

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR ROBOT KOLUNUN BİLGİSAYAR DESTEKLİ
KİNEMATİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. DEMET YILMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İML.
Tez Danışmanı : Yrd.Doç. Dr. MURAT ÖZSOY

Haziran 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR ROBOT KOLUNUN BİLGİSAYAR DESTEKLİ
KİNEMATİK ANALİZİ**

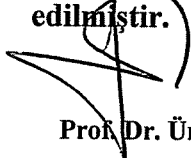
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. Demet YILMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

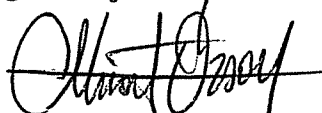
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE
İMALAT**

Bu tez 28/06/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



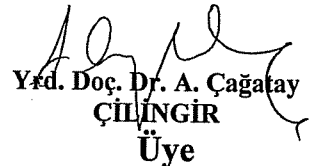
Prof. Dr. Ümit KOCABIÇAK

Jüri Başkanı



Yrd. Doç. Dr. Murat ÖZSOY

Üye



**Yrd. Doç. Dr. A. Çağatay
ÇİLİNGİR**

Üye

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlarken bana yardım eden danışman hocam Sn. Murat ÖZSOY' a, desteğini esirgemeyen eşim Gökhan YILMAZ' a ve sevgisi ile yanımda olan oğlum Alparslan YILMAZ' a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
2.1. Literatür Araştırması.....	1
2.1. Çalışmanın Amacı.....	3
BÖLÜM 2.	
ROBOT KOLU.....	5
2.1. Robot Tanımı	5
2.2. Robot Tarihçesi.....	9
BÖLÜM 3.	
KONUM VE YÖNELİM.....	11
3.1. Koordinat Sistemlerim Birbirine Göre Tanımlanması.....	13
3.2. Dönüşüm İşlemleri.....	14
3.2.1. Bileşik dönüşümler.....	14
3.2.2. Dönüşümün tersi.....	15
3.3. Sabit Eksen Takımına Göre Yönelim.....	15
3.4. Hareketli Eksen Takımına Göre Yönelim.....	16

BÖLÜM 4.	
ROBOT KOLU KİNEMATİK ANALİZİ.....	18
4.1. İleri Kinematik	18
4.2. Ters Kinematik	25
4.3. Robot Kolunun ADAMS® Programında Kinematik Analizi.....	30
4.4. Denklem Çözümü.....	37
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	40
5.1. Sonuçlar.....	40
5.2. Öneriler.....	44
KAYNAKLAR.....	45
EKLER.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	61

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Tipik bir robotun bölümleri.....	5
Şekil 2.2.	a) Kartezyen robot kolu.....	
	b) Silindirik robot kolu.....	
	c) Küresel robot kolu.....	6
	d) Antropomorfik robot kolu.....	
	e) Scara robot kolu.....	
Şekil 2.3.	Eklem çeşitleri.....	9
Şekil 3.1.	Uzayda bir noktanın konum vektörü ile gösterilmesi.....	11
Şekil 3.2.	Rijit bir cismin yönelimi.....	12
Şekil 3.3.	Koordinat sistemlerinin birbirine göre tanımlanması.....	13
Şekil 3.4.	Dönüşüm işlemleri.....	14
Şekil 3.5.	Sabit eksen takımlarına göre yönelim.....	15
Şekil 3.6.	Hareketli eksen takımlarına göre yönelim.....	16
Şekil 4.1.	4x4 Homojen transformasyon matrisinin şematik gösterimi	19
Şekil 4.2.	Eksen takımlarının uzuvlara tutturulması.....	20
Şekil 4.3.	İki eksen arası ilişkiyi belirleyen eklem parametreleri.....	20
Şekil 4.4.	Uzuv açıklığı ve eklem açısı.....	21
Şekil 4.5.	Uzuv dönüşümlerinde kullanılan ara eksen takımlarının yerleşimi	22
Şekil 4.6.	Üç dönel ekleme sahip düzlemsel robot kolu.....	23
Şekil 4.7.	Eksen takımlarının tutturulması.....	23
Şekil 4.8.	Düz ve ters kinematik analiz.....	25
Şekil 4.9.	Çalışma hacmi.....	26
Şekil 4.10.	Ters kinematikte birden fazla çözüm olma durumu.....	26
Şekil 4.11.	Ters kinematik çözümde kullanılan ara değişkenler.....	29
Şekil 4.12.	Robot kolu modeli.....	31

Şekil 4.13.	Genel nokta hareketi (General point motion).....	32
Şekil 4.14.	Genel nokta hareketi (General point motion).....	32
Şekil 4.15.	Fonksiyon ekleme.....	33
Şekil 4.16.	Hareket noktaları.....	34
Şekil 4.17.	Simülasyon kontrol.....	35
Şekil 4.18.	Ploting.....	35
Şekil 4.19.	Simülasyon ekranı.....	36
Şekil 4.20.	Load animation ve load plot.....	36
Şekil 4.21.	Grafik düzenleme ekranı.....	37
Şekil 4.22.	Robot kolu ölçüleri.....	38
Şekil 5.1.	X,Y,Z' deki hareket.....	40
Şekil 5.2.	'a', 'b', 'c' acılarının gösterimi.....	40
Şekil 5.3.	"a" açısının değişimi.....	41
Şekil 5.4.	"b" açısının değişimi.....	41
Şekil 5.5.	"c" açısının değişimi.....	41
Şekil 5.6.	'd' acısının gösterimi.....	42
Şekil 5.7.	"d" açısının değişimi.....	42

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Robot kollarının konfigürasyonlarının karşılaştırılması.....	8
Tablo 4.1	Denavit-Hartenberg parametreleri.....	24
Tablo 4.2	Denavit-Hartenberg parametre değerleri.....	38
Tablo 5.1	Konum ve açı değerleri.....	42

KISALTMALAR LİSTESİ

D-H : Denavit-Hartenberg

HTM : Homojen Transformasyon Matrisi

FEM : Sonlu Elemanlar Metodu

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kinematik Analiz, Robot Kolu, Adams Programı

Mekanizmaların ilkel olarak ilk ortaya çıkması insanlık tarihi ile aynı dönemlere denk gelmektedir. İnsanlar sorunlarla karşılaşmışlar ve bu sorunları çözebilmek için çeşitli araç gereçler üretmişlerdir. Ancak daha sonraları yapılan bu gereçler ve mekanizmalar daha karmaşık ve modern şekillere bürünmüştür ve insanlar akıllarındaki hemen yapmak yerine kâğıtlara çizdikten sonra daha sistemli şekilde hayata geçirmeye başlamışlardır. Bilgisayarların yaygınlaşması ile tasarım yapmak daha da kolaylaşmıştır ve üç boyutlu tasarım programları günümüzde tasarımın geldiği son noktadır. Üç boyutlu tasarımla birlikte bilgisayar destekli statik ve dinamik analiz programları ortaya çıkmıştır.

Bu sayede tasarlanan mekanizmaların, direkt olarak imal edilmeden önce, bilgisayarda simülasyonu yapılabilir, mekanizmanın hareketi incelenebilir. Uzunların birbirine göre konumları, yer değiştirmeleri ve hızları ileri kinematik ve ters kinematiğin karmaşık denklemleri ile uğraşmadan bulunabilir. Mekanizmaların bilgisayar üzerinde analizlerinin yapılması tek seferde doğruya ulaşmayı proje süresini kısaltmayı ve maliyetleri azaltmayı sağlar.

Bu çalışmada bir robot kolunun hareket kabiliyeti ADAMS® programında incelendi. Robot kolunun görevi, konum koordinatları bilinen bir cisim almak ve yine koordinatları bilinen başka bir noktaya koymaktır. Bu hareketi sağlamak için robot kolunun uzunlarının yapması gereken açıların incelenmesi bir ters kinematik problemdir. Bu problemin çözümü için ADAMS® ta hesaplama yapılarak açıların zamana göre değişimlerinin grafikleri çıkarıldı. Durum sağlaması yapmak için mekanizmanın belli bir saniyedeki (cisim aldığı saniyedeki) eklem açıları alınarak ileri kinematik denklemlerinde yerine konarak cismin koordinat sistemleri bulundu. Ayrıca ADAMS® çalışanlara örnek teşkil etmesi açısından iki adet basit mekanizma hesaplaması ekte sunuldu.

COMPUTER AIDED KINEMATIC ANALYSIS OF A ROBOTIC ARM

SUMMARY

Key Words: Kinematic Analysis, Robotic Arm, ADAMS®

The first emerge of the primitive mechanisms are at the same beginning period of the human history. Human beings met with problems and in order to solve these, they have produced some tools. For example, as to tie the stone on the pole of the stick was also a mechanism in order to make it a hammer and use it to provide the necessities. However, all of the further made tools and mechanisms have wrapped to complex and modern shapes and human beings have started to make what is in their mind, a part of life in a systematic manner as drawing them to the sheets rather than doing just at that time. With the spread of the computers, it has been easier to design and the 3D design is the last point of the design issue. Through the 3D design, the computer aided static & dynamic analysis programs have been also emerged.

In this way, it could be enough to perform a simulation and study the motion for the designed mechanisms instead of directly manufacturing. The positions of the members compared to together, displacements and velocities could be found without messing with the complex equations of the forward and reverse kinematic. To perform the analysis of the mechanisms on computer obtains to reach the true solution, shorten the project time and reduce the costs at once.

In this study, the movement capability of a robotic arm has been reviewed in the ADAMS® programme. The aim of a robotic arm is to take an object from a location which coordinates are known and to put the object to a location which coordinates are also known. The study of the angles which are made by the joints of the robotic arm in order to perform this movement is a reverse kinematic problem. In case of solving this problem, the deviations of the angles according to time have been simulated in ADAMS® as plotting related graphs. To verify the situation, we have obtained the coordinates of the object as noting the joint angles in a known time (second in taking the object) and putting them in to the forward kinematic equations. Also, in order to give examples for the people who study ADAMS®, two simple mechanism analyses have been presented as attached.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Mekanik sistemler uzuvlardan ve bu uzuvları birbirine bağlayan mafsallardan meydana gelir. Mafsallar yardımıyla bir araya gelen uzuvlar birbiriyle bağlantılı şekilde çalışarak bir hareketi meydana getirirler. Mekanik sistemleri tanımlamak, mekanizmayı oluşturan her elemanın birbirleriyle olan hareket ilişkilerini öğretmek, hareket esnasında uzayda konumlarını bulmak, konumun türevleri olan hız ve ivmeyi hesaplamak ve hareketten kaynaklanan uzuvlar ve mafsallar üzerinde oluşan tepki kuvvetlerini bulabilmektir. Ancak uzuv ve mafsal sayısı arttıkça çıkan denklemler ve bu denklemlerin çözümü zorlaşır. Bu denklemleri bilgisayarda çözdürmek mümkündür ama sayılarla uğraşmak yerine görsel olarak mekanizmayı modellemek ve bu mekanizmaya hareket kazandırarak bu hareketin sonuçlarını izlemek günümüzde bilgisayar programları ile yapılabilir hale gelmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Hikmet Nazım EKİCİ “Mekanik Sistemlerin Hareket Analizlerinin Ve Simülasyonunun Bilgisayar Ortamında Gerçekleştirilmesi” konusun da çalışmıştır. Bu çalışmada Adams Programı kullanılarak 5 ayrı tasarım yapılmıştır. İlk olarak bir yay-sönümleyici tasarımı yapılmış, simüle edilmiş ve analitik çözümü bulunmuştur. 4 çubuk mekanizması, krank- biyel mekanizması, vargel tezgahının çalışma mekanizmaları tasarlanıp simüle edilmiş ve analitik çözümleri bulunmuştur. Vargel tezgahı tasarımı için Anova analizi yapılarak optimum bir tezgah tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır. Ardından 4 silindirli içten yanmalı bir motor tasarlanmış ve motorun simülasyonu yapıldıktan sonra pistonlara etkiyen itme kuvveti, volan dişlisi torku bulunmuştur.[1]

Volkan İZGİ “Altı Eksenli Endüstriyel Robot Tasarımı” konusun da çalışmıştır. Bu çalışmada, altı eksenli mafsallı (articulated/antropomormik) robot tasarımı

yapılmıştır. Konuyla ilgili olarak endüstriyel robotların tanımı, sınıflandırılması yapıp konstrüktif yapıları örneklerle açıklanmıştır. Ayrıca robot kinematiği ve dinamiği hakkında bilgiler verilip, tasarımı yapılan robotun uç konum matrisi bulunmuştur.[2]

Yüksel HACIOĞLU “Bir Robotun Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrolü” konusun da çalışmıştır. Bu çalışmada bulanık mantık ile kayan kipli kontrolün avantajlarını bir araya getiren bir kontrol mekanizmasının tasarlanması ve bir robotun kontrolünde kullanılması amaçlanmıştır. Bu maksatla tezin ikinci bölümünde bu çalışmada kullanılan kontrolcülerle ilgili temel bilgiler ve bu kontrolcülerle ilgili literatürde yapılan çalışmalar verilmiştir. Üçüncü bölümde ise robotların kinematik ve dinamik analizi, PD Kontrol, Bulanık Mantık ve Kayan Kipli Kontrol hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde, iki serbestlik derecesine sahip, dönel eklemli düzlemsel robot kolunun ileri ve ters kinematik analizi yapılmış ve hareket denklemleri çıkartılmıştır. Robot kolunun izleyeceği yörünge tanımlandıktan sonra, PD kontrol, Bulanık Mantıklı Kontrol ve Kayan Kipli Kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Ardından bu çalışmada geliştirilen, kayan kipli kontrolcünün kontrol kazancının ve kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile belirlendiği, Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrolcü tanıtılmış ve bu kontrolcü de robot modeline uygulanmıştır. Ayrıca tüm bu kontrolcülerin robust olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Son bölümde, uygulanan kontrolcülerin performansları robustluk özelliği de dahil olmak üzere değerlendirilmiş, geliştirilen kontrol yönteminin verdiği sonuçlar tartışılmıştır.[3]

Çağatay SAYGILI “Scara Tipi Bir Robotun Tasarımı Ve Animasyonu” konusun da çalışmıştır. Bu çalışmada, Scara tipi bir robotun tasarımı yapılmış, bütün parçalarının Solidworks programı kullanılarak katı modelleri elde edilmiş ve aynı yazılım üzerinde parçalar monte edilerek robotun komple katı modeli oluşturulmuştur. Robotun eklemlerinden verilen açısal konumlar sonucu gerçekleşen hareket, Gifmax programı vasıtasıyla düzenlenmiş, parça tasıma ve hareket sekli canlandırılmıştır. Düz ve ters kinematik analiz yapılmış, kinematik analiz verileri kullanılarak, Matlab programı vasıtasıyla robotun animasyonu gerçekleştirilmiştir.[4]

Tuğba Selcen TONBUL ve Müzeyyen SARITAŞ “ Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar Ve Yörünge Planlaması” konusun da çalışmışlardır. Bu çalışmada, beş eksenli bir Edubot robotta, ters kinematik hesaplamalar ve yörünge planlaması yapılmıştır. Ters kinematik probleminde, robotun uç noktasının gideceği yerin koordinatları (x, y, z) ve robot elinin başlangıç pozisyonuna göre açısı (φ) girdi olarak verilmiş ve eklem açılarının alabileceği değerler ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) hesaplanmıştır. Eklem açıları hesaplandıktan sonra, robot verilen görevi gerçekleştirirken, hareketinin titreşimsiz ve düzgün olabilmesi için yörünge planlaması yapılmıştır. Yörünge planlaması yapılırken; pozisyonda, hızda ve ivmede süreklilik sağlamak için, beşinci dereceden polinomlar kullanılmıştır.[5]

Cihan AYIZ “Endüstriyel Robotların Üstel Yöntem ile Kinematik Analizi” konusun da çalışmıştır. Kinematik modelleme endüstriyel robotların en temel safhasını oluşturmaktadır. Bir robot manipülatörünün kinematiğini sistematik bir şekilde elde etmek daha sonra yapılacak çalışmaların da verimli bir şekilde ilerlemesine yardımcı olur. Bu amaçla endüstriyel robotların kinematik modellerini çıkarmak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan baslıcalar: Denavit Hartenberg, üstel yöntem, sıfır referans konum yöntemi, Pieper-Roth yöntemi, tam ve parametrik olarak sürekli yöntem olarak sıralanabilir. Bu tez çalışmasında bu yöntemlere kısaca değinilerek üstel yöntem detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Daha sonra Huang ve Milenkoviç tarafından sınıflandırılan onaltı adet temel endüstriyel robotun düzenleştirmeleri ve katı gövde yapıları verilmektedir. İlerleyen bölümlerde bu temel onaltı adet robot manipülatörünün ileri ve ters kinematiği üstel yöntem kullanılarak çözülmüştür.[6]

1.2. Çalışmanın Amacı

Çalışmada ilk olarak belirlenen işlevleri gerçekleştirebilecek bir robot kolu tasarımı yapıldı. Tezin ilk kısmında robotun tanımına, tasarladığımız robotun kısımlarına, robot çeşitleri ve kullanım yerlerine göre karşılaştırmalarına değinildi. Tasarlanan robot kolu 4 eklemlili ve endüstriyel amaçlı ürün taşıma için kullanılan bir robot koludur.

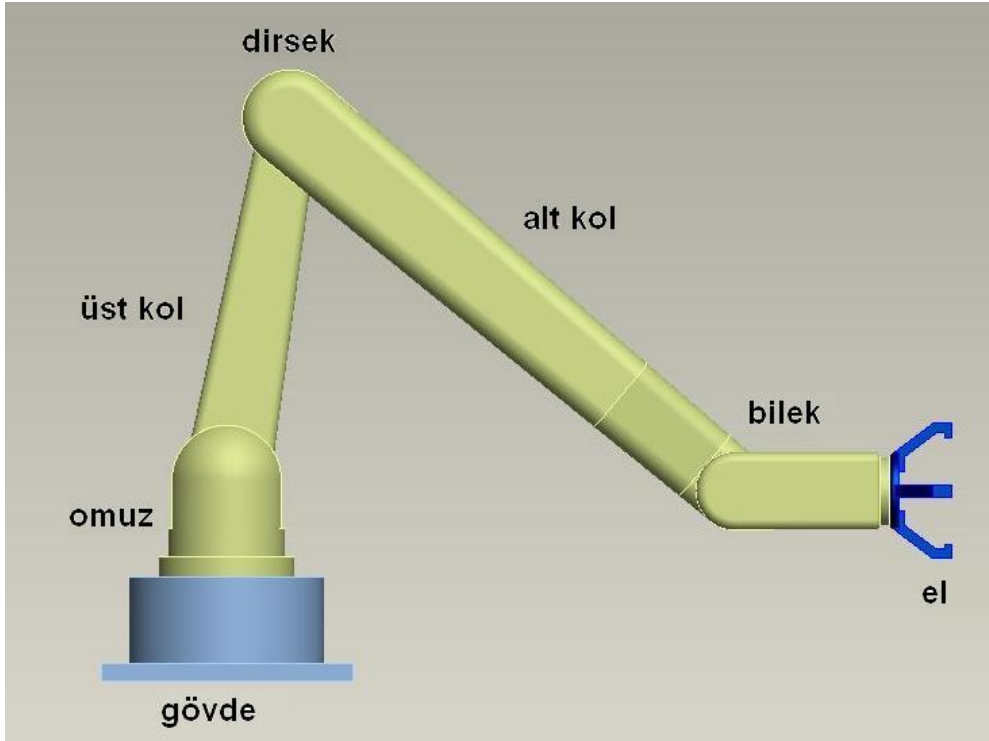
Çalışmanın ikinci kısmında ise robotun bu hareketi yapabilme kabiliyeti irdelenmiştir. Bu irdeleme bir kinematik problemdir ve robot kolunun istenen koordinatlara gidebilmesi için eklemlerdeki açı değişimleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar ters kinematik denklemlerle bulunabilir. Ancak bu çalışmada amaç bu karışık denklemlerin çözümü ile uğraşmadan bilgisayar destekli bir analiz programı ile eklem açılarının grafiksel olarak bulunabildiğini göstermektedir.

