



Makro / Mikro Robot Manipülatörü Tasarımı ve Gerçekleşmesi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Efecan AKDAL
ORCID 0000-0003-3801-1576

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Duygu Atcı

Ocak 2022

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi **Efecan AKDAL** tarafından hazırlanan **MAKRO / MİKRO ROBOT MANİPÜLATÖRÜ TASARIMI VE GERÇEKLEŞMESİ** başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

ONAYLAYANLAR:

Tez Danışmanı: **Dr. Öğr. Üyesi Duygu Atcı**
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Jüri Üyeleri:

Doç. Dr. Erkin Gezgin
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özgün Selvi
Çankaya Üniversitesi

Savunma Tarihi: 14.01.2022

Yazarlık Beyanı

Ben, **Efecan AKDAL**, başlığı **MAKRO / MİKRO ROBOT MANİPÜLATÖRÜ TASARIMI VE GERÇEKLEŞMESİ** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim. Ayrıca:

- Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Yüksek Lisans derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.
- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta bulundum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi çalışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

Tarih: 14.01.2022

Makro / Mikro Robot Manipülatörü Tasarımı ve Gerçekleşmesi

ÖZ

Endüstride kullanılan robotik sistemler arasında en çok gözüken türleri, robotik talaşlı üretim, robotik montaj, parçaların bir yerden alınıp başka bir yere taşınması görevi, boyama v.b. gibi birçok alanda gözükmektedir. Bu tez kapsamında mikro bir seri manipülatör tasarlanıp üretilerek, makro bir mekanizma üzerine montajlanması ile oluşturulmuş olan hibrit bir PRR seri manipülatörünün prototip üretimi, kinematik ve dinamik analiz, yörünge planlaması, simülasyonu ve kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan manipülatörün endüstride parça kalitesini belirleyen faktörlerden bir olan yüzey temizliği ve son operasyon işlemlerinde kullanılması planlanmıştır. Manipülatörün sahip olduğu hibrit yapı sayesinde makro mekanizmanın geniş çalışma alanından yararlanması planlanmış, mikro manipülatörün küçük çalışma alanı sayesinde hassas konumlandırılmasından yararlanması planlanmıştır. Tasarımı oluşturulmuş olan PRR artıksıl seri düzlemsel hibrit manipülatörü sigma profiller ve 3 boyutlu yazıcılar yardımıyla prototipi üretilmiş ve daha sonra hareket takip kameraları yardımıyla bilgisayar ortamında manipülatörün takip ettiği yörünge izlenmiştir. Takip işlemini gerçekleştirmek için manipülatörün uç efektörüne bir reflektör nokta yerleştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Makro/mikro Manipülatörler, Robotik işleme, Robot Yörüngesi, Yüzey Taşlama İşlemi

Design and Prototyping Macro/Micro Robot Manipulator

Abstract

The most common types of robotic systems used in the industry are seen in many areas such as robotic machining, robotic assembly, pick and place objective, painting, etc. In this thesis, prototype production, kinematic and dynamic analysis, trajectory planning, simulation and control studies of a hybrid PRR redundant serial manipulator is done for surface grinding and finishing operations which are one of the most importuned factors that determine the quality of parts manufactured in the industry. Because of the hybrid structure of the manipulator, it is planned to use both manipulators most benefit sides. For the macro mechanism it is rough positioning in large workspace and for the micro manipulator precise positioning in small workspace. The prototype of the designed hybrid PRR redundant planar serial manipulator was produced with the help of sigma profiles and 3D printers. Then, the planned trajectory for the manipulator was followed in the computer environment with the help of motion capture cameras with a reflective point placed on the end effector of the manipulator.

Keywords: Macro/Micro Manipulators, Robotic Operations, Robot Trajectory, Surface Grinding

Aileme

Teşekkür

Tez çalışması boyunca bana yardımcı ve destek olan öncelikle tez danışmanım olan Dr. Öğr. Üyesi Duygu Atıcı' ya ve proje süresince desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Erkin Gezgin ve Dr. Öğr. Üyesi Fatih Cemal Can hocalarıma, Tez boyunca çalışmalarımı gerçekleştirmiş olduğum İKCÜ medikal robotik laboratuvarı arkadaşlarıma, gene aynı laboratuvarda birlikte çalışmış olduğum kamera kontrollü sırasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Mertcan Koçak ve Tuğrul Uslu' ya ve bütün eğitim hayatım boyunca beni desteklemiş olan değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu çalışma 2018-GAP-MÜMF-0010 Proje no lu bilimsel araştırma projesinin sağlamış olduğu destek ile tamamlanmıştır. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinatörlüğüne teşekkürü borç biliyor ve saygılarımı sunuyorum.

İçindekiler

Yazarlık Beyanı.....	ii
Öz.....	iii
Abstract	iv
Teşekkür.....	vi
Şekiller Listesi.....	ix
Tablolar Listesi.....	xii
Kısaltmalar Listesi	xiii
Semboller Listesi.....	xiv
1 Giriş	1
1.1 Manipülâtör Türleri.....	2
1.2 Makro Mikro Robotik	2
1.3 Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	3
2 Kinematik Analiz.....	10
2.1 İleri Kinematik	11
2.2 Ters Kinematik.....	12
3 Çalışma Yörüngesi Analizi	14
3.1 Prizmatik Mafsal Analizi	21
4 Dinamik Analiz	26
4.1 Lagrange Dinamiği	26
4.1.1 Kinetik Enerji	27
4.1.2 Potansiyel Enerji.....	28
4.1.3 Dinamik Denklemlerinin Genel Formu	28
4.2 Dinamik Analiz Hesaplamaları.....	30
5 Mekanik Tasarım	38

5.1	Mikro Manipülatör Tasarımı.....	39
5.2	Makro Hareketten Sorumlu Mekanizmanın Tasarımı	40
5.3	Prototip Üretimi	42
5.3.1	Mikro Manipülatör Üretimi	42
5.3.2	Prizmatik Mekanizma Üretimi	45
5.3.3	Kaplin ve Mil Seçimi.....	46
5.3.4	İş Takımı Seçimi.....	48
6	Simülasyon, Kontrol ve Doğrulama Çalışmaları.....	51
6.1	Simülasyon.....	51
6.1.1	Simülasyon Tork Karşılaştırması	55
6.2	Kontrol	56
6.3	Doğrulama Çalışmaları	61
7	Sonuç.....	68
	Kaynakça	70
	Özgeçmiş	74

Şekiller Listesi

Şekil 1.1	Makro mikro manipülatörün şematik gösterimi	3
Şekil 1.2	Devol and Engelberge yapmış olduğu Unimate manipülatörünün kokteylde içki servis edişi [9]	4
Şekil 1.3	Arthrobot için yayınlanmış bir gazete haberi [12]	5
Şekil 1.4	Tasarlanan PRR seri artıksıl düzlemsel hibrit manipülatörü	8
Şekil 1.6	Mikro manipülatörün çalışma alanı	9
Şekil 1.7	Makro mekanizma aktif edildiğinde oluşan çalışma alanı.....	9
Şekil 2.1	Önerilmiş olan PRR seri manipülatörün kinematik gösterimi [27]	10
Şekil 3.1	Robotun RR kısmı için planlana yörünge.....	14
Şekil 3.2	Parça üzerinde takip edilmesi istenilen gerçek yol.....	15
Şekil 3.3	2DOF düzlemsel kartezyen manipülatör örneği	15
Şekil 3.4	(a) Manipülatörün uç efektörünün parça üzerinde izlemesi planlana yörünge nin döngü halinde gösterimi (b) Manipülatörün RR kısmının uç efektörünün yörüngesinin segmentlere ayrılmış gösterimi.....	16
Şekil 3.5	Denklem grubu (3.2) ile (3.7) arasında bulunan denklemlerin yörünge üzerinde denk geldiği noktaların gösterilişi.....	20
Şekil 3.6	Denklem grubu (3.2) ile (3.7) arasında bulunan denklemlerin parça yörüngesi üzerinde denk geldiği noktaların gösterilişi.....	21
Şekil 3.7	Uç-efektör, prizmatik mafsal konum zaman grafiği (boşluklu).....	22
Şekil 3.8	B ve C segmentleri için prizmatik mafsal konum grafiği.....	24
Şekil 3.9	H ve J segmentleri için prizmatik mafsal konum grafiği.....	25
Şekil 3.10	Prizmatik mafsal konum grafiği	25
Şekil 4.1	Prizmatik mafsal eyleyici kuvvetini grafiği.....	36
Şekil 4.2	Birinci döner mafsallar tork grafiği	36
Şekil 4.3	İkinci döner mafsallar tork grafiği	37

Şekil 5.1	Tasarlanmış olan PRR seri artıksıl hibrit manipülatörünü CAD modeli	38
Şekil 5.2	Tasarlanmış olan manipülatörün mikro, RR kısmı	39
Şekil 5.3	Manipülatörün RR kısmının uzuvları,	39
Şekil 5.4	Manipülatörün mikro (RR) kısmını makro (prizmatik) mekanizmaya bağlamak için tasarlanan parça	40
Şekil 5.5	Makro mekanizma için tasarlanan platform	41
Şekil 5.6	Tasarlanan manipülatörde makro hareketten sorumlu prizmatik mekanizmanın son hali	42
Şekil 5.7	RR seri manipülatörünün üretilen parçalar	43
Şekil 5.8	Manipülatörün RR kısmını prototipi	44
Şekil 5.10	(a) Prizmatik mekanizma üzerinde kullanılan sigma profil teknik çizimi [32] (b) Platformun teknik çizimi	45
Şekil 5.11	Tasarlanan motor standı üzerinde oluşturulan yatak yuvası	46
Şekil 5.12	(a) Birinci kaplin modeli (b) İkinci kaplin modeli (c) Üçüncü kaplin modeli (d) Dördüncü kaplin modeli	47
Şekil 5.13	NTM Prop Drive Series 28-26A 1200kv fırçasız motoru	49
Şekil 5.14	Freze çakısının bağlandığı motorun uç efektöre bağlantı parçası	49
Şekil 5.15	PRR artıksıl seri hibrit manipülatörü	50
Şekil 6.1	Simülasyon için oluşturulmuş Simulink modeli	51
Şekil 6.2	Manipülatörün mikro kısmı olan RR kısmının simülasyonda çalıştırılması sonucu elde edilen yörünge	52
Şekil 6.3	Simülasyonda Prizmatik mafsallı etkinleştirildiğinde elde edilen yörünge grafiği	53
Şekil 6.4	İki tur tamamlandığında oluşan yörünge	54
Şekil 6.5	(a) Kinematik analiz (b) Simülasyon ile oluşan grafikler	54
Şekil 6.6	(a) Kinematik analiz sonucu tork değerleri (b) Simülasyon sonucu tork değerleri	55
Şekil 6.7	OpenCM 485 Genişleme Kartı ile U2D2 Dynamixel Servo Haberleşme Modülü arasındaki bağlantı	56
Şekil 6.8	Matlab programı ile Dynamixel tipi motorları aktif etmek için kullanılan kod satırı	57
Şekil 6.9	Oluşturulan PRR artıksıl seri hibrit manipülatörünün kontrollü için hazırlanmış Simulink modeli	57

Şekil 6.10	Motorlar üzerine gönderilmiş olan sinyallerin okunması için oluşturulan Simulink modeli.....	58
Şekil 6.11	Prizmatik mafsallı hareke eden motorun kapalı olduğu durumda (a) Motorlara gönderilen konum değerleri ile çizilmiş uç efektör konum grafiği (b) Motorlar üzerinde okunan değerler ile çizilmiş uç efektör konum grafiği.....	59
Şekil 6.12	(a) Motorlara gönderilen konum değerleri ile çizilmiş uç efektör konum grafiği (b) Motorlar üzerinde okunan değerler ile çizilmiş uç efektör konum grafiği.....	60
Şekil 6.13	Optitrack hareket takip sistemi	61
Şekil 6.14	Optitrack kalibrasyon çubuğu ve referans düzlemi	62
Şekil 6.15	Optitrack kamera takibi sonucu elde edilen mikro manipülatörün uç-efektör yörüngesi	62
Şekil 6.16	Optitrack kamera takibi sonunu elde edilen uç efektör yörüngesi (2 hatveli mil).....	63
Şekil 6.17	Prizmatik mafsallı kontrol eden motorun konum zaman grafiği	63
Şekil 6.18	Optitrack kamera takibi sonunu elde edilen uç efektör yörüngesi (8 hatveli mil).....	64
Şekil 6.19	Prizmatik mafsallı harekete ettiren motor ters çalışırsa oluşacak olan yörünge	66
Şekil 6.20	Prizmatik mafsallı harekete ettiren motor ters çalıştığında oluşan yörünge kameranın takibi	66
Şekil 6.21	$\theta_2 = 270^0$, $\theta_3 = 180^0$ öteleme yapıldığında oluşan yörünge kameranın ortamında takibi	67

Tablolar Listesi

Tablo 2.1	Denavit-Hartenberg parametreleri	11
Tablo 2.2	Hesaplamalar sonucu oluşan θ_2 ve θ_3 açılı değerleri	13
Tablo 3.1	Örnek zaman değerleri.....	18
Tablo 3.2	Denklemler grubu (3.2) ile (3.7) arasında bulunan denklemlerin yörünge üzerindeki zaman karşılıkları.....	20
Tablo 5.1	Zortrax M200 adlı 3D printerda kullanılan z-ABS filamentinin özellikleri [29].....	43
Tablo 5.2	Uprint adlı 3D printerda kullanılan ABSplus-P430 filamentinin genel özellikleri [30]	44
Tablo 5.3	Dynamixel MX serisi için motor özellikleri.....	45
Tablo 5.4	NTM Prop Drive Series 28-26A 1200kv motorunun genel özellikleri [33]	48
Tablo 6.1	Mikro manipülatör üzerinde bulunan mafsallara başlangıçta öteleme verildiği zaman uç-efektörün takip ettiği yörünge.....	65

Kısaltmalar Listesi

Dof	(Degre of Freedom) Serbestlik Derecesi
RR	(Revalute, Revalute) Dönebilen Dönebilen
PRR	(Prismatic, Revalute, Revalute) Kayar Dönebilen Dönebilen
CAD	(Computer aided designe) Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	(Computer aided manufacturing) bilgisayar Destekli Üretim
MRP	Malzeme Kaldırma Profili
3D	Üç Boyut

Semboller Listesi

θ_i	Tetha aç¸ı değeri
T	Transformasyon matrisi
R	Rotasyon matrisi
l	Uzuv boyutu
I	Atalet matrisi
K	Kinetik enerji
U	Potansiyel enerji
J	Jacobian matrisi
P	Ağırlık merkezi konumu
M	Manipölatör atalet matrisi
v	Hız vektörleri
w	Aç¸ısal hız vektörleri
V	Hız kuplaj vektörleri
G	Yerçekimi vektörü
Q	Genelleştirilmiş kuvvetler

Bölüm 1

Giriş

Robotlar insanların hayatlarını kolaylaştırmak amaçlı olarak tasarlanmış makinelerdir. Dünya üzerinde teknolojinin de ilerlemesiyle birlikte robotların günlük yaşamda kullanım alanları artmaktadır. Robotlar sanayi, medikal-tıp, eğlence sektörü, tarım ve hayvancılık, uzay keşifleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Robot kelimesi 1920 yılında Karel Čapek adlı çek yazarın yazmış olduğu R.U.R adlı oyunda insanlar yerine günlük işleri yapan çok gelişmiş hayali bir makineye robot ismini vermiştir. Bu isimde eski Slavcada robota kelimesinden (köle, uşak) gelmektedir. [1] 1940 ile 1950 yılları arasında Oak Ridge ve Argonne ulusal laboratuvarlarında yapılan çalışmalarda tele operatör kontrollü robot manipülatör denemeleri medikal ve radyoaktif malzemeleri taşımak amacıyla geliştirilmesine başlanmıştır.[2] Robotların endüstride kullanılması iki temel ihtiyaç doğrultusunda 1960 lı yılların başlarında CAD (computer aided desing, bilgisayar destekli tasarım) ve CAM (computer aided manufacturing, bilgisayar destekli üretim) programlarının artması ile başlamıştır.[3] Endüstride robotların kullanımı üretimde hassasiyeti sağlamaktadır ve ayrıca kullanılan ilk örneklere de tele operasyon yöntemi ile materyallerin uzaktan robot kollar ile taşınabilmesi örnekleri verilebilir. Robotların endüstride kullanılması aynı zamanda üretilen parçalar üzerinde hassasiyet sağlamanın yanı sıra üretim zamanında da büyük bir kısaltma oluşturmaktadır.

Endüstriyel alanda robotlar

- Kaynak
- Boyama
- Yapıştırma

- Lazer ve su jeti kesimi
- Frezeleme ve delme
- apak alma ve taşlama
- Vidalama, kablolama ve sabitleme,
- Montaj

İşlemlerinde kullanılmaktadır [4]

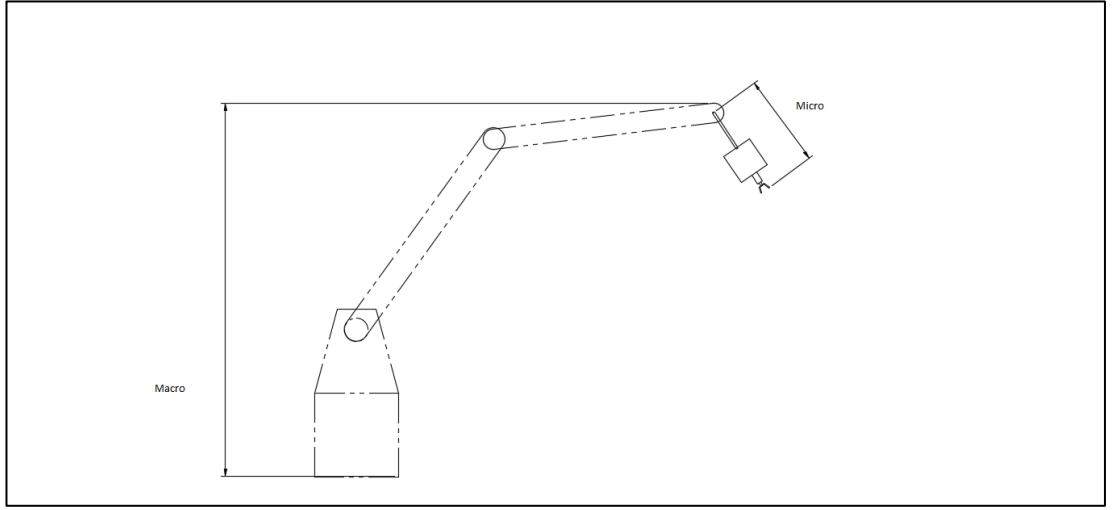
1.1 Manipülatör Türleri

Birden fazla mafsal ile bir görev gerçekleştirmek için birbirine bağlanmış uzuvların bir araya getirilmesiyle oluşan açık veya kapalı mekanizma zincirlerine manipülatör denir. Eğer bahsedilen manipülatör açık zincir mekanizması şeklinde ise bu tür manipülatörlere seri manipülatör, eğer bahsedilen manipülatör kapalı zincir şeklinde bir mekanizmandan oluşuyor ise o zaman bu tür manipülatörleri paralel manipülatör olarak adlandırabiliriz. [5-7] Andre Sharon hazırlamış olduğu doktora tezinde anlatmış olduğu üzere. Boyuta küçük olan manipülatör tiplerine mikro manipülatör, boyuta büyük olan manipülatörlere makro manipülatör denir. Makro ve mikro manipülatörler tip olarak seri veya paralel manipülatör olabilirler. Bir makro bir mikro manipülatörün birleşmesiyle ortaya çıkan manipülatör hibrit manipülatör olarak adlandırılabilir.[8]

1.2 Makro Mikro Robotik

Makro mikro manipülatörlerde amaç kullanılan manipülatörlerin en kullanışlı kısımlarından yararlanmaktadır. Makro manipülatörün geniş çalışma alanından yararlanılıp, mikro manipülatörün ise hassas konumlama kabiliyetinden yararlanıldığında ortaya geniş çalışma alanına sahip olan hassas konumlama kabiliyetli bir hibrit manipülatör çıkmış olur. Bu alışmada Makro hareketi sağlamak için tek serbestlik dereceli bir mekanizma oluşturulmuş ve hassas konumlama yapabilmek için iki serbestlik derecesi (DOF, degree of freedom) olan RR (kullanılan mafsal tipi, Revoluted, Revoluted, dönebilen mafsal) seri manipülatörünün prototip üretimi

gerçekleştirilmiştir. Üretilen prototipler birleştirilerek ortaya makro mikro hareketlerden sorumlu PRR seri artıksıl düzlemsel hibrit manipülatörü çıkartılmıştır.



Şekil 1.1: Makro mikro manipülatörün şematik gösterimi

Makro mikro manipülatörlerin şematik gösterimi yukarıda şekil (1.1) de gösterilmiştir.

1.3 Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Dünya üzerindeki programlanabilir olan ilk endüstriyel robotu George Devol ve Joseph Engelberger tarafından 1950 yıllarının sonlarında icat edilmiş olan Unimate isimli bir manipülatördür. Unimate manipülatörü ilk olarak 1959 yılında bir kokteylde içki servis etmesi için kullanılmış, 1961 yılında patenti alınarak General Motors'un Ewing Township, New Jersey'deki fabrikasında kullanılmıştır.[9]



Şekil 1.2: Devol and Engelberg yapmış olduğu Unimate manipülatörünün kokteylde içki servisi [9]

Daha sonra yaratmış oldukları Unimate robotu geliştirerek PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly, Montaj için programlanabilir evrensel makine) manipülatörlerine dönüşmüştür.

1960 ile 1970 yılları arasında birçok araştırma merkezi mikro elektronik ile ilgili çalışmaya başlayarak farklı robot manipülatörleri tasarlamışlardır. Bunlardan en çok bilinenleri arasında Stanford araştırma merkezinde Victor Scheinman adlı araştırmacı tarafından geliştirilmiş olan Stanford Arm isimli altı serbestlik derecesi olan seri manipülatördür. [10]

1980 li yıllarda robotlar medikal alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bilinen medikal alanda kullanılan ilk robot Arthrobot adında Kanda Vancouver şehrinde 1985 yılında kullanılmıştı. Kullanılan robot ses komutu ile hastanın bacağına istenilen konuma getirmektedir, ayrıca cerraha istediği cerrahi aletleri de iletebilmektedir.[11]

The Medical Post

The Maclean Hunter newspaper for the Canadian medical profession
Volume 21, No. 23 Toronto November 12, 1985

World's first surgical robot in B.C.

By OLGA LECHKY

VANCOUVER—Researchers at the University of British Columbia and the Vancouver General Hospital have developed and clinically tested what they believe to be the world's first orthopedic surgical robot.

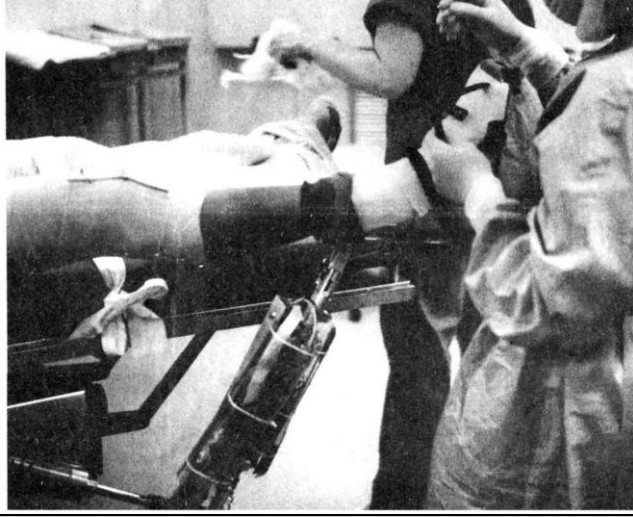
Developed under the direction of Dr. James McEwen, head of the department of biomedical engineering at VGH, the prototype advanced robot system manipulates and positions the patient's limb during orthopedic surgery on voice command by the surgeon. To date, more than 60 robot-assisted surgical arthroscopies have been performed by UBC orthopedic surgeon Dr. Brian Day and colleagues.

Dr. McEwen told The Medical Post the use of a robotic assistant during orthopedic surgical procedures has the potential to make the operation safer and to improve the quality of the result. "The surgeon no longer has to do two jobs at once—that is, manipulate the joint and perform the procedure," he said. "Or, alternatively, the surgeon no longer needs a human assistant to position and hold the limb while he operates. Holding a limb in place for long periods of time can be very fatiguing. The robot doesn't get tired and it doesn't get bored. The whole idea behind the robot is to reduce the labor intensiveness of certain surgical procedures.

"Our prototype has worked amazingly well for our first series of trials. We're very pleased with the success so far."

Dr. Day described the Arthrobot as a "breakthrough in the application of robotics in medicine." In an interview, he said: "To our knowledge, this is the first use of a robot in the operating room anywhere in the world. We started using our robot about a month before the well-publicized team in California started using their neurosurgical robot."

