

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR ROBOT MANİPULATÖRÜN BİLGİSAYAR
DESTEKLİ MÜHENDİSLİK ARAÇLARI İLE
ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ**

Yalkın KANT

Ağustos, 2009

İZMİR

BİR ROBOT MANİPULATÖRÜN BİLGİSAYAR DESTEKLİ MÜHENDİSLİK ARAÇLARI İLE ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yalkın KANT

Ağustos, 2009

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

YALKIN KANT, tarafından **YRD. DOÇ. DR. ZEKİ KIRAL** yönetiminde hazırlanan **“BİR ROBOT MANİPULATÖRÜN BİLGİSAYAR DESTEKLİ MÜHENDİSLİK ARAÇLARI İLE ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Zeki KIRAL

Yönetici

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezim boyunca bana yol gösteren, beni her konuda destekleyen ve değişik bakış açısıyla ufkumu genişleten danışmanım Yrd. Doç. Dr. Zeki KIRAL'a, lisans ve yüksek lisans boyunca bana olan güven ve desteğinden dolayı Prof. Dr. Erol UYAR'a çok teşekkür ederim.

Başta Osman KORKUT olmak üzere Otomatik Kontrol Laboratuvarı çalışanlarına anlayışlarından ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Hiç şüphesiz bana en büyük desteği ve motivasyonu sağlayan Melis DİNÇ'e çok teşekkür ederim.

Son olarak, bu günlere gelmemi sağlayan annem Bengü KANT'a, babam Recep KANT'a ve ağabeyim Doğa KANT'a çok teşekkür ederim.

Yalkın KANT

BİR ROBOT MANİPÜLATÖRÜN BİLGİSAYAR DESTEKLİ MÜHENDİSLİK ARAÇLARI İLE ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ

ÖZ

Robot manipülatörleri üretim, montaj, kaynak, boya, paketleme gibi otomasyona dayalı günümüz endüstriyel uygulamalarında sıkça kullanılan sistemlerdir. Üretimde hız, yüksek hassasiyet ve kalite artışı robot manipülatörlerinin sağladığı üstünlüklerdir. Karmaşık geometrilere sahip bu sistemlerin tasarımlarında klasik yöntemler yerine günümüz modern mühendislik araçları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, ele alınan bir endüstriyel robot manipülatörü için statik ve dinamik analizler, sonlu elemanlar yöntemi kullanan ticari bir bilgisayar destekli mühendislik yazılımı olan CosmosWorks ile gerçekleştirilmiştir. Farklı çalışma yükleri için, robot manipülatörünün üç boyutlu çalışma uzayı içerisindeki farklı noktalara erişmesi durumundaki uç nokta statik yer değiştirmeleri ve manipülatör üzerinde oluşan en büyük von-Mises gerilmeleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Bu şekilde, robot manipülatörünün çalışma uzayı içerisindeki statik davranışı belirlenmiştir. Ayrıca, robot manipülatörünün farklı konumlardaki direngenliklerini incelemek amacı ile doğal frekans analizleri yapılmıştır. Manipülatörün çalışma uzayı içerisindeki doğal frekans değişimleri üç boyutlu olarak sunulmuştur. Ayrıca robot manipülatörünün belirlenen bazı hareketleri farklı hızlarda gerçekleştirmesi durumunda gereksinim duyduğu mafsal momentleri de incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Robotlar, çalışma uzayı, sonlu elemanlar yöntemi, bilgisayar destekli mühendislik.

WORKSPACE ANALYSIS OF A ROBOT MANIPULATOR VIA CAE TOOLS

ABSTRACT

Robot manipulators are frequently used in automation system based on industrial applications like manufacturing, welding, painting and packing. Velocity, high sensitivity and quality are the advantages of the robot manipulators in manufacturing. During the design of such complicated geometric systems, modern engineering methods are often preferred rather than classical methods.

In this study, static and dynamic analyses of an industrial robot manipulator are performed by using a commercial computer aided engineering software CosmosWorks, which uses the finite element method. End point static displacement and maximum von-Mises stresses on the robot manipulator are calculated numerically for different pay loads where the manipulator reaches to different points in three dimensional workspace. In this way, the static behavior of robot manipulator is determined in its workspace. In addition, natural frequency analyses are performed to identify the stiffness of the robot manipulator for different positions. Natural frequency variations of manipulator in its workspace are presented in three dimensional space. Besides, joint torques which are required by the robot manipulator to perform some motions in different velocities are also investigated.

Keywords: Robots, workspace, finite element method, computer aided engineering.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v

BÖLÜM BİR-GİRİŞ..... 1

1.1 Giriş	1
1.2 Endüstriyel Robotların Tarihsel Gelişimi	1
1.3 Literatür Taraması	7
1.4 Projenin Amacı.....	10

BÖLÜM İKİ-ANALİZ YÖNTEMLERİ..... 12

2.1 Robot Tasarımında Analiz Yöntemleri.....	12
2.2 Çalışma Uzayı	12
2.3 Üç Serbestlik Dereceli Basit Bir Robotun Çalışma Uzayı Analizi	16
2.3.1 Robotun Kinematik Analizi	17
2.3.2 Doğal Frekans Kavramı.....	19
2.3.2.1 Ankastre Bir Kiriş İçin Doğal Frekans İfadesi: Topaklanmış Parametrelili Sistem Kabulü.....	21
2.3.2.1 Ankastre Bir Kiriş İçin Doğal Frekans İfadesi: Dağıtılmış Parametrelili Sistem Kabulü.....	22

2.3.3 Model Robotun Çalışma Uzayı Statik ve Frekans Analizi.....	28
2.4 Endüstriyel Robot İçin Analizler (Staubli RX-170B)	34
2.4.1 Robotun Teknik Verileri.....	36
2.5 Kinematik Analiz.....	38
2.5.1 Düz Kinematik Analizi.....	39
2.5.2 Ters Kinematik Analizi	42
2.5.2.1 Bilek Merkez Noktası Konum Analizi	43
2.5.2.2 Uç İşlevcinin Yönü	46
2.6 Statik Analiz	47
2.6.1 Seri Manipülatorlerin Statik Analizi	47
2.6.1.1 Uzuvlardaki Kuvvet ve Moment Dengesi.....	48
2.6.1.2 Tekrarlama Metodu	50
2.6.1.3 Eşdeğer Mafsal Torkları	51
2.6.2 Seri Manipülatorlerde Direngenlik Analizi	52
2.6.2.1 Uygun Matris Yöntemi	53
2.6.2.2 Direngenlik Matrisi.....	54
BÖLÜM ÜÇ-ENDÜSTRİYEL ROBOT İÇİN ANALİZLER.....	55
3.1 Analiz İçin Çalışma Uzayı Tanımlanması	55
3.2 Gerilme ve Yer Değiştirme Analizi.....	56
3.3 Doğal Frekans Analizi	62
3.4Tork Analizi	67
BÖLÜM DÖRT-SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR.....	79
EKLER.....	83

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

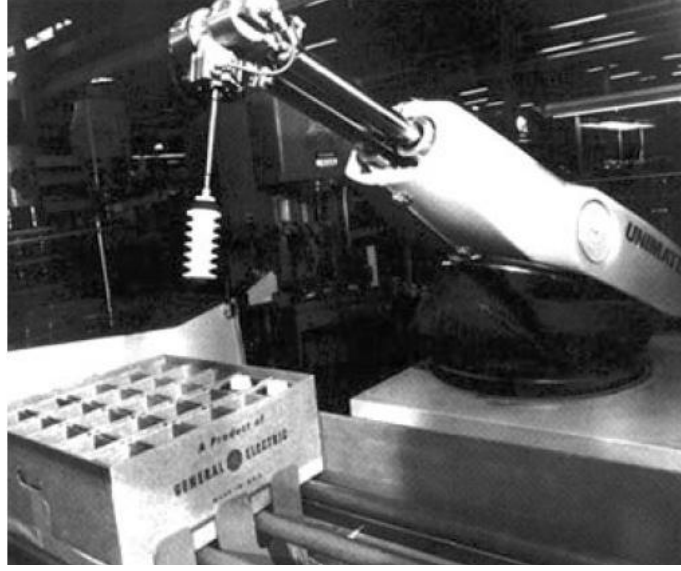
1.1 Giriş

Endüstriyel robotların gelişimi ilkel robot kollarıyla başlar ve insansı robotlara kadar uzanır. Robot teknolojisindeki avantajlarının sonucu olarak robot manipülatörlerinin hassaslık ve hızı artmaktadır. Bilgisayar destekli mühendislik(CAE) robot teknolojisinin gelişmesinde önemli rol oynamaktadır.

1.2 Endüstriyel Robotların Tarihsel Gelişimi

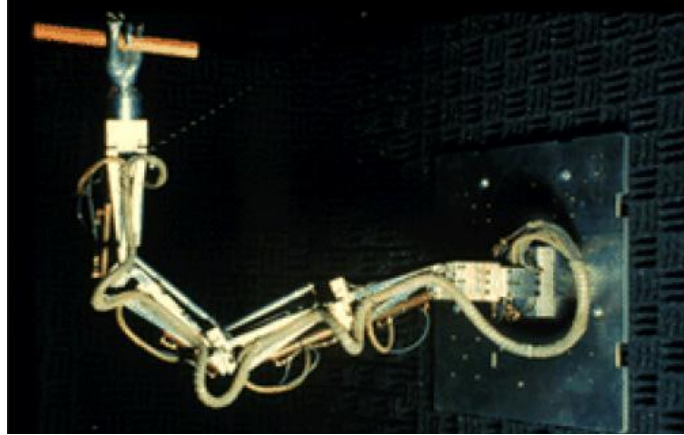
Endüstriyel robotlar ISO (ISO 1994) standartlarına göre “otomatik kontrollü, programlanabilen, üç veya daha fazla eksenli çok amaçlı manipülatör programları” olarak tanımlanmıştır. Robotların genel uygulama alanları olan kaynak, boyama, montaj, kaldırma ve yer değiştirme, paketleme işlemleri yüksek hız ve hassasiyette gerçekleştirilir.

1954 yılında George Devol ilk robot patent başvurusunu yapmıştır. 1956 yılında George Devol’un patentine dayanarak Unimation firması ilk robot üretimini yapmıştır. Üretilen bu robotlar programlanabilir transfer makineleri olarak isimlendirilmiştir. Programlanabilir transfer makinelerinin kullanım alanları bir nesneyi bir noktadan diğer noktaya transfer etmektir. İlk endüstriyel robot Unimate Şekil 1.1 de görülmektedir. Daha sonra Unimation teknolojileri, Kawasaki Heavy Industries ve Guest-Nettelfolds tarafından lisanslanmıştır ve üretimi Japonya ve İngiltere’de yapılmıştır. Bir süre için Unimation firmasının tek rakibi Cincinnati Milacron Inc. of Ohio’dur. Daha sonra birkaç robot firması endüstriyel robot pazarına girmiştir.



Şekil 1.1 Unimate, ilk endüstriyel robot (Akdağ,2008)

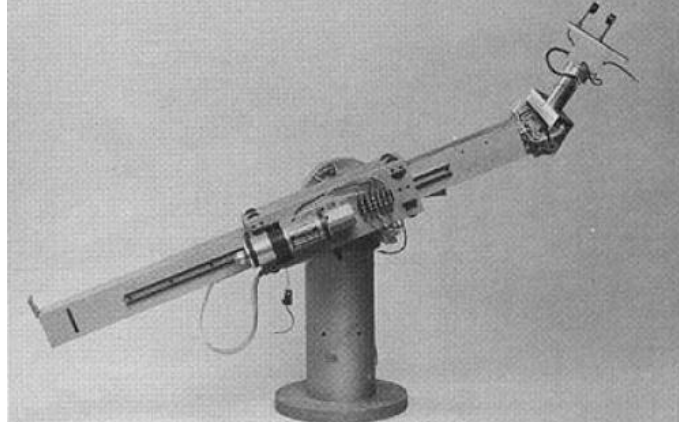
1968 yılında Marvin Minsky ahtapot benzeri dokunaç kollarını geliştirmiştir. Robot kolu Şekil 1.2 de görülmektedir.



Şekil 1.2 Dokunaç kol (Akdağ,2008)

1969 yılında Stanford üniversitesinde bir makina mühendisliği öğrencisi olan Victor Scheinman, Stanford kolunu geliştirmiştir. Stanford kolunun tasarımı günümüzde bile

etkileyici bir tasarım oluşturmaktadır. O yıllarda yapılmış ilk elektrikli ve bilgisayar kontrollü robottur. Stanford manipülatörü Şekil 1.3 de görülmektedir.



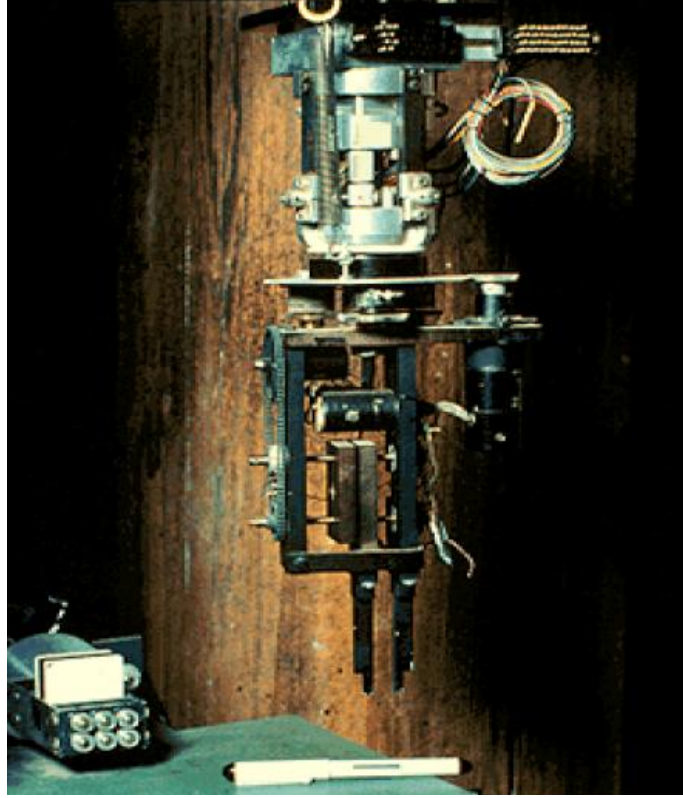
Şekil 1.3 Stanford manipülatörünün ilk tasarımı (Akdağ,2008)

1973 yılında Cincinnati Milacron firması ilk piyasaya uygun mini-kontröllü endüstriyel robotları piyasaya sürmüştür. Richard Hohn tarafında dizayn edilmiş robotlar Şekil 1.4'te görülmektedir.



Şekil 1.4 Cincinnati Milacron firmasının ürettiği ilk robot. (Akdağ,2008)

1974 yılında Victor Scheinman kendi firmasını kurarak Gümüş Kol'u piyasaya sürmüştür. Bu robotun özelliği dokunma ve basınç sensorlarından geri besleme olarak küçük parçaları monte etmektedir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Gümüş kol (Akdağ,2008)

Victor Scheinman, Endüstride çok kullanılan PUMA (Programmable Universal Manipulation Arm)'yı geliştirmiştir.. Unimation firması Vicarm'dan aldığı teknolojiyi kullanarak 1979 yılında PUMA robotlarını piyasaya sürmüştür (Şekil 1.6).



Şekil 1.6 PUMA (Programmable Universal Manipulation Arm)
(Akdağ,2008)

Sankyo ve IBM, SCARA'yı (Selective Compliant Articulated Robot Arm) Yamanashi üniversitesinde geliştirerek piyasaya sürmüştür (Şekil1.7).



Şekil 1.7 SCARA (Selective Compliant Articulated Robot Arm)
(Akdağ,2008)

1981 yılında Takeo Kanade direk sürüş kolunu geliştirmiştir. Bu robot kolların mafsallarına motor yerleştirilmiş ilk tasarımıdır.

1986 yılında Honda robot araştırma programı başlatmıştır. Bu programın Ana fikri toplumun yararlanması için robotların insanlar gibi hareket etmesidir.

1989 yılında MIT’de Rodney Brooks ve A. M. Flynn British Interplanetary Society dergisinde “Fast, Cheap and Out of Control: A Robot Invasion of the Solar System” makalesini yayınlamıştır. Bu makale büyük pahalı robotlar yerine küçük, yararlı daha ucuz robotlar yaratmayı savunmuştur.

2000 yılında Honda insansı ASIMO robotunu topluma tanıştırmıştır, bu robot yeni insansı robotların temelini oluşturmuştur (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 ASIMO, yeni nesil insansı robot (Akdağ,2008)

2000 yılının ekim ayında, dünya çapında 742.500 robot kullanılmaktaydı ve Bunlardan yarısından çoğu Japonya’da kullanılıyordu.

Son yıllarda robot üreticileri hafif ağırlıklı robotların araştırmalarını arttırmıştır. Şekil 1.9'da Motoman'ın hafif ağırlıklı robotu SDR10 ve Kuka'nın hafif ağırlıklı robot araştırması görülmektedir.



Şekil 1.9 Hafif ağırlıklı robotlar, Motoman ve Kuka'nın uygulamaları (Akdağ,2008).

1.3 Literatür Taraması

Günümüzde robot tasarımlarının optimize edilmesi önemli bir araştırma konusudur. Robot manipülatörlerinin tasarımında beklentilerin artışı esnek üretim koşullarını arttırmıştır. Oldukça karmaşık yapılar olan robot manipülatörleri, değişik parametre ve geometrik düzlemler içermektedir. Optimum Őartlarda robot tasarımı için Bilgisayar destekli tasarım (BDT-CAE) kullanılmaktadır.

Robot tasarımının temellerini oluşturan en önemli alışma Thomson (1984) tarafından yapılmıştır. Thomson çalışmalarında öncelikle tasarımcıların istek ve gerekliliklerini araştırmış ve ardından bulgularını çalışma alanına yansıtırmıştır. Vukobratovic, Potkonjak, Inoue ve Takano (2002) robot yürütme sistemlerini ve CAD sistemini endüstriyel robot tasarımına uyarlamışlardır. alışmalarında kesin çözümler vermek yerine gelişmiş robot tasarımının kurallarını belirlemişlerdir.

Mir-Nasiri (2004) SCARA robotuna kullanım alanları ve geometrik açıdan benzer paralel yapıda yeni bir robot kolu tasarımı yapmıştır. Bu tasarım SCARA robotuna göre daha avantajlı ve kullanışlıdır. Ayrıca yapılan çalışmalar tasarım, modelleme ve uygulama sırasında ortaya çıkabilecek çeşitli problemleri çözmeyi amaçlamıştır.

Mrozek (2003) disiplinler arası mekatronik alanında iki yeni girişimde bulunmuştur, ilki UML (Unified Modelling Language) ile modelleme, ikincisi MODELICA ile fiziksel modellemedir. UML mekatronik sistemlerinde grafik diyagramlarını anlaşılmasını ve modifikasyonlarını kolaylaştırarak avantaj sağlamıştır.

Clark ve Lin (2007) robot tasarım mekanizmalarının analiz ve doğrulanması için CAD ile entegrasyon metodunu kullanmıştır. Bu sistem robot mekanizmalarının tasarımları sırasında esnek tasarım sayesinde kolaylık ve zaman tasarrufu sağlamıştır.

Myung ve Han (2001) makine parçalarının parametrik modelleme süreçlerini ve bu parametrik modelleme süreçlerinin uzman tasarım sistemleri ile robot manipülatörlerine uygulanmasını tanımlamıştır.

Lucchetta, Bariani ve Knight, (2005) problem çözme tasarısına (TRIZ) dayanan, tasarımı ve üretimi ile ürün sadeleştirme metodlarını geliştirmiştir.

Bhatia, Thirunarayanan ve Dave (1998) SCARA robot tasarımı için yeni bir sistem oluşturmuşlardır. Bu çalışmanın amacı robot tasarım sürecini kısaltmak ve ayrıca daha özel robotlar üretmektir.

Morozov ve Angeles (2007) Schönflies-motion generator (SMG) üzerine yoğunlaşmıştır. Schönflies hareketleri dört serbestik derecesi ile avantaj sağlar, üç bağımsız oryantasyon ve bir ötelemedir. SMG planına göre tasarım protokolü; (i) modelleme ve görüntüleme, (ii) en belirgin parametreleri ve özellikleri belirleyerek özelleşmiş tasarımlar yapma, (iii) önemli parçaların tasarımı, (iv) şekil analizleri ile durağan ve elastik parçaların parametrelerinin tanımlanması, (v) detaylı tasarım ve üretim çizimlerinin yapılmasını içermektedir.

Kim ve Park (2007) yeni bir insansı robot donanımını hazırlamıştır. CAD/CAM/CAE ve hızlı prototipleme (RP) sistemlerini kullanarak robotun dış yapılarını oluşturmuşlardır. Bu çalışmada çoğunlukla üç boyutlu 3D CAD programları ile CAE sistemleri şekilsel benzetme ve kinematik analizler için kullanılmıştır. Sonuç olarak insansı robot prototipi Bonobo üretilmiştir.

O'Halloran, Wolf ve Choset (2005) iki tekerlekli düşük bütçeli robot platformunu tanıtmışlardır. Bu çalışma ile sürüş iletim sistemi ve süspansiyon sistemi geliştirilmiş ve titreşim karakteristikleri optimize edilmiştir.

Ouyang, Li ve Zhang (2003) Real Time Controllable (RTC) mekanizmasını güç dengeleme ve iz takibi ile tanımlamışlardır. RTC mekanizmasında yeni bir yaklaşım ortaya çıkarmışlardır, bu yaklaşım Ayarlanabilir Kinematik Parametreler (AKP)'dir. Mafsal kuvvetlerinin ve torklarının servo motorlara indirgenmesi, iz takibinin gelişimi açısından bu yeni yaklaşım çok daha kullanışlı ve umut vaat eden bir sistemdir.

Dwivedy ve Eberhard (2006) esnek robot manipülatörleri hakkında en kapsamlı çalışmayı yapmışlardır. Yayınladıkları makaleler modelleme, kontrol ve deneysel çalışmalar olarak üç bölüme ayrılmıştır.

Sun ve Mills (1999) yeni bir uyarlanabilen kontrol metodu olan Uyarlanabilen-Kontrolü (A-L) tanımlamışlardır. Bu teori tekil ve tekrarlanan mod olmak üzere iki biçimde incelenir.

Young ve Pickin (2000) deneylerinde üç modern seri manipülatör kullanarak robot hassasiyetlerini karşılaştırmıştır. Lazer ölçme sistemi her bir robot için uygulanmıştır. Deneylerde sadece statik durumdaki ölçümler yapılmıştır.

Drouet, Dubowsky ve Mavroidis (1998) uç işlevcinin hatalarını dengeleyen bir model geliştirdiler. Bu metot altı serbestlik dereceli çok hassas medikal robotta uygulanmıştır. Bu metot uç işlevcinin geometrik hataları ile elastik hataları birbirinden ayırır.

Xu, Tso ve Wang (1998) esnek manipulatörlerin yapısından kaynaklanan pozisyon hatalarının sensor tabanlı teknikle modellemeyi ve kontrol etmiştir

Zhang ve Goldberg (2005) wafer-handling robotu için hızlı, ucuz ve kolay kontrollü kalibrasyon sistemini geliştirmiştir. Bu sistem sabitleme ve basit kompensasyon algoritmasıyla açıklanır.

Shirinzadeh, Teoh, Foong ve Liu (1999) lazer girişimölçer tabanlı algılama tekniğini ile hareketli uç işlevcinin dinamik ölçümlerini yapmıştır. Bu sistemde robotun uç işlevcisine yol gösteren sensorlar kullanılmıştır.

Karagülle ve Malgaca (2004) bilgisayar destekli mühendislik araçları kullanarak, iki uzuvlu düzlemsel bir manipulatörün yörünge esneklik etkilerini incelemişlerdir.

Akdağ (2008) robot manipulatörleri için rijitlik uzayı kavramını geliştirmiş ve farklı tipteki robot manipulatörleri için rijitlik uzaylarını elde etmiştir.

Akdağ ve Kırıl (2007) bir ABB robotu için yörünge etkisinin robotun dinamik gerilme değerleri üzerindeki etkisini incelemiştir.

1.4 Projenin Amacı

Geometrik sınırlamalar ve yapısal zorluklar nedeniyle robot tasarımı zorlu bir mesele haline gelmiştir. Endüstriyel bir robottan, yüksek hız ve hassasiyette çalışmasının yanında büyük bir çalışma uzayına sahip olması istenir. Bu nedenle birçok parametre aynı anda göz önüne alınmalıdır. Robot tasarımı profesyonel tasarımcılar için bile zahmetli bir iştir. Günümüzde, CAE sürecinin kullanımı robot tasarımı için kaçınılmaz bir hale gelmiştir.

Bu tezin amacı, ele alınan endüstriyel bir robot manipulatörü için, bütünleşmiş (entegre) tasarım sürecindeki statik ve dinamik analiz basamaklarının günümüz CAE

araçları ile yapılması ve sonuçların robotun çalışma uzayı içinde gösterilmesidir. Analiz sonuçları kullanılarak, tasarımcı robotun belirtilen koşullardaki statik ve dinamik davranışını robotun çalışma uzayı içerisinde üç boyutlu olarak görür ve gerekli hallerde tasarımına müdahale edebilir. Çalışma kapsamındaki sayısal analizler SolidWorks yazılımının eklentisi olan CosmosWorks ve CosmosMotion programları ile yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen sonuçlar MATLAB programı ile robotun üç boyutlu çalışma uzayı içerisinde gösterilmiştir.

Tez dört bölüm halinde düzenlenmiştir. Birinci bölüm giriş nitelikli bir bölüm olup robot manipülatörlerinin tarihi gelişimini ve konu ile ilgili çalışmalarını aktarmaktadır. İkinci bölüm, bir robot manipülatörü tasarımındaki genel yöntemlerin anlatıldığı ve çalışmada kullanılan endüstriyel robot manipülatörünün genel özellikleri ile klasik analizleri için kullanılan bağıntıların verildiği bölümdür. Üçüncü bölüm endüstriyel robot manipülatörünün çalışma uzayı içerisindeki uç işlevcisinin yer değiştirme uzayı, von Mises gerilme uzayı, doğal frekans uzayı ve belli bir yörünge için tork uzayının çıkarıldığı bölümdür. Son olarak, dördüncü bölümde çalışma uzayı analizleri yorumlanmıştır.

BÖLÜM İKİ

ANALİZ YÖNTEMLERİ

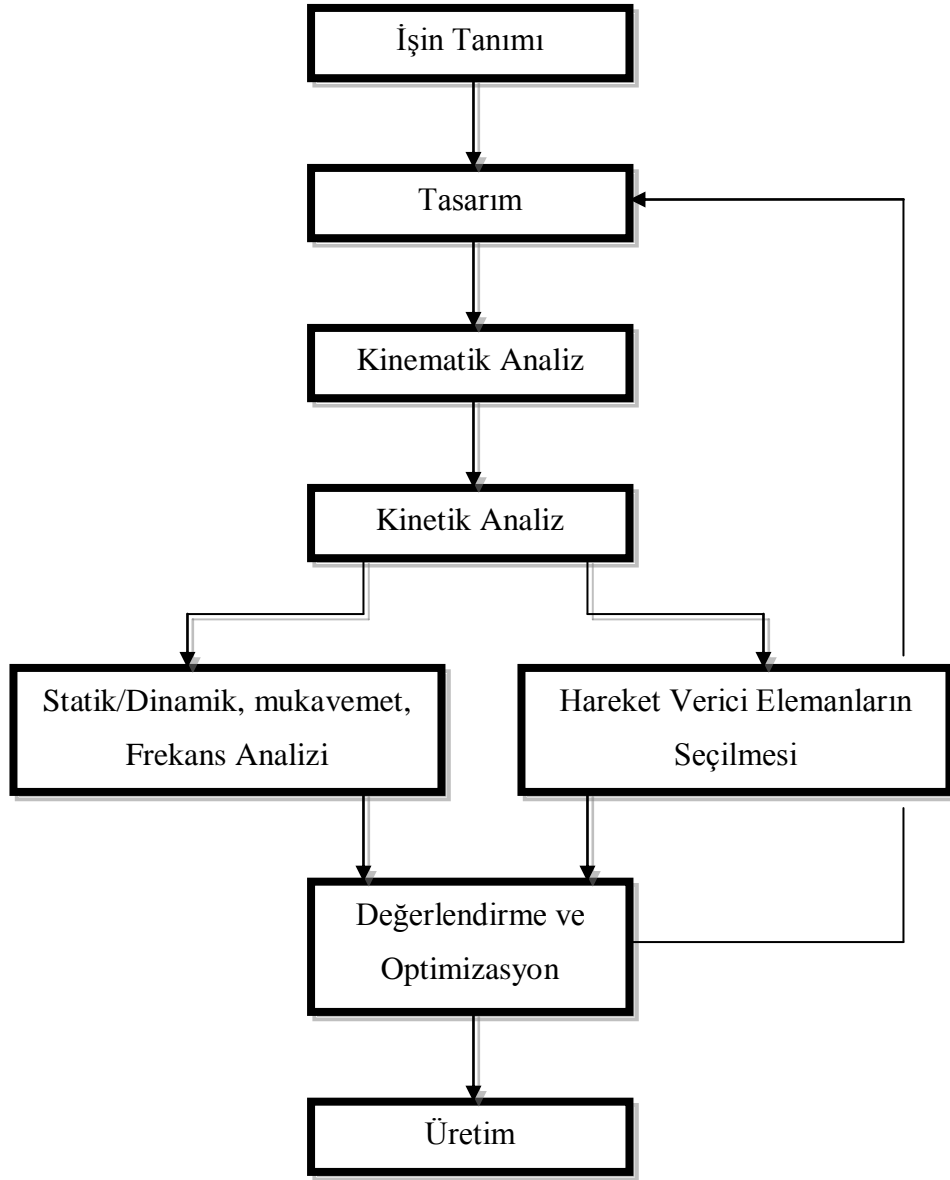
2.1 Robot Tasarımında Analiz Yöntemleri

Son yıllarda, makine üreticileri makine tasarımında müşterilerin taleplerine göre üretim yaparak üretimdeki rekabeti arttırmıştır. Müşterilerin talepleri doğrultusunda bir sürü değişik model üretmek yerine, harcamalar ve kaliteler biraz arttırarak daha özel üretimler yapmak önemli olmuştur. Müşterilerin istekleri doğrultusunda üretimin hızlı ve etkili olması gerekmektedir bu da esnek tasarımı ortaya çıkarmıştır. Esnek tasarım gerekli koşulları sağlayan hızlı ve güvenilebilir metotlar olarak tanımlanır. Esnek tasarımlar bütünleşmiş CAE analizleri ile oluşturulurlar.