Hareket hesaplamaları bilgisayar destekli analiz programı olan ADAMS ile yapılmış ve sağlama yapmak için belli saniyeler için kinematik denklem çözümleri yapılmıştır.

BÖLÜM 2. ROBOT KOLU

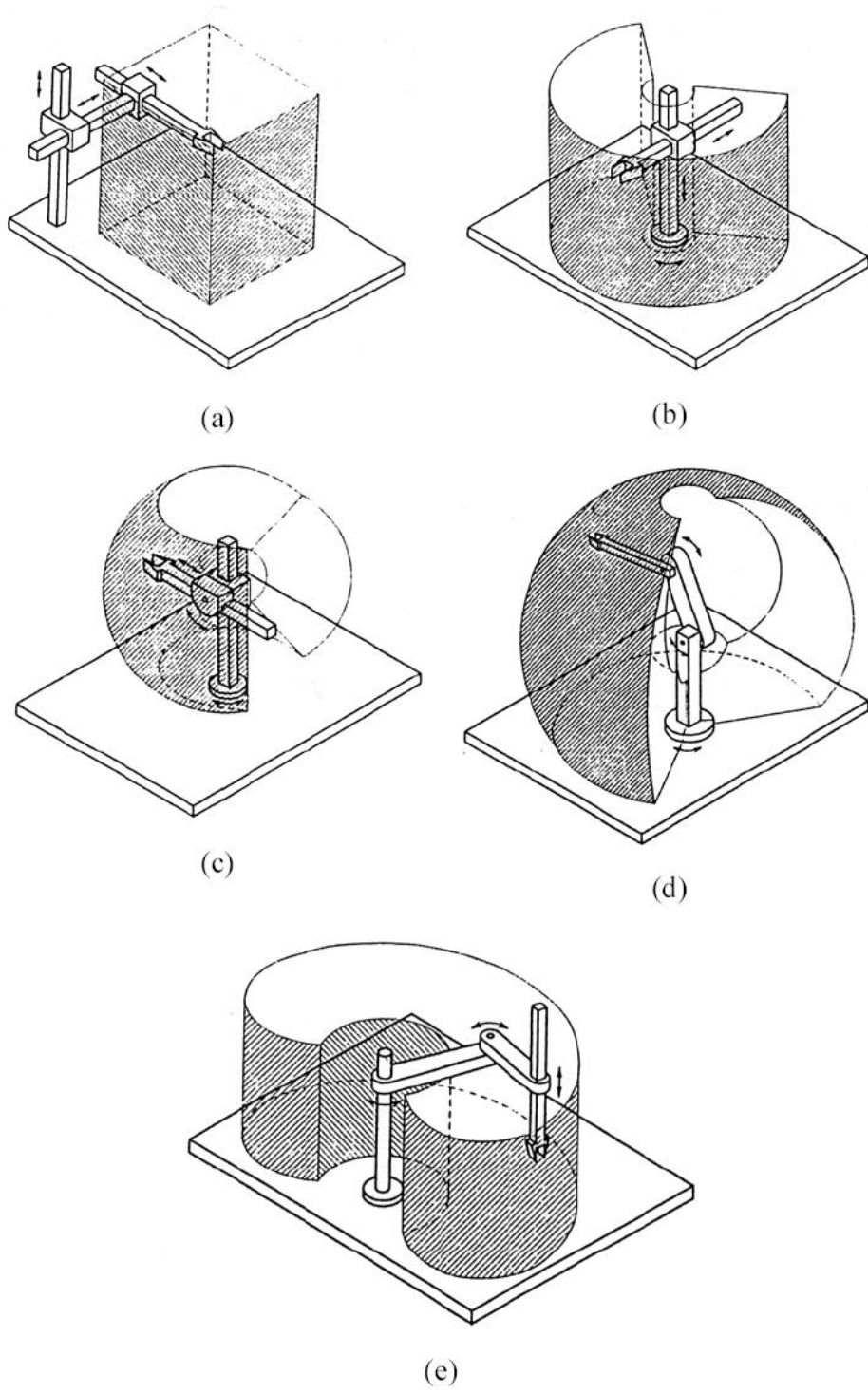
2.1. Robot Tanımı

Robot, fiziksel nesnelere idare etmek (kullanmak, hareket ettirmek) amacıyla, çalışma hacmi içinde, programlanmış hareketlerle, bir veya daha fazla robot elini yönetmek için algılayıcıları kullanan, yazılımla kontrol edilebilir bir cihazdır.



Şekil 2.1. Tipik bir robotun bölümleri

Şekil 2.1’de tipik bir robotun bölümleri gösterilmektedir. Burada gövde, üst kol ve ön kol robotun uzuvları, omuz, dirsek ve bilek ise robotun eklemleridir. Şekil 2.2’de çeşitli geometrilere sahip robot kolları ve bunlara ait çalışma hacimleri verilmektedir. Çalışma hacmi, robot elinin uzayda erişebileceği noktalardan oluşmaktadır.



Şekil 2.2. a) Kartezyen robot kolu. b) Silindirik robot kolu. c) Küresel robot kolu. d)Antropomorfik robot kolu. e) SCARA robot kolu. [3]

Kartezyen(Cartesian) Manipülatör: Bu tip bir manipülatör üç tane kayar tip eklem ile elde edilir. Mekanik yönden çok sağlamdır fakat çalışma uzayındaki hareket yeteneği bakımından zayıftır. Bu tip manipülatörler çok büyük boyutlarda ve ağırlıklarda nesnelere hareket ettirmek ve taşımak için idealdir. Kartezyen manipülatörlerde eklemleri hareket ettiren motorlar çoğunlukla elektrik bazen de pnömatik motorlardır.

Silindirik (Cylindrical) Manipülatör: Bu tip bir manipülatör bir tane döner ve iki tane kayar tip eklem ile elde edilir. Bu tip manipülatörler de mekanik yönden sağlamdır fakat bilek konum doğruluğu(accuracy) yatay harekete bağlı olarak azalır. Benzer şekilde büyük boyutlu nesnelere taşınmasında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde hidrolik motorları tercih edilir.

Küresel(Spherical) Manipülatör: Bu tip bir manipülatör iki tane döner ve bir tane kayar tip eklem ile elde edilir. Bu tip manipülatörler mekanik yönden diğer iki tipten daha zayıf, mekanik yapı yönünden daha karmaşıktır. Çoğunlukla makine montajlarında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde elektrik motorları tercih edilir.

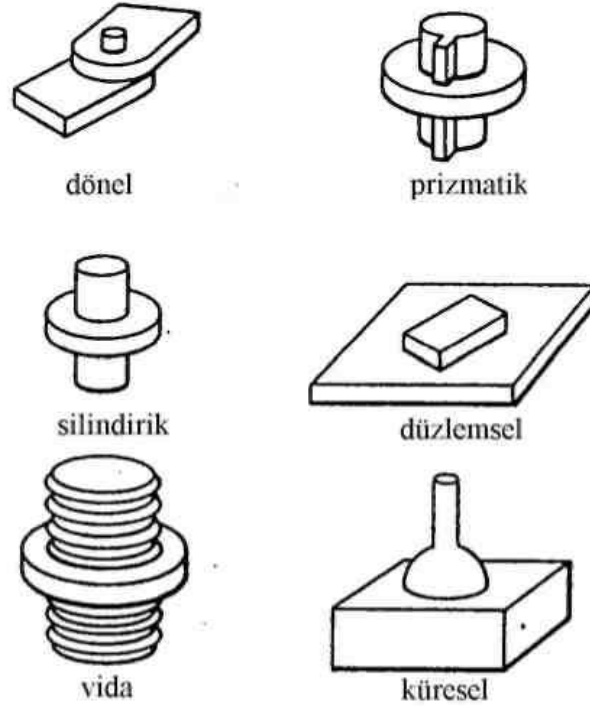
Mafsallı (Vertical articulated) Manipülatör: İnsan kol yapısı esas alındığı için bu isim verilmiştir. Bu tip manipülatörler tüm eklemleri döner olduğundan çalışma uzaylarında en yetenekli manipülatörlerdir. Endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanına sahiptirler.(Boyama, kaynak yapma, montaj, yüzey temizleme vb.) Bu tip manipülatörlerde elektrik motorlar tercih edilir (Craig 2005).

Endüstriyel robot, genel amaçlı, insana benzer özelliklere sahip ve programlanabilir bir makinedir. Bir robotun insana benzeyen en önemli özelliği onun koludur. Tutma ve yerleştirme işlemlerinde robot kolu kullanılır. Robot kolu, başka bir makineyle birleştirilerek, malzemenin yüklenmesi ve bir takım değiştirme işlemini yapmaktadır. Robotlar, kesme, şekil verme, yüzey kaplama, silindirik ve düzlem yüzey taslama gibi imalat işlemlerini gerçekleştirir; montaj ve kontrol uygulamalarında da kullanılmaktadır. Robot kolların kullanım alanları ve kullanım sonuçlarını da içeren konfigürasyonlarının daha detaylı karşılaştırılması Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 2.1. Robot Kolların Konfigürasyonlarının Karşılaştırılması

Robot Tipi	Mafsal Tipleri	Kullanım Alanları	Kullanım Nedenleri
Kartezyen Robot Kollar	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prizmatik 2. Prizmatik 3. Prizmatik 	Demiryolu, köprü inşaatları Büyük makine montajları	Kinematik modelleri basittir. Rijit bir gövdeye sahiptir. Çalışması için büyük alan gerekir.
Silindirik Robot Kollar	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dönel 2. Prizmatik 3. Prizmatik 	Büyük makine montaj sanayi Basit montaj, demontaj hatları	Kinematik modelleri basittir. Güçlü hidrolik elemanlar kullanılır. İş alanları sınırlıdır. Tozlu ve ıslak ortamlarda çalışmaları zordur.
Küresel Robot Kollar	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dönel 2. Dönel 3. Prizmatik 	Montaj sanayi Nükleer santraller	Büyük alanlara uzanabilirler. Kinematik modelleri karışıktır.
Mafsallı Robot Kollar	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dönel 2. Dönel 3. Dönel 	Otomobil sanayi Otomobil boya sanayi Elektronik montaj sanayi Nükleer santraller Tıbbi araç gereç yapım sanayi	Kinematik yapıları karmaşıktır. Kolların rijitlik ayarı zordur. Max. esnekliğe sahiptir. Hareket alanları büyüktür.

Eklemlerin dönel, prizmatik, silindirik, düzlemsel, vida ve küresel gibi çeşitleri vardır (Şekil 2.3). Robotikte uzuvlar daha çok eklemler arasındaki ilişkiyi belirleyen yapılar olarak düşünülür.



Şekil 2.3. Eklemlerin çeşitleri.

Her bir robot ekleminin konumu bir önceki veya bir sonrakine göre ifade edilir. Arka arkaya oluşturulan bu ilişkiye açık kinematik zincir denir.

2.2. Robot Tarihi

Dünya literatüründe ilk defa (Robot) kelimesi 1917 Karel Capek'in kısa hikâyesi olan Opilec de geçmiştir. Fakat asıl kavram olarak robot anlayışını 1921 yılında yine aynı yazarın Rossum's Universal Robots (R.U.R) adlı tiyatro eserinde ortaya atılmıştır (M.Vidyasagar, 1989).

Dünyada ilk olarak robotlarla ilgilenen bilim dalına (Robotik) ifadesini kullanan kişi Issac Asimov'dur. Kelimenin kullanıldığı eser Runaround (1942) adlı hikâyesidir, bu eser "Ben, Robot" adlı kitabında yer almıştır(1950). Ünlü bilimkurgu yazarı

hikâyelerinde henüz olmayan fakat ileride olması muhtemel sorunlarda ilgili durumları anlatmaktadır.

Sayısal kontrol ve uzaktan kumanda kavramların gelişmesiyle robotik çalışmalarında önemli gelişmeler ortaya çıkmıştır. John Parson tarafından uzaktan kumandalı olarak yapılan makine 1940 yıllarında Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri tarafından ardında da Atom Enerjisi Komisyonu tarafından kullanılmaya başlandı. Radyoaktif maddeler üzerinde yapılan çalışmalarda, önemli işlemlerde kullanıldı. Bu sistem endüstri alanında da kullanılmaya başlandı. Cyril Walter Kenwardla birlikte 1954'ün Mart ayında patentini aldılar. Böylece ilk endüstriyel robot denilebilecek bir sistem tasarlandı.

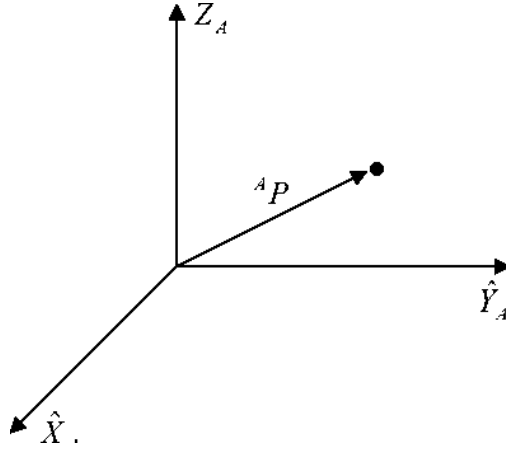
Belli başlı gelişmelerden biri de fizik müh. Josheph F.Engelberger ve George C.Devol tarafından gerçekleştirildi, parça aktarım robotu yaptılar ve çalışmalarını sonucunda “Unitmate” adlı firmayı kurdular(1949). Bu firma ilk robotik üzerine kurulan firmadır.

Bu tarihten sonra dünya üzerinde özellikle Amerika, Avrupa ve Japonya da pek çok firma robotik üzerine çalışmaya başladılar ve bu ilgi gelişmeyi de beraberinde getirdi. Bu gelişmeler arasında göze çarpan ilk uygulama dili olan WAVE Stanford akademisi tarafından geliştirildi ve robotik bilime kazandırıldı. 1974 de AI ve ticari amaçlı olan Val yapıldı. Val, ultimate tarafından geliştirilmişti ve buna bağlı olarak PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) geliştirilerek üzerinde uygulandı. Nispetten kısa eklemli bir robottu fakat temel olarak General Motors firmasının montaj hattı baz alınmıştı. 1979 yılında Yamanshi Üniversitesi tarafından montaj amaçlı olan SCARA (Selective Compliance Arm for Robotic Assembly) geliştirildi. Bu sistem ilk olarak 1981'de piyasaya sürüldü.

90'lı yıllara gelindiğinde robotlar artık çok çeşitli alanlarda ve özellikle insanların rahatlıkla yapamayacağı işleri kusursuz yaparak insanoğlunun yaşam sürecinde yerlerini aldılar. Bu yüzden birçok farklı alanda kullanabilmektedirler.

BÖLÜM 3. KONUM VE YÖNELİM

Uzayda bir noktanın konumu 3x1 boyutlu konum vektörü ile gösterilir (Şekil 3.1).

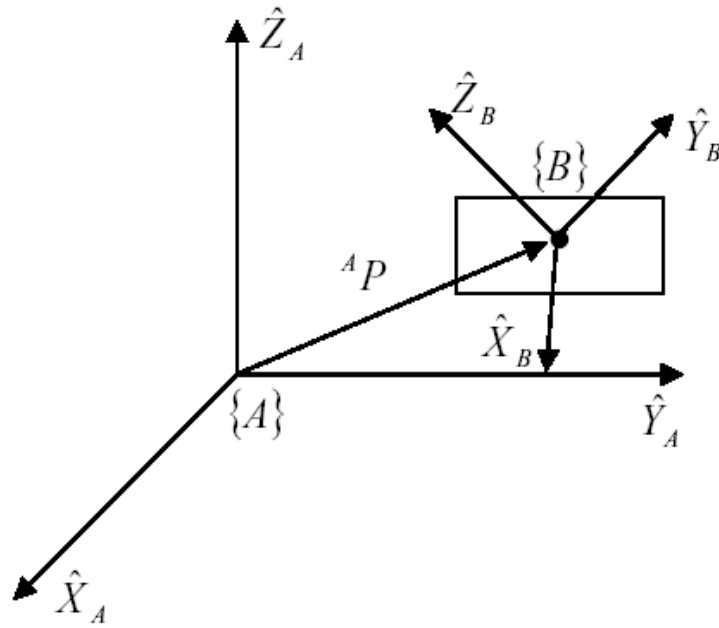


Şekil 3.1. Uzayda bir noktanın konum vektörü ile gösterilmesi.

$${}^A P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Burada A üst indisi vektörün A koordinat sistemine göre tanımlandığını belirtir. p_x , p_y ve p_z ise vektörün bu koordinat sistemindeki bileşenleridir.

Rijit bir cismin yerleşimini tam olarak belirlemek için konumunun yanı sıra yöneliminin de bilinmesi gerekir. Bunun için Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi bir {B} koordinat sistemi cisme tutturulur. Bu koordinat sistemi, {A} koordinat sistemine göre tanımlandığında cismin yönelimi belirlenmiş olur. Bu ise {B} koordinat sisteminin birim vektörlerini {A} koordinat sistemine göre yazarak sağlanır. Bunları kolonları birer vektör olan 3x3'lük bir matrisle gösterilebilir. Bu matrise rotasyon matrisi denir.



Şekil 3.2. Rijit bir cismin yönelimi.

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} {}^A\hat{X}_B & {}^A\hat{Y}_B & {}^A\hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A\hat{X}_B \cdot \hat{X}_A & {}^A\hat{Y}_B \cdot \hat{X}_A & {}^A\hat{Z}_B \cdot \hat{X}_A \\ {}^A\hat{X}_B \cdot \hat{Y}_A & {}^A\hat{Y}_B \cdot \hat{Y}_A & {}^A\hat{Z}_B \cdot \hat{Y}_A \\ {}^A\hat{X}_B \cdot \hat{Z}_A & {}^A\hat{Y}_B \cdot \hat{Z}_A & {}^A\hat{Z}_B \cdot \hat{Z}_A \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

${}^A_B R$: {B} koordinat sisteminin {A} koordinat sistemine göre rotasyon matrisi.