According to Dr. McEwen, he and colleagues did not want any publicity until they were sure their prototype was proven to be capable of carrying out its task safely and efficiently. "We made a



Şekil 1.3: Arthrobot için yayınlanmış bir gazete haberi [12]

1990 yılında Egeland ve Sagli tarafından yapılan bir çalışmada uzay aracı üzerine yerleştirilecek 12 serbestlik derecesine sahip olan bir makro mikro hibrit uzay manipülatör tasarlamışlardır. Hareket kontrolü sağladıkları manipülatörün makro kısmı ile geniş bir çalışma alanı elde ederken mikro kısmı ile de uydular üzerindeki onarım işlemlerini gerçekleştirmişlerdir.[13]

Makro mikro robotların bilinen ilk örneklerinden biri gene medikal alanında 1994 yılında Marzwell ve diğerleri tarafından yapılmıştır. Laproskopi cerrahi alanında yapılan uygulama 5 serbestlik derecesi olan bir makro manipülatör üzerine 3 serbestlik dereci olan bir mikro manipülatörün monte edilmesiyle oluşturulan hibrit manipülatörün gerçek zamanlı kuvvet kontrolü yapılmıştır. Makro robot ile geniş çalışma alanı oluşturulurken, mikro robot hassas kontörlü sayesinde insan dokusuna yakın bölgelerde çalışmıştır. [14]

Makro mikro robot uygulamaları arasında yapılmış en büyük manipülatörlerden biri Taghirad ve Nahon tarafından gerçekleştirilmiştir. Bir tarla üzerine yerleştirilen radyo teleskoplarının pozisyonlaması için kablo kontrolü ile kontrol edilen altı serbestlik

derecesine sahip bir makro robot üzerine gene altı serbestlik derecesine sahip bir mikro robot monte edilmiştir.[15]

Üretim de robotik taşlama yöntemleri seri ve paralel manipülatörler ile yüzey ve parça kalitesini arttırmak için kullanılmaktadır. Bu doğrultuda Nahavandi ve diğ. tarafından yay dengeleyicisi olan bir 5 çubuk mekanizması robotik taşlama manipülatörü olarak tasarlanmışlardır. Taşlama görevini gerçekleştirmek için hibrit bir konum – kuvvet kontrol şeması algoritması önermişler ve düşük güç ile çalışan manipülatör elde etmişlerdir. Tasarladıkları manipülatörün etkinliğini göstermek için simülasyon ve deneysel sonuçlar sunmuşlardır. [16]

Robotların endüstride talaşlı üretimde kullanılması üretilen parçalarda hassasiyeti ve kaliteyi arttırdığı gibi aynı zamanda üretim süresinde de olanak sağlamaktadır. 2012 yılında Snörno ve diğ. yapmış oldukları deneysel bir çalışmayla parça üzerinde robotik frezeleme işleminin sonuçları sunulmuştur. Benzer bir şekilde Schneider ve diğ. tarafından geliştirilen bir manipülatörde makro manipülatör iş parçasını tutarken mikro manipülatör ile freze çıkısının hassas konumlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. [17-18]

Yörünge planlama manipülatörler üzerinde pozisyon kontrolü yaparken önemli bir rol oynamaktadır. Wang ve Yun tarafından yapılan bir çalışmada robotik bant ile yüzey taşlama için otomatik yörünge planlaması için yeni algoritmayı sunulmuş ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimize edilmiş ve optimize edilmemiş deneysel taşlama sonuçları, önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için karşılaştırılmıştır.[19]

Huang ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada türbin kanat otomatik olarak taşlanması için robotik bir taşlama ve cilalama sistemi üzerinde çalışmışlardır. Pasif uyumluluk araçları (PCT'ler), uyarlanabilir yörünge planlaması ve robotik taşlamanın takım yolu optimizasyonu sunmuşlardır. [20]

Yörünge planlaması için bir çalışma Uzunoğlu ve diğ. tarafından CNC lazer kesim makinesine monte edilerek işlem süresini kısaltmak için tasarlanmış makro-mikro manipülatör kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada, lazer kesim mekanizması ile çalışan bir mikro manipülatör tasarlanmış, uç efektörün ivmesi artırılmış ve böylece parça üzerindeki işlem süreleri azaltılmıştır. Geleneksel lazer kesim makinalarının dinamik performansı lineer hareketteki hızlanma sonucu oluşan atalet kuvvetleri ve mekanik

titreşimler tarafından sınırlanmaktadır. Bunu önlemek için yüksek hız kapasitesine sahip artıksıl sistemler geliştirilmiştir. M. İ. Can DEDE ve diğ. düzlemsel lazer kesim performansını arttırmak için lazer kesim makinesini kinematik artıksıl hibrit bir mekanizma olarak yeniden yapılandırmışlardır. Bu sayede hem kinematik artıksılığın hem de paralel mekanizmanın avantajlarından yararlanmışlardır. [21-22]

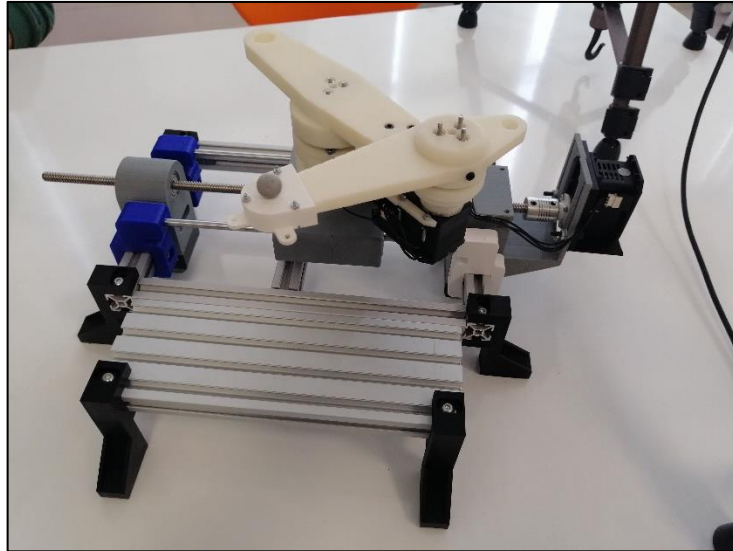
Yörünge planlaması konusunda Yuanjian Lv ve diğ. Tarafından yapılan başka bir çalışmada robotik taşlama sırasında tekerlek ve iş parçası arasındaki temaslı yüzeyde ki elastik deformasyonu dikkate alarak takım yörüngesini planlamak için malzeme kaldırma profili (MRP) modeline dayalı bir eş-tarak (iso-scallop) yüksekliği algoritması geliştirilmiş, serbest biçimli yüzeyin eğrilik değişim özelliklerine göre taşlama noktalarını uyarlamalı bir şekilde planlamak için elastik deformasyonun etkisini dikkate alan geliştirilmiş bir sabit giriş yüksekliği hata yöntemi önerilmişlerdir. Bu iki durumda robotik kayış taşlama işlemin de profil doğruluğunu geliştirmek için MRP modeli tabanlı uyarlanabilir yörünge planlama algoritması oluşturmuşlardır. [23]

MohammadHadi FarzanehKaloorazi ve diğ. tarafından yapılan çalışmada artıksıl koordinatlı bir robotik çalışma hücrelerinde belirli bir yörüngeyi planlamasını ve yerleşimini eş zamanlı, olarak optimize etmek için Parçacık sürüsü optimizasyonu yöntemini kullanan bir optimizasyon yöntemi tanıtmışlardır. Kullandıkları robotik çalışma hücreleri altı serbestliği olan bir seri manipülatör, altı serbestliği olan bir paralel manipülatör ve paralel manipülatöre bağlı dönebilen bir tabladan oluşan toplamda on üç serbestlik derecesine sahip artıksıl bir robotik sistemdir. İş hücrelerini artıksıl kinematik fazlalıktan yararlanarak, seri manipülatör için tekillikten yararlanarak, robotik hücre için ise çalışma alanı sınırlarını dikkate alarak çözüm elde etmişlerdir. [24]

Titreşim önleme, düşük sertlikteki büyük ince duvarlı kabukların taşlanması büyük bir zorluk oluşturmaktadır. İş parçası üzerinde etkili bir titreşim kontrolü yapılabilmesi için Qilong Wang diğ. tarafından yapılan bir çalışmada, robotun çalışma alanına entegre edilmiş olan kuvvet kontrollü uç efektör tarafından gerçekleştirilmesi önermişlerdir. [25]

Robotiğin talaşlı imalatta kullanılan başka bir örneği ise 2017 yılında Yusuf Hamida El Nasar ve diğ. Tarafından yapılmıştır. Talaşlı imalat sonrası üretilen parçalar üzerinde oluşan çapakların temizlenmesi için bir robot manipülatörü tasarlamışlardır. Çapak temizliği için tasarlanan üç serbestlik derecesine sahip robot manipülatörün uç efektörüne çapak temizleme aparatı yerleştirilerek yörünge ve kuvvet kontrolü uygulamışlar. [26]

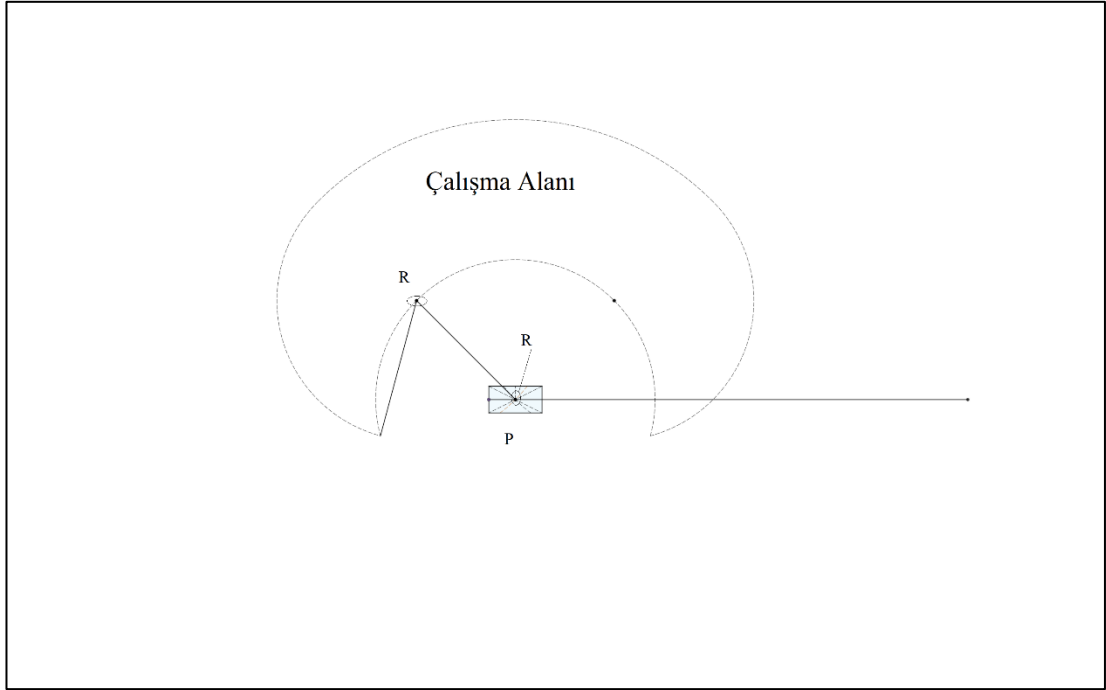
Bu tez kapsamında Makro hareketi sağlamak için tek serbestlik dereceli prizmatik mafsallı bir mekanizma oluşturulmuş ve hassas konumlama yapabilmek için iki serbestlik derecesi olan RR (Revolute, Revolute) seri manipülatörünün prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen prototipler birleştirilerek makro mikro hareketlerden sorumlu PRR seri düzlemsel artıksıl hibrit manipülatörü yüzey temizleme ve son işlem operasyonlarında kullanılmak üzere ortaya çıkartılmıştır. İlk olarak ikinci bölümde anlatılacak olan manipülatörün kinematik analizi yapılmış, üçüncü bölümde anlatılacak olan manipülatörün uç efektörünün parça üzerinde takip etmesi istenilen ve planlana yörüngesi oluşturulmuştur. Dördüncü bölümde manipülatör için yapılmış olan dinamik analiz gösterilmiş ve ardından beşinci bölümde prototip üretimi aşamaları anlatılmıştır. Altıncı ve yedinci bölümde ise simülasyon kontrol ve sonuç kısımları anlatılmıştır.



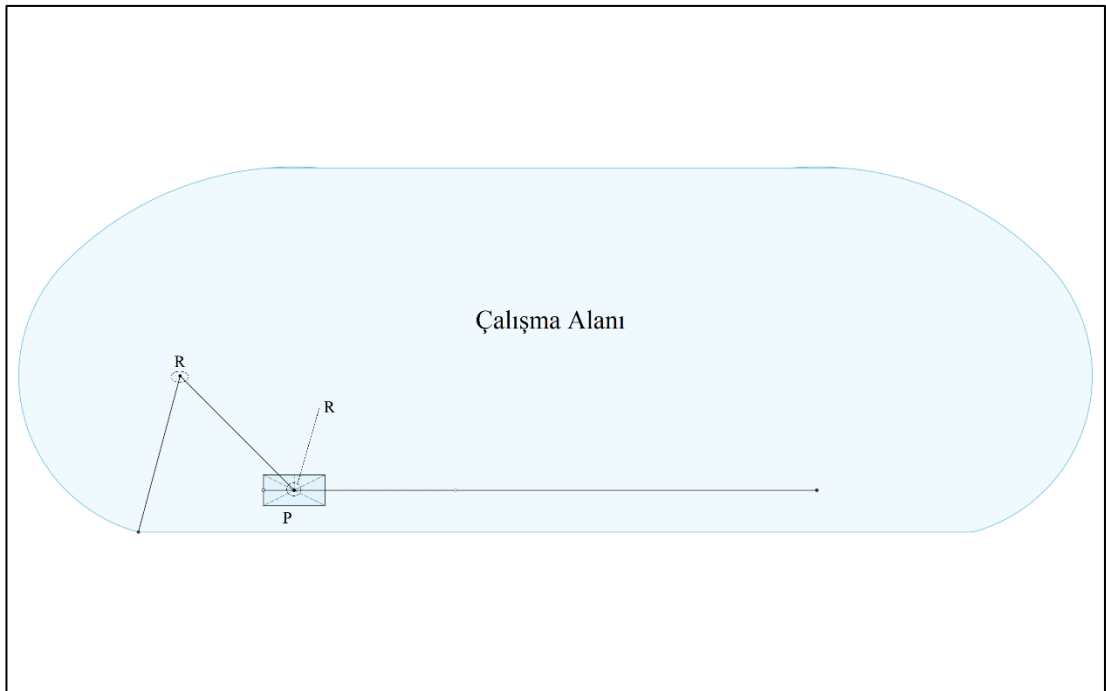
Şekil 1.4: Tasarlanan PRR seri artıksıl düzlemsel hibrit manipülatörü

Yukarıdaki şekil (1.4) bu tez kapsamında prototipi oluşturulmuş olan hibrit manipülatör gösterilmiştir. Aşağıdaki şekil (1.5) ve (1.6) da oluşturulmuş olan

prototipin en basit hali gösterilerek mikro manipülatör ve makro mekanizmanın çalışma alanları gösterilerek manipülatörün mikro ve makro kısımları tanımlanmıştır.



Şekil 1.6: Mikro manipülatörün çalışma alanı



Şekil 1.7: Makro mekanizma aktif edildiğinde oluşan çalışma alanı

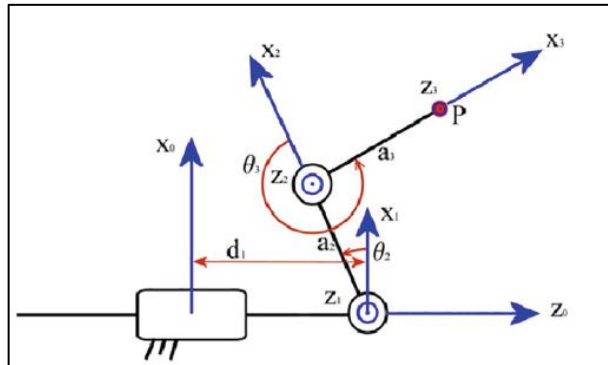
Bölüm 2

Kinematik Analiz

Oluşturulan manipülatörün konum, hız ve iveme gibi parametrelerinin bulunması için kinematik analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bu bölünme manipülatörün ileri ve geri kinematik analizleri bu bölümde gösterilecektir.

Bitirme işlemi sırasında takım için düzlemsel konumlandırma gerçekleştirmek için artıksıl üç serbestlik dereceli PRR seri düzlemsel manipülatör kullanılmasına karar verilmiştir. Oluşturulan manipülatörün mikro kısmının uç efektörü düzlemde (iki bağımsız öteleme ve bir bağımsız döndürme) hareketi tamamlaması için yeterli serbestlik derecesine sahip olmasına rağmen, ileride yörünge planlama için gerekli olan konfigürasyonu uç efektörün oryantasyonu sağlamayacağından fazladan bir prizmatik mafsal eklenerek sistemin tamamı artıksıl olarak kabul edildi.

Önerilmiş olan manipülatörün Denavit-Hartenberg kuralına göre kinematik gösterimi aşağıda ki şekil (2.1) de gösterilmiş, tablo (2.1) de ise Denavit-Hartenberg parametreleri verilmiştir.



Şekil 2.1: Önerilmiş olan PRR seri manipülatörün kinematik gösterimi [27]

Tablo 2.1: Denavit-Hartenberg parametreleri

Mafsal i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$-\pi/2$	0	d_1	0
2	0	a_2	0	θ_2
3	0	a_3	0	θ_3

Denavit-Hartenberg parametreleri kullanılarak manipülator için i ve $(i-1)$ koordinat sistemleri arasındaki transformasyon matrisi şu şekilde elde edilebilir:

$${}^{i-1}T_i = T(z_{i-1}, d_i)T(z_{i-1}, \theta_i)T(x_i, a_i)T(x_i, \alpha_i) = \begin{bmatrix} C_i & -C\alpha_i S_i & S\alpha_i S_i & a_i C_i \\ S_i & C\alpha_i C_i & -S\alpha_i C_i & a_i S_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Yukarıda gösterilen denklem (2.1) de olan transformasyon matrisinin genel gösterimi verilmiştir ve $C_i = \cos \theta_i$, $S_i = \sin \theta_i$, $C\alpha_i = \cos \alpha_i$ ve $S\alpha_i = \sin \alpha_i$ olarak gösterilmiştir.

Daha sonra denklem (2.1) de gösterilmiş olan transformasyon matrisine tablo (2.1) de bulunan Denavit-Hartenberg parametreleri yerleştirilerek sıfıncı ve üçüncü koordinat sistemleri arasında bulunan transformasyon matrisi 0T_3 şekilde elde edilmiştir:

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & p_x \\ u_y & v_y & w_y & p_y \\ u_z & v_z & w_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Burada $u_x = C_{23}$, $u_y = 0$, $u_z = -S_{23}$, $v_x = -S_{23}$, $v_y = 0$, $v_z = -C_{23}$, $w_x = 0$, $w_y = 1$, $w_z = 0$, $p_x = a_2 C_2 + a_3 C_{23}$, $p_y = 0$, $p_z = d_1 - a_2 S_2 - a_3 S_{23}$, $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ ve $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ değerlerini belirtmektedir.

2.1 İleri Kinematik

İleri kinematiğin ana amacı manipülatorün uç efektörünün konumun ve oryantasyonun ana koordinat sistemine göre verilen d_1 , θ_2 ve θ_3 gibi girdi değişkenleri ile hesaplamaktır. Transformasyon matrisi 0T_3 oluşturulduktan sonra uç efektörün düzlemindeki herhangi bir konum vektörü ${}^3q = [{}^3q_x, {}^3q_y, {}^3q_z, 1]^T$, ana eksene göre ${}^0q = [{}^0q_x, {}^0q_y, {}^0q_z, 1]^T$ ifade etmek için transformasyon matrisi kullanılabilir.

$${}^0q = {}^0T_6 {}^6q \quad (2.3)$$

0T_3 transformasyon matrisinin son kolunun da bulunan (p_x, p_y, p_z) manipülatörün konumunu, ilk üç kolunda bulunan (u_x, u_y, u_z) , (v_x, v_y, v_z) , (w_x, w_y, w_z) ise manipülatörün ana eksene göre olan dönüşünü göstermektedir.

$${}^0R_3 = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Burada $u_x = C_{23}$, $u_y = 0$, $u_z = -S_{23}$, $v_x = -S_{23}$, $v_y = 0$, $v_z = -C_{23}$, $w_x = 0$, $w_y = 1$, $w_z = 0$, $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ ve $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ değerlerini belirtmektedir.

2.2 Ters Kinematik

Ters kinematik, uç efektör konumu ve oryantasyonu belirli olan bir manipülatörün mafsallık girdi değişkenlerinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamındaki yörünge planlama görevleri sırasında oryantasyon bilgisine ihtiyaç duyulmayacağından, gerekli girdi değişkenleri d_1 , θ_2 ve θ_3 yalnızca uç efektör konum bilgisi kullanarak hesaplanmıştır. Sistem düzlemsel olarak çalıştığından konum girdi değişkenlerinden bir tanesi (p_y) her zaman sıfır olacaktır. Dolayısıyla üç bilinmeyen girdi değişkeni ve iki denklem şu şekilde elde edilmiştir.

$$p_x = a_2 C_2 + a_3 C_{23}, \quad p_z = d_1 - a_2 S_2 - a_3 S_{23} \quad (2.5)$$

Yukarıdaki belirtilen denklemlerin sınırsız sayıda girdi değişkeni için çözümü bulunmaktadır. Burada manipülatör üzerinde bulunan prizmatik mafsallık sistemde sadece tek eksende pozisyonlama amacıyla kullanılacağından ötürü ters kinematik analiz gerçekleştirilirken prizmatik mafsaldan gelen girdi değişkeninin etkisi hesaba katılmamıştır. Yani d_1 değişkeni 0 olarak alınca yukarıdaki denklemler (2.5) aşağıdaki denklemlere dönüşmüştür.

$$p_x = a_2 C_2 + a_3 C_{23}, \quad p_z = -a_2 S_2 - a_3 S_{23} \quad (2.6)$$

Yukarıda denklemler (2.6) de görüldüğü gibi iki bilinmeyen ve iki denklem elde edilmiştir. Elde edilen denklemlerin (2.6) ayrı ayrı kareleri alınarak birbirlerine eklenmesi sonucu θ_3 değeri ortaya çıkmıştır.

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{p_x^2 + p_z^2 + a_2^2 + a_3^2}{2a_2 a_3} \quad (2.7)$$

θ_2 değerini hesaplamak için yukarıda bulunan denklemler (2.6) bilinen ve bilinmeyenlere göre tekrar düzenlenmesiyle;

$$p_x = k_1 C_2 - k_2 S_2, p_z = -k_1 S_2 - k_2 C_2, k_1 = a_2 + C_3, k_2 = a_3 S_3 \quad (2.8)$$

Yukarıda bulunan denklem gurubu (2.8) kullanılarak basit matematiksel işlemler sonucunda θ_2 değeri;

$$\theta_2 = \text{Atan2}(-p_z, p_x) - \text{Atan2}(k_2, k_1) \quad (2.9)$$

Şeklinde hesaplanabilir. Yukarıdaki denklem (2.7) hesaplaması sonucu iki farklı θ_3 değeri bulunmaktadır her θ_3 değeri için denklem (2.9) tek bir sonuç vermektedir. Hesaplamalar sonucu oluşan θ_2 ve θ_3 değeri aşağıda tablo (2.2) de gösterilmiştir.

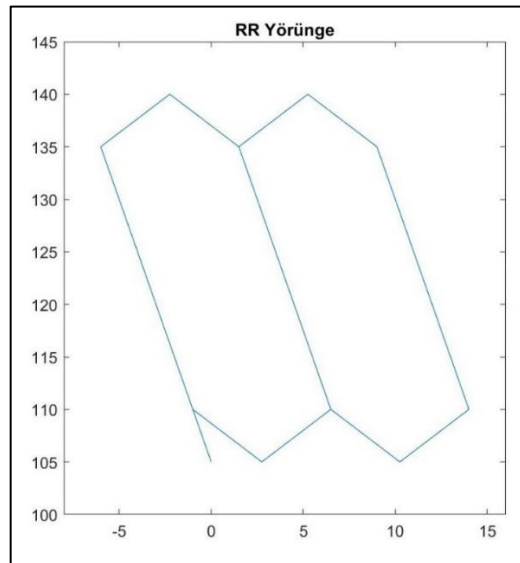
Tablo 2.2: Hesaplamalar sonucu oluşan θ_2 ve θ_3 açı değerleri

Zaman	θ_2 Radyan	θ_3 Radyan	Px (mm)	Pz (mm)
t ₁	1,0472	-2,0944	105	0
t ₂	1,0285	-2,0389	110	-1
t ₃	0,9162	-1,7435	135	-6
t ₄	0,8570	-1,6819	140	-2,25
t ₅	0,8614	-1,7450	135	-1,5
t ₆	0,9594	-2,0368	110	6,5
t ₇	0,9471	-2,0889	105	10,25
t ₈	0,8879	-2,0290	110	14
t ₉	0,8041	-1,7414	135	9
t ₁₀	0,8030	-1,6809	140	5,25
t ₁₁	0,8614	-1,7450	135	1,5
t ₁₂	0,9594	-2,0368	110	6,5
t ₁₃	1,0208	-2,0940	105	2,75
t ₁₄	1,0285	-2,0389	110	-1
t ₁₅	0,9162	-1,7435	135	-6

Bölüm 3

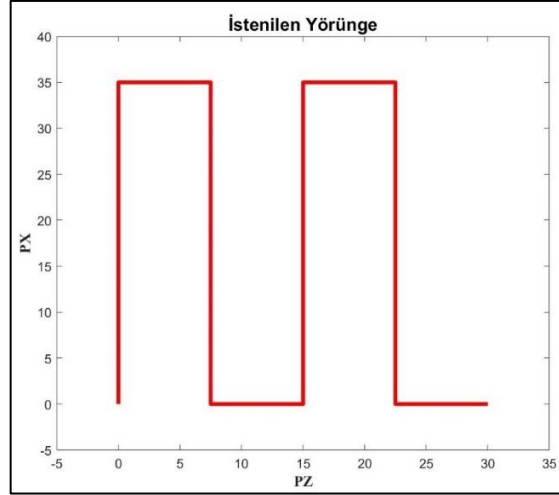
Çalışma Yörüngesi Analizi

Bu bölümde tasarlanmış olan hibrit robot manipülatörünün mikro kısmı olan RR kısmının uç efektörünün takip edeceği yörüngenin oluşturulması ve hesaplamalarında bahsedilecektir. Tasarlanana PRR hibrit seri manipülatörü robotik parça işleme operasyonlarından, yüzey temizleme ve bitirme(son) işlemi için kullanılması planlanmaktadır. Yüzey temizleme ve bitirme işlemleri oluşturulan parçalar üzerinde kaliteyi belirleyen en önemli unsurlardan biri olduğundan dolayı yüksek hassasiyet gerektirmektedir. Bu nedenle robotun uç efektörüne bağlanması planlanan takım tezgahının takip edeceği yörüngenin planlanması çalışma için en önemli görevlerden biri haline gelmiştir. Bu amaç doğrultusunda planlamaların daha basite indirgenmesi ve hassasiyetin artırılması için oluşturulan hibrit manipülatör olan PRR seri manipülatörünün mikro hareket kısmından sorumlu olan RR kısmı için yörünge planlamaları yapılmıştır.



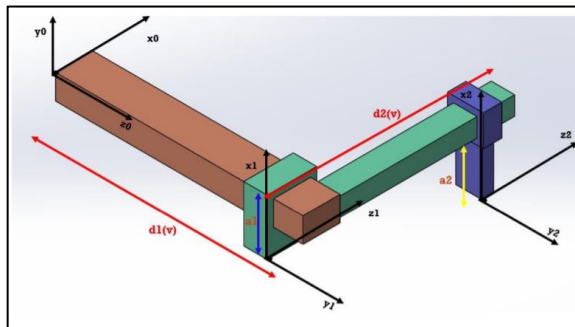
Şekil 3.1: Robotun RR kısmı için planlana yörünge

Yukarıda şekil (3.1) de Robotun RR kısmının uç efektörünün izlemesi planlanan yol gösterilmiştir. Planlanan bu yörünge daha sonra prizmatik mafsallı makro mekanizma sayesinde parça üzerinde ötelenerek aşağıdaki Şekil (3.2) de görülmekte olan yola dönüşmektedir.



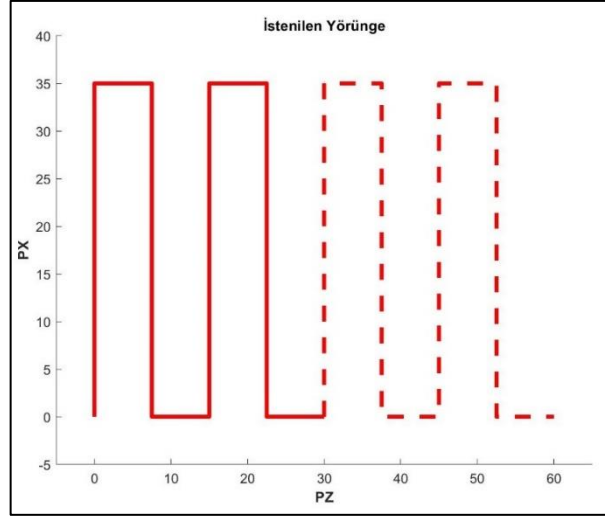
Şekil 3.2: Parça üzerinde takip edilmesi istenilen gerçek yol

Manipülatörün hareketi başladığında hibrit manipülatörün uç efektörü, manipülatörün mikro kısmı olan RR kısmı Şekil 3.1 gösterilmiş hareketi gerçekleştirirken manipülatörün tamamı Makro kısımdaki prizmatik mafsallı mekanizma sayesinde Şekil 3.2 de gösterilen hareketi gerçekleştirecektir. Yukarıda Şekil 3.2 de gösterilmiş olan yörünge aslından aşağıda şekil 3.3 de kinematik gösterimi bulunan iki tane Prizmatik mafsallı bulunduran Kartezyen çalışan bir robot ile gerçekleştirilebilir. Ancak bu işlemin Kartezyen robot ile gerçekleştirilmesi için robot üzerinde bulunan motorların sürekli durup tekrar çalışması gerekmektedir. Tasarlanan manipülatör sayesinde harekette süreklilikte sağlanması planlanmıştır.

