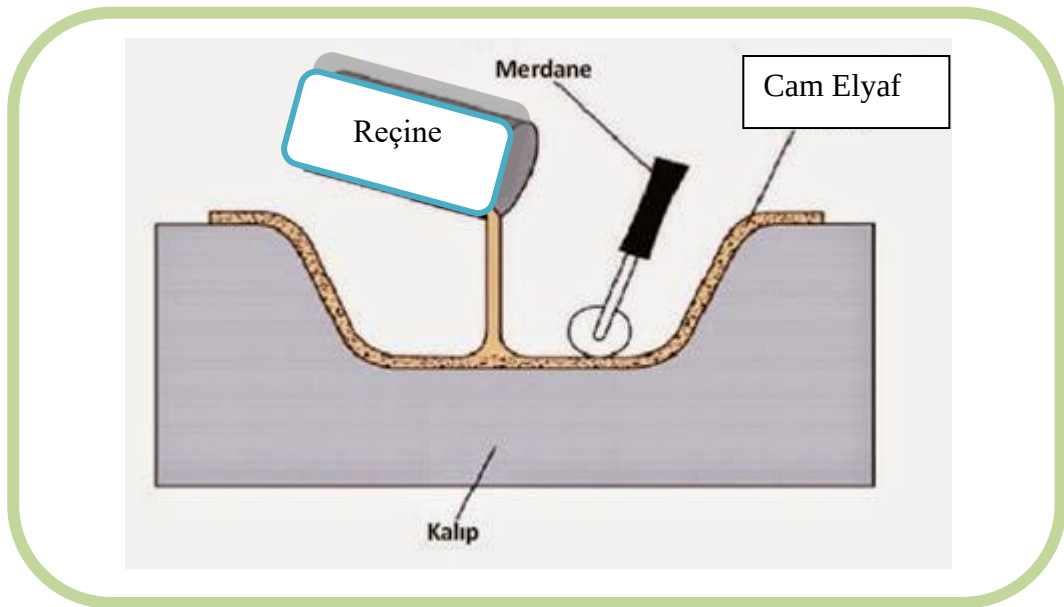
Şekil 2.1. Üretim Teknikleri

Kapalı kalıplama da ise vakumlu bir şekilde çift yüzeyli kalıp içerisinde işlem görülür. Kapalı kalıp teknikleri reçine transfer, vakum destekli reçine transfer, pultrizyon (profil çekme), enjeksiyon kalıplama olarak sınıflandırılabilir.

2.1.1. El ile Serme Yöntemi

El ile serme yönteminde kalıp yüzeyine püskürtme tabancası yardımı ile jelkot uygulanır, sonrasında kuru takviye malzemeleri serilir ve reçine uygulanarak bu işlem istenilen kalınlık elde edilinceye kadar devam edilir. Katlarda sürülen reçine sertleşene kadar rulo ile tabakalar arasındaki hava kabarcıkları giderilmeye çalışılır.

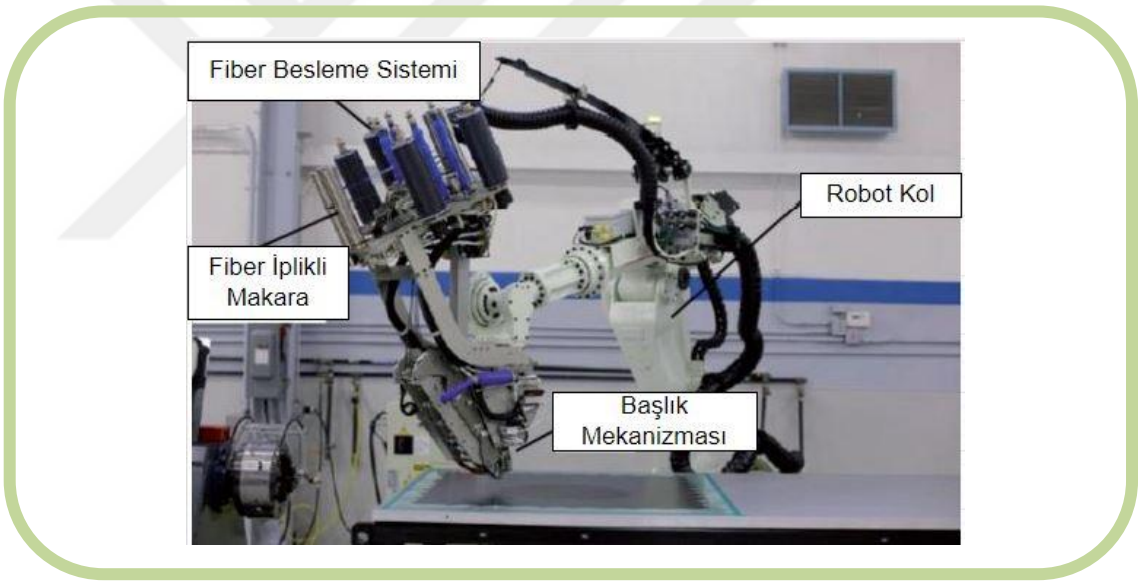
Bu yöntemin olumlu yönleri, işlemin yüksek işçilik gerektirmeyerek basit düzeyde olması, düşük maliyetli alet kullanımı ve geniş ürün boyut yelpazesinde üretim yapılabilmesidir. Olumsuz yönlerine örnek olarak karmaşık geometrilerdeki tasarımların üretim imkânı olmaması ve reçine içeriğinin iyi bir şekilde kontrolünün sağlanamaması örnek olarak verilmektedir. Üretim metodunun nasıl yapıldığı Şekil 2.2’de gösterilmektedir [27].



Şekil 2.2. El ile Serme Yöntemi

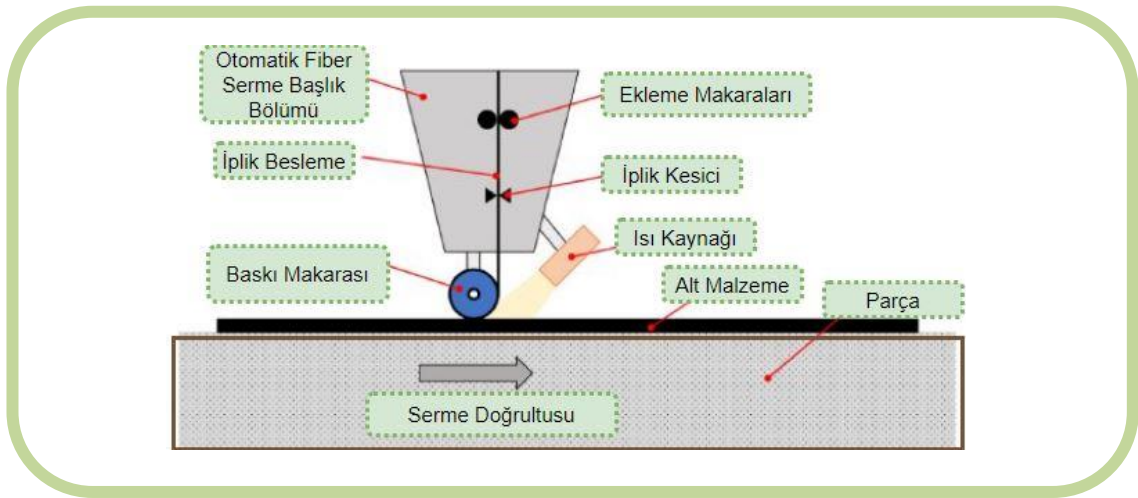
2.1.2. İleri Teknoloji Üretim Yöntemleri AFP ve ATL

Teknolojik gelişimlerin başlıca tetikleyici etkenlerinden olan havacılık ve uzay sektöründe, kompozit malzemelerin kullanımının uçak üzerinde ve yapılarında sağladığı mukavemet ve hafiflik özelliklerinin, kompozitlerin kullanımının artmasına pozitif etki etmiştir ve bu yüzden üretim tekniklerinde yeni, hızlı, maliyet etkin teknik arayışlarına itmiştir. Temel üretim yöntemlerindeki el işçiliğinin operatör kabiliyetlerine bağlı olması ve düşük üretim hızından dolayı, seri üretim ve kalite standardizasyonu gereken havacılık vb. alanlardaki batılı üreticiler çözüm olarak otomatik fiber serme teknolojisini çözüm olarak buldular. [28] Şekil 2.3’de antropomorfik bir robot kol üzerine yerleştirilmiş bir baskı makarası gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Otomatik Fiber Serme Robotu

Otomatik fiber serme özellikle kavisli yüzeylere sahip kompozit malzemelerin üretimi için uygundur. Heterojen baskı kuvveti dağılımı, serme kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Otomatik fiber serme işlemi, elyaf ısı ve basınç parametrelerine sahip üç girişli bir eklemeli kompozit imalat yöntemidir. Robot tutucu ucu kompozit bantı hassas bir şekilde basınç ve ısı yardımı ile yüzeyin üzerine konumlandırır. Bu işlemde parça üzerindeki gerekli yükleri kaldırabilmek için her bir katın farklı açılarda yerleşimine imkân sunulduğundan dolayı son derece özelleşmiş parça ve ürünlerin imaline olanak sağlar. Şekil 2.4’te antropomorfik bir robot kol üzerine yerleştirilmiş bir baskı makarası gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Fiber Serme Robot Başlık Mekanizması

Yukarıda ki görselde fiber serme robotun başlık mekanizmasını basitleştirilmiş olarak sunulmuştur. Robotik tezgahlar, operatöre süreç içerisindeki kritik değişkenlerin üzerinde kontrol sağlamasına imkan sağlayarak, üretimin yüksek oranda kontrol edilebilir ve tekrarlanabilirliğini mümkün kılar. Sonuçta üretilen malzemelerde çelikten iki kat daha mukavim ve beşte bir oranda hafif ürünler üretilir.

Sıkıştırma kuvveti, AFP için en önemli proses parametrelerinden birisidir. Belli bir aralıktaki sıkıştırma kuvvetinin artırılmasının, hazırlık yapışma seviyelerini ve döşeme kalitesini iyileştirebileceği ve kırışıklıklar ve köprüler gibi döşeme kusurlarını azaltılabileceği bilinmektedir [29]. Termoplastik prepreg için sıkıştırma kuvvetinin artırılması, boşluk içeriğinin azaltılmasına ve nihai laminantların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yardımcı olur. Havacılık endüstrisinde kullanılan çoğu üretim kalıbı düzensiz kavisli yüzeylere sahiptir ve AFP makinelerinde çoğunlukla kullanıldığı durum kavisli yüzeye sahip geometrik parçalardır.

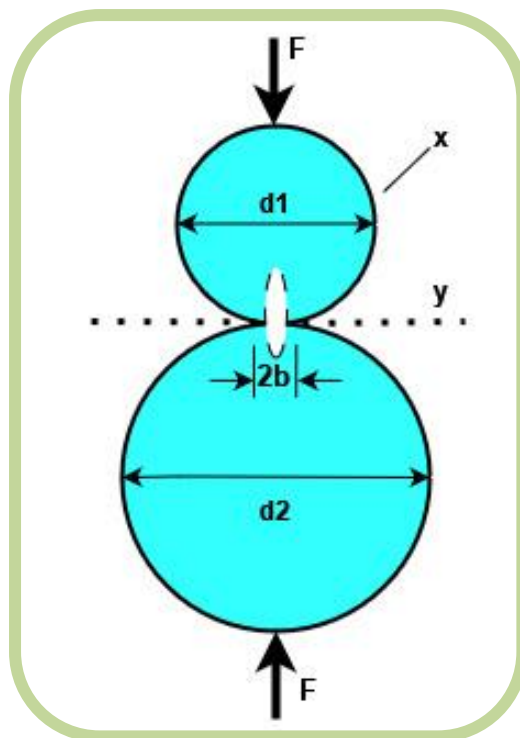
Yüzeylerin kavisli olması sebebiyle kullanılan baskı makarasında meydana gelen eksenel deformasyonlar düzensiz olacaktır ve bu da malzeme üzerinde eşit olmayan bir basınç dağılımına neden olacaktır. Bu durum eşit olmayan makara iz seviyelerine neden olarak kırışıklık ve kabarcık gibi üretim kusurlarına neden olabilir fakat bununla birlikte, sıkıştırma kuvvetinin tek başına kullanılması ve üzerinde durulması, eşit olmayan basınç olgusunu ve kusurların oluşumunu tanımlayamaz. Bununla birlikte, sıkıştırma kuvvetinin tek başına kullanılması, eşit olmayan basınç olgusunu ve kusurların oluşumunu tanımlayamaz.

2.2. Fiber Serme Robotlarında Baskı Kuvveti Hesabı

Fiber serme robotlarında üretilen kompozit malzemelerin, katmanlar arasındaki optimum birleşimi sağlayacak gerekli basınç ve kuvvet değerleri önemli bir noktadır.[30] Baskı kuvvetinin oluşacağı yüzeylerde ki belirlenmesinin Hertzian temas gerilmesi formülleri ile bulunduğu görülmüştür. Hertzian gerilmesi, silindirik ve eliptik yüzeyli iki parçanın kuvvet altında temasları sonucunda, temas noktalarında basma gerilmesi olarak meydana gelirler [31]. Hertzian temas gerilmelerinin bulunmasında birtakım kabuller yapılmaktadır. Bunlar

- Yüzeyler yumuşak ve sürtünmesizdir
- Temas noktası, cisimlerin boyutuna göre küçüktür.
- Cisimler yapısal özellikleri izotropik ve elastiktir.

Bu temas teorisinde birbirine kontak sağlayan eğrisel yüzeylerin birer daire olduğu kabul edilmektedir. Dolayısı ile her iki yüzeyin eğrilik yarıçapı bilinmelidir. Bu eğrilik yarıçaplarından birisi sonsuz seçilir ise bir dairenin düz bir yüzey ile teması durumunda oluşan kontak kuvveti bile hesaplanabilmektedir. Temas teorisine ait parametreler Şekil 2.5'teki görsel üzerinde verilmektedir. [32,33]



Şekil 2.5. Temas Teorisi Parametreleri

İki silindir cisim karşılıklı doğrusal F kuvvetleri bastırıldığında, genişliği b ve uzunluk parametresi l olan bir dikdörtgensel bir temas alanı oluşur. Bu temas yüzeyi teorik olarak bir çizgi olduğu varsayılır. Aşağıda temas noktası ile ilgili diyagram sunulmuştur. Formülde bulunan E ve v parametreleri elastik sabitlerdir. d1 ve d2 değerleri silindirik parçaların çaplarıdır. Denklem 1’de dikdörtgensel temas noktasının yarı genişliği hesaplanabilmektedir.

$$b = \sqrt{\frac{2F \frac{(1 - v_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - v_2^2)}{E_2}}{\pi l \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (1)$$

Basınç dağılımları eliptiktir ve maksimum temas basınç değeri denklem 2’de verilen formülden bulunur.

$$P_{max} = \frac{2F}{\pi b l} \quad (2)$$

Yapılan deneysel bir çalışmada,[31] baskı kuvveti ile makara sayısı, besleme hızı iplik gerilmesi arasında bir ilişki bulunmadığı belirtilmiştir. Temas basıncı, baskı kuvvetinin, makara çapının ve makara sayısına bağlı bir değişkendir ve baskı makaralarının tasarımı bu değerlerin belirlenmesini amaçlar.

2.3. El İşçiliği ile Üretim Tekniğinde Karşılaşılan Zorluklar

El işçiliği ile üretilen tekniklerde kullanılan materyaller, serme ve kürlleme gibi işlemler sırasında sürekli aynı kalite ve mekanik özelliklerin sağlanması zorlaşır. Bu yöntemler genellikle operatörlerin aktif katılımını gerektirir ve kaliteli ürünler elde etmek için yetenekli çalışanlara ihtiyaç duyar. Bu durum, ürünün birim maliyetini artırır. El işçiliği ile üretim, makine destekli yöntemlere kıyasla daha yavaş üretim hızları ve kapasiteler sunar, bu nedenle üretim boyutları sınırlıdır.

Karbon fiber ve reçine gibi bazı kompozit üretim bileşenleri, cilt ve solunum sistemi rahatsızlıklarına yol açabilir, bu da gerekli koruyucu ekipmanların kullanımını ve üretim ortamının iyi havalandırılmasını zorunlu kılar.

El işçiliği ile üretilen her ürün özelleştirildiği için, üretim aşamalarında işçilerin süreci yönlendirmesi ve sürekli takip etmesi gerekmekte, bu da üretim maliyetlerini artıran bir

faktördür. Üretilen parçaların boyutlarının değiştirilmesi istendiğinde ölçeklendirme zor olabilir. Ayrıca, el işçiliği ile üretimde hizalama sorunları veya uygun olmayan kürleme gibi hatalar sıkça meydana gelir, bu durumlar atık malzeme ve düzeltme işçilik maliyetlerini artırır. El işçiliği ile üretilen ürünler üzerinde bilgisayar destekli veri toplama ve analiz uygulamalarının kullanımı zorlaşmaktadır. Bu durum, ürün geliştirme ve iyileştirme süreçlerinin etkinliğini sınırlar ve teknolojik entegrasyon olanaklarını azaltır.

2.4. Otomatik Üretim Tekniklerindeki Problemler

Otomatik fiber yerleştirme ve serme (AFP-ATL) gibi robotik tezgahların kullanımı, yüksek sermaye ve yatırım gerektirdiğinden, bazı üreticiler için bu maliyetlerin karşılanması zor olabilir. Otomasyon destekli üretim yöntemleri, özelleştirilmiş görevler için tasarlandığından, yeniden yapılandırma ve güncellemeler yapmak zorlaşır. Ayrıca, bu ileri teknolojik sistemlerin bakımı karmaşık olduğundan ve özel uzmanlık gerektirdiğinden, bu alanda çalışacak yetenekli operatörlerin bulunması güçleşir.

Üretim için gerekli tezgahların programlanması ve robotların yörüngelerinin belirlenmesi gibi süreçler, ileri düzey teknik bilgi ve beceri gerektirir. Bu tezgahlar programlandıktan sonra, üretim sürecine katılım, el işçiliği gerektiren tekniklere göre daha azdır. Bu tür tezgahlar, yüksek hacim ve hızda üretim için tasarlandığı için, tekil ürün üretimi gibi özelleştirmeler zorlaşır.

Otomasyon sistemlerinden kaynaklanan atık maddelerin geri dönüşümü ve imhası zordur, bu durum çevresel hassasiyetleri artırır. Ayrıca, tezgahlarda bulunan hareketli, ağır ve tehlikeli mekanik parçalar, operatörler için yüksek düzeyde koruyucu güvenlik önlemleri alınmasını zorunlu kılar.

Kompozit malzemeler için kullanılan en son teknolojiye sahip tasarım ve üretim tekniklerinin yanlış kullanımı, uygun olmayan malzemelerin seçilmesine, maliyetli atıkların ortaya çıkmasına ve kullanımda potansiyel arızalara yol açabilir. Uygun olmayan uygulamalarda kullanılan kompozitler, daha karmaşık, daha ağır veya hasara daha yatkın ve rekabetçi olmayan ürünlerin ortaya çıkmasına neden olabilir.

Kompozit malzemelerin üretim sürecinde delta robotların kullanımı, bu alanda bir devrim niteliğindedir. Delta robotlar, hızlı ve hassas hareket kabiliyetleri sayesinde, özellikle kuvvet odaklı uygulamalarda avantaj sağlar. Bu tezde ele alınan yörünge planlama stratejileri, delta robotlarının kompozit malzemeler üzerinde uyguladığı kuvvetlerin daha eşit dağılmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Yörüngelerin dikkatli bir şekilde planlanması, malzeme yüzeyine uygulanan baskının homojenliğini artırarak ürün kalitesini önemli ölçüde iyileştirir.

Delta robotlarının kullanımı, aynı zamanda üretim verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu robotlar, programlanabilir ve tekrarlanabilir hareket yetenekleri sayesinde, üretim hatalarını minimize eder ve iş gücü maliyetlerinden tasarruf sağlar. Tezde incelenen üç farklı yörünge planlama algoritması, bu robotların farklı tarama hareketleriyle nasıl optimal sonuçlar elde edebileceğini göstermektedir. Bu algoritmalarından elde edilen veriler, delta robotlarının üretim süreçlerinde nasıl daha etkin kullanılabileceği konusunda değerli bilgiler sunmaktadır.

Sonuç olarak, delta robotlarının kompozit malzeme üretiminde kullanımı, yalnızca üretim süreçlerini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda malzeme üzerindeki kuvvetin daha düzenli dağılımını sağlayarak ürün kalitesini artırır. Bu tez, robotik manipülatörlerin ve ileri yörünge planlama tekniklerinin, zorlu üretim gereksinimlerini karşılamak ve endüstriyel uygulamalarda yenilikçi çözümler sunmak için nasıl kullanılabileceğine dair önemli bilgiler içermektedir. Delta robotların, üretimdeki bu stratejik kullanımı, gelecekte kompozit malzeme üretim tekniklerinin nasıl şekilleneceğini önemli ölçüde etkileyebilir.

3. BÖLÜM

DELTA ROBOTLAR

Dünya nüfusunun ihtiyaç duyduğu malzemelerin hızlı ve yeterli miktarda üretimi, yaşamın ve ekonominin sürdürülebilirliği için her zaman hayati öneme sahiptir. Sanayi devrimi ile birlikte teknoloji, daha önce örneği görülmemiş bir boyuta ulaşmıştır. Bu hızlı ilerleme, bilim ve teknikteki öncelikli gelişmeleri; buharlı lokomotiflerde kullanılan krank-biyel ve kama gibi mekanizmaların ortaya çıkışında gözlemlemek mümkündür.

Araştırmacılar ve mühendislerin iş birliğiyle, sürekli çalışabilen, kaliteyi devamlı sağlayan ve üretimde hızı artıran robotlar geliştirilmiştir. Bu robotlar, duygusuz ve kararlı çalışma yetenekleri sayesinde, yatırım ve araştırma-geliştirme çalışmalarında yeni bir favori haline gelmiştir.

1970'lerde Japonya'da ortaya çıkan mekatronik kavramı, robotları mühendislikte yeni bir çalışma alanına taşımıştır. Robotik, mekatronik mühendisliğinin önemli bir dalı olarak, çeşitli hareket mekanizmalarını kullanmaktadır. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan robotların ana amacı, bir end-efektörün belirlenen bir yörünge boyunca yüzeye baskı uygulayabilmesidir. Bu robotlar, işlevlerine göre seri ve paralel tip olarak iki ana sınıfa ayrılır. Bu bölümde, bu iki robot tipinin temel farklılıkları açıklanacak ve çalışmanın ana konusu olan Delta tip robotların kinematik, dinamik ve kontrol işlemleri için gerekli olanlar detaylandırılacaktır. Ayrıca, bu tez kapsamında yörünge planlama algoritmalarının kuvvet etkileşimlerini analiz edebilmek için kullanılacak dinamik simülasyonun tanıtımı yapılacaktır.

Delta robotlar, hızlı ve hassas hareket yetenekleri ile öne çıkar. Bu robotlar, özellikle yüksek hız gerektiren uygulamalar için idealdir ve genellikle hafif malzemelerden üretilir. Bu yapısal özellikler, delta robotlarını kompozit malzeme imalatında özellikle tercih edilen bir robot tipi yapar. Delta robotların kinematik yapıları, üç paralel kolun birleştiği

ve bir merkezi hareket platformunu kontrol ettiği şekilde tasarlanmıştır. Bu özel yapı, robotun yüksek hızda ve hassasiyetle hareket etmesini sağlar.

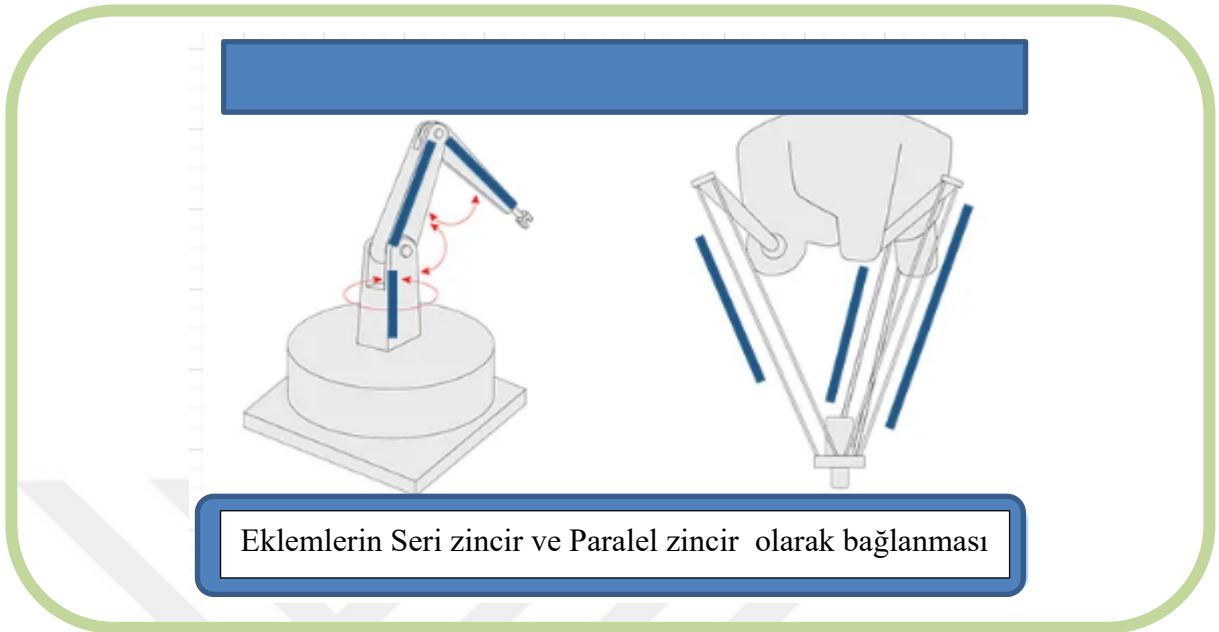
Ancak, endüstriyel uygulamalarda delta robotların kontrolü çoğunlukla sadece ters kinematik kullanılarak gerçekleştirilir ve hareket sırasında oluşan dinamikler çoğu zaman göz ardı edilir. Bu eksiklik, robotların performansını ve işlenen malzemenin kalitesini etkileyebilir. Bu bölümde, delta robotların dinamik analizlerinin önemi üzerinde durulacak ve robotun yörüngesi, hızı ve uygulanan kuvvetler açısından bu karmaşıklıkların nasıl yönetilebileceği tartışılacaktır. Kullanılacak simülasyon araçları, bu dinamikleri gerçek zamanlı olarak modelleyerek kontak esnasında oluşan kuvvetleri ölçmeye yardımcı olacaktır.

Delta robotların kompozit malzeme imalatındaki kullanımı, üretim süreçlerinin verimliliğini artırma ve ürün kalitesini yükseltme potansiyeline sahiptir. Bu tez, endüstriyel robotik uygulamalarda kullanılan geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını ve yeni yörünge planlama tekniklerinin nasıl bir fark yaratabileceğini detaylı bir şekilde ortaya koymaya çalışmaktadır.

3.1. Seri ve Paralel Robotlar

Robot mekanizmaları, yapılarına göre iki ana kategoriye ayrılır: seri ve paralel. Seri robotlar, açık bir zincir şeklinde birbirine prizmatik veya döner mafsallar aracılığıyla kesintisiz bir şekilde bağlanmış bağlantı elemanlarından oluşur. Robotun başlangıç noktası olan ilk eklem zemin üzerinde yer alırken, son eklem kinematik konfigürasyona bağlı olarak çalışma alanında serbestçe hareket edebilir. Buna karşın, paralel robotlar, eklemlerin iki veya daha fazla kapalı zincir şeklinde sabit ve hareketli platformlar arasında bağlanmasıyla karakterize edilir.