Yukarıdaki ifadede de görüldüğü gibi matris elemanları, {B} koordinat sisteminin birim vektörlerinin {A} koordinat sistemindeki izdüşümlerinden oluşmaktadır. Bu izdüşümleri nokta çarpımı ile bulunur. Ortonormal kolonlara sahip bu rotasyon matrisi aşağıdaki özellikleri taşır.

$${}^A_B R = {}^A_B R^{-1} = {}^A_B R^T \quad (3.3)$$

Aşağıdaki rotasyon matrisleri sırasıyla X,Y ve Z eksenlerine göre dönmeye kullanılırlar.

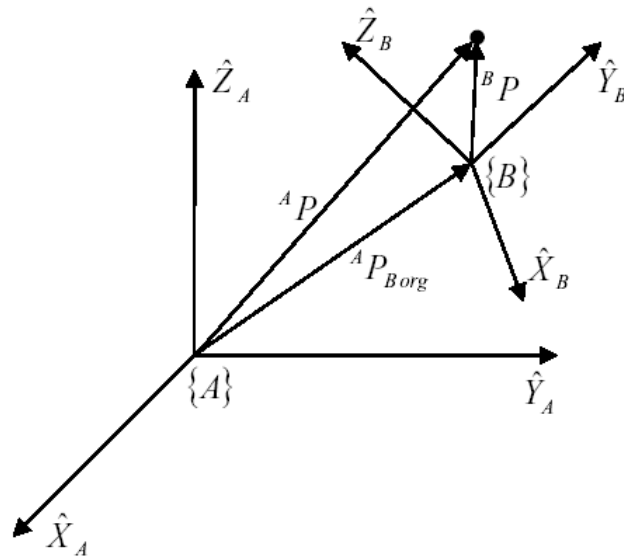
$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

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

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.1. Koordinat Sistemlerinin Birbirine Göre Tanımlanması

{B} koordinat sistemini {A} koordinat sistemine göre tanımlamak için, {B} koordinat sistemi orijininin {A} koordinat sistemine göre konumunun ve {B} koordinat sisteminin {A} koordinat sistemine göre yöneliminin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 3.3. Koordinat sistemlerinin birbirine göre tanımlanması.

Şekil 3.3’de {B} koordinat sisteminde tanımlı olan BP vektörü {A} koordinat sisteminde aşağıdaki gibi tanımlanır.

$${}^A P = {}^B P_{B\ org} + {}^A R {}^B P \quad (3.7)$$

${}^A P_{B\ org}$: {B} koordinat sistemi orijininin {A} koordinat sistemine göre konumu.

Bu ifadeyi 4x4’lük bir homojen dönüşüm matrisi kullanarak aşağıdaki gibi tekrar yazabiliriz. Homojen dönüşüm matrisi hem rotasyonu hem de konumu içermektedir.

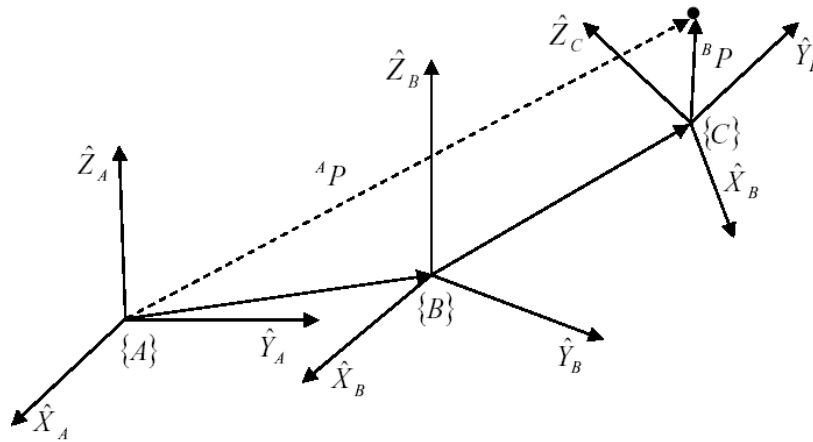
$${}^A P = {}^A T {}^B P \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R & {}^A P_{B\ org} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

${}^A T$: Homojen dönüşüm matrisi

3.2. Dönüşüm İşlemleri

3.2.1. Bileşik dönüşümler



Şekil 3.4. Dönüşüm işlemleri.

Şekil 2.8'den de anlaşılacağı üzere $\{C\}$ eksen takımı $\{B\}$ eksen takımına göre, $\{B\}$ eksen takımı da $\{A\}$ eksen takımına göre bilinmektedir. Dolayısıyla ${}^A P$ 'yi elde etmek için, önce ${}^C P$ 'yi ${}^B P$ 'ye, sonra ${}^B P$ 'yi ${}^A P$ 'ya dönüştürmek gerekmektedir.

$${}^A P = {}_B^A T {}_C^B T {}^C P \quad (3.10)$$

Yukarıdaki eşitlikte çarpma yönünün sağdan sola doğru olduğuna dikkat edilmelidir.

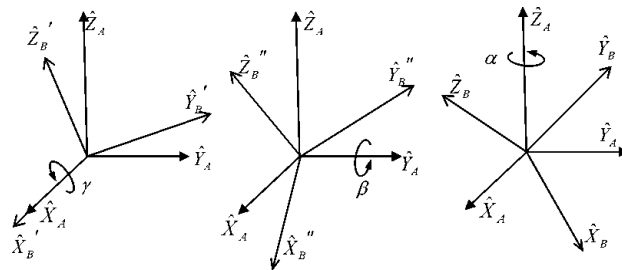
3.2.2. Dönüşümün tersi

$\{B\}$ eksen takımı $\{A\}$ eksen takımına göre tanımlı olsun. Bu durumda ${}^A_B T$ dönüşüm matrisi de bilinmektedir. Eğer $\{A\}$ eksen takımını $\{B\}$ eksen takımına göre tanımlamak istersek, ${}^B_A T$ 'nin hesaplanması gerekecektir. Bunun için ${}^A_B T$ 'nin tersi hesaplanabilir fakat, bu oldukça zahmetli olur. Bunun yerine dönüşüm matrisinin tersi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$${}^B_A T = {}^A_B T^{-1} = \begin{bmatrix} {}^A_B R^T & -{}^A_B R^T {}^A P_B \text{ org} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3. Sabit Eksen Takımlarına Göre Yönelim

Başlangıçta $\{A\}$ eksen takımıyla aynı olan bir eksen takımı, $\{B\}$ eksen takımını elde etmek üzere, önce X_A etrafında γ kadar, sonra Y_A etrafında β kadar ve α kadar döndürülürse $\{b\}$ eksen takımının yönelimini belirlemiş olur. Dönüşlerin sabit $\{A\}$ eksen takımının eksenlerine göre yapıldığına dikkat edilmelidir. (Şekil 2.9)



Şekil 3.5. Sabit eksen takımlarına göre yönelim.

Eşdeğer rotasyon matrisi, çarpma yönü sağdan sola doğru olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanır.

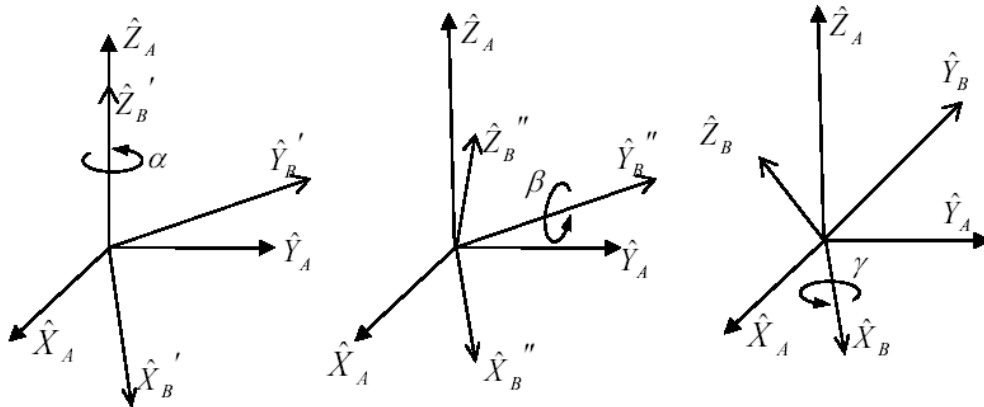
$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) \quad (3.12)$$

$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} cac\beta & cas\beta s\gamma - sac\gamma & cas\beta c\gamma + sas\gamma \\ sac\beta & sas\beta s\gamma + cac\gamma & sas\beta c\gamma - cas\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Bu hesaplamada çarpma sırası ve yönüne dikkat edilmelidir. Sıralamaların değiştirilmesiyle on iki farklı eşdeğer rotasyon matrisi hesaplanabilir.

3.4. Hareketli Eksen Takımına Göre Yönelim

Başlangıçta {A} eksen takımıyla aynı olan bir eksen takımı, {B} eksen takımını elde etmek üzere, Z_B etrafında α kadar, sonra Y_B etrafında β kadar ve X_B etrafında γ kadar döndürülürse {B} eksen takımının {A} eksen takımına göre yönelimi elde edilmiş olur. Dönüşlerin hareketli {B} eksen takımının eksenlerine göre yapıldığına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.6. Hareketli eksen takımlarına göre yönelim.

Eşdeğer rotasyon matrisi, çarpma yönü soldan sağa doğru olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanır.

$${}^A_B R_{Z'Y'X'}(a, \beta, \gamma) = R_Z(a)R_Y(\beta)R_X(\gamma) \quad (3.14)$$

$${}^A_B R_{Z'Y'X'}(a, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Bu hesaplamada çarpma sırası ve yönüne dikkat edilmelidir. Sıralamaların değiştirilmesiyle on iki farklı eşdeğer rotasyon matrisi hesaplanabilir.

Dikkat edilirse, sabit eksen takımına göre yapılan X - Y - Z dönüşlerinden elde edilen sonuç ile, hareketli eksen takımına göre yapılan Z - Y - X dönüşlerinden elde edilen sonuç aynıdır. Buna dayanarak, sabit eksen takımına göre yapılan dönüşlerle elde edilen yönelimi elde etmek için, hareketli eksenlerde yapılan dönüşlerin ters sırada olması gerektiği ortaya çıkar. Belirtilen bu eşitlikten dolayı toplam dönüş sıralamalarının sayısı yirmi dört olsa da, birbirinden farklı on iki sıralamadan söz edilebilir.

BÖLÜM 4. ROBOT KOLU KİNEMATİK ANALİZİ

Robot kontrolü, üç boyutlu uzayda robotun kendi tasarımı ve çevresinde ki nesnelerin yerleşimi ile ilgilenir. Yerleşim bilgisi konum vektörü ve yönelim matrisi gibi iki nitelikle açıklanır. Matematiksel olarak nesnelerin konumu bir konum vektörü, yönelimi ise yönelim matrisi vasıtasıyla hesaplanır.

Kinematik bilimi nesnelerin devinimleriyle ilgilenen bir hareket bilimidir. Robot kinematiği ile robotun kuvvet, hız ve ivme analizi yapılır. Özellikle uç işlevci ve eklem arasında bir ilişkiyi tanımlar. Dönme hareketinden gerçekleşen yer değiştirmeye eklem açısı, bağlar arasında yer değiştirmeden dolayı oluşan ötelemeye ise eklem kayması denir.

Üç boyutlu uzayda bir nesnenin yönelimini ve konumunu tanımlamak için o nesnenin merkezine bir koordinat sistemi yerleştirilir. Robotlarda da robotun eklemlerine ve çalışma alanında ki nesnelere koordinat sistemlerinin yerleştirilir. Yerleştirilen bu koordinat sistemleri vasıtasıyla robotla çalışma alanında ki nesnelere arasında yönelim ve konum ilişkisi tanımlanır.[1]

Robotlarda kinematik analiz iki şekilde ele alınır:

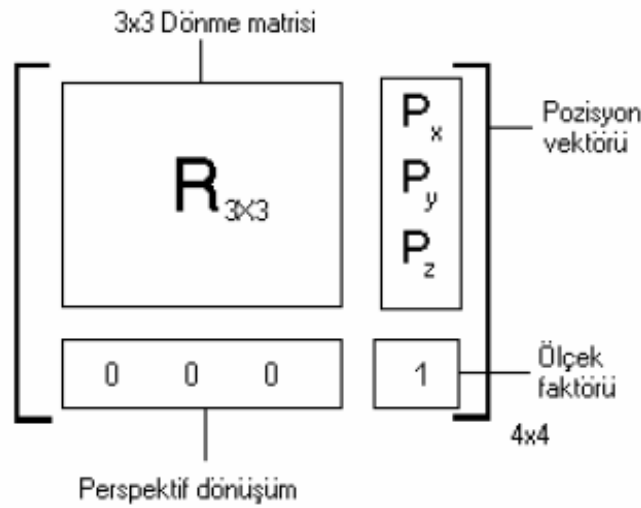
- 1) İleri Kinematik
- 2) Ters Kinematik

4.1. İleri Kinematik

Robotların ileri yön kinematiğinde eklem dönüşüm matrislerinin ardı ardına çarpılmasıyla ana çerçeve ile araç çerçevesi arasında ilişki tanımlanır. Bu ilişki araç çerçevesinin yönelim ve konumunu ana çerçeveye göre verir. Başka bir deyişle ileri

kinematik problem eklem değişkenlerinin verilmesiyle uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini ana çerçeveye göre hesaplar.

Denavit Hartenberg gösteriminde, her bir uzva bağlı bir koordinat sistemi bulunur. Bu yaklaşımda 4x4 homojen transformasyon matrisi, mafsallardaki her bir uzvun koordinat sistemini bir önceki uzvun koordinat sistemine göre gösterir.



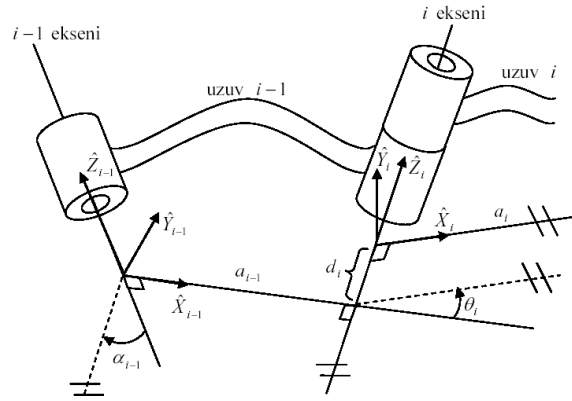
Şekil 4.1. 4x4 Homojen transformasyon matrisinin şematik gösterimi

Ardışık transformasyon ile el koordinatlarının transformasyonu yapılarak, taban koordinatları cinsinden ifade edilir. Bu durumda her bir mafsala, (x_i, y_i, z_i) şeklinde bir koordinat sistemi yerleştirilir. Burada $i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$ olabilir. n serbestlik derecesidir. n serbestlik dereceli bir robot için $n+1$ koordinat sistemi tanımlıdır. “Denavit Hartenberg” ilkesi ile robotun uç uzvunda belirlenen bir noktanın pozisyonundaki değişim, eklemlere yerleştirilen koordinat sistemleri vasıtası ile taban sabit referans eksen takımına bağlı olarak ifade edilebilir ve tanımlanabilir. Her bir koordinat sistemi aşağıdaki üç kural göz önünde bulundurularak belirlenir:

z_{i-1} eksen i. mafsalin hareket eksenini üzerinde bulunur.

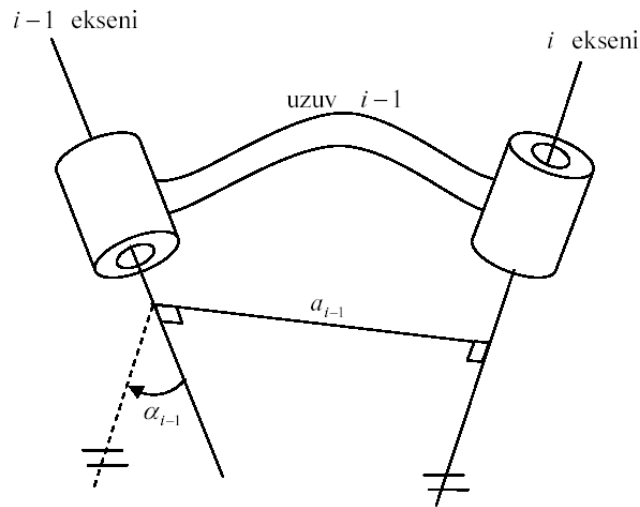
x_i eksenini z_{i-1} eksenine normaldir ve bu eksenenden uzaklaştırılacak şekilde yerleştirilir.

y_i eksenini sağ el kuralını sağlayacak şekilde oluşturulur.



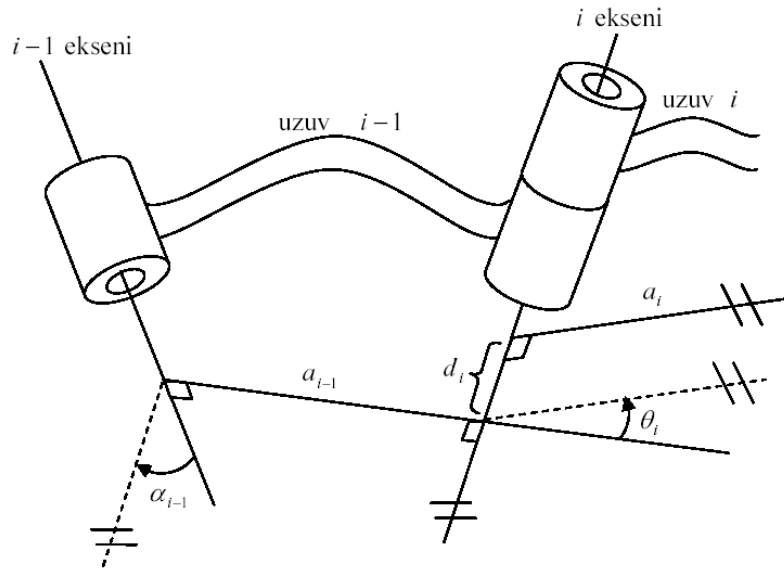
Şekil 4.2. Eksen takımlarının uzuvlara tutturulması.

Uzayda iki eksenin (burada eklem eksenleri) birbirine göre tanımlanması için uzuv uzunluğu (a_{i-1}) ve uzuv bükülme açısının (α_{i-1}) bilinmesi gerekmektedir. Uzuv uzunluğu iki eklem eksenleri arasındaki mesafedir. Bu mesafe, her iki eksene karşılıklı olarak dik olan doğru boyunca alınır. Bükülme açısı ise şöyle tarif edilir. Normal doğrusu, daha önce tarif edilen iki eksen arasındaki karşılıklı dik doğru olan bir düzlem ele alınsın. Her iki eksenin bu düzlem üzerindeki izdüşümleri alınır ve bunlar arasındaki açı ölçülürse bükülme açısı bulunmuş olur. Bu açı ölçümü $i-1$ ekseninden i eksenine doğru yapılır (Şekil .13).