Entegre dizayn analizinin basamakları aşağıdaki şemada gösterilmektedir (Şekil 2.1). Bu süreç işin tanımlanmasıyla başlayıp robotun üretimi ile bitmektedir. Bu süreç büyük çaplı üreticiler tarafından kullanılmaktadır ve metotlar, programlar, süreçler açık literatürde tam olarak paylaşılmamaktadır. Ancak bütünleşmiş tasarım basamakları her üreticinin anlayacağı şekilde açıklanır.

2.2 Çalışma Uzayı

Bir manipülatörün çalışma uzayı, uç işlevcisinin ulaşabileceği uzay hacmi olarak tanımlanabilir. Çalışma uzayının kullanılan iki farklı tanımı vardır. Her uç işlevcisinin en az bir oryantasyonla ulaştığı uzay hacmine ulaşılabilir çalışma uzayı denir. Uç işlevcisinin mümkün olan her oryantasyonda ulaştığı uzay hacmine genişletilmiş çalışma uzayı denir. Açıkça, genişletilmiş çalışma uzayı ulaşılabilir çalışma uzay grubunun bir alt grubudur.

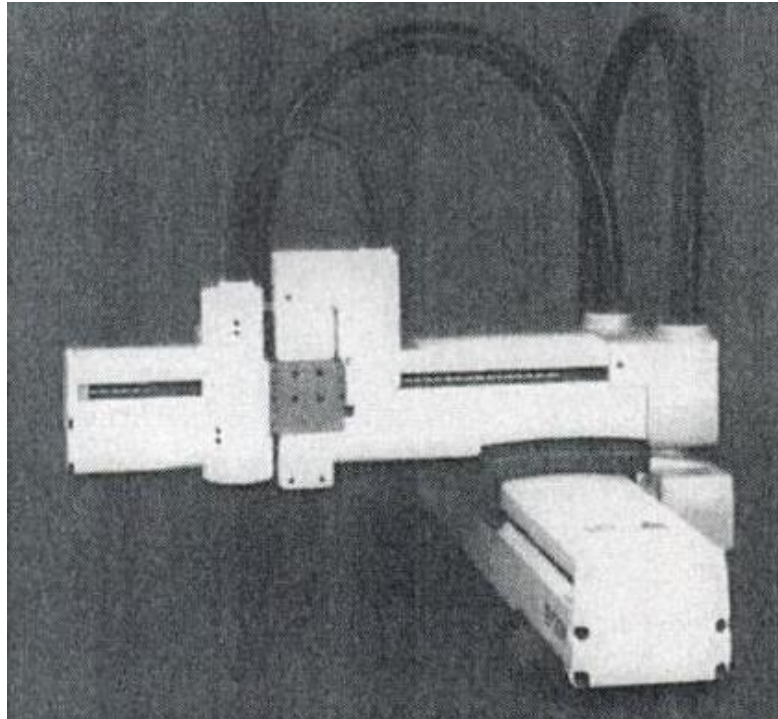


Şekil 2.1 Tasarım basamakları (Akdağ,2008).

Gerekli bir durum olmamasına rağmen, çoğu seri manipülatörlerin ilk üç hareketli uzuvu diğer uzuvlarına göre daha uzun olarak tasarlanır. Uç işlevcisini konumlandırmak için ilk üç uzuv, oryantasyon için diğer uzuvlar kullanılır. İlk üç uzuv kol, kalan uzuvlar da bilek olarak adlandırılır. Gereğinden fazla eksenli olan manipülatörler haricinde, manipülatörlerin bilek kısımları 1'den 3'e kadar serbestlik derecesi içerirken, kollar

toplam üç serbestlik derecesi içermektedir. Bilek noktasında birleşen eksenler bilek merkezini oluşturur. Değişik kinematik yapıların oluşturduğu kol, geniş çalışma alanlarıyla kaplanarak bölgesel çalışma uzayını oluşturur.

Muhtemelen robot kollarındaki en basit kinematik yapı birbirlerine dik olarak yerleştirilmiş üç kayar mafsaldan oluşmuştur. Bu tip robotlar kartezyen robot olarak adlandırılır. Kartezyen robotun bilek merkez noktası, üç kartezyen koordinatın, üç kayar mafsalla kesişimi olarak tanımlanabilir. Kartezyen manipülatörünün bölgesel çalışma uzayı bir dikdörtgen kutudur. Şekil 2.2’de Seiko firması tarafından üretilmiş kartezyen robot görülmektedir.



Şekil 2.2 Seiko firmasının ürettiği kartezyen robot (Tsai, 1999).

Kartezyen manipülatörün bir veya ikinci mafsalının yerini döner mafsal alırsa, bu robot koluna silindirik robot denir. Silindirik robotun bilek merkez noktası, silindirik koordinatlar kümesi ile üç mafsalın değişkenlerinin kesişimi olarak tanımlanabilir. Genellikle kayar mafsalların mekanik sınırlamaları iki bitiş ucudur. Bu yüzden silindirik

robotların çalışma uzayı, iki eş merkezli silindir tarafından sınırlandırılmıştır. Şekil 2.3’de silindirik robot görülmektedir.



Şekil 2.3 Seiko firmasının ürettiği silindirik robot (Tsai,1999).

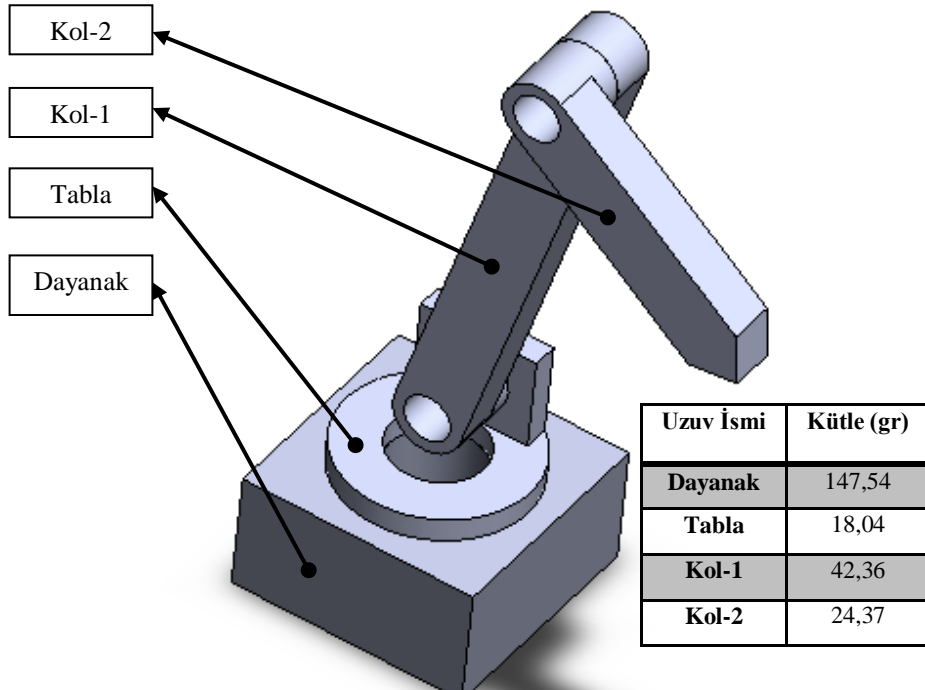
Eğer robot kolun ilk iki mafsalı döner ve üçüncü mafsalı kayar ise bu tip robotlara küresel robot denir. Normal olarak, kayar mafsal ikinci mafsal eksenine paralel değildir. Küresel robotun çalışma uzayı eş merkezli iki küre tarafından sınırlandırılmıştır. Şekil 2.4’te küresel çalışma uzayına sahip Stanford manipülatörü görülmektedir.



Şekil 2.4 Stanford Manipülatörü (www.stanford.edu)

2.3 Üç Serbestlik Dereceli Basit Bir Robotun Çalışma Uzayı Analizi

Bu çalışmada, Staubli firmasının ürettiği RX-170B robotunun çalışma uzayı analizleri yapılmadan önce üç serbestlik derecesine sahip basit bir model robotun analizleri yapılmıştır. Robot Şekil 2.5'te gösterildiği gibi toplam dört kısımdan oluşmaktadır. Dayanak isimli parça robotun yere sabitlendiği parçadır, tabla isimli parça robota ilk serbestliği kazandıran uzuvdur, Kol-1 isimli parça ikinci serbestliği kazandırır, Kol-2 isimli parça robota üçüncü serbestliği kazandırır ve uç işlevcisi Kol-2 üzerindedir.



Şekil 2.5 Üç serbestlik dereceli model robot.

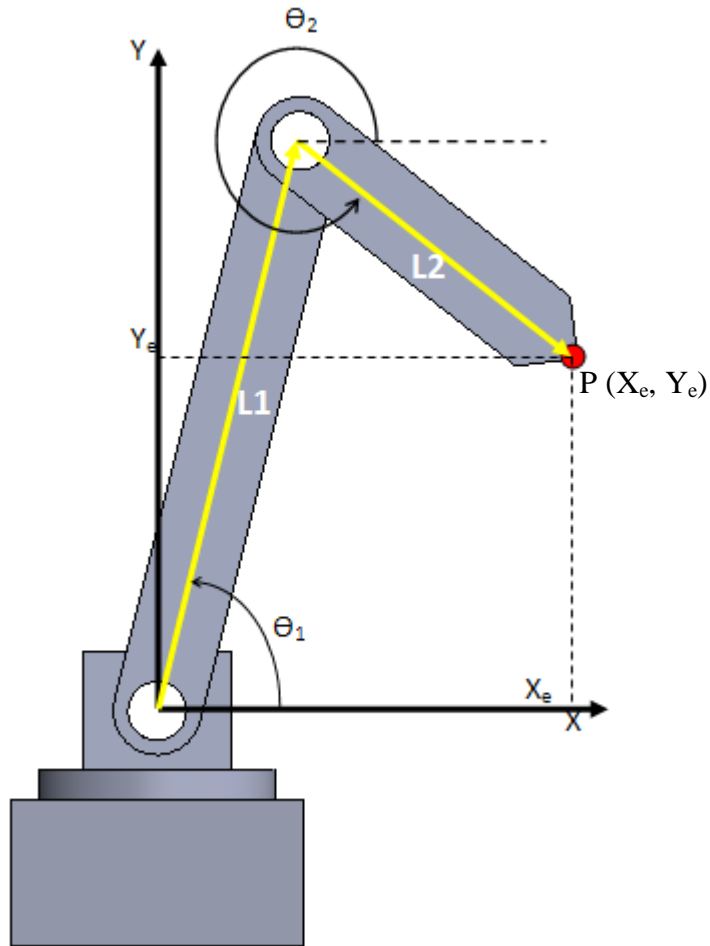
Robotun her bir uzvuna 1060 alüminyum malzeme atanmıştır ve mafsallarda boşluk olmağı varsayılmıştır. Kol-1'in uzunluğu L_1 , Kol-2'nin uzunluğu L_2 ile gösterilmiştir ve sırasıyla $L_1 = 100$ mm, $L_2 = 60$ mm alınmıştır.

2.3.1 Robotun Kinematik Analizi

Robotun, Kol-1 uzvunun x eksenine yaptığı açı θ_1 ve Kol-2 uzvunun x eksenine yaptığı açı θ_2 olarak adlandırılır (Şekil 2.6). Ters kinematik analiz yapmadan önce robotun uç noktasının takip edeceği yörünge X-Y eksen takımı içerisinde belirlenir. Bu yörünge içerisindeki her bir nokta için Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) geçerlidir.

$$x_e = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 \quad . \quad (2.1)$$

$$y_e = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 \quad . \quad (2.2)$$



Şekil 2.6 Robot üzerindeki parametreler.

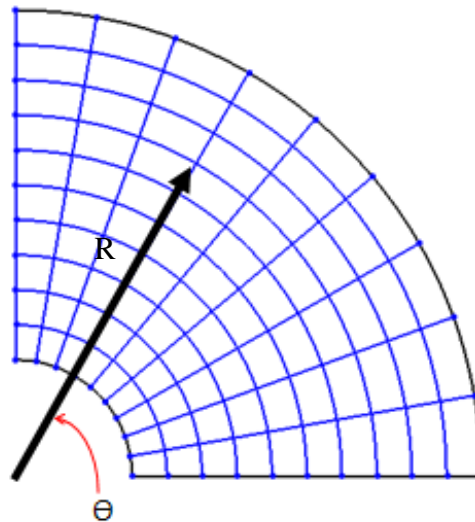
Ters kinematik analiz için Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) kullanılarak jakobiyen matrisi elde edilir. Denklem (2.3) deki jakobiyen matrisi kullanılarak, iki bilinmeyenli lineer olmayan denklem takımı Newton-Raphson metodu ile θ_1 ve θ_2 'yi elde etmek üzere çözülür.

$$dx = J dq$$

$$dx = \begin{pmatrix} dx_e \\ dy_e \end{pmatrix}, \quad dq = \begin{pmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{pmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_e}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_e}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y_e}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_e}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$J = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \theta_1 & -L_2 \sin \theta_2 \\ L_1 \cos \theta_1 & L_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix}$$

Ele alınan model robotun çalışma uzayı küreseldir. Bu nedenle analiz için tek bir kesitteki noktaları almak yeterlidir. Şekil 2.7'da gösterilen kesit R ve θ kullanılarak 100 parçaya bölünmüştür.

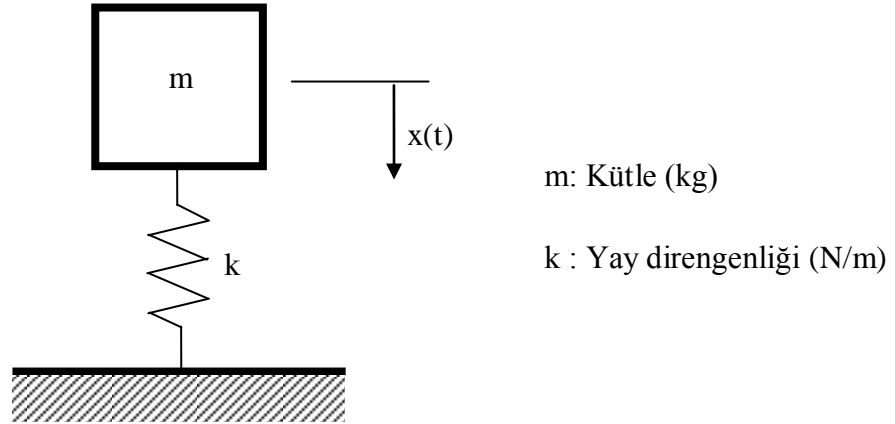


Şekil 2.7 Çalışma uzayı kesiti üzerindeki konumlar.

2.3.2 Doğal Frekans Kavramı

Bir mekanik sistemin doğal frekansı, sistemin serbest (zorlama etkisi yok iken) titreşimlerinin frekansı olarak tanımlanır ve sisteme özgü bir değerdir. Doğal frekans adedi sistemin serbestlik derecesi sayısı kadardır. Kirişler gibi sürekli sistemlerin sonsuz sayıda serbestlik derecesi olduğu için doğal frekans sayısı da sonsuz sayıdadır. Bununla birlikte fiziksel olarak belirli noktalarda topaklanabilen sistemler için (lumped parameter systems) serbestlik derecesi sınırlı sayıda olacağından, doğal frekans sayısı da serbestlik derecesi adedi kadardır.

Doğal frekans kavramını ifade etmek için genel olarak kullanılan model Şekil 2.8'de görülen tek serbestlik dereceli kütle-yay sistemidir.



Şekil 2.8 Tek serbestlik dereceli kütle-yay sistemi.

Kütle-yay sisteminin sönümsüz ve dış zorlamasız $x(t)$ yer değiştirmesini tanımlayan hareket denklemi Newton'un 2. yasası veya enerji yöntemi ve Lagrange denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2.4)$$

Kütleye verilebilecek bir ilk yer değıştirme etkisi ile oluşturulacak zamana bağılı $x(t)$ yer değıştirme ifadesi için

$$x(t) = A e^{st} \quad (2.5)$$

kabulü yapılabilir. Buradan $x(t)$ ve $\ddot{x}(t)$ ifadeleri diferansiyel denklemde yerine konularak

$$ms^2 A e^{st} + k A e^{st} = 0 \quad (2.6)$$

$$[ms^2 + k]A = 0 \quad (2.7)$$

Geçerli bir $x(t)$ yer değıştirmesi elde edebilmek için A katsayısının sıfırdan farklı bir değeri alması gerektiği dikkate alınarak $ms^2+k=0$ ifadesini sağlayan s değeri başlangıçta kabul edilen $x(t)$ çözümünü geçerli kılacak değeri olacaktır. Bu değeri tek serbestlik dereceli kütle-yay sisteminin doğal frekansı olarak adlandırılır ve

$$s_{1,2} = \mp \sqrt{\frac{k}{m}} i \quad (\text{rad/sn}) \quad (2.8)$$

olarak elde edilir. Burada $i = \sqrt{-1}$ dir. Fiziksel sistemler için frekans kavramı pozitif bir değeri alacağından kütle-yay sisteminin sönümsüz doğal frekansı

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{rad/sn}), \quad f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Hz}) \quad (2.9)$$

olarak elde edilir. Doğal frekans ifadesinden görüleceği gibi, bir sistemin doğal frekansı sistemin direngenliği ile doğru, kütlesi ile ters orantılıdır. Dolayısı ile rijitliği yüksek olan sistemlerin doğal frekansları, esnek sistemlere göre daha yüksek olacaktır. Doğal frekans kavramının robot tasarımı açısından önemi, robot manipülâtörünün ani duruş ve kalkışlarında gözlemlenen doğal titreşim genlikleri ile ilişkilidir. Doğal frekansı yüksek olan sistemler, daha rijit bir yapıya sahip olacakları için doğal titreşim genlikleri de buna paralel olarak düşük olacaktır. Böylelikle ani kalkış ve duruşlarda robot manipülâtörünün yüksek genliklerde titreşimi önlenerek manipülâtör hassasiyeti artırılmış olacaktır. Robot manipülâtörleri genel olarak topaklanmış parametrelili sistemler (lumped parameter systems) gibi modellenebilecek basit geometrilere sahip değildir. Bununla birlikte robot manipülâtörlerinin doğal frekanslarının, manipülâtörün sürekli bir sistem (continuous system) olarak kabul edilerek elde edilebilmesine de imkân vermemektedir. Belirtilen kavramlar basit bir ankastre kiriş için aşağıda verilmiştir.

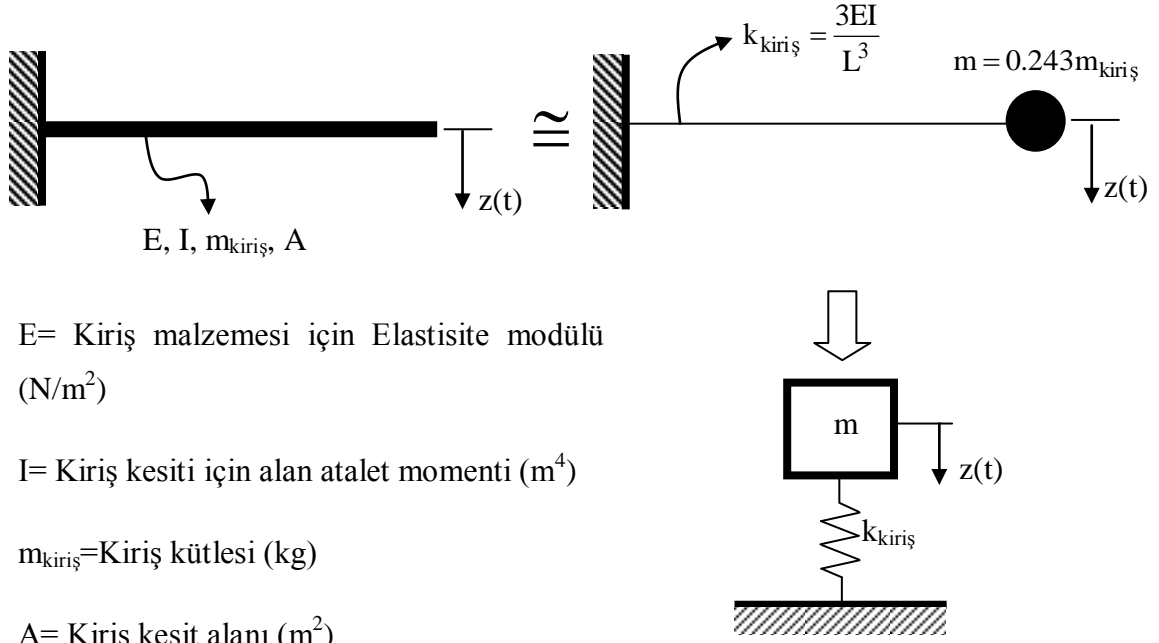
2.3.2.1 Ankastre Bir Kiriş İçin Doğal Frekans İfadesi: Topaklanmış Parametrelili Sistem Kabulü

Şekil 2.9’da verilen ankastre kirişe ait doğal frekans ifadesi, kiriş kütlesini kirişin istenilen noktasına topaklayarak oluşturulacak tek serbestlik dereceli bir sistem kabulü ile basit bir şekilde elde edilebilir.

Şekilde verilen eşdeğer model kullanılarak ankastre kiriş için doğal frekans değeri

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{\text{kiriş}}}{m}} = \sqrt{\frac{\frac{3EI}{L^3}}{0.243m_{\text{kiriş}}}} = \sqrt{\frac{3EI}{0.243m_{\text{kiriş}}L^3}} = 3.514 \sqrt{\frac{EI}{m_{\text{kiriş}}L^3}} \quad (\text{rad/sn}) \quad (2.10)$$

olarak elde edilebilir. Bu doğal frekans değeri kiriş kütlelerinin, kiriş serbest ucunda tek bir noktada toplandığı kabulü ile oluşturulan tek serbestlik dereceli sistem modeli için elde edilmiştir. Bu modelde, ankastre kiriş basitleştirilerek incelendiği için, elde edilen doğal frekans değeri de yaklaşıktır.



E = Kiriş malzemesi için Elastisite modülü
(N/m^2)

I = Kiriş kesiti için alan atalet momenti (m^4)

$m_{\text{kiriş}}$ =Kiriş kütlesi (kg)

A = Kiriş kesit alanı (m^2)

Şekil 2.9. Ankastre kiriş için tek serbestlik dereceli eşdeğer model.

2.3.2.1 Ankastre Bir Kiriş İçin Doğal Frekans İfadesi: Dağıtılmış Parametrelili Sistem Kabulü

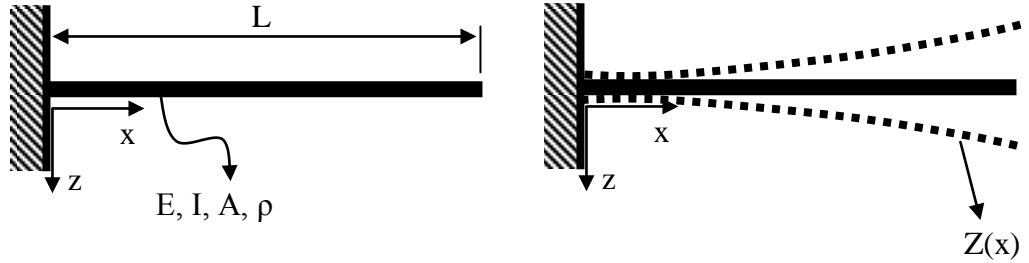
Ele alınan ankastre kiriş için doğal frekans değeri enerji yöntemi daha hassas bir şekilde hesaplanabilir. Sönümsüz bir sistem için, enerjinin korunumu prensibi ile sistemin potansiyel ve kinetik enerji toplamları aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$E_{k_{\max}} + E_{p_{\min}} = E_{k_{\min}} + E_{p_{\max}} \quad (2.11)$$

Salınım yapan bir sistem için sistemin kinetik enerjisi en büyük değerini aldığı anda potansiyel enerji sıfırdır. Potansiyel enerjinin en büyük olduğu durum için ise kinetik enerji sıfırdır. Dolayısı ile ankastre kirişin maksimum kinetik enerjisi ile maksimum potansiyel enerji değerleri birbirine eşittir.

$$E_{k_{\max}} = E_{p_{\max}} \quad (2.12)$$

Ele alınan ankastre kiriş için eksen takımı Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Ankastre kiriş modeli ve yer değiştirme eğrisi.

Sabit kesitli ankastre kiriş için potansiyel ve kinetik enerji ifadeleri şu şekilde yazılabilir.

$$E_p = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{d^2 z}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\frac{d^2 z}{dx^2} \right)^2 dx \quad (2.13)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 dx = \frac{1}{2} \rho A \int_0^L \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 dx \quad (2.14)$$

Ankastre kirişin titreşimine ait ifade

$$z(t, x) = Z(x) \sin \omega t \quad (2.15)$$

Potansiyel ve kinetik enerji ifadelerinde kullanılmak üzere

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{d^2 Z}{dx^2} \sin \omega t, \quad \frac{dz}{dt} = \omega Z \cos \omega t \quad (2.16)$$

yazılabilir. Potansiyel ve kinetik enerji ifadelerinin en büyük değerleri eşitlenir ise

$$\frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{d^2 Z}{dx^2} \sin \omega t \right)^2 dx = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A (\omega Z \cos \omega t)^2 dx \quad (2.17)$$

yazılabilir. Sinüs ve Cosinüs terimlerinin en büyük değerlerinin 1 olduğu dikkate alınır ise

$$\int_0^L EI \left(\frac{d^2 Z}{dx^2} \right)^2 dx = \omega^2 \int_0^L \rho A Z^2 dx \quad (2.18)$$

elde edilir ve ankastre kiriş için doğal frekans ifadesi

$$\omega_n^2 = \frac{\int_0^L EI \left(\frac{d^2 Z}{dx^2} \right)^2 dx}{\int_0^L \rho A Z^2 dx} \quad (2.19)$$

Doğal frekans ifadesine ulaşmak için ankastre kirişe ait yer değiştirme eğrisi x 'e bağlı dördüncü dereceden bir polinom ile şu şekilde ifade edilebilir. Yazılan yer değiştirme ifadesinin sınır şartlarını sağlaması gereklidir.

$$Z(x) = a x^4 + b x^3 + c x^2 + d x + e \quad (2.20)$$

Ankastre bir kiriş için sınır şartları aşağıda verilmiştir.

$$x=0 \text{ 'da } Z(x=0)=0 \text{ ve } \frac{dZ}{dx} = 0, \quad x=L \text{ 'de } \frac{d^2 Z}{dx^2} = 0 \text{ ve } \frac{d^3 Z}{dx^3} = 0 \quad (2.21)$$

Sınır şartları kullanarak yer değiştirme eğrisi içerisindeki katsayılar şu şekilde elde edilebilir.

$$b = -4aL, \quad c = 6aL^2, \quad d = 0, \quad e = 0 \quad (2.22)$$

Bu katsayılar yerine konarak kiriş için yer değiştirme eğrisi şu şekilde yazılabilir.

$$Z(x) = a \left(x^4 - 4Lx^3 + 6L^2 x^2 \right) \quad (2.23)$$

Bu sonuç doğal frekans ifadesinde kullanılır ise

$$\omega_n^2 = \frac{EI \int_0^L \left(\frac{d^2 Z}{dx^2} \right)^2 dx}{\rho A \int_0^L Z^2 dx} = \frac{EI \int_0^L [a(12x^2 - 24Lx + 12L^2)]^2 dx}{\rho A \int_0^L [a(x^4 - 4Lx^3 + 6L^2x^2)]^2 dx} \quad (2.24)$$

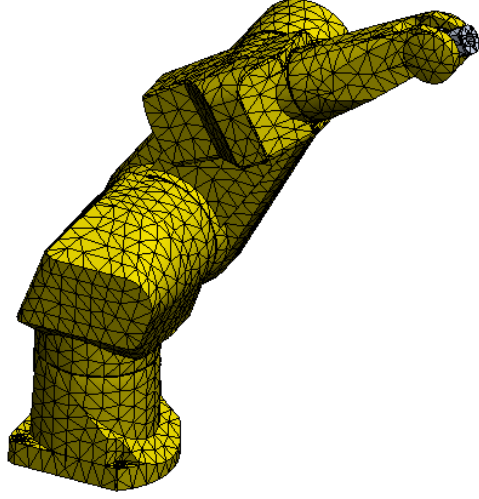
Gerekli integral alma işlemleri yapıldığında ankastre kiriş için doğal frekans ifadesi

$$\omega_n^2 = 12.4615 \frac{EI}{\rho AL^4} = 12.4615 \frac{EI}{m_{kiriş} L^3} \rightarrow \omega_n = 3.530 \sqrt{\frac{EI}{m_{kiriş} L^3}} \quad (\text{rad/sn}) \quad (2.25)$$

olarak elde edilir. Sürekli sistem yaklaşımı kullanıldığı için bu frekans ifadesi tek serbestlik dereceli sistem kabulü ile elde edilen değerden daha doğru cevabı verecektir.

Robot manipülatörleri çalışma uzayları içerisinde farklı uzuv konfigürasyonları nedeni ile farklı konumlara dolayısıyla farklı direngenliklere sahiptir. Doğal frekans formülasyonu dikkate alındığında, robot çalışma uzayındaki farklı uzuv konumları için değişen direngenlikler dolayısı ile doğal frekans değerlerinde de değişim oluşacaktır. Yani, robot manipülatörü çalışma uzayı içerisinde farklı direngenliklere, dolayısı ile farklı doğal frekanslara sahiptir ve buna bağlı olarak farklı titreşim davranışına sahiptir. Robot uzuvlarının karmaşık geometrileri ve montaj olarak robot manipülatörü modeli düşünüldüğünde, doğal frekans değerlerinin yukarıda ankastre bir kiriş için elde edildiği şekli ile hesaplanması mümkün değildir. Bu çalışmada, ele alınan robot manipülatörleri için statik ve dinamik davranışlar robot manipülatörünün topaklanmış parametrelili modellerini oluşturarak kütle ve direngenlik matrislerini sayısal olarak hesaplanmasını mümkün kılan Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elde edilmiştir. Sayısal analizler için CosmosWorks programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile robot manipülatörü

çok serbestlik dereceli bir sistem olarak modellenmektedir. Robot manipülatörüne ait sonlu elemanlar modeli her düğümünde üç öteleme serbestliği bulunan 10 düğümlü üçgen prizma elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli Şekil 2.11’de verilmiştir. Manipülatör sonlu elemanlar modelinde toplam 14407 eleman ve 25676 düğüm noktası bulunmaktadır.