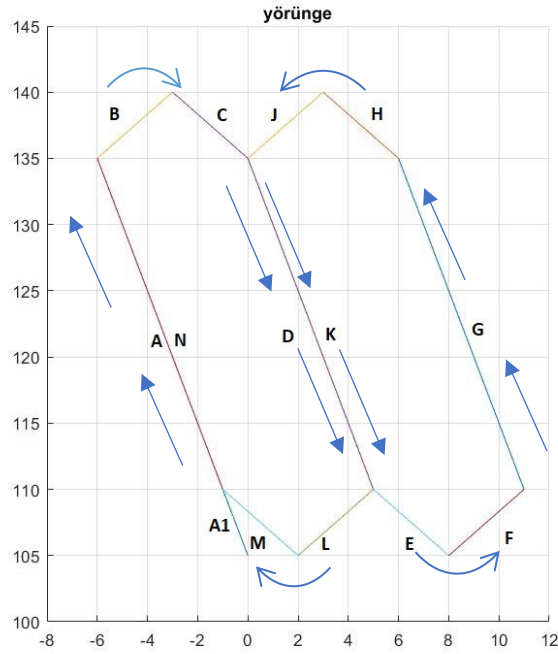


Şekil 3.3: 2DOF düzlemsel kartezyen manipülatör örneği

Yukarıda Şekil 3.2 de gösterilmiş olan parça üzerinde ki çalışma alanı oluşturulabilmesi için manipülatörün RR kısmı için oluşturulan çalışma alanı birden çok eşit parçalara bölünmelidir ve hareketin sürekliliği için son durumda başlangıç noktasına geri dönmelidir.



(a)



(b)

Şekil 3.4: (a) Manipülatörün uç efektörünün parça üzerinde izlemesi planına yörüngeyi döngü halinde gösterimi (b) Manipülatörün RR kısmının uç efektörünün yörüngesinin segmentlere ayrılmış gösterimi

Şekil (3.4) a ve b de daha önceden Şekil (3.1) ve Şekil (3.2) de gösterilmiş olan planlanmış yörüngelerin döngü ve segmentlere ayrılmış versiyonunu gösterimidir. Şekil (3.4) a manipülatörün uç efektörünün parça üzerindeki takip etmesi istenilen yörüngenin döngü halinde gösterilişi olup, düz çizgi ile çizilen bölüm ilk döngüyü oluşturan hareketi göstermek, kesikli çizgiler ise hareketin sonraki döngülerde devamlılığını göstermektedir. Şekil (3.4) b de ise manipülatörün RR kısmının takip etmesi planlanan yörüngenin alt segmentlere ayrılmış hali gösterilmiş olup bu yörünge Şekil (3.4) a da gösterilen birinci döngüyü oluşturmaktadır ve bir döngünün süresi 21 saniye olacak şekilde planlanmıştır. Her alt segment bir harf ile gösterilmiştir. Bu harfler sırasıyla A1, A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N olarak belirlenmiştir.

Manipülatörün RR kısmının yörüngesi oluşturulurken mafsallı pozisyonları olan θ_2 ve θ_3 değişkenleri zamana bağlı birer polinom olarak önerilmiştir.

$$\begin{aligned}
 i &= 2,3 \\
 \theta_i A1 &= a_1 t^3 + b_1 t^2 + c_1 t + d_1 \\
 \theta_i A &= a_2 t^3 + b_2 t^2 + c_2 t + d_2 \\
 \theta_i B &= a_3 t^3 + b_3 t^2 + c_3 t + d_3 \\
 \theta_i C &= a_4 t^3 + b_4 t^2 + c_4 t + d_4 \\
 \theta_i D &= a_5 t^3 + b_5 t^2 + c_5 t + d_5 \\
 \theta_i E &= a_6 t^3 + b_6 t^2 + c_6 t + d_6 \\
 \theta_i F &= a_7 t^3 + b_7 t^2 + c_7 t + d_7 \\
 \theta_i G &= a_8 t^3 + b_8 t^2 + c_8 t + d_8 \\
 \theta_i H &= a_9 t^3 + b_9 t^2 + c_9 t + d_9 \\
 \theta_i J &= a_{10} t^3 + b_{10} t^2 + c_{10} t + d_{10} \\
 \theta_i K &= a_{11} t^3 + b_{11} t^2 + c_{11} t + d_{11} \\
 \theta_i L &= a_{12} t^3 + b_{12} t^2 + c_{12} t + d_{12} \\
 \theta_i M &= a_{13} t^3 + b_{13} t^2 + c_{13} t + d_{14} \\
 \theta_i N &= a_{14} t^4 + b_{14} t^3 + c_{14} t^2 + d_{14} t + e_{14}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Burada yukarıdaki denklem grubu (3.1) de görüldüğü üzere bilinmeyen katsayılar a_k , b_k , c_k , d_k , $k=1,2,\dots,14$ e kadar ve e_{14} ten oluşmaktadır. Toplam 57 adet bilinmeyen katsayı oluşturulmuştur. Şekil(3.1) deki son denklemde polinomun derecesinin artmasının sebebi, uç efektör A1 alt segmentinden M alt segmentine kadar olan bir turunu tamamladıktan sonra ikinci tura durmada devam edebilmesini sağlamaktır.

Döngü üzerindeki zaman aralığı ise her alt segmentinin başlangıç ve bitiş noktası bir zamanı belirtecek şekilde 21 saniyelik hareket 15 parçaya bölünmüştür. Zaman aralıkları olan t değerleri sırasıyla aşağıdaki tablo (3.1) da gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Örnek zaman değerleri

Zaman	Saniye
t ₁	0
t ₂	0,5
t ₃	3
t ₄	4
t ₅	5
t ₆	7,5
t ₇	8,5
t ₈	9,5
t ₉	12
t ₁₀	13
t ₁₁	14
t ₁₂	16,5
t ₁₃	17,5
t ₁₄	18,5
t ₁₅	21

İlk olarak hareketin başlangıç noktası olan A1 segmentinin başında manipülatörün uç efectörünün başlangıç konumu belirli olduğundan;

$$\theta_2 A1(t_1) = 60^\circ; \theta_3 A1(t_1) = -120^\circ \quad (3.2)$$

$$\dot{\theta}_i A1(t_1) = 0, \ddot{\theta}_i A1(t_1) = 0 \quad i = 2, 3 \quad (3.3)$$

Denklem (3.2) de $\theta_2 A1$ ve $\theta_3 A1$ değerlerinin başlangıç konumlarındaki açıları gösterilmiştir. Denklem (3.3) te ise manipülatör harekete başladığında durmakta olduğu için A1 segmentinde hareketin başladığı anda ilk hız ve ivme değeri 0 olarak belirtilmiştir. Bu durumda her bir alt segment için başlangıç ve bitiş noktalarında pozisyon, hız ve ivme eşitlikleri yazılmıştır.

$$\begin{aligned}
 \theta_i A1(t_2) &= \theta_i A(t_2) \\
 \theta_i A(t_3) &= \theta_i B(t_3) \\
 \theta_i B(t_4) &= \theta_i C(t_4) \\
 \theta_i C(t_5) &= \theta_i D(t_5) \\
 \theta_i D(t_6) &= \theta_i E(t_6) \\
 \theta_i E(t_7) &= \theta_i F(t_7) \\
 \theta_i F(t_8) &= \theta_i G(t_8) \\
 \theta_i G(t_9) &= \theta_i H(t_9) \\
 \theta_i H(t_{10}) &= \theta_i J(t_{10}) \\
 \theta_i J(t_{11}) &= \theta_i K(t_{11}) \\
 \theta_i K(t_{12}) &= \theta_i L(t_{12}) \\
 \theta_i L(t_{13}) &= \theta_i M(t_{13}) \\
 \theta_i M(t_{14}) &= \theta_i N(t_{14})
 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Denklem grubu (3.4) de segmentler arasındaki başlangıç ve bitiş noktalarındaki konum eşitlikler gösterilmiştir

$$\begin{aligned}
\dot{\theta}_i A1(t_2) &= \dot{\theta}_i A(t_2) \\
\dot{\theta}_i A(t_3) &= \dot{\theta}_i B(t_3) \\
\dot{\theta}_i B(t_4) &= \dot{\theta}_i C(t_4) \\
\dot{\theta}_i C(t_5) &= \dot{\theta}_i D(t_5) \\
\dot{\theta}_i D(t_6) &= \dot{\theta}_i E(t_6) \\
\dot{\theta}_i E(t_7) &= \dot{\theta}_i F(t_7) \\
\dot{\theta}_i F(t_8) &= \dot{\theta}_i G(t_8) \\
\dot{\theta}_i G(t_9) &= \dot{\theta}_i H(t_9) \\
\dot{\theta}_i H(t_{10}) &= \dot{\theta}_i J(t_{10}) \\
\dot{\theta}_i J(t_{11}) &= \dot{\theta}_i K(t_{11}) \\
\dot{\theta}_i K(t_{12}) &= \dot{\theta}_i L(t_{12}) \\
\dot{\theta}_i L(t_{13}) &= \dot{\theta}_i M(t_{13}) \\
\dot{\theta}_i M(t_{14}) &= \dot{\theta}_i N(t_{14})
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Denklem grubu (3.5) de segmentler arasındaki başlangıç ve bitiş noktalarındaki hız eşitlikler gösterilmiştir

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_i A1(t_2) &= \ddot{\theta}_i A(t_2) \\
\ddot{\theta}_i A(t_3) &= \ddot{\theta}_i B(t_3) \\
\ddot{\theta}_i B(t_4) &= \ddot{\theta}_i C(t_4) \\
\ddot{\theta}_i C(t_5) &= \ddot{\theta}_i D(t_5) \\
\ddot{\theta}_i D(t_6) &= \ddot{\theta}_i E(t_6) \\
\ddot{\theta}_i E(t_7) &= \ddot{\theta}_i F(t_7) \\
\ddot{\theta}_i F(t_8) &= \ddot{\theta}_i G(t_8) \\
\ddot{\theta}_i G(t_9) &= \ddot{\theta}_i H(t_9) \\
\ddot{\theta}_i H(t_{10}) &= \ddot{\theta}_i J(t_{10}) \\
\ddot{\theta}_i J(t_{11}) &= \ddot{\theta}_i K(t_{11}) \\
\ddot{\theta}_i K(t_{12}) &= \ddot{\theta}_i L(t_{12}) \\
\ddot{\theta}_i L(t_{13}) &= \ddot{\theta}_i M(t_{13}) \\
\ddot{\theta}_i M(t_{14}) &= \ddot{\theta}_i N(t_{14})
\end{aligned} \tag{3.6}$$

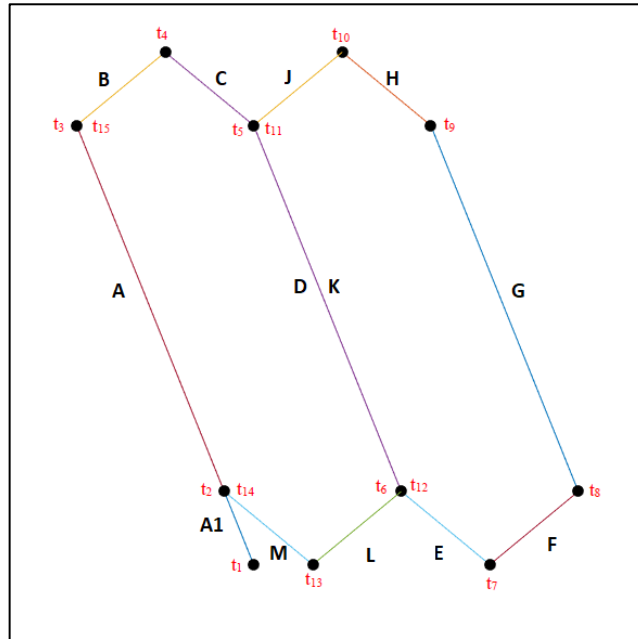
Denklem grubu (3.6) da ise segmentler arasındaki başlangıç ve bitiş noktalarındaki ivme eşitlikler gösterilmiştir. Son olarak 1 tur tamamlandığında hareket tekrar devam ettiğinde A1 segmenti tekrar yapılmayacaktır. İkinci tur başladığında hareket A segmentinden devam edecektir. Bu durumda $i=2,3$ olmak üzere;

$$\begin{aligned}
\theta_i N(t_{15}) &= \theta_i A(t_2) \\
\dot{\theta}_i N(t_{15}) &= \dot{\theta}_i A(t_2) \\
\ddot{\theta}_i N(t_{15}) &= \ddot{\theta}_i A(t_2)
\end{aligned} \tag{3.7}$$

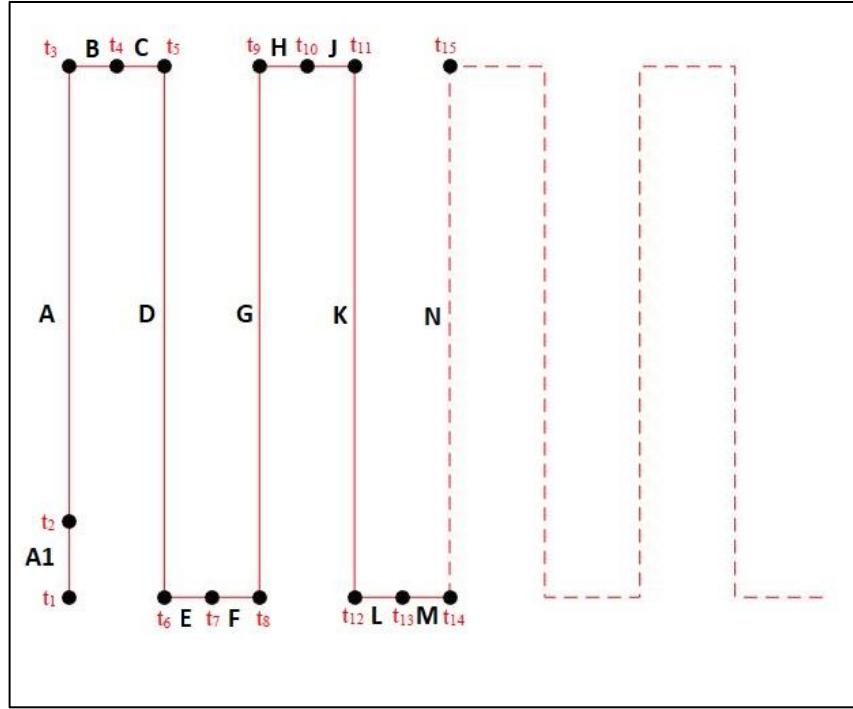
Denklem grubu (3.7) de gösterilmiş olan eşitlik sağlanmaktadır. Bu durumda hareket devamlılığı olduğu ve ivmenin değeri sıfır dan farklı bir değer olduğu için denklem (3.1) de gösterilmiş olan denklemlerde N segmentin de polinomun kat sayısı bir arttırılmıştır.

Tablo 3.2: Denklem grubu (3.2) ile (3.7) arasında bulunan denklemlerin yörünge üzerindeki zaman karşılıkları

Zaman noktaları	Zamanlar	Pozisyon	Hız	İvme
t_1	0	$\theta_2 A1(t_1) = 60^\circ;$ $\theta_3 A1(t_1) = -120^\circ$	$\dot{\theta}_i A1(t_1) = 0$	$\ddot{\theta}_i A1(t_1) = 0$
t_2	0,5	$\theta_i A1(t_2) = \theta_i A(t_2)$	$\dot{\theta}_i A1(t_2) = \dot{\theta}_i A(t_2)$	$\ddot{\theta}_i A1(t_2) = \ddot{\theta}_i A(t_2)$
t_3	3	$\theta_i A(t_3) = \theta_i B(t_3)$	$\dot{\theta}_i A(t_3) = \dot{\theta}_i B(t_3)$	$\ddot{\theta}_i A(t_3) = \ddot{\theta}_i B(t_3)$
t_4	4	$\theta_i B(t_4) = \theta_i C(t_4)$	$\dot{\theta}_i B(t_4) = \dot{\theta}_i C(t_4)$	$\ddot{\theta}_i B(t_4) = \ddot{\theta}_i C(t_4)$
t_5	5	$\theta_i C(t_5) = \theta_i D(t_5)$	$\dot{\theta}_i C(t_5) = \dot{\theta}_i D(t_5)$	$\ddot{\theta}_i C(t_5) = \ddot{\theta}_i D(t_5)$
t_6	7,5	$\theta_i D(t_6) = \theta_i E(t_6)$	$\dot{\theta}_i D(t_6) = \dot{\theta}_i E(t_6)$	$\ddot{\theta}_i D(t_6) = \ddot{\theta}_i E(t_6)$
t_7	8,5	$\theta_i E(t_7) = \theta_i F(t_7)$	$\dot{\theta}_i E(t_7) = \dot{\theta}_i F(t_7)$	$\ddot{\theta}_i E(t_7) = \ddot{\theta}_i F(t_7)$
t_8	9,5	$\theta_i F(t_8) = \theta_i G(t_8)$	$\dot{\theta}_i F(t_8) = \dot{\theta}_i G(t_8)$	$\ddot{\theta}_i F(t_8) = \ddot{\theta}_i G(t_8)$
t_9	12	$\theta_i G(t_9) = \theta_i H(t_9)$	$\dot{\theta}_i G(t_9) = \dot{\theta}_i H(t_9)$	$\ddot{\theta}_i G(t_9) = \ddot{\theta}_i H(t_9)$
t_{10}	13	$\dot{\theta}_i H(t_{10}) = \dot{\theta}_i J(t_{10})$	$\dot{\theta}_i H(t_{10}) = \dot{\theta}_i J(t_{10})$	$\ddot{\theta}_i H(t_{10}) = \ddot{\theta}_i J(t_{10})$
t_{11}	14	$\theta_i J(t_{11}) = \theta_i K(t_{11})$	$\dot{\theta}_i J(t_{11}) = \dot{\theta}_i K(t_{11})$	$\ddot{\theta}_i J(t_{11}) = \ddot{\theta}_i K(t_{11})$
t_{12}	16,5	$\theta_i K(t_{12}) = \theta_i L(t_{12})$	$\dot{\theta}_i K(t_{12}) = \dot{\theta}_i L(t_{12})$	$\ddot{\theta}_i K(t_{12}) = \ddot{\theta}_i L(t_{12})$
t_{13}	17,5	$\theta_i L(t_{13}) = \theta_i M(t_{13})$	$\dot{\theta}_i L(t_{13}) = \dot{\theta}_i M(t_{13})$	$\ddot{\theta}_i L(t_{13}) = \ddot{\theta}_i M(t_{13})$
t_{14}	18,5	$\theta_i M(t_{14}) = \theta_i N(t_{14})$	$\dot{\theta}_i M(t_{14}) = \dot{\theta}_i N(t_{14})$	$\ddot{\theta}_i M(t_{14}) = \ddot{\theta}_i N(t_{14})$
t_{15}	21	$\theta_i N(t_{15}) = \theta_i A(t_3)$	$\dot{\theta}_i N(t_{15}) = \dot{\theta}_i A(t_3)$	$\ddot{\theta}_i N(t_{15}) = \ddot{\theta}_i A(t_3)$



Şekil 3.5: Denklem grubu (3.2) ile (3.7) arasında bulunan denklemlerin yörünge üzerinde denk geldiği noktaların gösterilişi



Şekil 3.6: Denklemlerin parça yörüngesi üzerindeki noktalarının gösterilişi

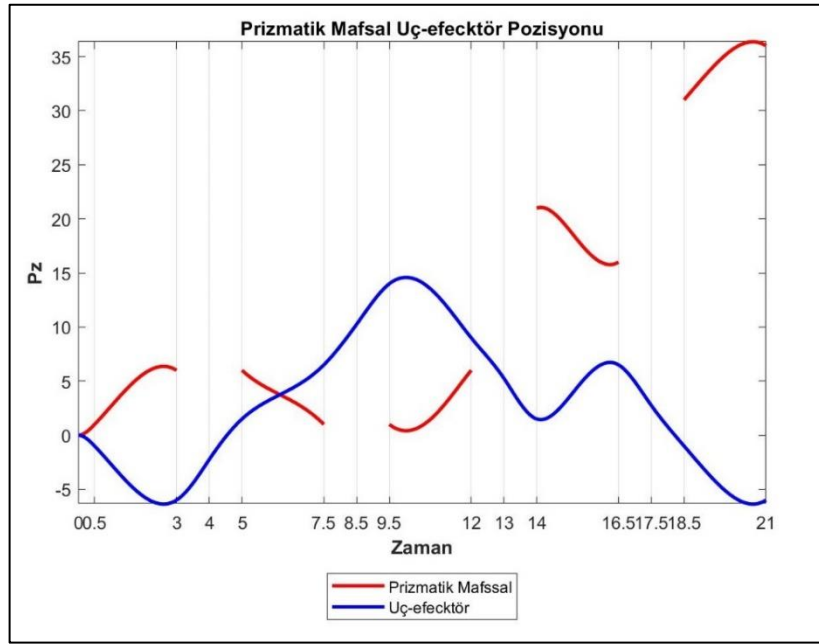
Yukarıdaki tablo (3.2) de manipulatörün RR kısmı için oluşturulmuş olan yörüngenin segmentler arasında zaman noktalarına ayıtlığı tablo halinde gösterilmiş olup bu zaman noktaları şekil (3.5) te RR kısmının yörüngesi üzerinde şekil (3.6) da manipulatörün parça üzerinde takip etmesi istenen gerçek yörünge üzerinde gösterilmiştir.

Alt segmentler için oluşturulan denklemlerde (3.1) görüldüğü üzere 57 tane bilinmeyen bulunmaktadır. Geri kinematik sayesinde her alt segmentin başlangıç noktasında hesaplanmış olan açı değerleri kullanılarak ve yukarıda tablo (3.2) de gösterilmiş olan eşitlikler sınır şartı olarak kullanılarak 57 tane denklem elde edilmiş ve bu 57 denklem aynanada çözülmüştür.

3.1 Prizmatik Mafsal Analizi

Bu bölümde tasarlanan manipulatörün RR kısmı için oluşturulan yörüngenin prizmatik mafsal mekanizma yardımıyla ötelenerek parça üzerinde hareket alanı için planlanan yörüngenin oluşması için yapılan çalışmalar anlatılacaktır.

Yukarıdaki bölümde manipülatörün parça üzerinde izlemesi istenilen asıl çalışma alanı olan yörünge şekil (3.2) de gösterilmişti. Bu yörüngeye ulaşmak için manipülatörün RR kısmı için şekil (3.1) de gösterilmiş olan yörünge oluşturulmuş ve bu yörünge hareketinin sağlanması için şekil (3.4)(b) de gösterildiği gibi alt segmentlere ayrılmıştır. Yörüngeyi şekil (3.1) de ki halinden şekil (3.2) de gösterildiği haline geçmesi için prizmatik mafsalı mekanizmaya pozisyon kontrolü uygulanarak manipülatörün RR kısmında Pz yönünde gerçekleşen pozisyon değişiminin tersi konum bilgisi olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.7: Uç-efektör, prizmatik mafsal konum zaman grafiği (boşluklu)

Yukarıdaki şekil (3.7) de gösterilen mavi ile çizilen çizgi ise manipülatörün RR kısmının uç-efektörünün konumunun 21 saniyelik 1 turdaki değişimini göstermektedir. Kırmızı çizgi ile gösterilmiş olan çizgiler ise manipülatörün makro hareketinden sorumlu olan prizmatik mafsalın istenilen yörüngeye ulaşması için gerekli olan konum bilgilerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere prizmatik mafsalın konum bilgileri arasında boş bırakılan bölümler olmuştur. Bu bölümler şekil (3.5) te gösterilmiş olan RR seri mikro manipülatörünün B, C, E, F, H, J, K ve L alt segmentlerinin olduğu bölümlerdir. Zaman aralığı olarak 3 ile 5 ve 7.5 ile 9.5 saniyeleri arasında istenilen yörüngeye ulaşılması için prizmatik mafsalın konum değişimi segmentlerin başlangıç ve bitiş anında aynı kalmalıdır. B segmentinin başlangıcı olan 3. saniyede uç efektörün konumu -6 da iken prizmatik mafsalın

konumu 6 da olmalı, C segmentinin bitişinde uç efektörün konumu -2 de iken prizmatik mafsalın konumunun tekrar 6 da olması gerekmektedir. Bu durumda şekil (3.1) de gösterilmiş olan RR seri mikro manipülatörünün yörüngesinin ötelenmiş ve Pz yönündeki ilerleme yalnızca mikro manipülatör tarafından sağlanmış olacaktır. Bu işlem E ve F segmentleri içinde aynı şekilde devam ederken 12.5. saniyede başlayan H ve J segmentleri için biraz daha farklı bir şekilde devam etmektedir. şekil (3.5) te gösterilmiş olan RR seri manipülatör yörüngesi yeniden incelendiğinde görüldüğü üzere H segmentinde hareket geriye dönmektedir. Bu durumda istenilen yörüngeye ulaşılması için hibrit manipülatörde bulunan prizmatik mafsal 2 katı hız ile hareket etmesi gerekmektedir. Bu sayede RR seri mikro manipülatörü için uç-efektör geriye doğru hareket ederken manipülatörün tamamına bakıldığında uç-efektörün hareketi ileriye doğru olacaktır. Arada oluşan bölümlerin konum bilgilerinin oluşturulabilmesi için;

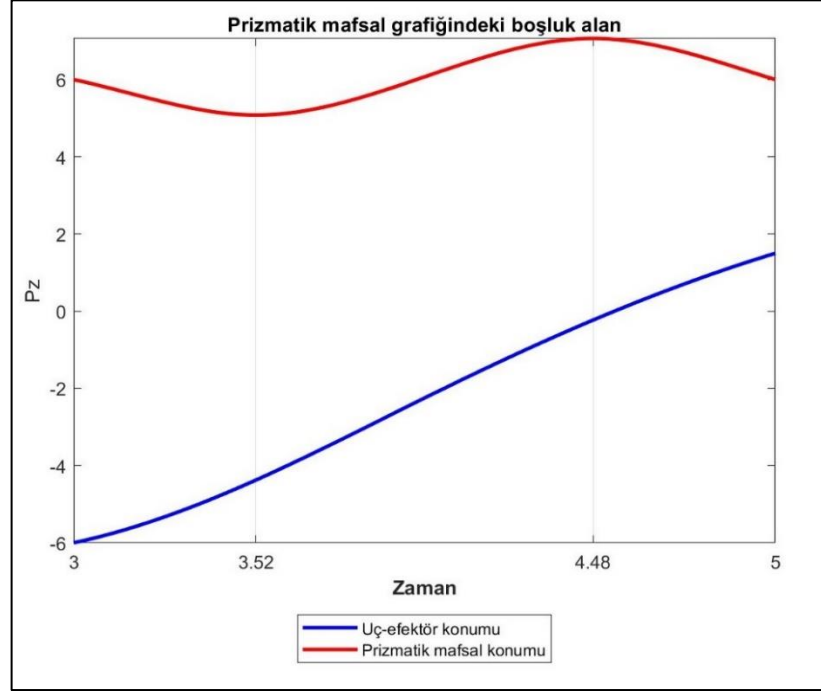
$$\begin{aligned}
at^3 + bt^2 + ct + d &= Pz @t = 3 \\
3at^2 + 2bt + c &= Vz @t = 3 \\
6at + 2b &= Az @t = 3 \\
pt^3 + qt^2 + rt + s &= Pz @t = 5 \\
3pt^2 + 2qt + r &= Vz @t = 5 \\
6pt + 2q &= Az @t = 5 \\
3at^2 + 2bt + c &= 0 @t = tm1 \\
3et^2 + 2ft + g &= 0 @t = tm1 \\
3et^2 + 2ft + g &= 0 @t = tm2 \\
3pt^2 + 2qt + r &= 0 @t = tm2 \\
6at + 2b - (6et + 2f) &= 0 @t = tm1 \\
6et + 2f - (6pt + 2q) &= 0 @t = tm2
\end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\int_3^{tm1} 3at^2 + 2bt + c + \int_{tm1}^{tm2} 3et^2 + 2ft + g + \int_{tm2}^5 3pt^2 + 2qt + r = 0$$

Yukarıda denklem grubu (3.8) de gösterilmiş olan denklemler oluşturulmuştur. Buradaki denklemler oluşturulurken üçüncü ve beşinci saniyelerdeki konum, hız ve ivme bilgileri bilinmektedir. Mafsal bir yönde hızlanırken yavaşlayıp duracağından ve diğer yönde tekrar hareketinin başlayacağı için iki zaman noktasında (tm1, tm2) hız

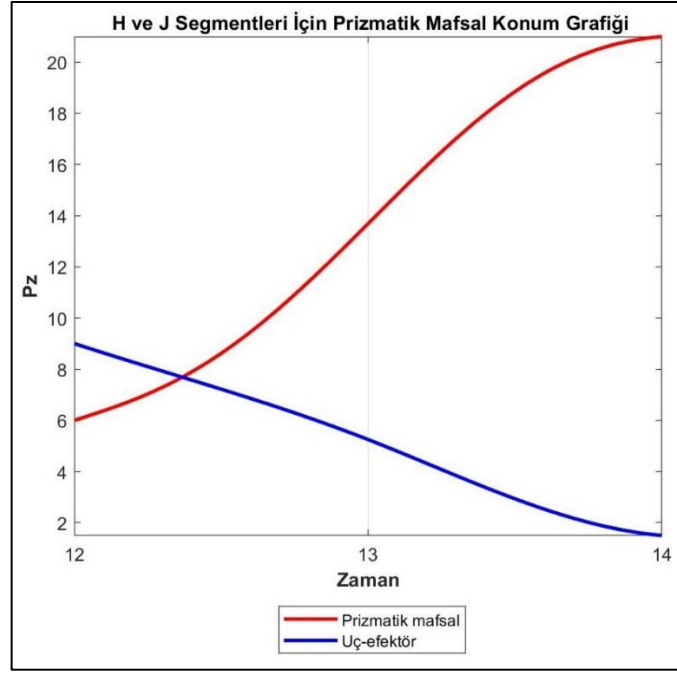
değerleri 0 olacaktır. Son olarak bu noktalar arasında hız grafiği altında kalan alanlardan ivme değerlerinin toplamı 0 olacağından denklem grubunda integral toplamı 0 olacak şekilde belirtilmiştir.