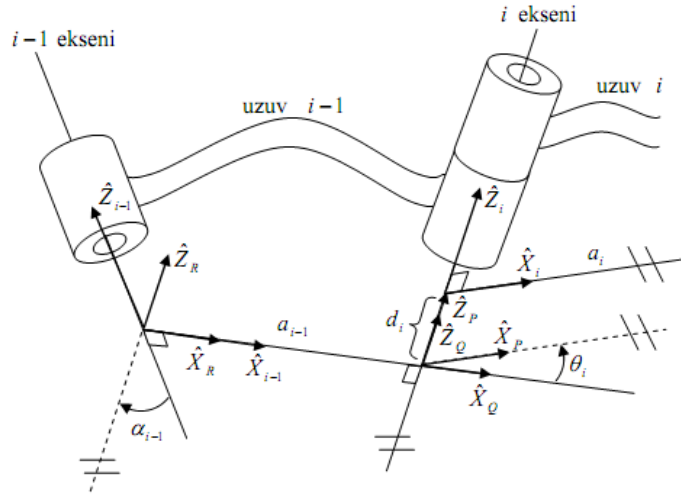
Şekil 4.3. İki eklem eksenleri arasındaki ilişkiyi belirleyen eklem parametreleri.

Uzuvların birbirleriyle bağlantısını belirlemek için iki parametre tanımına daha ihtiyaç vardır, uzuv açıklığı (d_i) ve eklem açısı (θ_i), (Şekil 4.12). Uzuv açıklığı a_{i-1} 'in eksenini kestiği noktadan, a_i 'nin eksenini kestiği noktaya olan uzaklıktır. Eklem açısı ise a_{i-1} 'in uzantısı ile a_i arasındaki açıdır. Böylece bir robotun kinematik tanımlaması, her uzuv için dört parametrenin verilmesiyle yapılabilir. Bunlardan ikisi uzvun kendisini, diğer ikisi de uzuvların birbiriyle olan ilişkilerini tanımlar. Eğer dönen eklem söz konusu ise θ_i eklem değişkeni, diğer üç parametre ise sabit parametreler olur. Eğer eklem prizmatik ise d_i eklem değişkeni, diğer üç parametre ise sabit parametreler olur.



Şekil 4.4. Uzuv açıklığı ve eklem açısı.

Böylece bu eksen takımları sayesinde uzuvların birbirine göre durumları tanımlanabilir. Bu notasyonda eksen takımları tutturuldukları uzva göre isimlendirilirler. $\{i\}$ eksen takımı i uzvuna tutturulmuş demektir. Sıfırdan başlayarak numaralandırma yapılır. Sıfır numaralı eksen takımı robot gövdesinin hareket etmeyen bir yerine tutturulur.



Şekil 4.5. Uzun dönüşümlerinde kullanılan ara eksen takımlarının yerleşimi.

{ } i eksen takımındaki bir vektör { } 1 i eksen takımına göre aşağıdaki gibi yazılabilir.

$${}^{i-1}P = {}^{i-1}T_R R_Q T_P T_i P_i P \quad (4.1)$$

$${}^{i-1}_i T = R_x(a_{i-1})D_x(a_{i-1})R_z(\theta_i)D_z(d_i) \quad (4.2)$$

$${}^{i-1}_i T = Vida_x(a_{i-1}, a_{i-1})Vida_z(d_i, \theta_i) \quad (4.3)$$

Burada $Vida_Q(r, \varphi)$, Q eksen boyunca r kadar ötelenme ve aynı eksen etrafında φ açısı kadar dönme olacağını belirtmektedir.

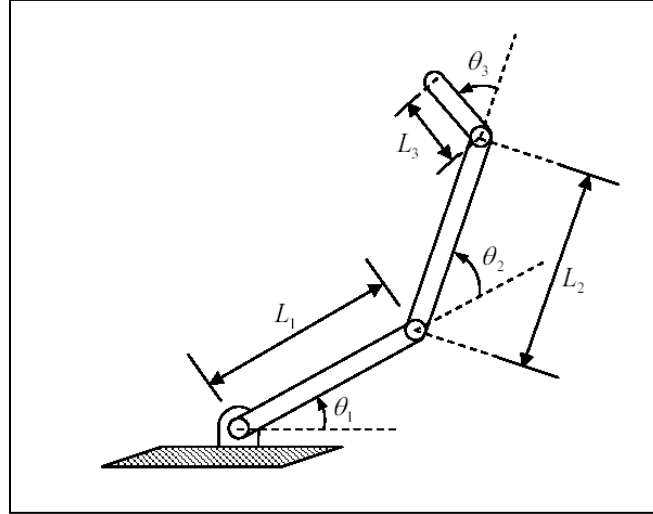
Eğer işlemler yapılırsa ${}^{i-1}_i T$ dönüşümü aşağıdaki gibi bulunur.

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

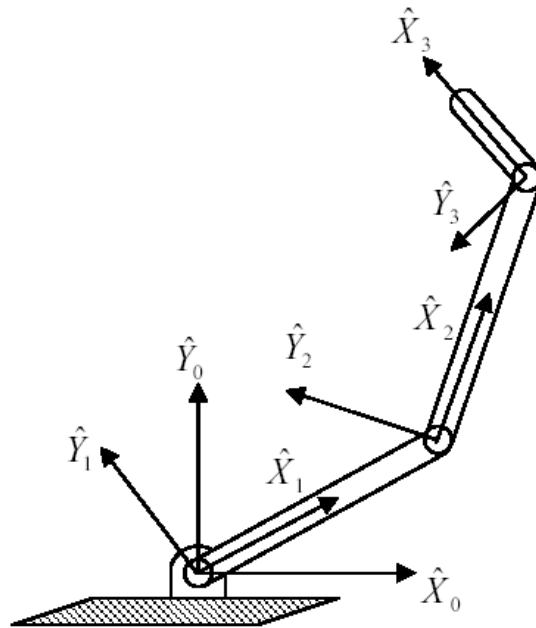
Böylece bir robotun son uzvunun konum ve yönelimini, o robotun hareketsiz uzvuna göre bulabilmek için elde edilen ${}^{i-1}_i T$ ile her uzvun dönüşüm matrisi bulunur ve elde edilen bu matrisler aşağıdaki gibi çarpılarak sonuca ulaşılır.

$${}^0_N T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \dots {}^{N-1}_N T \quad (4.5)$$

Örnek olarak Şekil 4.15’de görülen üç dönel ekleme sahip düzlemsel robot kolunun eksen takımları Şekil 4.16’de, Denavit – Hartenberg parametreleri ise Tablo 2’de gösterilmiştir. Ardından her uzvun dönüşüm matrisleri hesaplanıp, üçüncü uzvun hareketsiz eksen takımına göre dönüşüm matrisi hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. Üç dönel ekleme sahip düzlemsel robot kolu.



Şekil 4.7. Eksen takımlarının tutturulması.

Tablo 4.1. Denavit - Hartenberg parametreleri

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	L_1	0	θ_2
3	0	L_2	0	θ_3

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & L_1 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & L_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \quad (4.9)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_1c_1 + L_2c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_1s_1 + L_2s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Burada;

$$c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2) = c_1c_2 - s_1s_2 \quad (4.11)$$

$$s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2) = c_1s_2 + s_1c_2 \quad (4.12)$$

$$c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (4.13)$$

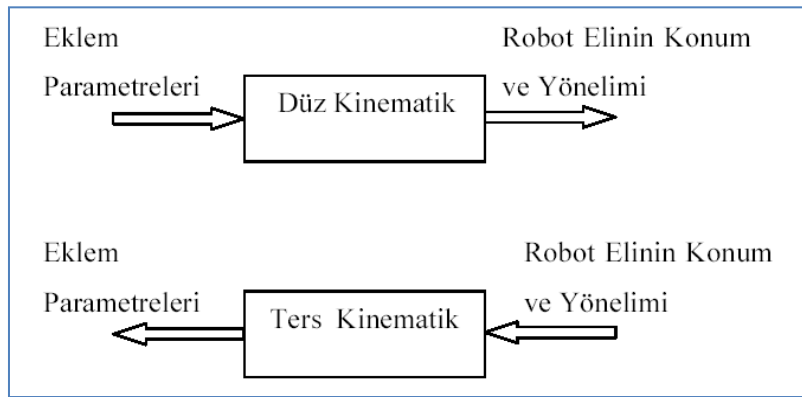
$$s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

olarak kullanılmıştır.

4.2. Ters Kinematik

Robotların ters kinematığında araç çerçevesinin ana çerçeveye göre yönelimi ve konumu verildiğinde, robotun bu yönelim ve konuma ulaşabilmesi için gerekli olan açı setlerinin hesaplanması şeklinde tanımlanır.

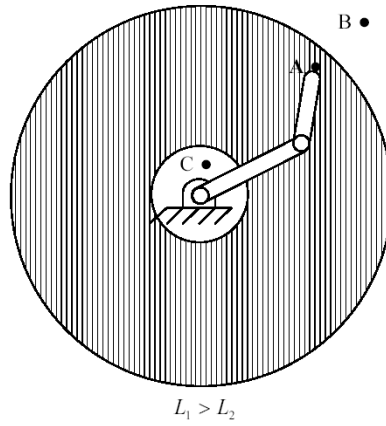
Daha önce anlatılan düz kinematik , eklem parametreleri ile robot elinin konum ve yönelimi arasındaki ilişki belirlenmişti. Yani belirli eklem parametreleri için robot elinin konum ve yönelimi hesaplanmıştı. Ters kinematik analiz ile ise robot elinin istenen bir konum ve yönelimi için eklem parametrelerinin alması gereken değerler hesaplanacaktır.



Şekil 4.8. Düz ve ters kinematik analiz.

Tahmin edileceği gibi kinematik denklemlerin içerdiği nonlineerlikler yüzünden çözüm yöntemleri düz kinematik çözümlmeye göre daha karmaşıktır. Bunun yanı sıra çözümün var olup olmadığı ve birden fazla çözümün varlığı gibi problemler de söz konusudur.

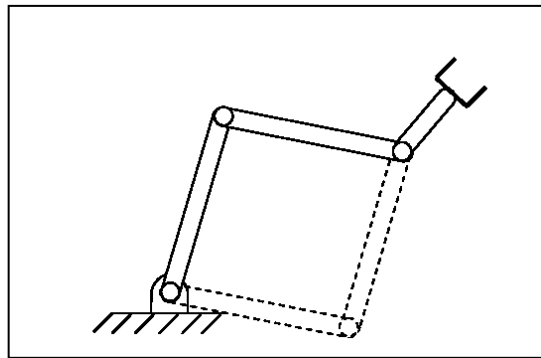
Çözümün var olabilmesi için istenen robot eli konumunun, robotun çalışma hacmi içinde olması gerekmektedir. Aksi takdirde çözüm yoktur (Şekil 4.18). Şekilde B ve C noktaları robotun çalışma hacminin dışındadır. Dolayısı ile bu noktalar için ters kinematik çözüm yoktur. A noktası ise robotun çalışma hacminin içindedir ve ters kinematik çözüm vardır.



Şekil 4.9. Çalışma hacmi.

Daha önce de bahsedildiği gibi kinematik denklemlerin çözümünde birden fazla çözüm ile karşılaşılabilir. Şekil 4.19'da görülen üç dönel ekleme sahip düzlemsel robot kolu için böyle bir durum söz konusudur. Robot elinin aynı konum ve yönelimi iki farklı şekilde elde edilebilmektedir. Elde edilen çözümlerden hangisi istenen robot eli konumuna ulaşmak için daha az hareket veya enerji gerektiriyorsa o tercih edilebilir. Ya da çözümlerden birisi eklemlerdeki fiziksel engellerden veya ortamda bulunan bir fiziksel engel yüzünden uygulanamıyorsa, diğer çözüm tercih edilir.

Genelde, sıfır olmayan uzuv uzunluğu (a_i) sayısı artarsa mümkün olan çözüm sayısı da artmaktadır. Altı serbestlik dereceli, genel bir robot kolu ile elde edilebilecek farklı çözüm sayısı onaltı ya çıkabilir.



Şekil 4.10. Ters kinematikte birden fazla çözüm olma durumu.

Ters kinematikte non-linear denklemler söz konusu olduğundan, lineer denklem çözümünde olduğu gibi genel bir çözüm yöntemi yoktur. Kullanılan çözüm yöntemlerini iki ana grupta toplamak mümkündür. Kapalı form çözümler ve sayısal çözümler. Sayısal çözümler iterasyonların uzun sürmesi yüzünden pek tercih edilmez. Kapalı form çözümler genelde analitik ifadelerden ya da dördüncü mertebeye kadar olan polinomlardan oluşur. Kapalı form çözümleri de kendi içinde cebirsel ve geometrik olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Fakat bu ayırım çok net yapılamaz. Çünkü geometrik ifadelerde cebirsel ifadeler de kullanılır.

Aşağıda örnek olarak üç dönel ekleme sahip düzlemsel robot kolunun ters kinematik çözümü verilmiştir.

Daha önce robotun üçüncü uzvunun konum ve yönelimi hareketsiz eksen takımına göre bulunmuştu, tekrar yazmak gerekirse;

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_1c_1 + L_2c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_1s_1 + L_2s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

robotun üçüncü uzvunun konum ve yönelimi ise bilinen değerler olarak aşağıdaki gibi verilir;

$${}^B_WT = \begin{bmatrix} c_\emptyset & -s_\emptyset & 0 & x \\ s_\emptyset & c_\emptyset & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

0_3T ve B_WT birbirine eşitlenerek çözüme gidebilir. Bu durumda aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$c_\emptyset = c_{123} \quad (4.16)$$

$$s_\emptyset = s_{123} \quad (4.17)$$

$$x = L_1c_1 + L_2c_{12} \quad (4.18)$$

$$y = L_1s_1 + L_2s_{12} \quad (4.19)$$

Son iki denklemin her iki tarafının karesi alınıp, taraf tarafa toplanırsa;

$$x^2 + y^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2c_2 \quad (4.20)$$

elde edilir. Buradan da c_2 değeri bulunur.

$$c_2 = \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (4.21)$$

Çözümün var olabilmesi için eşitliğin sağ tarafındaki ifadenin değeri -1 ile +1 arasında olmalıdır. s_2 değeri ise aşağıdaki gibi bulunur.

$$s_2 = \pm\sqrt{1 - c_1^2} \quad (4.22)$$

Böylece θ_2 açısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\theta_2 = A \tan 2(s_2, c_2) \quad (4.23)$$

Burada kullanılan $A \tan 2(y, x)$ fonksiyonu ile tanjantın tersi alınırken hem x hem de y'nin işaretini kullanılarak, açının koordinat sisteminin hangi bölgesinde olduğunu belirlenebilmektedir.

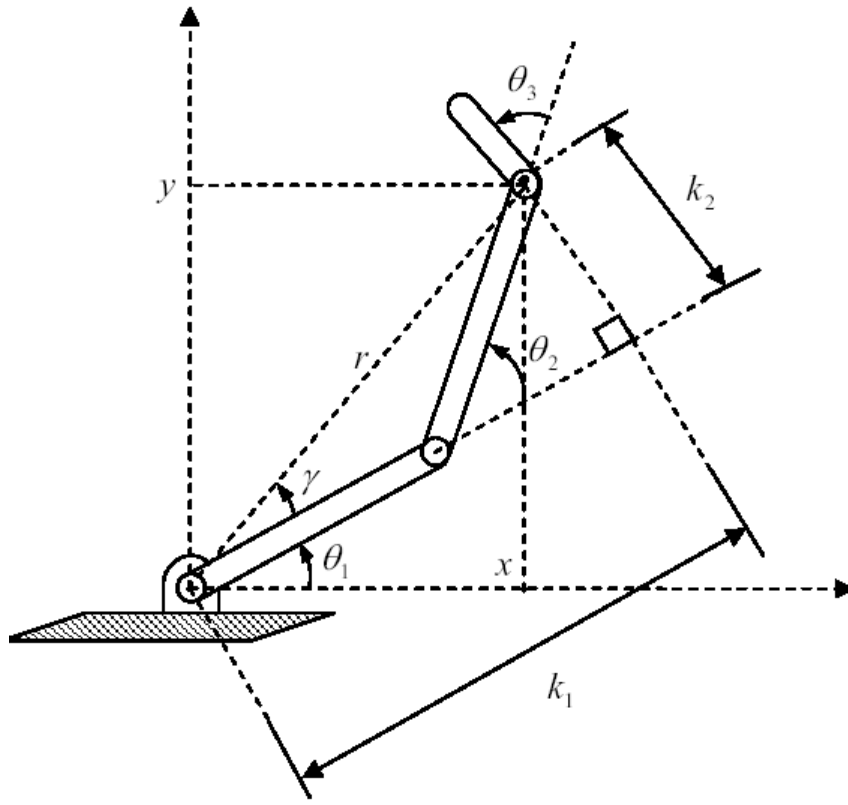
k_1 ve k_2 gibi iki değişkenin tanımlanmasıyla denklemler aşağıdaki hale getirilir. Bu değişkenler Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

$$k_1 = L_1 + L_2c_2 \quad (4.24)$$

$$k_2 = L_2s_2 \quad (4.25)$$

$$x = k_1c_1 - k_2s_1 \quad (4.26)$$

$$y = k_1s_1 + k_2c_1 \quad (4.27)$$



Şekil 4.11. Ters kinematik çözümde kullanılan ara değişkenler.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (4.28)$$

$$k_1 = r \cos \gamma \quad (4.29)$$

$$k_2 = r \sin \gamma \quad (4.30)$$

$$\gamma = \text{atan2}(k_2, k_1) \quad (4.31)$$

Elde edilen yeni denklemlerin her iki tarafı r 'ye bölünürse

$$\frac{x}{r} = \cos \gamma \cos \theta_1 - \sin \gamma \sin \theta_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{x}{r} = \cos (\gamma + \theta_1) \quad (4.32)$$

$$\frac{y}{r} = \cos \gamma \sin \theta_1 + \sin \gamma \cos \theta_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{y}{r} = \sin (\gamma + \theta_1) \quad (4.33)$$

Böylece θ_1 aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\gamma + \theta_1 = A \tan 2 \left(\frac{y}{r}, \frac{x}{r} \right) = A \tan 2(y, x) \quad (4.34)$$

$$\theta_1 = A \tan 2(y, x) - A \tan 2(k_2, k_1) \quad (4.35)$$

Son olarak ilk iki denklemden θ_1 bulunur.

$$\emptyset = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = A \tan 2(s_\emptyset, c_\emptyset) \quad (4.36)$$

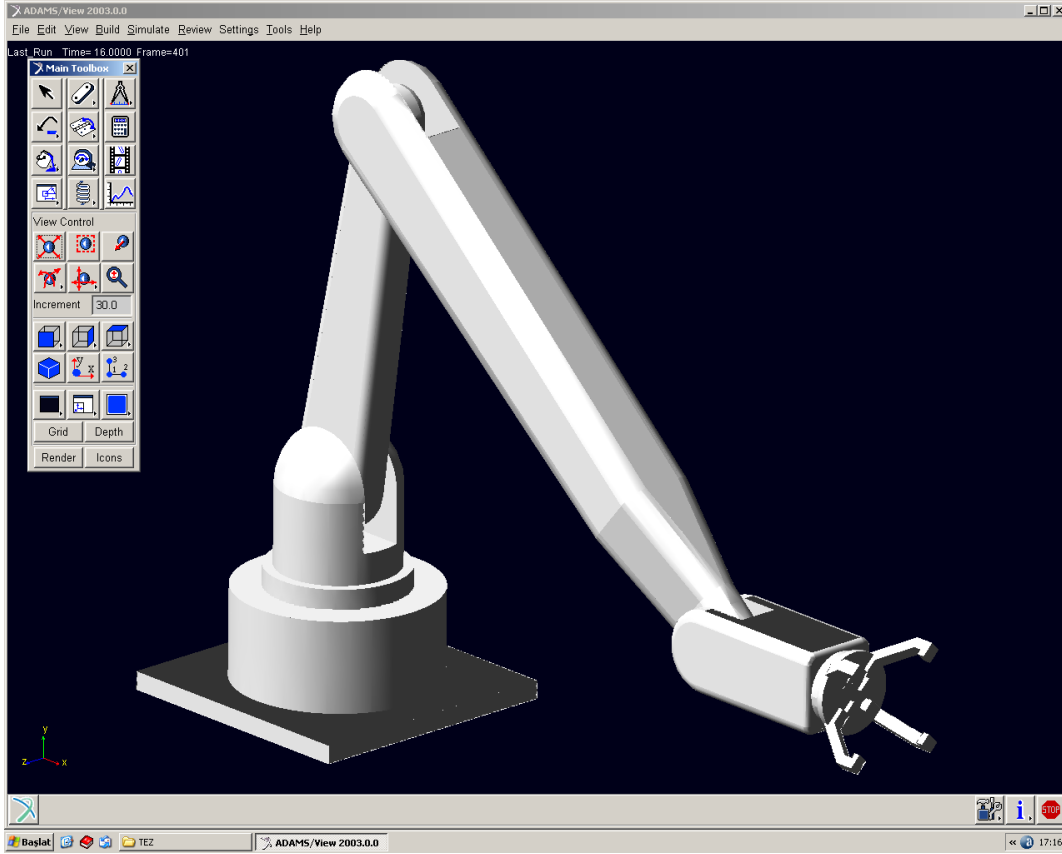
$$\theta_3 = \emptyset - \theta_1 - \theta_2 \quad (4.37)$$

Yukarıdaki örnekten de anlaşıldığı gibi kinematik denklemler çeşitli işlemlerle çözümü bilinen bir yapıya dönüştürülerek çözülmüştür. Genelde çeşitli geometrilere sahip robot kollarında ortaya çıkan kinematik denklemler belirli yapılara sahiptir. Yukarıdaki çözüm yöntemi bu yapılardan biridir.