Şekil 2.11. Robot manipülatörü sonlu elemanlar modeli.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, zorlama etkisindeki n serbestlik dereceli sönümsüz yapıya ait hareket denklemleri matris formunda aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$[\mathbf{M}]_{\text{nxn}} \{\ddot{\mathbf{z}}\}_{\text{nx1}} + [\mathbf{K}]_{\text{nxn}} \{\mathbf{z}\}_{\text{nx1}} = \{\mathbf{f}\}_{\text{nx1}} \quad (2.26)$$

Bu denklemde \mathbf{M} yapıya ait kütle matrisi, \mathbf{K} ise yapıya ait direngenlik matrisidir ve \mathbf{f} yapıya etki eden dış zorlama vektörüdür. $\ddot{\mathbf{z}}$ ve \mathbf{z} sırasıyla sonlu elemanlar modelindeki düğüm noktalarının ivme ve yer değiştirme vektörleridir. Yapıya ait statik davranış için

$$[\mathbf{K}]_{n \times n} \{z\}_{n \times 1} = \{f\}_{n \times 1} \quad (2.27)$$

ifadesi geçerlidir. Yapıya ait serbest titreşim cevabı için ise

$$[\mathbf{M}]_{n \times n} \{\ddot{z}\}_{n \times 1} + [\mathbf{K}]_{n \times n} \{z\}_{n \times 1} = 0 \quad (2.28)$$

matris denklemi kullanılır. Doğal frekans ve ilgili titreşim biçimlerini hesaplamak amacıyla yer değiştirme vektörü için exponansiyel cevap kabulü yapılarak problem bir özdeğer problemi haline dönüştürülür

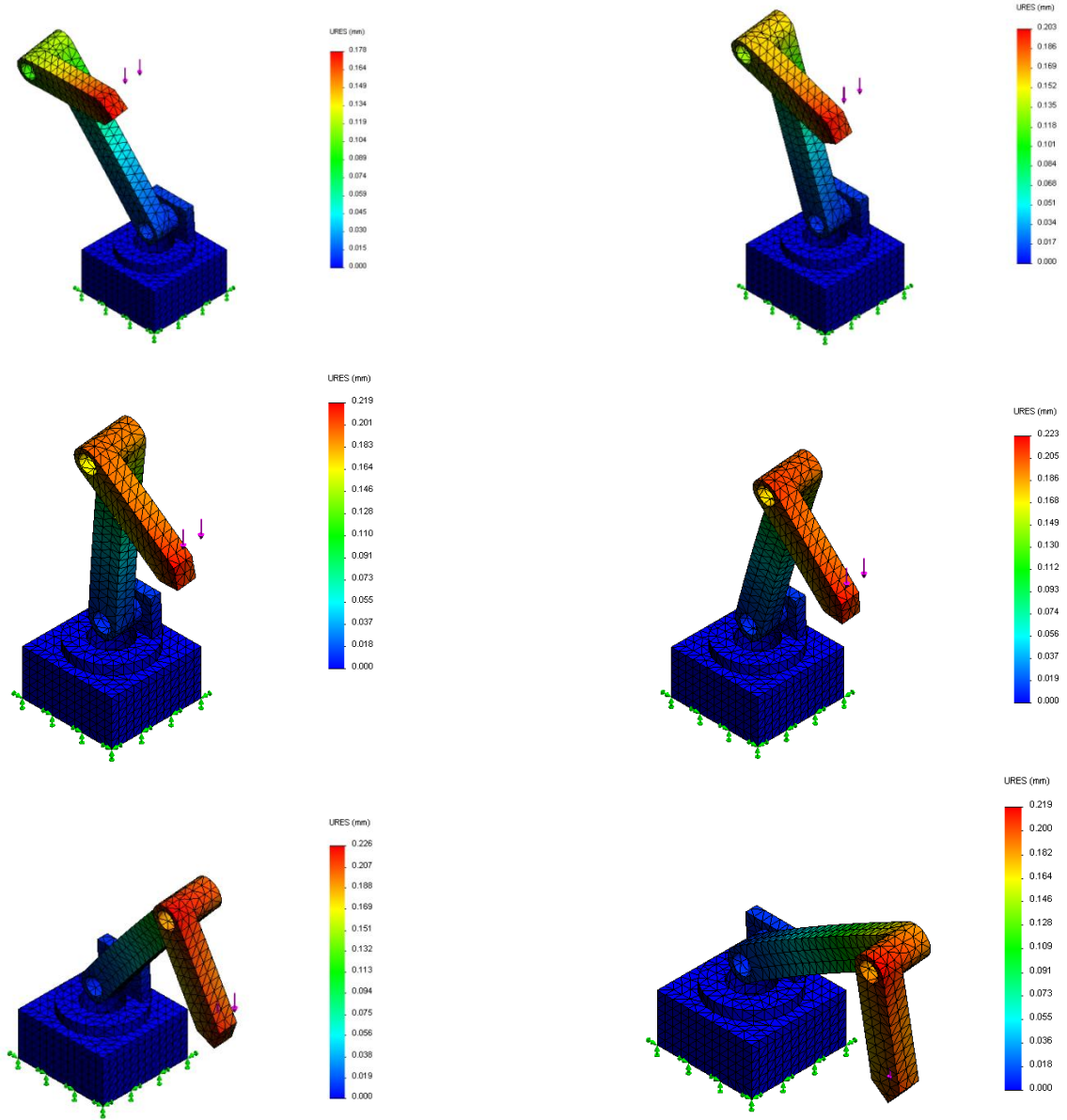
$$([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]) \{Z\} = 0 \quad (2.29)$$

Burada ω yapıya ait doğal frekansları içeren frekans vektörü, Z bu frekanslara ait titreşim biçimi vektörleridir. Bilgisayar destekli mühendislik yazılımları kullanılarak karmaşık geometrili yapılara ait doğal frekans değerleri ve bu frekanslarda yapının titreşim şeklini gösteren titreşim biçimleri elde edilebilmektedir.

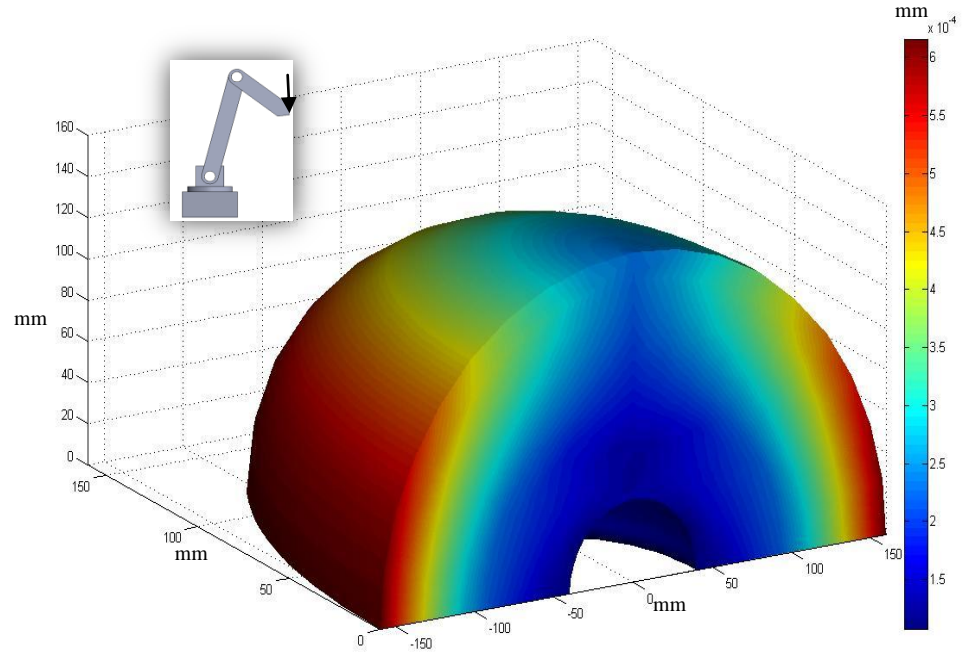
2.3.3 Model Robotun Çalışma Uzayı Statik ve Frekans Analizleri

Çalışma uzayı analizinde robotun uç işlevcisinin yer değiştirmesi, maksimum von Mises gerilmesi ve doğal frekansları sayısal olarak incelenmiştir. Yer değiştirme ve gerilme analizinde uç işlevcisine 50N'luk düşey bir kuvvet uygulanmıştır. Şekil 2.12'de altı farklı konum için yer değiştirme analizleri gösterilmiştir. Şekil 2.13'te yer değiştirme

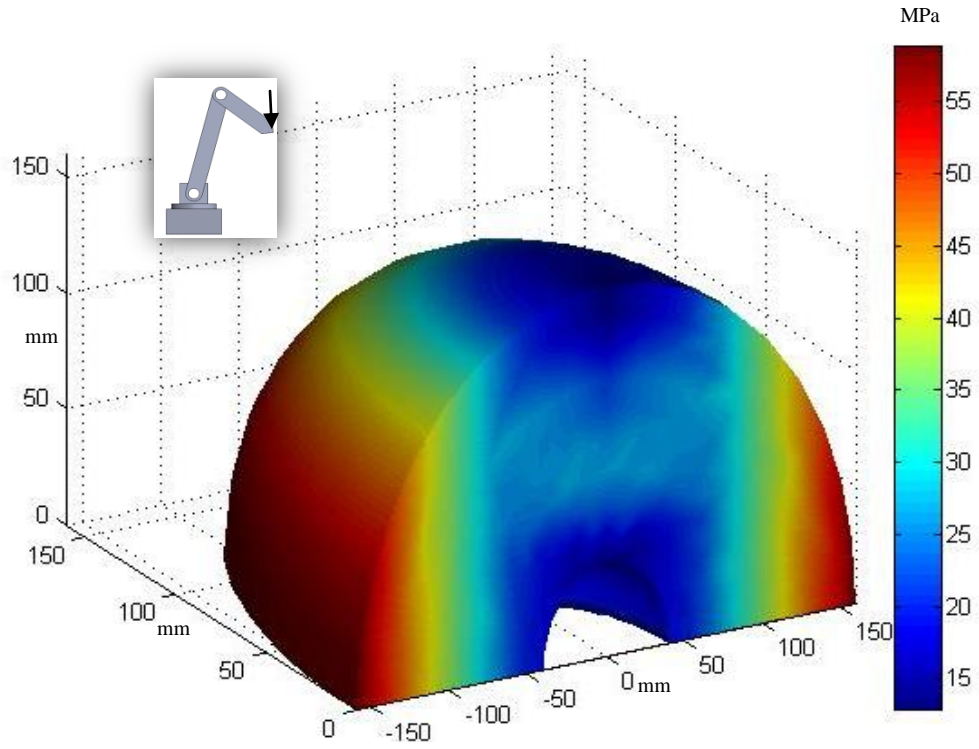
ve Şekil 2.14'te gerilme dağılımları gösterilmiştir. Doğal frekans beş ayrı titreşim modu için incelenmiştir. Model robotun ilk beş doğal titreşim modu Şekil 2.15'da verilmiştir. Şekil 2.16-2.20 de görüldüğü gibi kol kesitleri çok kalın olduğundan dolayı doğal frekansları da çok yüksek değerdedir.



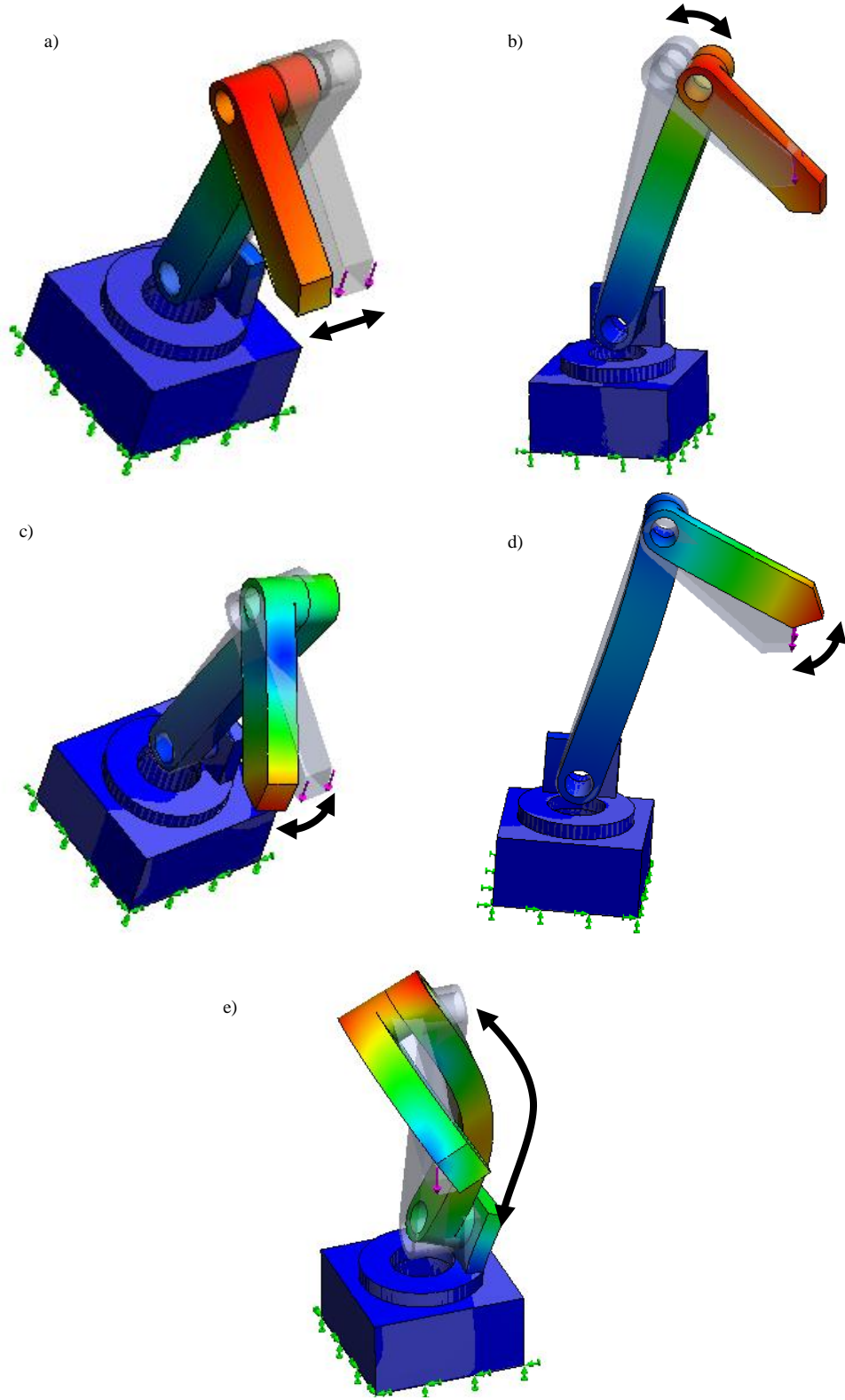
Şekil 2.12 Model robotun 50N'luk düşey kuvvet etkisi altında altı farklı konum için yer değiştirme analizleri.



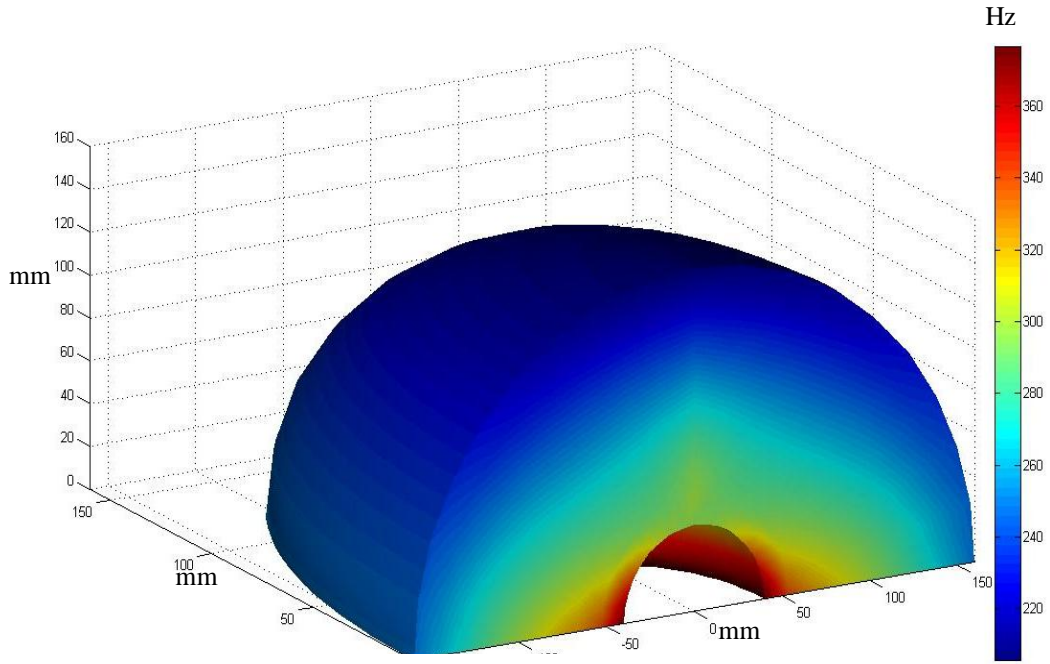
Şekil 2.13 Robotun 50N'lık düşey kuvvet için yer değıştirme dağılımı.



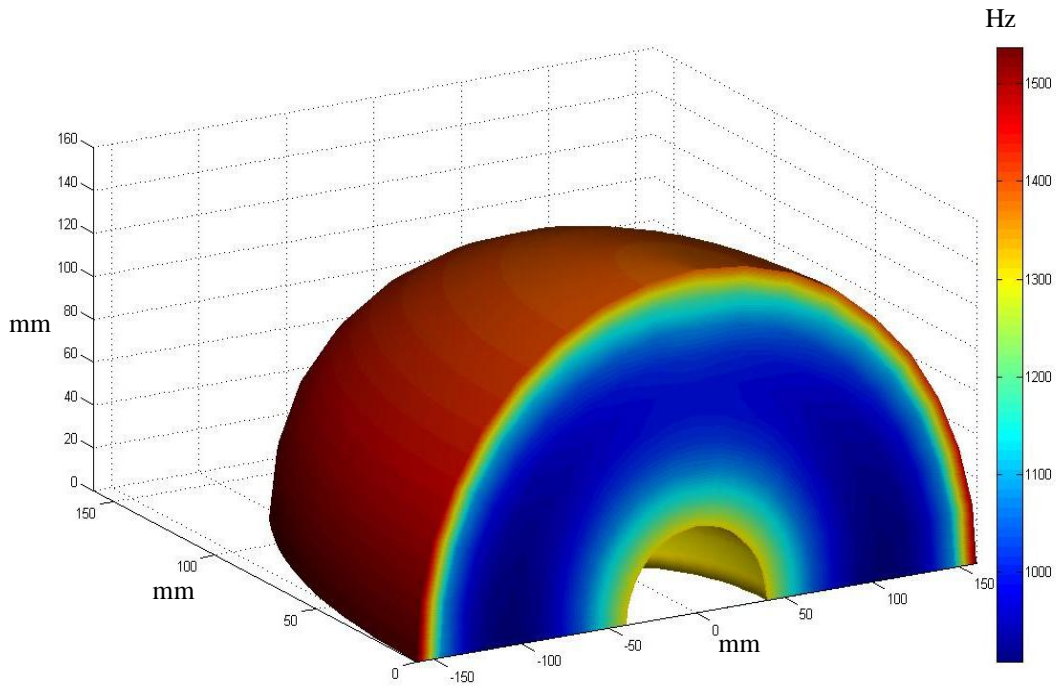
Şekil 2.14 Robotun 50N'lık düşey kuvvet için von Mises gerilme dağılımı.



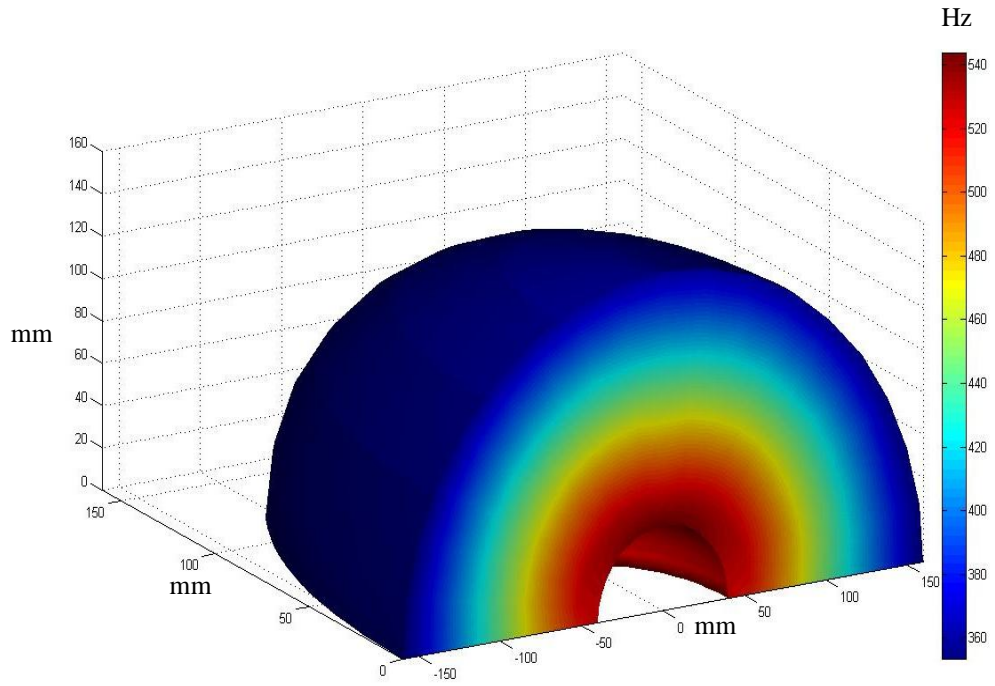
Şekil 2.15 Model Robotun beş ayrı doğal titreşim modu. a) birinci mod, b) ikinci mod, c) üçüncü mod, d)dördüncü mod, e) beşinci mod .



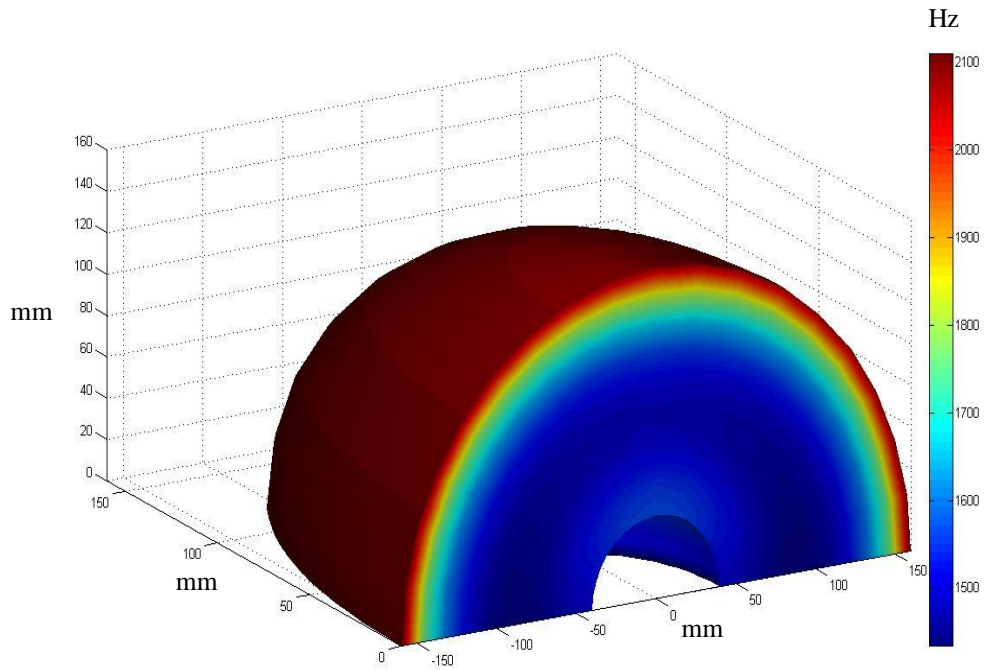
Şekil 2.16 Robotun 1.doğal frekans değerleri.



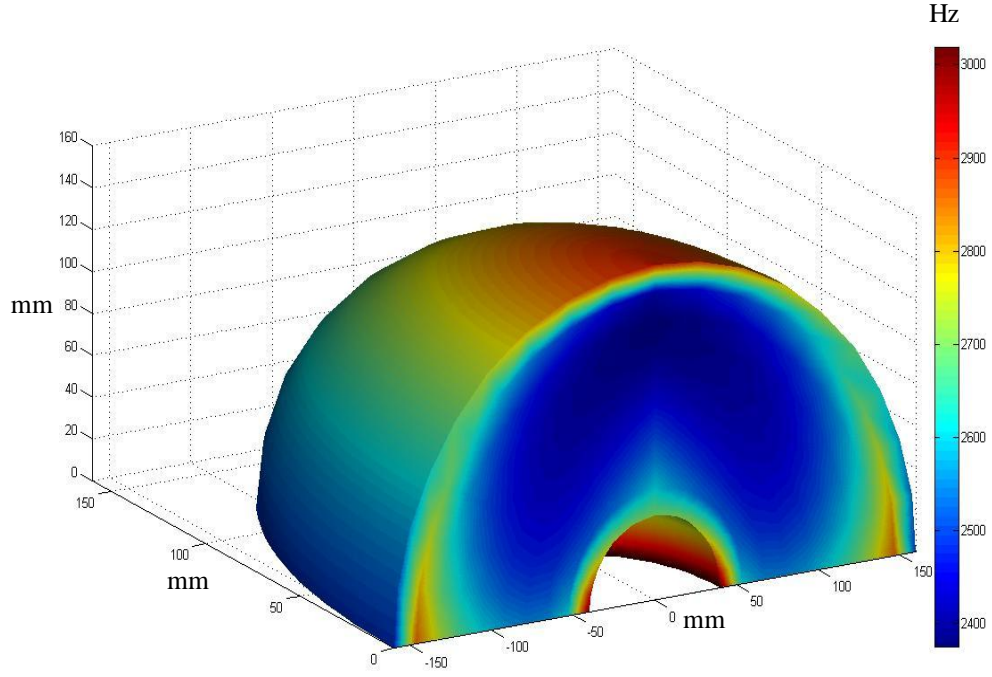
Şekil 2.17 Robotun 2.doğal frekans değerleri.



Şekil 2.18 Robotun 3.doğal frekans değerleri.



Şekil 2.19 Robotun 4.doğal frekans değerleri.



Şekil 2.20 Robotun 5.doğal frekans değerleri.

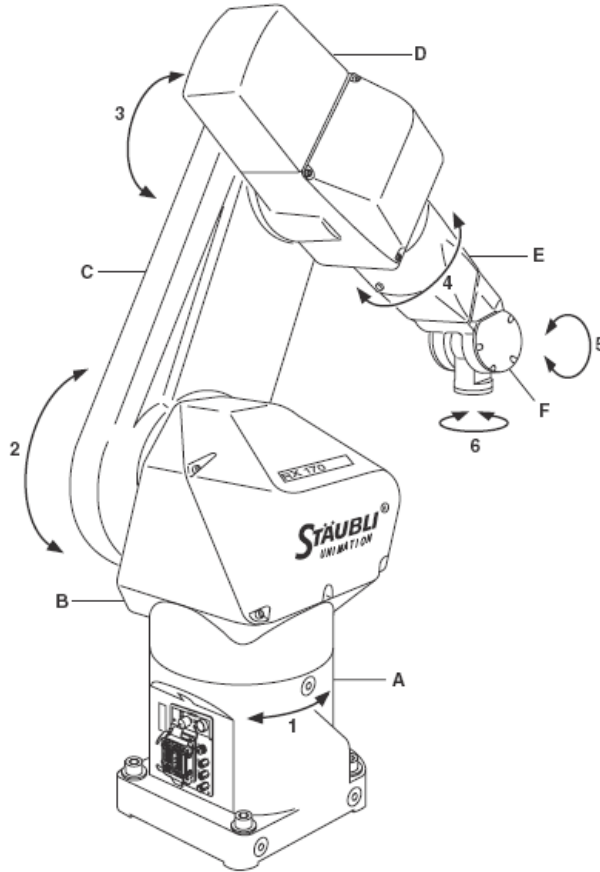
Genel olarak bakıldığında, robot manipulatörü çalışma uzayının dış sınırlarında bulunduğu direngenliği düşük olduğundan doğal frekans değerleri düşüktür. Manipülator kapandıkça direngenliği artacağından doğal frekans değerleri artmaktadır. Fakat bu durum titreşim biçimine göre değişim göstermektedir.

Robotun statik cevabı incelendiğinde manipulatörün çalışma uzayının dış yan sınırlarında bulunması durumunda uç nokta statik yer değiştirme değerleri ve manipülator üzerindeki en büyük eş değer gerilme değerleri artmaktadır.