Paralel robotlarda aktüatörler, harici yükleri eklemlere eşit bir şekilde dağıtarak tahrik eder. Seri robotlarda ise, her bir eklemdaki aktüatör torku, başlangıç eklemden itibaren ilerlerken momentin artmasıyla farklılık gösterir. Bu farklılıklar, Seri ve Paralel tip robot manipülatörlerinin karşılaştırmalı diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Seri ve Paralel Eklem Bağlantıları

Paralel robotlar, yüksek tekrarlanabilirlik, rijitlik, ivme, hız ve yük taşıma kapasiteleri sayesinde gerçek dünya uygulamalarında sıklıkla tercih edilir. Seri ve paralel robotlar kıyaslandığında, yapısal özellikler ve yük taşıma kapasiteleri gibi temel farklar ön plana çıkar. Seri robotlar, kendi ağırlıkları ve taşıyabilecekleri yük miktarı bakımından paralel robotlara göre daha az etkilidir.

Özellikle, paralel robotlar arasında yer alan Stewart platformları, havacılık simülasyonları gibi kritik uygulamalarda pilot eğitimi ve askeri alanda tank simülatörleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Diğer yandan, üretim hatlarında tut ve yerleştir işlemlerinde yaygın olarak kullanılan Delta manipülatörler gibi farklı bir paralel robot tipi, kinematik yapılarından kaynaklanan avantajlar nedeniyle hem endüstriyel hem de akademik araştırmalarda kullanımı artmaktadır. Bu robotların uygulama alanları ve avantajları, 3.2 bölümünde daha detaylı bir şekilde incelenecektir. Şekil 3.2, paralel tip manipülatörlerin kullanıldığı alanlara örnek olarak Delta robot görseli ve bir havayolu uçuş simülatörünü içermektedir.



Şekil 3.2. Delta Robot ve Uçuş Simülâtörü

3.2. Delta Robotlar Kullanım Alanları

Delta robotlar, sabit merkezli seri robotlardan farklı olarak, geniş salınımlara sahip paralelogram kolları ile benzersiz bir tasarıma sahiptir. Bu robotlar, iş-uzayına yukarıdan sabitlenmiş şekilde, yürüyen hareketli üretim hatlarında tut-yerleştir görevlerini standart olarak yerine getirir. Delta robotların yapısal özellikleri, üç adet dört-çubuk mekanizmasının sabit platforma bağlı motor tahrik elemanları tarafından hareket ettirilmesiyle, hareketli tutucu uç kısmında hareket sağlanır. Üretim sektöründe, delta robotların yüksek hızlı üretime olanak tanıyan ileri ivmelenme değerleri, bu robot tipini avantajlı hale getirir.

Delta manipülâtörlerdeki tahrik elemanları, görselde gösterildiği gibi sabit platformda bulunur. Bu özellikleri, IP69K standardına uygun toza ve yüksek basınçlı suya karşı mükemmel koruma sağlar, delta robotları özellikle hijyen gerektiren ortamlar için ideal kılar. Delta robotların sanayide kullanıldığı alanlar arasında:

- Yiyecek ve içecek sektörü
- Eczacılık ve ilaç sanayii
- Tıp
- Eklemeli Üretim

bulunmaktadır. Delta robotlar, özel görev uygulamalarında 3B yazıcılar, yüksek hassasiyet gerektiren montaj operasyonları, elektronik lehimleme ve gıda ile eczacılık sektörlerinde görüntü işleme teknikleri ile sınıflandırma ve paketleme işlemlerinde de kullanılmaktadır.

Tablo 3.1. Seri ve Paralel Robot Özellikleri

<i>Özellik</i>	<i>Seri Robot</i>	<i>Paralel Robot</i>
Çalışma Uzayı	Geniş	Dar
İleri Kinematik	Çözüm Kolay	Çözüm Zor
Ters Kinematik	Çözüm Zor	Çözüm Kolay
Pozisyon Hatası	Toplanır	Ortalama
Kuvvet Hatası	Ortalama	Toplanır
Rijitlik	Düşük	Yüksek
Dinamik Denk. Çözümü	Görece Kolay	Oldukça Karmaşık
Atalet	Yüksek	Düşük
Faydalı yük / Ağırlık Oranı	Düşük	Yüksek
Hız ve İvmelenme	Düşük	Yüksek

Delta robotların performansı ve özellikleri, Tablo 3.1'de [34] sunulmuş olup, bu tabloda hız ve ivmelenme, yük/ağırlık oranları gibi kritik noktalarda seri robotlara göre üstünlükleri matematiksel olarak gösterilmektedir. Robotların seçimi, kullanılacakları görevin gereksinimlerine göre yapılmalıdır. Delta robotların başarıyla uygulanabilmesi için, doğru yörünge takibi ve etkin çalışma sağlamak amacıyla öncelikli olarak ileri ve ters kinematik denklemleriyle, robot hareketlerini oluşturan konum, hız, ivme gibi dinamikleri inceleyen matematiksel hesaplamalar gerçekleştirilmelidir.

3.3. Robot Kinematiği

Kinematik, mekanik sistemlerdeki hareketlerin, kuvvet veya torkların etkisi olmaksızın incelendiği bilim dalıdır. Robotikte, manipülatörlerin istenilen konuma doğru hareket edebilmeleri için, eklem açılarının doğru bir şekilde hesaplanması gereklidir. Bu hesaplamalar, çalışma uzayında robotun tutucu ucunun belirlenen eklem açılarıyla istenilen hedef noktaya ulaşip ulaşamayacağını belirlemek için ileri kinematik denklemler aracılığıyla yapılır.

Ters kinematik ise, robotun belirli bir (x, y, z) noktasına ulaşabilmesi için gerekli olan eklemler açılarını tespit etme sürecidir. Robot kinematiği, robot hareketinin yörünge kontrolü ve tutucu ucun gerçekleştireceği görevlerde uygulanan kuvvetlerin hareket denklemleri ile belirlenmesinde ve kontrol edilebilirliğinde büyük bir önem taşır. Ayrıca, bir sistemin uzaydaki serbest hareket sayısını bilmek, bu sistemi tam olarak kontrol etmek için gerekli olan motor sayısını belirlemek için de önemlidir.[35]

Bu temel bilgiler ışığında, robot kinematiği robotların tasarımı ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar. Bu bölümde, manipülatörlerin kinematik analizlerinin nasıl yapıldığı, ileri ve ters kinematik denklemler kullanılarak nasıl uygulandığı detaylandırılacak ve bu konuların robot performansı üzerindeki etkileri incelenecektir.

3.3.1. Serbestlik Derecesi

Mekanik sistemlerde serbestlik derecesi (DOF), bir mekanizmanın uzaydaki olası konumlarını veya hareketlerini tanımlayan bağımsız değişkenlerin sayısı olarak tanımlanır. DOF ölçümleri, mekanizmanın iki boyutlu veya üç boyutlu uzayda çalışıp çalışmadığına bakılmaksızın, mekanizmanın hem katı hem de kısıtlanmamış olduğunu varsayar. Serbestlik derecesi, bağımsız yer değiştirmelerin veya hareket yönlerinin toplam sayısına eşittir ve bu, öteleme ve dönme hareketleri için geçerlidir. Öteleme, doğrusal ve dönmeyen hareketi, dönme ise bu hareketin tam tersini ifade eder. Düzlemsel bir uzayda, kısıtlanmamış bir rijit mekanizma potansiyel olarak iki öteleme ve bir dönme hareketine sahip üç bağımsız serbestlik derecesine sahiptir.

Bir mekanizmanın DOF sayısını hesaplama yöntemi olarak Chebychev-Grübler-Kutzbach kriteri, yani yaygın olarak bilinen Grübler formülü kullanılır. Bu formül, zemin dahil toplam N bağlantıya ve bağlantı noktalarının sayısı olan J bağlantılara sahip bir mekanizma için geçerlidir. Rijit bir cismin serbestlik derecesi, düzlemsel mekanizmalar için $m = 3$ ve uzaysal mekanizmalar için $m = 6$ kabul edilir. Grübler formülü, bir eklemler tarafından sağlanan serbestliklerin (F_i) ve kısıtlamaların (C_i) sayısı ile hesaplanır. Burada $m = F_i + C_i$ şeklinde ifade edilir.[35]

Grübler formülü, robot eklemlerinin hareket serbestliğinin genel robot serbestlik derecesine olan etkisini açıklar. Hesaplamalar yapılırken bazı istisnai durumlara dikkat

edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu bölümde, delta robotunun gerçek serbestlik derecesinin aslında üç olduğu kanıtlanmaktadır. Delta robotları için Kutzbach hareketlilik denklemini kullanarak yapılan hesaplamalara göre, delta robotlarının serbestlik derecesi aşağıda verilen şekilde hesaplanmaktadır:

$$\text{Serbestlik Derecesi} = m(N - 1) - \sum_{i=1}^J c_i \quad (3)$$

$$= m(N - 1) - \sum_{i=1}^J (m - f_i) \quad (4)$$

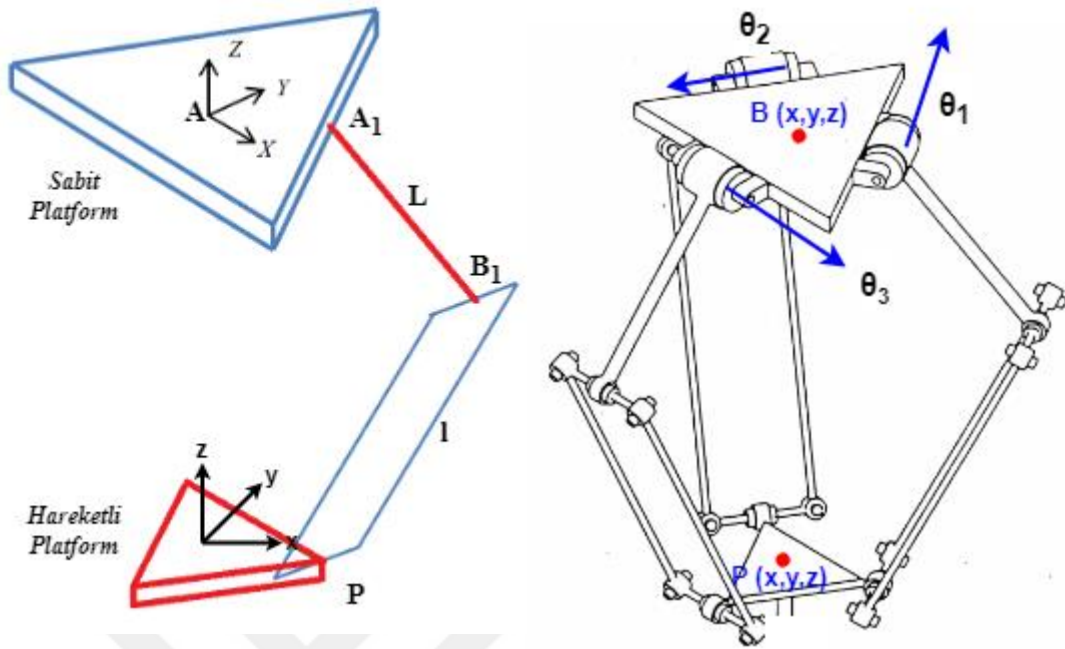
$$= m(N - 1 - J) + \sum_{i=1}^J f_i \quad (5)$$

$$M = 6(N - 1) - 5J_1 - 4J_2 - 3J_3 \quad (6)$$

Robot eklemlerinin hareket serbestliği, genel olarak robotun serbestlik derecesini belirler. Belirtilen 3, 4 ve 5 numaralı denklemler, herhangi bir mekanizmanın hareket serbestliğinin hesaplanmasına imkân tanır. Bu hesaplamalar yapılırken, denklem 9'da belirtilen bazı istisnai durumlar göz önünde bulundurulmalıdır.

- M hareketlilik veya serbestlik derecesi sayısıdır
- N, zemin dahil toplam bağlantı sayısıdır
- J_1 tek serbestlik dereceli eklemlerin sayısıdır(döner ve prizmatik eklemler)
- J_2 iki serbestlik dereceli eklemlerin sayısıdır(üniversal mafsalları)
- J_3 üç serbestlik dereceli eklemlerin sayısıdır(küresel eklem)

Şekil 3.3'deki görselde verilen delta robotun eklemlerini verilen parametrelere göre sınıflandırdığımız zaman serbestlik derecesi şu şekilde hesaplanır. [35,36]



Şekil 3.3. Robot Platform İsimlendirmesi ve Eklem Aktüatör Konumları

$$N = 17 \quad (7)$$

$$J_1 = 21 \quad J_2 = 0 \quad J_3 = 0 \quad (8)$$

$$M = 6(17 - 1) - 5(21) - 4(0) - 3(0) \quad (9)$$

$$M = -9 \quad (10)$$

Kutzbach denklemi sıklıkla başarısız olur çünkü, bu durumda sonuç olarak Delta robot için üç serbestlik derecesi (DOF) elde edilmesi beklenir. Ancak, denklemin verdiği sonuç Delta robotunun aşırı kısıtlanmış ve statik olarak belirsiz bir yapıda olduğunu öne sürer ki bu yanlış bir varsayımdır. Kutzbach denklemi, Delta robotunun özel geometrisini dikkate almaz. Delta robot, üç adet paralel dört çubuklu mekanizmadan oluşur. Eğer bu uzun paralel dört çubuklu mekanizmalardan bir bağlantı ve her birinden iki döner eklem çıkarılırsa, robotun hareketleri, orijinal Delta Robot ile kinematik olarak aynı olacaktır. Bu eşdeğer yapı ile yapılan hesaplamada, Kutzbach denklemi aşağıda verilen doğru sonucu üretir.

$$N = 14 \quad (11)$$

$$J_1 = 15 \quad J_2 = 0 \quad J_3 = 0 \quad (12)$$

$$M = 6(14 - 1) - 5(15) - 4(0) - 3(0) \quad (13)$$

$$M = 3 \quad (14)$$

11, 12, 13 ve 14 numaralı denklemlere göre yapılan hesaplamalar sonucunda, Delta robotun serbestlik derecesinin üç olduğu belirlenmiştir. Bu serbestlik sayesinde robot, yalnızca x , y ve z eksenlerinde doğrusal hareket edebilir. Ayrıca, yapılan akademik çalışmalar, teleskopik sistemlerle donatılmış, Rot_Y veya Rot_Z gibi ek dönme serbestliklerine sahip olan 4 veya 5 serbestlik dereceli robot modellerinin geliştirildiğini göstermektedir. Robotların tahrik elemanlarındaki motor dönüş açıları sayesinde, tutucu ucun uzaydaki konumu ileri kinematik kullanılarak belirlenebilir ve bu sayede tekil konumlar arasında etkili bir şekilde hareket planlaması yapılabilmektedir.

3.3.2. İleri Kinematik

İleri kinematik denklemleri, robot eklem motorlarına verilen açılar aracılığıyla kartezyen uzayda tutucu ucun konumunun hesaplanmasını sağlar. Ayrıca, ileri kinematik denklemleri, robot jakobiye matrisinin elde edilmesinde de kritik bir role sahiptir. Daha önce belirtildiği üzere, robotlar yapısal olarak seri ve paralel tip olmak üzere ikiye ayrılır. Seri robotlarda, ileri kinematik işlemleri matematiksel olarak daha basit olup genellikle tek bir çözüme ulaşırken, paralel robotlarda düz kinematik işlemleri yüksek dereceli denklemler içerdiğinden çoklu çözümler ortaya çıkar ve hesaplama zordur.

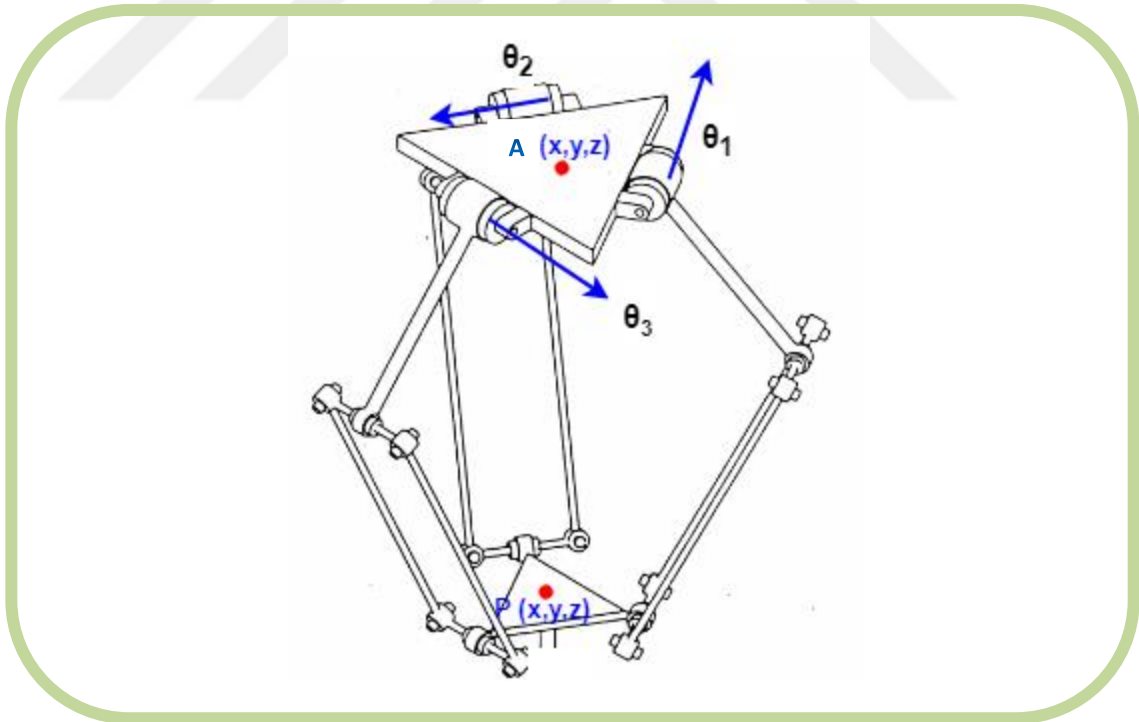
Delta robotları için ileri kinematik, kapalı döngü vektör çevrim denklemlerine uygulanan üç kısıt denkleminin birden fazla birleşik doğrusal olmayan cebirsel denklemin çözümünü gerektirir. Bu süreç genellikle birden fazla geçerli çözümle sonuçlanır, bu da hesaplamaların karmaşıklığını artırır. Ek olarak, ileri kinematik çözümleri üç küre kesişimi tekniği ile de bulunabilir. Paralel robotlarda, ters kinematik işlemler genellikle daha basit olup tek bir çözüme ulaşılırken, seri robotlarda ters kinematik hesaplamaları birden fazla çözüm sunabilir ve bu süreç daha zahmetli ve zaman alıcıdır.[36]

İleri kinematik analizi, robotun yapısal özelliklerine bağlı olarak farklı zorluklar ve çözüm yolları sunar. Seri robotlarda, her bir eklem sırasıyla bağımsız hareket eder, bu da kinematik zincirin sonuna doğru artan bir hareket serbestliği sağlar. Ancak, bu serbestlik aynı zamanda kinematik hesaplamaların karmaşıklığını da artırabilir. Paralel robotlar ise, birden fazla bağlantı ve eklemin koordineli hareketine dayanır, bu da yüksek yük taşıma kapasitesi ve hızlı operasyonlar için idealdir, fakat kinematik hesaplamaları daha karmaşık hale getirir.

İleri kinematik çözümler, özellikle üretim hatlarında ve hassas montaj işlerinde robotların etkin kullanımı için kritik öneme sahiptir. Bu çözümler, robotların iş parçasına doğru pozisyonda ve doğru açıyla ulaşmasını sağlayarak üretim verimliliğini artırır ve hata oranlarını minimize eder. Ayrıca, gelişmiş simülasyon yazılımları kullanılarak yapılan ileri kinematik analizler, yeni robot tasarımlarının geliştirilmesi ve mevcut sistemlerin iyileştirilmesi süreçlerinde önemli rol oynar.

3.3.3. Ters Kinematik

Delta robotlar, sabit ve hareketli olmak üzere iki platforma sahiptir. Hareketli platform, üç adet kapalı zincir mekanizması aracılığıyla üniversal mafsallar kullanılarak sabit platforma bağlanır ve üç motor tarafından tahrik edilir. Motorların kontrol değişkenleri, açısal olarak θ sembolü ile gösterilir. Hareketli platform yalnızca (x, y, z) eksenlerinde düzlemsel hareket yapabilir; herhangi bir dönme hareketi mümkün değildir. Delta robotun tahrik motorları ve mafsallarını gösteren diyagram, Şekil 3.4'te sunulmuştur. [36]

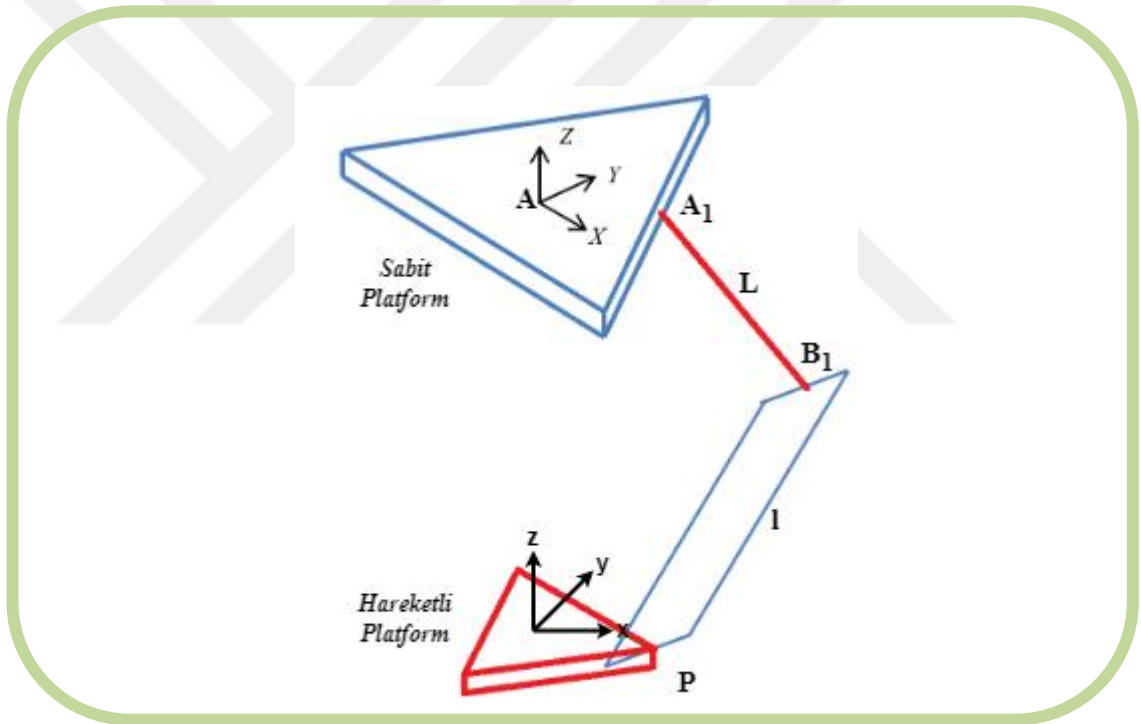


Şekil 3.4. Delta Robot Diyagram

Şekil 3.5'de sunulan görselde, delta robotun üç adet eş kinematik zinciri bacak olarak tanımlanmıştır. $A_{1,2,3}$ noktaları kalça eklemini, $B_{1,2,3}$ noktaları diz eklemini ve $P_{1,2,3}$ bilek eklemlerine denk gelmektedir. Bu bacaklar, aynı zamanda robotun kısıt denklemini

oluşturan kapalı kinematik zinciri olarak işlev görür. Görselde, sabit platformun Kartezyen referans noktası, A noktasındaki eşkenar üçgenin merkezine konumlandırılmıştır. Hareketli platformun P noktasındaki eşkenar üçgen de benzer şekilde Kartezyen referans çerçevesine sahiptir. P noktasının oryantasyonu, her konumda A referansına göre sabittir, bu nedenle ${}^A_R = I_3$ rotasyon matrisi sabittir.

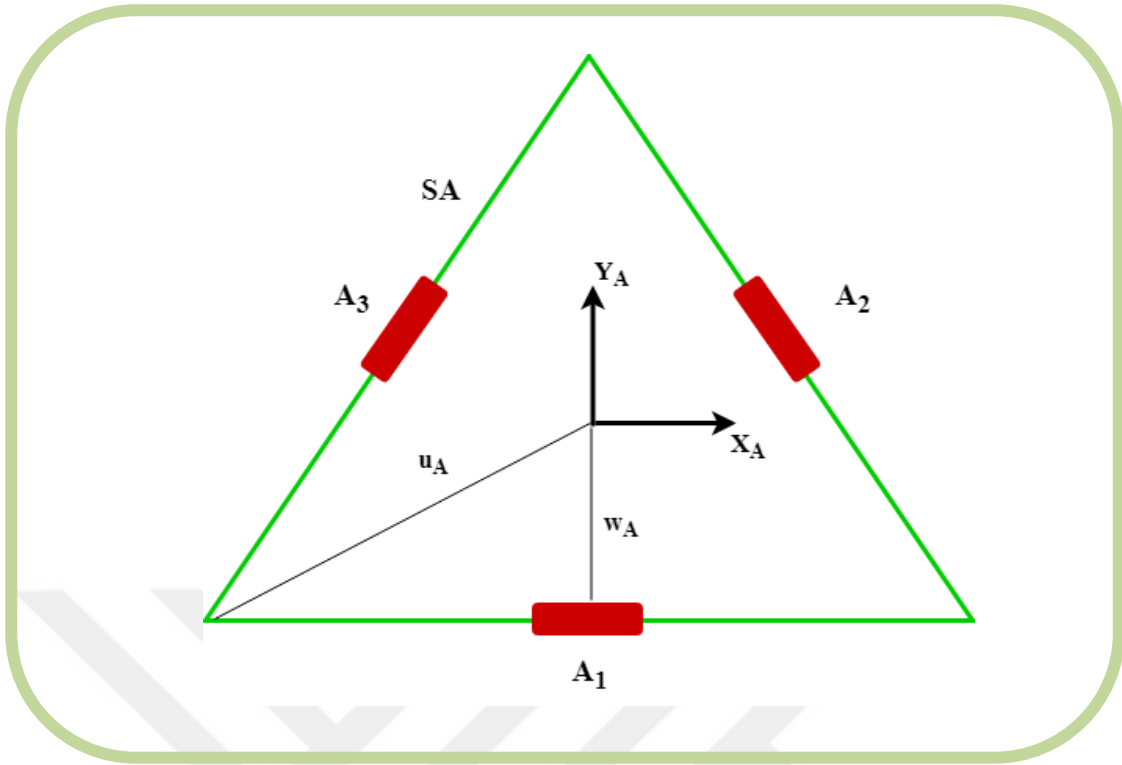
Eklem değişkenleri $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ ve Kartezyen hareket değişkenleri $P = \{P_1, P_2, P_3\}$ olarak ifade edilir. Delta robotun sabit ve hareketli platformlarının geometrik ayrıntıları, Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7'de sunulmuştur. Her iki platform da eşkenar üçgen yapısına sahiptir, dolayısıyla orijin noktalarını hesaplamak nispeten kolaydır.



Şekil 3.5. Delta Robot Kinematik Diyagram

Görselde u_A , köşe noktasından merkez noktasına olan düzlemsel uzaklıktır. w_A , ise yakın kenarın merkez noktasına olan düzlemsel uzaklığıdır.