4.3. Robot Kolunun ADAMS Programında Kinematik Analizi

Robot kollarından genelde istenen işlev en uç uzvun (tutucunun) bir cismin yerini değiştirmek için cismi hareket ettirmesidir. Bu senaryo da cismin kartezyen koordinatlarda yerinin bilinmesi ve tutucuya da bu koordinatlar verildiğinde oraya gidebilmesi gerekmektedir. Bu bir ters kinematik problemidir. Bu problemde her eklem için bir matris yazılır ve sondan başa varış şeklinde birbirine bağlı olarak çözümlenerek eklem açıları hesaplanır. Bu çalışmada kullanılan robot kolunda eklem sayısı fazla olduğu için çıkan denklemlerin elle çözümü zor ve yorucu olabilir. Oysa kolun kinematik hesaplamaları bilgisayarda yapıldığında hem hareket simülasyonu görülmüş olur, bu da daha sonradan bir sürprizle karşılaşılmasını engeller hem de eklem açılarının grafiği rahatlıkla bulunabilir.

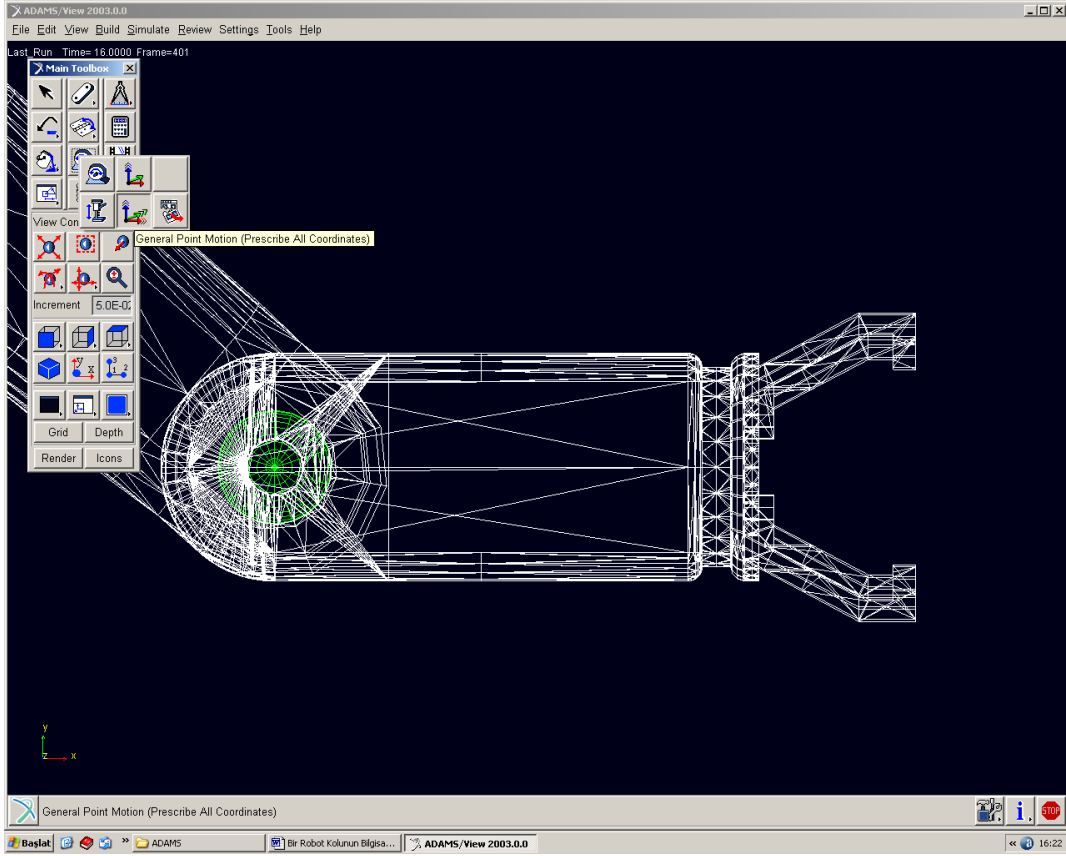
Hesaplamaya başlamak için ilk olarak robot uzuvlarının teker teker çalışma ortamına alınması gerekmektedir. Bunun için daha önceden Pro-Engineer programında tasarlanan robot kolu Adams ortamına aktarılır. Aktarma işlemini EK1'deki krank biyel mekanizması örneğinde olduğu gibi yapılır.



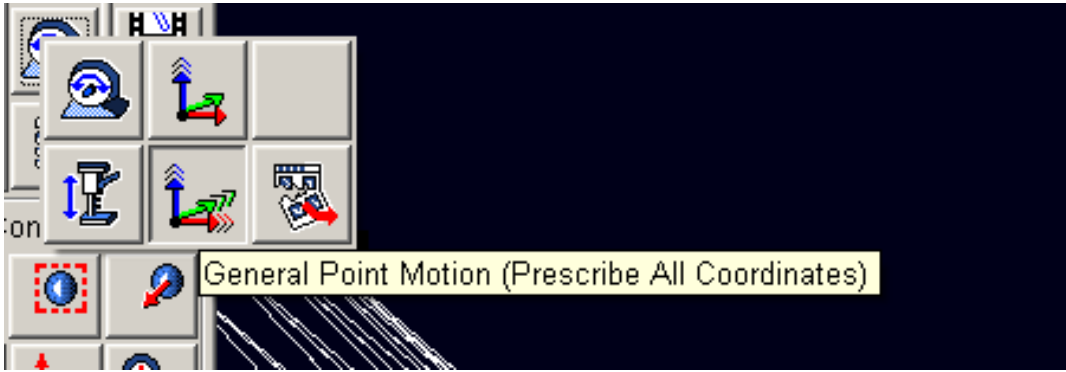
Şekil 4.12. Robot kolu modeli

Robot kolunun uzuvları aktarıldığında birbirinden bağımsız olarak çalışma sayfasına gelir. Robot kolunun istediğimiz hareketi yapması için eklemlerin hangi yönde tahrik edilmesi gerekiyorsa eklemler o şekilde mafsallarla bağlanır.

Robot kolundan beklenen işlev, koordinatları verilen noktaya giderek oradaki ürünü almak ve yine koordinatları verilen diğer noktaya giderek ürünü oraya bırakmaktır. Bunun için kolaylık olması açısından bilek dediğimiz son uzvun kola bağlandığı noktaya bir küre yerleştirilir ve bu küreye kartezyen noktaları ve dönüş açıları girilecek bir genel nokta hareketi (general point motion) atanır.

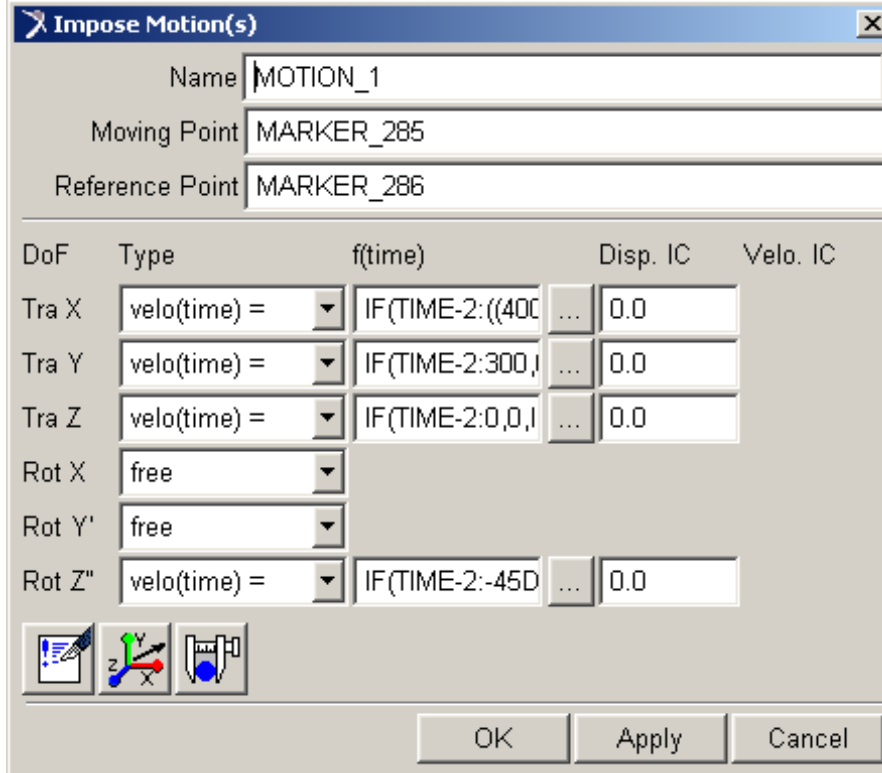


Şekil 4.13. Genel nokta hareketi (General point motion)



Şekil 4.14 Genel nokta hareketi (General point motion)

Bu hareket atandıktan sonra üzerinde sağ tıklanarak modify a girilir ve işlem penceresine girilir.



Şekil 4.15. Fonksiyon ekleme

Şekilde görüldüğü gibi general point motion 6 serbestliğe sahiptir. Nokta koordinatlarını girmek için Tra X, TraY ve Tra Z birer fonksiyon girerken, kolu yataydan cismi alabileceği dik konuma getirmek için Rot Z ye bir fonksiyon girilir. Bu fonksiyonlar aşağıda verilmiştir. Burada Tra X, TraY ve Tra Z eklem noktasının kartezyen koordinatlardaki değerlerinin değişimi ifade eder. Rot Z ise bilekten sonra gelen el kısmını dik konuma getirmek için z eksenini etrafındaki açı değerinin değişimini ifade eder.

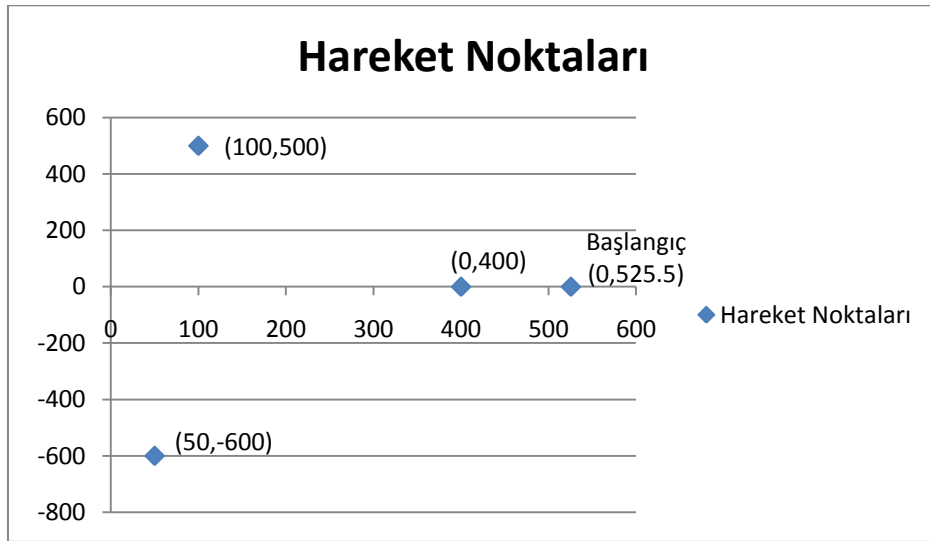
X: IF(TIME-2:((400-525.5)/2), 0 ,IF(TIME-4:-((300/2),0,IF(TIME-6:0,0,IF(TIME-8:0,0,IF(TIME-10: -(50/2), 0 ,IF(TIME-12: 0, 0 ,IF(TIME-14: 0, 0, IF(TIME-16: -((50-525.5)/2), 0 ,0))))))))))

Y: IF(TIME-2:300,0,IF(TIME-4:0,0,IF(TIME-6:-((571.5-0)/2),0,IF(TIME-8:((571.5-0)/2),0,IF(TIME-10:0,0,IF(TIME-12:-((571.5-0)/2),0,IF(TIME-14:((571.5-0)/2),0,IF(TIME-16:-300,0,0))))))))))

Z: IF(TIME-2:0,0,IF(TIME-4:-250,0,IF(TIME-6:0,0,IF(TIME-8:0,0,IF(TIME-10:1100/2,0,IF(TIME-12:0,0,IF(TIME-14:0,0,IF(TIME-16:-600/2,0,0))))))))))

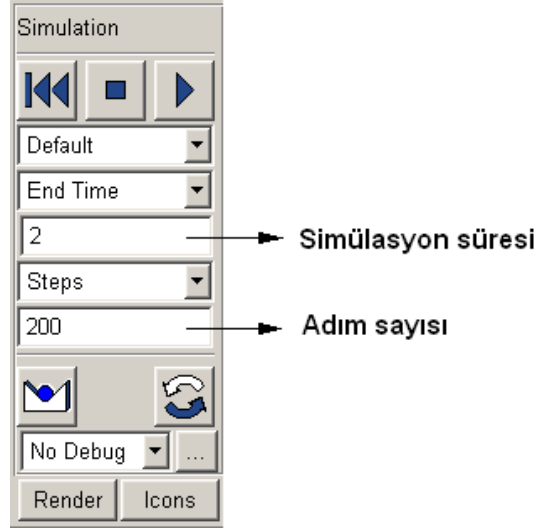
ROT Z: IF(TIME-2:-45D,0,IF(TIME-14:0,0,IF(TIME-16:45D,0,0)))

Girilen fonksiyonlara göre sistemin (x,z) deki hareket noktaları şekil 4.16 de verilmektedir.



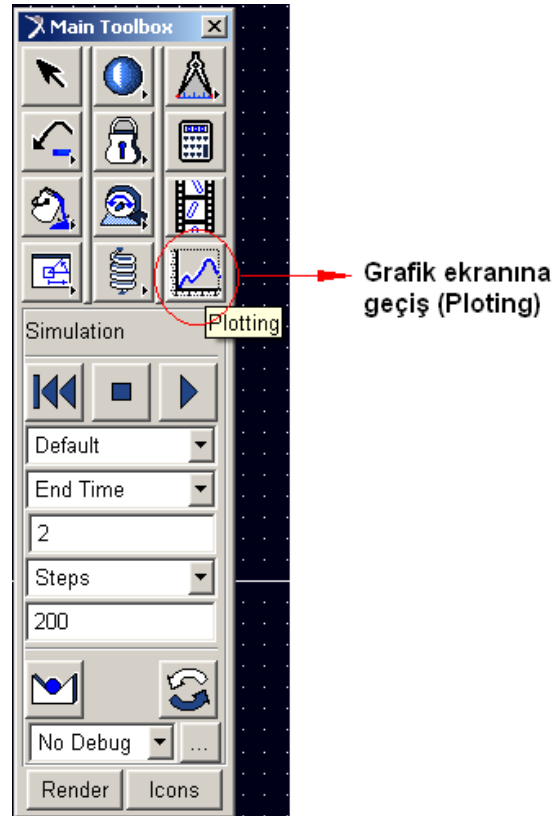
Şekil 4.16. Hareket noktaları

Fonksiyonlar girildikten sonra hareket simülasyonunu görmek için main toolboxtan simülasyon controls seçilir. Simülasyon kısmı açılınca simülasyon süresi ve adım sayısı girilir. Adım sayısı sistemin saniyede gösterdiği kare sayısını temsil eder. Play tuşuna basılarak simülasyon izlenir.

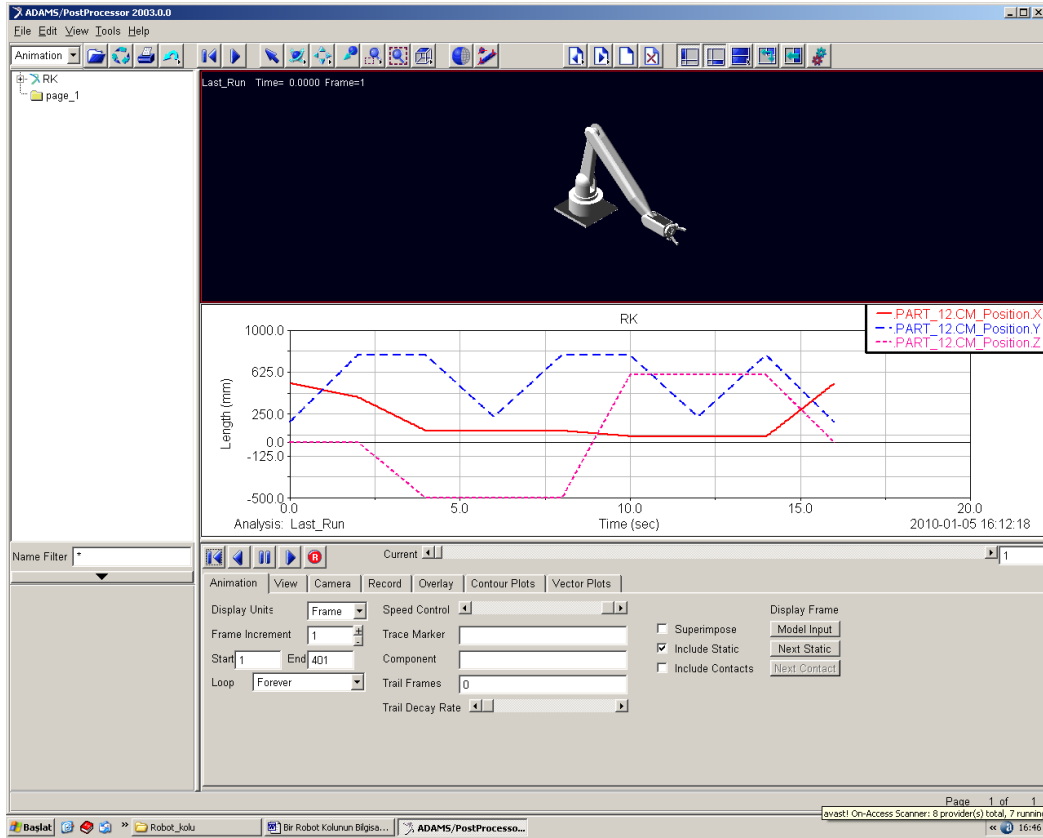


Şekil 4.17. Simülasyon Kontrol

Simülasyon izlendikten sonra grafik ekranına geçmek için aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi main toolbox menüsünden plotting seçilir.