2.4 Endüstriyel Robot İçin Analizler (STAUBLI RX-170B)

Bu bölümde çalışma uzayı analizleri endüstriyel bir robot için gerçekleştirilmiştir. Robot Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Robot kolu mafsallarla birbirine bağlanmış elemanlar ve bölümler içerir. Her bir mafsal iki dayanak arasında bir eksene sahiptir. Robot kolundaki mafsalların hareketlerini fırçasız motorlar oluşturur ve bu motorların her biri park frenlerine sahiptir. Yenilikçi sayısal montaj işlemleri, şimdiye kadar bilinen en

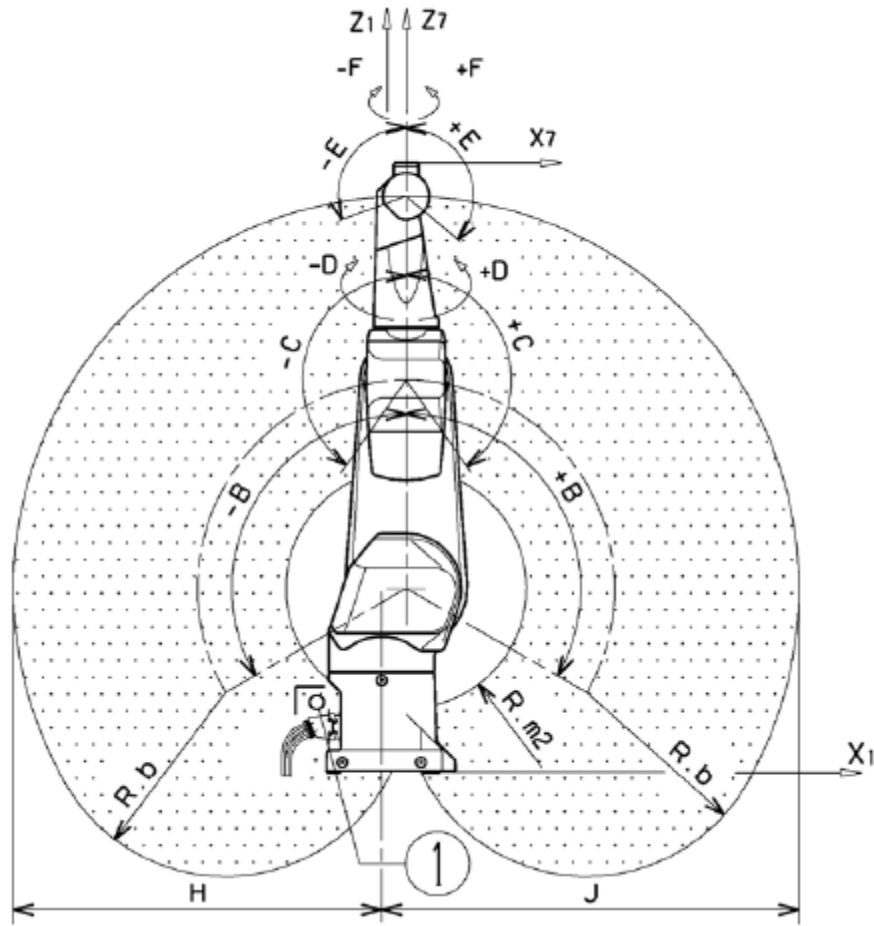
hassas pozisyonlamaya izin verir. Kol montajının yeterince esnek olması çok büyük uygulama alanları icra eder. Robot kolu altı kısımdan oluşur ve bunlar: dayanak (A), omuz (B), kol (C), dirsek (D), önkol (E) ve bilek (F)'tir (Şekil 2.20). En basit konstrüksiyonla, RX170B robot kolu onu dış etkenlerden koruyan rijit ve kapalı bir yapıya sahiptir. Robotun tasarımı aktarım organlarına dayanmaktadır: 1, 2, 3, 4, nolu mafsallarda JCS (STAUBLI combined joint) kullanılmıştır. Bilek kısmı ise 5. ve 6. mafsallardır (Şekil 2.21). Robot manipülatörünün dengesi tümleşik yay sistemi ile sağlanmaktadır. Kol, karşı yay denge sistemine sahiptir ve bu da robotta hafif ağırlık elde edilmesini sağlamıştır. Fakat analizlerde yay dikkate alınmamıştır.



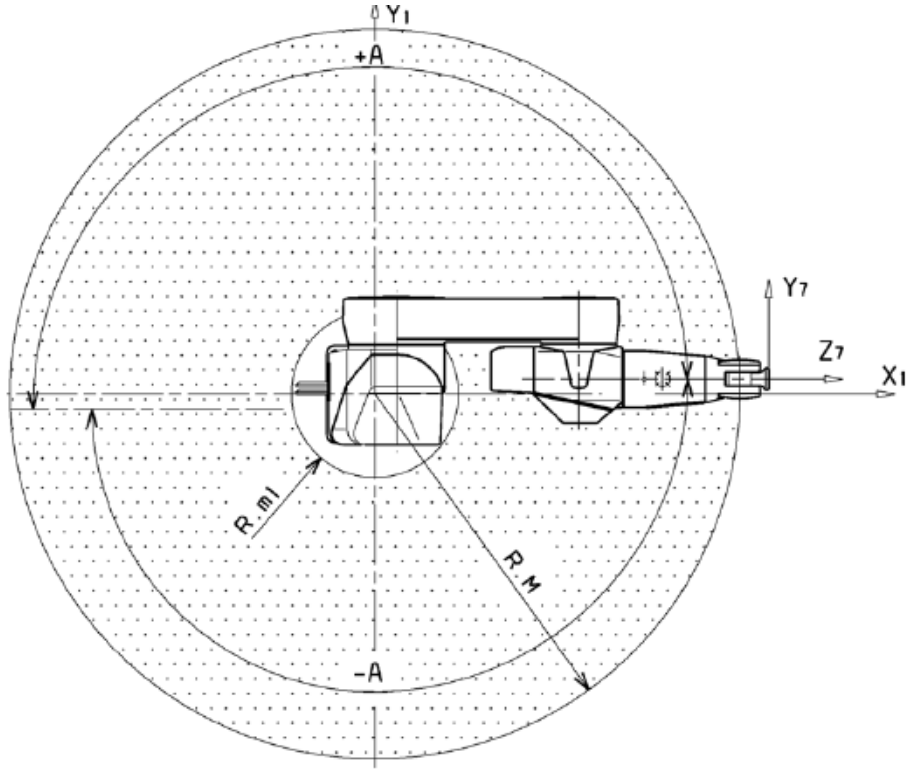
Şekil 2.21 Staubli RX170B-standart arm (Staubli,2004).

2.4.1 Robotun Teknik Verileri

Staubli RX-170B robotu 721 kg ağırlıkta olup 30 kg taşıma kapasitesine sahiptir. Çalışma uzayı, Şekil 2.22 ve 2.23’da gösterilmiştir. Çalışma uzayındaki hareket verileri Tablo 2.1 de sunulmuştur. Beşinci ve altıncı mafsallardaki motorların tork limitleri Tablo 2.2 verilmiştir. Manipülatörün en büyük kartezyen hızı 1,5 m/s’dir. Son olarak, Tablo 2.3 de her mafsalin açısai hızı, salınımı ve açısai çözünürlüğü verilmiştir.



Şekil 2.22 Staubli RX170B robotunun önden görünüşü, şekildeki tüm değerler Tablo 2.1 de mevcuttur (Staubli,2004).



Şekil 2.23 Staubli RX170B robotunun üstten görünüşü, şekildeki tüm değerler tablo 2.1 de mevcuttur (Staubli,2004).

Tablo 2.1 Staubli RX170B robotunun çalışma uzayındaki hareket değerleri.

	RX-170B
R.M, mafsal 1 ile 5 arasında en büyük ulaşılabilir mesafe	1701.4 mm
R.m1, mafsal 1 ile 5 arasında en küçük ulaşılabilir mesafe	390 mm
R.m2, mafsal 2 ile 5 arasında en küçük ulaşılabilir mesafe	490 mm
H	1500 mm
J	1700 mm
Sabit sıcaklıkta tekrarlanabilirlik	±0,04 mm
R.b, mafsal 3 ile 5 arasındaki mesafe	750 mm

Tablo 2.2 Staubli RX170B robotunun 5. ve 6. Mafsallardaki tork limitleri.

		5. Mafsal		6.Mafsal
Staubli RX-170B	Statik tork(Nm)	129	93	36
	En büyük tork(Nm)	847	574	273

Tablo 2.3 Staubli RX170B robotunun mafsallardaki açısal değerleri.

Mafsal	1	2	3	4	5	6
Genlik (°)	360	240	290	540	240	540
Çalışma açısı dağılımı (°)	A ±180	B ±120	C ±145	D ±270	E +130 -110	D ±270
Nominal hız (°/s)	130	115	135	190	200	297
En büyük hız (°/s)	155	130	205	237	243	562
Açısal çözünürlük (°. 10^{-3})	0,568	0,48	0,502	0,87	1,373	1,373

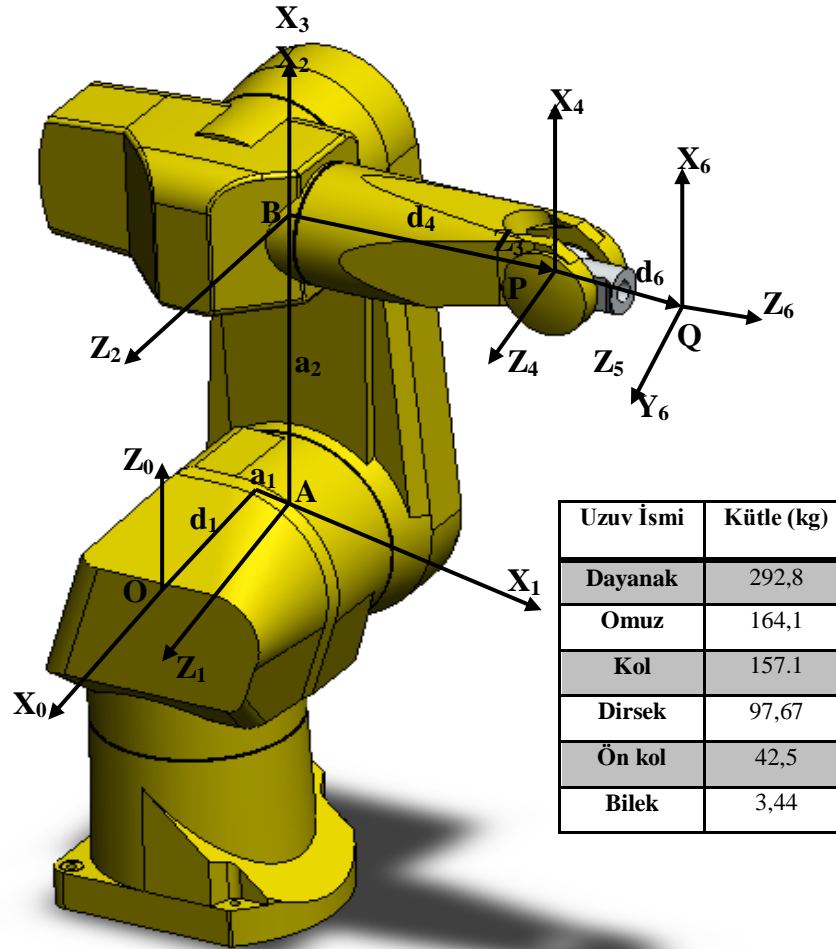
2.5 Kinematik Analiz

Seri manipulatörler, değişik tipte mafsallarla birbirlerine bağlanmışlardır. Manipulatörün bir ucu yere bağlanmıştır, diğer ucu ise uzayda serbestçe hareket eder. Bu nedenle seri manipulatörler bazen *açık döngü manipulatörler* olarak adlandırılırlar. Sabit uzva dayanak, mekanik el takılan serbest uca ise uç işlevcisi denir.

Robotların özel görevleri için, ilk önce uç işlevcisinin dayanağa göre konumu belirlenir. Buna konum analizi denir. İki tip konum analizi problemi vardır: düz kinematik ve ters kinematik. Düz kinematik için mafsal öteleme ya da dönme bilgileri verilmiştir ve uç işlevcisinin konumu istenir. Ters kinematikte ise uç işlevcisinin konumu verilmiştir ve mafsal öteleme ya da dönme değerleri istenir.

2.5.1 Düz Kinematik Analiz

Şekil 2.24'te gösterilen manipülatör 6 serbestlik dereceli bir manipülatör olup Staubli tarafından üretilmiştir. Bu manipülatörde, ilk mafsalsal eksen noktası dikey olarak z_0 eksenine doğrultusundadır, ikinci mafsalsal eksenini birinci mafsalsal eksenine a_1 ve d_1 mesafesinde diktir, üçüncü mafsalsal eksenini ikinci mafsalsal eksenine a_2 mesafesinde paraleldir, dördüncü mafsalsal eksenini üçüncü mafsalsal eksenine diktir. Ek olarak, son üç mafsalsal eksenleri B noktasından d_4 mesafesinde P noktasında dik olarak çakışır. Bu P noktası aynı zamanda bilek noktasını oluşturur.



Şekil 2.24 Staubli RX170B robotunun mafsalsal eksenlerinin gösterilmesi.

Tablo 2.4 Staubli robotunun Denavit-Hartenberg parametreleri.

Mafsal i	α_i	a_i	d_i	Θ_i
1	$\pi/2$	a_1	d_1	Θ_1
2	0	a_2	0	Θ_2
3	$\pi/2$	0	0	Θ_3
4	$-\pi/2$	0	d_4	Θ_4
5	$\pi/2$	0	0	Θ_5
6	0	0	d_6	Θ_6

Şekil 2.24'teki koordinat sistemi Tablo 2.4'te düzenlenmiştir. Denavit-Hartenberg homojen dönüşüm matrisleri kullanarak aşağıdaki matrisler elde edilir.

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & a_1c\theta_1 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & a_1s\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_2c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_2s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & s\theta_3 & 0 \\ s\theta_3 & 0 & -c\theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & s\theta_5 & 0 \\ s\theta_5 & 0 & -c\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.34)$$

$$A_6^5 = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

Uç işlevcinin konumu aşağıdaki gibidir.

$$A_6^0 = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & q_x \\ u_y & v_y & w_y & q_y \\ u_z & v_z & w_z & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.36)$$

Kapalı döngü denklemi iki basamakta elde edilir. İlk olarak, Denklem (2.30), (2.31) ve (2.32) birbirleriyle çarpılır.

$$A_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_{23} & s\theta_1 & c\theta_1 c\theta_{23} & c\theta_1(a_1 + a_2 c\theta_2) \\ s\theta_1 s\theta_{23} & -c\theta_1 & s\theta_1 s\theta_{23} & s\theta_1(a_1 + a_2 c\theta_2) \\ s\theta_{23} & 0 & -c\theta_{23} & a_2 s\theta_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.37)$$

Daha sonra Denklem (2.33), (2.34) ve (2.35) birbirleriyle çarpılır.

$$A_6^3 = A_4^3 A_5^4 A_6^5 = \begin{bmatrix} c\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 - s\theta_4 s\theta_6 & -c\theta_4 c\theta_5 s\theta_6 - s\theta_4 c\theta_6 & c\theta_4 s\theta_5 & d_6 c\theta_4 s\theta_5 \\ s\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 + c\theta_4 s\theta_6 & -s\theta_4 c\theta_5 s\theta_6 - c\theta_4 c\theta_6 & s\theta_4 s\theta_5 & d_6 s\theta_4 s\theta_5 \\ -s\theta_5 c\theta_6 & s\theta_5 s\theta_6 & c\theta_5 & d_6 c\theta_5 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

Sonuç olarak dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$A_6^0 = A_3^0 A_6^3, \quad (2.39)$$

burada A_6^0 uç işlevcinin konumunu belirtir.

Denklem (2.37) ve (2.38)'i (2.39) yerine koyarsak A_6^0 'ın elemanları Denklem (2.40)'ı elde ederiz.

$$u_x = c\theta_1 [c\theta_{23}(c\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 - s\theta_4 s\theta_6) - s\theta_{23} s\theta_5 c\theta_6] + s\theta_1 (s\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 + c\theta_4 s\theta_6),$$

$$u_y = s\theta_1 [c\theta_{23}(c\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 - s\theta_4 s\theta_6) - s\theta_{23} s\theta_5 c\theta_6] - c\theta_1 (s\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 + c\theta_4 s\theta_6),$$

$$\begin{aligned}
u_z &= s\Theta_{23}(c\Theta_4 c\Theta_5 c\Theta_6 - s\Theta_4 s\Theta_6) + c\Theta_{23} s\Theta_5 c\Theta_6, \\
v_x &= c\Theta_1[-c\Theta_{23}(c\Theta_4 c\Theta_5 s\Theta_6 + s\Theta_4 c\Theta_6) + s\Theta_{23} s\Theta_5 s\Theta_6] + s\Theta_1(-s\Theta_4 c\Theta_5 s\Theta_6 + c\Theta_4 c\Theta_6), \\
v_y &= s\Theta_1[-c\Theta_{23}(c\Theta_4 c\Theta_5 s\Theta_6 + s\Theta_4 c\Theta_6) + s\Theta_{23} s\Theta_5 s\Theta_6] - c\Theta_1(-s\Theta_4 c\Theta_5 s\Theta_6 + c\Theta_4 c\Theta_6), \\
v_z &= -s\Theta_{23}(c\Theta_4 c\Theta_5 s\Theta_6 + s\Theta_4 c\Theta_6) - c\Theta_{23} s\Theta_5 s\Theta_6, \\
w_x &= c\Theta_1(c\Theta_{23}c\Theta_4 s\Theta_5 + s\Theta_{23} c\Theta_5) + s\Theta_1 s\Theta_4 s\Theta_5, \\
w_y &= s\Theta_1(c\Theta_{23}c\Theta_4 s\Theta_5 + s\Theta_{23} c\Theta_5) - c\Theta_1 s\Theta_4 s\Theta_5, \\
w_z &= s\Theta_{23}c\Theta_4 s\Theta_5 - c\Theta_{23} c\Theta_5, \\
q_x &= c\Theta_1[a_1 + a_2 c\Theta_2 + d_4 s\Theta_{23} + d_6(c\Theta_{23} c\Theta_4 s\Theta_5 + s\Theta_{23}c\Theta_5)] + d_6 s\Theta_1 s\Theta_4 s\Theta_5, \\
q_y &= s\Theta_1[a_1 + a_2 c\Theta_2 + d_4 s\Theta_{23} + d_6(c\Theta_{23} c\Theta_4 s\Theta_5 + s\Theta_{23}c\Theta_5)] - d_6 c\Theta_1 s\Theta_4 s\Theta_5, \\
q_z &= a_2 s\Theta_2 + d_1 - d_4 c\Theta_{23} + d_6(s\Theta_{23} c\Theta_4 s\Theta_5 - c\Theta_{23}c\Theta_5),
\end{aligned} \tag{2.40}$$

2.5.2 Ters Kinematik Analiz

Ters kinematik analiz için düz kinematikte elde edilen denklemler kullanılabilir olmasına rağmen lineer olmadıkları için çözüm elde etmek zordur. Çözümün daha kolay yapılabilmesi için problem, bilek merkez noktası problemi ve yön problemi olarak ayrılabilir.

2.5.2.1 Bilek Merkez Noktası Konum Analizi

Son üç mafsalsal ekseninin P bilek merkez noktasında çakışık olmasından dolayı son üç mafsalsal dönmeleri P noktasının konumunu etkilemez. Şekil 2.23'te uç işlevcinin yeri Q, bilek merkez noktası P ve aralarındaki vektör ilişkisi görünmektedir.

Bilek merkez noktası ile uç işlevcinin bağlantısı aşağıda ifade edilmiştir.

$$p^6 = \overline{QP} = [0, 0, -d_6, 1]^T \quad (2.41)$$

Bilek merkez noktası ile temel koordinat sistemi bağlantısı aşağıda ifade edilmiştir.

$$p^0 = \overline{OP} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x - d_6 w_x \\ p_y - d_6 w_y \\ p_z - d_6 w_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Uç işlevcinin konumu verildiğinden dolayı, bilek merkez noktasının (P)'nin konumu temel koordinat sistemine göre bulunabilir. Bunlara ek olarak bilek merkez noktası üçüncü uzvun koordinat sisteminde incelenebilir.

$$p^3 = \overline{CP} = [0, 0, d_4, 1]^T. \quad (2.43)$$

p^3 temel koordinat sistemine dönüştürülürse,

$$p^0 = A_3^0 p^3 \quad olur. \quad (2.44)$$

Denklem (2.44) üç bilinmeyenli üç denklem içerir. Bunun sonucunda, ters kinematik problemin konumu ve yönü birbirinden ayrılır.

Teorik olarak, üç mafsalsal açısı Denklem (2.44)'ten çözülebilir. Daha kolay bir çözüm yolu ise A_1^0 'in tersini eşitliğin her iki tarafıyla çarpmaktır.

$$(A_1^0)^{-1} p^0 = A_3^1 p^3. \quad (2.45)$$

Denklem (2.30) ve (2.32), denklem (2.45)'de yerine koyulur.

$$p_x c\Theta_1 + p_y s\Theta_1 - a_1 = a_2 c\Theta_2 + d_4 s\Theta_{23}, \quad (2.46)$$

$$p_z - d_1 = a_2 s\Theta_2 - d_4 c\Theta_{23}, \quad (2.47)$$

$$p_x s\Theta_1 - p_y c\Theta_1 = 0, \quad (2.48)$$

Burada p_x , p_y , p_z Denklem (2.42)'de verilmiştir. Denklem (2.48) çözülürse Θ_1 elde edilir.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{p_y}{p_x}. \quad (2.49)$$

Bunda dolayı Θ_1 'in iki ayrı sonucu vardır. Özelleştirirsek $\pi \geq \Theta_1^* \geq 0$ iken, $\Theta_1 = \Theta_1^*$ bir sonuç, $\Theta_1 = \Theta_1^* + \pi$ ayrı bir sonuçtur.

Robotun kinematik yapısını incelersek A noktasıyla bilek merkez noktası P arasındaki mesafe Θ_1 ve Θ_2 'den bağımsızdır. Böylelikle bu değişkenleri yok edebiliriz. Denklem (2.46), (2.47) ve (2.48)'in karesi alınır ve toplanır.

$$k_1 s\Theta_3 + k_2 c\Theta_3 = k_3, \quad (2.50)$$

Burada $k_1 = 2a_2d_4$, $k_1 = 0$ ve $k_3 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - 2p_x a_1 c\Theta_1 - 2p_y a_1 s\Theta_1 + a_1^2 - a_2^2 + d_1^2 - d_4^2$ dir.

Denklem (2.50)'ü polinomial yapıya çevirmek için trigonometrik benzerlikten yararlanılabilir.

$$\cos \theta_3 = \frac{1 - t_3^2}{1 + t_3^2} \text{ ve } \sin \theta_3 = \frac{2t_3}{1 + t_3^2}, \text{ burada } t_3 = \tan \frac{\theta_3}{2} \text{ dir.}$$

Trigonometrik değerler Denklem (2.50)'de yerine konursa

$$(k_2 + k_3)t_3^2 - 2k_1 t_3 + (k_3 - k_2) = 0 \text{ olur.} \quad (2.51)$$

Böylece

$$\frac{\theta_3}{2} = \tan^{-1} \frac{k_1 \pm \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}}{k_3 + k_2} \text{ olur.} \quad (2.52)$$

Denklem (2.51) için üç farklı koşul bulunmaktadır. (1) eğer $k_1^2 + k_2^2 - k_3^2 > 0$, ise iki reel kökü vardır, (2) eğer $k_1^2 + k_2^2 - k_3^2 = 0$, ise çakışık iki kökü vardır, (3) eğer $k_1^2 + k_2^2 - k_3^2 < 0$, ise kökler reel değildir. Denklem (2.52)'nin kökleri çakışık olduğu zaman ya tamamen gergin durumdadır ya da tamamen katlanmıştır. Diğer yandan hiç reel kökü yok ise konum erişilemezdir.

Θ_1 ve Θ_3 bir kez bilinirse Θ_2 , Θ_1 ve Θ_3 'ü yerine koymakla bulunur. Denklem (2.46) ile (2.47)'i açarsak,

$$\mu_1 c\Theta_2 + v_1 s\Theta_2 = \gamma_1, \quad (2.53)$$

$$\mu_2 c\Theta_2 + v_2 s\Theta_2 = \gamma_2, \quad (2.54)$$

Burada

$$\mu_1 = a_2 + d_4 s\Theta_3,$$

$$v_1 = -a_3 s\Theta_3 + d_4 c\Theta_3,$$

$$\gamma_1 = p_x c\Theta_1 + p_y s\Theta_1 - a_1,$$

$$\mu_2 = -d_4 c\Theta_3,$$

$$v_2 = a_2 + d_4 c\Theta_3,$$

$$\gamma_2 = p_z,$$

Denklem (2.53) ve (2.54) çözüldüğünden dolayı $c\Theta_2$ ve $s\Theta_2$ bulunabilir. Bir kez $c\Theta_2$ ve $s\Theta_2$ bulunduktan sonra Θ_2 'nin tekil sonucu

$$\Theta_2 = \text{Atan2}(s\Theta_2, c\Theta_2) \text{ ile bulunur.} \quad (2.55)$$

2.5.2.2 Uç İşlevcinin Yönü

Θ_1 , Θ_2 ve Θ_3 bulunduktan sonra A_3^0 tamamen bilinir. Kalan diğer mafsalsal açıları Denklem (2.39)'un her iki tarafını $(A_3^0)^{-1}$ ile çarparak bulunur.

$$A_6^3 = (A_3^0)^{-1} A_3^6, \quad (2.56)$$

Denklem (2.56)'nın sağ tarafındaki bütün elemanlar bilinmektedir, son üç mafsalsal açısını bilmek için denklem (2.56)'nın rotasyon matrislerini bilmek yeterlidir. Rotasyon matrisleri olan R_3^0 ve R_6^3 Denklem (2.37) ve (2.38)'in alt matrisleridir.

Denklem (2.56)'nın 3x3 elemanları eşitlenerek

$$\Theta_5 = \cos^{-1} r_{33} \quad \text{sağlanır.} \quad (2.57)$$

Burada $r_{33} = w_x c\Theta_1 s\Theta_{23} + w_y s\Theta_1 s\Theta_{23} - w_z c\Theta_{23}$ tür. Bundan dolayı her sonuç Θ_1 , Θ_2 ve Θ_3 'e bağlıdır. Denklem (2.57) ,(1) $|r_{33}| < 1$ ise iki reel kökü vardır ve (2) eğer $|r_{33}|=1$ ise Θ_5 sifira ya da π ye eşittir. Θ_5 sifir ya da π ye eşit olduğunda altıncı mafsalsal eksenini z_5 ile dördüncü mafsalsal eksenini z_3 aynı yöndedir ve bilek tekil durumdadır. Eğer $|r_{33}| > 1$ ise durum fiziksel olarak çıkmaz.

$s\Theta_5$ 'in sıfırdan farklı olduğu varsayılırsa, Θ_4 ve Θ_6 sırasıyla bulunur. Denklem (2.56)'nın 1x3 elemanları eşitlenerek

$$c\theta_4 = \frac{w_x c\theta_1 s\theta_{23} + w_y s\theta_1 s\theta_{23} - w_z c\theta_{23}}{s\theta_5} \text{ bulunur.} \quad (2.58)$$

Denklem (2.56)'nın 2x3 elemanları eşitlenerek

$$s\theta_4 = \frac{w_x s\theta_1 - w_y c\theta_1}{s\theta_5} \text{ bulunur.} \quad (2.59)$$

Her bir sonuç, Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 , Θ_5 , Denklem (2.58) ve Denklem (2.59)'a bağlı olarak Θ_4 'ün tekil sonucunu verir.

$$\Theta_4 = \text{Atan2}(s\theta_4, c\theta_4). \quad (2.60)$$

Benzer şekilde, Denklem (2.56)'nın 3x1 elemanları eşitlenerek

$$c\theta_6 = \frac{u_x c\theta_1 s\theta_{23} + u_y s\theta_1 s\theta_{23} - u_z c\theta_{23}}{s\theta_5} \text{ bulunur.} \quad (2.61)$$

Denklem (2.56)'nın 3x2 elemanları eşitlenerek

$$s\theta_6 = \frac{v_x c\theta_1 s\theta_{23} + v_y s\theta_1 s\theta_{23} - v_z c\theta_{23}}{s\theta_5} \text{ bulunur.} \quad (2.62)$$

Her bir sonuç, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$, Denklem (2.61) ve Denklem (2.62)'ye bağlı olarak θ_6 'nın tekil sonucunu verir.

$$\theta_6 = \text{Atan2}(s\theta_6, c\theta_6). \quad (2.63)$$

2.6 Statik Analiz

Manipülator, iş parçasını kaldırmak gibi bir görevi yerine getirirken, uç işlevci dış çevresine temas noktasından kuvvet ve moment uygular. Bu kuvvet ve momentler, birçok bağlantı noktası olan hareket vericiler tarafından üretilir. Seri manipülatorler için hareket vericilerin kuvveti açık çevrim zinciriyle temas noktasına aktarılır.

Statik kuvvet analizi, mekanizmanın mafsallarına giden kuvvetlerin niteliğinin belirlenmesi için çok büyük önem sahiptir. Bu analiz, uzuvların boyları, rulmanlar ve hareket vericilerin seçilmesi aşamasında kullanılır. Sonuçlar robotun hareket kontrolünde de kullanılmaktadır.

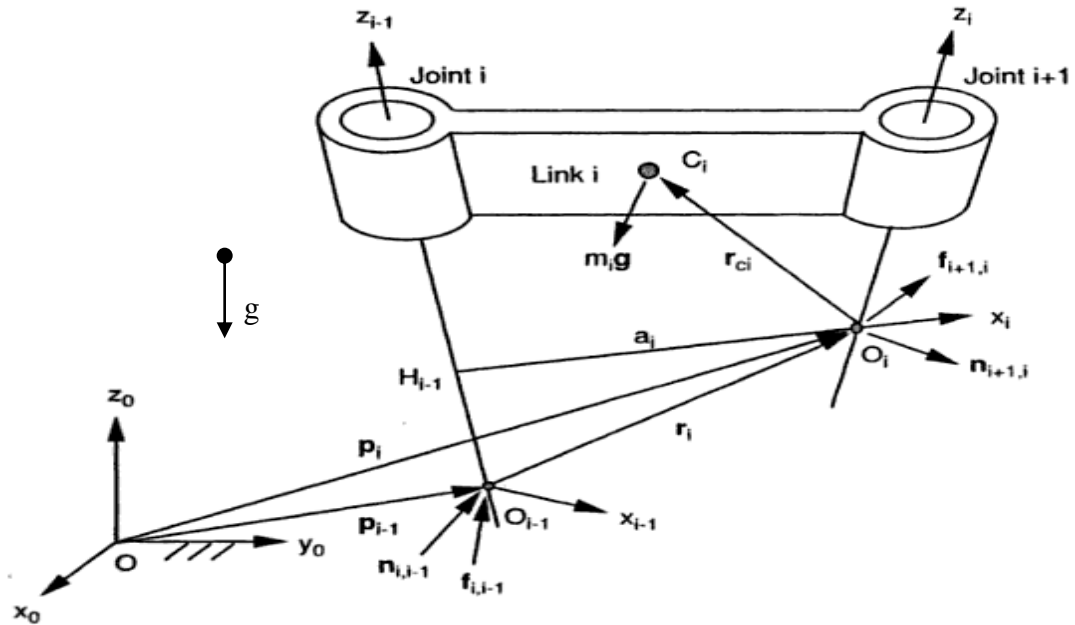
2.6.1 Seri Manipülatorlerin Statik Analizi

Statik analizlerde ilk önce, uzvun statik dengesi için denklemler düzenlenir. Daha sonra bu denklemler seri manipülatorün statik analizinde kullanılır. Eşdeğer mafsal

torkları ve uç işlevcinin kuvvetleri ile eşdeğer mafsal torkları arasındaki dönüşüm, kavramsal olarak ifade edilir.