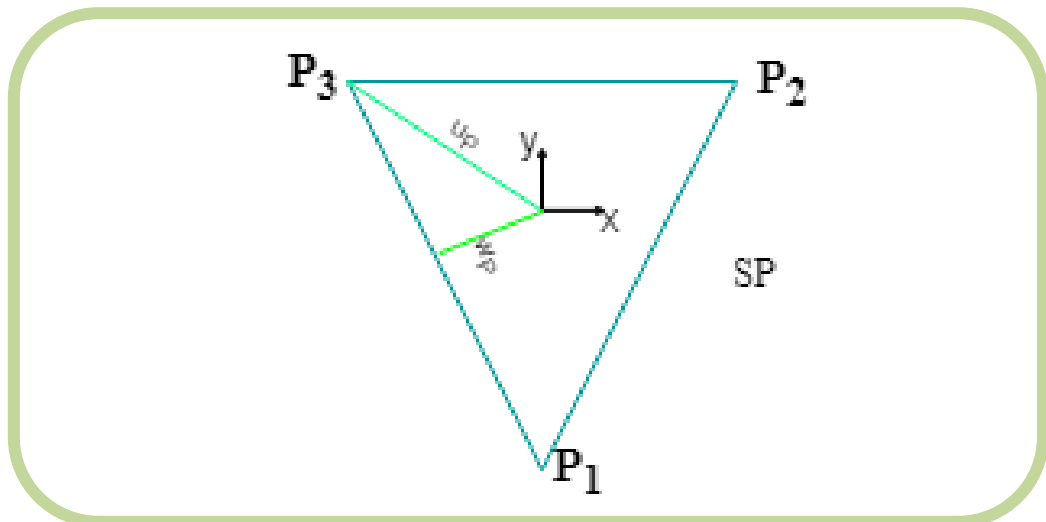
Sabit platformun döner eklem noktaları A_i , sabit çerçeveye göre sabittir. Aynı şekilde, hareketli platformun üniversal eklem noktaları P_i de sabit çerçeveye göre sabittir. Sabit platformun merkez noktası A 'ya göre düzlemsel olarak A_1 , A_2 ve A_3 noktalarının uzaysal koordinatları matris formunda sunulacak, hareketli platforma ait koordinatlar ve açıklayıcı görsel ise Şekil 3.6'da gösterilecektir.



Şekil 3.6. Delta Robot Hareketli Platform Eşkenar Üçgen

A_1 , A_2 ve A_3 noktaları için koordinatlar:

$${}^A A_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -w_a \\ 0 \end{pmatrix}, \quad {}^A A_2 = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}}w_a \\ \frac{1}{2}w_a \\ 0 \end{pmatrix}, \quad {}^A A_3 = \begin{pmatrix} -\sqrt{\frac{3}{2}}w_a \\ \frac{1}{2}w_a \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$



Şekil 3.7. Delta Robot Sabit Platform Eşkenar Üçgen

P_1, P_2 ve P_3 noktaları için koordinatlar:

$${}^P P_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -u_p \\ 0 \end{pmatrix}, {}^P P_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}s_p \\ w_p \\ 0 \end{pmatrix}, {}^P P_3 = \begin{pmatrix} \frac{-1}{2}s_a \\ w_p \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Sabit platformun köşe nokta koordinatları, denklem 17'de sunulan trigonometrik değerlerden, özellikle $\cos(30)$ ve $\cos(60)$ kullanılarak elde edilir. Delta robot kinematik diyagramındaki kapalı vektör çevrim denklemleri, denklem 19'da verilir.

$${}^A a_1 = \begin{pmatrix} \frac{s_a}{2} \\ -w_a \\ 0 \end{pmatrix}, {}^A a_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -u_a \\ 0 \end{pmatrix}, {}^A a_3 = \begin{pmatrix} -\frac{s_a}{2} \\ -w_a \\ 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$w_a = \frac{\sqrt{3}}{6}s_a, u_a = \frac{\sqrt{3}}{3}s_a, w_p = \frac{\sqrt{3}}{6}s_p, u_p = \frac{\sqrt{3}}{3}s_p \quad (18)$$

$$\{{}^A A_i\} + \{{}^A L_i\} + \{{}^A l_i\} = \{{}^A P_p\} + [{}^A_p R]\{{}^P P_i\} = \{{}^A P_p\} + \{{}^P P_i\} \quad i = 1,2,3 \quad (19)$$

Delta robotlarda, kinematik yapılarından dolayı tutucu ucun dönme hareketine sahip olmamakla birlikte, denklem 20 deki yapı ile ifade edilir.

$$[{}^A_p R] = [I_3] \quad (20)$$

Robotun üç kolunda geçerli olan vektör denklemi, bir kısıt denklemidir ve bu, Şekil 12'de gösterilen paralelogramın merkezinden geçen uzunluğu temsil eder ve l değeri her kol için sabit ve doğru şekilde denklem 21'i sağlamalıdır.

$$l_i = \|\{{}^A l_i\}\| = \|\{{}^A P_p\} + \{{}^P P_i\} - \{{}^A A_i\} - \{{}^A L_i\}\|, i = 1,2,3 \quad (21)$$

Denklem 21'deki vektör normunu hesaplarken karekök işlemine ihtiyaç vardır. Bu karekök değerlerinden kurtulmak için her iki tarafın karesini almak uygundur. Bu sayede karekök işleminden doğan karmaşıklık ortadan kaldırılır.

$$l_i^2 = \|\{{}^A l_i\}\|^2 = l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2 \quad i = 1,2,3 \quad (22)$$

Sabit vektörler P_i ve A_i , önceden tanımlanmıştır. Vektör değerleri $\{^A l_i\}$, eklem değişkenleri $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}^T$ ile ilişkilidir. Bu parametreler kullanılarak kinematik denklemler elde edilir.

$${}^P P_i = \{x, y, z\}^T \quad (23)$$

Vektör değerleri eklem değişkenleri olan değerlerine bağımlıdır. Aşağıda verilen 24-25 numaralı kısıt denklemleri verilen parametrelere uygun şekilde açılarak kinematik denklem elde edilir.

$$\{^A A_i\} + \{^A L_i\} + \{^A l_i\} = \{^A P_P\} + [{}^A_R] \{^P P_i\} = \{^A P_P\} + \{^P P_i\} \quad (24)$$

$$\{A_i^A\} + \{L_{ij}^A\} + \{1_i^A\} = \{P_p^A\} + [R_p^A] \{P_{ij}^P\} = \{P_p^A\} + \{P_i^A\} \quad (25)$$

Bu kısıt denklemleri 3 kol için ayrı ayrı açılacak olursa denklem 26-28 arasında verilen kısıt denklemleri elde edilmiş olur.

$$2L(y + a) \cos \theta_1 + 2zL \sin \theta_1 + x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 = 0 \quad (26)$$

$$-L(\sqrt{3}(x + b) + y + c) \cos \theta_2 + 2zL \sin \theta_2 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + \dots$$

$$2xb + 2yc - l^2 = 0 \quad (27)$$

$$-L(\sqrt{3}(x - b) - y - c) \cos \theta_3 + 2zL \sin \theta_3 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 - \dots$$

$$2xb + 2yc - l^2 = 0 \quad (28)$$

Kısıt denklemlerindeki a, b ve c değerleri aşağıdaki 29,30,31 formülleri ile hesaplanır.

$$a = w_b - u_p \quad (29)$$

$$b = \frac{s_p}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} w_b \quad (30)$$

$$c = w_b - \frac{1}{2} w_b \quad (31)$$

Ters kinematik problemi, paralel robotlarda daha belirgin şekilde çözülebilir. Ters kinematik işlemi, tutucu ucun hedeflenen kartezyen (x, y, z) koordinatlarına ulaşmak için

gereken üç eklem tahrik açısını belirlemeyi mümkün kılar. Bu analitik çözüm, genelleştirilmiş denklem formunda

$$E_i \cos \theta_i + F_i \sin \theta_i + G_i = 0 \quad i = 1,2,3 \quad (32)$$

Şeklinde ifade edilir ve tanjant yarım açı formülü kullanılarak çözülebilir.

$$E_1 = 2L(y + a), \quad F_1 = 2zL, \quad G_1 = x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 \quad (33)$$

$$E_2 = -L(\sqrt{3}(x + b) + y + c), \quad F_2 = 2zL, \quad G_2 = x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + \dots + 2xb + 2yc - l^2 \quad (34)$$

$$E_3 = -L(\sqrt{3}(x - b) - y - c), \quad F_3 = 2zL, \quad G_3 = x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 - \dots - 2xb + 2yc - l^2 \quad (35)$$

Çözüme elde etmek amacıyla, $t_i = \tan \frac{\theta_i}{2}$ değişkeni tanımlanır ve ilgili trigonometrik değerler kullanılır.

$$\cos \theta_i = \frac{1 - t_i^2}{1 + t_i^2}, \quad \sin \theta_i = \frac{2t_i}{1 + t_i^2} \quad (36)$$

Bu değişkenler yerine konduğunda, elde edilen denklemler düzenlenir ve çözüme ulaşılır.

$$E_i \left(\frac{1 - t_i^2}{1 + t_i^2} \right) + F_i \left(\frac{2t_i}{1 + t_i^2} \right) + G_i = 0 \quad (37)$$

Denklemleri yeniden düzenlendiğinde 40 numaralı denklemdeki çözüm elde edilir.

$$E_i(1 - t_i^2) + F_i(2t_i) + G_i(1 + t_i^2) = 0 \quad (38)$$

$$(G_i - E_i)t_i^2 + (2F_i)t_i + (G_i + E_i) = 0 \quad (39)$$

$$t_{i,2,3} = \frac{-F_i \pm \sqrt{E_i^2 + F_i^2 - G_i^2}}{G_i - E_i} \quad (40)$$

İşaret değişiminden kaynaklanan iki çözüm bulunmaktadır ve her ikisi de geçerli sonuçlar sunmaktadır. Ancak, robotun paralel kollarının kinematik kısımlarından dolayı genellikle pozitif işaretli çözüm tercih edilir. Bu delta robotun her bir kolundaki birleşim noktasının içe veya dışa kırıldığı anlamına gelmektedir.

Delta robotların ters kinematik analizi, robotun kontrol stratejilerinin temelini oluşturur ve bu nedenle, kompozit malzeme üretimi gibi hassas uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Ters kinematik işlemleri, robotun end-efektörünün istenen pozisyon ve oryantasyonunu sağlamak için gerekli olan motorların açısal konumlarını hesaplar. Bu hesaplamalar, robotun hareketlerinin doğruluğunu ve işlenen malzemenin kalitesini doğrudan etkileyen faktörlerdendir.

Delta robotlar, yapısı gereği yüksek hız ve doğruluk gerektiren uygulamalarda avantaj sağlar. Ancak, bu yüksek performansın elde edilebilmesi için robotun kinematik yapısının tam olarak anlaşılması ve bu yapıya uygun olarak programlanması gerekmektedir. Ters kinematik algoritmalar, robotun her bir hareketinin, hedeflenen yörünge ve zamanlama ile mükemmel bir uyum içinde olmasını sağlar. Bu da, özellikle kompozit malzeme serimi gibi tekrar edilebilirlik ve yüksek doğruluk gerektiren süreçlerde, üst düzey bir performansın garantisi olur.

Ayrıca, ters kinematik işlemleri, robotun hareket kabiliyetinin sınırlarını belirler ve bu sınırlar dahilinde en optimal hareket yörüngelerinin tasarlanmasına olanak tanır. Kompozit malzeme üretiminde, elyafın serim yönünün ve yüzeye uygulanan basıncın eşit ve dengeli olması gerektiği için, robotun her bir hareketinin çok hassas kontrol edilmesi gerekmektedir. İşte bu noktada, ters kinematik analizlerinin doğru ve etkin bir şekilde yapılması, ürün kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

3.4. Hızlar Kinematiği ve Jakobiyen Matrisi

Matematiksel olarak ileri kinematik denklemler, kartezyen koordinatlardaki konumlar ve yönelimler ile eklem konumları arasındaki ilişkiyi ifade eder. Jakobiyen matrisleri, uç efektörün lineer hızı ve kuvveti ile eklem açılarının açısal hızı ve torku arasındaki bağlantıyı tanımlayan matrislerdir [37]

Jakobiyen matrisi, uç efektöre uygulanan kuvvet ve momentleri(torkları) eklem kuvvet ve momentlerine dönüştürmek için de kullanır. Bu dönüşüm, ters dinamik analizlerde önemlidir. Jakobiyen matrisinin determinantının sıfır olduğu noktalar, robotun tekillik noktalarıdır. Bu noktalarda robotun serbestlik derecesi azalır veya kaybolur. Tekillik analizi, bu noktaların tespiti ve önlenmesi için gereklidir. Jakobiyen matris analitik jakobiyen ve geometrik jakobiyen olarak ikiye ayrılmaktadır. Analitik jakobiyen konum ve yönelimin doğrudan kısmi türevleri ile hesaplanırken, geometrik jakobiyen, eklem hızlarını direkt olarak uç efektör hızlarına bağlayan bir matristir[38].

Jakobiyen matrisi, robot hareketlerinin analizinde ve kontrolünde kritik bir öneme sahiptir ve robotiğin birçok alanında kullanılır; örneğin yörünge planlama, tekil konfigürasyonların tespiti, dinamik hareket denklemlerinin türetilmesi ve manipülatör eklemlerinden tutucu uca kuvvet ve torkların aktarımında önemli bir rol oynar [39]. Delta robota ait jakobiyen matrisleri 41 numaralı denklemden itibaren açıklanmaktadır.

Delta robotun hareketli olan paralel kısım bağlantıları kinematik kısıt denklemlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Genelleştirilmiş denklem formu 41 numaralı denklemden sunulmaktadır. Robot kısıtları denklem formunda üç adet paralel kol için 42, 43 ve 44 numaralı denklemler ile sunulmuştur. Bu kısıt denklemleri üç adet paralel kolun hareketli platformu eşgüdümlü bir şekilde hareketinin sağlanabilmesi için gerekli kinematik kısıt koşulunu vermektedir. f_1 eşitliği birinci paralel kol mekanizması için f_2 eşitliği ikinci ve f_3 eşitliği üçüncü paralel kol mekanizması için kısıt denklemini sunmaktadır. Denklem 45'te verilmiş olan kısaltmaya dair değerler EK1.'de verilerek açıklanmaktadır. Delta robot jakobiyen matrisi için zincir kuralı formunda denklemini denklem 46'daki formda yazılmaktadır.[16]

$$f_i(q_i, x_D, y_D, z_D) = 0 \quad (41)$$

$$f_1 = -2 \ell_1 (x_D - r_d) \cos q_1 + (-2 z_D \ell_1) \sin q_1 + (x_D^2 + y_D^2 + z_D^2 + r_d^2 + l_1^2 - 2x_D r_d - l_2^2) = 0 \quad (42)$$

$$f_2 = l_1 \left(x_D + \frac{1}{2} r_d - \sqrt{3} y_D + \frac{3}{2} r_d \right) \cos q_2 + (-2 l_1 z_D) \sin q_2 + (x_D^2 + y_D^2 \dots \dots + z_D^2 + r_d^2 + x_D r_d - \sqrt{3} y_D r_d + l_1^2 - l_2^2) = 0 \quad (43)$$

$$f_3 = l_1 \left(x_D + \frac{1}{2}r_d + \sqrt{3}y_D + \frac{3}{2}r_d \right) \cos q_3 + (-2l_1 z_D) \sin q_3 + (x_D^2 + y_D^2 \dots$$

$$\dots + z_D^2 + r_d^2 + x_D r_d + \sqrt{3}y_D r_d + l_1^2 - l_2^2) = 0 \quad (44)$$

45 numaralı denklem ile matematiksel sadeleştirme gerçekleştirilerek hesaplama kolaylığı elde edilir.

$$r_d = r_0 - r_3 \quad (45)$$

$$\frac{df_i}{dx} : \frac{\partial f_i}{\partial x_D} \dot{x}_D + \frac{\partial f_i}{\partial y_D} \dot{y}_D + \frac{\partial f_i}{\partial z_D} \dot{z}_D + \frac{\partial f_i}{\partial q_i} \dot{q}_i = 0 \quad (46)$$

47 numaralı denklem ile hareketli platform orijin noktasına ait hız eşitliği yazılmaktadır. Bu eşitlik ile hareketli platformun lineer hızı ile eklem açılarına ait açısal hız değerleri ile bağlantı kurulmaktadır. Bu bağıntı 42,43 ve 44 denklemlerindeki f_1, f_2, f_3 kısıt fonksiyonlarının her bir değişken için kısmi türevleri alınarak 47 denklem formunda elde edilir.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_D} & \frac{\partial f_1}{\partial y_D} & \frac{\partial f_1}{\partial z_D} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_D} & \frac{\partial f_2}{\partial y_D} & \frac{\partial f_2}{\partial z_D} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_D} & \frac{\partial f_3}{\partial y_D} & \frac{\partial f_3}{\partial z_D} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_D \\ \dot{y}_D \\ \dot{z}_D \end{bmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_D} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial f_2}{\partial y_D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial f_3}{\partial z_D} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (47)$$

$$J_d = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_D} & \frac{\partial f_1}{\partial y_D} & \frac{\partial f_1}{\partial z_D} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_D} & \frac{\partial f_2}{\partial y_D} & \frac{\partial f_2}{\partial z_D} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_D} & \frac{\partial f_3}{\partial y_D} & \frac{\partial f_3}{\partial z_D} \end{pmatrix}, \quad J_q = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_D} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial f_2}{\partial y_D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial f_3}{\partial z_D} \end{pmatrix} \quad (48)$$

Bu noktada zincir kuralına göre analitik jakobiyen ve geometrik jakobiyen arasındaki aşağıdaki 48 numaralı denklem eşitliğini yazabiliriz.

$$J_d \dot{D} = J_q \dot{q}_a \quad (49)$$

Bu noktada $\dot{D}$ noktası hareketli platformun kartezyen uzayda $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ noktalarının hız değerlerine karşılık gelmektedir, $\dot{q}_a$ ise eklem açılarının hız vektörüne karşılık geldiği görülmektedir. Denklem 50 ile verilen d_r ifadesi hesaplama kolaylığı açısından sadeleştirme ifadesidir.

$$d_r = r_0 - r_3 \quad (50)$$

- $r_0 = 0.330\text{m}$ (eşkenar temel çerçeve üçgeninin çevrelenmiş dairesinin yarıçapı)
- $r_3 = 0.125\text{m}$ (eşkenar hareketli platform üçgeninin çevrelenmiş dairesinin yarıçapı)

Yukarıda verilen değerler Autonox24 RL4 model delta robota ait mekanik değerlerdir. Sabit parametreler olarak EK1. dosyasında sunulmuştur. Denklem 51 ile robotun singular konumunda olmadığı kabul edilir. Denklem 52 de yapılan işlemler, denklem 47 eşitliğinin düzenlenerek hareketli platforma ait $\dot{D}$ noktasındaki lineer hızların ve $\dot{q}$ açısal eklem hızlarının matematiksel düzenlemeler ile elde edilmesini açıklamaktadır.

$$\det(J_d) \neq 0 \text{ ve } \det(J_q) \neq 0 \quad (51)$$

$$\dot{D} = J_d^{-1} J_q \dot{q}_a, \quad \dot{q} = J_q^{-1} J_D \dot{D} \quad (52)$$

$$J_D = \begin{bmatrix} 2(x_D - d_r - \ell_1 \cos q_1) & 2y_d & 2(z_D - \ell_1 \sin q_1) \\ 2x_D + d_r + \ell_1 \cos q_2 & 2y_d - \sqrt{3}(d_r + \ell_1 \cos q_2) & 2(z_d - \ell_1 \sin q_2) \\ 2x_D + d_r + \ell_1 \cos q_3 & 2y_d + \sqrt{3}(d_r + \ell_1 \cos q_3) & 2(z_d - \ell_1 \sin q_2) \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$J_q = \begin{bmatrix} 2\ell_1(\sin q_1(d_r - x_D) - z_D \cos q_1) & 0 & 0 \\ 0 & \ell_1(\sin q_2(2d_r + x_D - \sqrt{3}y_d) + 2z_D) & 0 \\ 0 & 0 & \ell_1(\sin q_3(2d_r + x_D - \sqrt{3}y_d) + 2z_D \cos q_3) \end{bmatrix} \quad (54)$$

Denklem 53 ve 54 ile değerlerin açık halde sunulmasıyla birlikte ait $\dot{D}$ noktasındaki lineer hızlar ve $\dot{q}$ açısal eklem hızlar hesaplanması mümkün olmaktadır. Hesaplanan bu jakobiye matrislerin robot dinamiğinde motor torklarının oluşturduğu etkinin tutucu uçta dönüştürülerek torkların ve kuvvetlerin belirlenmesinde, rijitlik(stiffness) kontrol,

empedans kontrol, admitans kontrol gibi robot kuvvet kontrol işlemlerinde belirlenmesi gereklidir. Jakobiyen matrisleri sayesinde yapılmak istenilen kuvvet kontrol işlemleri doğru sonuçlar vererek, endüstriyel uygulamaların güvenilirliğini artırmaktadır.

Delta robotlarında Jakobiyen matrisinin doğru bir şekilde hesaplanması, robotun hız ve konum kontrolünün yanı sıra kuvvet kontrolünü de doğrudan etkiler. Çünkü kuvvet kontrolü, robotun mekanik yapısının sağladığı doğruluk ve tekrarlanabilirlik ile yakından ilişkilidir. Jakobiyen matrisi, robotun herhangi bir noktasında uygulanan kuvvetin, diğer noktalara nasıl transfer edileceğini ve bu kuvvetin robotun hareketi üzerinde nasıl bir etki yaratacağını modellemek için kullanılır. Bu modelleme, özellikle kompozit malzemeler gibi hassas ve düzgün yüzey baskısı gerektiren uygulamalarda hayati öneme sahiptir.

Jakobiyen matrisinin kullanımı, delta robotunun çalışma alanı içindeki kuvvet dağılımını optimize etmek için de kritik bir araçtır. Robotun hareket alanının her noktasında kuvvetin uniform olarak dağılmasını sağlamak, malzemenin yapısının bozulmadan, istenilen mekanik özelliklere sahip ürünlerin üretilmesi için gereklidir. Bu, özellikle yüksek mukavemetli kompozit malzemelerin üretiminde, malzeme bütünlüğünün korunması ve üretim hatalarının minimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Jakobiyen matrisinin dinamik bir şekilde hesaplanabilmesi, delta robotun hızlı tepki verme ve adaptasyon yeteneğini artırır. Bu yetenek, özellikle üretim süreçlerinde beklenmedik değişikliklere veya hatalara karşı hızlı bir şekilde müdahale etmeyi ve süreç kontrolünü iyileştirmeyi mümkün kılar. Delta robotunun bu adaptasyon kabiliyeti, karmaşık üretim süreçlerindeki verimliliği ve ürün kalitesini önemli ölçüde artırabilir. Bu bağlamda, Jakobiyen matrisinin detaylı analizi ve optimizasyonu, kuvvet kontrolü stratejilerinin geliştirilmesinde ve üretim sürecinin tüm aşamalarında etkin bir rol oynamaktadır.

3.5. Robot Dinamiği

Robot hareketi, kinematik ve dinamik denklemlerle modellenir. Robot kinematiği, robotun konumunu ve hareketini açıklamak için kullanılırken, robot dinamiği ise robotun hareketini ve bu hareket için gereken kuvvetleri inceler.[38] Dinamik analiz, cisimlerin hareketlerini ve bu hareketlere neden olan kuvvet ve momentleri inceleyen fizik dalıdır. Kinematikten farklı olarak, dinamikte hareketin nedenleri olan kuvvetler ve torklar

üzerinde durulur. Robotik alanında dinamik analiz, robotların kontrolü ve simülasyonu için hayati öneme sahiptir, çünkü bir robotun istenen hareketleri gerçekleştirebilmesi için gerekli kuvvet ve torkların doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir.

Robot dinamiği, robotların hareketlerini ve bu hareketleri sağlayan kuvvet ve torkları analiz eden bir disiplindir. Bu alan, robotların fiziksel özelliklerine ve çevre ile etkileşimlerine dayanarak, robotun belirli bir hareketi gerçekleştirmesi için gerekli olan kuvvet ve torkları belirler. Robot dinamiği iki ana bölüme ayrılır: ileri dinamik ve ters dinamik.

İleri dinamikte, verilen kuvvet ve torklar altında robotun hareketi belirlenirken, ters dinamikte, belirli bir hareketin gerçekleştirilmesi için gerekli kuvvet ve torklar hesaplanır. Robot dinamiğini hesaplamaları için bazı gereklilikler bulunmaktadır. Bunlar fiziksel parametreler, kuvvet ve momentler olarak iki kısma ayrılır. Fiziksel parametreler, kütle ve kütle merkezi, bağlantı uzunlukları olarak tanımlanır. Robotun çevresiyle etkileşimi sırasında maruz kaldığı kuvvet ve momentlerin belirlenmesi gerekir. Bu değerler, kütle atalet momentleri, yerçekimi, merkezci kuvvetler, sürtünme kuvvetleri ve robota dışarıdan etki eden dış kuvvetler olarak tanımlanır.

Robot dinamiğini hesaplamak için Newton-Euler, Lagrange-Euler, Hamiltonian gibi farklı teknikler bulunmaktadır. Newton-Euler yöntemi, robot dinamiklerini hesaplamak için kullanılan temel yöntemlerden biridir. Newton-Euler yöntemi, her bir robot bağlantısı için Newton'un ikinci yasasını ($F = m \times a$) ve Euler'in dönme hareketi yasasını ($\tau = I \times \alpha$) uygulayarak dinamik denklemleri türetir. Bu yöntem, özellikle robotun her bir bağlantısı için kuvvet ve tork denklemlerini türeterek dinamik denklemleri oluşturur.

Lagrange yöntemi, enerjinin korunumu ilkesine dayanarak robotun kinetik ve potansiyel enerjileri üzerinden hareket denklemlerini türetir. Bu yöntem, enerjinin korunumu prensibine dayanır ve robotun kinetik ve potansiyel enerjilerini kullanarak hareket denklemlerini türetir. Lagrange-Euler yöntemi, daha soyut ve matematiksel olarak yoğun bir yöntemdir ve karmaşık sistemler için daha etkili olmaktadır.

Robot dinamiği, robotların hareket ve kuvvet ilişkilerini çözümlmek için kritik bir disiplindir. Newton-Euler, Lagrange yöntemleri, robot dinamiklerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılır ve her iki yöntem de avantajlar ve zorluklar içermektedir. Robot

dinamiği, robotların tasarımı, kontrolü ve simülasyonu için temel bir bileşen olup, robotların istenen görevleri doğru ve verimli bir şekilde gerçekleştirmesini sağlar.

3.5.1. Euler-Lagrange Dinamiği

Euler-Lagrange formülasyonu, dinamik sistemlerde hareket denklemlerini türetmek için kullanılan bir matematiksel formülasyondur. Bu formülasyon, mekanik elemanların kinetik ve potansiyel enerji denklemlerinin elde edilmesiyle, sistem için genel bir Lagrange fonksiyonu türetir ve bu fonksiyon üzerinden Euler-Lagrange denklemleri ile ifade edilir. [37,38,39]

55 numaralı denklemdeki Lagrange fonksiyonu, sistem üzerindeki kinetik (T) ve potansiyel enerji (U) arasındaki farkı temsil eder:

$$L = T - U \quad (55)$$

Burada T kinetik enerjiyi, U ise potansiyel enerjiyi ifade eder. Genelleştirilmiş Euler-Lagrange denklemi ise aşağıdaki gibidir:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = Q_i \quad (56)$$

$\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right)$: Lagrange fonksiyonunun $\partial \dot{q}_i$ hızına göre kısmi türevlerini,

$\left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right)$: Lagrange fonksiyonunun ∂q_i konumlarına göre kısmi türevlerini,

$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right)$: $\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right)$ ifadesinin zaman türevini,

Q_i : Harici kuvvet ve torkları temsil eder.