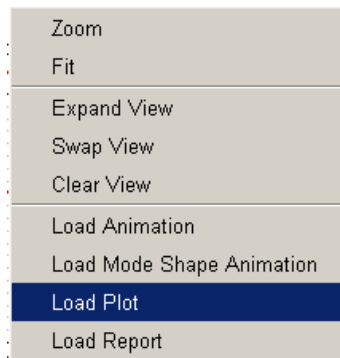


Şekil 4.18. Plotting



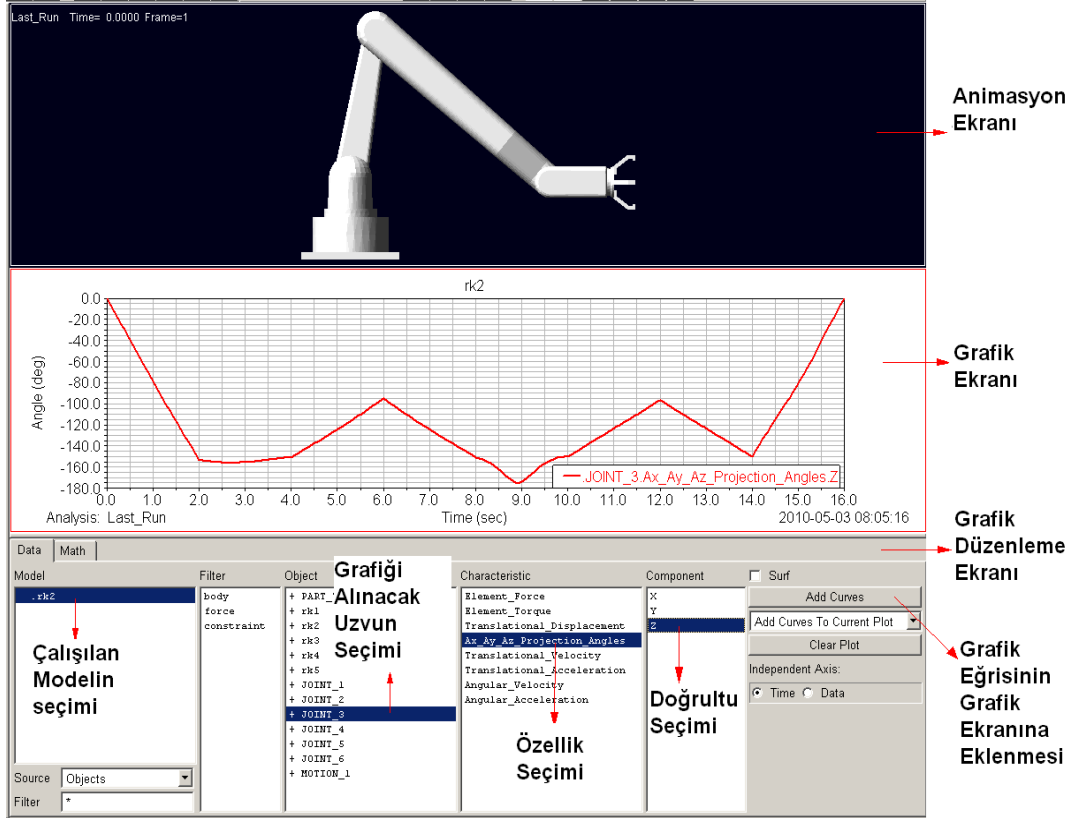
Şekil 4.19. Simülasyon ekranı

Açılan simülasyon ekranında 2 adet görüntü penceresi (alt tarafta simülasyon ayar penceresi ve sol tarafta görünüm ayar penceresi) mevcuttur. Görüntü pencerelerine simülasyon yada grafik eklenir. Bunun için yüklenecek pencere üzerine gelinerek sağ tıklanır. Simülasyon yüklemek için load animation, grafik yüklemek için load plot seçilir.



Şekil 4.20 Load animation ve load plot

Grafik düzenlemek için grafik ekranı üzerine tıklanır. Ayar pencerelerinde grafik ayarları açılır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi grafik ayarları yapılır.

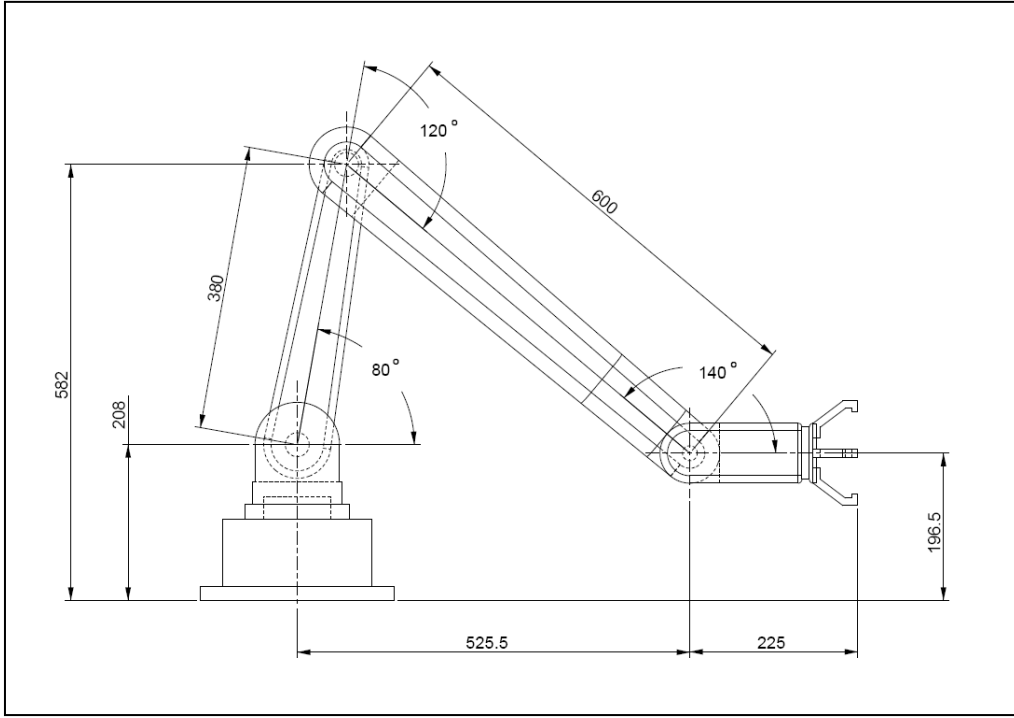


Şekil 4.21. Grafik düzenleme ekranı

Robot kolunun bilek ekleminin konum grafikleri ve eklemlerinin açıları grafikleri görüntülenir. Böylelikle robot kolunun hareketinin her saniyesindeki açı değerleri okunmuş olur.

4.4. Denklem Çözümü

Bu bölümde robot kolunun Denavit - Hartenberg metodu ile ileri kinematik çözümü için gerekli olan parametreler ve matrisler bulunur.



Şekil 4.22. Robot kolu ölçüleri

Tablo 4.2. Denavit - Hartenberg parametre değerleri

Mafsal	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
1	θ_d	208	0	0
2	θ_a	0	0	90
3	θ_b	0	380	0
4	0	0	600	0

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_d & -s\theta_d & 0 & 0 \\ s\theta_d & c\theta_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 208 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_a & -s\theta_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_a & c\theta_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_b & -s\theta_b & 0 & 380 \\ s\theta_b & c\theta_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

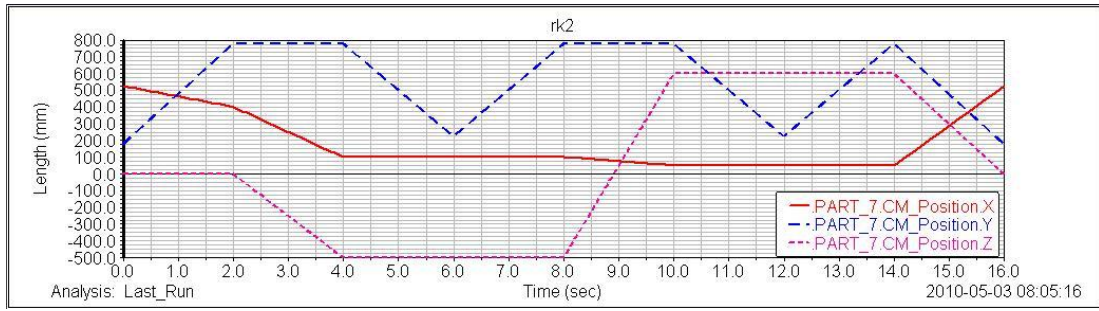
$${}^3_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 600 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} c\theta_d & -s\theta_d & 0 & 0 \\ s\theta_d & c\theta_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 208 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_a & -s\theta_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_a & c\theta_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_b & -s\theta_b & 0 & 380 \\ s\theta_b & c\theta_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 600 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

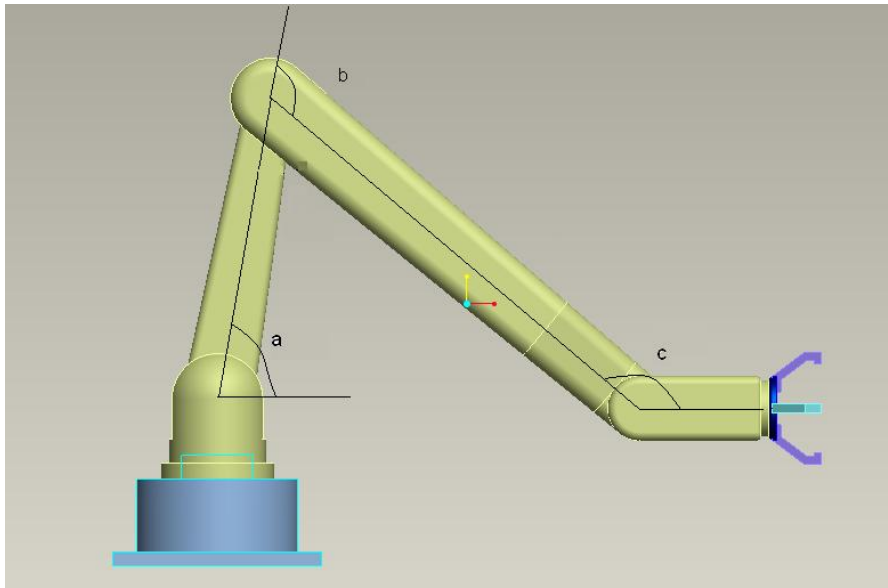
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

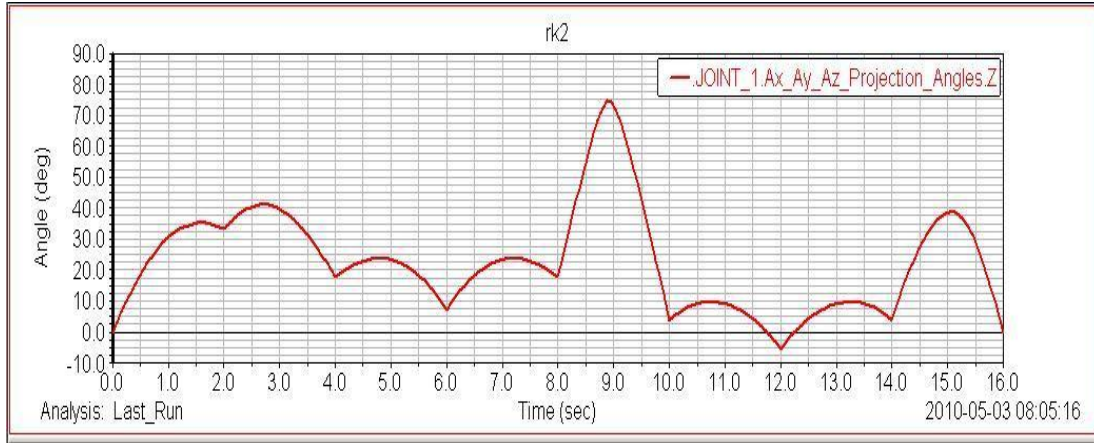
Bilgisayar destekli analiz programı (ADAMS) ile yapılan hesaplamalar sonucu konum ve açı grafikleri çıkar.



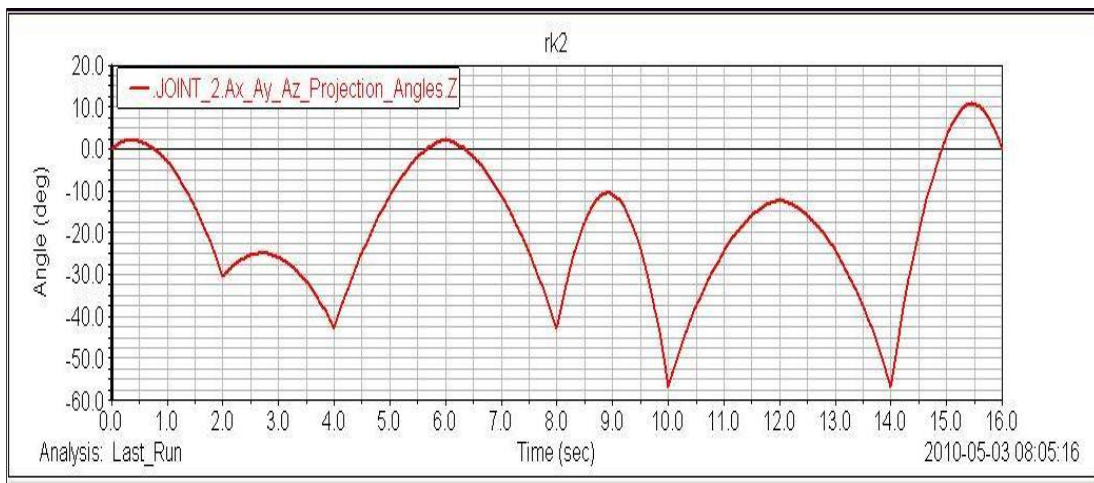
Şekil 5.1. X,Y,Z deki hareket



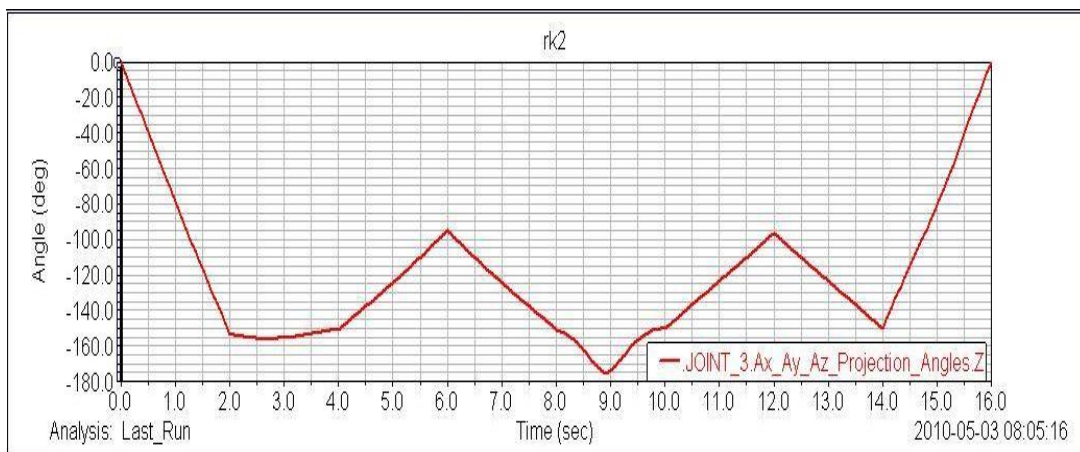
Şekil 5.2. “a”, “b”, “c” açılarının gösterimi



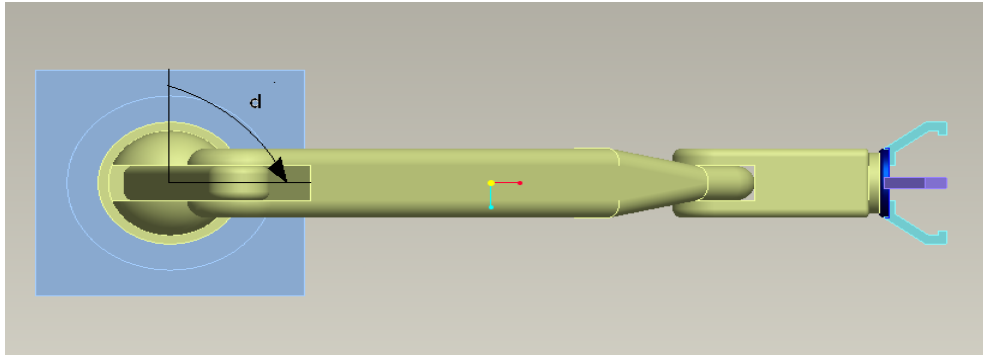
Şekil 5.3. “a” açısının değişimi



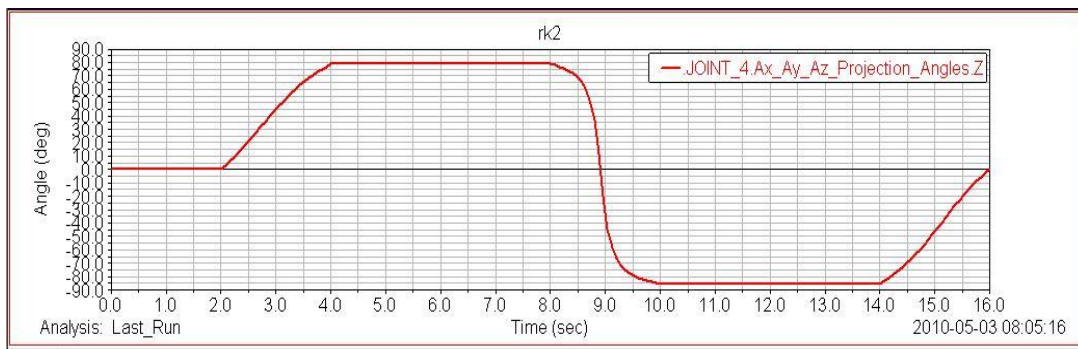
Şekil 5.4. “b” açısının değişimi



Şekil 5.5. “c” açısının değişimi



Şekil 5.6. “d” açısının gösterimi



Şekil 5.7. “d” açısının değışimi

Çıkan sonuçlar tablo halinde sıralanabilir. Bunun için mekanizmanın hareket saniyelerine denk gelen konum ve açı değerleri grafiklerden okunarak girilir.