2.6.1.1 Uzuvlardaki Kuvvet ve Moment Dengesi

Seri manipülatörlerde, her uzuv değişik mafsallarla bir ya da iki linke bağlanmıştır. Şekil 2.25'te görüldüğü gibi kuvvetler ve momentler $i-1$ uzvundan i mafsalıyla bağlı olan i uzvuna ve $i+1$ mafsalı ile $i+1$ uzvuna iletilir. $i+1$ mafsalıyla i uzvundan $i+1$ uzvuna uygulanan kuvvetler, (x_i, y_i, z_i) koordinat sistemindeki O_i noktasına bileşke kuvvet $\mathbf{f}_{i+1,i}$ ve bileşke moment $\mathbf{n}_{i+1,i}$ olarak indirgenebilir. Benzer şekilde, i mafsalıyla $i-1$ uzvundan i uzvuna uygulanan kuvvetler, $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ koordinat sistemindeki O_{i-1} noktasına bileşke kuvvet $\mathbf{f}_{i,i-1}$ ve bileşke moment $\mathbf{n}_{i,i-1}$ olarak indirgenebilir.



$\mathbf{f}_{i+1,i}$: i uzvu tarafından $i+1$ uzvuna O_i noktasında uygulanan bileşke kuvvettir. $\mathbf{f}_{i+1,i} = -\mathbf{f}_{i,i+1}$

$\mathbf{n}_{i+1,i}$: i uzvu tarafından $i+1$ uzvuna O_i noktasında uygulanan bileşke momenttir. $\mathbf{n}_{i+1,i} = -\mathbf{n}_{i,i+1}$

\mathbf{r}_{ci} : i uzvunun kütle merkezi ile i uzvun koordinat sistemini arasındaki konum vektörüdür.

\mathbf{r}_i : O_i ile $(i-1)$ uzvun koordinat sistemi arasındaki konum vektörüdür.

Şekil 2.25 i uzvuna etkiyen kuvvet ve momentler (Tsai, 1999).

İlk önce kuvvet dengesi göz önüne alınır. Şekil 2.24'te görüldüğü gibi i uzvu üzerine etkiyen üç tane kuvvet vardır: $\mathbf{f}_{i,i-1}$, $-\mathbf{f}_{i+1,i}$ ve $m_i\mathbf{g}$. Bundan dolayı kuvvet denge denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$\mathbf{f}_{i,i-1} - \mathbf{f}_{i+1,i} + m_i\mathbf{g} = 0 \quad (2.64)$$

Sonra, O_i orijinine göre moment dengesi hesaba katılır. Şekil 2.24'te görüldüğü üzere i uzvu üzerine etkiyen iki tane moment vardır: $\mathbf{n}_{i,i-1}$ ve $-\mathbf{n}_{i+1,i}$. bunlara ek olarak, $\mathbf{f}_{i,i-1}$ ve $m_i\mathbf{g}$, O_i noktasında moment oluştururlar. Bu momentlerin toplamından aşağıdaki denklemi elde edilir.

$$\mathbf{n}_{i,i-1} - \mathbf{n}_{i+1,i} - \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_{i,i-1} + \mathbf{r}_{ci} \times m_i\mathbf{g} = 0. \quad (2.65)$$

$\mathbf{f}_{i+1,i}$ ve $\mathbf{n}_{i+1,i}$ 'ye, i ve $i+1$ uzuvları arasındaki reaksiyon kuvveti ve momenti denir. $i=0$ olması durumunda, $\mathbf{f}_{1,0}$ ve $\mathbf{n}_{1,0}$ ilk uzvun temel uzva kuvvet ve moment uyguladığını gösterir. $i=n$ olması durumunda, $\mathbf{f}_{n+1,n}$ ve $\mathbf{n}_{n+1,n}$ uç işlevcinin çevreye moment ve kuvvet uyguladığını gösterir. Bu bağlamda, çevre $n+1$ numaralı ilave uzuvdur.

Denklem (2.64) ve (2.65) her bir hareketli uzuv için. $i=1, 2, \dots, n$. $2n$ vektör denklemi ve $2(n+1)$ sayıda reaksiyon kuvveti ve momenti yazılır. Bu nedenle tekil sonuç sağlamak için reaksiyon kuvvetleri ve momentlerinden iki tanesi belirtilmiş olmalıdır. Manipülator, basma ve yerleştirme gibi verilmiş bir görevi uygularken, uç işlevci dış çevresine kuvvet ve moment uygular. Başka bir deyişle manipülator bir nesneyi kaldırırken, nesnenin ağırlığı uç işlevcinin yükü olur. Uç işlevcinin çıkış kuvveti ve momenti olan $\mathbf{f}_{n+1,n}$ ve $\mathbf{n}_{n+1,n}$ 'i hesaba katarak Denklem (2.64) ve (2.65)'ten geri kalan kuvvet ve momentleri bulabiliriz.

Genellikle kuvvet ve moment, altı elemanlı bir vektörde birleştirilir.

$$F_{i,i-1} = \begin{bmatrix} f_{i,i-1} \\ n_{i,i-1} \end{bmatrix}. \quad (2.66)$$

Yukarıdaki altı elemanlı $F_{i,i-1}$ vektörüne O_{i-1} etrafındaki burulma denir.

2.6.1.2 Tekrarlama Metodu

Tekrarlama metodu, seri manipülatörlerin statik kuvvet analizi için geliştirilmiştir. Tekrarlama metodu ile, $2n$ vektör denklemini çözmeye ihtiyaç duymadan, bir uzuvdaki mafsallık reaksiyon kuvvetleri ve momentleri elde edilir. Analizi kolaylaştırmak için Denklem (2.64) ve (2.65) tekraralama formunda yazılır.

$$\mathbf{f}_{i,i-1} = \mathbf{f}_{i+1,i} - m_i \mathbf{g}. \quad (2.67)$$

$$\mathbf{n}_{i,i-1} = \mathbf{n}_{i+1,i} + \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_{i,i-1} - \mathbf{r}_{ci} \times m_i \mathbf{g} \quad (2.68)$$

Denklem (2.67) ve (2.68)'deki vektörler sabit koordinat sisteminde tanımlanmıştır. Genellikle \mathbf{r}_{ci} konum vektörü i . koordinat sisteminde belirtilir. Benzer şekilde, \mathbf{r}_i vektörü i . koordinat sisteminde D-H parametreleriyle aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{r}_i^i = \begin{bmatrix} a_i \\ d_i s \alpha_i \\ d_i c \alpha_i \end{bmatrix}. \quad (2.69)$$

Bu nedenle, \mathbf{r}_{ci}^i ve \mathbf{r}_i^i Denklem (2.67) ve (2.68)'de yerine koymadan önce sabit koordinat sistemine dönüştürülmelidirler ve Aşağıdaki dönüşümlerle bu kolayca yapılabilir.

$$\mathbf{r}_{ci} = R_i^0 \mathbf{r}_{ci}^i. \quad (2.70)$$

$$\mathbf{r}_i = R_i^0 \mathbf{r}_i^i. \quad (2.71)$$

Denklem (2.67) ve (2.68) uygulanarak mafsallık reaksiyon kuvvetleri ve momentleri sırasıyla bulunabilir. Süreç uç işlevcinin uzvundan başlar ve sırayla temel uzvuna kadar gider. $i=n$ için, uç işlevcinin reaksiyon momenti ve kuvveti, $\mathbf{f}_{n+1,n}$ ve $\mathbf{n}_{n+1,n}$, biliniyor olarak değerlendirilir. Denklem (2.67) ve (2.68), n . mafsallık reaksiyon kuvvetlerini ve momentlerini, $\mathbf{f}_{n,n-1}$ ve $\mathbf{n}_{n,n-1}$, olarak verir. İşlem $i = n-1, n-2, \dots, 1$ için tüm reaksiyon kuvvetleri bulunur.

Alternatif olarak, her bir mafsalın reaksiyon kuvvetleri ayrı ayrı bulunabilir. Denklem (2.67) ve (2.68)'i i. uzvun koordinat sistemi için yazılır.

$${}^i \mathbf{f}_{i,i-1} = {}^i \mathbf{f}_{i+1,i} - m_i {}^i \mathbf{g}. \quad (2.72)$$

$${}^i \mathbf{n}_{i,i-1} = {}^i \mathbf{n}_{i+1,i} + {}^i \mathbf{r}_i \times {}^i \mathbf{f}_{i,i-1} - {}^i \mathbf{r}_{ci} \times m_i {}^i \mathbf{g} \quad (2.73)$$

(i)ninci uzuv için reaksiyon kuvvetleri bulunduktan sonra (i-1). uzuv için dönüşüm uygulanır.

$${}^{i-1} \mathbf{f}_{i,i-1} = \mathbf{R}_i^{i-1} {}^i \mathbf{f}_{i,i-1}. \quad (2.74)$$

$${}^{i-1} \mathbf{n}_{i,i-1} = \mathbf{R}_i^{i-1} {}^i \mathbf{n}_{i,i-1}. \quad (2.75)$$

Ayrıca uç işlevcinin kuvvet ve momenti, temel koordinat sisteminde belirtilmek istenirse, kuvvet ve momentler uç işlevcinin koordinat sistemine dönüştürülmelidir.

$${}^n \mathbf{f}_{n+1,n} = \mathbf{R}_0^n {}^0 \mathbf{f}_{n+1,n}. \quad (2.76)$$

$${}^n \mathbf{n}_{n+1,n} = \mathbf{R}_0^n {}^0 \mathbf{n}_{n+1,n}. \quad (2.77)$$

2.6.1.3 Eşdeğer Mafsal Torkları

Mafsallardaki reaksiyon kuvvetleri bulunduğunda, hareket vericilerin ihtiyaç duyduğu kuvvetler ve torklar bulunur. Seri manipülatörler için, her mafsal bir hareket verici tarafından kuvvet veya tork verilerek sürülür. Bu hareket vericilerin kuvvetleri ve torkları, bağlı oldukları mafsal eksenlerinin reaksiyon kuvvetleri ile bulunabilir.

Kayar mafsallar için, hareket vericiler kuvveti i. mafsal eksenini doğrultusunda iletirler. Sürtünme kuvvetlerini ihmal edersek, hareket vericinin kuvveti τ_i aşağıdaki gibi yazılır.

$$\tau_i = \mathbf{z}_{i-1}^T {}^i \mathbf{f}_{i,i-1}. \quad (2.78)$$

Burada z_{i-1} i.mafsal eksenini pozitif doğrultusunda birim vektördür. Denklem (2.78), hareket vericilerin mafsal eksenini doğrultusundaki ${}^i\mathbf{f}_{i,i-1}$ elemanı bileşenlerini taşıdığını kasteder. ${}^i\mathbf{f}_{i,i-1}$ 'nin diğer bileşenleri mafsal rulmanları tarafından desteklenir.

Aynı şekilde, döner mafsalda, hareket verici kuvvet yerine i. mafsal ekseninde tork uygular. Bu hareket vericini torku aşağıda verilmiştir.

$$\tau_i = z_i^T {}^i\mathbf{n}_{i,i-1}. \quad (2.79)$$

Tekrar etmek gerekirse, hareket verici sadece mafsal eksenini yönündeki ${}^i\mathbf{n}_{i,i-1}$ 'nin bileşenlerini taşır. Diğer bileşenler mafsallardaki rulmanlar tarafından taşınır. Burada τ_i 'ye eşdeğer mafsal torku denir.

2.6.2 Seri Manipülatorlerde Direngelik Analizi

Manipülator verilen görevi yaparken, uç işlevci çevresine bazı kuvvetler ve momentler uygular. Bu temas kuvvetleri ve momentler, uç işlevcinin istenen pozisyondan sapmasına neden olur. Sapmanın miktarı manipülatöre uygulanan kuvvet ve direngeliğin bir fonksiyonudur. Bu manipülator direngeliğinin kesin pozisyonlamada doğrudan etkisi vardır. Daha da ötesi, bazı gelişmiş kontrol sistemlerinde, direngelik karakteristiği robotlarda geri besleme olarak kullanılır. Manipülatorlerdeki direngelik, uzuvlar için kullanılan malzemenin boyutuna, mekanik aktarma organlarına, mekanizmalara, kontrolcüye ve de hareket veren elemanlara bağlıdır.

2.6.2.1 Uygun Matris Yöntemi

Seri manipülatorler için, her bir mafsal çok milli ve kademeli redüktörlere sahip motorlar tarafından sürülür. Kuvvet ve momentler iletilirken bu redüktördeki millerin pozisyonları olması gereken değerden sapabilir. Sürücü torku veya kuvveti, servo

sistemlerdeki pozisyon ve hız hata sinyallerinden alınan geri besleme kazancı ile üretilir. Redüktörün, millerin ve servo sistemlerinin direngenlikleri toplamı eşdeğer direngenliği oluşturur.

n mafsalsal uzayının boyutu, m uç işlevci uzayının boyutu, τ_i i . mafsalsalın torku veya kuvveti, Δq_i ise ilgili mafsalsalın sapması olarak adlandırılır. Daha sonra küçük ölçekli sapmalar için, τ_i ve Δq_i doğrusal yakınsamayla ilişkilendirilebilir.

$$\tau_i = k_i \Delta q_i, \quad (2.80)$$

burada k_i direngenlik sabitidir. Daha uygun bir şekilde, (2.50) denklemi $i = 1, 2, 3, \dots, n$ için matris formunda yazılabilir.

$$\tau = X \Delta q, \quad (2.81)$$

burada $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n]^T$, $\Delta q = [\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3, \dots, \Delta q_n]^T$, $X = [k_1, k_2, k_3, \dots, k_n]$ $n \times n$ köşegen matrisidir.

Seri manipulatörler için, $m \times n$ boyutlarında olan uç işlevci deplasmanı Δx , mafsalsal deplasmanı olan Δq ile ilişkilidir.

$$\Delta x = J \Delta q, \quad (2.82)$$

ve uç işlevcinin çıkış kuvveti \mathbf{F} , mafsalsal torku τ ve bilinen jakobiyen matrisinin tersi ile ilişkilidir.

$$\tau = J^T \mathbf{F}, \quad (2.83)$$

Denklem (2.81), (2.82) ve (2.83)'ten τ ve Δq u elenirse, elde edilen denklem

$$\Delta x = C \mathbf{F} \quad \text{olur.} \quad (2.84)$$

Burada

$$C = J X^{-1} J^T, \quad (2.85)$$

Bu $m \times m$ matrise uygun matris denir.

Denklem (2.84)'ten anlaşılacağı gibi uygun matris simetriktir. Denklem sadece her bir sürücü doğrultusunun direngenliğine değil jakobiyen matrisine de bağlıdır.

2.6.2.2 Direngenlik Matrisi

Eğer $m = n$ ve jakobiyen matrisi tekil değil ise uygun matris tersinirdir. Denklem (2.58)'in her iki tarafını C^{-1} ile çarparsak, elde edilen denklem

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \Delta \mathbf{x}, \quad (2.86)$$

burada

$$\mathbf{K} = \mathbf{C}^{-1} = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{X} \mathbf{J}^{-1} \quad (2.87)$$

direngenlik matrisi olarak adlandırılır.

Açıkça, direngenlik matrisi duruma bağlıdır. Manipülatör direngenliği, belli bir görev için kuvvet ihtiyaçlarından oluşan uç işlevcinin bir birim sapması olarak tanımlanır. Denklem (2.84) de $(\Delta \mathbf{x})^T (\Delta \mathbf{x}) = 1$ yerine konursa

$$\mathbf{F}^T \mathbf{C}^T \mathbf{C} \mathbf{F} = 1, \quad (2.88)$$

Verilen manipülatör düzeninde, Denklem (2.88) m-boyutlu kuvvet elipsoidini ifade eder. Çünkü $\mathbf{C}^T \mathbf{C}$ pozitif simetriktir ve kesin olarak öz vektörü ortogonal'dir. Elipsoidin ana eksenleri ile $\mathbf{C}^T \mathbf{C}$ 'nin öz vektörü çakışık ve uzunlukları özdeğerin karekökünün zıttına eşittir. Bundan dolayı birim sapmayı üretmek için gereken maksimum ve minimum kuvvetler $1/\sqrt{\lambda_{min}}$ ve $1/\sqrt{\lambda_{max}}$ olur, sırasıyla, burada λ_{min} ve λ_{max} $\mathbf{C}^T \mathbf{C}$ 'nin minimum ve maksimum özdeğeridir.

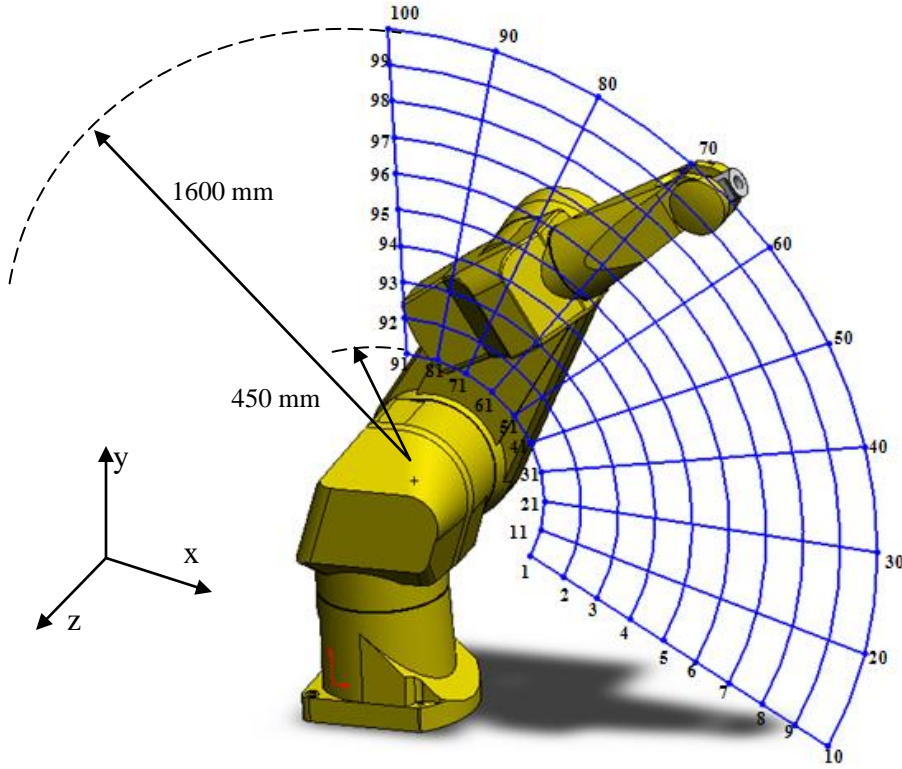
BÖLÜM ÜÇ

ENDÜSTRİYEL ROBOT İÇİN ANALİZLER

Bu bölümde Staubli RX-170B robotu için statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Robot manipülatörü çalışma uzayı içerisinde belirlenen noktalar için analizler yapılmıştır.

3.1 Endüstriyel Robot için Çalışma Uzayı Tanımlanması

Analizler için çalışma uzayı oluşturmak için ilk önce Şekil 3.1 de görüldüğü gibi yüzyirmi derecelik bir kesit alınır ve bu kesit daha sonra yüz parçaya bölünür. Bu kesitteki noktalar MATLAB programı yardımıyla bulunur ve bulunan noktalar SolidWorks programının analiz kısmındaki Design Scenario'ya aktarılır. Kesitin iç çapı 450 mm dış çapı ise 1600 mm'dir ve y ekseninden $\pm 120^\circ$ tarar.

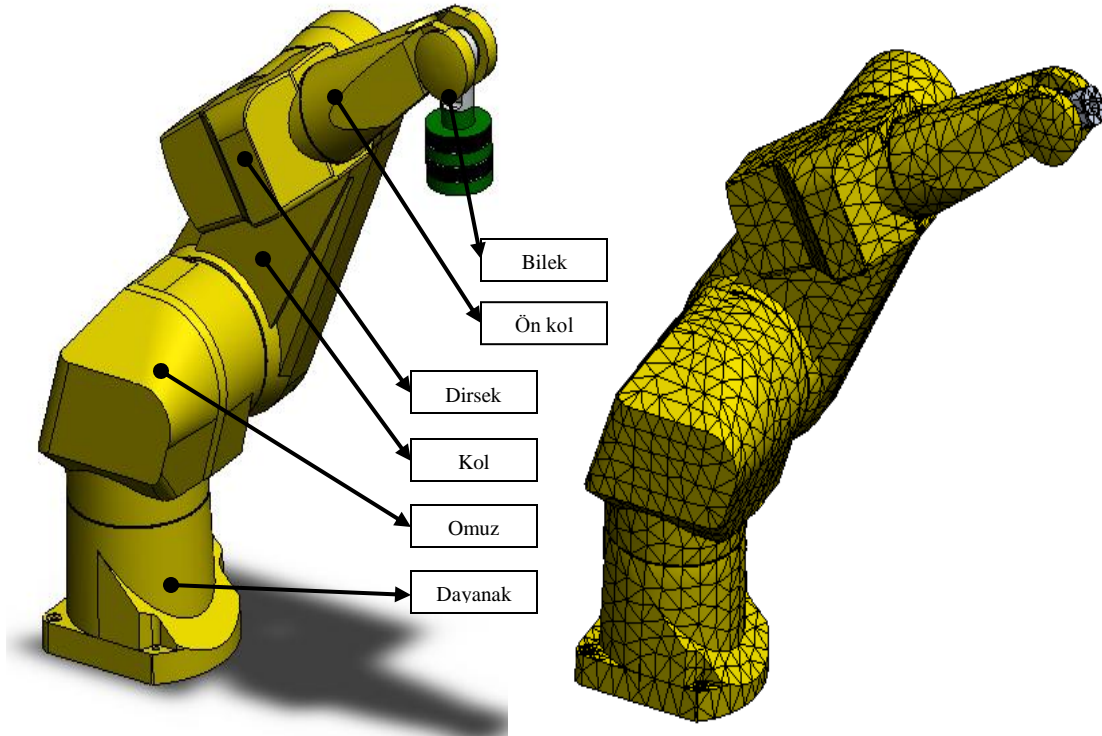


Şekil 3.1 Çalışma uzayının yüzyirmi derecelik kesiti.

3.2 Gerilme ve Yer Değiştirme Analizi

Gerilme analizi robot uzuvları için malzeme tayini aşamasında yararlıdır. Çalışma kuvveti etkisi altında malzemenin akma sınırının aşılmayacağına bakılır. Eğer malzeme istenen değerleri sağlamıyorsa daha mukavemetli bir malzeme seçilip analiz tekrar edilir. Uç nokta yer değiştirme analizinde ise robotun hassasiyeti belirlenir. Malzeme olarak dayanağa dökme demir ve geri kalan diğer uzuvlara 1060 alaşımlı alüminyum malzeme atanmıştır.

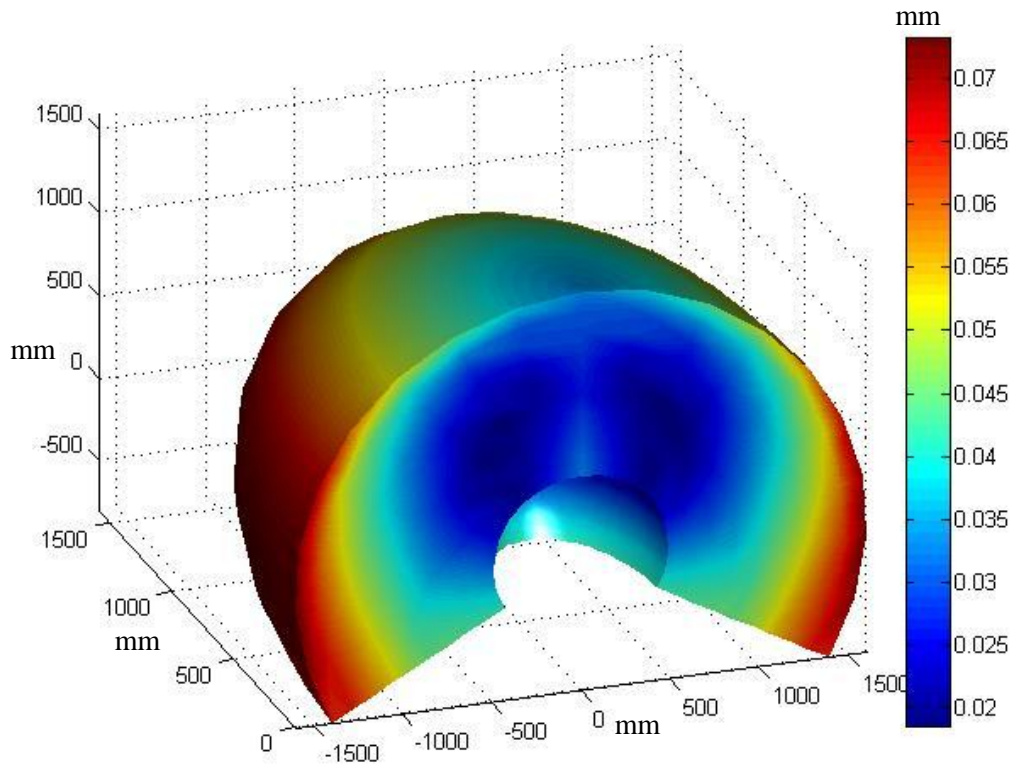
Gerilme analizi, robotta üç aşamada incelenmiştir: (1) yüksüz durumda (2) en yüksek taşıma kapasitesi olan 30 kg yüklü iken ve (3) 50 kg yüklü iken. Şekil 3.2 de robot en yüksek taşıma kapasitesi olan 30 kg yük taşımaktadır.



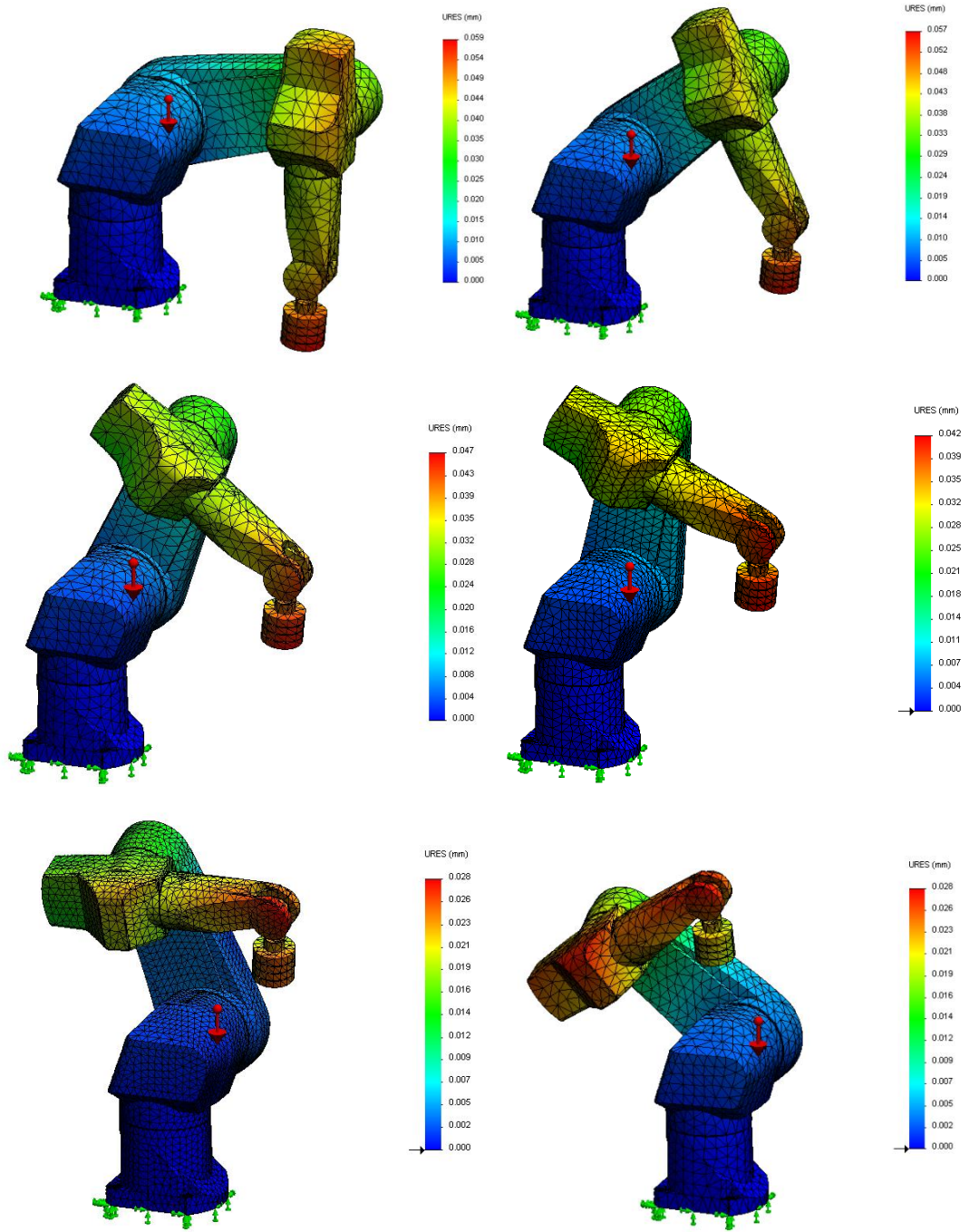
Şekil 3.2 Robotun gerilme, yer değiştirme analizindeki yüklü hali ve sonlu elemanlar modeli.

Robot yüksüz durumda sadece yerçekimi ivmesinden doğan kendi ağırlığıyla gerilmeye maruz kalmaktadır. Yük takıldıktan sonra ise bilek noktasına düşey doğrultuda 294.3N'luk sabit bir kuvvet uygulanmaktadır.