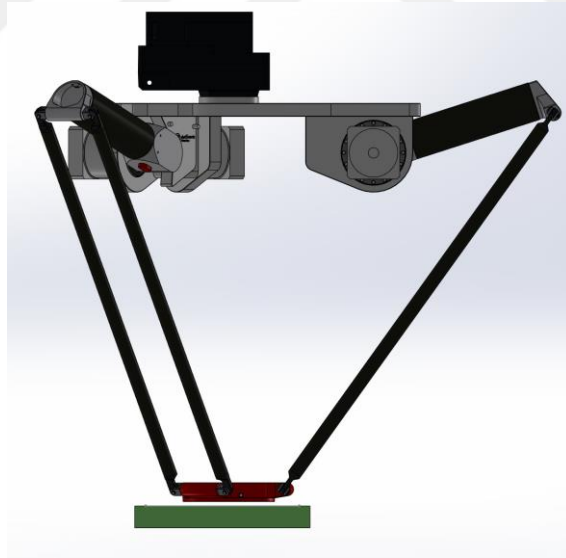
Bu denklem, sistemin dinamik davranışını açıklamak için kullanılır ve robot hareket denklemlerini elde etmek amacıyla Euler-Lagrange veya Newton-Euler gibi tekniklerle dinamik model oluşturulur. Elde edilen robot dinamik modeli genel bir formda aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (57)$$

Verilmiş olan denklemdeki parametreler;

- q : genelleştirilmiş eklemlerin, konum vektörüdür.
- $\dot{q}$: genelleştirilmiş eklemlerin, hız vektörüdür.
- $\ddot{q}$: genelleştirilmiş eklemlerin, ivme vektörüdür.
- $M(q)$: Kütle matrisidir eklemlerin robotun hareketine dinamik etkisini belirtir.
- $C(q, \dot{q})$ Coriolis ve merkezci ivme kuvvetlerinin meydana getirdiği matrisidir ve eklemlerin hızlarına bağlı olarak oluşan etkileri içerir.
- $G(q)$: Yerçekimi kuvvet vektörüdür ve eklemlerin konumlarına bağlı olarak oluşan yerçekimine bağlı etkisini belirtir

τ : Eklemler üzerine uygulanan dış kuvvet ve moment vektörüdür. Robot kolun eklemlerinin kütlelerinden ve yörünge boyunca oluşacak dinamik etkileri yenebilmesini imkân sağlayacak tork değeridir.



Şekil 3.8. Delta Robot CAD Görseli

Paralel mekanizmalar içerisinde bulunan Delta robotlar, kinematik ve dinamik modelleme ve kontrolünde seri robotlara göre daha karmaşık ve zorlayıcıdır, araştırmacılar bu konulara çözümler sunabilmek amacıyla için çalışmalar gerçekleştirmektedir. Seri zincirli robotların kinematikinden farklı olarak, Delta robotun ileri kinematiği, tahrik edilen eklem açılarından uç efektörün konumunu ifade eden fonksiyon, analitik olarak ifade edilemez ve bu durum ileri dinamik ve ters dinamik

hareket denklemlerinin formüle edilmesini zorlaştırır. Hareket denklemleri, sanal iş prensibi, Newton-Euler formülasyonu veya Lagrange ve Hamilton enerji temelli yaklaşımlar gibi çeşitli metodolojiler kullanılarak türetilmektedir fakat bir Delta robotunun tek bir doğru kinematik, ileri dinamik veya ters dinamik modeli yoktur. [40,41]

Bahsedilen farklı teknikler, farklı dinamik modellerle sonuçlanır ve her birinin kullanım durumuna bağlı olarak teknikler model sentezi süreci için daha verimli olabilirken diğerleri daha verimli yazılım süreci veya geri beslemeli kontrol sistemi tasarımı için daha kullanışlıdır.

Model	Time
Principle of Virtual Work	0,73 s
Newton-Euler Formulation	1,00 s
Lagrangian Formulation	0,37 s

Şekil 3.9. Dinamik Çözüm Yöntemleri Karşılaştırma [28]

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau_a \quad (58)$$

$$\tau_a = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (59)$$

Delta robotların dinamiği, paralel mekanizmalar nedeniyle, kinematik ve dinamik modelleme ve kontrolünde zorlayıcıdır. Delta robotun ileri kinematiği, tahrik edilen eklem açılarından uç efektörün konumunu ifade eden fonksiyon analitik olarak ifade edilemez. Bu, ileri ve ters dinamik hareket denklemlerinin formüle edilmesini zorlaştırır. Bu denklemler, sanal iş prensibi, Newton-Euler formülasyonu veya Lagrange ve Hamilton enerji temelli yaklaşımlar gibi çeşitli metodolojiler kullanılarak türetilir.

Kısıtlı dinamiklerin hesaplanması, Delta robotlar gibi karmaşık mekanizmaların modellemesinde özellikle önemlidir. Bu tür sistemler, bağlantılı ve doğrusal olmayan dinamik denklemlerin çözülmesi gerektiğinde, kısıtların matematiksel olarak ifade edilmesini ve bu kısıtlar altında sistem dinamiklerinin analizini gerektirir. Kısıtlı dinamikler, genellikle Lagrange çarpanları yöntemiyle işlenir. Bu yöntem, sisteme eklenen kısıtların matematiksel ifadelerini, hareket denklemlerine entegre ederek, sistem üzerindeki kısıtlayıcı kuvvet ve torkların hesaplanmasını sağlar. Kısıtlı sistemler için

diferansiyel cebirsel denklemler kullanılır ve bu denklemlerin çözümü genellikle yüksek dereceden karmaşık matematiksel işlemler gerektirir.

Delta robotların dinamik modellemesi, sürtünme kuvvetlerinin ihmal edildiği ve kol kütlelerinin eklem konumlarına orantılı olarak dağıtıldığı basitleştirmelerle gerçekleştirilir. Bu kabuller, dinamik modelin doğruluğunu ve hesaplama verimliliğini etkileyebilir. Ancak, bu basitleştirmeler olmadan, delta robotun dinamiklerini analiz etmek ve kontrol etmek çok daha karmaşık bir hale gelir.

Bu bağlamda, delta robotların dinamik modellemesi, kuvvet kontrolü uygulamaları için hayati öneme sahiptir. Bu modeller, robotun eklemleri üzerine uygulanan kuvvet ve momentleri doğru bir şekilde tahmin etmek için gereklidir ve robotun istenen hareketleri doğru ve verimli bir şekilde gerçekleştirmesini sağlar.

Delta robotların kontrol stratejileri, genellikle robot kollarının hafifliği ve dinamik denklemlerindeki matris terimlerinin göreceli olarak küçük katkıları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bu sebeple, düşük hızlı hareketlerde genellikle ters kinematik kullanılarak yüksek kazançlı geri beslemeli servo konum kontrolü yeterli olabilmektedir. Ancak, robotun hızı arttığında, dinamik denklemlerdeki terimlerin etkileri de önemli ölçüde artar. Özellikle yüksek hızlarda, dinamik etkilerin ihmal edilmesi, kontrol performansının düşmesine ve istenmeyen davranışların ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle, yüksek hızlı hareketlerde kontrol stratejisinin yeniden gözden geçirilmesi ve dinamik modellemeye dayalı daha gelişmiş kontrol tekniklerinin uygulanması gereklidir.

Dinamik denklemlerin önemi, robotun kuvvet ve komplians kontrolü gibi daha karmaşık kontrol gereksinimlerinde de kendini gösterir. Özellikle, robotun yüksek hızlarda olmasa bile, kuvvet ve komplians kontrolünde dinamik etkiler göz ardı edilemez. Robotun çevresiyle etkileşimde bulunduğu uygulamalarda, yani robotun bir yüzeye baskı uyguladığı veya hassas montaj işleri gerçekleştirdiği durumlarda, dinamik modelleme önemli hale gelir. Bu tür durumlarda, robotun hareketi sırasında ortaya çıkan kuvvetlerin ve momentlerin doğru bir şekilde hesaplanması, işlem kalitesini ve robotun etkinliğini doğrudan etkiler.

Komplians kontrolü, robotun dış kuvvetlere uyum sağlayabilmesi ve bu kuvvetlere dinamik bir yanıt verebilmesi anlamına gelir. Bu kontrol, özellikle esnek üretim sistemlerinde ve insanlarla işbirliği içinde çalışan robotlarda kritik öneme sahiptir. Komplians kontrolü için dinamik modelin entegrasyonu, robotun etkileşimde olduğu ortama ve uygulanan kuvvetlere bağlı olarak hareketini uyumlu bir şekilde ayarlamasına olanak tanır. Bu, robotun hem daha güvenli hem de daha verimli çalışmasını sağlar.

Delta robotların kontrolünde, özellikle yüksek hızlı hareketler veya kuvvet ve komplians gibi hassas kontrol gerektiren uygulamalar söz konusu olduğunda, dinamik modellemeye dayalı kontrol stratejilerinin benimsenmesi önem taşır. Bu yaklaşım, robotun performansını optimize ederken aynı zamanda daha güvenli ve etkin çalışmasını sağlar. Dinamik etkilerin ihmal edilmesi, kontrol hatalarına ve sistemdeki diğer bileşenlere zarar verebilecek anormal davranışlara yol açabilir. Bu nedenle, robot dinamiğinin kapsamlı bir şekilde modellenmesi ve bu modellere dayalı kontrol algoritmalarının geliştirilmesi, gelişmiş robotik uygulamalarda başarı için kritik öneme sahiptir.

Kısıtlı dinamiklerin modellenmesi, özellikle delta robotlar gibi karmaşık kinematik yapılarına sahip robot sistemler için oldukça zorlayıcı bir süreçtir. Bu tür sistemlerde, birden fazla kinematik zincir ve bu zincirlerin etkileşimi nedeniyle, dinamik denklemler doğrusal olmayan ve oldukça karmaşık hale gelir. Bu karmaşıklık, hem analitik çözümlerin bulunmasını zorlaştırır hem de sayısal yöntemlerle çözüm sürecini uzatabilir ve hesaplama kaynaklarını yoğun bir şekilde kullanabilir. Bu nedenle, gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında ve hızlı yanıt gerektiren sistemlerde, bu detaylı dinamik modellemeler yerine daha basitleştirilmiş veya yaklaşımsal modeller kullanmak pratik bir çözüm olabilir.

Yaklaşımsal dinamik modeller, sistem dinamiklerinin temel davranışlarını yakalamak için yeterli olacak şekilde tasarlanırken, hesaplama yükünü önemli ölçüde azaltmayı amaçlar. Bu modeller, robotun gerçek hareketini tam olarak temsil etmese de, kontrol algoritmalarının etkin bir şekilde çalışmasını sağlayacak ana dinamik etkileri içerir. Özellikle, endüstriyel uygulamalar ve üretim süreçlerinde, hız ve verimlilik esastır ve bu tür yaklaşımsal modeller, sistem performansını optimize ederken aynı zamanda kontrol sistemlerinin karmaşıklığını yönetilebilir seviyelerde tutar.

Bu bağlamda, delta robotlar ile gerçekleştirilen çalışmada [16] dinamik denklemlerin belirlenmesi sürecinde bazı basitleştirmeler ve kabuller yapılmıştır. Bu basitleştirmeler, robotun kinematik ve dinamik hesaplamalarını kolaylaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir ve formülasyon içerisinde kullanılan parametrelerin değerleri, çalışmanın giriş bölümünde sunulan semboller listesinde tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, modelin hesaplanmasını ve kontrol algoritmasının etkin bir şekilde uygulanmasını sağlarken, sistem üzerindeki yükü azaltmayı ve uygulama sürecinin hızlanmasını hedefler. Böylece, pratik uygulamalarda karşılaşılan zorluklara rağmen, robotun yüksek performansla çalışabilmesi için gerekli dinamik kontrol sağlanabilir.

Bu modeldeki kabuller,

- i) sürtünme kuvvetlerinin ihmal edilmesi
- ii) kol kütlelerinin uç noktalara yani yaklaşık eklem konumlarına sabit oranlarda dağıtılması şeklinde kabullere dayanmaktadır.

Denklem 60 ile verilen m_{Bi} ifadesi, kinematik koldaki B noktasına kütle dağılımına denk gelmektedir.[36] numaralı çalışmada bu kabul ve değerlere ulaşılabilir. 60-61 denklemleri ile belirlenen kütle değerleri 62 numaralı denklemde yerine koyularak, kol uzunluğuna karşılık gelen kütle değerlerini verir.

$$m_{Bi} = m_1 + p_2 \cos q_i m_2 + m_e \quad i = 1,2,3 \quad (60)$$

$$m_D = m_3 + 3 \left(1 - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 p_2 \cos q_i \right) m_2 + 3m_e \quad (61)$$

$$\ell_{Bi} = \ell_1 \frac{p_1 m_1 + p_2 \cos q_i m_2 + m_e}{m_{Bi}} \quad i = 1,2,3. \quad (62)$$

$$I = [I_{3 \times 3}] \quad (63)$$

Denklemler ile elde edilen kütle değerleri kütle atalet matrisine, merkezci ivmeler matrisine ve yerçekimi matrisine karşılık gelen 64-65-66-67 numaralı denklemlerde yerine koyularak 58 numaralı denklemde verilen genel robot hareket denklemi elde edilir.

$$M_a(q) = I(I_{AB} + m_D J_D^T J_D) \quad (64)$$

$$C_a(q, \dot{q}) = I(m_D J_D^T \dot{J}_D) \quad (65)$$

$${}^\tau G_a = -I \text{diag}(m_{Bi} \ell_{Bi} g) [\cos q_1, \cos q_2, \cos q_3]^T + (J_D^T m_D) [0, 0, -g]^T \quad (66)$$

$$G_a(q) = -{}^\tau G_a \quad (67)$$

Delta robot kontrolünde, kütle-atalet matrisi, merkezci ivmeler matrisi ve yerçekimi ivmesi matrisi gibi dinamik matrisler büyük önem taşır. Bu matrislerin bir araya getirilmesiyle, robotun uzayda serbest hareketini mümkün kılan hareket denklemleri oluşturulur. Ancak, bir görevi yerine getirmek üzere tasarlanmış bir robotun uç kısmında, belirli bir uygulamayı gerçekleştirebilmek için gerekli olan kuvvet ve torkun sağlanması gereklidir. Delta robotlarda, tutucu uç için gerekli olan kuvvet ve tork ihtiyacını hesaplamak, seri tip robotlara kıyasla daha zordur ve genellikle ilk adımda bu hesaplamaları yapmak mümkün olmaz.

Delta robotların paralel kinematiği nedeniyle, her bir eklem için kısıt denklemleri mevcuttur ve bu kısıtlar, robotun hareketli platformunda dengeli ve doğru bir hareket profiline oluşabilmesi için, üç adet eklem tahrik motorunun bileşke kuvvetlerinin dengede kalması gerektiğini belirtir. Bu denge kuvveti ve tork hesaplaması, Lagrange çarpanları kullanılarak elde edilen bir dizi karmaşık denklemler aracılığıyla gerçekleştirilir. Bortoff'un yaptığı çalışma[17,40,41], bu konuda önemli açıklamalar sunmaktadır. Delta robot dinamiği, kuvvet kontrolü uygulamaları için zorunlu olan diferansiyel cebirsel denklemler ile modellemeye tabidir. Bu denklemlerin matris boyutları yüksek derecede olduğu için, Baumgarte merteye indirgeme gibi karmaşık matematiksel işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemler, robotun dinamik modelinin hesaplanmasını ve kontrol algoritmasının etkin bir şekilde uygulanmasını sağlar, böylece robotun performansı artırılır ve istenen görevler doğrulukla yerine getirilebilir.

3.6. Kuvvet Kontrolü

Kuvvet kontrol algoritmaları, robotların fiziksel temas sırasında çevreleriyle etkileşimde bulunurken kuvvetleri düzenlemek üzere tasarlanmış kontrol stratejileridir. Bu algoritmalar, robotların nesnelerle veya yüzeylerle gerçekleştirdikleri uygulama, montaj

ve diğer etkileşim görevlerini yerine getirirken hassas kuvvet ayarlaması ve değişken çevre koşullarına adaptasyon sağlar. Kuvvet kontrol stratejisi, karşılaşılan kuvvetlere yanıt olarak bir robotun hareketlerinin planlanan yörüngede nasıl ayarlandığını kapsar. Bu süreçte kuvvet sensörlerinden alınan geri bildirimler kritik önem taşır. Bu sensörler genellikle üç ana kategori altında toplanır: bilek kuvveti sensörleri, eklem torku sensörleri ve dokunsal veya el sensörleri.

Bilek kuvveti sensörü, tipik olarak bir dizi gerinim ölçer içerir ve bu ölçerler, sensörün koordinat eksenleri boyunca uygulanan üç boyutlu kuvveti ve bu eksenler etrafındaki torku hassas bir şekilde ölçer. Eklem torku sensörleri, robot eklemlerinde bulunur ve genellikle aktüatör miline yerleştirilmiş gerinim ölçerlerden oluşur [37,42].

Kuvvet kontrol sistemlerinde sensörlerin gürültülü çalışması, kontrol performansını ciddi şekilde olumsuz etkileyebilir. Bu durum, özellikle hassas uygulamalar gerektiren robotik sistemlerde problem yaratabilir. Gürültülü veri, yanlış kuvvet ölçümlerine neden olabilir ve bu da robotun yanıt verme kabiliyetini ve işlem kalitesini düşürebilir. Bu sebepten ötürü, kuvvet kontrol algoritmaları bazen gürültülü sensör verilerini minimize etmek için sensörleri geri beslemeli olarak kullanabilirken, bazı durumlarda ise sensör kullanmadan çalışacak şekilde tasarlanabilir.

Kuvvet sensörleri olmadan kuvvet kontrolü yapmak için gerçekleştirilen araştırmalar, genellikle kuvvet tahmini (force estimation) tekniklerine dayanır. Bu teknikler, robotun mevcut hareket verileri ve dinamik modellemeler kullanılarak uygulanan kuvvetlerin tahmin edilmesine olanak tanır. Ancak, bu yaklaşımların başarısı büyük ölçüde kullanılan modelin doğruluğuna ve hesaplama algoritmalarının hassasiyetine bağlıdır. Mevcut teknolojilerde ölçüm doğruluğu, bu yöntemlerin daha yaygın olarak benimsenmesi için önemli bir darboğaz oluşturmaktadır. Yetersiz modelleme veya hesaplama hataları, gerçek kuvvetlerle önemli farklılıklar gösterebilir ve bu da robotun etkileşimde bulunduğu ortamla uyumsuz davranmasına neden olabilir.

Geliştirilmiş kuvvet tahmini yöntemleri, özellikle yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinin entegrasyonu sayesinde, sensörlerden elde edilen verilerin gürültüsünü filtreleyebilir ve daha doğru kuvvet tahminleri yapabilir. Bu ilerlemeler, kuvvet kontrol algoritmalarının daha güvenilir ve etkin olmasını sağlayarak robotik sistemlerin daha geniş bir uygulama yelpazesinde etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. Bu tür

sistemlerin daha geniş çapta kabul görmesi, özellikle üretim ve montaj gibi alanlarda robotların etkileşim kabiliyetlerini önemli ölçüde artırabilir.

Kuvvet kontrol algoritmaları, pozisyon ve kuvvet ilişkilerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. Konum ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiyi içeren yöntemler:
 - Yalnızca konum geri beslemesi ile sertlik kontrolü.
 - Kuvvet geri beslemesi ile sertlik kontrolü düzeltmesi.
2. Hız ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiyi kullanan yöntemler:
 - Empedans kontrolü.
 - Admitans kontrolü.
3. Doğrudan konum ve uygulanan kuvveti uygulayan yöntemler:
 - Hibrit konum/kuvvet kontrolü.
 - Hibrit empedans kontrolü.
4. Doğrudan uygulanan kuvvet geri beslemesini uygulayan yöntemler:
 - Açık kuvvet kontrolü.

Empedans kontrol algoritmaları, robot-çevre etkileşimini sanal bir mekanik empedans olarak modelleyerek, hem konum hem de kuvveti aynı anda düzenler. Bu yaklaşım, robotların hassas nesneler veya yüzeylerle sorunsuz bir şekilde etkileşime girmesine olanak tanır. Admitans kontrol algoritmaları, çevrenin mekanik girdisini dikkate alarak robotun hareketini, ortamın davranışını taklit edecek şekilde ayarlar; bu da robotun değişen yüzey koşulları ve dış kuvvetlere uyum sağlamasını kolaylaştırır, böylece etkileşim sırasında robotun sağlamlığını ve stabilitesini artırır.

Hibrit kuvvet/konum kontrol algoritmaları ise hem pozisyon hem de kuvvet kontrolü unsurlarını birleştirir. Bu algoritmalar, montaj işlemleri gibi hem kuvvet düzenlemesi hem de hassas hareket kontrolü gerektiren görevler için idealdir, çünkü hassas konumlandırma doğruluğunu korurken etkileşim kuvvetlerini etkin bir şekilde düzenler.

3.6.1. İdeal Kuvvet Kontrolü

Saf kuvvet kontrolü, ortamın her yönde direnç kuvvetleri sağladığı özel durumlarda mümkündür. Örneğin, bir robotun tutucu ucu çimento karışımı gibi viskoz bir materyalin içerisinde olduğunda ve bu materyal robotun hareketlerine altı eksenle direnç gösterdiğinde ideal kuvvet kontrolü uygulanabilir. Ancak, gerçek hayatta böyle bir durum nadiren mümkündür, bu nedenle saf kuvvet kontrolü genellikle teorik bir kavram olarak kalır.

İdeal kuvvet kontrolünde, uç efektör tarafından uygulanan kuvvet, çevreden gelen bozucu hareketlerden etkilenmez. Manipülatörün ortama uyguladığı tipik bir sıkma kuvveti F_{tip} ile ifade edilir. Bu durumda manipülatörün dinamiği 68 numaralı denklemdeki gibi modellenebilir [31] [35]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T(\theta)F_{tip} = \tau \quad (68)$$

Robotun kuvvet kontrol işleminde genellikle sabit ya da çok yavaş hareket ettiği varsayıldığında, ivme ve hız terimleri ihmal edilebilir. Bu basitleştirme ile elde edilen denklem şu şekildedir:

$$G(q) + J^T(\theta)F_{tip} = \tau \quad (69)$$

Eğer bir kuvvet/tork sensörü kullanılıyorsa, PI kuvvet kontrolü ile yerçekimi kompanzasyonu gerçekleştirilen denklem aşağıdaki gibidir. Burada F_d arzu edilen kuvvet değeridir.

$$\tilde{g}(q) + J^T(\theta) \left(F_d + K_{fp}F_e + K_{fi} \int F_e(t)dt \right) = \tau \quad (70)$$

$$F_e = F_d - F_{tip} \quad (71)$$

70 ve 71’de verilen denklemler, tutucu uçta oluşan kuvvet hatasını hesaplamak için kullanılır. Hedef, bu hatayı sıfıra indirmek ve böylece yerçekimine karşı sabit bir kuvvet değeri elde etmektir. Bu yöntemler, robotun çevresiyle etkileşimini optimize ederken kontrolün doğruluğunu artırır ve genel sistem stabilitesini sağlar.

3.6.2. Empedans Kontrolü

Mekanik empedans, bir mekanik sistemin uygulanan kuvvete veya yer değiştirmeye nasıl tepki verdiğini tanımlar. Bu kavram, sistemlerin harici kuvvetlere veya hareketlere maruz kaldıklarında nasıl tepki vereceklerini açıklar. Basit bir ifadeyle, mekanik empedans bir mekanik sistemin üzerine bir kuvvet uygulandığında ne kadar kolay deformasyona uğrayabileceğini veya ne kadar kolay hareket edebileceğini belirtir.

Mekanik empedans, elektrik devrelerindeki empedans analojisiyle anlaşılabilir: Elektrik devrelerinde empedans, akımın akışına karşı direnci tanımlar; benzer şekilde, mekanik sistemlerde empedans, uygulanan kuvvet veya harekete karşı direnci tanımlar. Matematiksel olarak, mekanik empedans, uygulanan kuvvet ile ortaya çıkan yer değiştirme veya hız arasındaki oran olarak ifade edilir. Sistemin sertliği, sönümü ve kütlesi gibi faktörler, sistemin dış kuvvetlere nasıl tepki vereceğini etkiler ve genel mekanik davranışını belirler.

Robot hızı $\dot{X}$ ile uygulanan kuvvet F arasındaki ilişki, mekanik empedans ile tanımlanır ve bu ilişki frekans domeninde denklem 72'deki ifade ile tanımlanır:

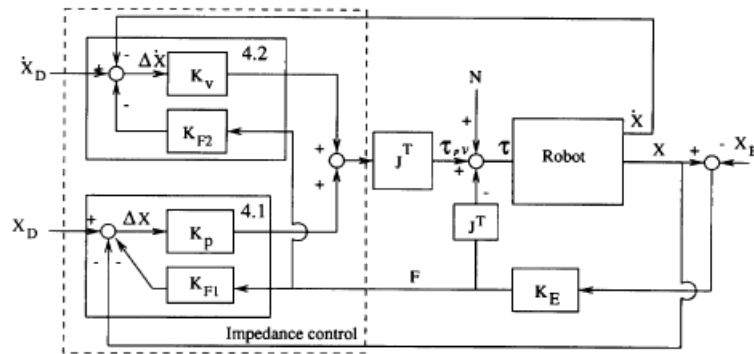
$$\frac{F(s)}{\dot{X}(s)} = Z_m(s) \quad (72)$$

Konum parametresi olarak yazıldığında ise denklem şu şekilde olur:

$$\frac{F(s)}{X(s)} = sZ_m(s) \quad (73)$$

Lineer durumda istenen empedans, kütle-yay-sönüm sistemi olarak tanımlanabilir. Burada M, D ve K parametreleri sırasıyla kütle, sönüm ve sertlik matrisleridir:

$$sZ_m(s) = Ms^2 + Ds + K \quad (74)$$



Şekil 3.10. Kuvvet Kontrol Diyagramı

"Şekil 3.10, temel empedans kontrolünü blok diyagram formatında gösteren kuvvet kontrol şemasını içermektedir. Bu şemada, eklem uzayındaki kuvvet hatasının nasıl düzeltilmesi gerektiği, Denklem 75 ile aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\tau_{pv} = J^T (K_p \Delta X + K_v \Delta \dot{X}) \quad (75)$$

Empedans kontrolü, delta robotların kompozit malzeme imalatında özellikle önemli bir rol oynar. Bu kontrol yöntemi, robotun kompozit malzemelerle etkileşimini düzenleyerek, malzemenin yapısına zarar vermeden uygun baskı ve yerleştirme işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlar. Özellikle katmanlı malzemelerin hassas bir şekilde üst üste yerleştirilmesi veya baskı uygulanması sırasında, empedans kontrolü robotun hareketlerini ve uygulanan kuvvetleri malzemenin mekanik özelliklerine uygun şekilde ayarlayarak optimal sonuçlar elde etmeyi mümkün kılar. Bu kontrol metodu, kompozit katmanlar arasında uniform ve bütünsel bir birleşimi sağlayarak ürün kalitesini artırır ve üretim hatalarını azaltır.

Empedans kontrolü, işbirlikçi robotlar (cobotlar) gibi etkileşim gerektiren diğer uygulama alanlarında da başarıyla kullanılmaktadır. Robotun çevresel değişkenliklere uyum sağlaması, gerçek zamanlı kontrol gerektiren uygulamalarda özellikle kritik öneme sahiptir. Bu kontrol stratejisi, robotların esnek ve dinamik bir şekilde çevresiyle etkileşim kurmasını sağlar, böylece daha verimli ve etkin bir üretim süreci mümkün olur.