Tablo 5.1. Konum ve açı değerleri

t(sn)	x	y	z	a	b	c	d
0	525.5	196.5	0	80	120	140	0
2	400	796.5	0	113.3	89.5	292.5	0
4	100	796.5	-500	97.5	77	290	78.7
6	100	225	-500	85.3	122.4	235	78.7
8	100	796.5	-500	97.5	77	290	78.7
10	50	796.5	600	83.333	63	290	85
12	50	225	600	74.375	108	235	85
14	50	796.5	600	83.75	63	290	85
16	525.5	196.5	0	80	120	140	0

Tablodaki x,y ve z değerleri robot kolunun bileğine hareket girmek için yazdığımız fonksiyonlarda mevcuttur. Aynı değerler konum grafiğinden de okunabilir. Bu değerlere karşılık gelen açı değerleri de grafiklerden okunarak tabloya girilir.

Sonuçların sağlamasını yapmak için belli bir saniyedeki açı değerleri tablodan okunarak matrislere konular ve matlab da çözüm yapılır. Çıkan sonuçlar tablo değerleri ile karşılaştırılır.

Cisim alma anı ($t=6sn$) için açı değerleri tablodan okunur.

$$\theta_a = 80+5.29 =85.3$$

$$\theta_b = -(120+2.37)=-122.4$$

$$\theta_d = 78.7$$

Matrislerin matlab ta yazılımı ve çözümü

$$T1=[\cos(\theta_d*(\pi/180)), -\sin(\theta_d*(\pi/180)), 0, 0; \sin(\theta_d*(\pi/180)), \cos(\theta_d*(\pi/180)), 0, 0; 0, 0, 1, 208; 0, 0, 0, 1];$$

$$T2=[\cos(\theta_a*(\pi/180)), -\sin(\theta_a*(\pi/180)), 0, 0; 0, 0, -1, 0; \sin(\theta_a*(\pi/180)), \cos(\theta_a*(\pi/180)), 0, 0; 0, 0, 0, 1];$$

$$T3=[\cos(\theta_b*(\pi/180)), -\sin(\theta_b*(\pi/180)), 0, 380; \sin(\theta_b*(\pi/180)), \cos(\theta_b*(\pi/180)), 0, 0; 0, 0, 1, 0; 0, 0, 0, 1];$$

$$T4=[1, 0, 0, 600; 0, 1, 0, 0; 0, 0, 1, 0; 0, 0, 0, 1];$$

$$T=T1*T2*T3*T4$$

$$T = \begin{bmatrix} 0.1565 & 0.1182 & 0.9806 & 99.9962 \\ 0.7823 & 0.5912 & -0.1961 & 499.9778 \\ -0.6029 & 0.7978 & 0 & 224.9590 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} X &= 99.9962 \\ Y &= 499.9778 \\ Z &= 224.9590 \end{aligned}$$

Bu değerlere tablodan bakıldığın da çözümlerin yüksek hassasiyette doğru olduğu görölür.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada bir robot kolunun kinematiği irdelenmiştir. Bu kinematik irdeleme sayesinde kolun hareketi için eklemlere hareket veren motorun programlanması için gereken açı değerleri bulunmuştur.

İlerleyen aşamalarda kola ve taşınacak olan yüke ağırlıklar girilerek eklemlere gelen tepki kuvvetleri bulunarak motorların güç hesapları yapılabilir. Koldaki gerilmeler hesaplanarak kol kalınlıklarında optimizasyon yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] EKİCİ, H.N., Mekanik Sistemlerin Hareket Analizlerinin Ve Simülasyonunun Bilgisayar Ortamında Gerçekleştirilmesi. 2008
- [2] İZGİ, V., Altı Eksenli Endüstriyel Robot Tasarımı. 2006
- [3] HACIOĞLU, Y., Bir Robotun Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrolü. 2004
- [4] SAYGILI, Ç., Scara Tipi Bir Robotun Tasarımı Ve Animasyonu. 2006
- [5] TONBUL, T. S., SARITAŞ, M., Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar Ve Yörünge Planlaması.2003
- [6] AYIZ, C., Endüstriyel Robotların Üstel Yöntem ile Kinematik Analizi. 2008
- [7] Msc Software “Adams/View Tutorials and Examples” 2005.
- [8] Msc Software “Adams/Engine Tutorials and Examples” 2005
- [9] Msc Software “Adams Student Guide” 2005
- [10] BİNGÜL, Z., KÜÇÜK, S., “Robot Tekniği 1” Birsen Yayınları 2005
- [11] SÖYLEMEZ, E., “Makine Teorisi-1, Mekanizma Tekniği” Birsen Yayınları 2007

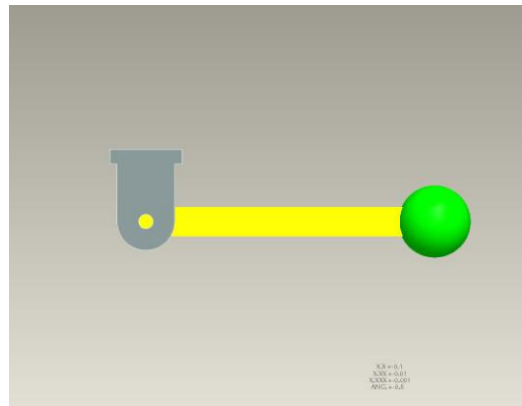
EKLER

EK A

SERBEST SALINIMLI SARKAÇIN ADAMS'DA KİNEMATİK HESAPLAMASI

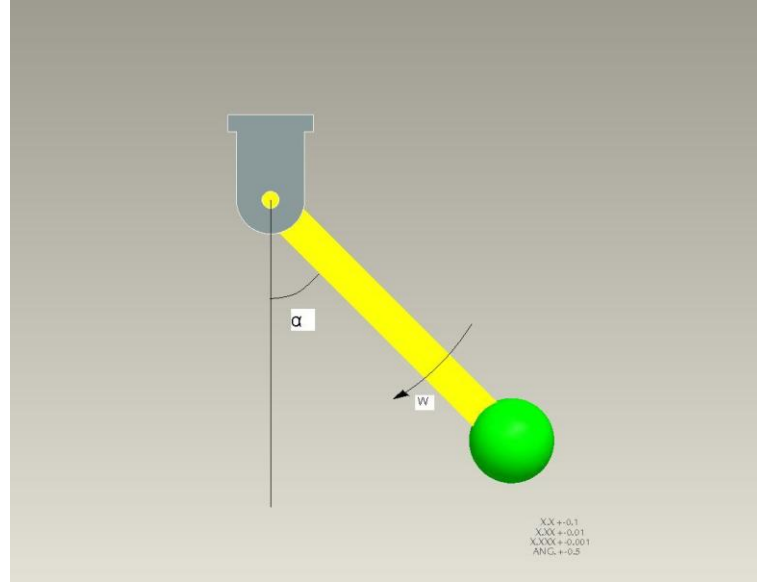
Dinamik Sistemleri tanımlarken aklımıza ilk gelen en basit örnek serbest salınımlı sarkaçtır. Bir sarkacın ucuna bir yük bağlayarak yatay pozisyondan serbest düşmeye bıraktığımızda sarkaç salınım hareketi yapar. Bu salınım hareketi sırasında yükün potansiyel enerjisi kinetik enerjiye dönüşür ve yük hız ve ivmeye sabit olur aynı zamanda zamanla pozisyonu ve mafsala uyguladığı yük değişir. Bu değişkenlerin hesaplanmasını enerji denklemi, hareket denklemleri ve ters kinematik denklemler ile yaparız. Ancak şimdi ki zamanda bu değişkenlerin adım adım değişimlerini görmek için Bilgisayar Destekli analiz programları ortaya çıktı. Biz bu tezde daha öncede bahsettiğim gibi ADAMS programını kullanacağız.

Dinamik hesaplaması yapılacak serbest sarkacın tasarımı Şekil1.1 ve Şekil1.2 görülmektedir.



Şekil A.1. Serbest sarkaç modeli

Sarkaç şekilindeki gibi ilk olarak yatayla paralel olacak konuma getirilir ve serbest bırakılır. Sarkacın hızının, ivmesinin ve sarkacın mafsala uyguladığı yükün grafikleri incelenir.



Şekil A.2. Serbest sarkaç hareketi

Uzunluk (L)= 40 cm

Genişlik (W)= 4 cm

Kalınlık (D) =2 cm

Kürenin Yarı Çapı (R)= 5 cm

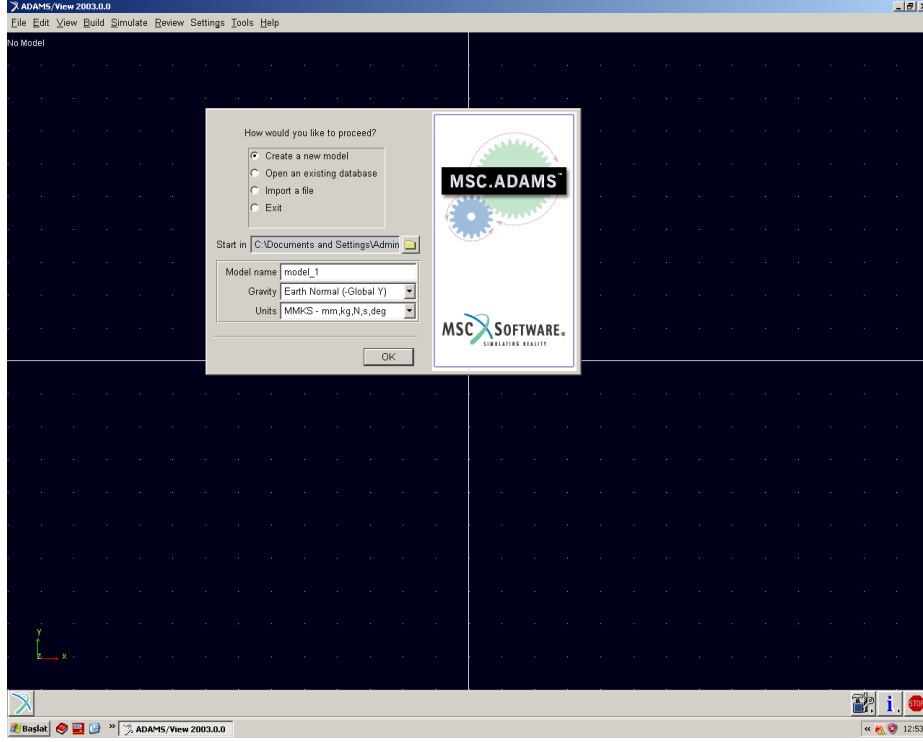
İlk Hız (V_{ilk}) =0

Bilgisayar Destekli Analiz (ADAMS) Programı ile çözüm.

Bu bölümde sarkacın Adam's programında analizinin nasıl yapıldığı adım adım resimlerle incelenir.

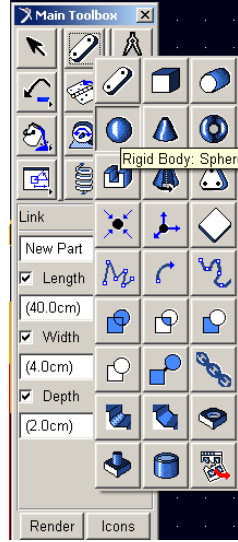
İlk olarak programı açmak için adams ikonunu tıkladığımızda karşımıza resimde görülen pencere çıkar, bu pencereden yeni bir model yaratmak için “ yeni model

yarat (creat a new model)” seçilir. Modeli oluşturulacağı klasör belirlenir ve programa geçilir.



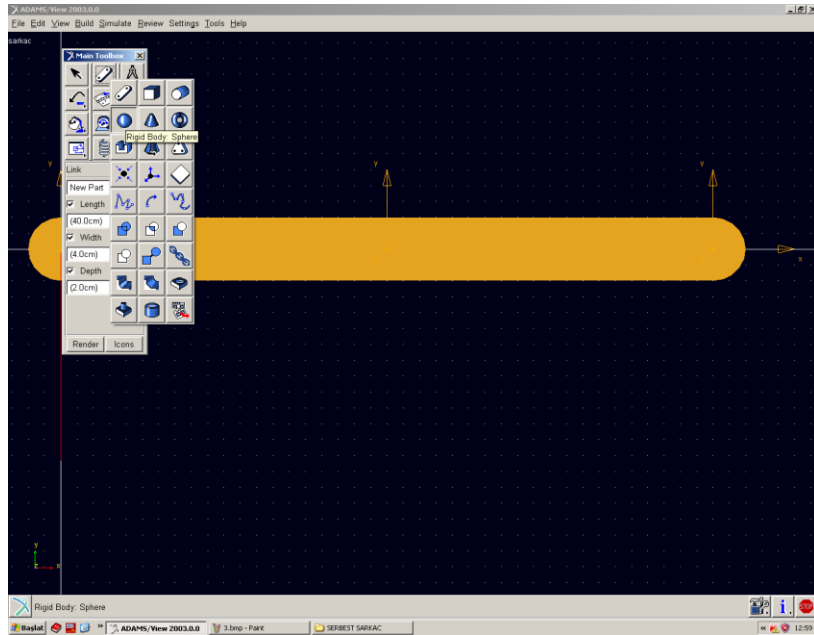
Şekil A.3. Adams programı açılış sayfası

Programa geçildiğinde açılan sayfanın sol tarafında araç kutusu (main toolbox) kutusu olduğunu görülür. Bu kutuda tasarım, analiz, animasyon ve görüntü almak için gerekli olan bütün gereçler mevcuttur. Bu çalışmada bir sarkaç analizi yapılacağı ve tasarımını bu programın arayüzünde gerçekleştireceği için ilk olarak main toolbox tan tasarım için olan gereçleri kullanılır.



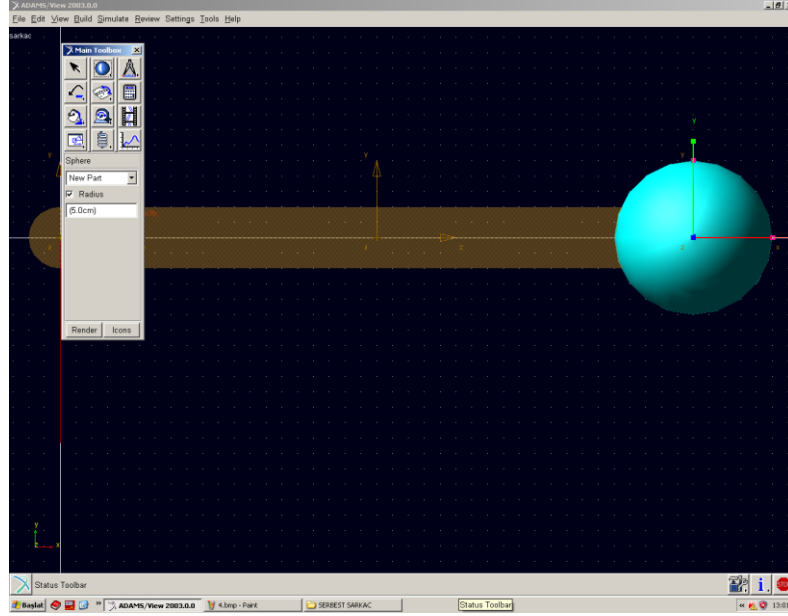
Şekil A.4. Araç kutusu

Görünen kutuda çubuk resmi üzerine sağ tıklanıldığında gerekli tasarım araçlarının çıktığı görülür. Tasarıma başlarken ilk olarak çubuk seçilerek topun salının yapmasını sağlayan parça çizilir. Bu parçayı çizmek için Şekil 1.5 deki gibi ilk olarak uzunluk, kalınlık ve genişlik girerek bir nokta tutulur ve çubuğun uzamasını istediğimiz yöne çekilir.



Şekil A.5. Çubuğun çizimi

Daha sonra salınım yapacak topu çizmek için küre resmi üzerine tıklanarak topun yarı çapı girilir ve küreyi oluşturmak istenen nokta işaretlenir.



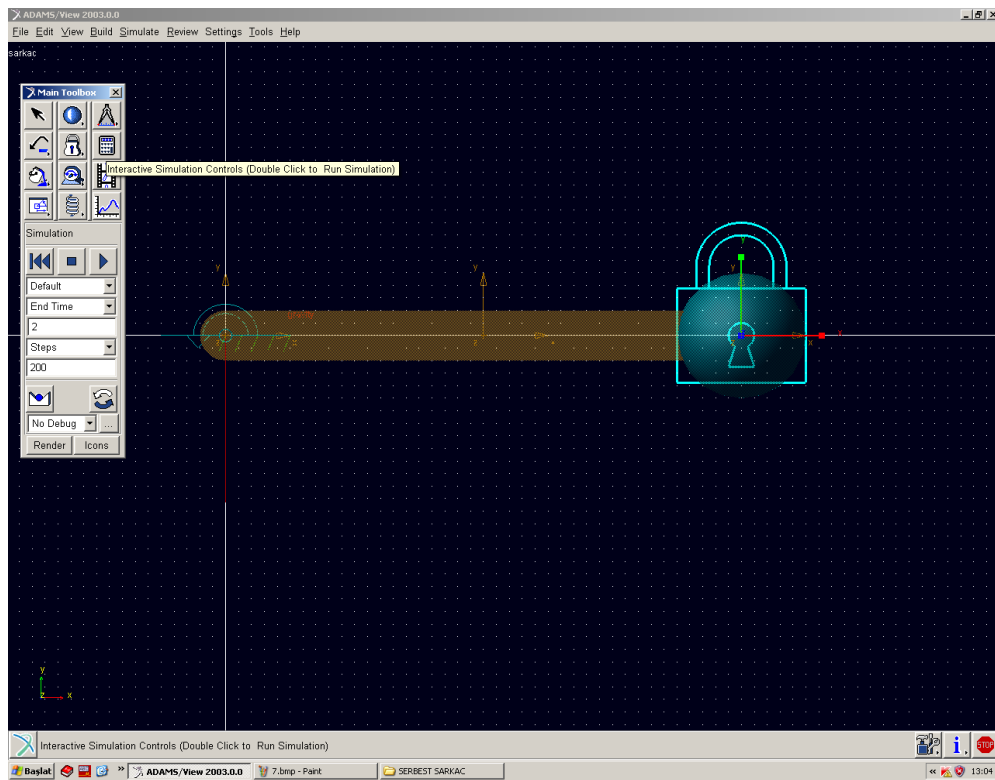
Şekil A.6. Kürenin çizimi

Tasarım tamamlandığında sıra bu parçaları birbirine bağlayacak ve hareketi sağlayacak eklemlerin oluşturulmasına gerilir.