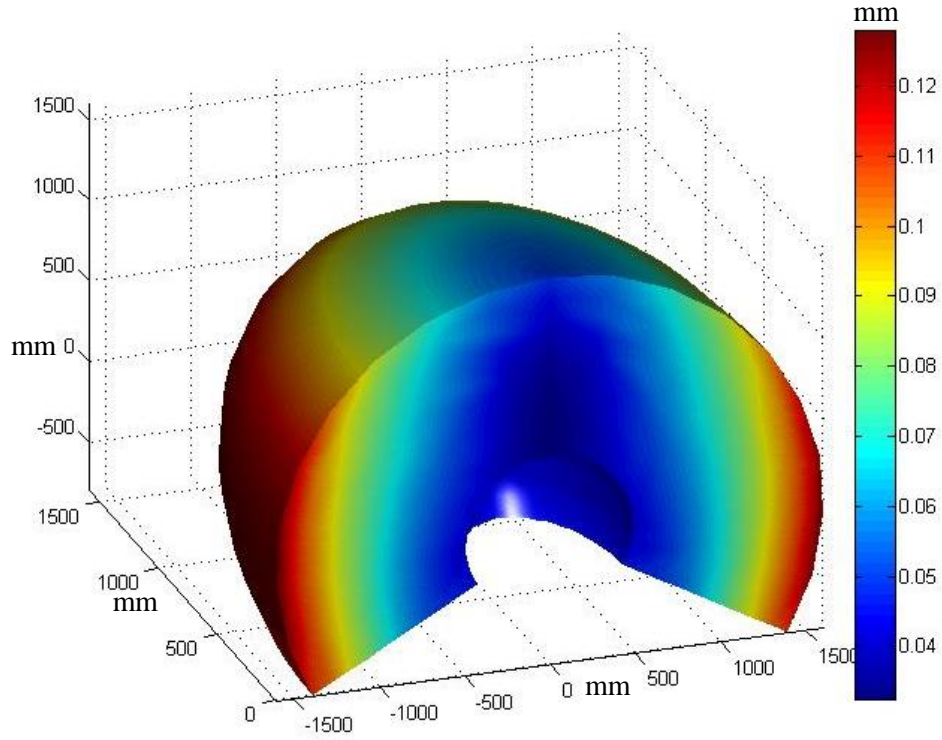
Şekil 3.3'te robotun yüksüz durumda, Şekil 3.5'te 30 kg ağırlığında yüke maruz kalırken, Şekil 3.6'da ise 50kg ağırlığında yüke maruz kalırken, çalışma uzayı içindeki en büyük yer değiştirme dağılımı gösterilmiştir. Şekil 3.4'te ise robot belli bir yörüngede hareket ederken altı farklı konumda analiz yapılmıştır. Şekil 3.7 de ise Şekil 3.3, 3.5 ve 3.6'daki verilerin daha iyi karşılaştırılabilmesi için aynı grafikte verilmiştir. Şekil 3.7 de yüksüz, Şekil 3.8'de 30 kg ve Şekil 3.9'da 50 kg'lık yüke maruz kalmaktadır. Bu üç şeklin karşılaştırılması Şekil 3.10'da yapılmıştır. Buradaki değerlerin hepsi von Mises kriterine göre MPa cinsinden olup kırmızıdan maviye giden bir renk skalasıyla gösterilmiştir.



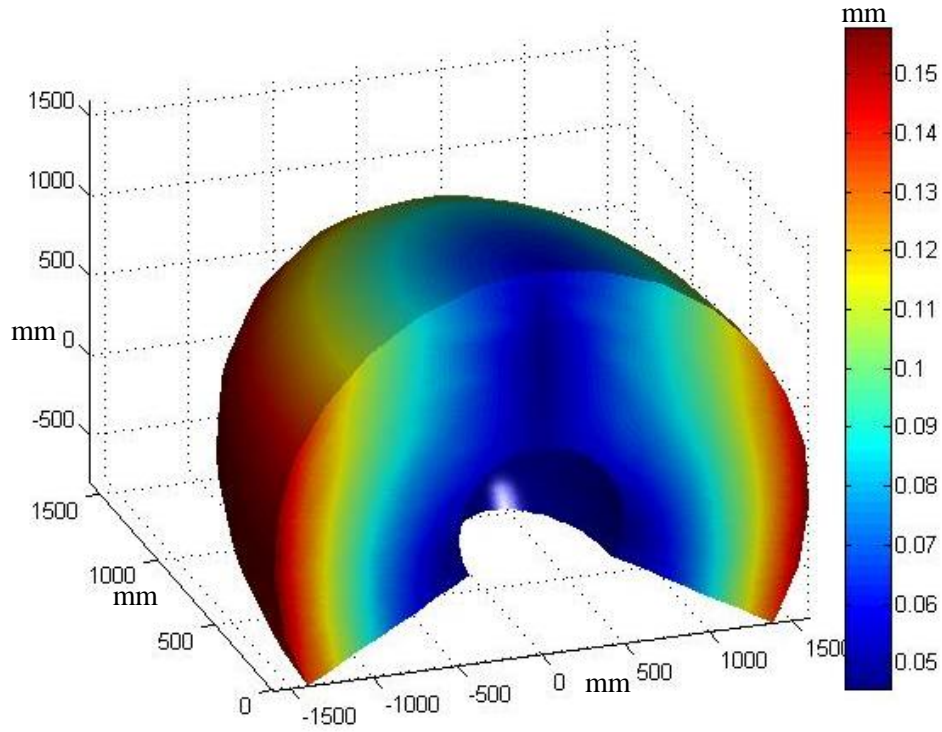
Şekil 3.3 Çalışma uzayında yüklemesiz durumda uç nokta yer değiştirme analizi.



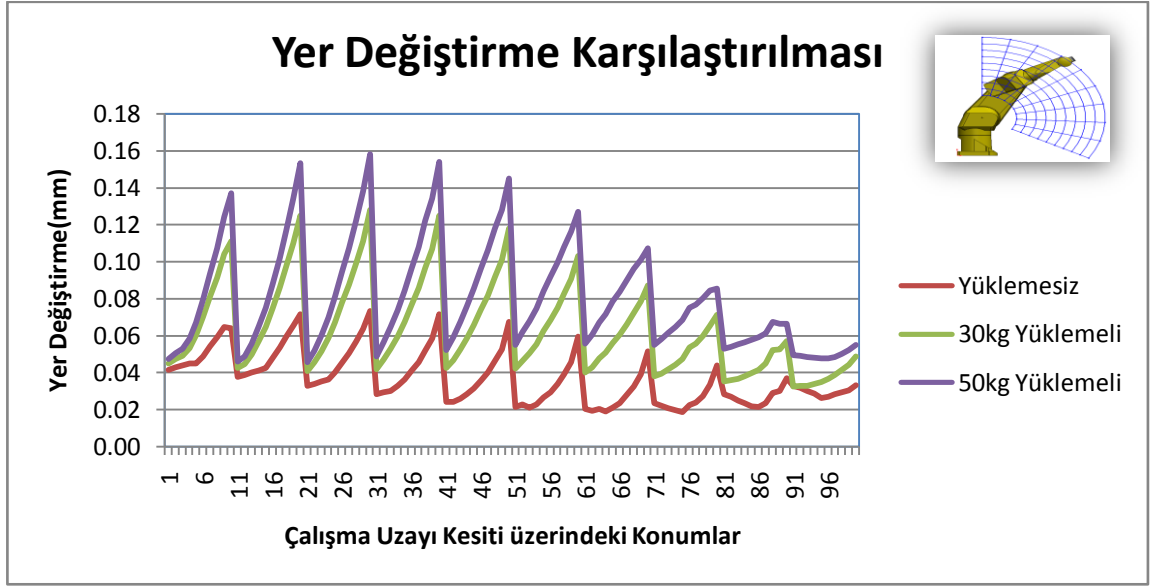
Şekil 3.4 Altı farklı konum için yer değiştirme analizi.



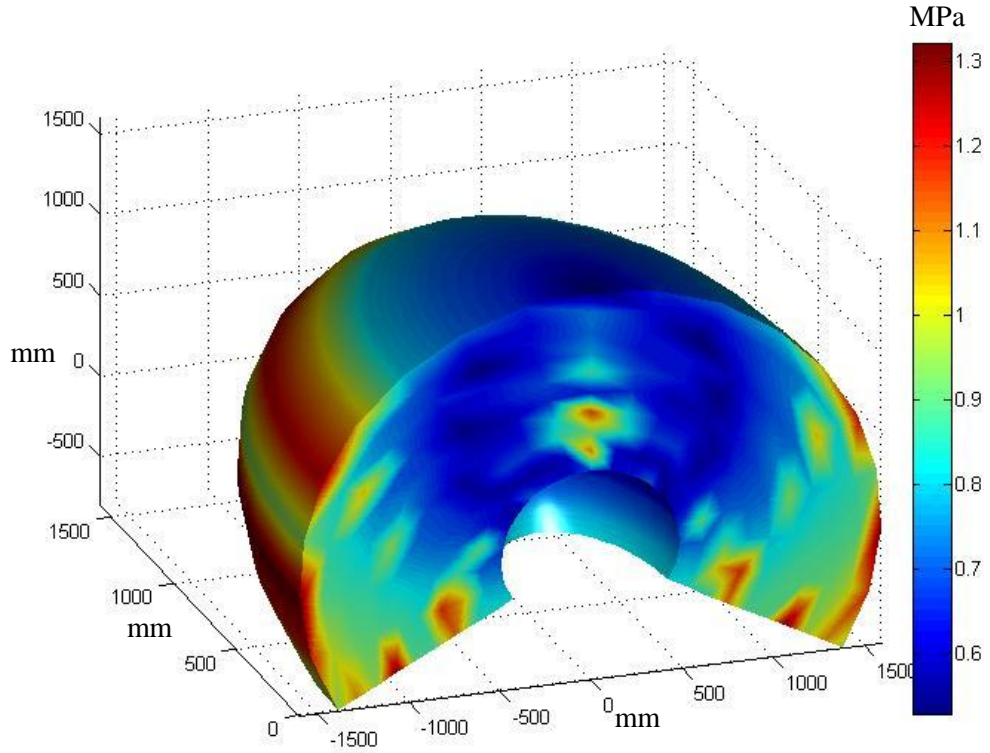
Şekil 3.5 Çalışma uzayında 30kg yüklemeli durumda uç nokta yer değıştirme analizi.



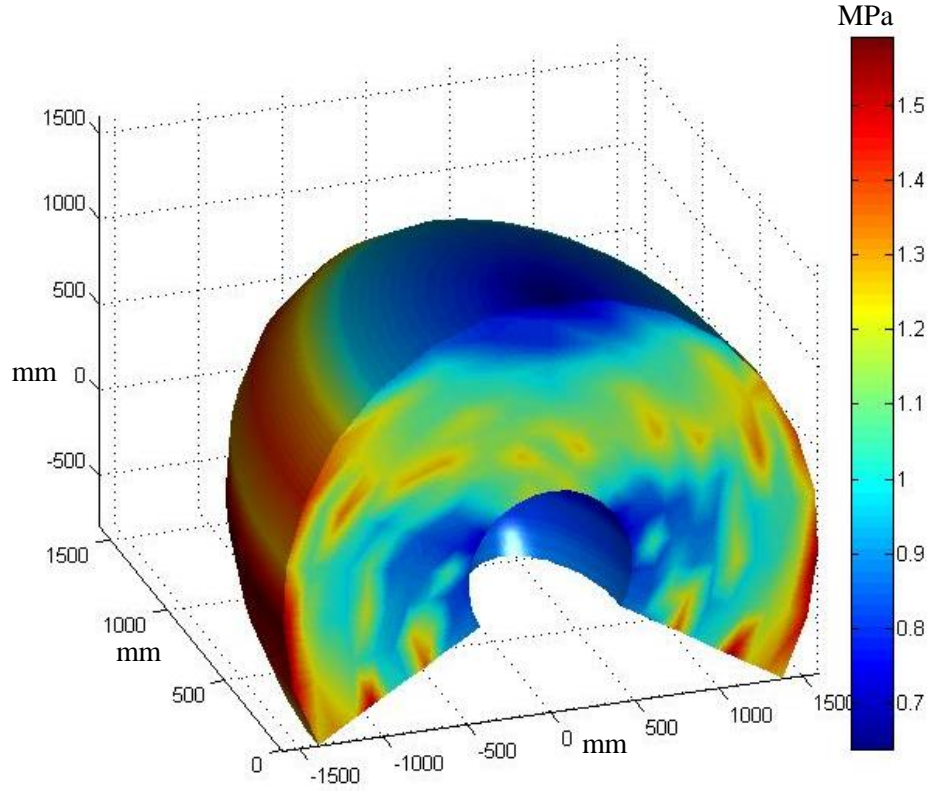
Şekil 3.6 Çalışma uzayında 50kg yüklemeli durumda uç nokta yer değıştirme analizi.



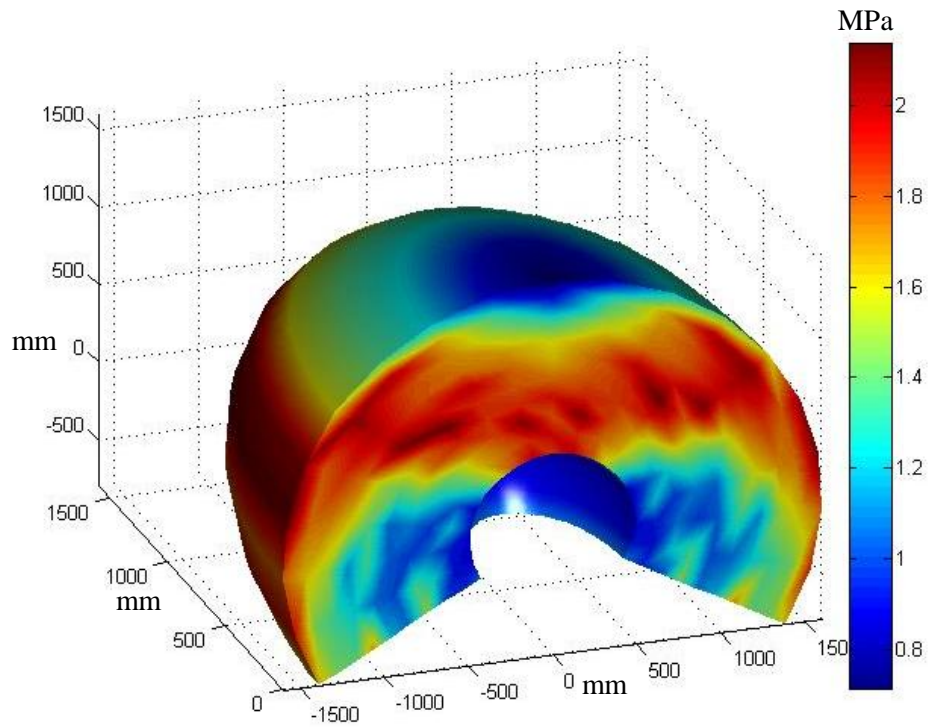
Şekil 3.7 Yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması



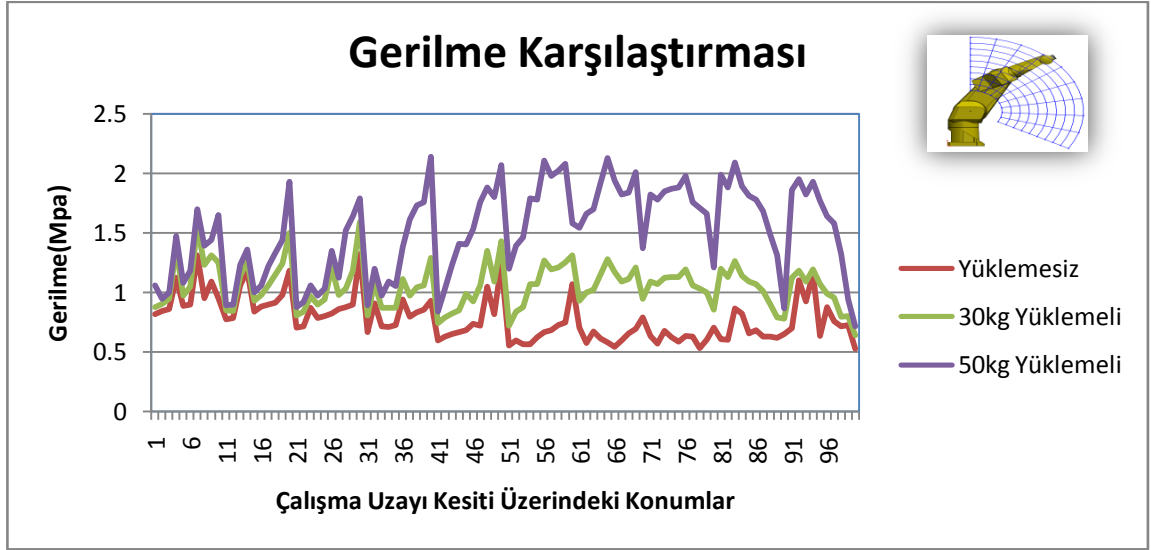
Şekil 3.8 Çalışma uzayında yüklemesiz durumda gerilme analizi.



Şekil 3.9 Çalışma uzayında 30kg yüklemeli durumda gerilme analizi.



Şekil 3.10 Çalışma uzayında 50kg yüklemeli durumda gerilme analizi.



Şekil 3.11 Gerilme değerlerinin karşılaştırılması

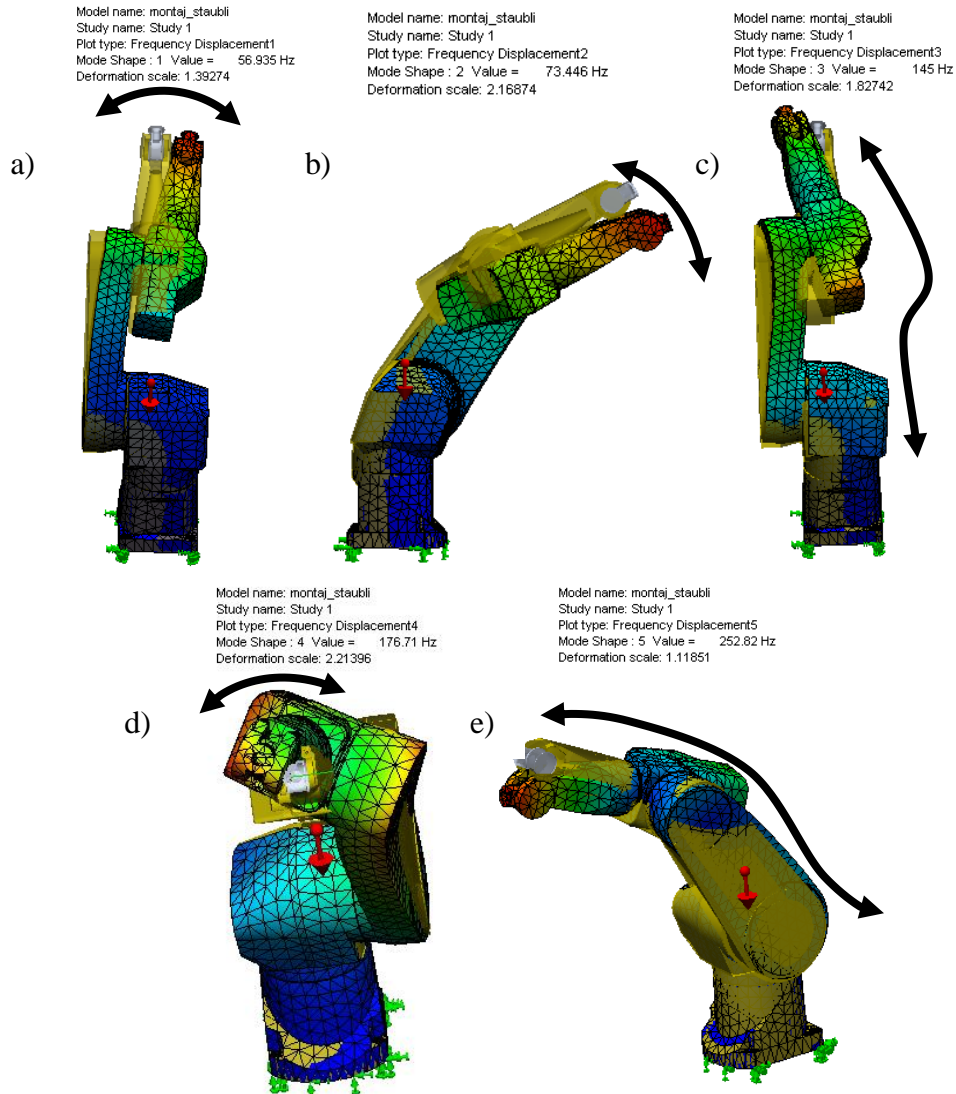
Şekil 3.7'deki yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılmasına bakılırsa çökme değerlerinin lineer olarak içten dışa doğru arttığı görülebilir. Burada en büyük değer olan 0.16 mm robot 50 kg yük taşırken çalışma uzayının en dış noktasında meydana gelmektedir.

Şekil 3.11 de gerilme değerlerinin yüksüz durumda 40. ve 91. noktalar arasında azaldığı, buna karşılık yüklü durumda aynı noktalar arasında artmakta olduğu gözlenmektedir. 50 kg ağırlık taşımakta olan endüstriyel robot 2 MPa gibi çok az gerilme değerine maruz kalmıştır. Bu da robotun ne kadar mukavemetli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

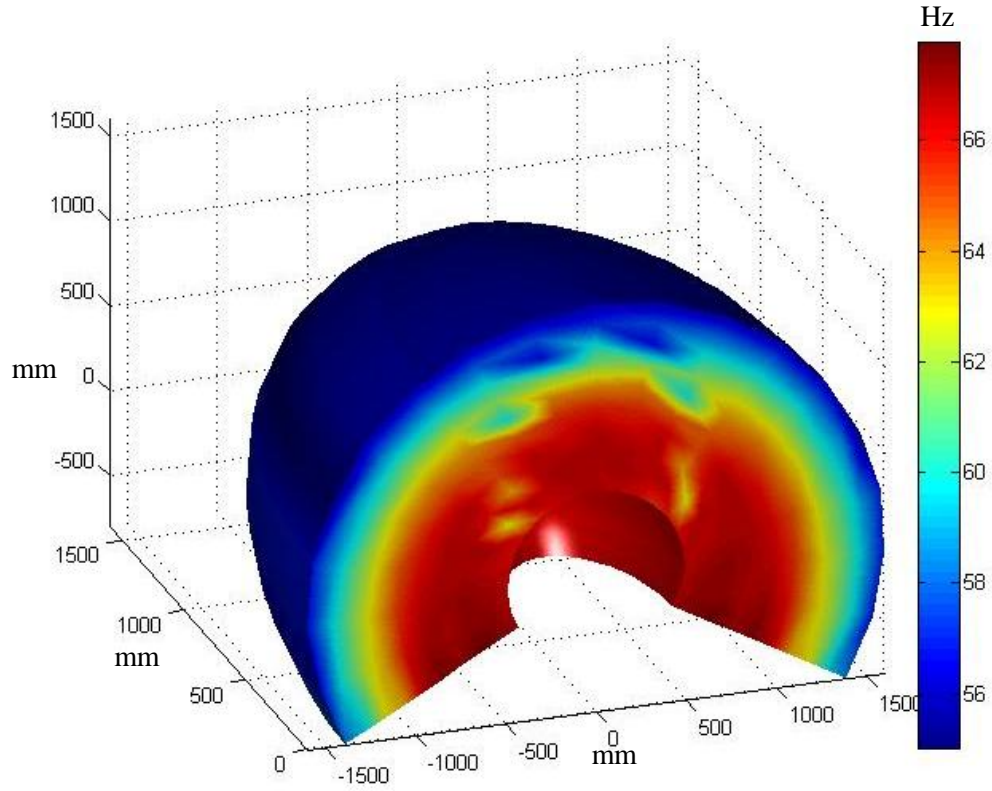
3.3 Doğal Frekans Analizi

Robotun doğal frekansı, manipülatörün rijitliği hakkında bilgi verir. Robotun konumu değiştikçe doğal frekansı da değişir. Kalkışta ve duruşta etki eden titreşimler, özellikle yüksek hızlı duruşlarda robotun çalışmasını etki eder. Pozitif ve negatif ivmelenmelerde,

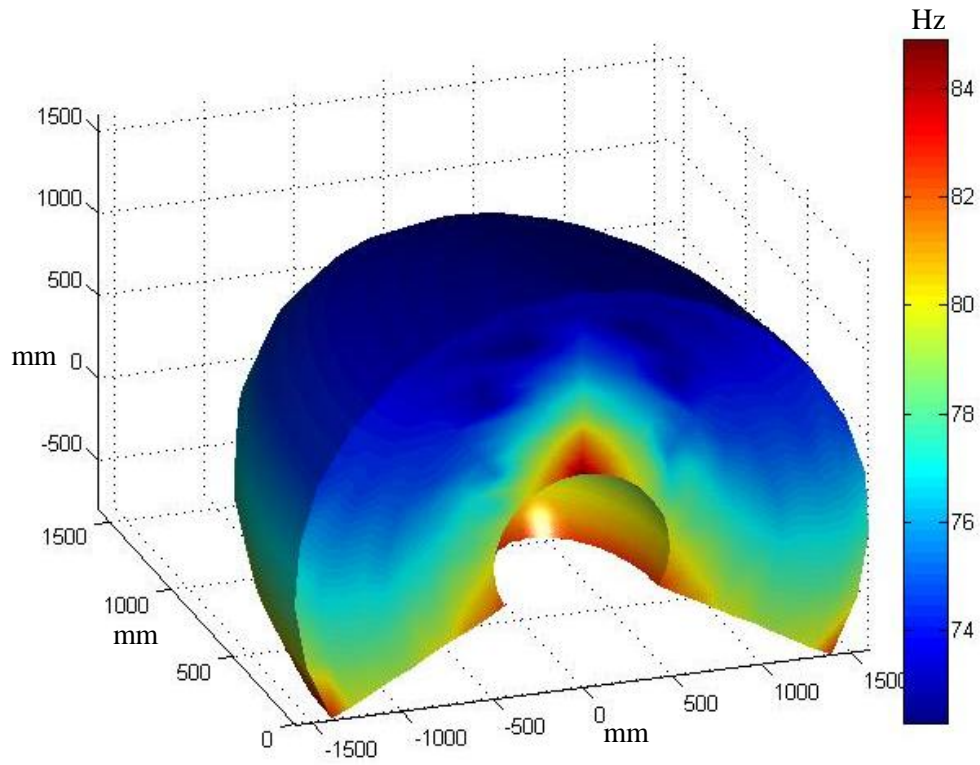
robot kontrolcüsü doğal frekansı göz önünde bulundurarak titreşimleri en düşük seviyede tutar. Bu konu özellikle hafif ağırlıklı robotlarda önem kazanır. Şekil 3.12 de robotun beş değişik şekildeki titreşim modu görülmektedir. RX-170B robotunun birinci doğal frekans uzayı Şekil 3.13 de, ikinci doğal frekans uzayı Şekil 3.14 de, üçüncü doğal frekans uzayı Şekil 3.15 de, dördüncü doğal frekans uzayı Şekil 3.16 da, beşinci doğal frekans uzayı Şekil 3.17 de gösterilmiştir. Çalışma uzayı kesiti üzerindeki konumlara bağlı olarak, beş frekans modunun karşılaştırılması Şekil 3.18 de verilmiştir.



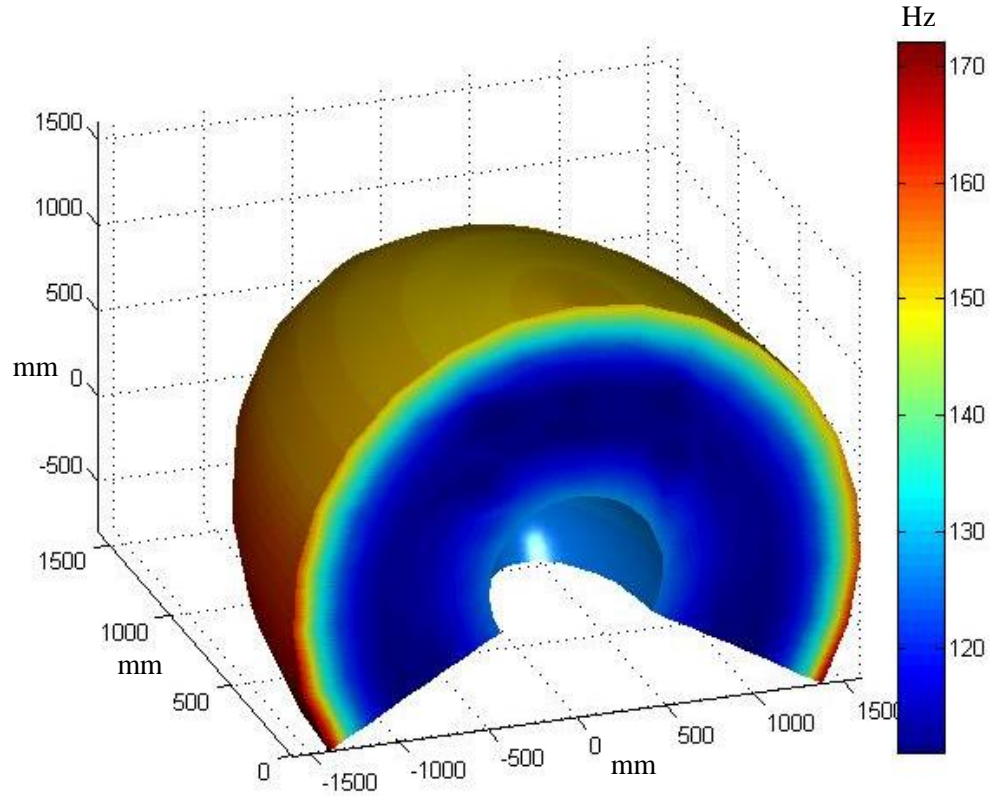
Şekil 3.12 Endüstriyel Robotun beş ayrı doğal titreşim modu. a) birinci mod, b) ikinci mod, c) üçüncü mod, d)dördüncü mod, e) beşinci mod .