Empedans kontrolü genellikle bir robotun bulunduğu ortamın sönümlleme özelliklerine uyum sağlaması gerektiğinde kullanılır. Bu kontrol yöntemi, robotların çevresel değişkenliklere esnek ve dinamik bir şekilde uyum sağlamalarını gerektirir, bu da kontrol stratejilerinin bu değişkenliklere duyarlı olmasını zorunlu kılar. Empedans kuvvet

kontrolü ile karşılaşılan matematiksel zorluklar genellikle kontrol sistemlerinin karmaşıklığından kaynaklanır ve gerçek zamanlı kontrol gerektiren uygulamalarda, denetim algoritmalarının hesaplama süreleri ve stabilitesi büyük önem taşır. Bu zorluklara rağmen, empedans kuvvet kontrolü işbirlikçi robotlar gibi etkileşim gerektiren birçok uygulama alanında başarıyla kullanılmaktadır. Bu yöntem, kompozit katmanlarının sahip olduğu esnekliğin oluşturabileceği yanlış baskı kuvvetini regüle ederek, katmanların uniform ve bütünsel birleşimini sağlayacak doğru kuvveti elde etmek amacıyla kullanılabilir.

3.7. Delta Robot Simülasyon Modeli

Delta robotların kompozit malzeme imalatında kullanılmasının artan popülaritesi, robotların dinamik davranışlarını daha iyi anlamayı ve bu sistemler üzerinde daha hassas kontrol stratejileri geliştirmeyi zorunlu kılmaktadır. Bu tür sistemlerde, gerçek dünya uygulamalarında karşılaşılan kuvvet etkileşimlerini simüle edebilmek, robotun performansını doğru bir şekilde değerlendirebilmek için hayati önem taşır.

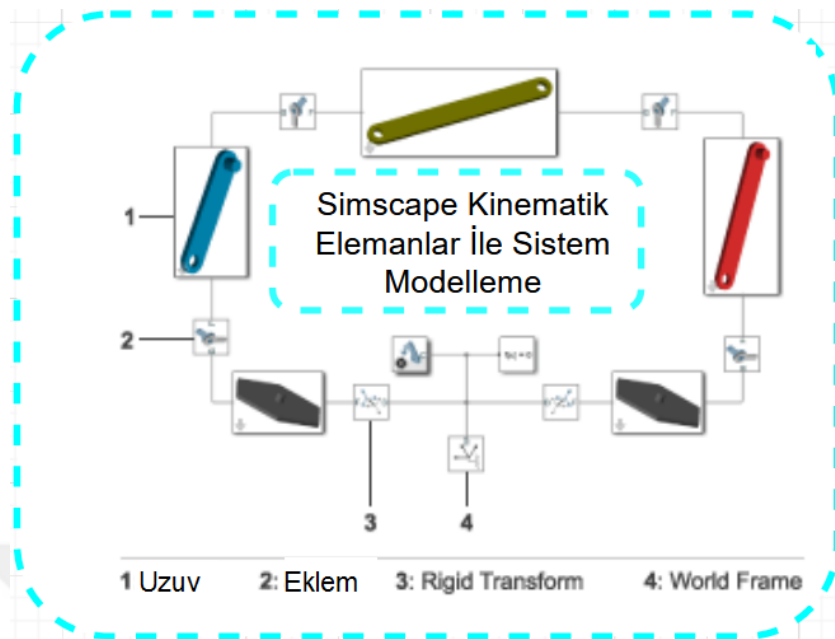
Robotlar üzerinde yapılan fiziksel deneyler maliyetli ve zaman alıcı olabilir, özellikle de karmaşık yörünge ve kuvvet kontrol algoritmalarının test edilmesi gerektiğinde. Bu nedenle, simülasyon ortamlarının kullanılması, yeni algoritmaların etkinliğini değerlendirmede önemli bir yer tutar. Simülasyon, mühendislere ve araştırmacılara gerçek zamanlı deneyler yapmadan önce çeşitli senaryoları hızlı ve maliyetsiz bir şekilde test etme olanağı sağlar. Ayrıca, simülasyon modelleri, tasarım aşamasında ortaya çıkabilecek potansiyel problemleri önceden tespit etme ve düzeltme fırsatı verir, bu da ürün geliştirme sürecinin verimliliğini ve etkinliğini artırır.

Tezin amacı doğrultusunda, delta robotların dinamik modellemesinin ve yörünge planlama algoritmalarının etkinliğinin test edilebilmesi için bir simülasyon modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu model, robotun kuvvet etkileşimlerini detaylı bir şekilde ölçebilmeli ve yörünge planlama stratejilerinin robot performansı üzerindeki etkilerini analiz edebilmelidir. Bu nedenle, MATLAB SimMechanics ortamında geliştirilen bir simülasyon modeli kullanılmaktadır. MATLAB SimMechanics, karmaşık mekanik sistemlerin simülasyonu için güçlü araçlar sunar ve mühendislerin mekanik sistemlerin kinematik ve dinamik davranışlarını kolayca modellemesine olanak tanır.

Endüstriyel robotlarda yaygın olarak kullanılan ters kinematik tabanlı kontrolörler, robotların belirlenen hedeflere doğru hareket etmelerini sağlar. Ancak, bu kontrolörler genellikle sadece pozisyonu kontrol eder ve dinamik etkileşimler gibi ek faktörleri göz ardı edebilir. Bu tez kapsamında kullanılan MATLAB SimMechanics modelinde, ters kinematik ile birlikte PID tabanlı bir kontrolör bulunmaktadır. Bu kontrolör, robotun yörüngesini ve kuvvet etkileşimlerini gerçek zamanlı olarak düzenleyerek, daha hassas ve etkili bir kontrol sağlar. Bu simülasyon modeli, tez çalışmasında delta robotların kompozit malzeme imalatındaki uygulamalarının incelenmesi için temel bir araç olarak kullanılacaktır. Model, yörünge planlama algoritmalarının performansını değerlendirmek ve potansiyel iyileştirmeler için gereken bilgileri sağlamak üzere tasarlanmıştır.

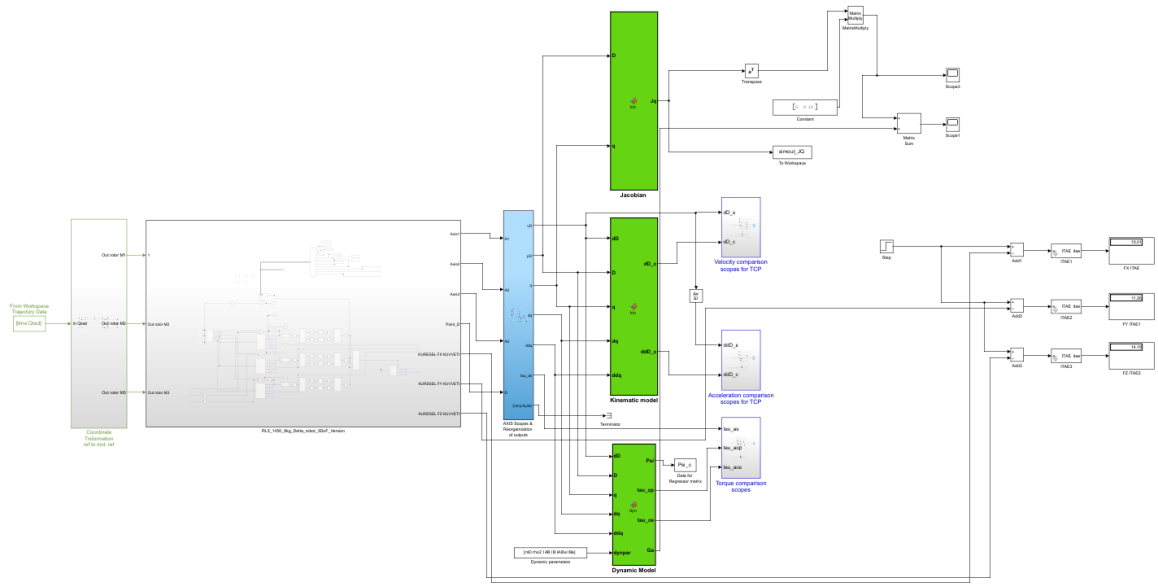
SimMechanics editörü, MATLAB üzerinden fiziksel sistemlerin mekanik, elektriksel ve diğer elemanlarını ilgili kütüphanelerden seçerek, bu elemanları kullanarak sistemleri bilgisayar ortamında modellenenir ve matematiksel hareket denklemleri formunda simüle etmemize olanak tanır. SimMechanics, çoklu gövdeli sistemlerin, bağlantı elemanlarının, kısıtların ve sensörlerin modellenmesi için gerekli blokları sunar, böylece fiziksel sistemlerin dinamiklerini detaylı bir şekilde inceleyebilir ve kontrol işlemlerini gerçekleştirebiliriz.

Ayrıca, SimMechanics kullanıcılarına bilgisayar destekli tasarım (CAD) programlarında yapılan mekanik sistem tasarımlarını “.xml” formatında ve arayüz eklentileri aracılığıyla Matlab/Simulink ortamına aktarma imkanı sunar. Bu özellik, kullanıcıların mevcut CAD modellerini doğrudan SimMechanics'e aktarmalarını sağlar ve böylece sıfırdan sistem tasarlamak için gereken zaman ve çaba büyük ölçüde azaltılır. Bu işlevsellik, özellikle karmaşık mekanik sistemlerin hızlı ve verimli bir şekilde simülasyonunu yapmak isteyen mühendisler için büyük bir avantaj sağlar. Şekil 3.11'deki görsel Matlab Simscape'de kullanılan kinematik elemanlara ile sistemin modellenebileceğini göstermektedir.

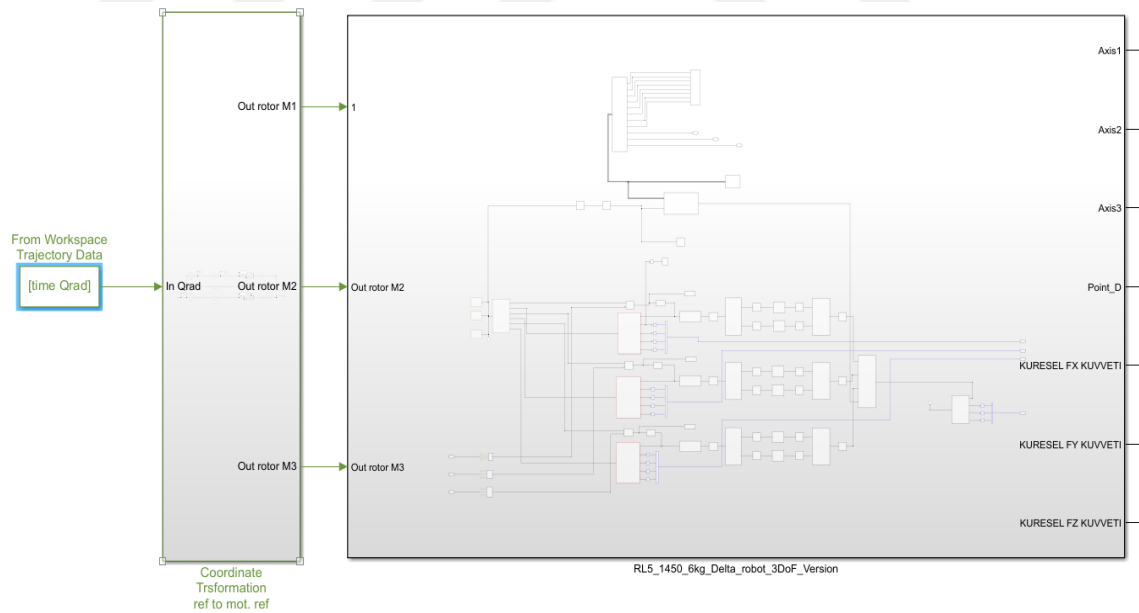


Şekil 3.11. Matlab Simscape Multibody Sistem Oluşturma

[15] referansında yer alan Delta robot SimMechanics simülâtörünün görseli Şekil 3.12'de sunulmaktadır. Şekil 3.13, Simülâtörün yörünge planlama hesaplamaları için kullanıcıdan harici veri girişi gerektirdiğini göstermektedir. Kartezyen uzayda geçilmek istenilen (x_d, y_d, z_d) noktalar kullanıcı tarafından vektör formatında belirlenir. Ardından, delta robotun ters kinematik denklemleri kullanılarak bu noktalar eklem uzayına $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ dönüştürülür. Yörünge, kübik yörünge planlama algoritması, lineer parabolik segment (LSPB) Trapezoid formu ve minimum jerk algoritmaları kullanılarak tanımlanır. Belirlenen yörüngeler, Matlab arayüzünden Simulink'e giriş verisi olarak sağlanır ve tanımlanan süre (t) boyunca simülâtör çalışır. Bu planlama sürecinde, istenilen konum değerlerinin yanı sıra eklem hızları ve ivmeleri, kübik ve trapez yörüngelerde belirlenebilir. İvme değerinin zamana göre türevi olan jerk değerleri, minimum jerk planlama algoritmasında kullanılır.

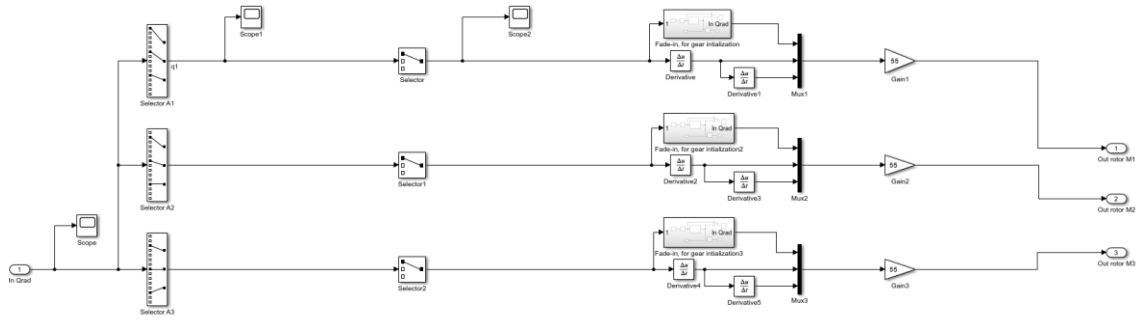


Şekil 3.12. Matlab Genel Simülasyon Görşeli[15]

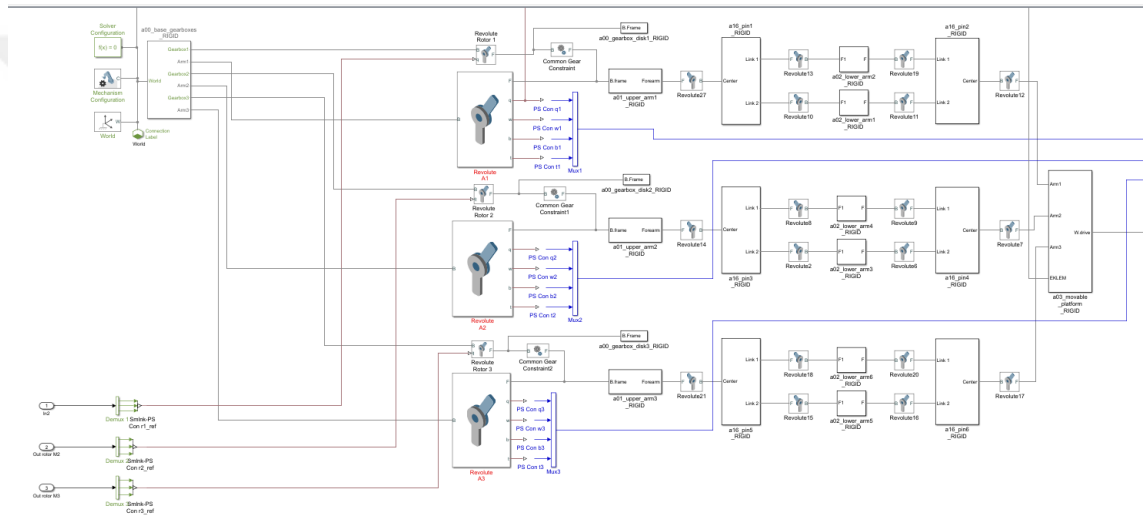


Şekil 3.13. Yörünge ve Robot Simülasyon Bloğu

Üç farklı yörünge planlama algoritmasının farklılıkları, tahrik motorlarının sağladığı hareket torkları için oluşturduğu sinyal profillerinde ortaya çıkar. Şekil 3.14’de yörünge veri giriş blokları gösterilmektedir.

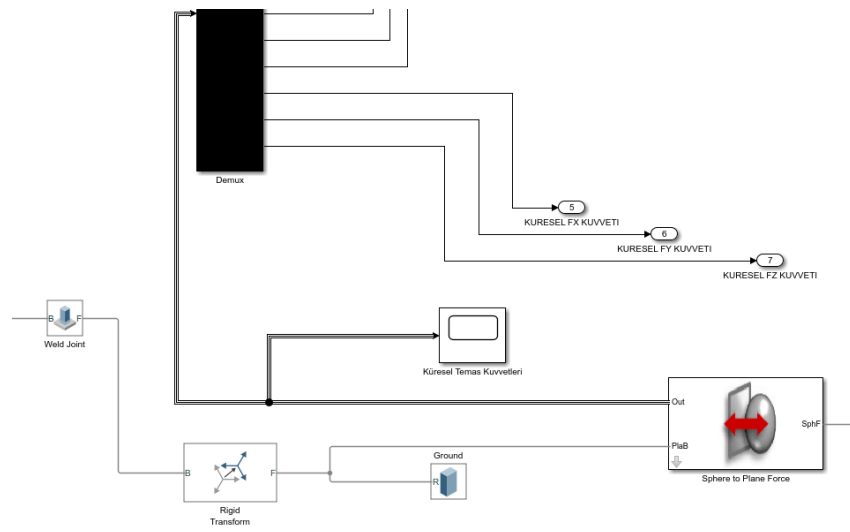


Şekil 3.14. Yörünge Veri Giriş Bloğu



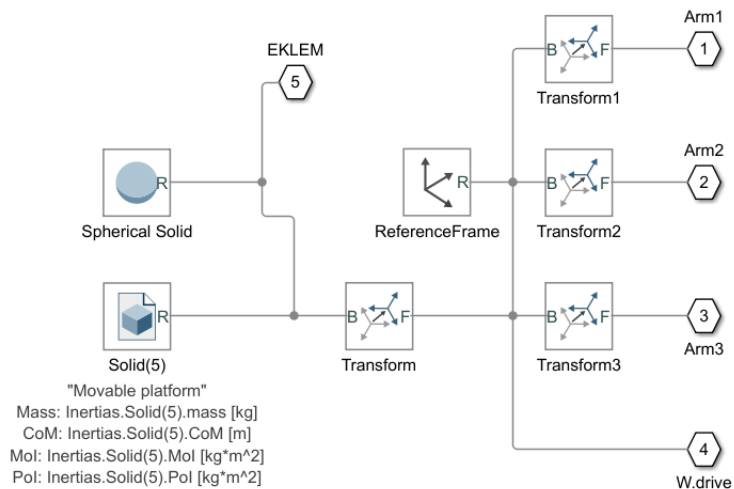
Şekil 3.15. Robot Simülâtörünün Multibody Modeli

Şekil 3.15'de, Delta robotun SolidWorks tasarım programından alınan CAD dosyasının SimMechanics arayüzüne girildiğinde oluşan multibody modeli gösterilmektedir. Burada, 1, 2 ve 3 numaralı sinyal girişleri aracılığıyla simülâtöre, yörünge planlamasından elde edilen konum, hız, ivme ve jerk değerleri ile simülasyonun çözüm süresi ve hassasiyet değerleri girilmektedir. Girdiler sonrasında, hareket, robotun döner eklemleri (Revolute Joint) üzerinden sağlanmaktadır. Robot dinamiği için gerekli olan aktüatör tork hesaplamaları, SimMechanics programı tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.16. Temas Kuvvetleri Ölçüm Sensörü

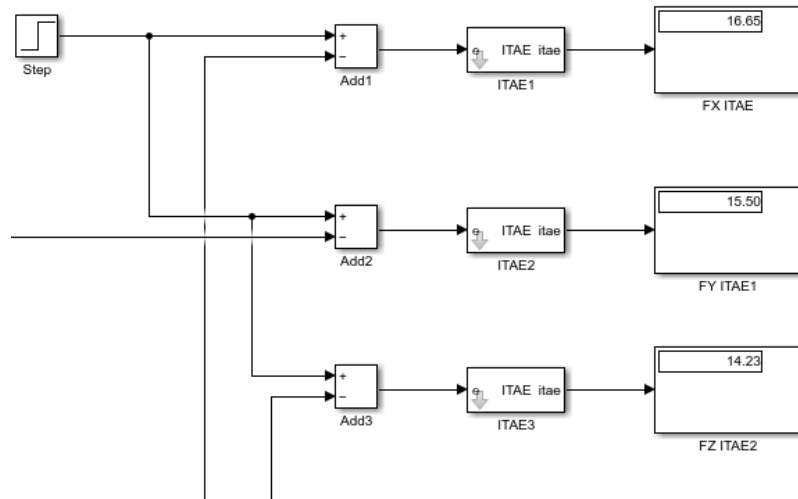
Bu modelde, delta robotun malzeme ile temas durumunda oluşan kuvvetleri ölçebilmesi için tutucu kısmına küresel bir eleman eklenmiştir. Şekil 3.16'da gösterilen görselde, delta robotun tutucu ucuna eklenen bu küresel eleman, planlanan yörünge üzerinde robotun altına konumlandırılan iş parçasına teması senaryolaştırmak amacıyla yerleştirilmiştir. Şekil 3.16'da gösterilen görselde, düzlemsel iş parçası ile temas halinde, "Sphere to Plane Force" bloğu aracılığıyla temas kuvvetlerinin ölçümü yapılmaktadır. Burada değerlendirilecek olan önemli veri, "Küresel Fz Kuvveti"dir. Şekil 3.17'de Delta robotun ucunda bulunan silindirik parçaya temas küresinin nasıl bağlandığı gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Delta Robotun Ucuna Temas Küresinin Bağlantısı

Tutucu uca eklenen temas sensörü bloğundan elde edilen “Küresel Fz Kuvveti” verisi, kullanıcı tarafından belirlenen referans giriş değeriyle karşılaştırılarak bir performans kriteri belirlenir. Bu performans kriteri, tezde incelenen yörünge planlama algoritmalarının etkinliklerini değerlendirmek için kullanılır. Performans değerlendirme için, özellikle entegre zaman ağırlıklı mutlak hata (ITAE - Integral of Time-weighted Absolute Error) tekniği kullanılmaktadır. ITAE hatası, hata büyüklüğü ile zamanın çarpımının integrali alınarak hesaplanır ve bu yöntem, sistem tepkisinin zaman içindeki performansını daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirmeyi sağlar. ITAE, özellikle uzun süreli sistem performansını optimize etmek amacıyla kullanılır çünkü bu teknik, hata değerlerinin zamanla azalmasını teşvik eder ve böylece sistem tepkisinin hızlı ve etkili bir şekilde istenilen seviyeye ulaşmasını hedefler.

Şekil 3.18'de, bu performans değerlendirme tekniğinin uygulandığı hesaplama blokları gösterilmektedir. Bu bloklar, delta robotun yörünge planlama algoritmaları tarafından üretilen hareket profillerinin gerçek zamanlı olarak ne kadar etkili olduğunu değerlendirmek için tasarlanmıştır. ITAE hatası ile ölçülen performans, delta robotun etkileşimde bulunduğu malzemelerle olan hassas işlemlerinde kritik öneme sahiptir,



Şekil 3.18. ITAE Performans Bloğu

Bu bölümde, delta robotların kinematik ve dinamik özellikleri, kompozit malzeme üretimindeki uygulamaları açısından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Delta robotlar, yüksek hız ve hassasiyet özellikleriyle öne çıkan paralel robotlar kategorisine girerler. Özellikle otomatik elyaf yerleştirme (AFP) gibi kompozit malzeme üretim süreçlerinde kullanıldıklarında önemli katkılar sağlayabilirler. Bu tez, delta robotların gelişmiş

yörünge planlama teknikleri ve kuvvet kontrol stratejileri aracılığıyla kompozit malzeme üretimindeki otomasyon süreçlerinde nasıl daha etkin kullanılabileceğini ele almaktadır.

Kinematik yapılarına bakıldığında, delta robotlar üç paralel kolun birleştiği ve bir merkezi hareket platformunu kontrol ettiği özgün bir tasarıma sahiptir. Bu yapı, robotların yüksek hızda ve hassasiyetle hareket etmelerini sağlar. Ancak, endüstriyel uygulamalarda bu robotların kontrolü çoğunlukla ters kinematik analizlerle gerçekleştirilir, bu da robot dinamiklerinin sıklıkla ihmal edilmesine yol açar. Bu ihmal, robotların performansını ve işlenen malzemenin kalitesini olumsuz etkilemektedir.

Ayrıca, bu bölümde delta robotlarının dinamik analizlerinin önemi üzerinde durulmuş ve karmaşık yapıların yönetilmesi için kullanılabilecek simülasyon araçlarına değinilmiştir. MATLAB/Simmechanics simülasyon platformunun, robot-parça etkileşimlerinin simüle edilmesi ve bu etkileşimlerin robotun kinematik ve dinamik yapıları göz önünde bulundurularak incelenmesi için nasıl kullanılabileceği açıklanmaya çalışılmıştır. Bu simülasyonlar, delta robotlarda dinamik etkilerin daha iyi anlaşılmasına ve yörünge planlama algoritmalarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

4. BÖLÜM

YÖRÜNGE PLANLAMA

Kompozit malzemelerin üretimi, yüksek mukavemet ve hafiflik özellikleri sayesinde endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez bir yere sahiptir. Özellikle otomatik elyaf yerleştirme (AFP) gibi gelişmiş üretim tekniklerinin kullanılması, üretim süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu süreçlerde, delta robotların kullanımı, kuvvet ve hassasiyet gerektiren uygulamalar için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu tezde, delta robotların kompozit imalat süreçlerinde nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceği ve yörünge planlamasının kuvvet üzerindeki etkileri ele alınmaktadır.

Bu bölümde, robotik sistemlerde kritik bir öneme sahip olan yörünge planlaması konusuna odaklanılmaktadır. Önceki bölümlerde robotların kinematik ve dinamik kontrol mekanizmaları üzerinde durulmuş, bu bölümde ise yörünge planlamanın robot performansı üzerindeki etkileri ve teknik zorlukları detaylandırılacaktır. Yörünge planlaması, robotun zamana bağlı olarak istenilen konum, hız, ivme ve jerk kısıtları dahilinde hareket etmesini sağlayan kritik bir süreçtir.

Robotik sistemlerde, yol(path) ve yörünge(trajectory) kavramları arasındaki farka değinilmektedir. Yol, robotun eklem veya çalışma uzayında uğraması gereken sıralı noktaların tanımlandığı bir dizidir ve hareketin temel yapı taşı oluşturur. Yörünge ise, bu noktaların zaman içindeki hız ve ivme değerleri ile zenginleştirilmiş, daha detaylı bir tanımını içerir. Bu sayede robot, başlangıçtan bitişe kadar olan hareketini, pozisyon ve oryantasyon değişimlerini sürekli bir biçimde gerçekleştirebilir. İdeal yörünge planlaması, robotun ani hareketlerden kaçınarak, işlem sırasında oluşabilecek titreşimleri minimize eder ve bu da kompozit imalat gibi hassas uygulamalarda ürün kalitesini artırır.