Yukarıda belirtilmiş olan denklem grubu (3.8) de gösterilmiş olan denklemler çözüldükten sonra grafik üzerinde gösterilmiş olan boş bölüm aşağıdaki şekil (3.8) de gösterildiği gibi dolmuştur.



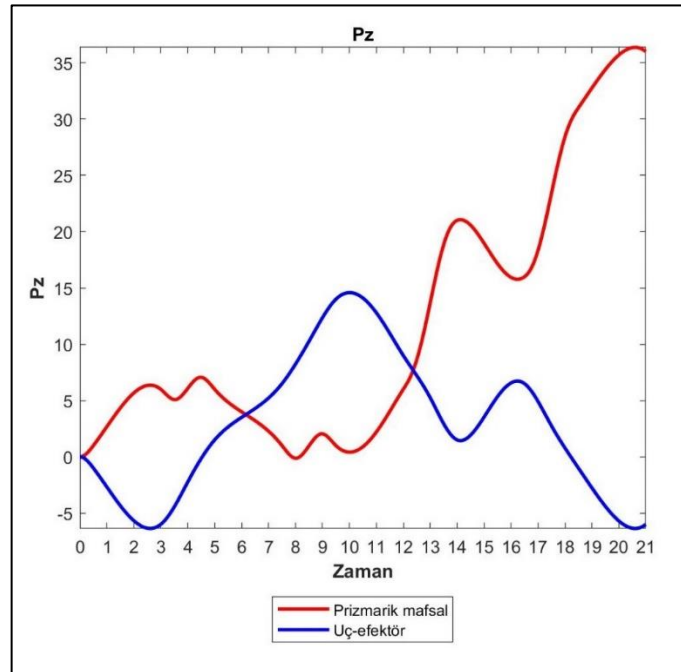
Şekil 3.8: B ve C segmentleri için prizmatik mafsalsız konum grafiği

Şekil (3.8) de görüldüğü üzere uç eftör Pz yönünde hareket ederken prizmatik mafsalsızın 3. ve 5. saniyeler arasındaki konumu değişmesine rağmen aynı noktaya geri gelmiştir. Bu sayede Pz yönündeki öteleme mikro manipülatör olan RR seri manipülatörü sayesinde sağlanmıştır. Bu işlem aynı şekilde E ve F segmentleri içinde uygulanmıştır. Diğer segmentler olan H, J, K ve L segmentlerinde ise hız iki katına çıkacağı ve prizmatik mafsalsızın yönü değişmediğinden dolayı grafikte boş kalan alan aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi doldurulmuştur.



Şekil 3.9 H ve J segmentleri için prizmatik mafsalsal konum grafiği

Bu işlem aynı şekilde K ve L segmentleri içinde uygulanarak prizmatik mafsalsal konum grafiği oluşturulmuştur. Aşağıda şekil (3.10) prizmatik mafsalsal konum grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Prizmatik mafsalsal konum grafiği

Bölüm 4

Dinamik Analiz

Bu bölümde tasarlanmış olan PRR artıksıl hibrit manipülatörünün dinamik analizi yapılarak manipülatörün mafsal noktalarında oluşan tork değerleri hesaplanmıştır. Dinamik analizi yapılırken kinetik enerji, Newton-Euler denklemleri, d' Alembert ya da Hamilton denklemleri, Lagrange denklemleri ve Kane metodu gibi birçok yöntem bulunmaktadır. Robotik sistemlerde genellikle Newton-Euler ve Lagrange denklemleri kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında manipülatörün dinamik analizi yapılırken lagrange denklemlerinden yararlanılmıştır.[28]

4.1 Lagrange Dinamiği

Lagrange formülasyonu kullanılarak kısıtlama kuvvet ve momentleri ortadan kaldırılmış, denklemlerdeki bilinmeyen sayısı azaltılmış bu sayede gerekli olan denklem sayısı azaltılmıştır. Sonuç olarak mafsallar üzerinde oluşan mafsal torkları elde edilmiştir. Lagrange formülün en genel hali aşağıda gösterilmiştir. (4.1)

$$L = K - U \quad (4.1)$$

Yukarıdaki formülde K sistemin kinetik enerjisini temsil ederken U sistemin potansiyel enerjisini temsil etmektedir. Yukarıda belirtilmiş olan lagrange formülüne göre lagrange hareket denklemini aşağıda denklem (4.2) de gösterildiği gibi oluşturabiliriz. [28]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, i = 1, 2, 3, \dots n \quad (4.2)$$

Yukarıdaki denklem (4.2) de i mafsal numarasını, q_i genelleştirilmiş koordinatları, Q_i ise genelleştirilmiş kuvvetleri göstermektedir.[28]

4.1.1 Kinetik Enerji

$$K_i = \underbrace{\frac{1}{2} v_{ci}^T m_i v_{ci}}_{\text{öteleme}} + \underbrace{\frac{1}{2} w_i^T I_i w_i}_{\text{Dönme}} \quad (4.3)$$

Yukarıda denklem (4.3) te gösterilmiş olan kinetik enerji denkleminde v hız vektörlerini, m link ağırlıklarını w açısal hız vektörlerini ve I uzuvların atalet matrislerini göstermektedir. Atalet matrisi olan I_i matrisini ana eksene taşımak için uzuv ekseninde bulunan ${}^i I_i$ matrisinin ana eksene göre olan rotasyonu ile çarpılması gerekir. Bu durumda I_i matrisi aşağıda gösterilen denklem (4.4) teki gibi gösterilebilir.

$$I_i = {}^0 R_i {}^i I_i ({}^0 R_i)^T \quad (4.4)$$

i inci uzuvdaki merkezci hız olan v_{ci} ve açısal hız olan w_i vektörleri aşağıda denklem (4.5) gösterildiği gibi Jacobian matrisleri ile gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} v_{ci} \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{vi} \\ J_{wi} \end{bmatrix} \dot{q} \quad (4.5)$$

Jacobian matrisleri J_i $6 \times n$ şeklinde bir matristir ve buradaki n sayısı manipülâtör üzerindeki mafsal sayısını göstermektedir. Ayrıca J_i matrisini $3 \times n$ olacak şekilde J_{vi} $3 \times n$ ve J_{wi} $3 \times n$ şeklinde gösterilebilir.

$$J_{vi}^j = \begin{cases} z_{j-1} \times {}^{j-1} p_{ci}^* & \text{Dönebilen mafsal için} \\ z_{j-1} & \text{Prizmatik mafsal için} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$J_{wi}^j = \begin{cases} z_{j-1} & \text{Dönebilen mafsal için} \\ 0 & \text{Prizmatik mafsal için} \end{cases} \quad (4.7)$$

Yukarıdaki gösterilen denklem (4.6) ve denklem (4.7) de Jacobian matrislerinin mafsal türevlerine göre nasıl hesaplandığı gösterilmiştir. Oluşturulan prototip PRR düzlemsel seri artıksıl hibrit manipülâtörü olduğunda üzerinde bir tane prizmatik mafsal, iki tane dönebilen mafsal bulunmaktadır. Bu durumda yukarıdaki denklem (4.5) te gösterilen eşitlikten yararlanılarak kinetik enerji formülü tekrar düzenlendiğinde

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (v_{ci}^T m_i v_{ci} + w_i^T I_i w_i) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n ((J_{vi} \dot{q})^T m_i (J_{vi} \dot{q}) + (J_{wi} \dot{q})^T I_i (J_{wi} \dot{q})) \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} \dot{q}^T \left[\sum_{i=1}^n (J_{vi})^T m_i (J_{vi}) + (J_{wi})^T I_i (J_{wi}) \right] \dot{q} \quad (4.8)$$

Bu durumda manipülatör atalet matrisi;

$$M = \sum_{i=1}^n (J_{vi})^T m_i (J_{vi}) + (J_{wi})^T I_i (J_{wi}) \quad (4.9)$$

Şeklinde tanımlandığında denklem (4.8) ile denklem (4.9) birleştirilerek kinetik enerji aşağıdan denklem (4.10) da gösterildiği gibi tanımlanabilir.[28]

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} \quad (4.10)$$

4.1.2 Potansiyel Enerji

Manipülatörün uzuvlarının yerçekimine karşı yaptıkları işler potansiyel enerji olarak tanımlanır. Bu durumda potansiyel enerji aşağıdaki denklem (4.11) deki gibi gösterilebilir.

$$U = - \sum_{i=1}^n m_i g^T p_{ci} \quad (4.11)$$

Burada n uzuv sayısını, m uzvun ağırlığını, g yerçekimi ivmesini, p_c ise uzvun ağırlık merkezine göre pozisyon vektörünü göstermektedir.

4.1.3 Dinamik Denklemlerinin Genel Formu

Yukarıda denklem (4.1) de lagrange formülünün en genel hali gösterilmişti. Denklem (4.10) ve denklem (4.11) denklem (4.1) in içerisinde kullanılarak tekrar düzenlenirse lagrange formülü aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$L = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} + \sum_{i=1}^n m_i g^T p_{ci} \quad (4.12)$$

Yukarıda belirtilen denklem (4.12) dinamik hareket denklemini oluşturmak için türevi alındığında ve M manipülatör atalet matrisi içerisindeki elemanları ile gösterilecek şekilde M_{ij} şeklinde gösterilmesiyle;

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j + \sum_{i=1}^n m_i g^T p_{ci} \quad (4.13)$$

Şeklinde gösterilebilir. Bu durumda potansiyel enerjinin \dot{q}_i ye bağlı parçalı bir türevine bağlı bulunmadığından dolayı;

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \sum_{j=1}^n M_{ij} \dot{q}_j \quad (4.14)$$

Elde edilir. Denklem (4.14) ün zaman bağlı türevi alınarak;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = \sum_{j=1}^n M_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \left(\frac{dM_{ij}}{dt} \right) \dot{q}_j = \sum_{j=1}^n M_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_k \dot{q}_j \quad (4.15)$$

Denklem (4.13) ün q_i ye göre parçalı türevini alarak

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} \left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right) + \sum_{j=1}^n m_j g^T \left(\frac{\partial p_{cj}}{\partial q_i} \right) \quad (4.16)$$

Burada p_{cj} nin q_i ye göre parçalı türevi Jacobian alt matrisi olan J_{vj} nin i ' ninci kolon vektörüdür. Bu durumda denklem (4.16) tekrar yazılarak;

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k + \sum_{j=1}^n m_j g^T J_{vj}^i \quad (4.17)$$

Son durumda denklem (4.15) ve denklem (4.17), denklem (4.2) içerisinde tekrar yazılarak dinamik hareket denklemini aşağıdaki gibi elde edebiliriz.

$$\sum_{j=1}^n M_{ij} \ddot{q}_j + V_i + G_i = Q_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.18)$$

Burada

$$V_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_i} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k \quad (4.19)$$

$$G_i = - \sum_{j=1}^n m_j g^T J_{vj}^i \quad (4.20)$$

Şeklinde gösterilebilir.[28]

4.2 Dinamik Analiz Hesaplamaları

Bu bölümde yukarıda gösterilmiş olan lagrange dinamiği denklemleri kullanılarak elde edilen mafsal torklarından bahsedilecektir.

Oluşturulan PRR düzlemsel seri artıksıl hibrit manipülatörünün mafsallarında oluşan tork değerlerinin teorik olarak hesaplanması için yukarıda belirtilen lagrange dinamiği denklemleri uygulanmıştır. İlk olarak bölüm iki de gösterilmiş olan manipülatör transformasyon matrisi ve rotasyon matrisleri kullanılarak manipülatörün uzuvları üzerindeki oluşan atalet matrisleri gösterilmiştir. Denklem (2.2) ge gösterilen transformasyon matrisi göze alındığında;

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & p_x \\ u_y & v_y & w_y & p_y \\ u_z & v_z & w_z & p_z \\ \hline \text{ROTASYON} & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Öteleme} \quad (2.2)$$

Rotasyon matrisleri;

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$${}^2R_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Ve

$${}^0R_1 = {}^0R_1 * {}^1R_2 * {}^2R_3 \quad (4.24)$$

Şeklinde denklem (4.24) de gösterildiği gibi her mafsalın ana eksen göre olan rotasyonu gösterilebilir. Daha sonra her mafsalın atalet matrislerinin oluşturulması için denklem (4.4) kullanılarak;

$$\begin{aligned} I_1 &= {}^0R_1 {}^1I_1 ({}^0R_1)^T \\ I_2 &= {}^0R_2 {}^2I_2 ({}^0R_2)^T \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$I_3 = {}^0R_3 {}^3I_3 ({}^0R_3)^T$$

Denklem grubu (4.25) de gösterilen ana eksene göre olan atalet matrisleri yazılabilir. Ana eksene göre olan atalet matrislerinin yazılabilmesi için her mafsalın kendi atalet matrislerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu durumda manipülatörün birinci mafsalı olan prizmatik mafsal için ince cidarlı bir silindir gibi düşünülerek I_z eksenindeki yani mafsalın yönünde atalet kuvveti 0 I_x ve I_y de bulunan atalet kuvvetleri birbirine eşittir. Bu durumda birinci mafsal olan prizmatik mafsal için 1I_1 değeri;

$${}^1I_1 = \frac{1}{2} * m_1 * l^2 * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

2I_2 ve 3I_3 olan R döner mafsalları için ise I_x ekseninde de 0, I_y ve I_z ekseninde ise birbirine eşit şekilde alınarak;

$${}^2I_2 = \frac{1}{2} * m_2 * a_2^2 * \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$${}^3I_3 = \frac{1}{2} * m_3 * a_3^2 * \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Şeklinde tanımlanabilir.

Manipülatörün mafsallarının atalet matrislerini oluşturduktan sonra Jacobian matrislerinin oluşturulması için önce manipülatörün uzuvlarının ağırlık merkezlerinin pozisyonları gerekmektedir. Bu konumları ana eksen takımına döndürmek için rotasyon matrisleriyle çarpma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bu durumda

$${}^0P_{c1}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix}$$

$${}^1P_{c2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_2 C\theta_2 \\ \frac{1}{2} a_2 S\theta_2 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^1P_{c2}^* = {}^0R_1 {}^1P_{c2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_2 C\theta_2 \\ 0 \\ -\frac{1}{2} a_2 S\theta_2 \end{bmatrix}, {}^0P_{c2}^* = {}^0T_1 {}^1P_{c2}^* = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_2 C\theta_2 \\ 0 \\ d_1 - \frac{1}{2} a_2 S\theta_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
{}^2P_{c3} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}a_3C\theta_3 \\ \frac{1}{2}a_3S\theta_3 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^2P_{c3}^* = {}^0R_2 {}^2P_{c3} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}a_3C\theta_{23} \\ 0 \\ -\frac{1}{2}a_3S\theta_{23} \end{bmatrix} \\
{}^1P_{c3} &= {}^1T_2 {}^2P_{c3} = \begin{bmatrix} a_2C\theta_2 + \frac{1}{2}a_3C\theta_3 \\ a_2S\theta_2 + \frac{1}{2}a_3S\theta_3 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, {}^1P_{c3}^* = {}^0R_1 {}^1P_{c3} = \begin{bmatrix} a_2C\theta_2 + \frac{1}{2}a_3C\theta_{23} \\ 0 \\ -a_2S\theta_2 - \frac{1}{2}a_3S\theta_{23} \\ 1 \end{bmatrix} \\
{}^0P_{c3}^* &= {}^0T_2 {}^2P_{c3} = \begin{bmatrix} a_2C\theta_2 + \frac{1}{2}a_3C\theta_{23} \\ 0 \\ d_1 - a_2S\theta_2 - \frac{1}{2}a_3S\theta_{23} \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Yukarıdaki denklem grubu (4.29) da uzuvların ağırlık merkezlerinin pozisyon vektörleri verilmiştir. * ile gösterilen ifadeler ana eksen takımına göre olan konum vektörünü göstermekte * olmayan vektörler ise uzuvların kendi buldukları eksen takımına göre olan konumları göstermektedir. Uzuvların ağırlık merkezlerinin pozisyon vektörleri oluşturulduktan sonra denklem (4.6) ve denklem (4.7) kullanılarak Jacobian matrisleri oluşturulmuştur.

Bu durumda Jacobian matrisleri

$$\begin{aligned}
J_{v1} &= [J_{v1}^1, J_{v1}^2, J_{v1}^3], & J_{v2} &= [J_{v2}^1, J_{v2}^2, J_{v2}^3], & J_{v3} &= [J_{v3}^1, J_{v3}^2, J_{v3}^3] \\
J_{w1} &= [J_{w1}^1, J_{w1}^2, J_{w1}^3], & J_{w2} &= [J_{w2}^1, J_{w2}^2, J_{w2}^3], & J_{w3} &= [J_{w3}^1, J_{w3}^2, J_{w3}^3] \\
J_{v1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.30}$$

$$J_{v2} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{a_2}{2}S\theta_2 & 0 \\ \frac{a_2}{2}C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{a_2}{2}C\theta_2 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.31}$$

$$J_{v3} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{a_3}{2}S\theta_{23} - a_2S\theta_2 & -\frac{a_3}{2}S\theta_{23} \\ \frac{a_3}{2}C\theta_{23} + a_2C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{a_3}{2}C\theta_{23} - a_2C\theta_2 & -\frac{a_3}{2}C\theta_{23} \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

$$J_{w1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, J_{w2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, J_{w3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.33}$$

Şeklinde gösterilebilir. Denklem (4.30) ile denklem (4.33) arasında gösterilen Jacobian matrisleri oluşturulduktan sonra manipülatör atalet matrisi denklem (4.9) kullanılarak oluşturulmuştur.

$$M = \sum_{i=1}^n (J_{vi})^T m_i (J_{vi}) + (J_{wi})^T I_i (J_{wi})$$

$$M = (J_{v1})^T m_1 (J_{v1}) + (J_{w1})^T I_1 (J_{w1}) + (J_{v2})^T m_2 (J_{v2}) + (J_{w2})^T I_2 (J_{w2}) + (J_{v3})^T m_3 (J_{v3}) + (J_{w3})^T I_3 (J_{w3}) \quad (4.34)$$

Bu durumda manipülatör atalet matrisi aşağıda denklem grubu (4.35) te gösterilmiş olan değerleri almaktadır.

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = m_1 + m_3 \left(\frac{a_3 c \theta_{23}}{2} + a_2 c(\theta_2) \right)^2 + \frac{a_2^2 m_2 c(\theta_2)^2}{4}$$

$$M_{12} = 0$$

$$M_{13} = 0$$

$$M_{21} = 0$$

(4.35)

$$M_{22} = \left(\frac{m_2 a_2^2}{3} \right) - m_2 s \theta_2 a_2 d_1 + \frac{m_3 a_3^2}{3} + m_2 d_1^2$$

$$M_{23} = \frac{a_3 m_3 (a_3 - 2d_1 s \theta_{23} + 2a_2 c \theta_3)}{4}$$

$$M_{31} = 0$$

$$M_{32} = \frac{a_3 m_3 (a_3 - 2d_1 s \theta_{23} + 2a_2 c \theta_{23})}{4}$$

$$M_{33} = m_3 \left(\frac{a_3 s \theta_{23}}{2} - d_1 + a_2 s \theta_2 \right)^2 + m_3 \left(\frac{a_3 c \theta_{23}}{2} + a_2 c \theta_2 \right)^2$$

Manipülatör atalet matrisi oluşturulduktan sonra sırasıyla her uzuv için hız kuplaj vektörleri oluşturulması gerekmektedir. Yukarıdaki denklem (4.19) kullanılarak;

$$V_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_i} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k$$

$$\begin{aligned}
V_1 &= \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \left(\frac{\partial M_{1j}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k = \\
V_1 &= \left(\frac{\partial M_{11}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{11}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_1 \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial M_{11}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \left(\frac{\partial M_{11}}{\partial q_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{13}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_1 \dot{q}_3 \\
&+ \left(\frac{\partial M_{12}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{21}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_2 \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial M_{12}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{22}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_2 \dot{q}_2 \\
&+ \left(\frac{\partial M_{12}}{\partial q_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{23}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \left(\frac{\partial M_{13}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{31}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_3 \dot{q}_1 \\
&+ \left(\frac{\partial M_{13}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{32}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_3 \dot{q}_2 + \left(\frac{\partial M_{13}}{\partial q_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{33}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_3 \dot{q}_3 \quad (4.36)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_2 &= \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \left(\frac{\partial M_{2j}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k = \\
V_2 &= \left(\frac{\partial M_{21}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{11}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_1 \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial M_{21}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \left(\frac{\partial M_{21}}{\partial q_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{13}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_1 \dot{q}_3 \\
&+ \left(\frac{\partial M_{22}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{21}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_2 \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial M_{22}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{22}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_2 \dot{q}_2 \\
&+ \left(\frac{\partial M_{22}}{\partial q_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{23}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{31}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_3 \dot{q}_1 \\
&+ \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{32}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_3 \dot{q}_2 + \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial q_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{33}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_3 \dot{q}_3 \quad (4.37)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_3 &= \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \left(\frac{\partial M_{3j}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k = \\
V_3 &= \left(\frac{\partial M_{31}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{11}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_1 \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial M_{31}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \left(\frac{\partial M_{31}}{\partial q_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{13}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_1 \dot{q}_3 \\
&+ \left(\frac{\partial M_{32}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{21}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_2 \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial M_{32}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{22}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_2 \dot{q}_2 \\
&+ \left(\frac{\partial M_{32}}{\partial q_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{23}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \left(\frac{\partial M_{33}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{31}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_3 \dot{q}_1 \\
&+ \left(\frac{\partial M_{33}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{32}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_3 \dot{q}_2 + \left(\frac{\partial M_{33}}{\partial q_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{33}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_3 \dot{q}_3 \quad (4.38)
\end{aligned}$$

Şeklinde denklem (4.36) ile denklem (4.38) arasında belirtilen denklemlerde hız kuplaj vektörlerinin oluşturulması gösterilmiştir. Hız kuplaj vektörleri oluşturulduktan sonra denklem (4.20) de gösterilmiş olan yerçekimi kuvveti vektörleri;

$$G_i = - \sum_{j=1}^n m_j g^T J_{vj}^i$$

$$G_1 = - \sum_{j=1}^3 m_j g^T J_{v_j}^1 = -(m_1 g^T J_{v_1}^1 + m_2 g^T J_{v_2}^1 + m_3 g^T J_{v_3}^1) \quad (4.39)$$

$$G_2 = - \sum_{j=1}^3 m_j g^T J_{v_j}^2 = -(m_1 g^T J_{v_1}^2 + m_2 g^T J_{v_2}^2 + m_3 g^T J_{v_3}^2) \quad (4.40)$$

$$G_3 = - \sum_{j=1}^3 m_j g^T J_{v_j}^3 = -(m_1 g^T J_{v_1}^3 + m_2 g^T J_{v_2}^3 + m_3 g^T J_{v_3}^3) \quad (4.41)$$

Şeklinde denklem (4.39) ile denklem (4.40) arasında gösterilmiş olan yerçekimi kuvveti vektörleri oluşturulmuştur. Burada yerçekimi kuvveti vektörlerinin değeri;

$$\begin{aligned} G_1 &= 0 \\ G_2 &= 0 \\ G_3 &= 0 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Denklem grubu (4.42) de görüldüğü üzere 0 olarak gelmiştir. Bunun sebebi manipülatör düzlemsel olarak çalıştığından dolayı yerçekimine karşı bir iş yapmamıştır ve bu sayede herhangi bir potansiyel enerji oluşmadığından dolayı 0 olarak gelmektedir. Yerçekimi kuvveti vektörleri 0 olarak hesaplandıktan sonra denklem (4.18) de gösterilmiş olan dinamik hareket denklemleri;

$$Q_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \ddot{q}_j + V_i + G_i$$

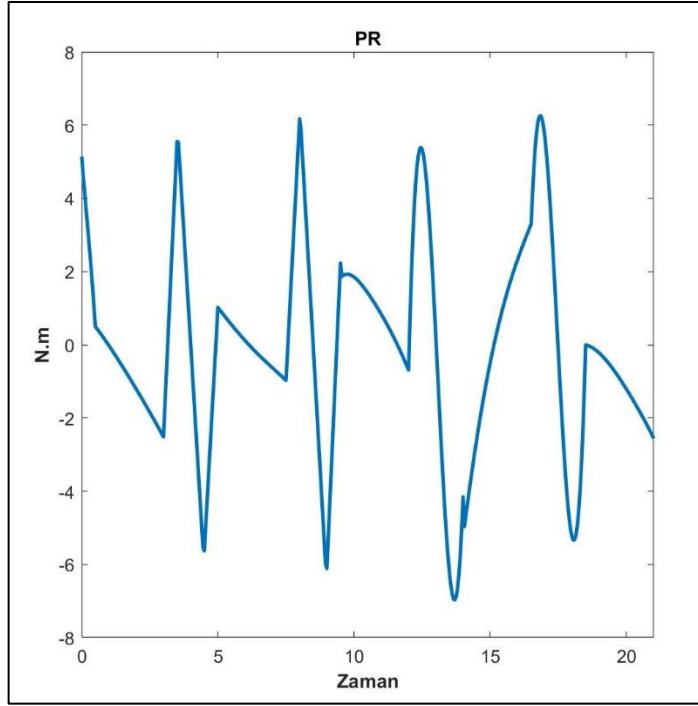
$$Q_i = \sum_{j=1}^3 M_{ij} \ddot{q}_j + V_i + G_i =$$

$$Q_1 = M_{11} \ddot{q}_1 + M_{12} \ddot{q}_2 + M_{13} \ddot{q}_3 + V_1 + G_1 \quad (4.43)$$

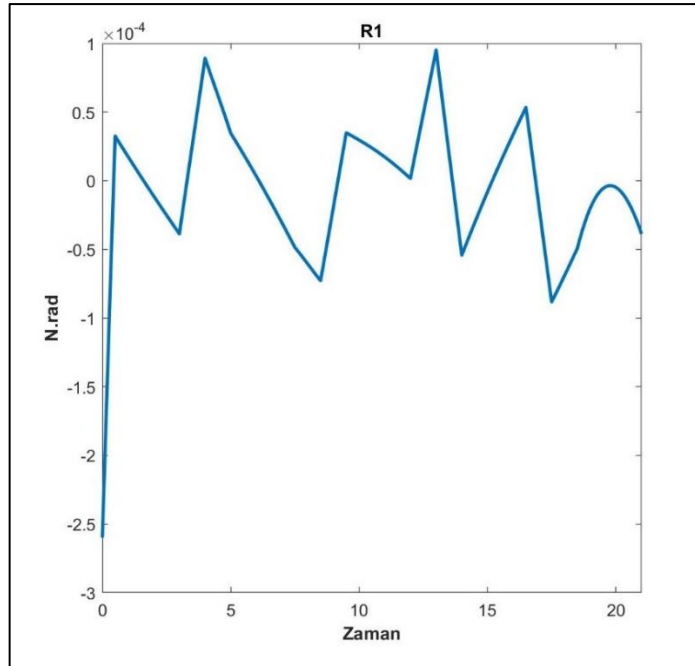
$$Q_2 = M_{21} \ddot{q}_1 + M_{22} \ddot{q}_2 + M_{23} \ddot{q}_3 + V_2 + G_2 \quad (4.44)$$

$$Q_3 = M_{31} \ddot{q}_1 + M_{32} \ddot{q}_2 + M_{33} \ddot{q}_3 + V_3 + G_3 \quad (4.45)$$

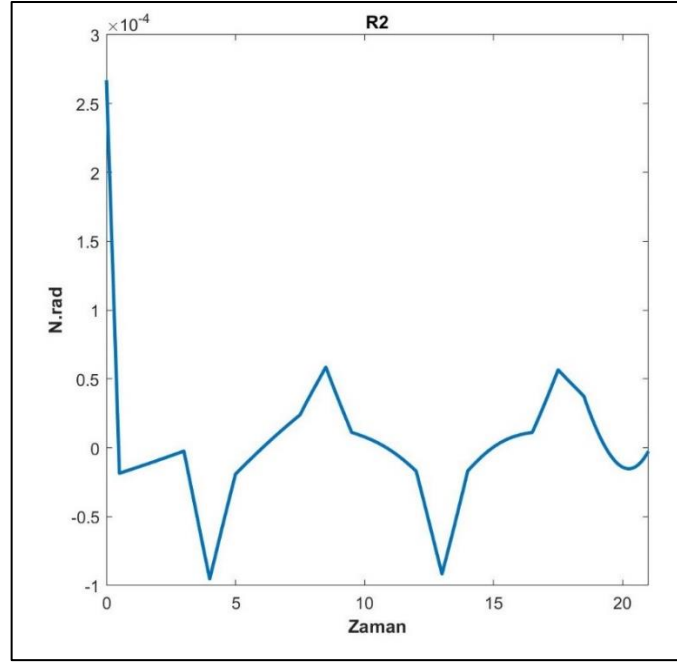
Şeklinde elde edilebilir. Yukarıdaki denklem (4.43) ile denklem (4.45) arasında gösterilen denklemlerde Q değeri manipülatörün mafsalları üzerinde oluşan genelleştirilmiş kuvvetleri göstermektedir. Bu kuvvetler döner mafsallar için tork değerini prizmatik mafsal içinde eyleyici kuvvetini göstermektedir.