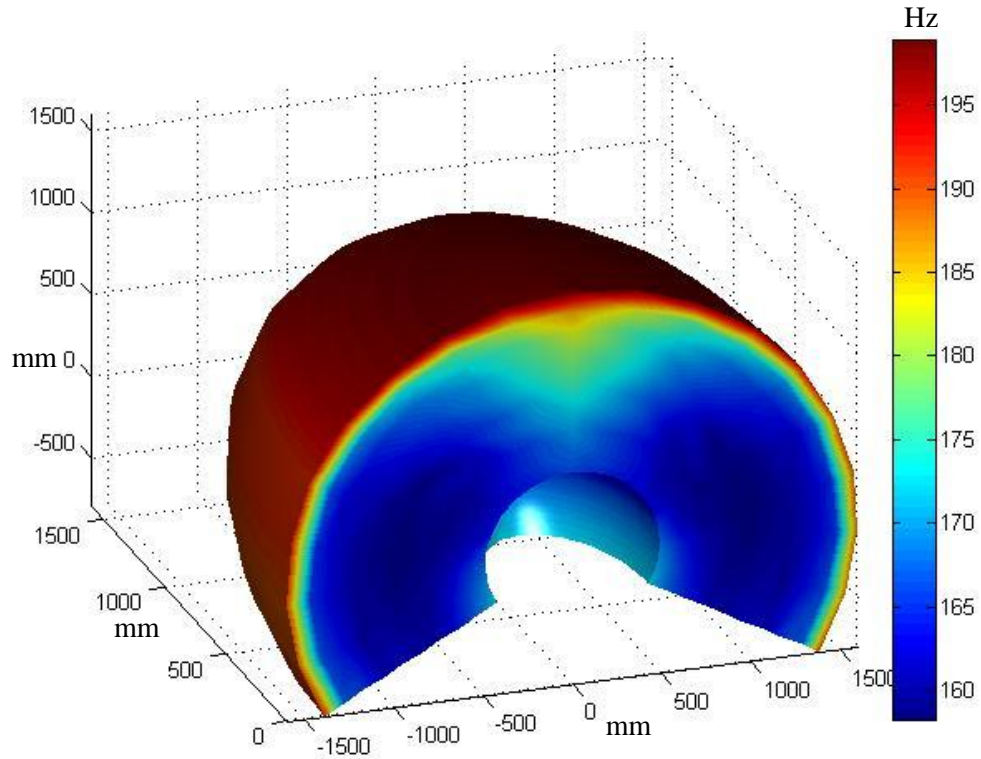
Şekil 3.13 Birinci mod doğal frekans çalışma uzayı.



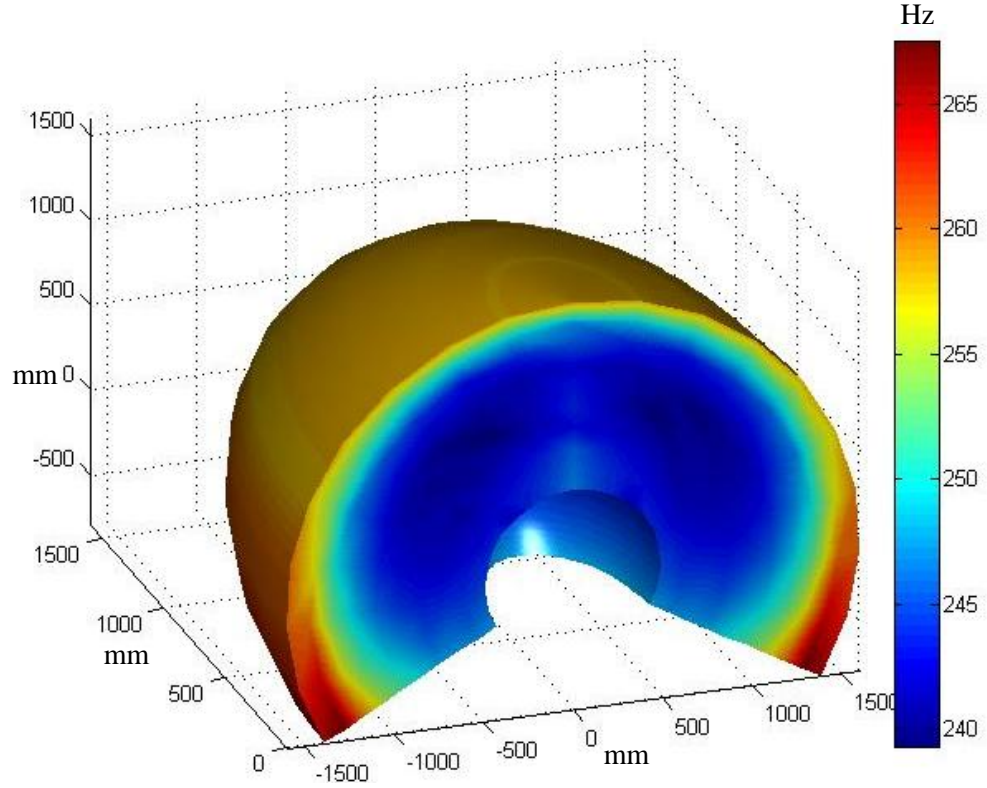
Şekil 3.14 İkinci mod doğal frekans çalışma uzayı.



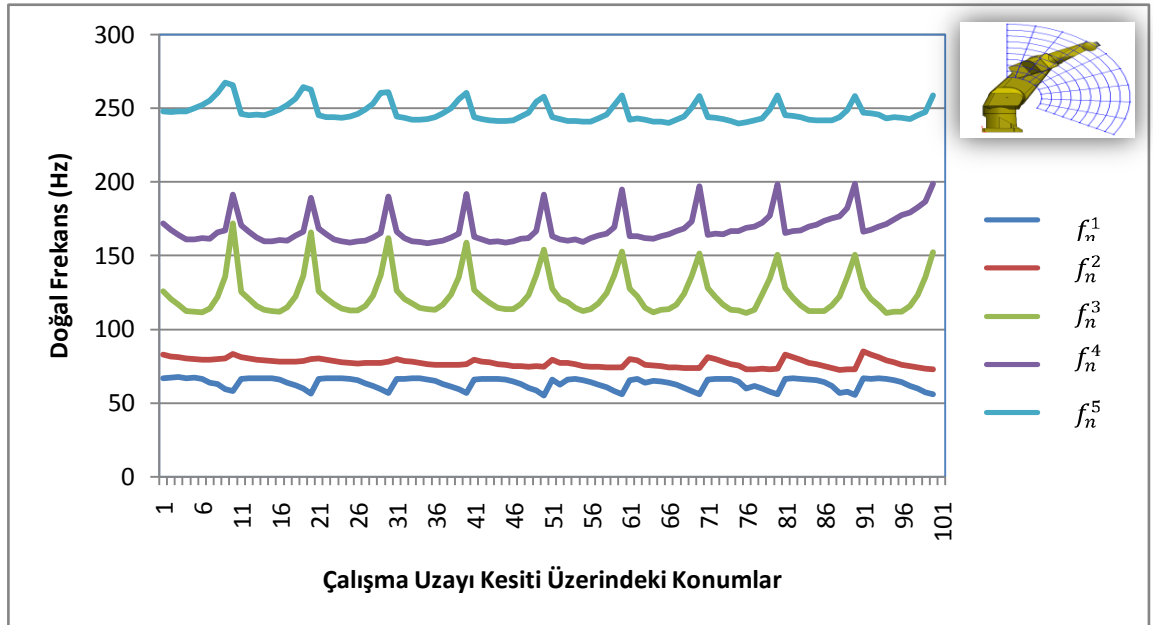
Şekil 3.15 Üçüncü mod doğal frekans çalışma uzayı.



Şekil 3.16 Dördüncü mod doğal frekans çalışma uzayı.



Şekil 3.17 Beşinci mod doğal frekans çalışma uzayı.

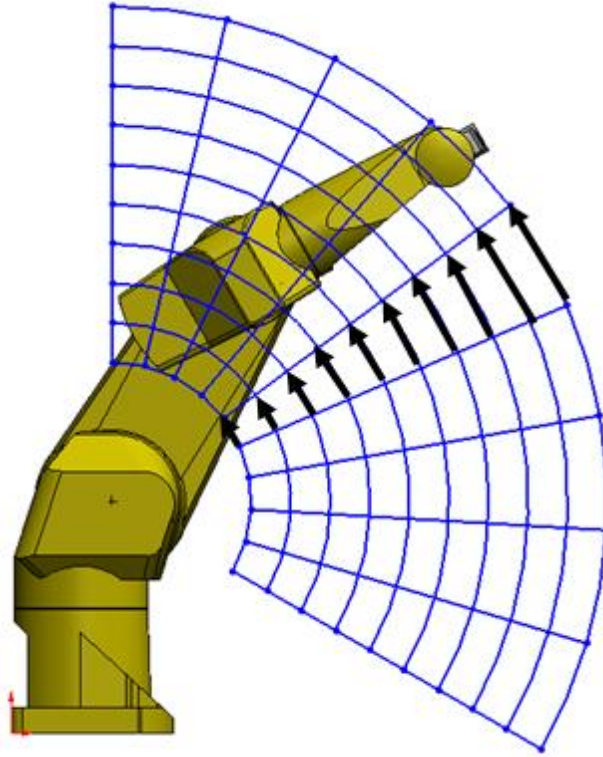


Şekil 3.18 Doğal frekansların karşılaştırılması.

Robotun doğal frekansı direngenliğiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Robot çalışma uzayının içerilerine doğru ilerledikçe doğal frekansı artmaktadır ve dışına doğru ilerledikçe azalmaktadır. Doğal frekans analizlerinde en küçük değerli titreşime bakılır, bu manipülatörde en küçük değer olan 53 Hz robotun birinci doğal frekans modunda bulunmuştur.

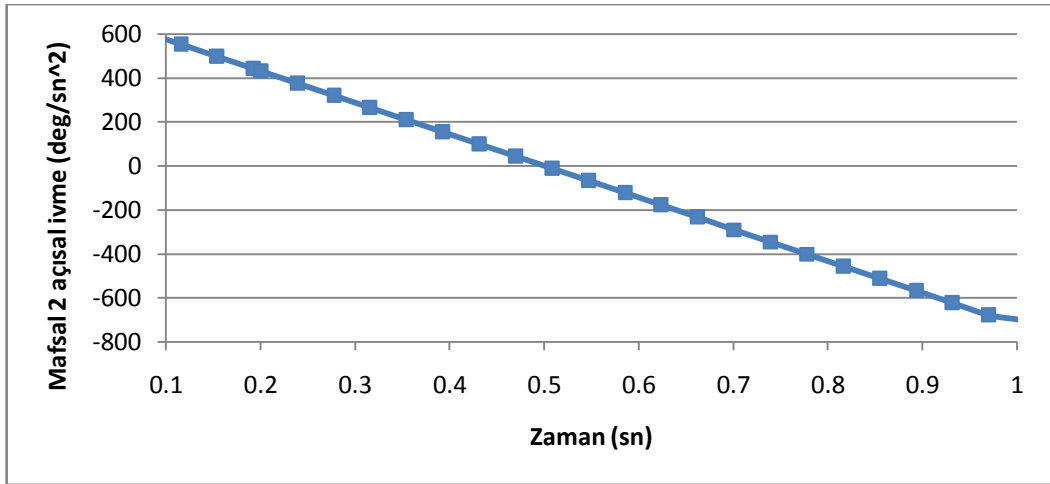
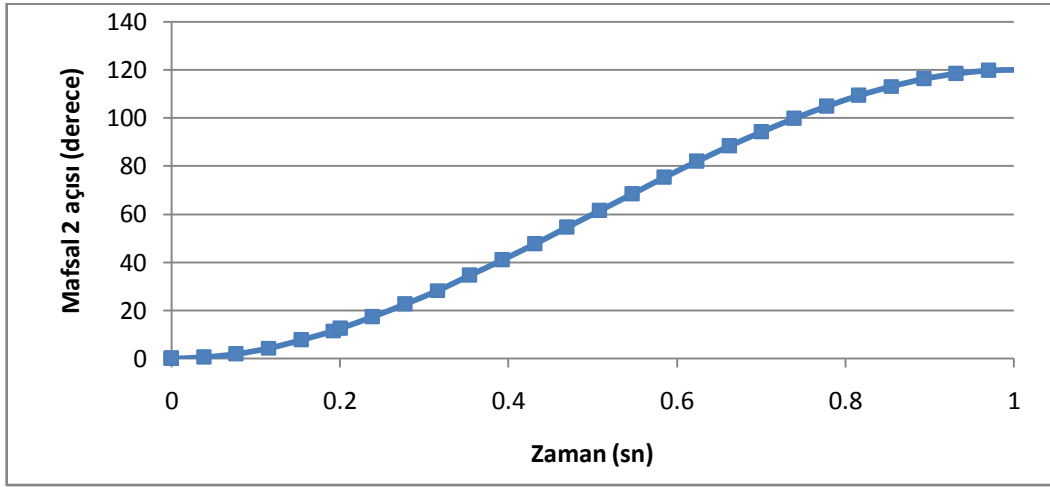
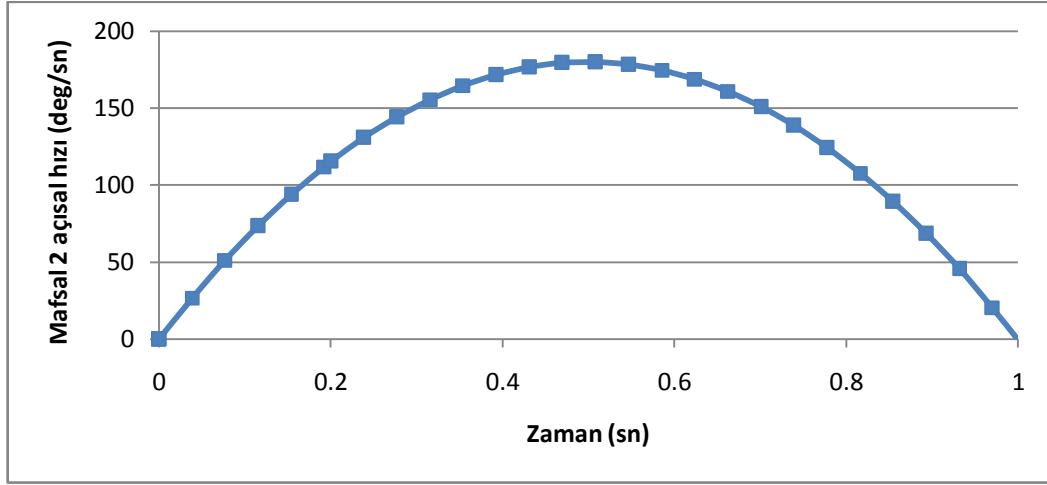
3.4 Tork Analizi

Tork analizinde robot manipülatöründeki ikinci ve üçüncü mafsallardaki torklar ele alınmıştır. Analizler Solidworks programının eklentisi olan Motion Analysis de yapılmıştır ve daha sonra MATLAB'a aktarılıp grafikleri çıkarılmıştır. Robot manipülatörü Şekil 3.19 da görüldüğü gibi çalışma uzayı kesitindeki on adet yay doğrultusunda hareket etmektedir. Bu hareketlerin tek bir yaydaki süresi sırasıyla bir, üç ve beş saniye olarak alınmıştır. Robot manipülatörünün en dış yörüngeyi bir ve beş saniye süresinde kat etmesi durumu için mafsal ikiye ait yer değiştirme, hız ve ivme değerleri Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 de verilmiştir. Robot manipülatörünün 2.mafsalında bir saniye için elde edilen torklar yüksüz durumda Şekil 3.22 de, 30 kg yüklü durumda Şekil 3.23 de gösterilmiştir. Robot manipülatörünün 2.mafsalında üç saniye için elde edilen torklar yüksüz durumda Şekil 3.24 de, 30 kg yüklü durumda Şekil 3.25 de gösterilmiştir. Robot manipülatörünün 2.mafsalında beş saniye için elde edilen torklar yüksüz durumda Şekil 3.26 da, 30 kg yüklü durumda Şekil 3.27 de gösterilmiştir. Şekil 3.28, Şekil 3.30 ve Şekil 3.32 da ise sırasıyla 3.mafsal için yüksüz durumda bir, üç, beş saniye için tork değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.29, Şekil 3.31 ve Şekil 3.33 da ise sırasıyla 3.mafsal için yüksüz durumda bir, üç, beş saniye için tork değerleri gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi yüklü ve yüksüz durumda mafsal iki ve mafsal üç için ihtiyaç duyulan tork değerleri hıza bağlı olarak değişim göstermektedir.

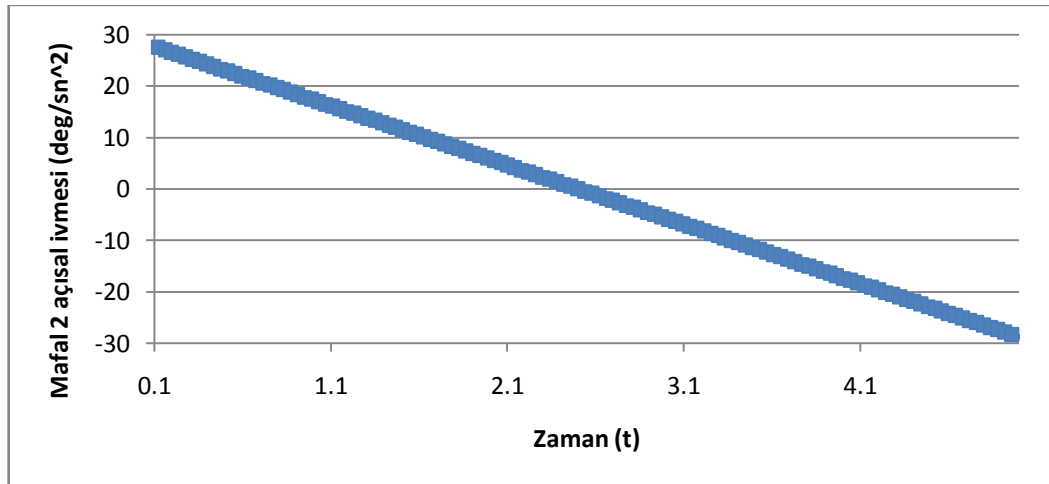
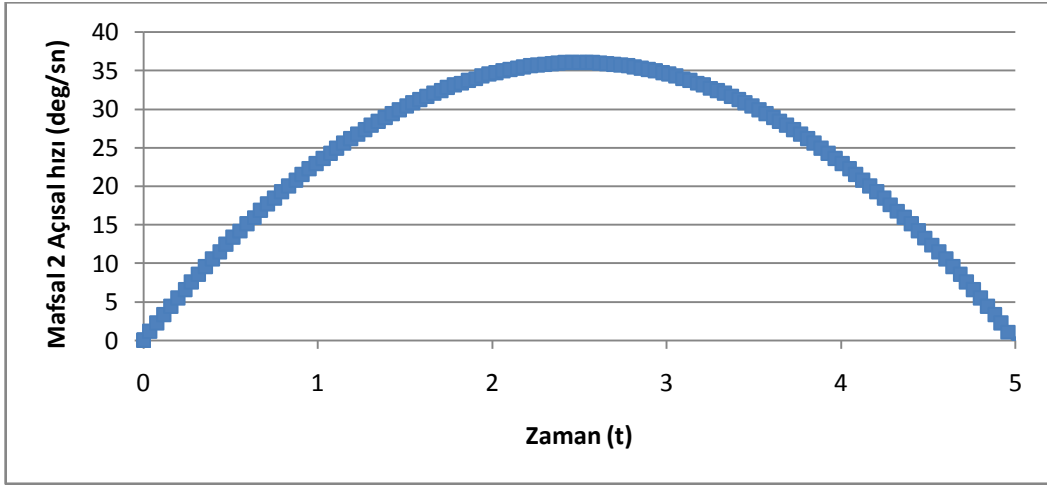
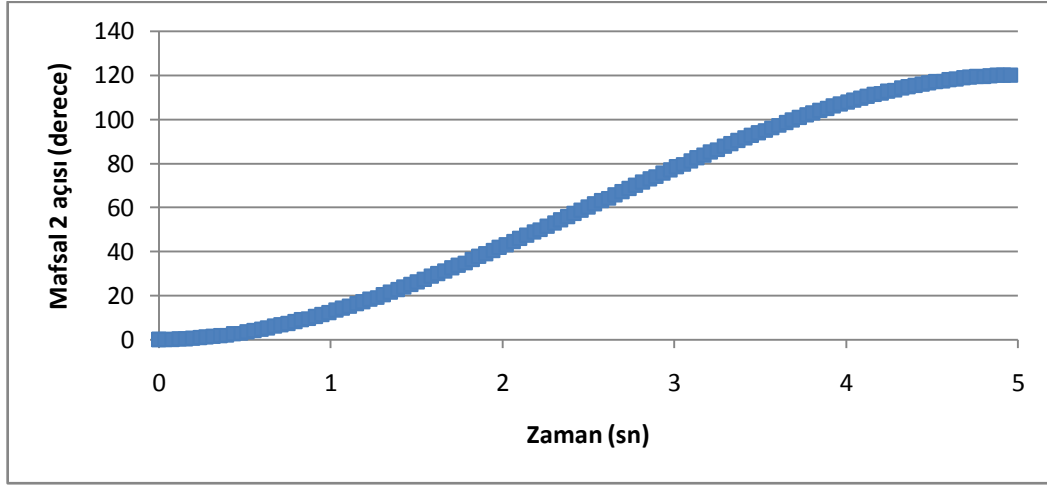


Şekil 3.19 Çalışma uzayı kesiti içinde tork analizi yapılan yaylar.

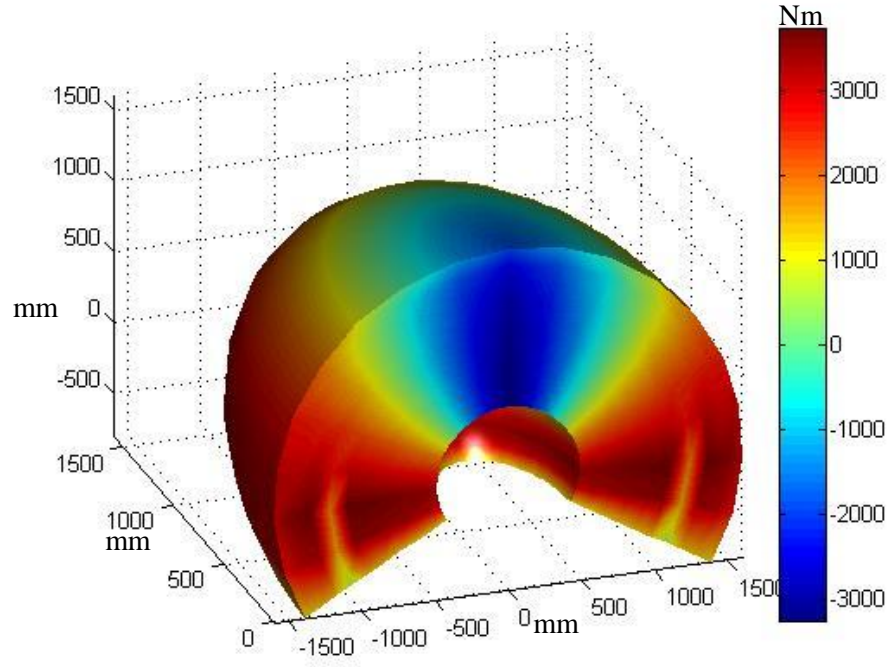
Robot manipülatörünün en dış yayı bir saniyede izlemesi için gerekli açısal yer değiştirme, açısal hız ve açısal ivme grafikleri Şekil 3.20 de verilmiştir. Bu grafiklere dayanarak robot manipülatörünün hareket yönünde 180 °/s'lik en yüksek açısal hıza ve 728 °/s²'lik açısal ivmeye ulaştığı görülmektedir. Şekil 3.21 de ise robotun en dış yayı beş saniyede aldığı açısal yer değiştirme, açısal hız ve açısal ivme değerleri gösterilmiştir. Robotun beş saniyede yayı taramasından elde edilen en büyük açısal hız hareket yönünde 36 °/s ve en büyük ivme 29 °/s² bulunmuştur.



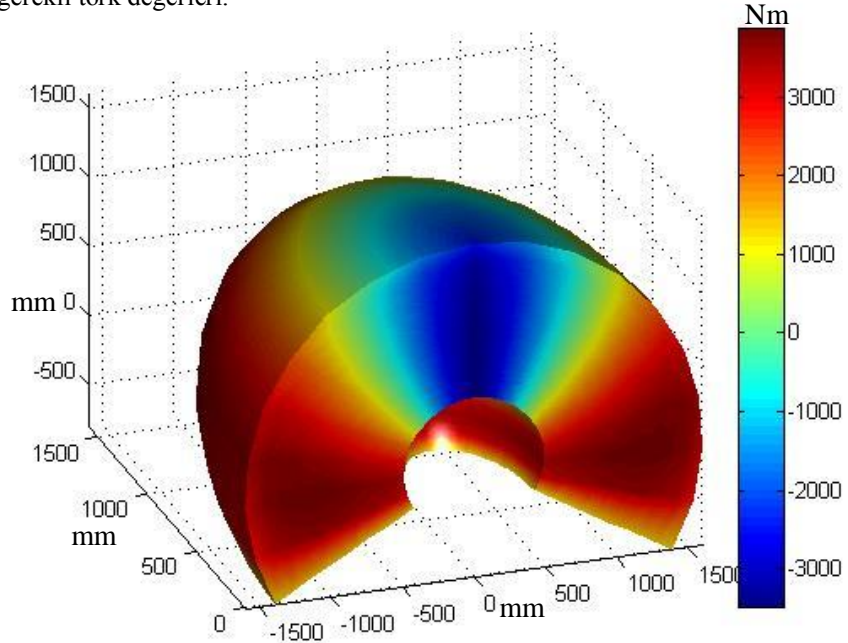
Şekil 3.20 Robotun en dış yayı bir saniyede taraması durumunda ikinci mafsalın zamana göre konum, hız ve ivme grafikleri.



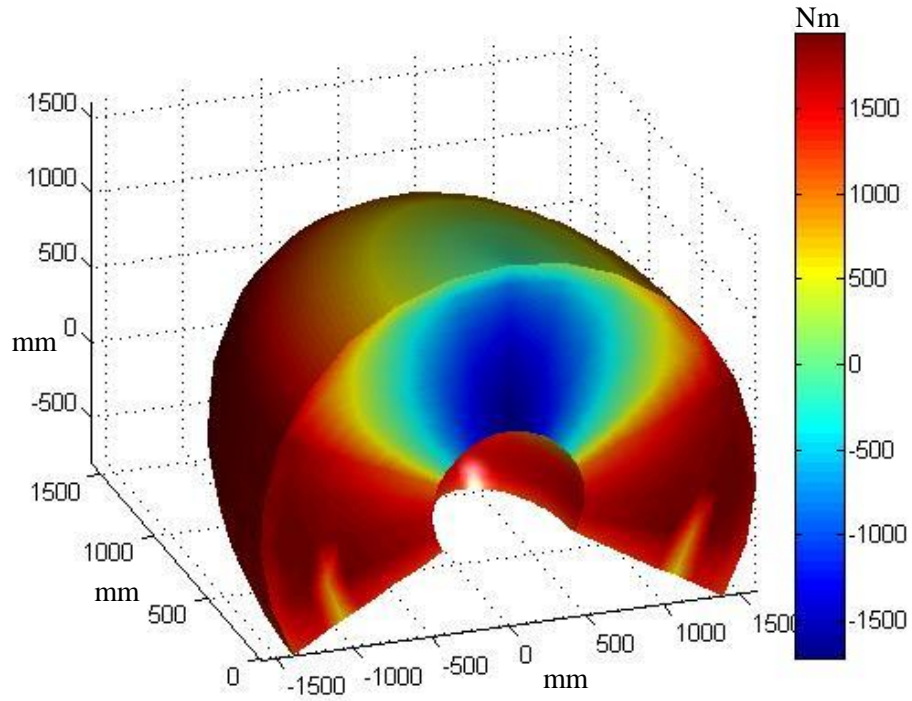
Şekil 3.21 Robotun en dış yayı beş saniyede taraması durumunda ikinci mafsaliın zamana göre konum, hız ve ivme grafikleri.