Yörünge planlamasında, robotun başlangıç konumundan hareketle hem pozisyon hem de oryantasyon değişiklikleri göz önünde bulundurularak hedeflenen konuma doğrusal veya

eğrisel yollarla ulaşması sağlanır. İstenen konuma erişim sürecinde, pozisyon ve oryantasyon değerlerinin hesaplanması ileri kinematik yöntemleri ile gerçekleştirilir. Robot yörüngeleri genellikle yumuşak hareketlerle tasarlanır çünkü ani hareketler, yani jerk (sıçrama), matematiksel olarak ivmenin zaman türevi olarak tanımlanır ve bu tür hareketler robot eklemlerinde titreşimlere neden olabilir. Bu titreşimler, kompozit malzeme imalatı gibi sabit ve düzenli kuvvet dağılımı gerektiren hassas uygulamalarda kaliteyi olumsuz etkileyebilir.

Yörünge planlaması sırasında, başlangıç ve bitiş noktalarının yanı sıra ara yardımcı noktalar da (via points) belirlenebilir. Bu ara noktalar, robotun yumuşak ve dengeli bir hareket profili izlemesini sağlamak için konumlandırılır. Ara noktalar, başlangıç ve bitiş noktaları arasında kesintisiz ve yumuşak bir geçiş olanağı sunan matematiksel kısıtlar olarak işlev görür. Böylece robot, noktalar arası geçişlerinde süreklilik sağlayarak daha stabil ve düzenli hareketler sergileyebilir.

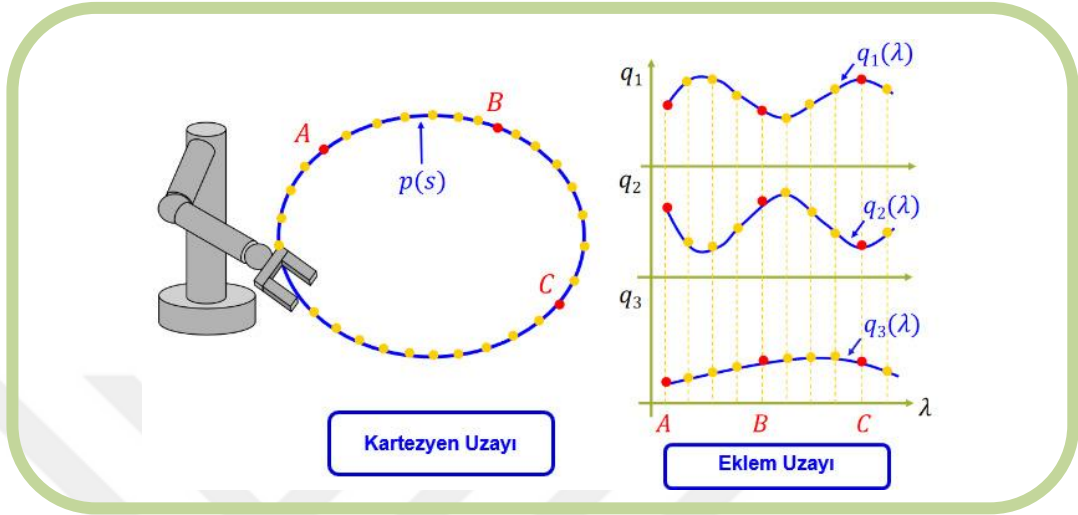
Bu bölümde, yörünge planlama tekniklerinin sınıflandırılması, avantajları ve delta robotların kompozit imalatında kullanımına özgü yörünge planlama stratejileri üzerinde durulacaktır. Robot programcılar tarafından belirlenen yörünge noktaları, delta robotun ters kinematik denklemleri aracılığıyla görev uzayında tanımlanmakta ve eklem uzayına dönüştürülerek gerekli algoritmik hesaplamaların yapılmasına olanak tanınmaktadır.

4.1. Yörünge Planlama Teknikleri ve Sınıflandırılması

Endüstriyel ve işbirlikçi robotlarda, uygulama alanlarına özgü çeşitli yörünge planlama teknikleri bulunmaktadır ve her teknik, belirli avantajlara sahiptir. Robot çalışma alanının tanımı yapılırken, genellikle eklem uzayı ve Kartezyen uzayı olmak üzere iki farklı alan kullanılır. Eklem uzayındaki yörünge planlaması, robotun eklem açıları cinsinden tanımlanır ve bu yöntem, iki nokta arasındaki geçişi öngörmeyi zorlaştırır. Bu yöntem hesaplama açısından daha basittir ve tekil konumlara erişim imkânı tanır.

Görev uzayındaki yörünge planlaması ise, doğrudan yol üzerindeki kısıtları—engeller ve yol geometrisi gibi—dikkate alarak, eklem uzayındaki doğrusal olmayan kinematik zorlukları aşmamıza olanak tanır. Kartezyen uzayda yapılan planlamalarda, iki nokta arasındaki hareket önceden bilinir ve kontrol edilebilir; yörüngeyi görselleştirmek kolaydır fakat tekil konumlarının oluşma ihtimalini kontrol etmek daha zordur. Şekil

4.1'te Kartezyen ve eklem uzayındaki yörünge planlamalarının farklılıkları görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 4.1. Kartezyen ve Eklem Uzay Yörünge Planlama

Yörünge planlama teknikleri genel olarak aşağıda verilen adımlarda sınıflandırılmaktadır.

- Uzay Tanımına Göre: Kartezyen ve Eklem Uzay
- Görev Tipine Göre: Noktadan Noktaya(PTP), Çoklu Noktalar, Sürekli, Birleştirilmiş
- Yol Geometrisine Göre: Doğrusal, Polinom ve Üstel
- Zamanlama Kuralına Göre: Trapezoid ve Polinom
- Eşzamanlı veya Bağımsız Eklem Hareketi: Bütün eklem hareketleri aynı anda başlangıç ve bitiş sürelerinde, ($t = 0$ ve $t = T$ tek zamanlı kural) veya robot eklemleri uygulama ve robot kabiliyetine bağlı olarak birbirinden bağımsız hareket etmesi.

Yörünge planlaması sürecinde, Kartezyen ve eklem uzayı arasındaki farklar dikkate alındığında, her iki uzayın benzersiz avantajları ortaya çıkar. Kartezyen uzayda yapılan planlama, yörüngeyi doğrudan görselleştirilmesini kolaylaştırır ve bu, özellikle engellerden kaçınma gerekliliği olan durumlar için büyük bir avantaj sağlar. Kartezyen uzayda planlanan hareketler, robotun geçiş yolunu ve etkileşimde bulunacağı çevresel unsurları daha net bir şekilde öngörmeye yardımcı olur.

Öte yandan, eklem uzayında yapılan yörünge planlaması, robotun eklem açıları üzerinden gerçekleştirildiği için, eşzamanlı ters kinematik çözümler gerektirmez. Bu durum, kontrol sistemi üzerindeki hesaplama yükünü azaltır, böylece daha basit ve hızlı bir kontrol mekanizması sunar. Eklem uzayındaki bu yöntem, özellikle robotun mekanik sınırlamalarına uygun hareketler tasarlamak için uygundur, çünkü her eklem için en uygun açısal pozisyonlar doğrudan hesaplanabilir.

Bu iki yaklaşım arasındaki farkların anlaşılması, yörünge planlama sürecinin her bir uygulama için en uygun sonuçları vermesini sağlar, böylece robotun performansı maksimize edilirken operasyonel verimlilik artırılabilir. Bu çalışmada kullanılan üç farklı yörünge planlama algoritmasının detayları ilgili bölümlerde sunulmuştur. İlk olarak, kübik fonksiyonlu yörünge planlaması ele alınmış, ardından lineer parabolik segmentli (LSPB) trapezoid yörünge planlaması ve en son olarak minimum jerk planlama algoritması kullanılmıştır. Bu tekniklerin etkinlikleri, MATLAB Simmechanics simülatörüne eklenen temas sensörü aracılığıyla, Z ekseninde elde edilen doğrusal temas kuvvetleri performans indeksine göre değerlendirilmiştir.

4.2. Eklem-Uzayında Kübik Fonksiyonlar ile Yörünge Planlama

Eklem uzayında yörünge planlama çalışması gerçekleştirilirken, genellikle üçüncü veya daha yüksek dereceli polinomlar kullanılır [23]. Robotun tutucu ucunun başlangıç noktasından bitiş noktasına ulaşması gerektiğinde, bu hedef noktaların konum ve yönelimleri ters kinematik fonksiyonlar ile hesaplanır. Başlangıç ve bitiş konumları, kullanıcı tarafından belirlenen $\theta(0) = \theta_0$ ve $\theta(t_f) = \theta_f$ değerleridir. Bu iki noktayı birbirine bağlayan üçüncü dereceden bir polinom oluşturabilmek için başlangıç ve bitiş anındaki hız değerlerinin sıfır olduğu $\dot{\theta}(0) = 0$ ve $\dot{\theta}(t_f) = 0$ gibi iki ek kısıt parametresine ihtiyaç vardır.

Bu dört koşulu karşılayan kübik polinom, 76 ve 77 numaralı denklemlerle ifade edilir:

$$\theta(0) = \theta_0, \theta(t_f) = \theta_f \quad (76)$$

$$\dot{\theta}(0) = 0, \dot{\theta}(t_f) = 0 \quad (77)$$

Bu koşullar altında eklem konumlarını tanımlayan kübik polinom yörünge denklemi, 78 numaralı denklem ile şöyle verilir:

$$\theta(t) = s_0 + s_1 t + s_2 t^2 + s_3 t^3 \quad (78)$$

Bu denklemin zamana göre birinci dereceden türevi, eklem hız planlamasını sağlayan polinomu verir:

$$\dot{\theta}(t) = s_1 + 2s_2 t + 3s_3 t^2 \quad (79)$$

İkinci dereceden türevi ise, eklem ivmelerini hesaplayan polinomu verir:

$$\ddot{\theta}(t) = 2s_2 + 6s_3 t \quad (80)$$

Parametreler s_0, s_1, s_2, s_3 78 numaralı denkleme uygulanan matematiksel düzenlemelerle elde edilir ve şu şekilde ifade edilir:

$$\theta(t) = s_0 + s_1 t + s_2 t^2 + s_3 t^3 \quad (81)$$

$$s_0 = \theta_0, \quad s_1 = 0 \quad (82)$$

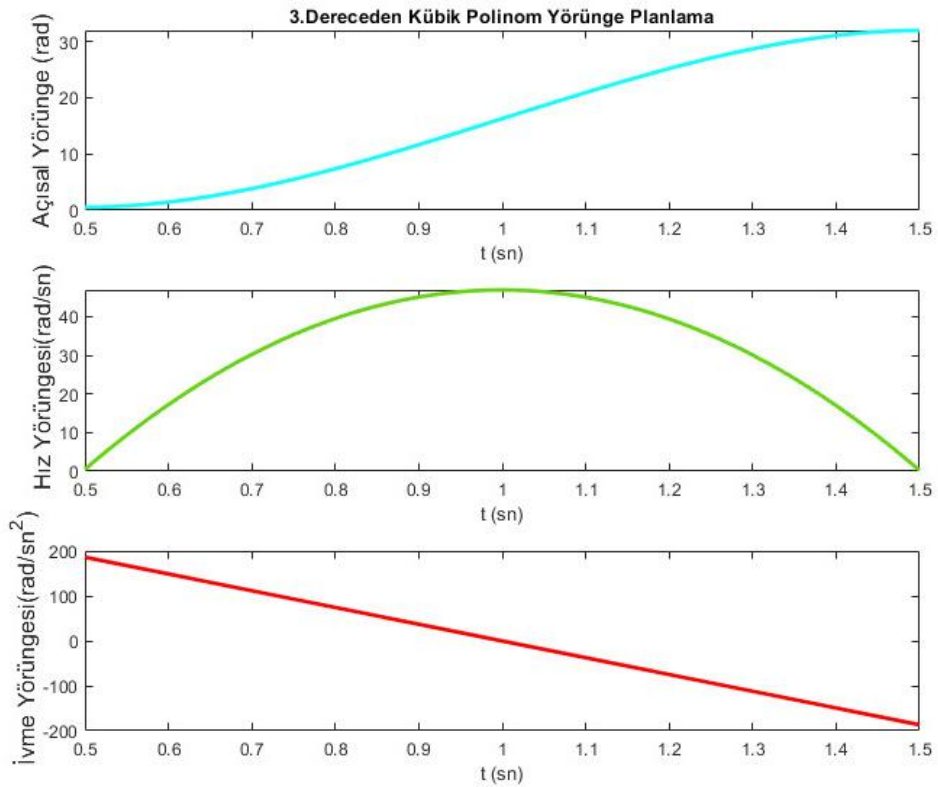
$$s_2 = \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0) \quad (83)$$

$$s_3 = -\frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0) \quad (84)$$

Tek serbestlik dereceli bir robot manipülatör için yörünge planlamasını ele alalım. Başlangıç koşulları 0.5 saniye ve bitiş anı 1.5 saniye olarak belirlensin. Robotun $\pi/6$ konumundan başlayıp $61\pi/6$ konumuna π derecelik bir dönüş yapması hedeflensin. Bu parametreler uygulandığında, elde edilen yörünge üzerinde konum, hız ve ivme profilleri Şekil 4.2'de görsel olarak sunulmaktadır.

$$t_0 = 0.5 \quad t_f = 1.5 \quad (85)$$

$$q(t_0) = \frac{\pi}{6}, \quad q(t_f) = \frac{61\pi}{6} \quad (86)$$

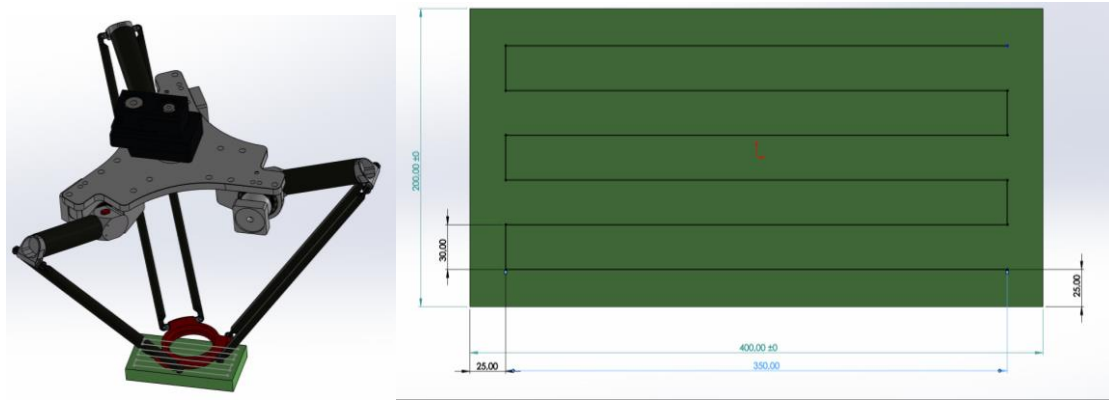


Şekil 4.2. Kübik Polinom Yörünge Planlama

4.2.1. Delta Robot için Kübik Yörünge Planlama

Yukarıdaki denklemlere uygun olarak, üç serbestlik dereceli (3-DOF) bir delta robot manipülatör için düz plaka üzerinde çok noktalı yörünge planlaması gerçekleştirilebilir. Başlangıç koşulları olarak, başlangıç anı 0. saniye ve bitiş anı 2. saniye olarak belirlenmiştir. Bu süre zarfında robotun hareket etmesi gereken noktalar, Kartezyen görev uzayında önceden belirlenmelidir. Delta robot, 3-DOF Kartezyen hareket serbestliğine sahip olduğundan, dönme oryantasyonu hesaplamaları yapılmamaktadır.

İşleme ait robotik sisteme yönelik iş parçası ve robotun görseli Şekil 4.3'te sunulmuştur. İş parçası, kompozit imalatında kullanılmak üzere, temel seviyede dikdörtgensel tarama profili olarak tasarlanmıştır. Her doğrunun bitiş noktası, ara nokta olarak tanımlanmış ve delta robotun ters kinematik denklemleri ile eklem açılarına dönüştürülmüştür. Tablo 4.1, bu noktaları Kartezyen uzay ve eklem açıları cinsinden tablolaştırmaktadır. Bu sayede, vektörel olarak ters kinematik denklem girişleri düzenlenmiştir.

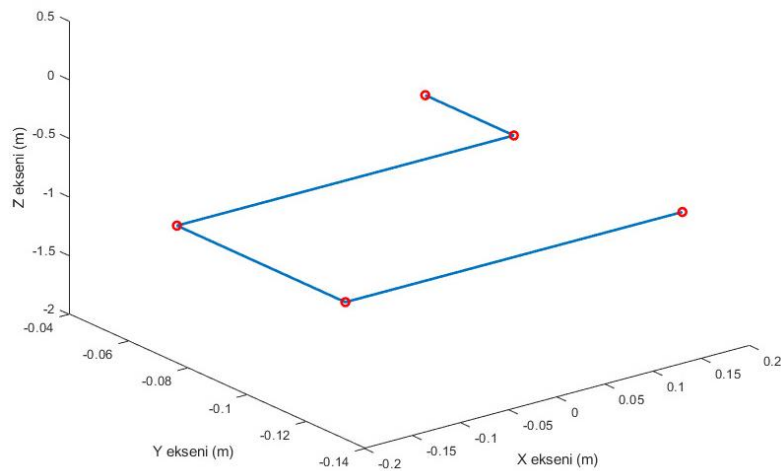


Şekil 4.3. Delta Robot CAD Görşeli ve İş Parçası Yörünge Tasarımı

Tablo 4.1. Kartezyen Yörünge Noktaları

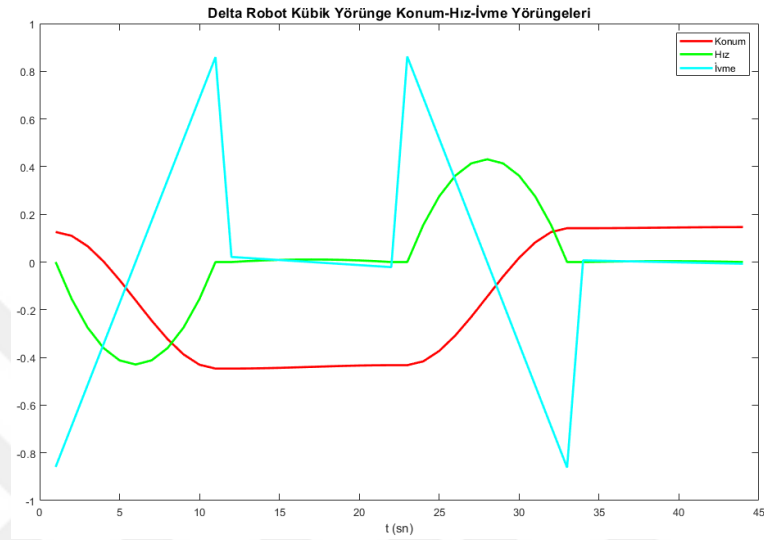
	Px (mm)	Py(mm)	Pz(mm)	θ_1	θ_2	θ_3
1-	160	-103	-887	0.1261	-0.4387	-0.0883
2-	-189	-103	-887	-0.4467	-0.1842	0.1919
3-	-189	-73	-887	-0.4325	-0.0884	0.1243
4-	160	-73	-887	0.1419	-0.3520	-0.1539
5-	160	-43	-887	0.1466	-0.3083	-0.1912

Şekil 4.4’de, robotun kartezyen uzaydaki çalışma profili çizdirilerek görselleştirilmiştir. Kırmızı noktalar, ara nokta olarak belirlenen ve kinematik denklemlere giriş yapılan bölümlerdir. Hareketin sabit bir Z yüksekliğinde gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

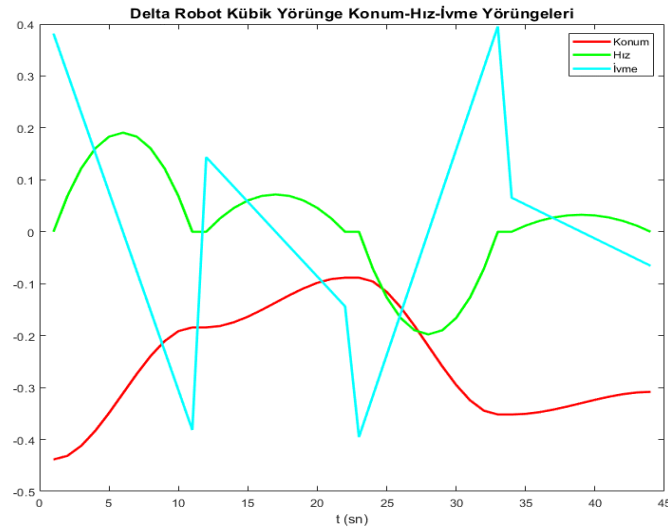


Şekil 4.4. Delta Robot Kübik Yörünge Planlama

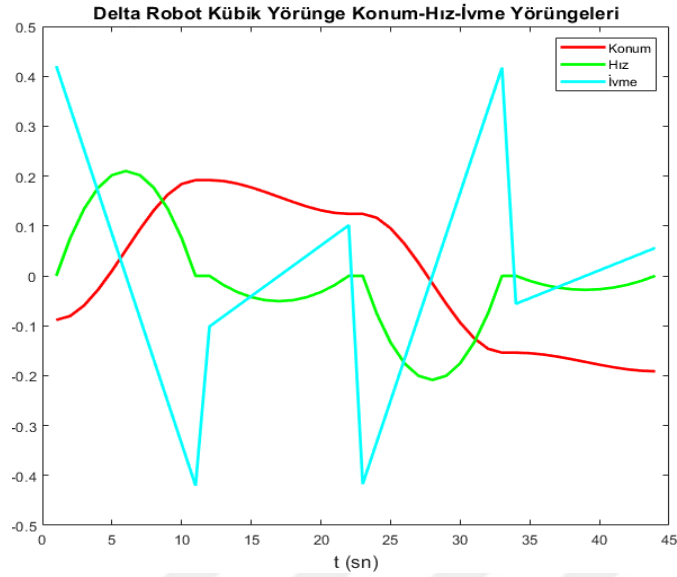
Şekil 4.5’de, kübik polinomlar ile tasarlanan yörüngeye ait θ_1 eklemi için konum, hız ve ivme profilleri sunulmuştur. Turkuaz renkli sinyal, eklem ivmelerine denk gelmekte ve sıçramalı bir hareket profiline sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.6 ve 4.7’de diğer iki eklem için yörünge grafikleri sunulmuştur.



Şekil 4.5. Kübik Yörünge θ_1 Konum Konum-Hız-İvme Yörüngeleri



Şekil 4.6. Kübik Yörünge θ_2 Konum Konum-Hız-İvme Yörüngeleri



Şekil 4.7. Kübik Yörünge θ_3 Konum Konum-Hız-İvme Yörüngeleri

4.3. Lineer Segmentler ile Parabolik Blend Yörünge Planlama

Parabolik bağlantılar ve doğrusal segmentler ile yörünge oluşturma tekniği, robotik sistemlerde düzgün yörüngeler elde etmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [24]. Bu teknik, yol noktaları arasında yumuşak geçişler sağlarken aynı zamanda hız ve ivme kısıtlamalarını da karşılar. Hareket üç farklı fazda incelenir: hızlanma, sabit hız ve yavaşlama. Bu fazlar, hareketin trapezoidal bir hız profili çizmesine neden olur.

Anahtar kavramlar; doğrusal segmentler ve parabolik bağlantılardır. Lineer Segmentli Parabolik Blend (LSPB) yönteminde, iki yol noktası arasındaki yörünge doğrusal segmentlere bölünür. Bu doğrusal bölümler, yol noktaları arasında etkili bir interpolasyon sağlar. Parabolik bağlantılar, doğrusal bölümler arasındaki geçişleri yumuşatmak için kullanılır ve hız ile ivmedeki ani değişimler en aza indirgenir.

Bu yörünge planlama tekniği özellikle, yolun bir kısmında sabit hız gerektiğinde idealdir. LSPB yörüngesinde, hız başlangıçta yükselir ve hedef pozisyona yaklaştıkça düşer. İstenen yörünge, üç bölüme ayrılarak planlanır. t_0 'dan t_b 'ye kadar olan süre içinde yörünge ikinci dereceden bir polinomdur ve bu, doğrusal bir rampa hızına yol açar. t_b 'de yörünge doğrusal bir fonksiyona geçer ve bu, sabit hıza karşılık gelir. $t_f - t_b$ 'den t_f 'ye kadar olan süre içinde yörünge yeniden değişir ve bu sefer hız, doğrusal olacak şekilde ikinci dereceden bir polinoma dönüşür.

Bu Yörünge planlama tekniğinde başlangıç değerleri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir..

$$t_0, \quad t_f, \quad q(t_0) = \theta_0, \quad q(t_f) = \theta_f, \quad \dot{q}_{maks} = V \quad (87)$$

İstenen yörünge, $q(t)$ yörünge fonksiyonu ile ifade edilir. Kalkış zaman eşitliği $0 \leq t \leq t_b$ aralığında aşağıdaki yörünge denklemi ile verilir:

$$q(t) = q_0 + \frac{V}{2t_b} t^2 \quad 0 \leq t \leq t_b \quad (88)$$

Sabit hız profilinde $t_b \leq t \leq t_f - t_b$ arasındaki hareket, aşağıdaki yörünge fonksiyonu ile modellemiş:

$$q(t) = \frac{q_f + q_0 - Vt_f}{2} + Vt \quad (89)$$

Yavaşlama fazında, $t_f - t_b < t \leq t_f$ arasındaki yörünge aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$q(t) = q_f - \frac{V}{2t_b} t_f^2 + \frac{Vt_f}{t_b} t - \frac{V}{2t_b} t^2 \quad t_f - t_b < t \leq t_f \quad (90)$$

Geçiş zamanlarını hesaplamak için gerekli matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir:

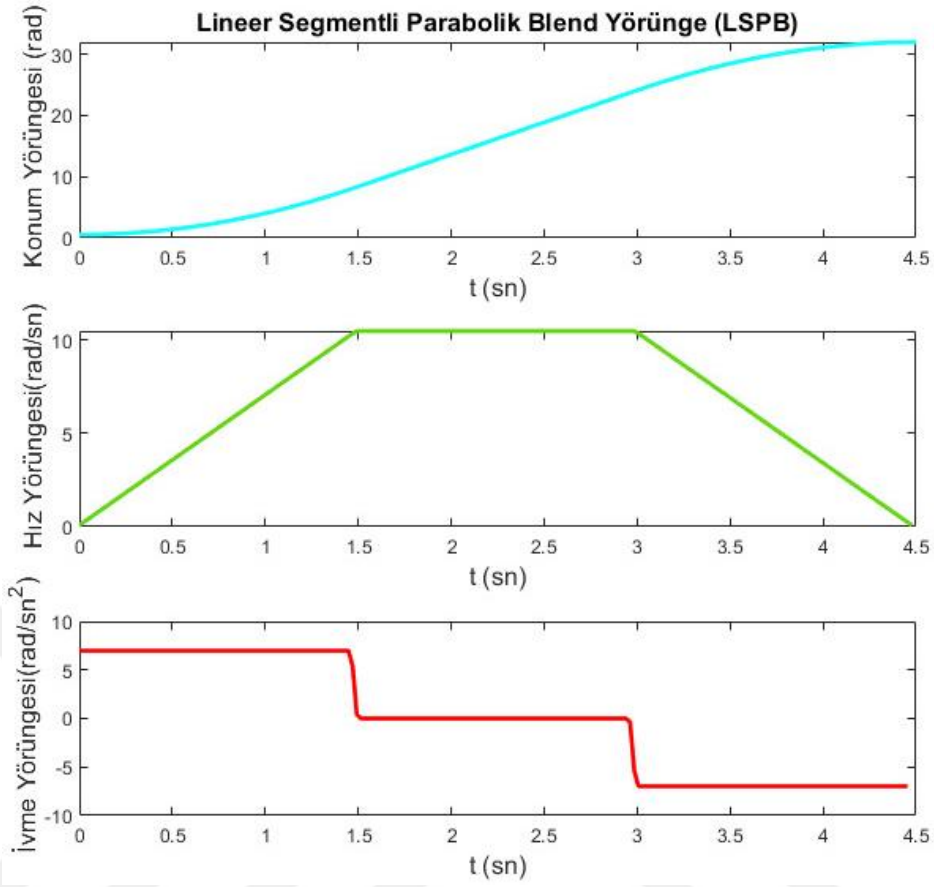
$$t_b = \frac{q_0 - q_f + Vt_f}{V} \quad (91)$$

En uygun eklem hız değerini seçmek için aşağıdaki eşitliği kullanmak önerilir:

$$\frac{q_f - q_0}{t_f} < V \leq \frac{2(q_f - q_0)}{t_f} \quad (92)$$

Örnek bir yörünge grafiği, Şekil 31'de sunulmuştur.

$$t_0 = 0, \quad t_f = 4.5 \text{ sn} \quad \dot{q}_{maks} = 10 \frac{\text{rad}}{\text{sn}} \text{ ve } q(t_0) = \frac{\pi}{6}, \quad q(t_f) = \frac{61\pi}{6} \quad (93)$$



Şekil 4.8. Lineer Segmentli Parabolik Blend Yörünge (LSPB)

Şekil 4.8, tek serbestlik dereceli bir robot manipülatör için verilen değerlerle, hızlanma, sabit hız ve yavaşlama fazları ile birlikte, hem pozitif hem de negatif ivmelenme fazlarını gösteren bir grafikdir. Bu planlama, robotun başlangıç ve duruş anlarında yumuşak hareketler sergilemesini sağlayarak eklemlerdeki aşırı yüklenmeyi önler. Ancak, zamana bağlı sabit ivmelenme değerlerinin türevi sıfır olmadığından, sıçrama (jerk) hareket profiline yol açar. Bu, polisaj, zımparalama gibi sabit kuvvet baskısı gerektiren görevler için dezavantaj olabilir ve end-efektörde kuvvet uniformluğunu bozabilir.