Şekil 4.1: Prizmatik mafsal eyleyici kuvvetini grafiği



Şekil 4.2: Birinci döner mafsallar tork grafiği



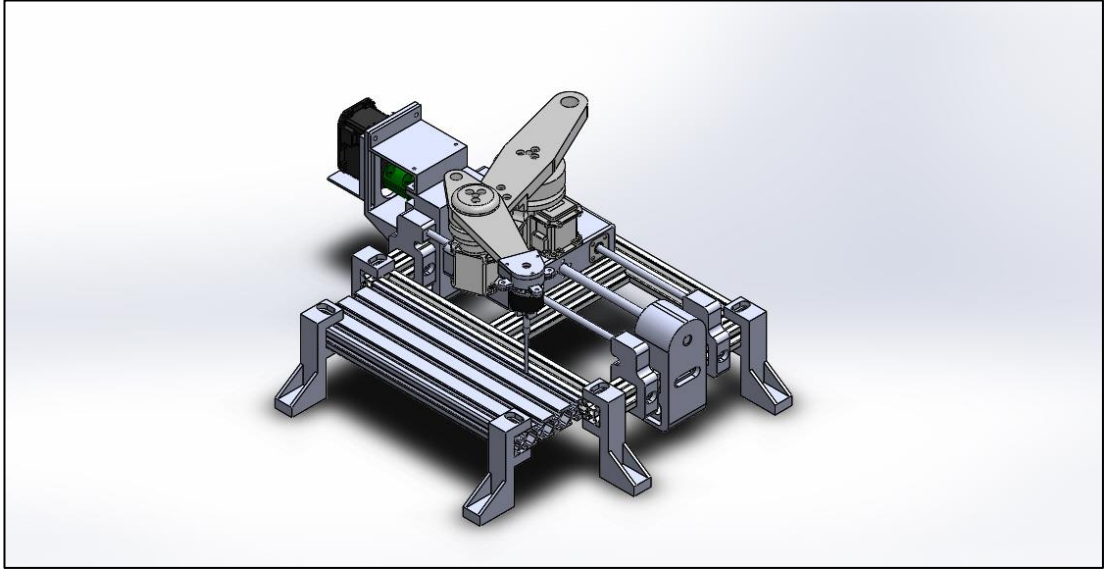
Şekil 4.3: İkinci döner mafsallar tork grafiği

Yukarıda şekil (4.1) de prizmatik mafsal için oluşan tork(eyleyici kuvveti) değerleri, şekil (4.2) de birinci dönebilen mafsal için oluşmuş tork değerleri ve şekil (4.3) te ise ikinci dönebilen mafsal için olan tork değerleri gösterilmiştir.

Bölüm 5

Mekanik Tasarım

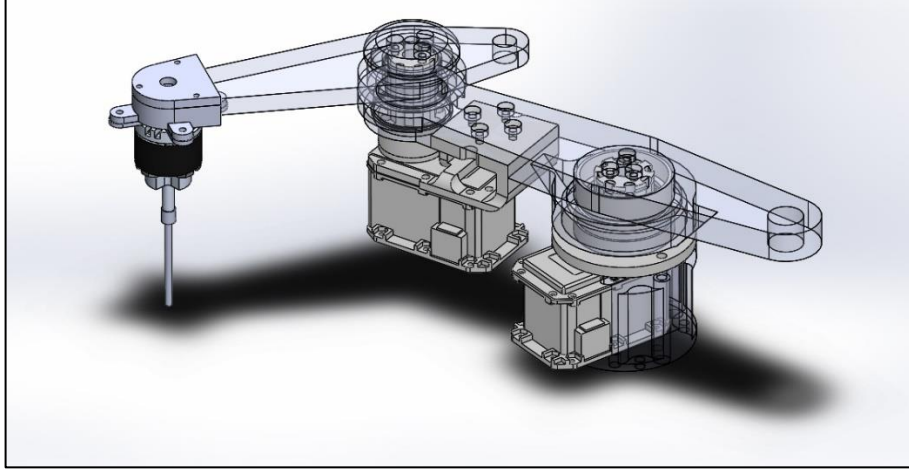
Bu bölümde tasarlanmış olan PRR düzlemsel seri artıksıl hibrit manipülatörün mekanik tasarımı ve oluşturulmuş olan prototipler için üretilmiş olan parçalar üzerinde durulacaktır. Tasarlanmış olan PRR düzlemsel seri artıksıl hibrit manipülatörü imalatta son işlem olan yüzey temizleme işlemi için kullanılması planlanmıştır. Bu durumda manipülatörün mikro kısmı olan RR kısmı imalat parçası üzerinde hassas konumlama, makro hareketi oluşturan prizmatik mafsallı mekanizma ise çalışma alanını genişletmek için kullanılacaktır.



Şekil 5.1: Tasarlanmış olan PRR seri artıksıl hibrit manipülatörünü CAD modeli

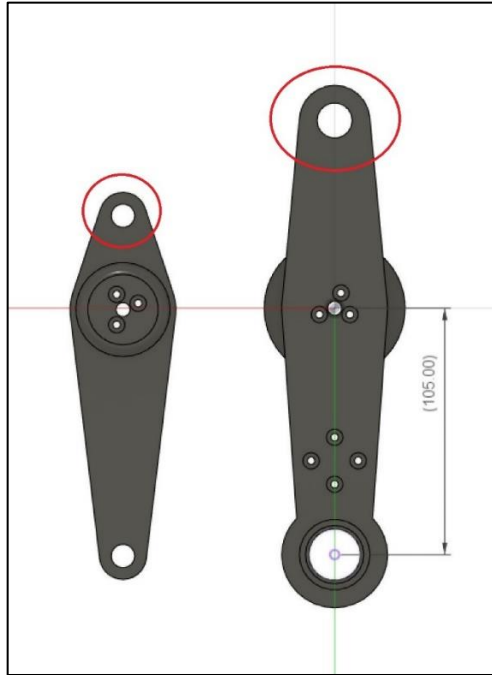
Yukarıda şekil (5.1) de PRR seri artıksıl hibrit manipülatörünün son versiyonu görülmektedir. Manipülatör oluşturulurken ilk olarak yörünge takibi bölümünde de anlatıldığı gibi tasarıma manipülatörün RR kısmı olan mikro hareketten sorumlu bölümünden başlanmıştır.

5.1 Mikro Manipülator Tasarımı



Şekil 5.2: Tasarlanmış olan manipülatorün mikro, RR kısmı

Manipülatorün RR kısmı tasarlanırken planlanmış olan yörüngeye göre uzuv boyutları 105 mm olacak şekilde seçilmiştir. Aşağıda şekil (5.3) te görüldüğü gibi tasarlanan uzuvların arka taraflarında boşluklar bulunmaktadır. Bu boşluklar gerektiği durumlarda manipülatorün uzuvları üzerine karşıt ağırlıklar bağlanması için kullanılacaktır.

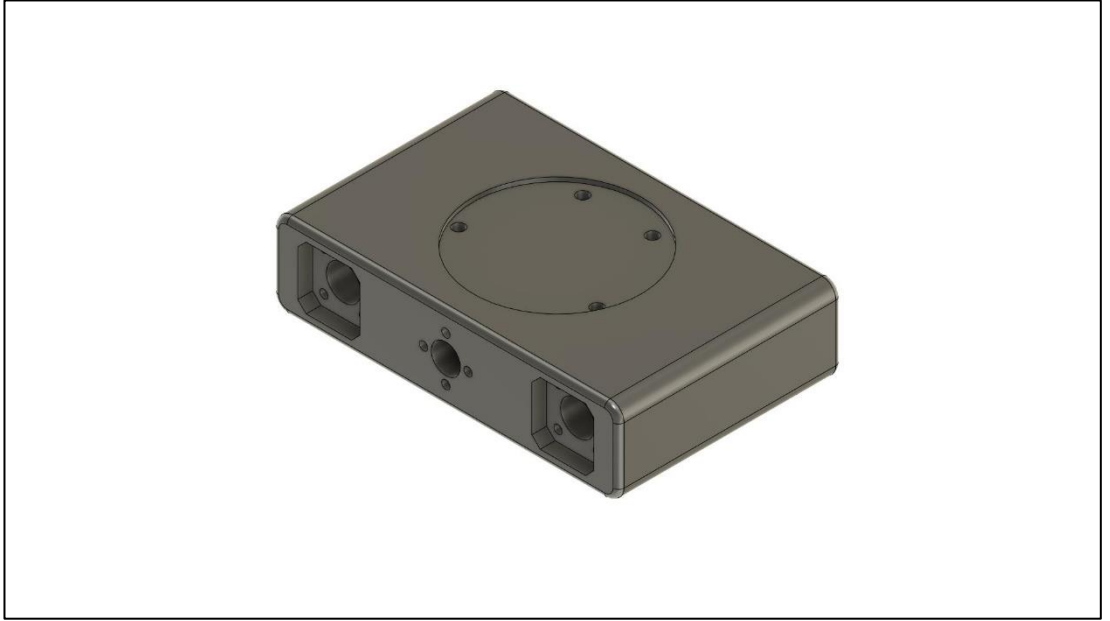


Şekil 5.3: Manipülatorün RR kısmının uzuvları,

RR kısmının tasarım aşaması bittikten sonra manipülatörün makro hareketinden sorumlu olan prizmatik mafsalı mekanizmasının tasarlanmasına başlanmıştır.

5.2 Makro Hareketten Sorumlu Mekanizmanın Tasarımı

Prizmatik hareketin sağlanması için vidalı mil yardımıyla motorun oluşturduğu rotasyon hareketi lineer harekete dönüştürülmüştür. Ayrıca manipülatörün RR kısmının bulunacağı gövde üzerinde vidalı milin somununun yerleşeceği yer dışında iki tane lineer rulman için delik açılmıştır. Bu tasarımda şekil (5.4) iki tane lineer rulman kullanılmasının sebebi manipülatörün çalışması sırasında oluşabilecek atalet kuvvetlerini azaltmaktır.



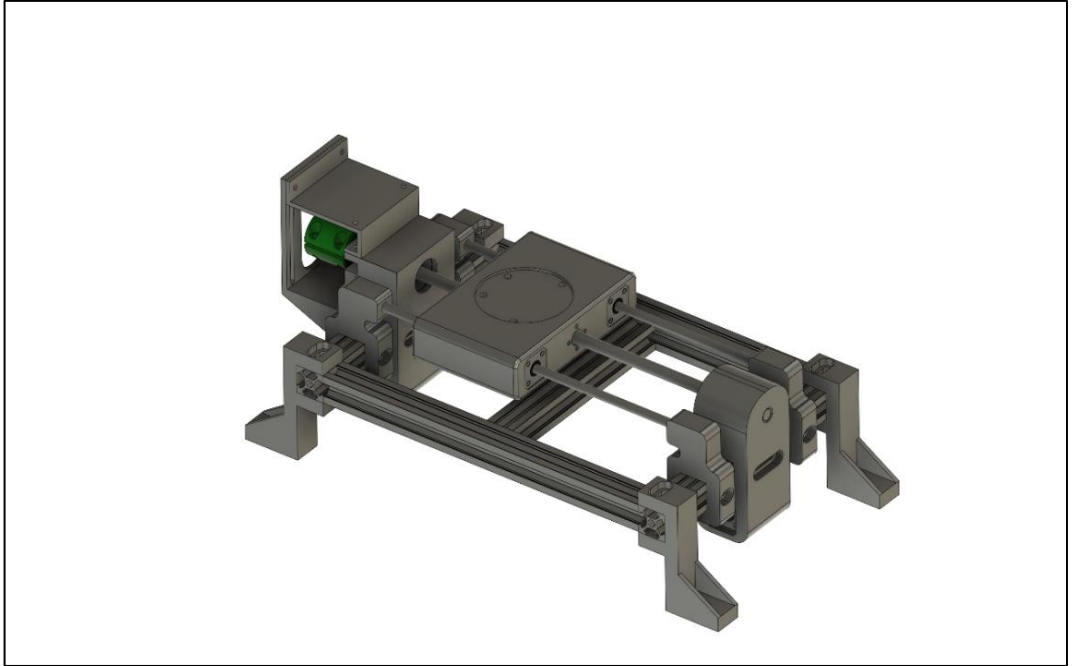
Şekil 5.4: Manipülatörün mikro (RR) kısmını makro (prizmatik) mekanizmaya bağlamak için tasarlanan parça

Manipülatörün mikro kısmını makro mekanizma olan prizmatik mafsal mekanizmasına bağlamak için tasarlanan parça yukarıda şekil (5.4) te gösterilmiştir. Makro mekanizmanın tasarımı yapılırken ilk olarak mekanizmanın yerleştirileceği platformun tasarımı yapılmıştır. Bu platform oluşturulurken 20x20 kanal genişliği 6 mm olan sigma profiller kullanılmıştır. Platform oluşturulduktan sonra yerden yükseklik sağlamak amacıyla ayak tasarlanmıştır.



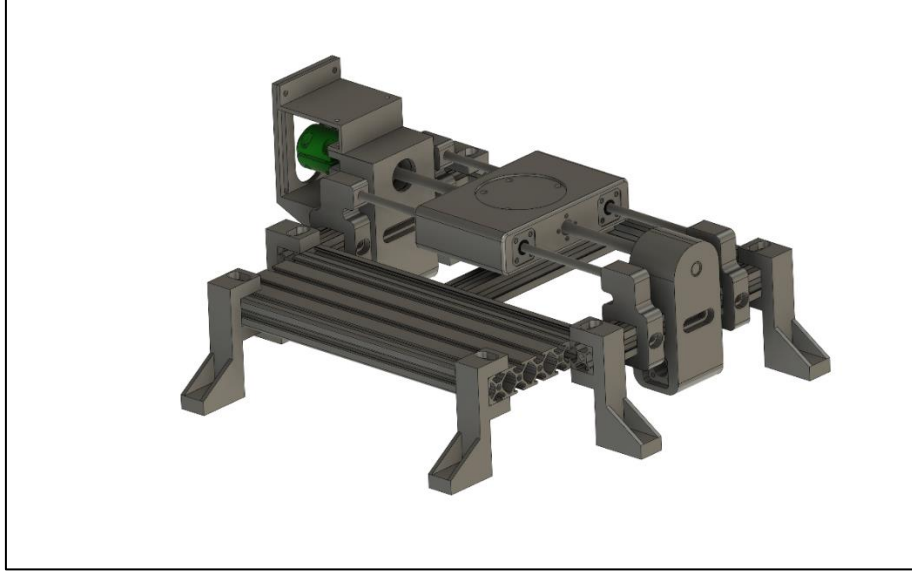
Şekil 5.5: Makro mekanizma için tasarlanan platform

Yukarıda şekil (5.5) ta gözüken makro mekanizmanın yerleştirileceği platform gözükmektedir. Platform üzerinde bulunan ayaklar tasarlanırken ayakların arka kısımları L şeklide olacak şekilde tasarlanmış ve yanları feder oluşturarak kapatılmıştır. Bu daha sonra manipülâtör bir masa üzerine sabitlenmek istenirse sabitleme işleminin kolaylaştırmak için tasarıma eklenmiştir.



Şekil 5.6: Tasarlanan manipülâtörde makro hareketten sorumlu prizmatik mekanizma

Makro hareketten sorumlu prizmatik mekanizma tasarlandıktan sonra son olarak manipülâtörün çalışma alanını oluşturmak için mekanizma üzerine bir çalışma tablası takıldı. Çalışma tablası için 80x20 kanal genişliği 6 mm olan sigma profil kullanıldı. Profil üzerinde bulunan kanallar yardımıyla tabla üzerine çalışma parçası bağlanması planlanmıştır.

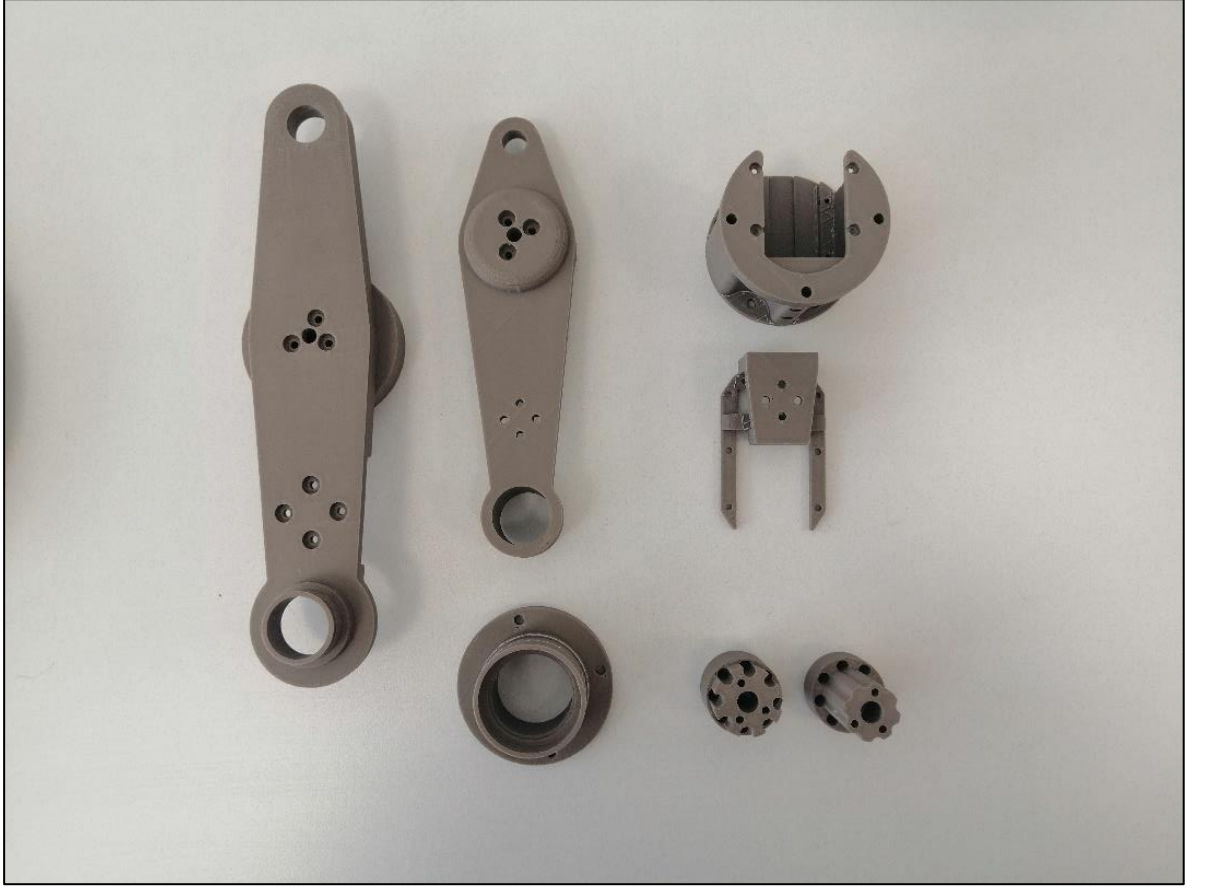


Şekil 5.6: Tasarlanan manipülâtörde makro hareketten sorumlu prizmatik mekanizmanın son hali

5.3 Prototip Üretimi

5.3.1 Mikro Manipülâtör Üretimi

Tasarlanan manipülâtörün prototip üretimi de diğer işlemlerde olduğu gibi mikro manipülâtör olan RR seri manipülâtörü ile başlamıştır. Prototipin üretimi sırasında hızlı prototipleme cihazları olarak adlandırılan 3 boyutlu yazıcılar (3D) kullanılmıştır.



Şekil 5.7: RR seri manipulatörünün üretilen parçalar

Yukarıda Şekil (5.7) de tasarlanan manipulatörün RR mikro kısmı için 3D yazıcılar kullanılarak üretilen parçalar gözükmemektedir. Parçaların üretiminde ABS filament, ZORTRAX M200 adlı 3D yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak ilk parti üretilirken filament yazıcının tablasını tutamamış ve bazı parçalar baskı sırasında tabladan kalkması sonucu yamuk olarak çıkmıştır. Bu sebepten dolayı ikinci parti parçalar UPRİNT adlı 3D yazıcı kullanılarak ABS+ filament ile basılmıştır.

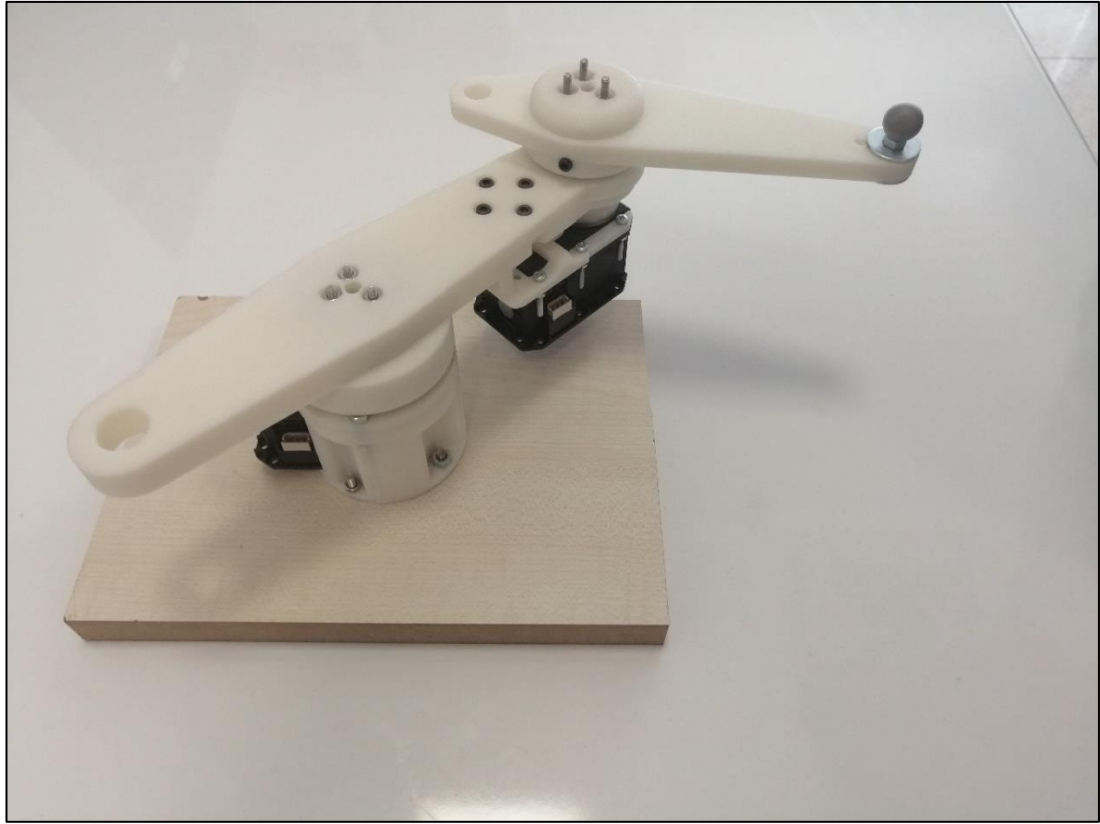
Tablo 5.1: Zortrax M200 adlı 3D printerda kullanılan z-ABS filamentinin özellikleri [29]

z-ABS		
Mekanik Özellikler	Metrik	Test Metodu
Çekme Dayanımı	30.46 MPa	ISO 527:1998
Kırılma Gerilmesi	25.89 MPa	ISO 527:1998
Eğilme Gerilimi	46.30 MPa	ISO 178:2011
Elastisite Modülü	1.08 GPa	ISO 178:2011
İzod Darbe, Çentikli	8.93 kJ/m ²	ISO 180:2004
Termal Özellikler	Metrik	Test Metodu
Camsı Geçiş Sıcaklığı	107.89° C	ISO 11357-3:2014

Tablo 5.2: Uprint adlı 3D printerda kullanılan ABSplus-P430 filamentinin genel özellikleri [30]

ABSplus-P430		
Mekanik özellikler	Metrik	Test Metodu
Maksimum Çekme dayanımı	33 MPa	ASTM D638
Çekme akma gerilmesi	31 MPa	ASTM D638
İzod darbe, Çentikli	106 J/m	ASTM D256
Termal özellikler	Metrik	Test Metodu
Camsı geçiş sıcaklığı	108 °C	DSC (SSYS)

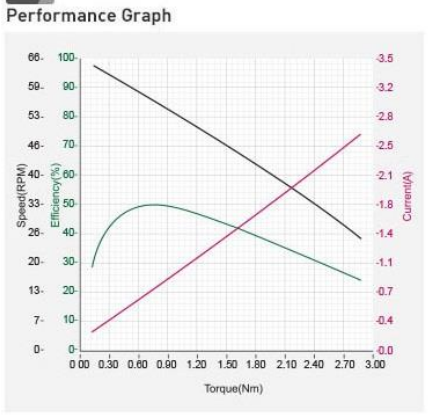
İkinci parti üretilen parçaların birbirine montajlanması sonucu manipülâtörün RR kısmının prototipi oluşturulmuştur.