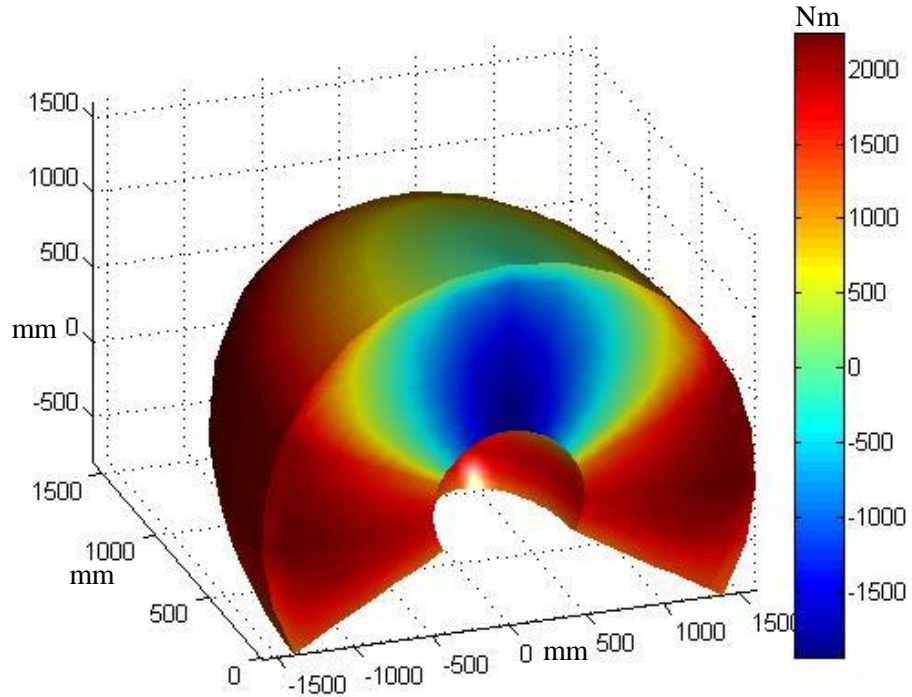
Şekil 3.22 İkinci mafsalsın yüksüz durumda bir yayı bir saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



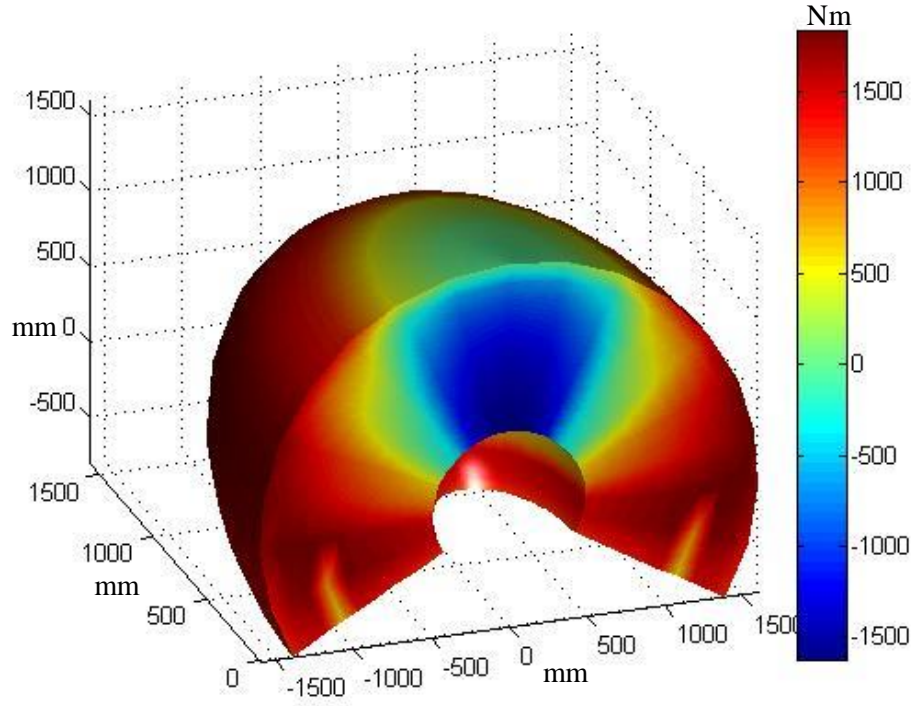
Şekil 3.23 İkinci mafsalsın 30 kg yüklü durumda bir yayı bir saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



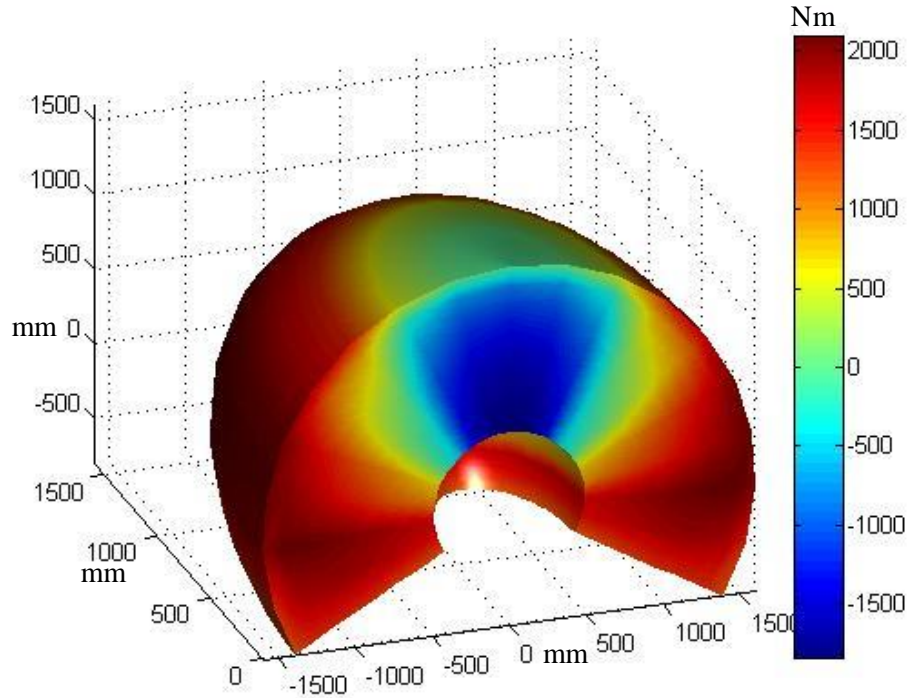
Şekil 3.24 İkinci mafsalmın yüksüz durumda bir yayı üç saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



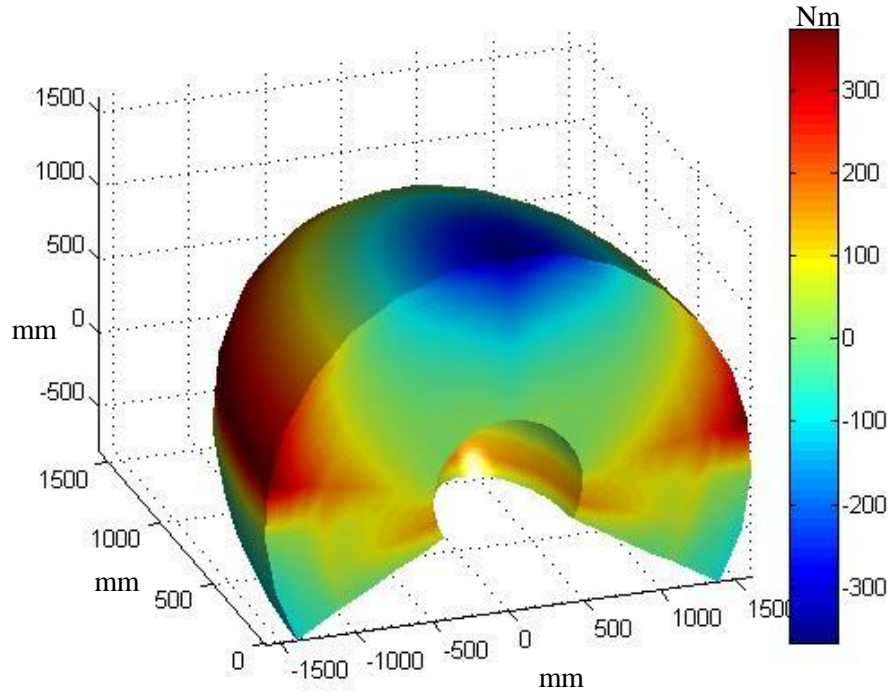
Şekil 3.25 İkinci mafsalmın 30 kg yüklü durumda bir yayı üç saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



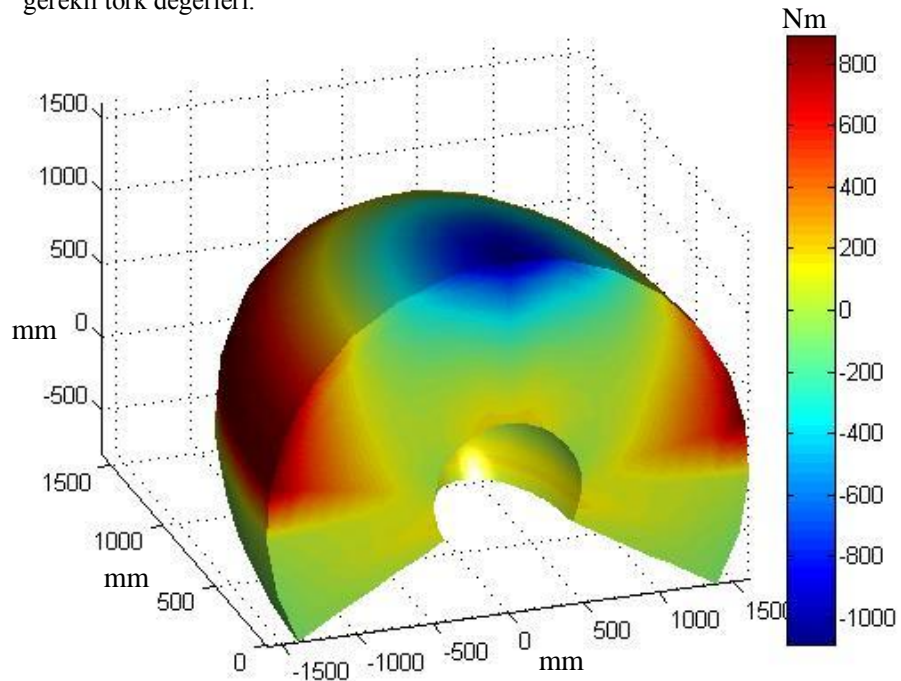
Şekil 3.26 İkinci mafsalsın yüksüz durumda bir yayı beş saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



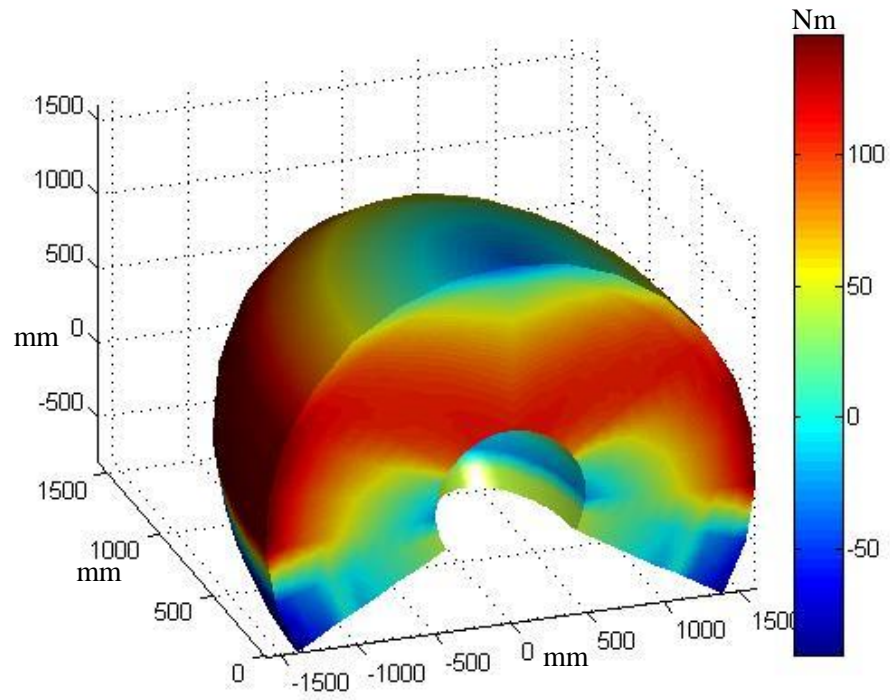
Şekil 3.27 İkinci mafsalsın 30 kg yüklü durumda bir yayı beş saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



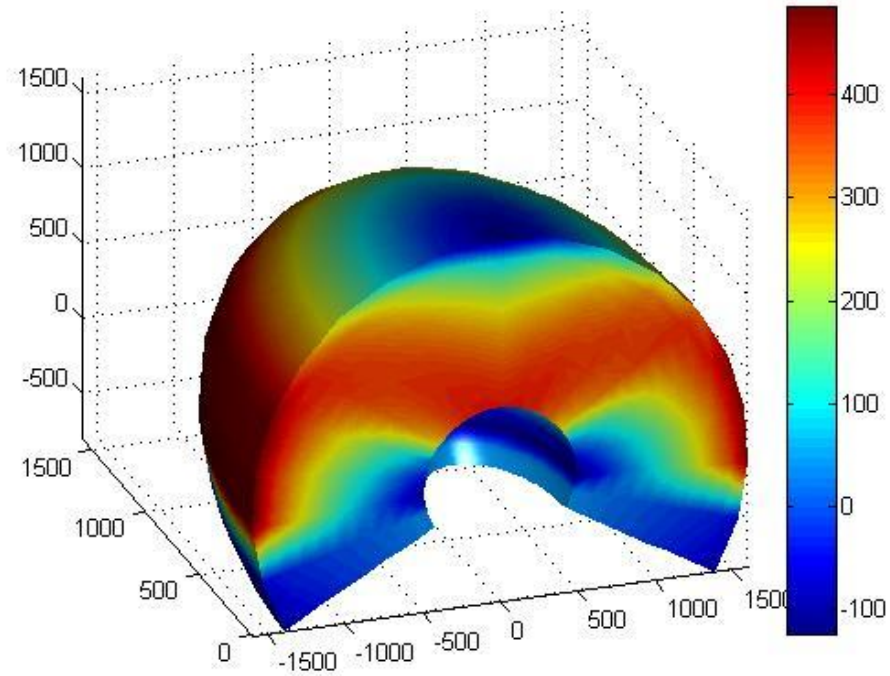
Şekil 3.28 Üçüncü mafsalsın yüksüz durumda bir yayı bir saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



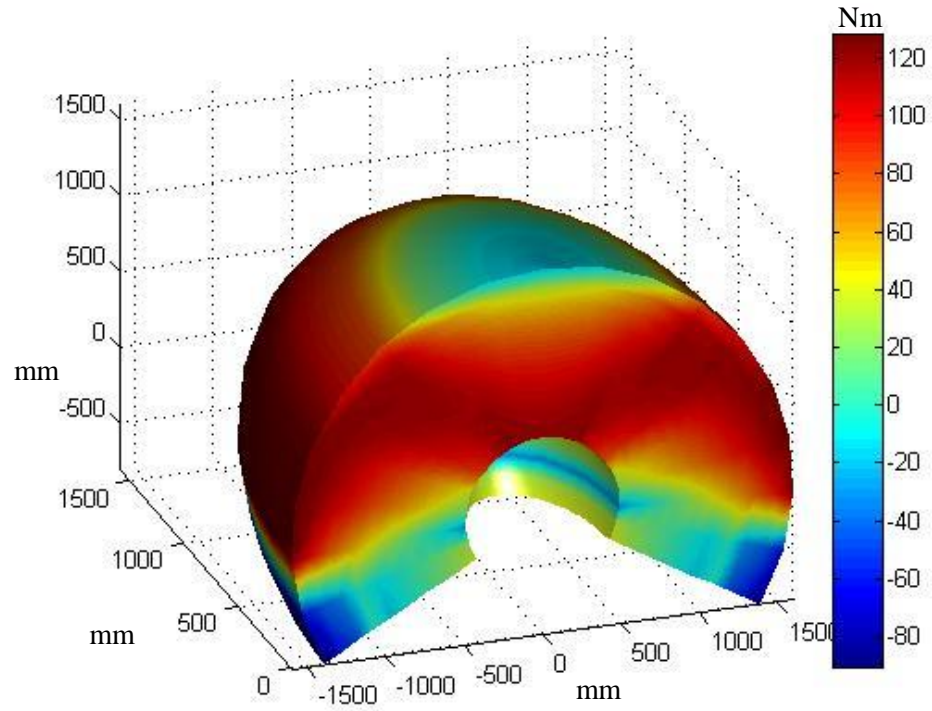
Şekil 3.29 Üçüncü mafsalsın 30 kg yüklü durumda bir yayı bir saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



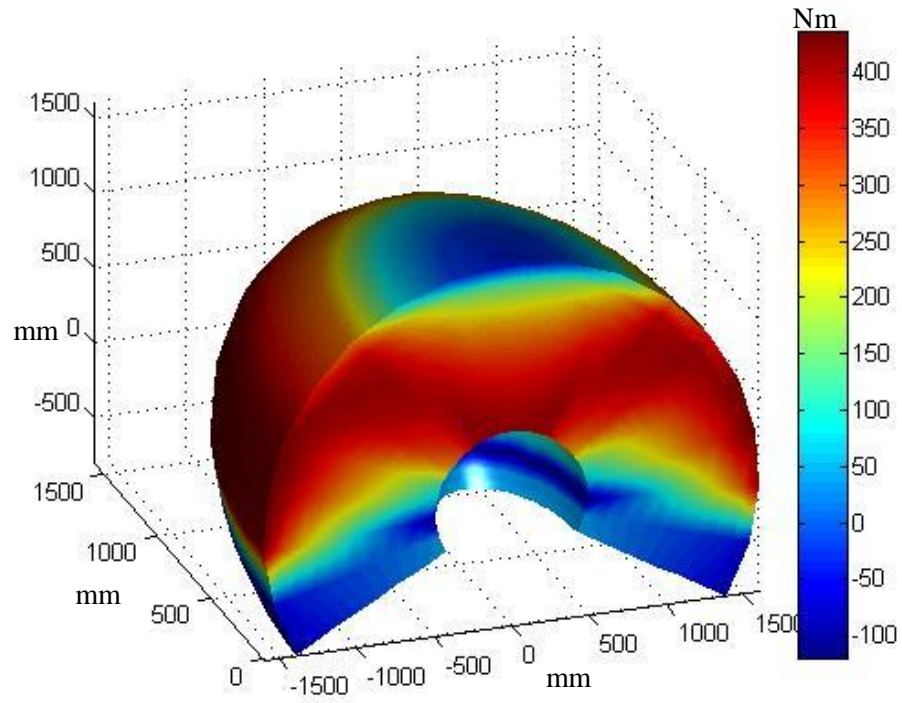
Şekil 3.30 Üçüncü mafsalsın yüksüz durumda bir yayı üç saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



Şekil 3.31 Üçüncü mafsalsın 30 kg yüklü durumda bir yayı üç saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



Şekil 3.32 Üçüncü mafsalsın yüksüz durumda bir yayı beş saniyede taraması için gerekli tork değerleri.



Şekil 3.33 Üçüncü mafsalsın 30 kg yüklü durumda bir yayı beş saniyede taraması için gerekli tork değerleri.

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüz endüstriyel uygulamalarında gereksinim duyulan yüksek hız, hassasiyet, tekrarlanabilirlik ve düşük enerji sarfiyatı gibi temel unsurlar robot manipülatörlerinin tasarımlarında dikkate alınması ve sağlanması gerekli temel koşullardandır. Karmaşık geometrilere ve yüksek çalışma hızlarına sahip bu sistemlerin istenilen performans değerlerini sağlamaları klasik tasarım yöntemleri ile erişilmesi güç bir hedeftir. Bu güçlüğü gidermek ve beklentileri sağlayacak en uygun manipülatör tasarımını gerçekleştirmek için, gelişen bilgisayar ve yazılım teknolojisi ile her geçen gün daha da kullanışlı hale gelen Bilgisayar Destekli Mühendislik (BDM) araçlarından yararlanmak kaçınılmazdır. Bu yaklaşım gerek basit bir işlevi yerine getirmek için tasarlanacak sınırlı serbestlik dereceli bir manipülatör için, gerekse yüksek çalışma hızlarına sahip çok serbestlik dereceli endüstriyel bir robotun tasarımı sürecinde de takip edilmelidir.

Bu çalışmada, endüstriyel bir robotun çalışma uzayı içerisindeki farklı konumları ve farklı çalışma yükleri için uç nokta yer değiştirme değerleri ile manipülatör üzerinde oluşan en büyük eşdeğer gerilme değerleri sonlu elemanlar yöntemi kullanan ticari bir yazılım ile sayısal olarak elde edilmiş ve sonuçlar çalışma uzayı içerisinde gösterilmiştir. Robot manipülatörleri çalışma uzayı içerisindeki farklı konumlara erişmeleri sırasında, uzuvların farklılaşan geometrik konumları dolayısı ile değişen direngenliklere sahiptirler. Direngenlik değişimindeki bu farklılıklar manipülatörün çalışma uzayı içerisindeki uç nokta konumlandırma hassasiyetlerinde de farklılıklar oluşturmaktadır ve bu durum manipülatöre ait uzuvları hareketlendiren eyleyicilerin konumlandırma kontrolünde dikkate alınmalıdır. Bu çalışma ile sayısal olarak elde edilen ve uç nokta yer değiştirme değerlerinin çalışma uzayı içerisindeki dağılımlarına ait sonuçlar, robota ait eyleyici kalibrasyonları sırasında kullanılacak referans veri dosyalarını oluşturma amacıyla kullanılabilir niteliktedir. Robot uç nokta yer değiştirmelerinin yanı sıra,

manipülâtörün çalışma uzayı içerisindeki değişen direngenliklerini incelemek amacı ile doğal frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Ele alınan seri tip endüstriyel robot manipülâtörüne ait ilk beş doğal frekans, manipülâtörün çalışma uzayı içerisindeki farklı konumları için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve doğal frekans değişimleri üç boyutlu olarak gösterilmiştir. Ek olarak, ele alınan robot manipülâtörüne ait eyleyici moment ihtiyaçları, manipülâtör uç noktası için tanımlanan farklı yörüngelerin farklı hızlarda takip edilmesi durumu için hesaplanmış ve manipülâtörün çalışma uzayı içerisinde üç boyutlu grafikler ile gösterilmiştir.

Bu çalışmada yapılan sayısal analizler tek bir endüstriyel robot manipülâtörü için gerçekleştirilmiş olup farklı manipülâtörler veya aynı manipülâtörün farklı tasarımları için karşılaştırma amaçlı olarak tekrarlanmamıştır. Ayrıca sayısal analizler gerçekleştirilir iken, ele alınan robot manipülâtörüne ait mafsallar rijit olarak kabul edilmiş ve herhangi bir esneklik tanımlaması yapılmamıştır. Bu çalışmada izlenen yöntem, yeni tasarlanacak bir robot manipülâtörünün, çalışma uzayı içerisinde istenilen yapısal direngenliklere sahip olması sureti ile hedeflenen uç nokta yer değiştirme ve doğal frekans değerlerine ulaşılması amacıyla kullanılabilir. Bu çalışmalar sırasında, gerçek modellerde mevcut olan mafsal esneklikleri de dikkate alınarak, tasarım aşamasında yapılan analizler ile edilen sayısal sonuçların iyileştirilmesi ve daha hassas tasarımların elde edilmesi mümkün olabilir. Ayrıca sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen sayısal sonuçların geçerliliği gerçek robot manipülâtörleri üzerinde yapılacak deneysel çalışmalardan elde edilecek sonuçlar ile sorgulanabilir.

KAYNAKLAR

- Abderrahim, M. ve Whittaker, A.R. (2000). Kinematic model identification of industrial manipulators. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 16, 1-8.
- Albu-Schaffer, A., Haddadin, S., Ott, C., Stemmer, A., Wimböck, T. ve Hirzinger, G. (2007). The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments. *Industrial Robot*, 34 (5), 376-385.
- Alici, G. ve Shirinzadeh, B. (2005). A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing. *Mechanism and Machine Theory*, 40, 879-906.
- Akdağ M. ve Kırıl Z. (2007). *Dynamic Stress Analysis of a Robot Manipulator for Different End Point Trajectories. Ifac Workshop Technology Transfer in Developing Countries: Automation in Infrastructure Creation – TT*
- Akdağ M. (2008) Design and Analysis of Robot Manipulators by Integrated CAE Procedures. 10 Haziran 2009, http://www.fbe.deu.edu.tr/ALL_FILES/Tez_Arsivi/2008/DR_t544.pdf
- Bergan, P.B., Horrigmoe, G., Krakeland, B. ve Soreide, T.H. (1978). Solution techniques for non-linear finite element problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 12, 1677–1696.
- Bhatia, P., Thirunarayanan, J. ve Dave, N. (1998). An expert system-based design of SCARA robot. *Expert Systems with Applications* 15, 99-109
- Chin, J.-H. ve Lin, S.-T. (1997). The path precompensation method for flexible arm robot. *Robotics ve Computer Integrated Manufacturing*, 13 (3), 203-215.

- Clark, S. ve Lin, Y.J. (2007). CAD tools integration for robot kinematics design assurance with case studies on PUMA robots. *Industrial Robot*, 34 (3), 240-248.
- Craig, J.J. (1986). *Introduction to robotics mechanics & control*. (1th ed.). United States of America: Addison-Wesley.
- Drouet, P., Dubowsky, S. ve Mavroidis, C. (1998). Compensation of geometric and elastic deflection errors in large manipulators based on experimental measurements: application to a high accuracy medical manipulator. *6th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Austria*.
- Dwivedy, S.K. ve Eberhard, P. (2006). Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review. *Mechanism and Machine Theory*, 41, 749-777.
- Hibbitt, H.D. ve Karlsson, B.I. (1979). Analysis of pipe whip. *EPRI, Report NP, 1208*.
- Jang, J.H., Kim, S.H. ve Kwak, Y.K. (2001). Calibration of geometric and nongeometric errors of an industrial robot. *Robotica*, 19, 311-321.
- Karagülle, H. ve Malgaca, L. (2004). Analysis of end point vibrations of a two-link manipulator by integrated CAD/CAE procedures. *Finite Elements in Analysis and Design*, 40, 2049-2061.
- Lee, E. ve Mavroidis, C. (2004). Geometric design of spatial PRR manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 39, 395-408.
- Lucchetta, G., Bariani, P.F. ve Knight, W.A. (2005). Integrated design analysis for product simplification. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54 (1), 147-150.

- Mir-Nasiri, N. (2004). Design, modelling and control of four-axis parallel robotic arm for assembly operations. *Assembly Automation*, 24 (4), 365-369.
- Morozov, A. ve Angeles, J. (2007). The mechanical design of a novel Schönfliesmotion generator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23, 82-93.
- Mrozek, Z. (2003). Computer aided design of mechatronic systems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 13 (2), 255-267.
- Myung, S. ve Han, S. (2001). Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method. *Expert Systems with Applications*, 21, 99-107.
- N-Nagy, F. ve Siegler, A. (1987). *Engineering foundations of robotics*. (1th ed.). UK: Prentice-Hall.
- O'Halloran, O., Wolf, A. ve Choset, H. (2005). Design of a high-impact survivable robot. *Mechanism and Machine Theory*, 40, 1345-1366.
- Ouyang, P.R., Li, Q. ve Zhang, W.J. (2003). Integrated design of robotic mechanisms for force balancing and trajectory tracking. *Mechatronics*, 13, 887-905.
- Park, K., Kim, Y.S., Kim, C.S. ve Park, H.J. (2007). Integrated application of CAD/CAM/CAE and RP for rapid development of a humanoid biped robot. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 609-613
- Shirinzadeh, B., Teoh, P. L., Foong, C. W. ve Liu, Y.D. (1999). A strategy for accurate guidance of a manipulator using laser interferometry-based sensing technique. *Sensor Review*, 19 (4), 292-299.

Sun, D. ve Mills, J.K. (1999). High-accuracy trajectory tracking of industrial robot manipulator using adaptive-learning scheme. *Proceedings of the American Control Conference, California, 1935-1939.*

STAUBLI (2004) Arm - RX series 170B family. Instruction manual.

Thomson, C. C. (1984). Robot modelling-the tools needed for optimal design and utilization. *Computer-Aided Design, 16(6), 335-337.*

Tsai, L. W. (1999). *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators* (1. Baskı). NY: John Wiley & Sons, Inc.

Vukobratovic, M., Potkonjak, V., Inoue, K. ve Takano, M. (2002). Actuators and computer-aided design of robots. Nwokah, O.D.I.(Ed.). *Mechanical systems design handbook (523-556)* CRC Press.

EKLER

SolidWorks Programında Kullanılarak Robotun Çalışma Uzayı Kesitinden Yüz Adet Nokta Tanımlayan MATLAB Programı

```

clc;
clear;
%%%%% Robot Manipulatörü %%%%

L1=850; %L1'in boyu (mm)
L2=750; %L2'nin boyu (mm)

r=linspace(490,1600,10);
[m,a]=size(r);

phi=linspace(-30*pi/180,pi/2,10);

phiy=sin(phi);phix=cos(phi);

for b=1:a;

Xe=r(b)*phix;
Ye=r(b)*phiy;

    [c,d]=size(Xe);

    for e=1:d;
%Ters kinematik....
k=0;
k=k+1;
    hat=[0.0000001;0000001];

teta_ilk=[29;329];
Ee=[0;0];
for n=1:10000;
    e1=Ee(1);
    e2=Ee(2);
    teta_ilk=[teta_ilk(1)+e1;teta_ilk(2)+e2];
    J=[-L1*sin(1/180*teta_ilk(1)*pi) -L2*sin(1/180*teta_ilk(2)*pi);
        L1*cos(1/180*teta_ilk(1)*pi) L2*cos(1/180*teta_ilk(2)*pi)];

f=[-(L1*cos(teta_ilk(1)*pi/180)+L2*cos(teta_ilk(2)*pi/180)-Xe(e));
    -(L1*sin(teta_ilk(1)*pi/180)+L2*sin(teta_ilk(2)*pi/180)-Ye(e))];
Ee=inv(J)*f;

```

```

if abs(Ee(1))<=hat(1); abs(Ee(2))<=hat(2);
    if teta_ilk(2)>=359.999;
        teta_ilk(2)=abs(teta_ilk(2)-360);
    end
    if teta_ilk(2)<0;
        teta_ilk(2)=abs(360+teta_ilk(2));
    end
    if teta_ilk(1)<0;
        teta_ilk(1)=abs(360+teta_ilk(1));
    end
    teta1(b,e)=teta_ilk(1);
    teta2(b,e)=teta_ilk(2);

    break
else

end
end
end
Xek(e,:)=Xe;
Yek(e,:)=Ye;
end
    teta_1=reshape(teta1,100,1);
    teta_2=reshape(teta2,100,1);
    bir=ones(100,1);
    teta=[bir,teta_1,teta_2];

    csvwrite('teta.csv',teta,3,1);

```

SolidWorks'ten Alınan Verilerden Üç Boyutlu Çalışma Uzayı Çıkaran MATLAB Programı

```

clc;clear;

A=csvread('tork_30kg.csv',0,2);
L1=850;
L2=750;

teta1=A(1,:);
teta2=A(2,:);
freq1=A(3,)/1000;
freq2=A(4,)/1000;
freq3=A(5,)/1000;
freq4=A(6,)/1000;
freq5=A(7,)/1000;
freq6=A(8,)/1000;

Xe=L1*cos(teta1*pi/180)+L2*cos(teta2*pi/180);

```

```

Ye=L1*sin(teta1*pi/180)+L2*sin(teta2*pi/180);

phi=linspace(0,pi,50);

for i=1:50
    for j=1:100
[X,Y,Z]=pol2cart(phi(i),Xe(j),Ye(j));
B=[X,Y,Z];
C(j,1:3)=B;

        end
        C1=C(:,1);
        C2=C(:,2);
        C3=C(:,3);

        D1(1:100,i)=C1;
        D2(1:100,i)=C2;
        D3(1:100,i)=C3;
    end
freq1_y=repmat(freq6,50,1);
freq1_x=freq1_y';

%dis yüzey-----
XS=D1([10:10:90 100:-1:91 81:-10:1],:); %dis yüzey
YS=D2([10:10:90 100:-1:91 81:-10:1],:); %dis yüzey
ZS=D3([10:10:90 100:-1:91 81:-10:1],:); %dis yüzey
freq1_a=freq1_x([10:10:90 100:-1:91 81:-10:1],:);
%-----

%Kesit-----
F1=reshape(D1,10,500);
F2=reshape(D2,10,500);
F3=reshape(D3,10,500);
F4=reshape(freq1_x,10,500);

G1=F1(:, [1:10 500:-1:491]);
G2=zeros(10,20);
G3=F3(:, [1:10 500:-1:491]);
G4=F4(:, [1:10 500:-1:491]);
%-----

surf(G1,G2,G3,G4,'FaceColor','interp','EdgeColor','none','FaceLighting',
,'phong')

hold on

surf(XS,YS,ZS,freq1_a,'FaceColor','interp','EdgeColor','none','FaceLighting',
,'phong')
colorbar
axis tight
view(-19,30)
camlight headlight

```