4.4. Minimum Jerk Yörünge Planlama

‘Jerk’ terimi, ivmenin zamana göre türevi olarak tanımlanır ve bu, hızla değişen aktüatör kuvvetleriyle ilişkilendirilir. Aşırı jerk, aktüatörlerin erken aşınmasına neden olur, robot yapısında rezonans titreşimleri oluşturur ve kontrolörün doğru takibi zorlaştırır. Jerk'i en aza indiren yörüngeler, bu nedenle yol izleme problemlerinde çeşitli avantajlar sağlar.

Minimum jerk yörüngesi, Euler-Lagrange denklemleri kullanılarak aşağıda verilen fonksiyonu minimize ederek elde edilir:

$$x^*(t) = \operatorname{argmin}_{x(t)} \int_0^T L(\ddot{x}, \dot{x}, x, t) dt = \operatorname{argmin}_{x(t)} \int_0^T \ddot{x}^2 dt \quad (94)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial L}{\partial \ddot{x}} \right) - \frac{d^3}{dt^3} \left(\frac{\partial L}{\partial \ddot{x}} \right) = 0 \quad (95)$$

95 numaralı denklemin çözülmesi için başlangıç ve bitiş konum kısıtları, hız ve ivme kısıtları dahil olmak üzere toplam altı adet şart gereklidir:

$$x^{(6)} = 0 \quad (96)$$

Bu denklemler sonucunda elde edilen beşinci dereceden polinom, altı bilinmeyen katsayı içerir. Buradaki hedef, genelleştirilmiş denklemde $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ katsayılarını belirlemektir. Bu katsayılar için Tablo 4.2'de verilen altı adet sınır şartı belirlenmelidir:

$$x(t) = c_5 t^5 + c_4 t^4 + c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0 \quad (97)$$

Tablo 4.2. Minimum Jerk Algoritması Kısıt Şartları

Zaman	Konum	Hız	İvme
$t = 0$	a	0	0
$t = T$	b	0	0

Hareket başlangıç anına ait pozisyon kısıtı olan a değeri $t = 0$ yerine koyulduğunda $x(t)$ denklemi aşağıdaki 99 denklemi aşağıdaki gibi sonuç verir ve başlangıç anındaki katsayı değeri elde edilir:

$$x(t) = c_5 t^5 + c_4 t^4 + c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0 \quad (98)$$

$$x(0) = c_0 = a \quad (99)$$

Hareket sonuna ait $t = T$ değeri yerine koyulduğunda aşağıdaki denklemler ile sonuçlar elde edilir:

$$x(T) = c_5(T)^5 + c_4(T)^4 + c_3(T)^3 + c_2(T)^2 + c_1(T) + c_0 \quad (100)$$

$$x(T) = b \quad (101)$$

Yörünge planlamasının final zamanı olan T değeri bilinmektedir ve bu değer, 98 numaralı denklemde kullanıldığında, lineer katsayılı bir denklem elde edilir çünkü c katsayılarının üstel değerleri yoktur. Genel olarak, 98 numaralı denklem, başlangıç ve bitiş anlarına ait pozisyon kısıtları ile birlikte matris formunda denklem 102 ve 103 olarak yeniden düzenlenebilir. 1×6 ve 6×1 boyutlarındaki matrislerin çarpımı sonucu elde edilen 1×1 matris, $c_0 = a$ değerini verir.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_5 \\ c_4 \\ c_3 \\ c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = a \quad (102)$$

T hareketin bitiş anını belirttiği için bilinen bir değerdir ve denklem, matris formunda 103 numaralı şekilde yeniden yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} T^5 & T^4 & T^3 & T^2 & T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_5 \\ c_4 \\ c_3 \\ c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = b \quad (103)$$

Başlangıç anına ait 0 değeri ile denklem 104 yerine koyulduğunda, c_1 katsayısı elde edilir. T , hız kısıt değerleri ile birlikte matris formunda yazıldığında, denklemler 106, 107 ve 108 işlemleri takip edilir:

$$\dot{x}(t) = 5c_5t^4 + 4c_4t^3 + 3c_3t^2 + 2c_2t + c_1 \quad (104)$$

$$\dot{x}(0) = c_1 = 0 \quad (105)$$

$$\dot{x}(T) = 5c_5(T)^4 + 4c_4(T)^3 + 3c_3(T)^2 + 2c_2(T) + c_1 = 0 \quad (106)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_5 \\ c_4 \\ c_3 \\ c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (107)$$

$$[5T^4 \quad 4T^3 \quad 3T^2 \quad 2T \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} c_5 \\ c_4 \\ c_3 \\ c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (108)$$

98 numaralı denklemin zamana bağlı olarak iki kere türevi alındığında, ivme fonksiyonu elde edilir. Başlangıç anına ait 0 değeri denklem 109'da yerine koyulduğunda, c_2 katsayısı elde edilir. T anında yörünge fonksiyonu denklem 111 şeklinde elde edilir ve kısıtları 112 şeklinde matris formunda düzenlenerek yazılır:

$$\ddot{x}(t) = 20c_5t^3 + 12c_4t^2 + 6c_3t + 2c_2t \quad (109)$$

$$\ddot{x}(0) = 2c_2 = 0 \quad (110)$$

$$\ddot{x}(T) = 20c_5(T)^3 + 12c_4(T)^2 + 6c_3(T) + 2c_2(T) = 0 \quad (111)$$

$$[20T^3 \quad 12T^2 \quad 6T \quad 2 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} c_5 \\ c_4 \\ c_3 \\ c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (112)$$

Matris formunda yazılan denklemler 102, 103, 107, 108 ve 112, tek bir matriste 115 numaralı denklemdeki şekilde birleştirilir. Bu sayede, genelleştirilmiş katsayılar matrisi elde edilir ve lineer cebir veya bilgisayar paket programları kullanılarak çözülebilir:

$$Ax = b \quad (113)$$

$$x = A^{-1}b \quad (114)$$

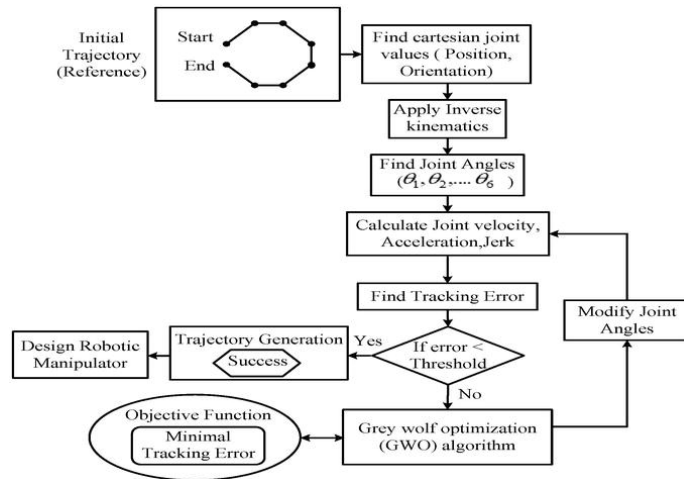
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ T^5 & T^4 & T^3 & T^2 & T & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 5T^4 & 4T^3 & 3T^2 & 2T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 20T^3 & 12T^2 & 6T & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_5 \\ c_4 \\ c_3 \\ c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (115)$$

114 numaralı denklemde bulunan $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ katsayıları yerine koyulduğunda, zaman t' 'ye bağlı yörünge denklemi 116 numaralı denklem şeklinde elde edilir:

$$x(t) = c_5 t^5 + c_4 t^4 + c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0 \quad (116)$$

Yörünge planlama algoritmalarında karşılaşılan önemli dezavantajlardan biri olan sıçrama (jerk), planlanan görev profilinde hareket hassasiyetini azaltabilir, baskılayıcı titreşimi tetikleyebilir ve bu nedenle robotun yapısal ömrünü kısaltabilir [43]. Ayrıca, bu titreşimler, end-efektör tarafından uygulanan kuvvet gerektiren görevlerde dalgalanmalara sebep olabilir, bu da hareket yörüngesinden sapmalara ve dolayısıyla ciddi kalite problemlerine ve ürün parçalarında kuvvet süreksizliğine yol açabilir. Bu nedenlerle, minimum jerk algoritması, delta robota ait simülatörde yörünge planlama tekniklerinden biri olarak kullanılması uygun görülmüştür. Bu yaklaşım, kompozit imalatı için kompozit katmanlar arasında yapıştırıcı Z ekseninde uygulanan doğrusal baskı kuvvetinin önceki bölümlerde ele alınan kübik ve trapez yörünge profilleri ile karşılaştırılmasına imkan tanır.

Şekil 4.9, robot yörünge planlaması için bir akış diyagramını sunarak, yörünge planlama süreci ve eklem hareketlerindeki eklem hızları, ivmeleri ve jerk verilerine ait hata değerlerinin nasıl optimize edileceğini detaylandırır.



Şekil 4.9. Yörünge Planlama Akış Diyagramı[44]

Yörünge planlama teknikleri arasında, B-Spline ve Frenet Frame gibi çeşitli üç boyutlu karmaşık ve ileri seviye planlama algoritmaları bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada, sadece Z ekseninde kuvvet incelemesi gerçekleştirildiği için, bu tekniklere detaylı olarak değinilmemiştir.

5. BÖLÜM

SONUÇ TARTIŞMA ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kompozit imalatında Delta robotların kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır; özellikle yörünge planlama algoritmaları ve üretim senaryoları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, MATLAB programına ait Simmechanics arayüzünde geliştirilmiş olan bir simülatör aracılığıyla yapılmıştır. Çalışma, kompozit imalatında fiber serme işlemi için gerekli olan baskı kuvvetinin, düşük yarar-yük oranına sahip antropomorfik robotlar yerine, hassasiyeti, kararlı ve rijit yapısı, ve yüksek ivmelenme kapasitesi gibi özellikleri nedeniyle fayda sağlayacak paralel tip Delta robotlarla gerçekleştirilmesi fikri ile başlamıştır.

İlk olarak, kompozit malzemelerin özellikleri ve otomatik fiber serme robotları üzerine araştırmalar yapılarak, üretim süreçleri ve adımları incelenmiştir. Sonrasında, Delta robotların kinematik denklemleri detaylandırılarak, kartezyen uzaydaki hareket noktalarının eklem uzayına dönüştürülmesi ve böylece robotun hareketinin sağlanabilmesi amaçlanmıştır. İleri ve ters kinematik denklemlerinin çözümünden sonra, hız kinematiğine ait analitik ve geometrik Jacobian matrisleri elde edilmiştir. Bu matrisler, hareketli platformun hız vektörü ile eklem açısal hız vektörü arasındaki ilişkiyi kurarak, aynı zamanda robot dinamiğinde önemli bir rol oynamaktadır.

Sunulan Jacobian matrisleri, kuvvetler ve torklar arasındaki bağlantıyı kurma olanağı sağlamıştır. İdealde delta robotlar için tek bir doğru dinamik modelin bulunmamasına rağmen, akademik çalışmalarda ortaya konulan farklı modelleme metodolojilerinin, hesaplama yükü gibi çeşitli avantajlar sunduğu belirtilmiştir. Ayrıca, paralel robotların eşgüdümlü hareketleri sebebiyle dinamik denklemlerde Lagrange çarpanlarının kullanılması gerektiği, bu çarpanların dinamik modellemeyi karmaşık ve zor bir hale

getirdiği ifade edilmiştir. Delta robot bölümünde, kompozit imalatında kullanılması muhtemel kontrol stratejileri hakkında bilgiler sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, Delta robotun kullanımını mümkün kılan yörünge planlama algoritmaları sınıflandırılmış, teknikleri ve avantajları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Kübik yörünge planlama, lineer segmentli parabolik blend/trapez yörünge planlama ve minimum jerk yörünge planlama teknikleri ele alınmış, bu teknikler kullanılarak Simmechanics simülatörü için dört farklı iş parçası için yörünge planlaması yapılmıştır. Modellenen iş parçaları, robotun orijin noktasına göre sağ, sol ve merkez olarak konumlandırılmış ve üç farklı yörünge planlama algoritmasıyla yörünge verileri elde edilmiştir. Bu bölümde, elde edilen sonuçlar belirlenen bir performans kriteri kullanılarak değerlendirilmiştir. Z eksenini boyunca meydana gelen kuvvet değişimleri ve eklemlerin torkları görselleştirilmiş, farklı yörünge planlama algoritmalarının end-efektörün temas küresinde oluşturduğu kuvvet değişiklikleri tablo halinde sunularak yorumlanmaya çalışılmıştır.

5.1. Performans Kriteri

Bu bölümde, yörünge planlama algoritmalarının etkinliklerinin değerlendirilmesi için kullanılan performans kriteri açıklanmaktadır. Performans değerlendirmesi, özellikle entegre zaman ağırlıklı mutlak hata (ITAE - Integral of Time-weighted Absolute Error) tekniği kullanılarak gerçekleştirilir. ITAE hatası, hatanın büyüklüğünün zamanla çarpımının integrali alınarak hesaplanır; bu yöntem, sistem tepkisinin zaman içindeki performansını detaylı bir şekilde değerlendirme imkânı sunar. ITAE, özellikle uzun süreli sistem performansını optimize etmek amacıyla tercih edilir çünkü bu teknik, hata değerlerinin zamanla azalmasını teşvik eder ve böylece sistem tepkisinin hızlı ve etkili bir şekilde istenen seviyeye ulaşmasını sağlar. Performans kriterinin matematiksel formülasyonu Denklem 117'de sunulmuştur:

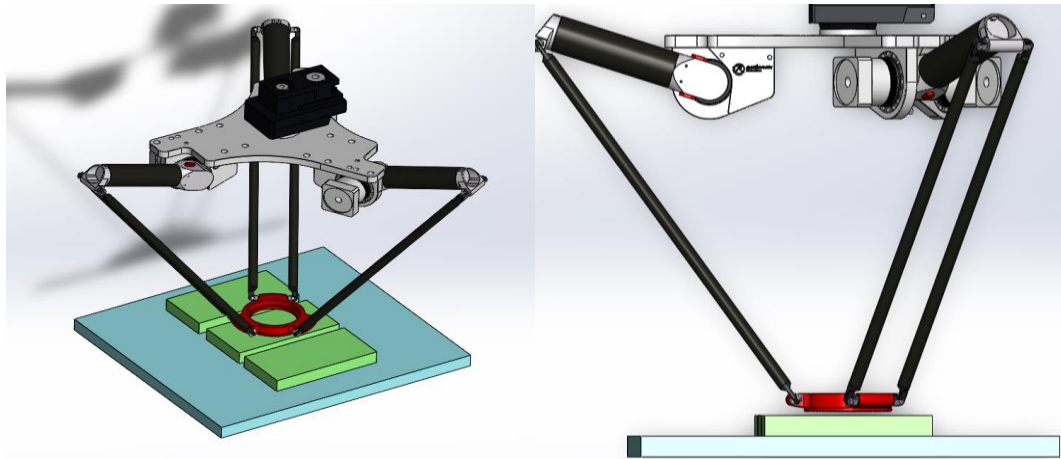
$$I_{ITAE} = \int_0^T t|e|dt \quad (117)$$

Denklemde $[0,T]$ simülasyon aralığı boyunca referans sinyal ile ölçülen sinyal arasındaki mutlak değerli hata sinyali belirlenir ve zaman t ile çarpılarak ağırlıklandırılır. Simmechanics simülatöründe, bu hata sinyalinin oluşumu için gerekli referans sinyal

olarak MATLAB Simulink arayüzündeki "Step" sinyali kullanılmıştır. Otomatik kontrol işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bu birim basamak sinyali, kullanıcı kararıyla seçilmiştir. Bu noktada step fonksiyonu için girilen referans kuvvet değeri tüm analizlerde eşit seçildiği için yörünge planlama algoritmalarının birbirleri ile karşılaştırılabilmesi mümkün bir hale gelmiştir. Ölçülen sinyal olarak, Bölüm 3.7'de tanımlanan "Sphere to Plane Force" bloğunun "Küresel Fz Kuvveti" çıkışı kullanılarak hata değeri elde edilmiştir. ITAE hesaplamaları, simülasyon süresi boyunca MATLAB Simulink'in ITAE bloğu tarafından gerçekleştirilmiştir.

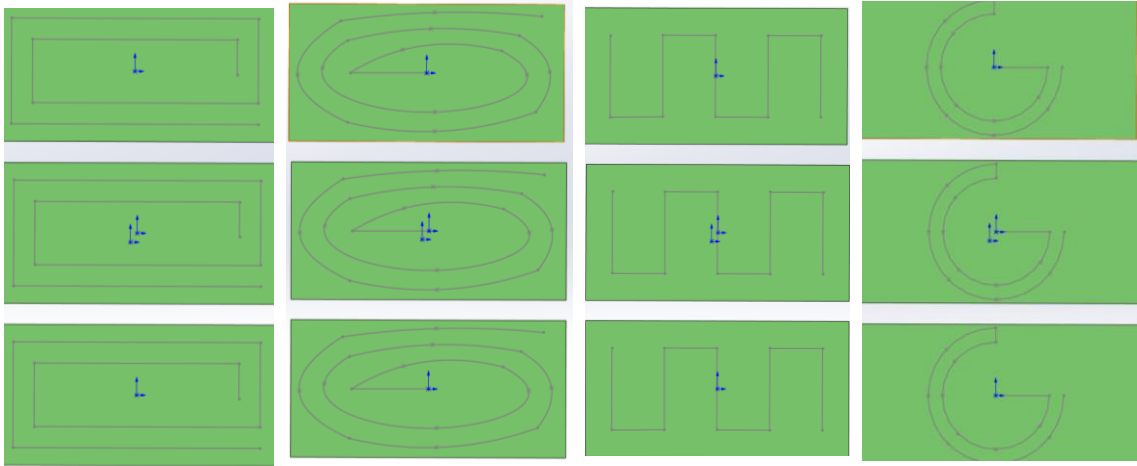
5.2. Delta Robota Uygulanan Test Yörüngeleri ve Sonuçları

Bu bölümde, kompozit imalatına yönelik iş parçalarının farklı konumlandırılmalarına bağlı olarak Z eksenini boyunca meydana gelen temas kuvvetlerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Test edilmek üzere dört farklı CAD çizimi oluşturulmuş olan iş parçaları, kübik, trapez ve minimum jerk yörünge planlama algoritmaları kullanılarak, robotun orijin noktasına göre merkez, sağ ve sol konumlarında test edilmiştir. Bu iş parçalarının hangi yörünge planlama algoritmasıyla daha kararlı baskı kuvvetleri oluşturduğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Delta robota ait CAD görseli ve iş parçalarının konumlandırılma şekilleri Şekil 5.1'de görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 5.1. Delta Robot Tabla Üzerinde İş Parçası

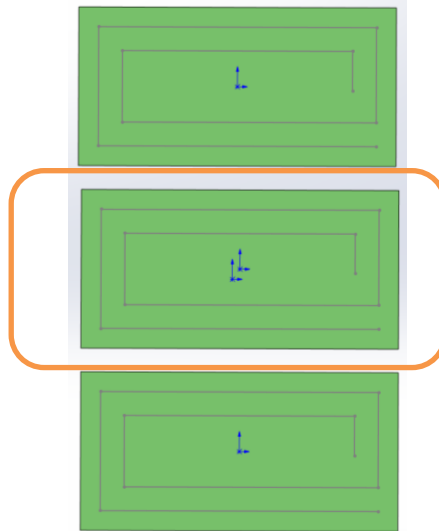
Şekil 5.2'de, dört farklı iş parçasına ait lineer hareketler ve eğrisel profiller gösterilmektedir. Bu tasarımlar, keskin ve yumuşak dönüşlerde gerçekleşen hareketlere bağlı olarak Z eksenini boyunca oluşan temas kuvvetlerindeki farklılıkları incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2. Test İş Parçaları

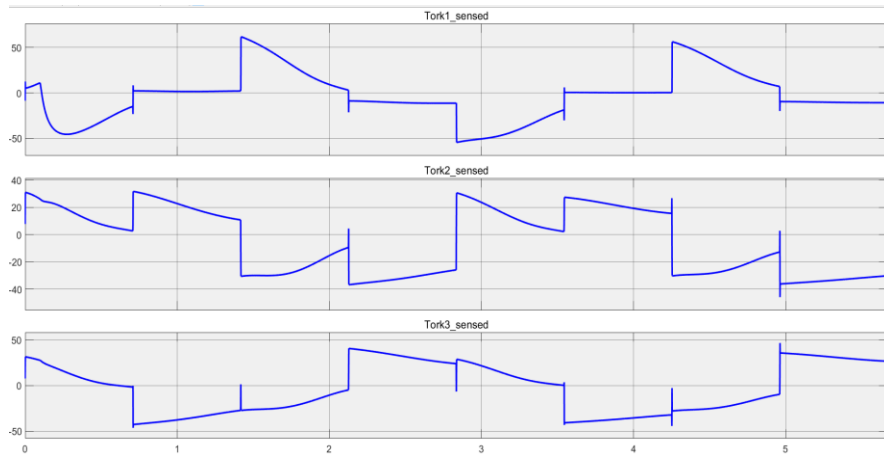
5.2.1. Robot Merkezi, Sağ ve Sol Konumlu İç Kare Parça Tarama Yörüngesi

Bu bölümde, Şekil 5.3'te görseli sunulan iç kare tarama yörüngesi iş parçasına uygulanan, kübik, trapez ve minimum jerk yörünge planlama algoritmalarının sonuçları incelenmiştir. Bu yörüngeler sonucunda oluşan Z ekseni temas kuvvetleri ve eklem tork grafikleri değerlendirilmiştir.

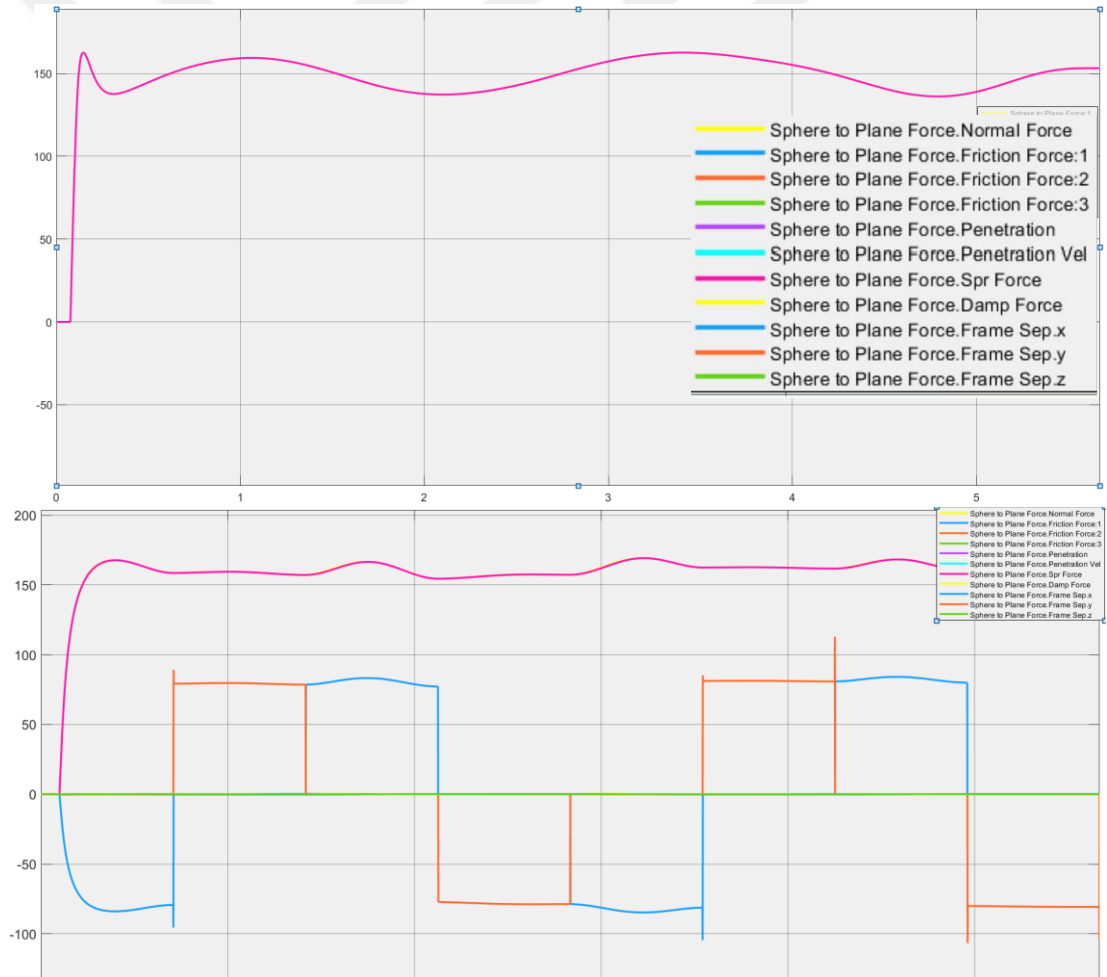


Şekil 5.3. İç Kare Tarama Yörüngesi İş Parçası

Bu yörüngelere ait, Şekil 5.3'te sunulan iş parçası için kübik planlama altında gerekli olan eklem tork grafiği Şekil 5.4'da Z ekseni temas kuvvetleri ise Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



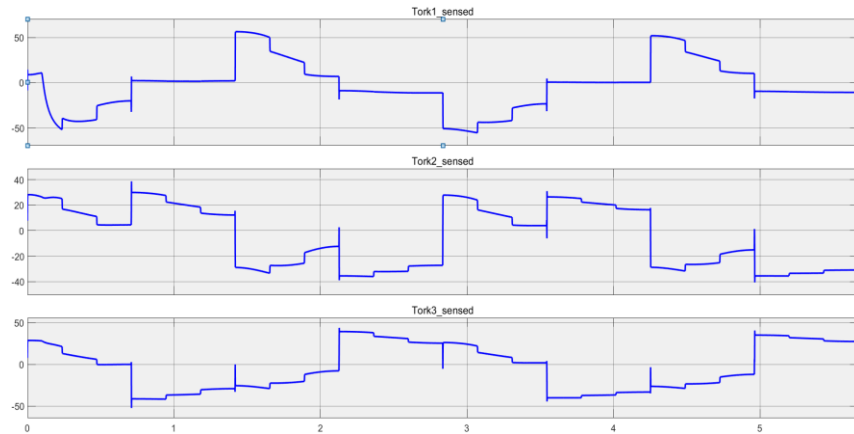
Şekil 5.4. İç Kare Merkez Konum Kübik Planlama Eklem Torkları



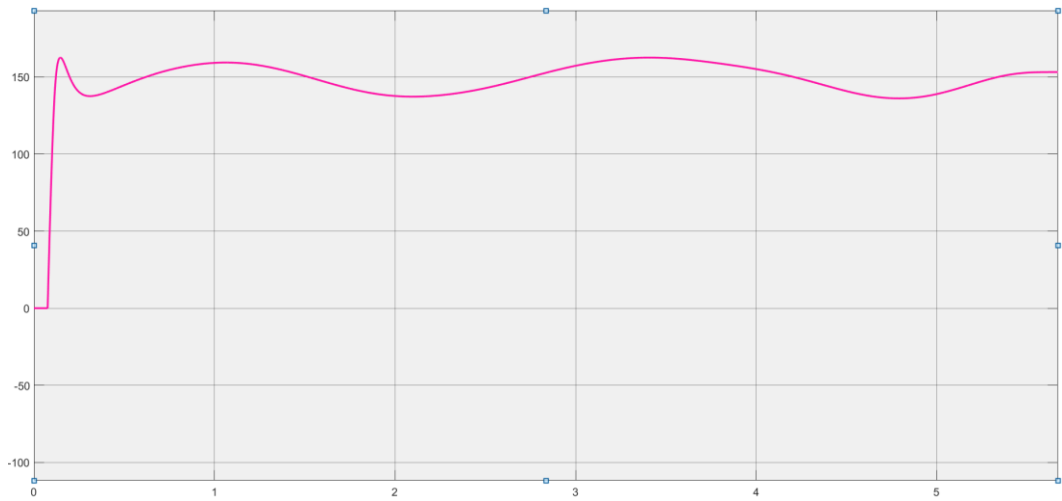
Şekil 5.5. İç Kare Merkez Konum Kübik Planlama Z eksenı Temas Kuvvetleri

Şekil 5.5'de görseli verilen temas kuvveti sensör bloğundan elde edilen 11 adet çıkış grafiği ve bu grafiklere ait tekil Z eksen temas kuvveti çıkışı sunulmaktadır. Grafik kimlikleri (Legand) olarak belirtilen sarı renkli sinyal, küresel elemanın düzleme uyguladığı normal kuvveti; mor renkli sinyal "Force Penetration", küresel elemanın düzlem üzerine nüfuz etme kuvvetini göstermektedir. Ek olarak "Friction force" sinyalleri x, y ve z eksenlerinde sürtünme kuvvetlerine, "Spr Force" ise yay kuvvetine karşılık gelmektedir. "Damp Force" ise sönümlleme kuvveti olarak değerlendirilirken, "Force.Sep.x/y/z" sinyalleri, sırasıyla küresel elemanın X, Y ve Z eksenindeki kuvvet değerlerini temsil etmektedir.