Şekil 5.8: Manipülâtörün RR kısmının prototipi

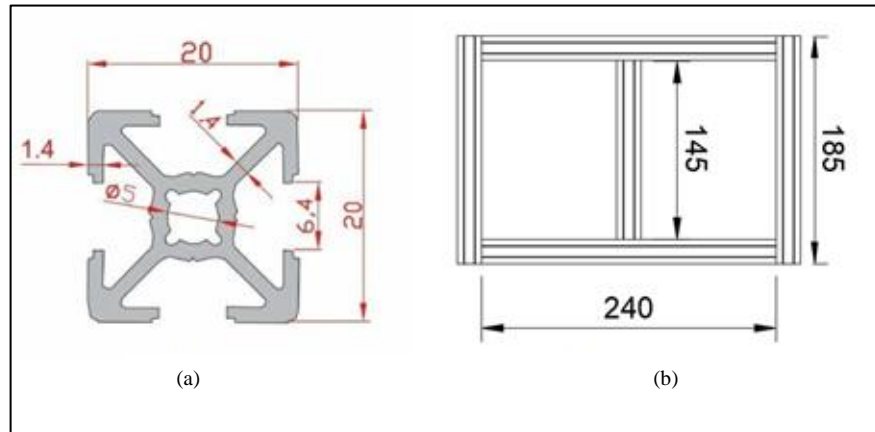
Hazırlanan prototip üzerinde motor olarak Dynamixel MX-64 tipi akıllı servo motorlar kullanılmıştır.

Tablo 5.3: Dynamixel MX serisi için motor özellikleri

MX-64AR, MX-64AT tipi motorların genel özellikleri		 <p>Şekil (5.9) MX-64AR, MX-64AT tipi motorları için tork grafikleri [31]</p>
Boyut (Mm)	40.2 x 61.1 x 41	
Kontrol Algoritması	PID kontrol	
Ağırlık	165 g	
Dişli Oranı	200 : 1	
Girdi Voltajı	10.0 ~ 14.8 [V] önerilen 12[V]	
Durma Tork ve Akım Değerleri	5.5[N.m](@ 11.1[V],3.9 [A]) 6.0 [N.m] (@ 12[V], 4.1 [A]) 7.3[N.m](@ 14.8[V],5.2 [A])	
Yük Altında Olmadan Çalışma Hızı	58 [rev/min] (at 11.1 [V]) 63 [rev/min] (at 12 [V]) 78 [rev/min] (at 14.8 [V])	

5.3.2 Prizmatik Mekanizma Üretimi

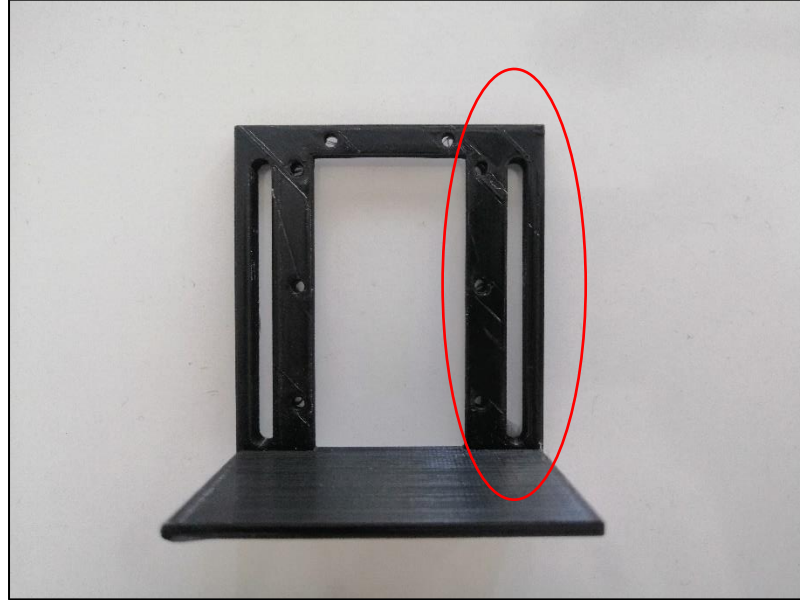
Yukarıda da bahsedildiği üzere prizmatik mafsallı mekanizma tasarlanırken 20x20 sigma profiller kullanılmıştı. Kullanılan sigma profiller üzerinde 6 mm genişliğinde kanalların bulunması montaj işleminde kolaylık sağlamıştır.



Şekil 5.10: (a) Prizmatik mekanizma üzerinde kullanılan sigma profil teknik çizimi [32] (b) Platformun teknik çizimi

Yukarıda şekil (5.10) (a) da teknik çizimini gösterilmiş olan sigma profiller ile şekil (5.10) (b) de gösterilmiş olan platform hazırlanmıştır. Platform hazırlandıktan sonra

motor bağlantı parçası üretilmiştir. Motor bağlantı parçası tasarımı sırasında motor ve vidalı mil arasında oluşabilecek eksen kaçıklıklarını minimuma indirmek için motorun parça üzerine oturtulacağı bölüm yatak olarak tasarlanmıştır bu sayede motor gerektiği zaman yukarı ve aşağı olarak kolayca hareket ettirilebilecek ve oluşabilecek eksen kaçıklıkları önlenecektir.



Şekil 5.11: Tasarlanan motor standı üzerinde oluşturulan yatak yuvası

Son olarak mikro manipülatör olan RR seri manipülatörünün bağlantı noktasını oluşturan araba ve üzerinde hareketi sağlayacak olan millerin yatakları 3D yazıcı kullanılarak üretildikten sonra kaplin, mil ve vidalı mil gibi elemanların seçilip manipülatöre montaj yapılması kısmına geçildi.

5.3.3 Kaplin ve Mil Seçimi

Manipülatörün makro hareketinden sorumlu olan prizmatik mafsalı mekanizma üzerinde lineer hareket oluşturmak için rotasyon hareketi vidalı mil ve lineer rulmanlar yardımıyla lineer harekete çevrilmiştir. Vidalı mil seçimi yapılırken ilk olarak 2 hatveli 8 mm çapında vidalı mil kullanılmıştır. Ancak kullanılan bu mil ile motorun maksimum hızda çalışması durumunda istenilen yörüngenin gerisinde kaldığından dolayı mil seçimi tekrar yapılarak 8 hatveli 8 mm çaplı trapez vidalı mil sisteme entegre edilmiştir. 2 hatveli vidalı mil ile 8 hatveli trapez vidalı mil arasında ki sonuç farkı ilerideki simülasyon ve sonuç bölümünde gösterilecektir. Lineer kayma

hareketini sağlayacak olan lineer rulmanlarda ise 6 mm lik krom miller üzerinde kayması için LMEK 06 UU tipi lineer rulmanlar kullanılmıştır.

Kaplin motordan gelen rotasyonu bir mile aktarmak için kullanılan bağlantı elemanlarından biridir. Hazırlanan prototip üzerinde 4 farklı kaplin denenmiştir. Aşağıda şekil (5.12) de kullanılan bütün kaplinler gösterilmektedir. Birinci kullanılan kaplin torna ile bir alüminyum parça kullanılarak üretilmiştir. Ancak kullanılan ilk modelde herhangi bir esneklik olmadığından dolayı motora zarar vermesi olasılığı oluşmuştur bu sebeple ikinci modele geçilmiştir.



Şekil 5.12: (a) Birinci kaplin modeli (b) İkinci kaplin modeli (c) Üçüncü kaplin modeli (d) Dördüncü kaplin modeli

Kullanılan ikinci model 3 parçadan oluşmaktadır. Bu modelin ortasında bulunan kauçuk parça kaplinin esnemesini sağlamaktadır. Esneme sayesinde motordan mile hareket aktarılırken, motor ile mili arasında bir eksen kaçıklığı var ise motor üzerinde oluşan zorlamaları engellemektedir. Ancak bu kaplin kullanıldığı zaman motor ile olan bağlantısında bir problem olmamış fakat kaplin vidalı mili tutmamıştır yani kaplin üzerinde bulunan vidaların sıkılmasına rağmen vidalı mil kaplinin içerisinde boştaymış gibi dönmekteydi. Bu sebep ile üçüncü model kapline geçildi. Üçüncü model kaplin şekil ve işlev bakımından ikinci modelde kullanılmış olan kaplinin 3 D yazıcı yardımıyla PLA filamenti kullanılarak üretilmiş halidir. Burada esneklik sağlanması için motora ve mile bağlanacak olan parçalar %100 dolulukta basılmış, ortadaki parça ise %0 dolulukla sadece kabuk olarak basılmıştır. Üretilen üçüncü kaplin motor ve mil bağlantısını düzgün olarak sağlamıştır ve vidalı mil ile kaplin arasında herhangi bir kayma gözlemlenmemiştir. Bu durumda üçüncü üretilen kaplin kullanılmaya başlanmıştır ancak zaman içerisinde kaplin üzerinde bulunan vidaların sıkılması sonucu kaplin üzerinde bazı yerlerde çatlaklar oluşmuştur ve bu çatlakların

ileride bir sorun oluşturmaması için son model olan dördüncü model kapline geçilmiştir. Dördüncü modelde şekil (5.12) d) de gözüktüğü üzere kaplin üzerinde spiral şeklinde bir kesik bulunmaktadır. Bu kesikler ikinci ve üçüncü modeldeki kauçuk ve doluluk oranı %0 olan parçalar ile aynı şekilde kaplin üzerinde esneklik sağlayarak motor üzerinde eksen kaçıklığı yüzünden oluşabilecek kuvvetleri azaltmaktadır. Kaplin üzerinde bulunan spiral şeklindeki kesik aynı zamanda çok yüksek torklarda yay etkisi de gösterebilmektedir, ancak manipülatörün çalışması sırasında çok yüksek değerlerde tork oluşmadığından dolayı yaylanma etkisi dinamik hesaplamalara ihmal edilmiştir.

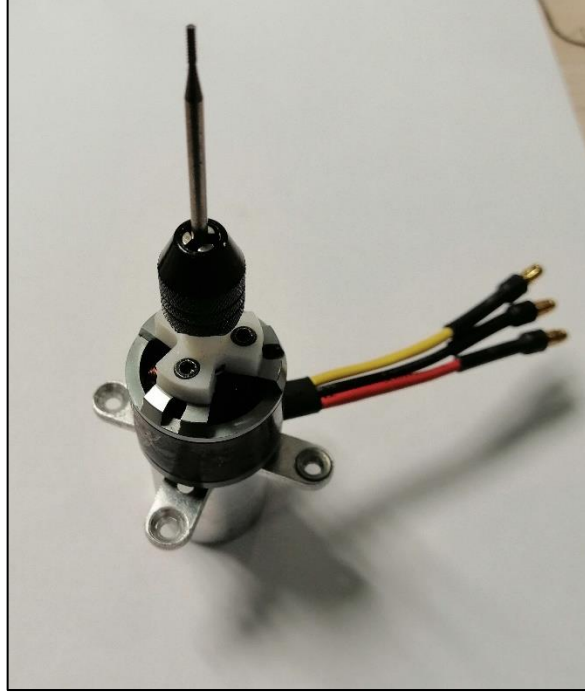
Manipülatör üzerinde lineer hareketi sağlamak için kaplin seçiminde gerçekleştirildikten sonra parça üzerinden talaş kaldıracak olan iş takımının hazırlanması ve mikro manipülatöre montaj kısmına geçildi.

5.3.4 İş Takımı Seçimi

Tasarlanan manipülatör ileride parça üzerinde yüzey kalitesini arttırmak için yüzey temizleme, son işlem yapması planlanmıştır. Bu işlem doğrultusunda manipülatörün uç efektörüne bir iş takımı yerleştirilmesi gerekmektedir. Uç efektöre yerleştirilecek iş takımı bir parmak freze çakısı olarak seçilmiş ve bu freze çakısını döndürmek için fırçasız bir motor belirlenmiştir. Kullanılacak fırçasız motor olarak NTM Prop Drive Series 28-26A 1200kv adlı dron motoru seçilmiştir. Seçilen motorun genel bilgileri aşağıda tablo (5.4) te gösterilmiştir.

Tablo 5.4: NTM Prop Drive Series 28-26A 1200kv motorunun genel özellikleri [33]

NTM Prop Drive Series 28-26A 1200kv motorunun genel özellikleri	
Dönüş	1200rpm/V
Mil	3 mm
Ağırlık	57.9 g
Maksimum Güç	215W @12V 286W @15V

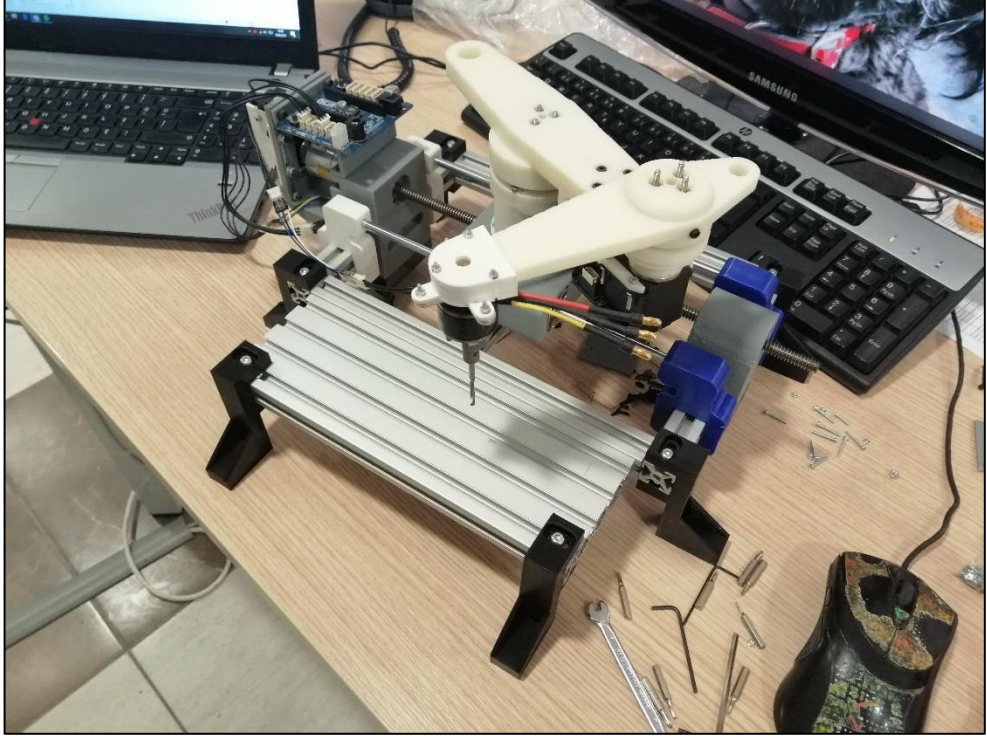


Şekil 5.13: NTM Prop Drive Series 28-26A 1200kv fırçasız motoru.



Şekil 5.14: Freze çakısının bağlandığı motorun uç efektöre bağlantı parçası

Yukarıda şekil (5.13) te uç efektöre yerleştirilmesi planlanan freze takımının bağlanacağı fırçasız motor gösterilmiş, şekil (5.14) te ise bu motorun manipülatörün uç efektörüne bağlamak için tasarlanıp üretilmiş olan parça gösterilmiştir.



Şekil 5.15: PRR artıksıl seri hibrit manipulatörü

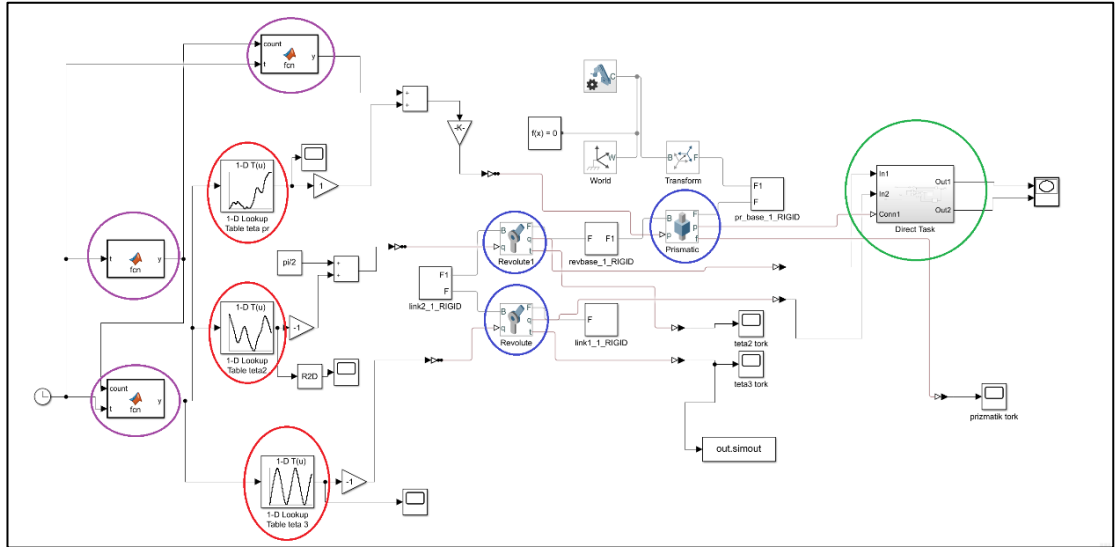
Bölüm 6

Simülasyon, Kontrol ve Doğrulama Çalışmaları

Bu bölümde tasarlanmış olan PRR seri artıksıl hibrit manipülatörünün simülasyon, kontrol ve doğrulama çalışmalarından bahsedilecektir.

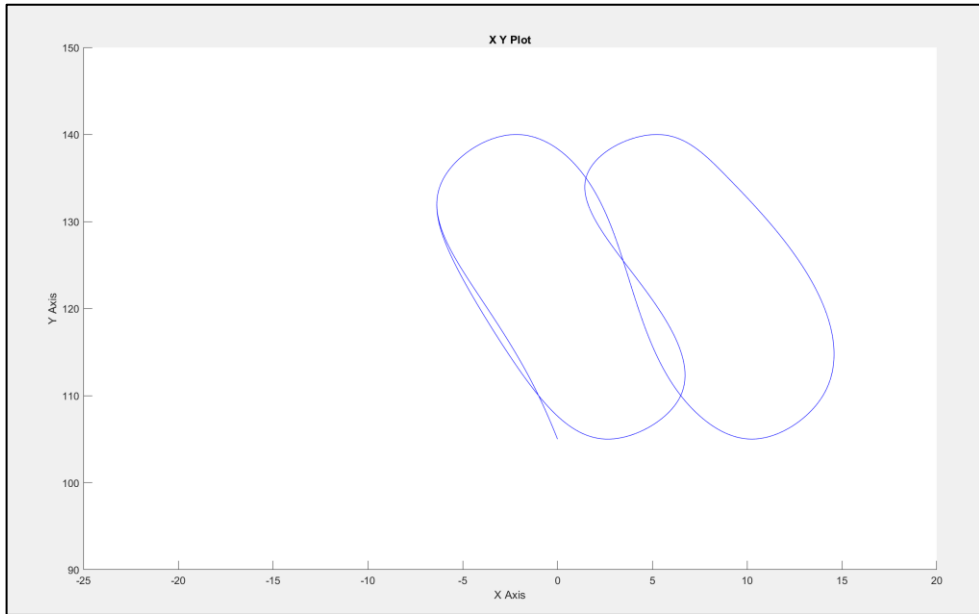
6.1 Simülasyon

Manipülatörün simülasyon ortamına geçirirken ilk olarak bütün hesaplamalar MATLAB programı kullanılarak bilgisayar ortamında çözülmüştür. Solidworks programı yardımıyla oluşturulan basitleştirilmiş PRR düzlemsel artıksıl seri manipülatörü modeli MATLAB Simulink ortamında simülasyonu oluşturulması için programa aktarılmıştır.



Şekil 6.1: Simülasyon için oluşturulmuş Simulink modeli

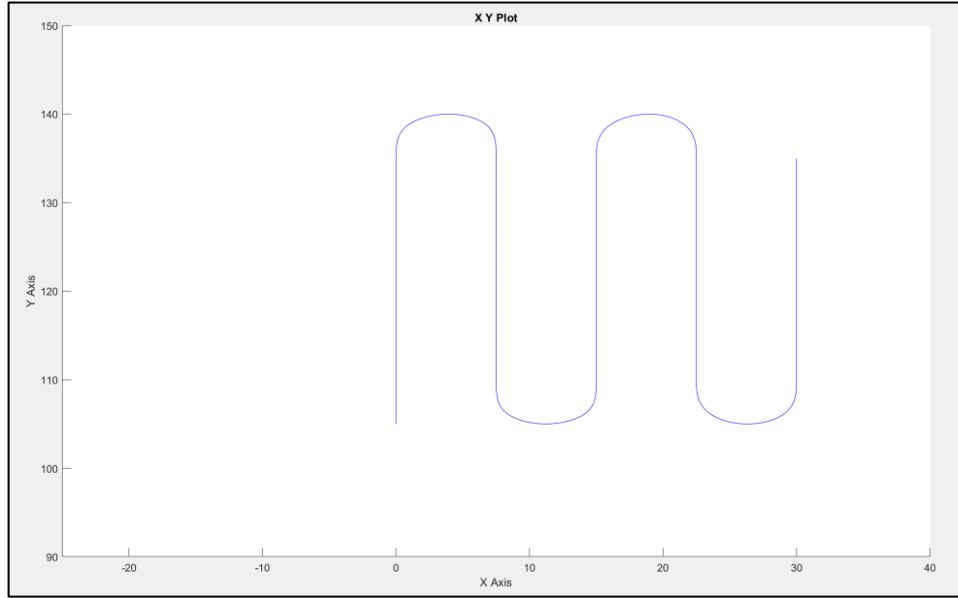
Yukarıda şekil (6.1) de PRR düzlemsel artıksıl seri manipülatörünün Simulink ortamında simülasyonunun gerçekleştirilmesi için oluşturulan model görülmektedir. Bu model de mavi renk ile çizilmiş daireler manipülatörün mafsallarını göstermekte, kırmızı ile çizilen daireler manipülatörün 2. Bölümde hesaplanmış olan döner mafsalları için mafsal açısı olan θ değerlerini prizmatik mafsal için ise Pz üzerindeki konum değişimini göstermekte, yeşil ile çizilmiş daire ise mafsallara gönderilen konum değerlerini alarak içersin de ileri kinematik uygulayan bloğu göstermektedir. Ayrıca dikkat edilirse kırmızı daire ile çizilmiş lookup table bloklarının içerisinde küçük grafikler bulunmaktadır. Bu grafikler daha önce üçüncü bölüm olan yörünge planlama bölümünde gösterilmiş olan θ_2 , θ_3 ve prizmatik mafsal konum grafikleri ile aynı olduğu görülmektedir. Mor ile çizilmiş olan daireler ise manipülatörün 21 saniye olarak belirlenen bir turunu bitirdikten sonra çalışma süresi 21 saniyenin üzerinde olduğu durumlarda diğer turlara geçmesini sağlayan döngünün oluşturulduğu bloklardır. Simülasyon kısmında da her işlemde olduğu gibi kolaylık olması nedeniyle ilk önce manipülatörün mikro kısmı olan RR kısmı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda gösterilmiş olan şekil (6.2) de manipülatörün RR kısmı çalıştığında takip edilen yörünge gösterilmektedir.



Şekil 6.2: Manipülatörün mikro kısmı olan RR kısmının simülasyonda çalıştırılması sonucu elde edilen yörünge

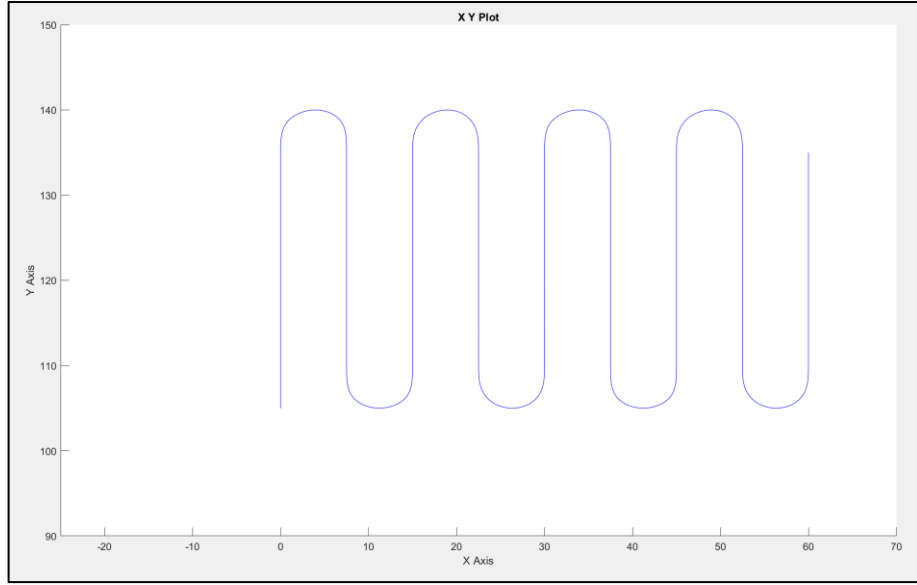
Yukarıdaki grafikte yörünge planlama bölümünde şekil (3.1) de gösterilmiş olan planlanmış yörünge robotun uç efektörünün takip etmesi sonucu oluşan yörünge

gösterilmiştir. Grafik üzerinde konumlar XY olarak gösterilmiştir bunun sebebi grafiği oluşturmak için kullanılan Simulink bloğunun adı XY plot bloğu olmasıdır. Burada X eksenini aslında Z eksenini Y eksenini de X eksenini temsil etmektedir. Oluşan bu grafik gözlük modeli olarak adlandırılmıştır. Manipülatör üzerinde bulunan prizmatik mafsalsimülasyonda çalıştırıldığında oluşan gözlük modelinin ötelenip daha önce yörünge planlama bölümünde şekil (3.2) de gösterilmiş olan parça üzerinde izlenmesi istenilen asıl yörüngeye dönüşmesi beklenmektedir.

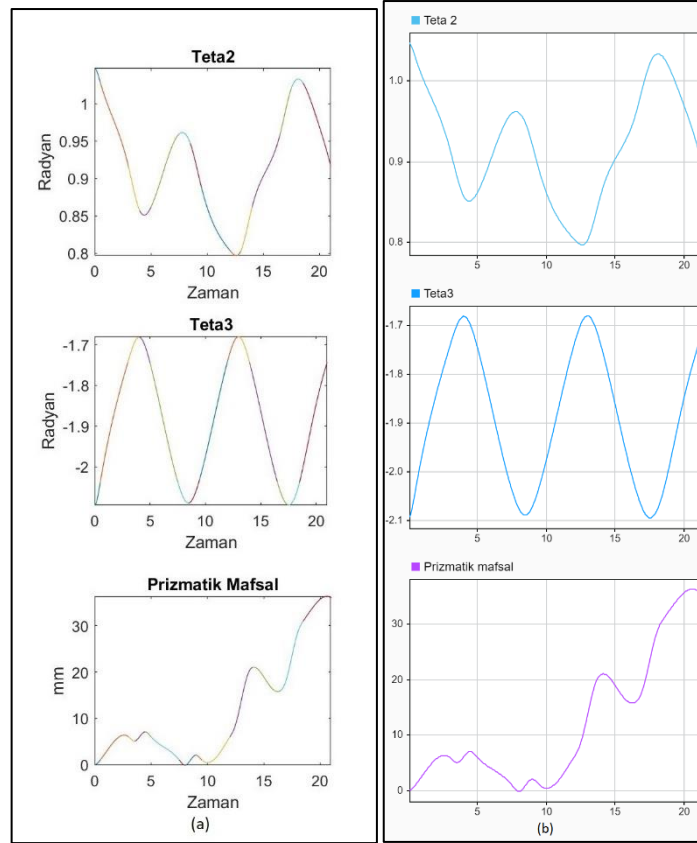


Şekil 6.3: Simülasyonda Prizmatik mafsals etkinleştirildiğinde elde edilen yörünge grafiği

Yukarıda şekil (6.3) te gösterilmiş olan grafikte simülasyonda bir tur tamamlandığı zaman manipülatörün uç efektörünün takip ettiği yörüngeyi göstermektedir. Görüldüğü üzere grafikte oluşan bu model de parça üzerinde takip etmesi planlanan yörünge modeline benzemektedir. Simülasyon süresi 39 saniyeye çıkartıldığında yukarıda oluşan grafiğin uzunluğu iki katına çıkacaktır. Burada ikinci turun sonunda sürenin 42 saniye yerine 39 saniye olması üçüncü bölüm olan yörünge planlama bölümünde de bahsedildiği gibi hareket başlangıç konuma geri döndüğünde birinci segment olan A1 segmentinin tekrar uygulanmaması, son segment olan N segmentinin de B segmenti ile aynı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.4: İki tur tamamlandığında oluşan yörünge

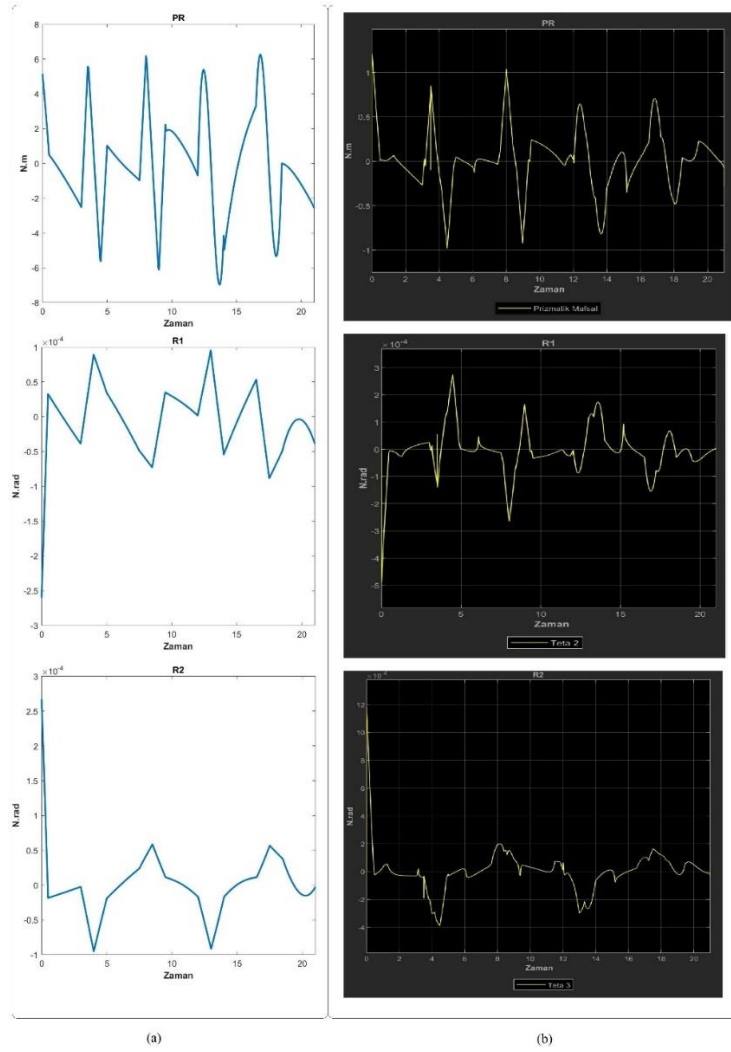


Şekil 6.5: (a) Kinematik analiz (b) Simülasyon ile oluşan grafikler

6.1.1 Simülasyon Tork Karşılaştırması

Bu bölümde daha önceden dinamik analiz ile hesaplanmış olan tork değerlerinin simülasyon sonucu oluşan tork değerleri ile karşılaştırılması gösterilecektir.

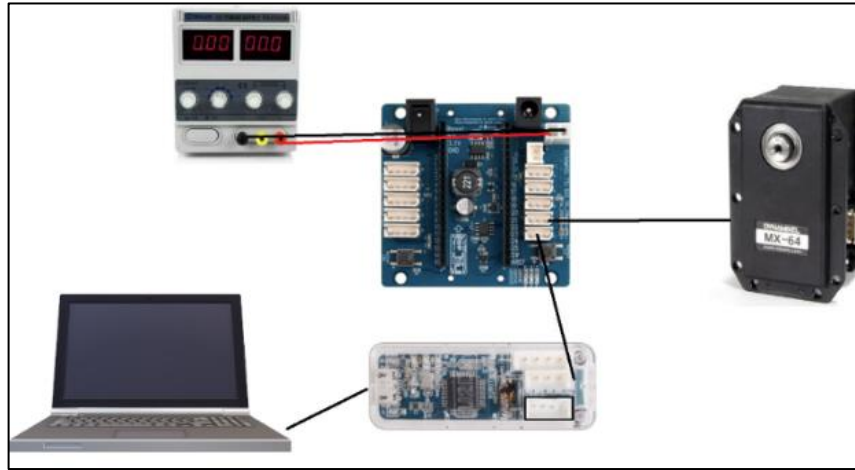
Yukarıda şekil (6.1) de gösterilmiş olan simulink simülasyon modeli üzerinde mavi olarak çizilmiş daireler ile gösterilmiş olan blokların manipülatör üzerinde bulunan mafsallar olduğu yukarıda açıklanmıştır. Bu bloklar üzerinde 3 tane çıkış bulunmaktadır. Bu çıkışlardan ilki mafsalları birbirine bağlamak için kullanılan çıkış ikincisi konum bilgilerinin okunduğu çıkış ve son olarak üçüncü olan t adlı çıkış ise tork bilgisinin okunduğu çıkıştır. Bu çıkışlar üzerine bir scope bloğu ekleyerek mafsal üzerinde oluşan tork değerinin simülasyon sonucunu görmüş oluruz.



Şekil 6.6: (a) Kinematik analiz sonucu tork değerleri (b) Simülasyon sonucu tork değerleri

6.2 Kontrol

Oluşturulan PRR artıksıl seri hibrit manipülatöründe eyleyici motor olarak Dynamixel MX-64 tipi akıllı servo motorlar kullanılmıştır. Simülasyon kısmında oluşturulmuş olan Simulink modeli üzerinde değişiklikler yapılarak Simulink üzerinde motorların kontrolü gerçek zamanlı olarak yapılmıştır. Bunun için öncelikle Dynamixel MX-64 tipi motorların üretici firması olan Robotis in Matlab ile motorlar arasındaki iletişimi sağması için hazırlanmış olduğu Dynamixel SDK adlı paket kurulumu gerçekleştirilmiştir. [34] Paketin kurulumu yapıldıktan sonra paket içerisinde bulunan örnek kodlardan yararlanılarak Matlab ile motorlar arasındaki haberleşme sağlanmıştır. Motor ile bilgisayar arasındaki bağlantı için bir tane entegre kart ve haberleşme bağlantısı kullanılmıştır. Entegre kart için OpenCM 485 genişleme kartı, bilgisayar ile haberleşmeyi sağlamak için U2D2 Dynamixel servo haberleşme modülü kullanılmıştır.



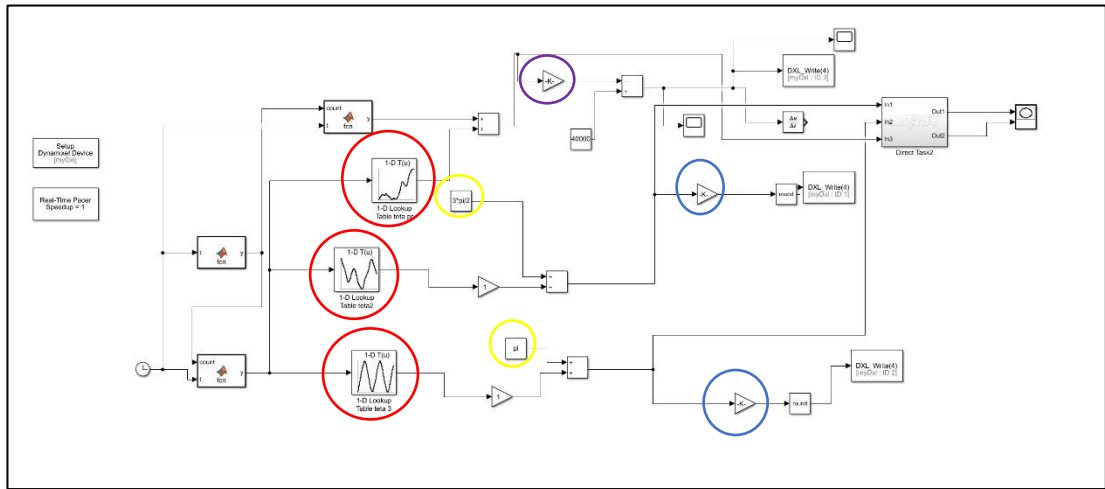
Şekil 6.7: OpenCM 485 Genişleme Kartı ile U2D2 Dynamixel Servo Haberleşme Modülü arasındaki bağlantı

Yukarıdaki şekil (6.7) da gösterilen görselde bilgisayar ile U2D2 Dynamixel servo haberleşme modülünün bağlantısı, U2D2 Dynamixel servo haberleşme modülü ile OpenCM 485 genişleme kartının bağlantısı ve OpenCM 485 genişleme kartı ile Dynamixel MX-64 tipi servo motorunun bağlantısı gösterilmiştir. Şekil (6.7) da gösterilen bağlantılar yapıldıktan sonra Matlab programında aşağıdaki şekil (6.8) de gösterilmiş olan kod çalıştırılmaktadır.

```
1 %%
2 Ts = 0.02;
3 myDxl = s1Dxl('COM5', 1000000);
4 myDxl.findDxls ()
5 myDxl
6
7 %%
8 myDxl.doEnableTorque (1);
9 myDxl.doEnableTorque (2);
10 myDxl.doEnableTorque (3);
11
```

Şekil 6.8: Matlab programı ile Dynamixel tipi motorları aktif etmek için kullanılan kod satırı

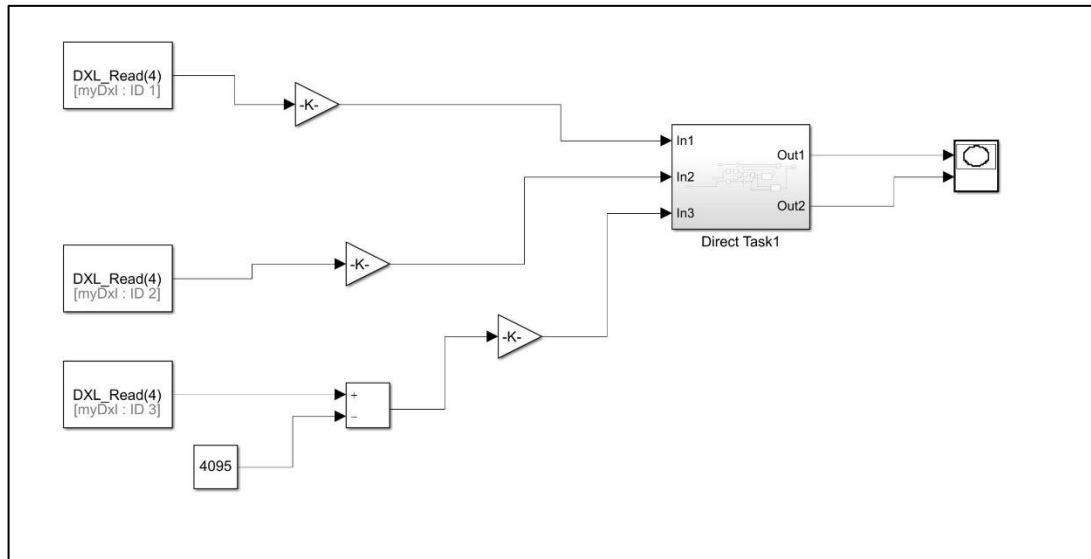
Yukarıda şekil (6.8) de gösterilmiş olan kod Matlab programını Dynamixel motorları üzerinde tork aktif etmesini sağlamaktadır. COM5 bilgisayar üzerindeki kullanılan USB portunu, 1000000 sayısı da motorların haberleşme hızı olan baud rate sayısını göstermektedir. Motorlar üzerinde tork oluşturulduktan sonra kontrol çalışmaları için oluşturulmuş olan Simulink modeline geçilmiştir.



Şekil 6.9: Oluşturulan PRR artıksıl seri hibrit manipülatörünün kontrollü için hazırlanmış Simulink modeli

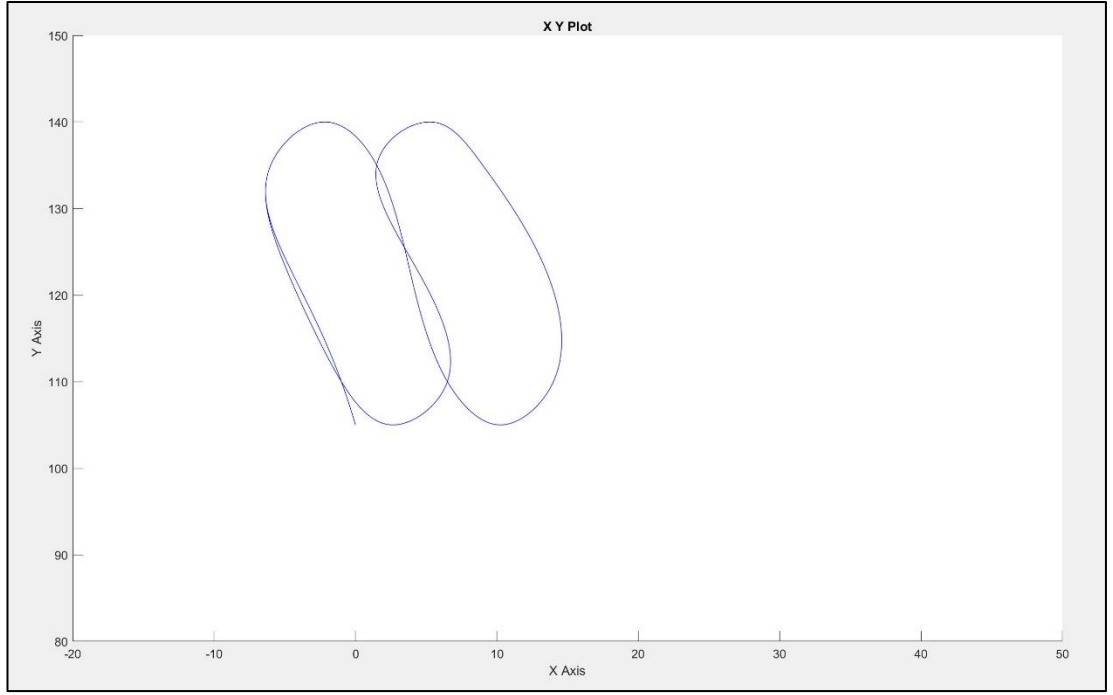
Yukarıda şekil (6.9) de manipülatör için Simulinkte hazırlanmış olan kontrol modeli gözükmektedir. Bu model üzerinde kırmızı ile işaretlenmiş olan bloklar simülasyon bölümünde olduğu gibi look up table blokları olup manipülatörün yörünge takibi için gereken konum bilgilerini içermektedir. Mavi ile çizilmiş olan daireler bu konum bilgilerini radyan değerinde motorun kendi çözünürlüğü olan 4095 değerine dönüştürmektedir. Yani motor bir tur döndüğünde motorun içerisinde bulunan encoder

bu konum bilgisini 4096 olarak algılamaktadır. Bu sebep ile mavi ile çizilmiş daireler içerisinde bulunan bloklar radyan olan konum değerlerini $4095/(2*\pi)$ değeri ile çarparak motorun çözünürlük derecesine çevirmektedir. Mor ile çizilmiş olan daire ise aynı şekilde konum bilgisini motorun kendi çözünürlük bilgisine çevirmektedir ancak buradaki bu motor prizmatik mafsalı kontrol eden motor olduğundan dolayı buradaki çarpım işlemi kullanılan vidalı milin 1 tur dönmesinin mafsalı kaç milimetre ilerlettiği ile doğru orantılıdır. Vidalı milin hatvesi 8 milimetre olduğundan buradaki blok gönderilen milimetre değerini $4095/8$ ile çarpmaktadır. Write adı ile gösterilen bloklar ise manipülatör üzerinde bulunan motorlar üzerindeki encoderların konum bilgilerini kayıt ettikleri adreslere motorların anladıkları çözünürlük değerlerine çevrilmiş konum bilgilerini yazmaktadır. Sarı ile işaretlenmiş bloklar ise motorların başlangıç konumlarını öteleyerek manipülatörün kinematik analizde kullanılmış olan başlangıç konumuna gelmesini sağlamaktadır.

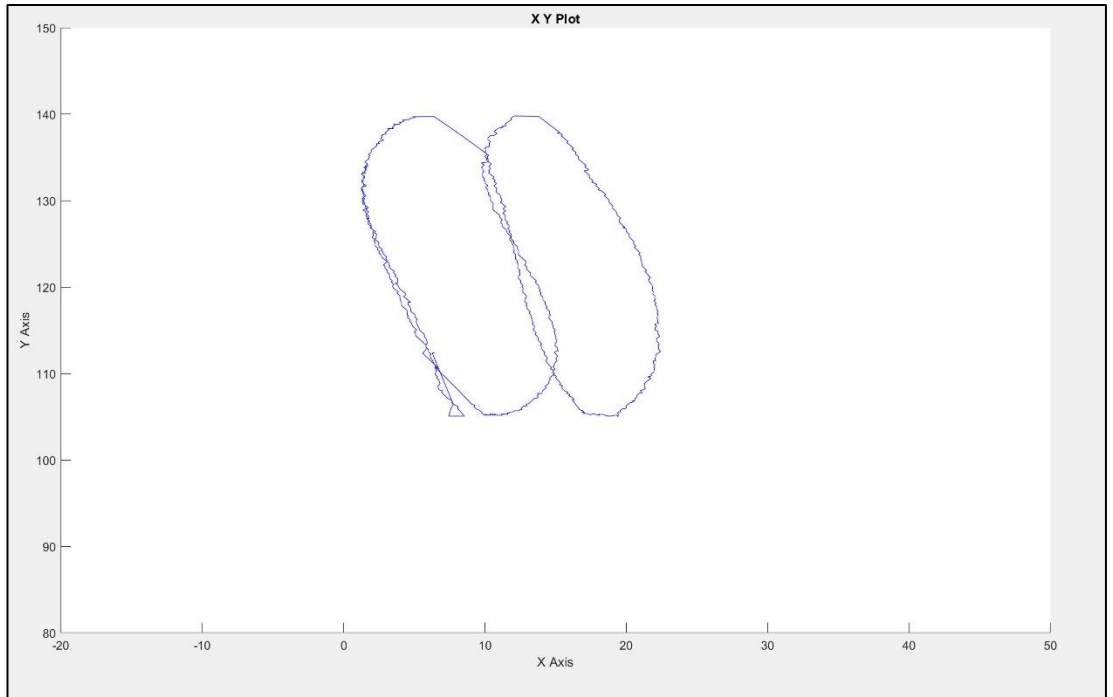


Şekil 6.10: Motorlar üzerine gönderilmiş olan sinyallerin okunması için oluşturulan Simulink modeli

Yukarıda şekil (6.10) da gösterilmiş olan Simulink modelinde read adı ile gösterilen bloklar motorlar üzerine yazılmış olan sinyallerin geri okunmasını sağlayan bloklardır. Bu blokları kullanarak gönderilen sinyal değerinin motorun ne kadar iyi bir şekilde uyguladığını gözlemlemiş oluyoruz. K ile gösterilmiş olan bloklar motorun çözünürlük değerini tekrardan açı ve mesafe bilgisine çevirerek bu konum bilgilerini tekrar ileri kinematiğe sokulmasını sağlamıştır.



(a)

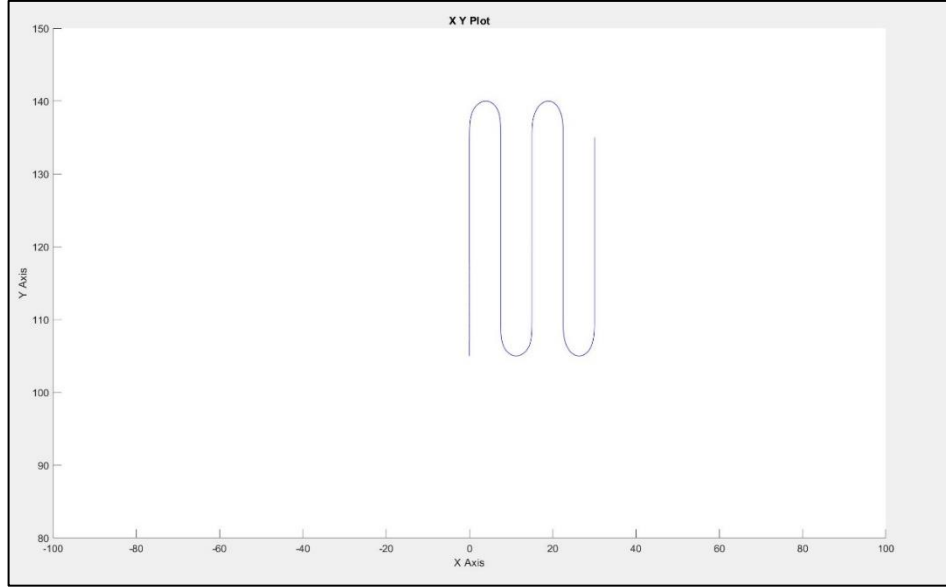


(b)

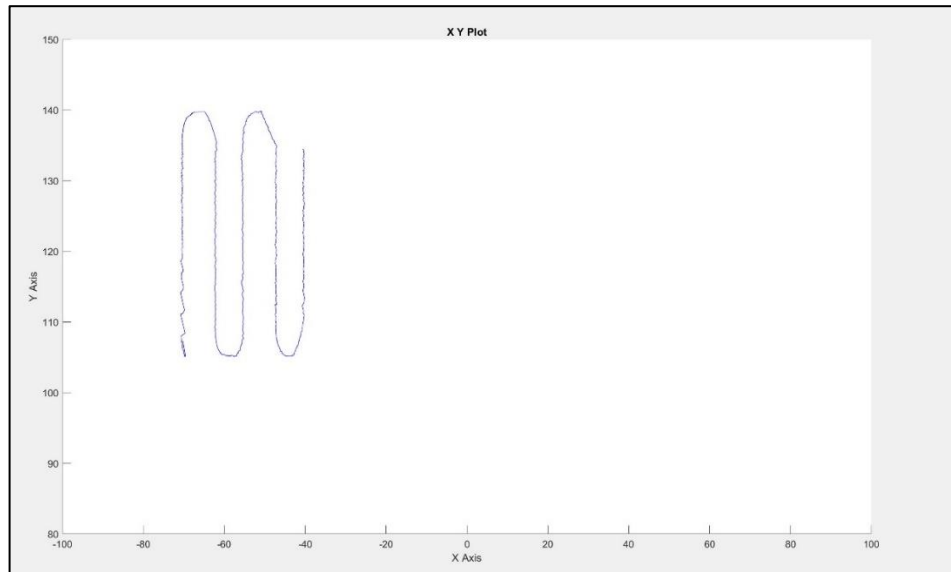
Şekil 6.11: Prizmatik mafsalı hareke eden motorun kapalı olduğu durumda (a) Motorlara gönderilen konum değerleri ile çizilmiş uç efektör konum grafiği (b) Motorlar üzerinde okunan değerler ile çizilmiş uç efektör konum grafiği

Yukarıda şekil (6.11) da gösterin grafikler manipülatörün mikro kısmı olan RR seri manipülatörünün çalıştırılmasıyla elde edilmiştir. Şekil (6.11) (a) motorlara gönderilen

konum bilgilerinin kinematik analize sokulması ile oluşturulmuş uç efektör konum grafiği, şekil (6.11) (b) ise motorlar üzerinden okunan sinyallerin ileri kinematik analize sokulması ile oluşturulmuş uç efektör konum grafiğidir. İki grafikten görüldü üzere planlanmış olan yörünge takip edilebilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.12: (a) Motorlara gönderilen konum değerleri ile çizilmiş uç efektör konum grafiği (b) Motorlar üzerinde okunan değerler ile çizilmiş uç efektör konum grafiği

Yukarıda şekil (6.12) de manipülatör üzerinde bulunan bütün motorların çalıştırılması sonucu oluşan uç efektör konum grafiği gözükmektedir. Şekil (6.12) (a) motorlara

gönderilen konum bilgileri ile çizilmiş uç efektör konum grafiğidir, şekil (6.12) (b) motorlar üzerinde okunan sinyal değerleri ile çizilmiş uç efektör konum grafiği.

6.3 Doğrulama Çalışmaları

Bu bölümde manipülatörün uç efektörünün takip etmiş olduğu yörüngenin bilgisayar ortamında kameralar yardımı ile izlenmesi sonucu toplanılan data ile manipülatörün yörüngeyi ne kadar doğru bir şekilde takip ettiğinin testi yapılmıştır.



Şekil 6.13: Optitrack hareket takip sistemi

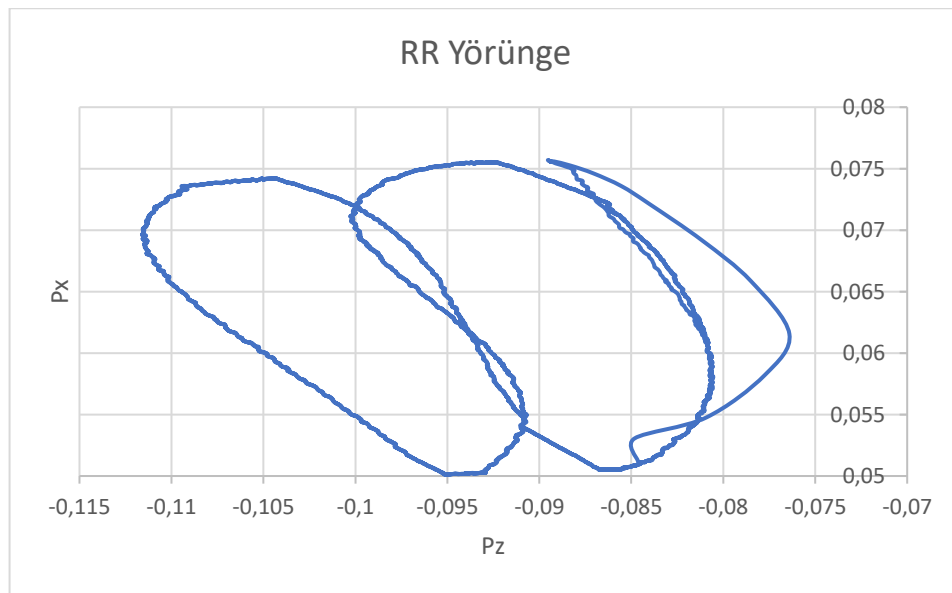
Bu test sırasında Optitrack Flex 3 tipi kameralar kullanılarak manipülatörün uç efektörüne yerleştirilmiş olan bir reflektörlü nokta ile hareket yakalama programı olan optitrack motive programı aracılığı ile fiziksel olarak gerçek dünyada yapılan bir testin bilgisayar ortamına aktararak doğruluğu test edilmiştir. Şekil (6.13) de de görüldüğü üzere test sırasında iki tane kamera kullanılmıştır. İlk olarak kalibrasyon için sistemin kendi kalibrasyon çubuğu kullanılarak alınmış olan yaklaşık 3000 nokta bulunmaktadır. Bu noktalar alındıktan sonra üç tane nokta kullanılarak bir referans

uzayı hazırlanmış ve daha sonra manipülötör oluşturulan referans uzayı üzerine yerleştirilerek çalıştırılmıştır.