Ayrıca, Şekil 5.3'te görseli sunulan iş parçasına trapez yörünge planlama algoritması uygulandığında, eklem motorlarından ölçülen tork grafiği Şekil 5.6'da ve temas kuvvetleri Şekil 5.7'de sunulmuştur. Trapez yörüngesinin karakteristiği olarak hızlanma, sabit hareket ve yavaşlama profilleri bu grafiklerde belirgin şekilde gözlemlenmektedir. Hareket dönüş noktalarında meydana gelen lineer segmentler trapez yörünge planlama algoritmasının karakteristiğini göstermektedir. Burada hızlanma, sabit hareket ve yavaşlama profili mevcut olduğu görülmektedir. Şekil 5.7'de ise bu yörüngeye ait temas kuvvetleri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere temas kuvvetinde küçük dalgalanmalar mevcuttur. Şekil 5.7'deki sinyalde görüldüğü üzere Spring Force sinyali Robot harekete başlayıp iş parçasına temas edene kadar sıfır değerine karşılık gelmektedir. İlk temas anında kuvvet sıçrama oluşmaktadır, bu bize robotun end-efektöründe kuvvet kontrolü algoritmasının olmadığını göstermekte ve aynı zamanda sinyalin devamında hareket sürecinde dalgalanmalar olduğu görülmektedir.

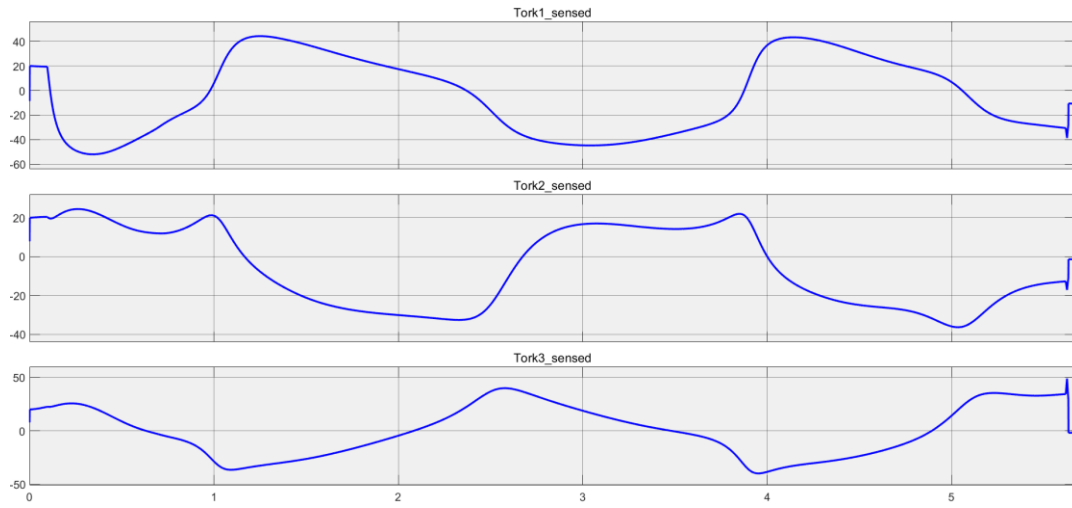


Şekil 5.6. İç Kare Merkez Konum Trapez Planlama Eklem Torkları

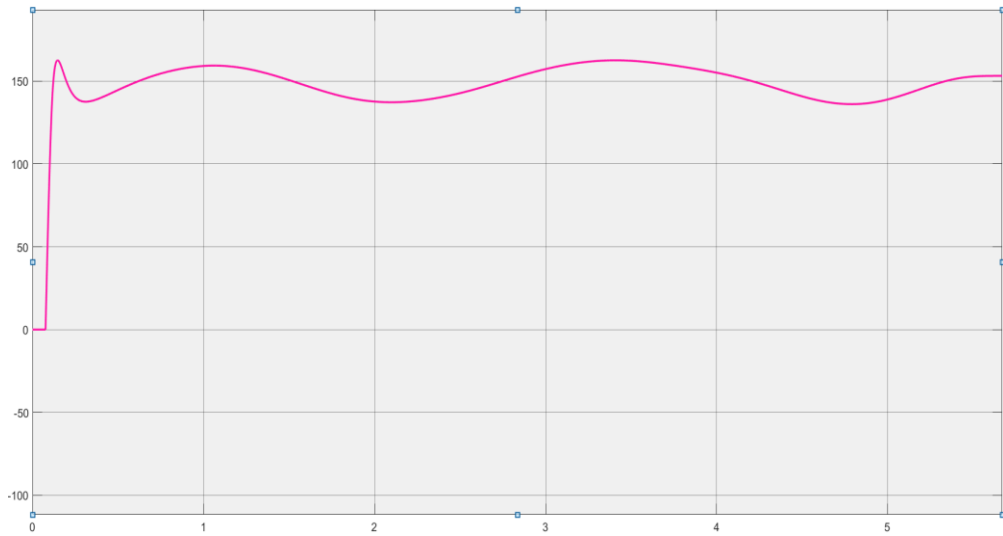


Şekil 5.7. İç Kare Merkez Konum Trapez Planlama Temas Kuvvetleri

Son olarak, minimum jerk yörünge planlama algoritması uygulandığında, eklem torklarının daha yumuşak bir profil izlediği ve ani yük değişikliklerinden kaçınıldığı gözlemlenmiştir. Bu yörüngeye ait tork grafiği Şekil 5.8'de, temas kuvvetleri ise Şekil 5.9'da sunulmuştur.



Şekil 5.8. İç Kare Merkez Konum Minimum Jerk Planlama Eklem Torkları



Şekil 5.9. İç Kare Merkez Konum Minimum Jerk Planlama Temas Kuvvetleri

5.3. Sonuçlar

Simülasyon çalışmasında, düz levha üzerindeki iş parçaları için CAD tasarımları gerçekleştirilmiştir. Delta robot end-efektörü, merkez ve sağ yönde kaçık olarak konumlandırılmış doğrusal tarama ve dairesel geometriye sahip iş parçaları ile toplam 24 farklı simülasyon çevrimi tamamlanmıştır. Kartezyen uzayda, iş parçaları üzerinden yapılan ara nokta ölçümleri ve planlamalar, Matlab ortamında ters kinematik fonksiyonu kullanılarak eklem uzayındaki açı değerlerine dönüştürülmüştür. Daha sonra, bu eklem açıları üç farklı yörünge planlama algoritması kullanılarak konum, hız, ivme ve jerk parametrelerine göre zamana bağlı olarak planlanmıştır.

Bu planlama sonucunda her bir iş parçasına ait 24 farklı yörünge dosyası, MATLAB Simmechanics simülatörüne giriş olarak sağlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda, end-efektörde meydana gelen temas kuvvetleri, temas sensörü aracılığıyla ölçülmüş ve ITAE performans bloğuna giriş olarak verilmiştir. Elde edilen değerler tablolaştırılarak sonuç verileri elde edilmiştir. Kübik, trapez ve minimum jerk yörünge planlama algoritmaları ile elde edilen Z eksenli temas kuvvetleri sonuçları, Şekil 5.10'da tablo halinde sunulmuştur.

	İÇE KARE PARÇA	SAĞ KONUM	MERKEZ	SOL
ITAE FZ	KÜBİK	2210	2400	2361
ITAE FZ	TRAPEZ	2210.74	2580	2360.74
ITAE FZ	JERK	2210.74	2548	2332.60

	SPIRAL PARÇA	SAĞ KONUM	MERKEZ	SOL
ITAE FZ	KÜBİK	2369	2671	2402.99
ITAE FZ	TRAPEZ	2369.24	2671	2402.91
ITAE FZ	JERK	2367.39	2668.36	2400.80

	ELİPS PARÇA	SAĞ KONUM	MERKEZ	SOL
ITAE FZ	KÜBİK	2301.61	2630.08	2389.55
ITAE FZ	TRAPEZ	2301.31	2629.71	2389.23
ITAE FZ	JERK	2293.77	2620.53	2381.23

	ZİGZAG PARÇA	SAĞ KONUM	MERKEZ	SOL
ITAE FZ	KÜBİK	2344.03	2626.83	2377.95
ITAE FZ	TRAPEZ	2343.82	2626.53	2377.78
ITAE FZ	JERK	2337.37	2619.22	2375.66

Şekil 5.10. ITAE Performans Sonuçları

5.4. Tartışma

Simülasyon sonuçlarına dayanarak, elde edilen temas kuvvetleri için ITAE performans kriteri sonuçları ve eklem motorlarından alınan tork değerleri incelenmiştir. İş parçalarının konumları, hareket profilleri ve uygulanan yörünge planlama algoritmalarına göre Z eksen temas kuvvetlerinde ve eklem torklarında gözle görülür farklılıklar saptanmıştır.

"İç Kare Parça" analizinde, yörünge hareketi keskin dönüşlere sahip ve doğrusaldır. Performans indeksleri, sağ, sol ve merkez konumlu iş parçaları için incelendiğinde, "Merkez" konumunda ortalama 200-300 birim daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Bu iş parçası sağ konumdayken yörünge planlama algoritmaları arasında belirgin bir fark oluşturmamış, ancak sol konumlandırıldığında en yüksek değer kübik planlamada gözlemlenmiştir. Sağ ve sol konumlandırma arasında yaklaşık 150 birimlik bir fark bulunmuştur. Performans indeksi, trapez ve minimum jerk algoritmalarında sırasıyla azalmaktadır.

"Spiral Parça" analizinde, merkez konum, diğer iki konuma göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Sağ ve sol konumlar arasında yaklaşık 30 birimlik bir fark tespit edilmiş, bu durum delta robotun eşkenar sabit platformunun iş parçalarının tam simetrik şekilde konumlandırılmamasından kaynaklanmıştır. Ayrıca, merkez konum ile diğer iki konum arasında 270 birimlik bir fark bulunmuştur, bu da merkez konumda yüksek performansa işaret etmektedir. Minimum jerk tekniği, kübik ve trapez tekniklerine göre sırasıyla sağ, merkez ve sol konumlarda 2 birim daha düşük sonuç vermiştir.

"Elips Parça" analizinde, merkez konum diğer iki konuma göre ortalama 300 birim daha yüksek sonuç vermiştir. Sağ ve sol konumlar arasında yaklaşık 80 birimlik bir fark gözlenmiş, bu da delta robotun yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, merkez konum ve diğer iki konum arasında ortalama 300 birimlik bir fark saptanmıştır. Minimum jerk tekniği, kübik ve trapez tekniklerine göre sağ, merkez ve sol konumlarda sırasıyla 8, 9 ve 8 birim daha düşük sonuç vermiştir.

"Zigzag Parça" analizinde, merkez konum diğer iki konuma göre ortalama 250 birim daha yüksek sonuç vermiştir. Sağ ve sol konumlar arasında yaklaşık 33 birimlik bir fark bulunmuş, delta robotun eşkenar sabit platformunun iş parçalarının tam simetrik şekilde konumlandırılmamasından kaynaklanmıştır. Minimum jerk tekniği, kübik ve trapez tekniklerine göre sağ, merkez ve sol konumlarda sırasıyla 6, 7 ve 2 birim daha düşük sonuç vermiştir.

Genel olarak, iş parçası konumlandırılma durumuna göre en yüksek performans indeksleri dört farklı parça için merkez konumda elde edilmiştir. Planlama algoritmaları farklılığına gelince, kübik planlama, diğerlerine göre küçük miktarda daha yüksek performans indeksi sunmuştur, ardından trapez ve en son olarak minimum jerk planlama algoritmaları gelmiştir. Eklem motorlarının tork değerlerinin analizi, trapezoid hareket profilinin robot hareketinde sıçramalara yol açtığını, bu durumun eklem bağlantı noktalarında yüksek ivmelenmelere neden olarak robotun mekanik ömrünü kısaltabileceğini göstermiştir. Ayrıca, kompozit serme parçasının üzerinde çalışılırken eklem torklarının sıçramalı olması, baskı kuvvetinde dalgalanmalara yol açarak, kompozit katmanlar arasında sürekli ve yüksek kalitede baskı kuvvetinin uygulanmasını engellemektedir. Yörünge planlama algoritmalarına göre eklem torklarının yumuşak tork profili sıralaması ise minimum jerk, kübik ve trapezoid olarak değerlendirilmektedir.

5.5. Öneriler

Bu çalışma beş ana bölümde gerçekleştirilmiştir. İlk bölümde, çalışmanın genel problemi ve literatürde yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, kompozit malzemelerin avantajlı yönleri, temel ve ileri imalat yöntemleri ile antropomorfik robotlar aracılığıyla gerçekleştirilen fiber serme robotları incelenmiştir. Bu robotların kompozit serme sürecindeki temas teorisine ve bu süreçte önemli olan noktalara dair yapılan akademik çalışmalar değerlendirilmiştir.

Üçüncü Bölümde, Delta robotlar ve seri ile paralel robotlar arasındaki farklar, tablolar aracılığıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Delta robotun serbestlik derecesi, Gröbler formülasyonu kullanılarak hesaplanmış, robot kinematiği ve delta robotun ileri ve ters kinematik denklemleri incelenmiş, seri robotlarla olan zorluklar noktasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Delta robotun hız kinematiğine ait Jacobian matrisi ve robot dinamiğine ait denklemler, literatürde yapılan referanslı çalışmalar aracılığıyla gösterilmiştir. Kuvvet kontrol algoritmalarına değinilmiş ve MATLAB Simmechanics simülatörü açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, delta robot simülatöründe kullanılmak üzere, kübik, trapez ve minimum jerk yörünge planlama algoritmaları açıklanmıştır. Bu algoritmalar ile planlanan yörüngelere ait konum, hız, ivme ve jerk verileri simülatöre giriş olarak verilmiştir.

Beşinci bölümde, sonuçlar değerlendirilmiştir. ITAE performans indeksine ait formülasyon ve açıklamalar sunulmuş, referans değerin kullanıcı kararına dayalı olarak seçildiği belirtilmiş ve simülatörde kullanılan test iş parçalarına ait CAD görselleri verilmiştir. Ayrıca, simülasyon sonucunda elde edilen eklem torkları ve Z eksen boyunca gerçekleşen temas kuvvetlerine ait grafikler sunulmuş, bu temas kuvvetleri performans indeksi olarak tablo halinde topluca sunulmuştur.

Yörünge planlaması ve parça konumlandırmalarına bağlı olarak değişen temas kuvvetleri ve tork değerleri, özel kuvvet kontrol algoritmaları kullanılarak her durumda sabitlenebilir. Bu algoritmalar sayesinde, delta robotların kullanım alanları genişletilebilir. Ayrıca, delta robotların yüksek hızlanma kapasitesi ve paralel kinematik yapısından kaynaklanan yüksek rijitlik, robotların çeşitli uygulamalarda etkin şekilde kullanılmasını sağlar.

KAYNAKÇA

1. Elkington, M., Ward, C., Bloom, L. D., Potter, K., & Chatzimichali, A. 2015. Hand Layup: understanding the manual process. **Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science**, 1(3), 138-151. <https://doi.org/10.1080/20550340.2015.1114801>
2. Skramstad, D.J., 1999. Evaluation Of Hand Lay-Up And Resin Transfer Molding In Composite Wind Turbine Blade Manufacturing, Montana State University, Msc.Thesis, Montana, 240
3. Direk, E. 2022. Elle Yatırma Yöntemi İle Katkılı Kompozit Üretimi İstanbul Ticaret Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 57
4. Güldü, S., 2014. Otomatik Fiber Serme Tekniği İle Üretilen Silindirik Yapıların Analizi ve Optimizasyonu, ODTÜ, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 133
5. Halbritter, J. A. 2020. Automation of Process Planning for Automated Fiber Placement.(Master's thesis). Retrieved from <https://scholarcommons.sc.edu/etd/5953>
6. Oberhauser, Joseph Q., 2016. Mechanical Engineering Design, Construction, Control, and Analysis of Linear Delta Robot, Msc.Thesis,
7. Bozok, U., 2019. Bir Delta Robot Manipülâtörün Entegre Tasarım Ve Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 60
8. Yıldırım, O., 2019. Görüntü işleme tabanlı Delta robot kontrolü, Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 64
9. Gül, Ö., 2019. Trajectory Control Of A Delta Robot For Telescopic Mast Systems Assembly, Çankaya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 53
10. Alashqar, H. A. H. 2015. Modeling and High Precision Motion Control of 3 DOF Parallel Delta Robot Manipulator, The Islamic University of Gaza, Msc.Thesis, Gaza, 98
11. Hu, X. 2008. “Design and analysis of a three degrees of freedom parallel kinematic machine,” M. Sc. Thesis, The Faculty of Engineering and Applied Science Mechanical Engineering Program University of Ontario Institute of Technology, North Oshawa,.

12. Liu, X.-J., Wang, J., Oh, K.-K., & Kim, J. 2004. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, **39**(2): 209–225.
13. Şanlıtürk, İ. H, 2012. Görerek İşlem Yapabilen Delta Robotun Tasarımı Ve Performans Karakteristiklerinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ,108
14. Olsson, A. Master Thesis, ,February 2009, Modeling and control of a Delta-3 robot. (Modellering och kontroll utav en Delta-3 robot), ISRN LUTFD2/TFRT--5834—SE
15. Alikoç, B., Šustr, V., Zítek, F., and Burget, P., 2022, “Repository with simulation models and trajectory data sets for the 5-axis Delta robot RL5-1450- 6kg,” Testbed for Industry 4.0 - CIIRC, Prague, Czech Republic, last modified July 12, 2022, accessed May 31, 2022, <https://github.com/testbedCIIRC/delta-robot-public>
16. Alikoç, Baran, et al. 2024. Motion Modeling of a 5-Axis Delta Robot with Telescopic Shafts. **Journal of Mechanisms and Robotics**, **16**(4).
17. Okasha, Ahmed & Bortoff, Scott. (2020). Modelica-Based Control of a Delta Robot. 10.1115/DSCC2020-3158.
18. Şimşek, N.,2023. Elektrikli Tramvay İmalatı İçin Kaynak Robotu Tasarımı. Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Denizli,106
19. Beyhan, A.,2021. Üç Serbestlik Dereceli Robotik Kolun Kartezyen Uzayda Empedans Kontrolü. Bursa Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa,78
20. Dirin,İ,2014. Paralel robot kinematiği, yörünge planlaması ve 3-UPS, 1-RU paralel robot uygulaması, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli,122
21. Çetin,M.2024. İnsansız araçlar için optimum uzaysal yörünge planlama algoritmaları geliştirilmesi ve uygulanması, Yıldız Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,172,
22. Ünlüel,M.2015. Endüstriyel zaman robotlarda optimal yörünge kontrolü, İTÜ, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,86
23. Ünsal B,C.2023. Paralel robotların tekilliklerden geçmesi için parçalı kuintik polinom yörüngelerin optimal planlaması, Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,68

24. Sönmez, M.,2009. Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi Ve Geleceği: Türkiye’den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme. İTÜ, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,203
25. Chesmar, Eric & Cole, William & Museux, Francois & Armstrong, Keith. (2020). Care and Repair of Advanced Composites. 10.4271/9780768093179.
26. (Web sayfası: <https://llis.nasa.gov/lesson/682>), (Erişim tarihi: Ocak 2022).
27. (Web sayfası: <http://tekstilteknik.blogspot.com/p/kompozit-uretim-yontemleri.html>), (Erişim tarihi: Ocak 2023).
28. (Web sayfası: <https://www.addcomposites.com/post/what-is-automated-fibre-placement-afp>), (Erişim tarihi: Şubat 2023).
29. Bakhshi N, Hojjati M. 2019. Effect of compaction roller on layup quality and defects formation in automated fiber placement. **J Reinf Plast Compos**, 0731684419868845
30. Sabido, A. M. Development of an Automated Fiber Placement Process for the Fabrication of Thermoplastic Composite Laminates. University of South Carolina Yüksek Lisans Tezi., Florida, s.19-61
31. Ricardo de Souza, Juliana & Nascimento, Isaac & Moreira, Severino & Cavalcanti, Synara & Medeiros, João. hertz theory x experiment: contact parameters in sphere-plan configuration for composites of polyester/glass fiber against a steel sphere in quasistatics tests. *Conference: Proceedings of COBEM_2011*, October 24-28, 2011, Natal, RN, Brazil
32. (Web sayfası: <https://www.engineeringnotes.org/solid-mechanics/hertzian-contact-stress/>), (Erişim tarihi: Şubat 2023).
33. (Web sayfası: <https://www.compositesworld.com/articles/modular-mobile-multiple-robotics-poised-to-change-the-afpatl-paradigm>), (Erişim tarihi: Ocak 2023).
34. Shaik, Himam Saheb & Garlanka, Satish & Raju, N.V.Subba. (2018). Relative Kinematic Analysis of Serial and Parallel Manipulators. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 455. 012040. 10.1088/1757-899X/455/1/012040.
35. Kevin M. Lynch and Frank C. Park, Modern Robotics, May 3, 2017

36. R.L. Williams II, 2016. the delta parallel robot: kinematics solutions., www.ohio.edu/people/williar4/html/pdf/DeltaKin.pdf, (Erişim tarihi: Ocak 2022).
37. Robot Modeling and Control, 2nd Edition Mark W. Spong, Seth Hutchinson, M. Vidyasagar
38. Craig, J.,J., 2005. Introduction to Robotics Mechanics and Control, Pearson Education International, USA, 408 pp.
39. Siciliano, B., Khatib, O., 2008. Handbook of Robotics. Springer, Würzburg, 1628 pp.
40. Bortoff, Scott. (2018). Object-Oriented Modeling and Control of Delta Robots. 251-258. 10.1109/CCTA.2018.8511395.
41. Brinker, J., Corves, B., & Wahle, M. (2015). A Comparative Study of Inverse Dynamics based on Clavel's Delta robot.
42. May 2017 preprint of Modern Robotics, Lynch and Park, Cambridge U. Press, 2017. <http://modernrobotics.org>
43. Freeman, Philip, "Minimum Jerk Trajectory Planning for Trajectory Constrained Redundant Robots" (2012). All Theses and Dissertations (ETDs). 689
44. (Web sayfası: <https://www.intechopen.com/chapters/76559> (Erişim tarihi: Nisan 2024)).

EKLER

EK 1.

```

function [teta1,teta2,teta3] = delta_ters_kin_ea(xd,yd,zd)
% Delta Robot Ters Kinematik Çözümü
%% Sabit Değişkenler
r0 = 0.330;          % [m],
l1 = 0.420;          % [m],
l2 = 1.055;          % [m],
r3 = 0.125;          % [m],
rd = r0 - r3;

%% Kinematik Hesaplamalar

a1 = -2*l1*(xd-rd);
b1 = -2*l1*zd;
c1 = xd^2+yd^2+zd^2+rd^2+l1^2 - 2*xd*rd - l2^2;

a2 = l1*(xd+2*rd - sqrt(3)*yd);
b2 = -2*l1*zd;
c2 = xd^2+yd^2+zd^2+rd^2+l1^2-l2^2+xd*rd-sqrt(3)*yd*rd;

a3 = l1*(xd+2*rd+sqrt(3)*yd);
b3 = -2*l1*zd;
c3 = xd^2+yd^2+zd^2+rd^2+l1^2-l2^2+xd*rd+sqrt(3)*yd*rd;

ust1 = (-b1 + sqrt(a1^2+b1^2-c1^2));
alt1 = c1-a1;
%% Açı Değerleri
teta1 = 2*atan(ust1/alt1);

ust2 = (-b2 + sqrt(a2^2+b2^2-c2^2));
alt2 = c2-a2;

teta2 = 2*atan(ust2/alt2);

ust3 = (-b3 + sqrt(a3^2+b3^2-c3^2));
alt3 = c3-a3;
teta3 = 2*atan(ust3/alt3);
teta1 = teta1';
teta2 = teta2'; teta3= teta3';
end

```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Ekrem AYAZ

Uyruğu:

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Fırat Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği	2018
Lise	Etimesgut Anadolu Lisesi	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2023-Halen	Pulsar Robotik A.Ş.	Devam Ediyor

YABANCI DİL

İngilizce(İleri), Almanca

YAYINLAR

- Arslan E., Ayaz E The Usage of a Force Controlled Delta Manipulator for Composite Hand Lay-Up Fiber Placement Process. 5th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, HORA 2023, İstanbul, Türkiye, 8 - 10 Haziran 2023