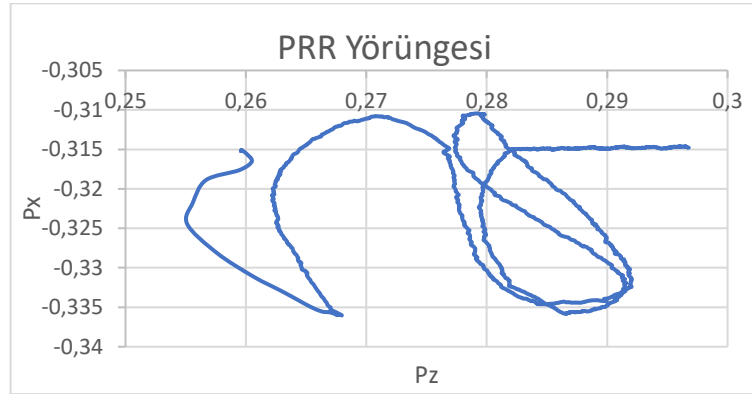
Şekil 6.14: Optitrack kalibrasyon çubuğu ve referans düzlemi

Referans uzayı oluşturulup kamera kalibrasyon işlemi gerçekleştirildikten sonra manipülötör kameraların gördüğü alana yerleştirilerek uç efektöründe bulunan reflektörlü nokta yardımıyla kamera takip testine sokulmuştur. İlk olarak prizmatik mafsallı mekanizma kapatılarak çalıştırılmış ve manipülötörün mikro kısmı olan RR kısmının çizmesi gereken gözlük modeli test edilmiştir.

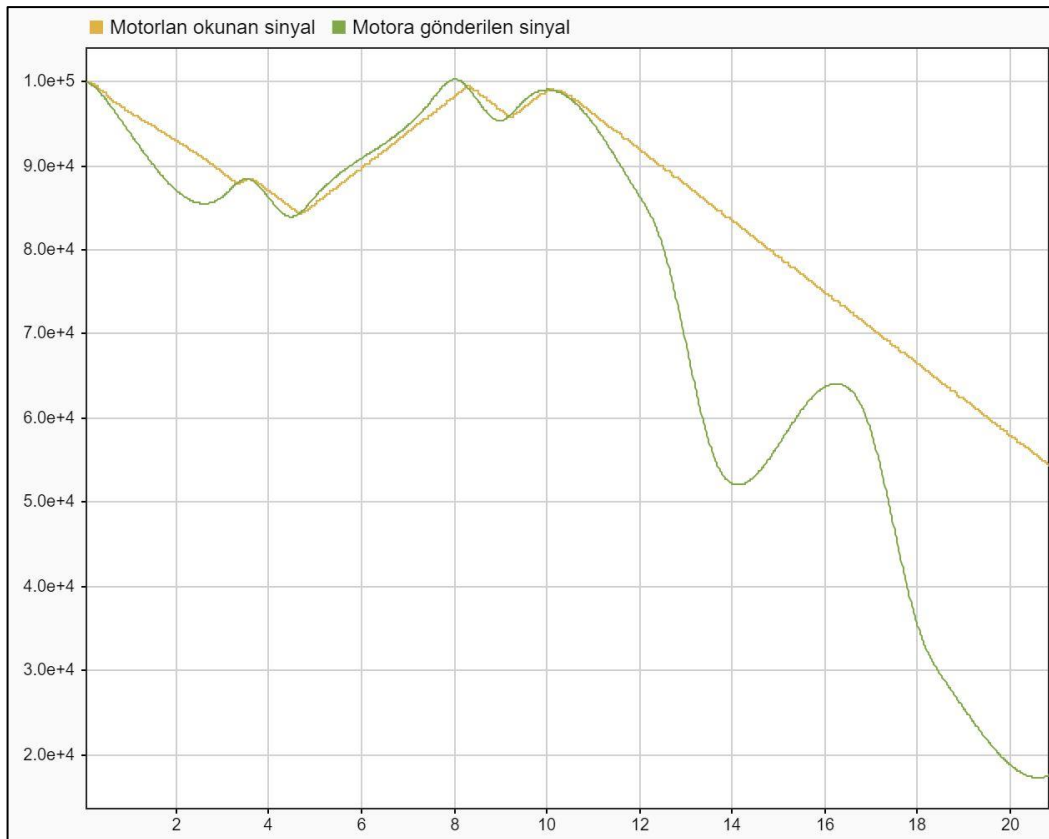


Şekil 6.15: Optitrack kamera takibi sonucu elde edilen mikro manipülötörün uç-efektör yörüngesi

Yukarıda şekil (6.15) te görüldüğü üzere manipülâtörün Prizmatik mafsallı makro kısmı çalıştırılmayıp sadece mikro kısmı olan RR kısmı çalıştırıldığında elde edilen yörünge şekil (6.2) de gösterilen simülasyon sonucuna benzer çıkmıştır. Gözlük modeli elde edildikten manipülâtör üzerinde bulunan prizmatik mafsallı mekanizma da aktif hale getirilerek manipülâtörün parça üzerinde izlemesi istenilen yörüngeyi doğrulamasına geçilmiştir.

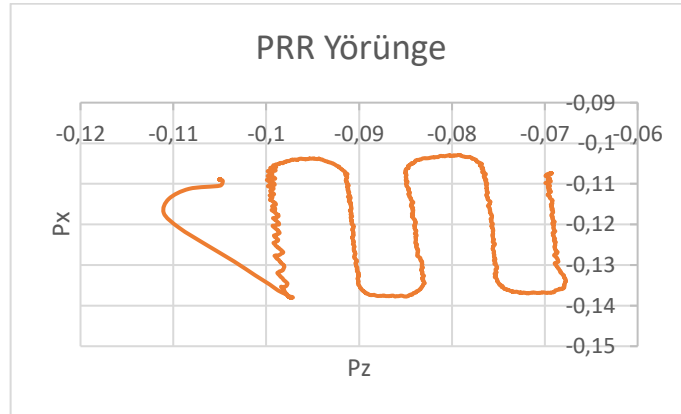


Şekil 6.16: Optitrack kamera takibi sonucu elde edilen uç efektör yörüngesi (2 hatveli mil)



Şekil 6.17: Prizmatik mafsallı kontrol eden motorun konum zaman grafiği

Yukarıda şekil (6.16) te manipülatörün prizmatik mafsallı mekanizması çalıştığında kamera takibi sonucu parça üzerinde izleyeceği yörünge çizilmiştir. Şekildeki çizilmiş olan yörünge görüldüğü üzere istenilen yörünge ile uyuşmamaktadır. Oluşan bu sorunu düzeltmek için ilk olarak prizmatik mafsallın hareketinden sorumlu olan motorun üzerine gönderilen konum bilgisi ile buna karşılık motordan okunan konum bilgisi karşılaştırılmıştır. Yukarıda şekil (6.17) da gösterilmiş olan grafikte yeşil ile çizilmiş olan çizgi prizmatik mafsallı hareket ettiren motora gönderilmiş olan konum değerleri, turuncu ile çizilmiş olan çizgi ise gönderilen konum değerlerine karşılık olarak motor üzerinden okunmuş olan konum değerleridir. Grafikten görüldüğü üzere motor aynı zamanda istenilen konuma gidememiş yani hız değeri bakımından yavaş kalmıştır. Sorunu gidermek için manipülatör üzerinde bulunan motorun değiştirilmesi yerine beşinci bölümde kaplin ve vidalı mil seçimi kısmında anlatılmış olan vidalı milin değiştirilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha önceden 2 hatveli vidalı mil kullanılmış iken bu vidalı mil 8 hatveli trapez vidalı mil olarak değiştirilmiştir. Yani vidalı mil 1 tur döndüğünde prizmatik mafsall 8 mm ötelenecek şekilde bir vidalı mil kullanılmıştır. Yapılan bu değişiklik sonucu olarak kamera ortamında tekrar yörünge takibi yapılarak aşağıdaki grafik elde edilmiştir.

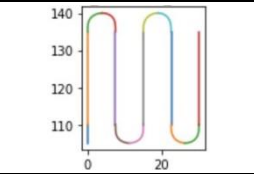


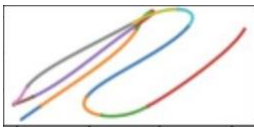





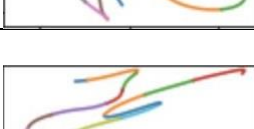








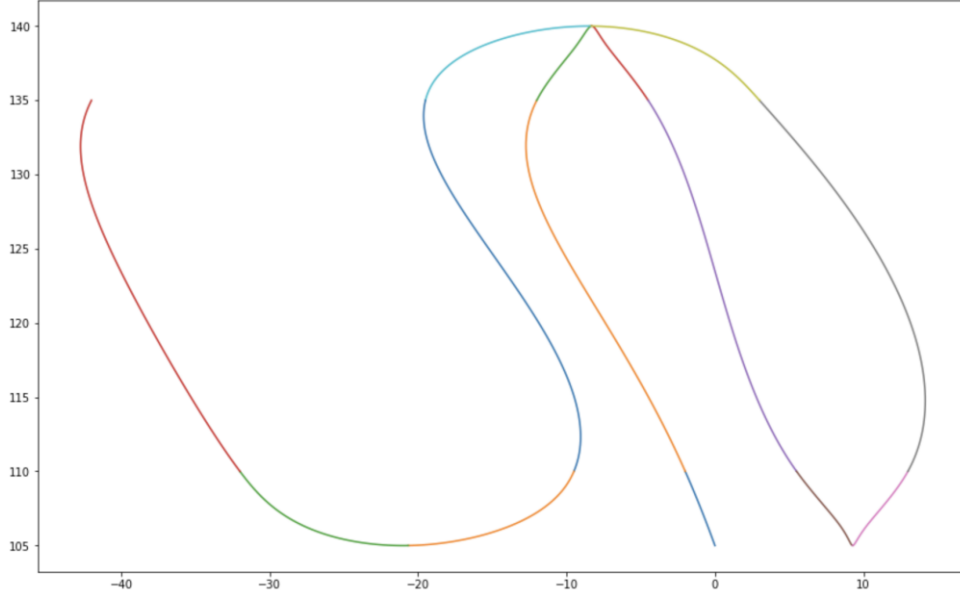
Şekil 6.18: Optitrack kamera takibi sonucu elde edilen uç efektör yörüngesi (8 hatveli mil)

Yukarıda şekil (6.18) da görüldüğü üzere manipülatör üzerinde bulunan vidalı mil hatve sayısı büyütülerek 1 tur rotasyon ile ötelenme miktarı artırılmıştır. Ötelenme miktarı artırılınca manipülatör üzerinde bulunan motorların maksimum hızı çalışması gereken maksimum hıza yetişmiş ve yörünge takibi istenilen şekilde sağlanmıştır. Manipülatörün parça üzerinde takip etmesi istenilen yörüngeye ulaştıktan sonra

manipülator üzerinde bulunan motorlara farklı başlangıç pozisyonları verilerek takip edecekleri yörüngeler çıkarılmıştır. İkinci bir doğrulama testi olarak RR mikro manipülatorünün başlangıç açısı değerleri 90 derecelik açı değişimleri yapılarak oluşabilecek yörünge grafikleri hazırlanmıştır. Oluşturulan yörüngelerden bazıları tekrardan kamera ortamında izlenerek hareketin takibinin ne kadar doğru olduğunu göstermek için kullanılmıştır. Başlangıç konumlarının 90 derecelik ötelenmesi ile oluşan yörüngelerin grafikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

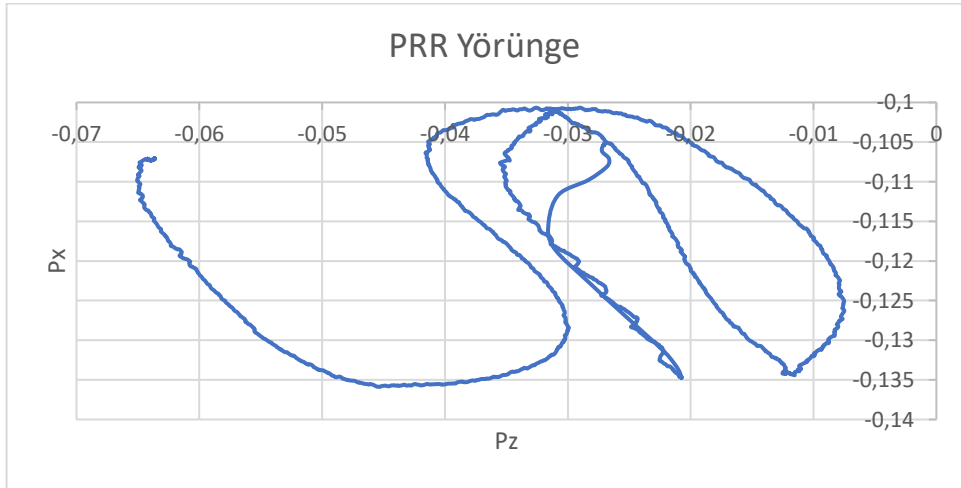
Tablo 6.1: Mikro manipülator üzerinde bulunan mafsallara başlangıçta öteleme verildiği zaman uç-efektörün takip ettiği yörünge

$\theta_2 = 0^0$ $\theta_3 = 0^0$		$\theta_2 = 0^0$ $\theta_3 = 90^0$	
$\theta_2 = 0^0$ $\theta_3 = 180^0$		$\theta_2 = 0^0$ $\theta_3 = 270^0$	
$\theta_2 = 90^0$ $\theta_3 = 0^0$		$\theta_2 = 90^0$ $\theta_3 = 90^0$	
$\theta_2 = 90^0$ $\theta_3 = 180^0$		$\theta_2 = 90^0$ $\theta_3 = 270^0$	
$\theta_2 = 180^0$ $\theta_3 = 0^0$		$\theta_2 = 180^0$ $\theta_3 = 90^0$	
$\theta_2 = 180^0$ $\theta_3 = 180^0$		$\theta_2 = 180^0$ $\theta_3 = 270^0$	
$\theta_2 = 270^0$ $\theta_3 = 0^0$		$\theta_2 = 270^0$ $\theta_3 = 90^0$	
$\theta_2 = 270^0$ $\theta_3 = 180^0$		$\theta_2 = 270^0$ $\theta_3 = 270^0$	



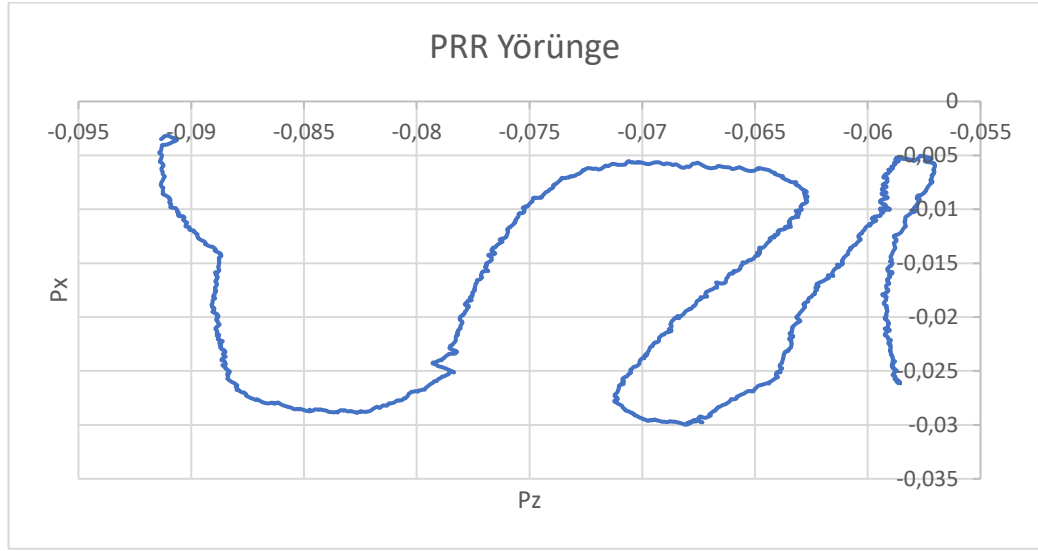
Şekil 6.19: Prizmatik mafsalı harekete ettiren motor ters çalışırsa oluşacak olan yörünge

Yukarıda tablo (6.1) de manipülatörün mikro kısmına farklı ötelemeler uygulandığı zaman oluşması beklenen yörüngeler gösterilmiş ve şekil (6.19) de ise öteleme uygulanmayıp prizmatik mafsallı hareket eden motorun sisteme ters monte edilmesi sonucu oluşacak olan yörünge gösterilmiştir.



Şekil 6.20: Prizmatik mafsalı harekete ettiren motor ters çalıştığında oluşan yörünge kamera takibi

Yukarıda şekil (6.20) de görüldüğü gibi prizmatik mafsalı çalıştıran motorun ters çalışması durumunda oluşan grafik ile hesaplama sonucu şekli (6.19) da gösterilmiş olan yörünge grafiği uyuşmaktadır.



Şekil 6.21: $\theta_2 = 270^0$, $\theta_3 = 180^0$ öteleme yapıldığında oluşan yörünge kameranın ortasında takibi

Yukarıda şekil (6.21) da manipülâtörün mikro kısmı olan RR kısmının mafsallarının başlangıç açılarına $\theta_2 = 270^0$, $\theta_3 = 180^0$ şeklinde bir öteleme yapılması durumunda oluşan yörünge görülmektedir. Görüldüğü üzere bu yörünge tablo (6.1) de gösterilmekte olan yörüngeler arasındakilerden birini göstermekte ve bu grafikte sonuç ile uyuşmaktadır.

Bölüm 7

Sonuç

Robotik sistemlere bakıldığında endüstride kullanılan sistemlerde robotik imalatta talaşlı üretim sıklıkla gözükmemektedir. Makro mikro hibrit robot kullanımının yüzey temizleme işleminde kullanım örneklerine rastlanmamıştır. Bu tez çalışması kapsamında imalatta üretilen parçanın kalitesini belirleyen unsurlardan biri olan son işlem olarak bahsedilen yüzey temizliği işlemi gerçekleştirilmesi doğrultusunda PRR artıksıl seri hibrit düzlemsel manipülatörü önerilmiştir. Önerilen manipülatörün mikro kısmı olan RR seri manipülatöründen yararlanılarak küçük bir çalışma yüzeyi üzerinde hassas konumlama planlanmış, oluşturulan tek serbestlik derecesine sahip prizmatik mafsallı mekanizma kullanılarak makro hareketten yararlanıp çalışma uzayının genişletilmesi hedeflenmiştir. Tasarlanan manipülatörün kinematik analizi D-H parametreleri kullanılarak ileri ve geri kinematik yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizi ise Lagrange dinamiği kullanılarak yapılmıştır. Manipülatörün uç efektörünün taşıma işlemi doğrultusunda parça üzerinde takip etmesi için bir yörünge oluşturulmuş, oluşturulan yörüngeyi takibi sağlanmıştır. Tasarlanan manipülatörün prototip üretimi için 3D yazıcılar, sigma profiller ile yapılmış ve manipülatörün mafsallarında bulunan eyleyici motorlar için Dynamixel MX-64 tipi akıllı servo motorları kullanılmıştır. Prototip üretimi yapıldıktan sonra manipülatörün bilgisayar ortamında testi için simülasyonu oluşturulmuş ve ardından manipülatörün kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Kontrol işlemi sırasında manipülatörün uç efektörünün takip etmiş olduğu yörüngeyi doğruluğunun test edilmesi için manipülatörün uç efektörüne reflektörlü bir nokta yerleştirilerek bilgisayar ortamında kamera takibi ile veri toplanmış ve bu sayede takip edilen yörüngeyi doğrulama çalışması yapılmıştır. Doğrulama çalışmaları sırasında birtakım mekanik konstrüksiyon problemleri ile karşılaşmıştır. Bu problemler kullanılan kaplinin ve vidalı milin değiştirilmesi ile giderilmiştir.

İleride oluşturulan PRR seri artıksıl düzlemsel hibrit manipölatörün son gerçekleştirilecek testi olarak gerçek bir parça üzerinde talaş kaldırarak yüzey temizleme işleminin testlerinin yapılması planlanmaktadır. Manipölatörün parça üzerinde takip ettiği yörüngenin iyileştirme çalışması olarak sisteme x ekseninde bir tane daha prizmatik mafsal eklenerek yörüngenin x ekseninde de iyileştirme yapılması planlanmaktadır.

Kaynakça

- [1] Türk dil kurumu etimoloji sözlüğü [Aralık 2021] <https://sozluk.gov.tr/>
- [2] Goertz R C. Master-Slave Manipulator. United States: N. P; 1949; doi:10.2172/1054625.
- [3] John J Craig. Introduction to Robotics Mechanics and Control, Pearson Education Third Edition; 2005
- [4] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo. Robotics modelling, Planning and Control, Springer; 2009
- [5] J M Skowronski. Control Dynamics of Robotic Manipulators, ACADEMIC PRESS; 1986
- [6] Jean-Pierre Merlet. Parallel Robots, First Edition, Springer Science Business Media B.V.; 2000
- [7] Mark W Spong, Seth Hutchinson, M Vidyasagar. Robot Modeling and Control, Second Edition. John Wiley & Sons; 2020
- [8] Sharon A. The Macro/Micro Manipulator: An Improved Architecture For Robot Control. PhD. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology; 1988.
- [9] Shimon Y. Handbook of Industrial Robotics, Second Edition. John Wiley & Sons; 1999
- [10] Michael E Moran. Evolution of robotic arms J Robotic Surg; (2007) 1:103–111 DOI 10.1007/s11701-006-0002-x
- [11] Lauterbach R, Matanes E, Lowenstein L. Review of robotic surgery in gynecology—the future is here. Rambam Maimonides Medical Journal. 2017;8(2):e0019. doi:10.5041/rmmj.10296.

- [12] The Maclean Hunter Newspaper For the Canadian Medical Profession
Volume 21, No.23 Toronto; November 12, 1985
https://www.brianday.ca/imagez/1051_28738.pdf
- [13] Egelnd O, Sagli J R. Kinematics and control of a space manipulator using the macro-micro manipulator concept, Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control;1990; Honolulu, Hawaii, pp. 3096-3101
- [14] Marzwell N I, Uecker D R, Wang Y A. Force-controllable macro-micro manipulator and its application to medical robots, Technology 2003: The Fourth National Technology Transfer Conference and Exposition;1994; NASA, Washington, Vol. 1, pp. 3-16
- [15] Taghirad H D, Nahon M. Kinematic Analysis of a macro-micro redundantly actuated parallel manipulator, Advanced Robotics; 2008; Vol. 22, pp.657-687
- [16] Saeid Nahavandi, Mohammad Jashim Uddin, Yasuo Nasu, Hieu Trinh, Mozafar Saadat. Automated robotic grinding by low-powered manipulator. Robot. Comput. Integr. Manuf; 2007; 23(5), 589–598
- [17] Sörnmo O, Olofsson B, Schneider U, Robertsson A Johansson R. Increasing the milling accuracy for industrial robots using a piezo-actuated high-dynamic micro manipulator, IEEE/ASME Conference on Advanced Intelligent Mechatronics; 2012; Kaohsiung, Taiwan, pp. 104-110.
- [18] Schneider U, Olofsson B, Sörnmo O, Drust M, Robertsson A, Hagele M, Johansson R. Integrated approach to robotic machining with macro/micro-actuation, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing; 2014; Vol. 30, pp. 636-647.
- [19] Wang W, Yun C. A path planning method for robotic belt surface grinding. Chin. J. Aeronaut; 2011; 24(4), 520–526
- [20] Huang H, Gong Z M, Chen X Q, Zhou L. Robotic grinding and polishing for turbinevane overhaul. J. Mater. Process. Technol; 2002; 127(2), 140–145

- [21] Emre Uzunoglu, Mehmet Ismet Can Dede and Gökhan Kiper. Trajectory planning for a planar macro-micro manipulator of a laser-cutting machine *Industrial Robot: An International Journal*; 2016; 43/5 pp 513–523
doi.org/10.1108/IR-02-2016-0057
- [22] M İ Can DEDE, Erkin GEZGİN, Gökhan KİPER, Ercan MASTAR, Tayfun SİĞİRTMAÇ, Emre UZUNOĞLU. DESIGN AND ANALYSIS OF A PARALLEL MECHANISM FOR KINEMATICALLY REDUNDANT HYBRID PLANAR LASER CUTTING MACHINE, 16th International Conference on Machine Design and Production; 2014; İzmir, Turkey (pp. 810-822). <https://gcris.iyte.edu.tr/handle/11147/4210>
- [23] Yuanjian Lv, Zhen Peng, Chao Qua, Dahu Zhua. An adaptive trajectory planning algorithm for robotic belt grinding of blade leading and trailing edges based on material removal profile model, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* ;26 May 2020 doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101987
- [24] MohammadHadi FarzanehKaloorazi, Ilian A Bonev, Lionel Birglen. Simultaneous path placement and trajectory planning optimization for a redundant coordinated robotic workcell *Mechanism and Machine Theory* Volume 130;December 2018; Pages 346-362
doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.08.022
- [25] Qilong Wang, Wei Wang , Lianyu Zheng, Chao Yun. Force control-based vibration suppression in robotic grinding of large thinwall shells, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*; February 2021; Volume 67, 102031
doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102031
- [26] Yusuf Hamida El Naser, Durmus Karayel, S Serdar Ozkan, Gokhan Atali. Talaşlı İmalatta Otomatik Çapak Alma İşlemi için Endüstriyel Robot Kol Tasarımı; 2017; ISITES2017 Baku - Azerbaijan A7-ISITES2017ID241
- [27] Duygu Atcı, Efecan Akdal, Fatih Cemal Can, and Erkin Gezgin. Trajectory Planning of a PRR Redundant Serial Manipulator for Surface Finishing Operations on Plane, Presented at Interactive Collaborative Robotics 4th

International Conference; 2019; ICR 2019 doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4

- [28] Tsai LW. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. Kanada: John Wiley & Sons; 1999.
- [29] Z-ABS_Technical_Data_Sheet [Aralık 2021] <https://zortrax.com/filaments/z-abs/>
- [30] ABSPlus P430 - EN Data Sheet FDM Material [Aralık 2021] <https://support.stratasys.com/en/materials/fdm/absplus-p430>
- [31] ROBOTIS e-manual /MX-64AR, MX-64AT [Aralık 2021] <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-64/>
- [32] Kullanılan sigma Profil için teknik resim [Aralık 2021] <https://www.doguskalip.com.tr/Urun/1077/20x20-sigma-profil>
- [33] NTM Prop Drive Series 28-26A 1200kv motorunun genel özellikleri [Aralık 2020] https://hobbyking.com/en_us/ntm-prop-drive-series-28-26a-1200kv-286w.html?__store=en_us
- [34] Dynamixel MATLAB iletişimi için gerekli olan dosyaların kurulumu [Aralık 2021] https://emanual.robotis.com/docs/en/software/dynamixel/dynamixel_sdk/library_setup/matlab_windows/

Özgeçmiş

Adı Soyadı: Efecan AKDAL

Eğitim:

2013–2019

Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

2019–2022

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

İş Deneyimi:

Tem 2016 – Ağu 2016 – Yaz ayı Stajyer – CTS Makine A.Ş.

Tem 2017 – Ağu 2017 – Yaz ayı Stajyer – OBEL CIVATA SAN. VE TIC. A.S.

2019 – Araş.Gör. – Yaşar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Yayımlar :

1. Duygu Atcı, Efecan Akdal, Fatih Cemal Can, and Erkin Gezgin (2019) Trajectory Planning of a PRR Redundant Serial Manipulator for Surface Finishing Operations on Plane Presented at Interactive Collaborative Robotics 4th International Conference, ICR 2019
2. Efecan AKDAL, Duygu ATCI, Fatih Cemal CAN, Erkin GEZGİN Development of Trajectory Design of a Planar PRR Redundant Serial Manipulator FCRAR 2021