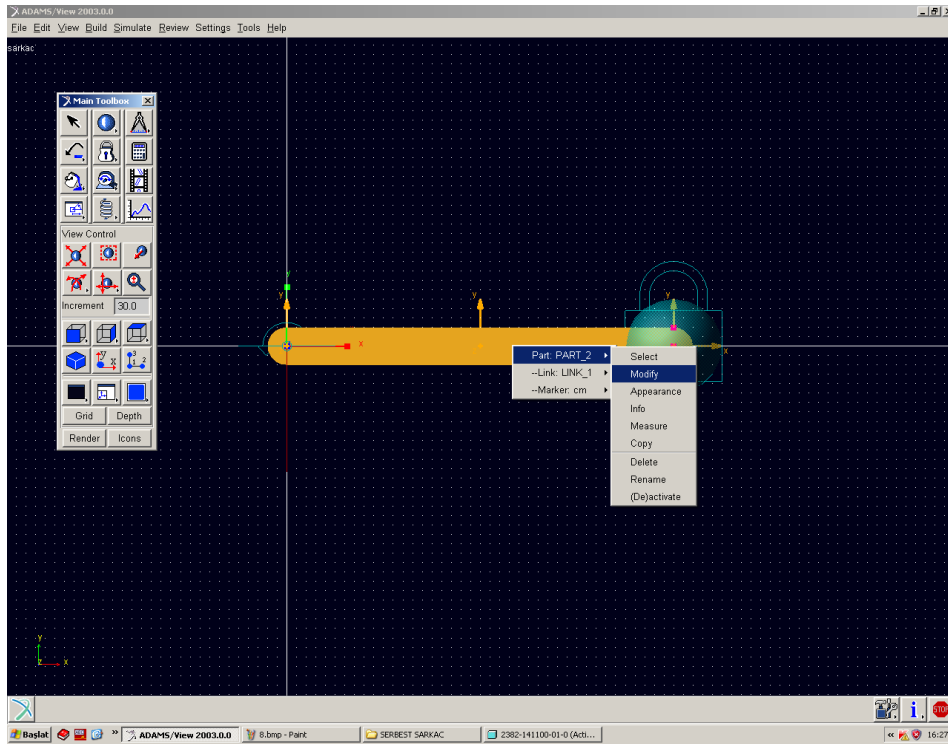
Şekil A.7. Mafsala araç kutusu

Bunun için ‘‘araç kutusu (main toolbox)’’ dan menteşe Őeklideki eklem üzerine sağ tıklanarak joint menüsü açılır. Bu kutudan ilk olarak menteşe Őeklindeki eklem kullanarak çubuğun etrafında salının yapacağı 0 noktasında yerleştirilir. Bu sayede sadece Rz serbest ve diğer serberstlik dereceleri sabitlenmiŐ olur. Bu Şekilde salının hareketini programa tanıtılmış olur. Daha sonra çubukla top birbirine sabit olduğu için kilit Őeklindeki eklem seçilerek topla çubuk üzerine uygulanır. Bu sayede bunların birbirinden bağımsız hareket etmesi engellenir. Eklemlerin model üzerindeki görünümleri Şekil A.8’de mevcuttur.

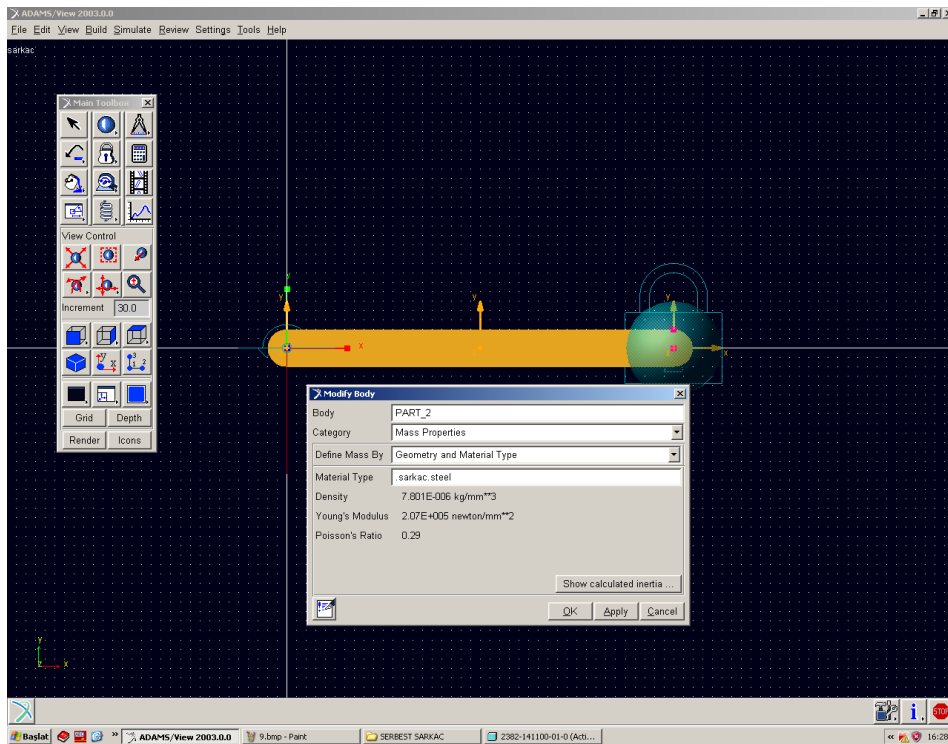


Şekil A.8. Mafsalların eklenmiş durumu

Bu iŐlemlerden sonra sistemin hareket sebebi olan sistem ağırlıkları girilir. Bunun için ağırlık girilecek olan parçanın üstüne gelerek sağ tuŐa basılır çıkan pencerelerden ‘‘parça özellikleri (part-modify)’’ seçilerek parça yoğunluğu girilir. Burada topa ve çubuğa elik kabul ederek elik yoğunlu girilir.



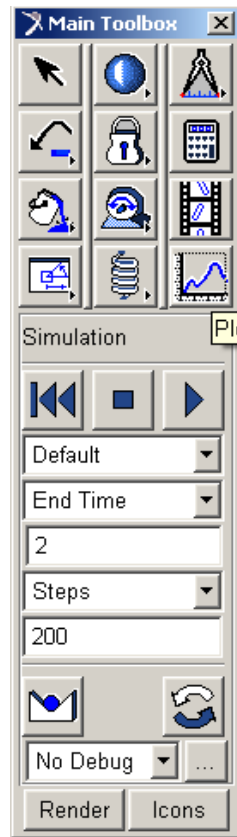
Şekil A.9 Parçalara özellik yükleme



Şekil A.10. Parçalara ağırlık girme

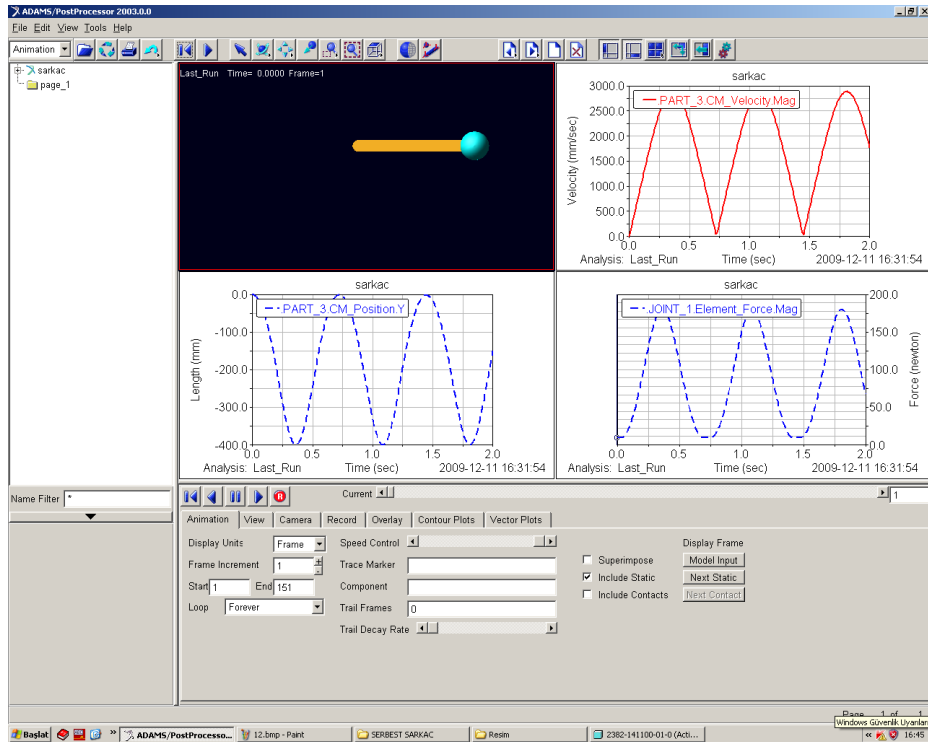
Sistem çalışmaya başladığında sisteme başka kuvvet uygulanmadığı için sarkaç yerçekiminin etkisiyle hareket etmeye başlar. Sisteme sürtünmeler ve ya başka bir sönümlenme eklenmediği İçin sistem kinetik enerjinin potansiyele, potansiyel enerjinin kinetiğe çevrilmesi ile sonsuza kadar salınım yapar.

Sistemin hareketini görebilmek için araç kutusundan hesap makinesi şeklinde butona basılır ve hareket özellikleri girilir. Bunun için hareket süresi ve bu hareketteki adım sayısı girilmesi yeterli olur. Hareket işlendikten sonra plot'a basılarak grafik (animasyon) ekranına geçilir.

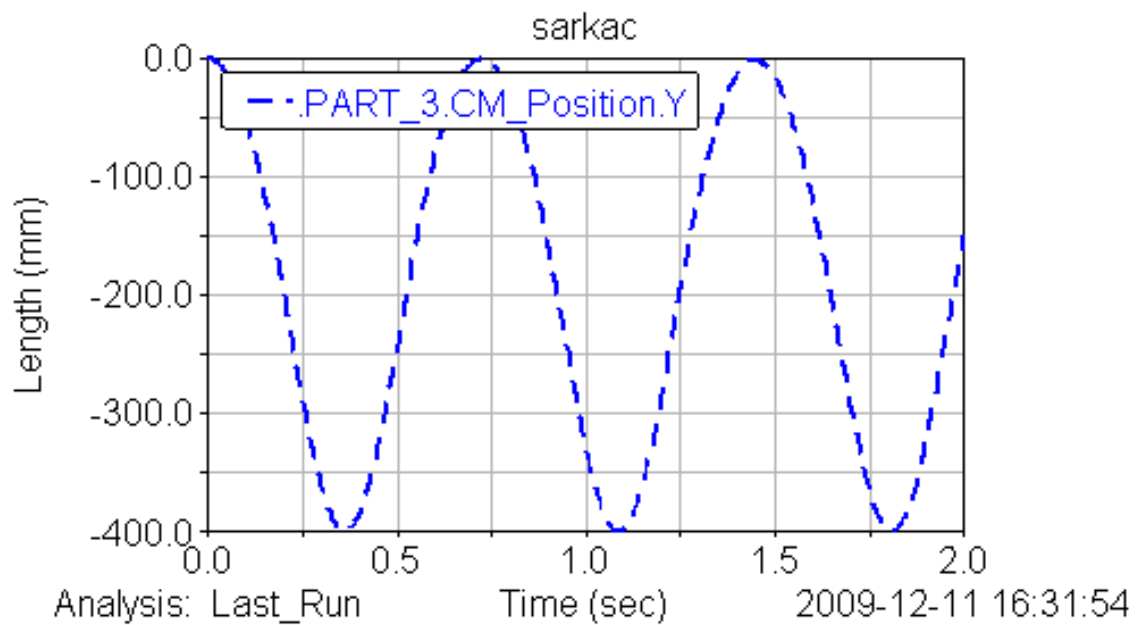


Şekil A.11. Simülasyon araç kutusu

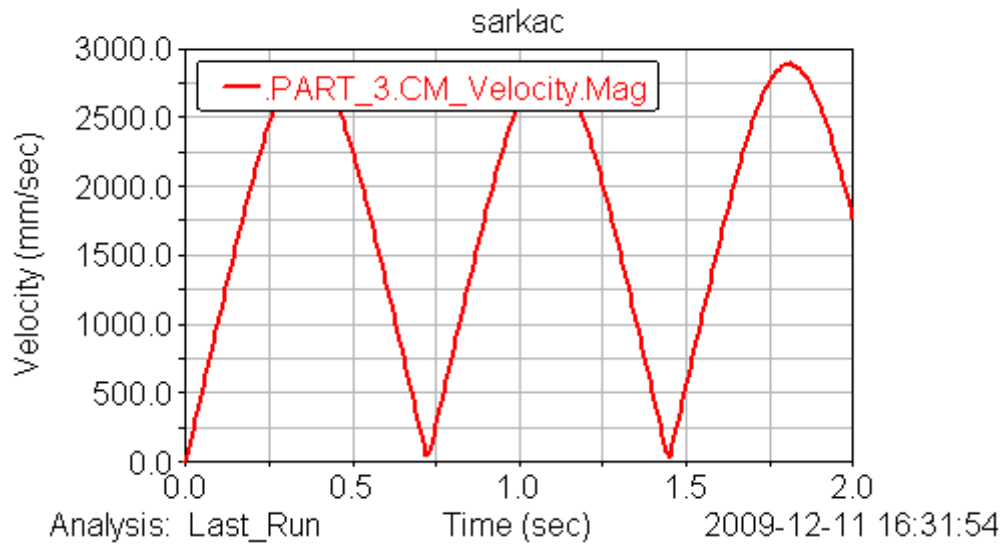
Bu ekran sayesinde sistemin hareket sırasındaki hızı, ivmesi, konumu ve ekleme gelen kuvveti grafikler halinde görebilir.



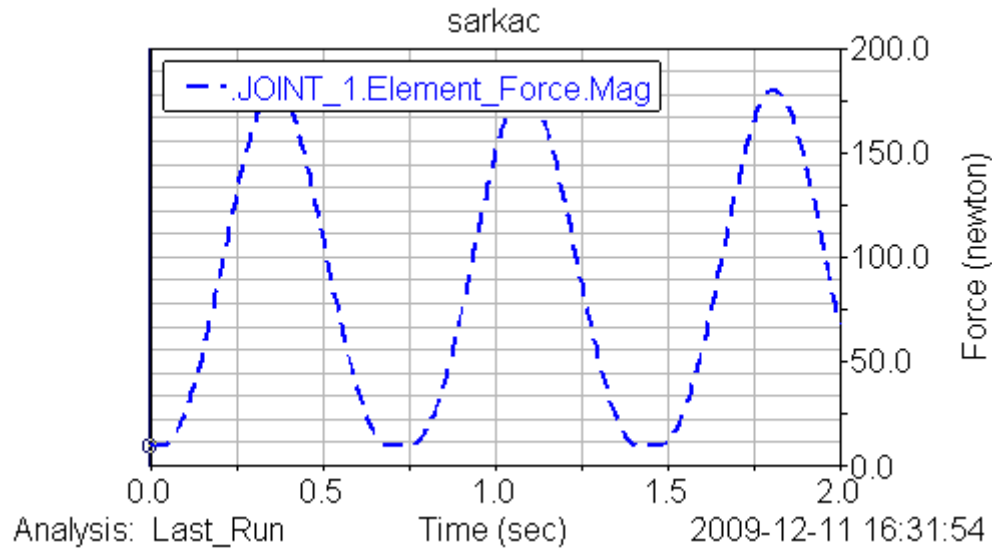
Şekil A.12. Simülasyon ekranı



Şekil A.13. Sarkacın Y eksenindeki hareketi



Şekil A.14. Sarkacın hızı



Şekil A.15. Sarkacın mafsala uyguladığı kuvvet

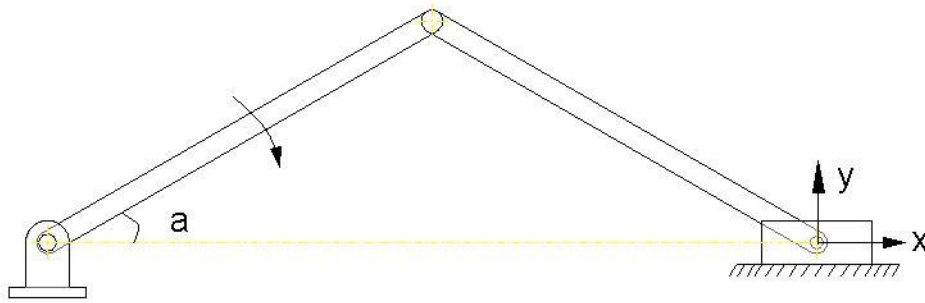
Sonuç

Grafiklerde topun Y eksenindeki değişiminin, hızını ve mafsala uyguladığı kuvvetin zamana bağlı değişimi görülür.

EK B

KRANK BİYEL MEKANİZMASININ ADAMS'DA KİNEMATİK HESAPLAMASI

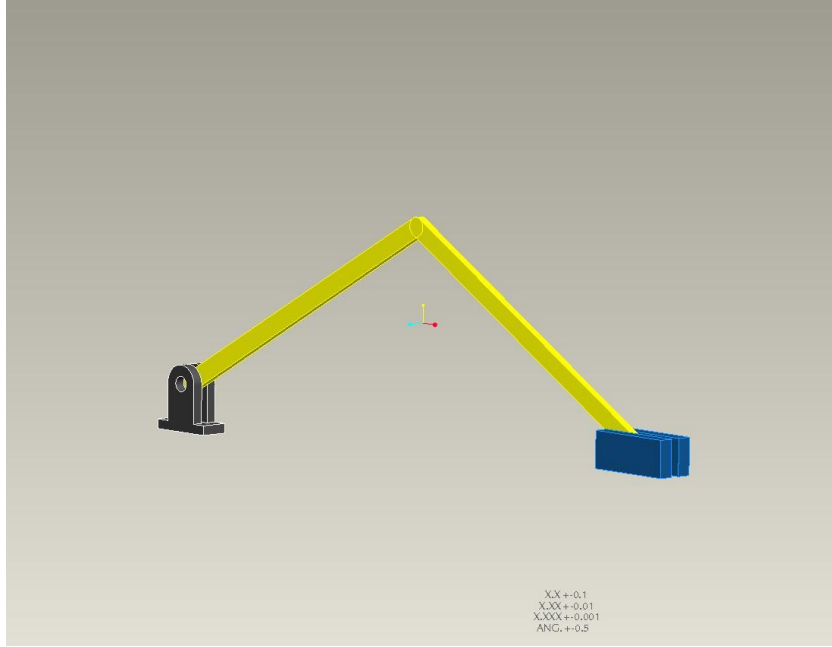
Analizini yapacak olan krank biyel mekanizması 2 uzuv, 2 döner mafsall ve bir adet kayar masaldan oluşmaktadır. Sistemin tasarımı aşağıda görülmektedir.



Şekil B.1. Krank biyel mekanizması

Bu sistemde yüklerden bağımsız olarak a acısının değişimiyle kayar mafsalın x yönündeki hareketini inceleyeceğiz.

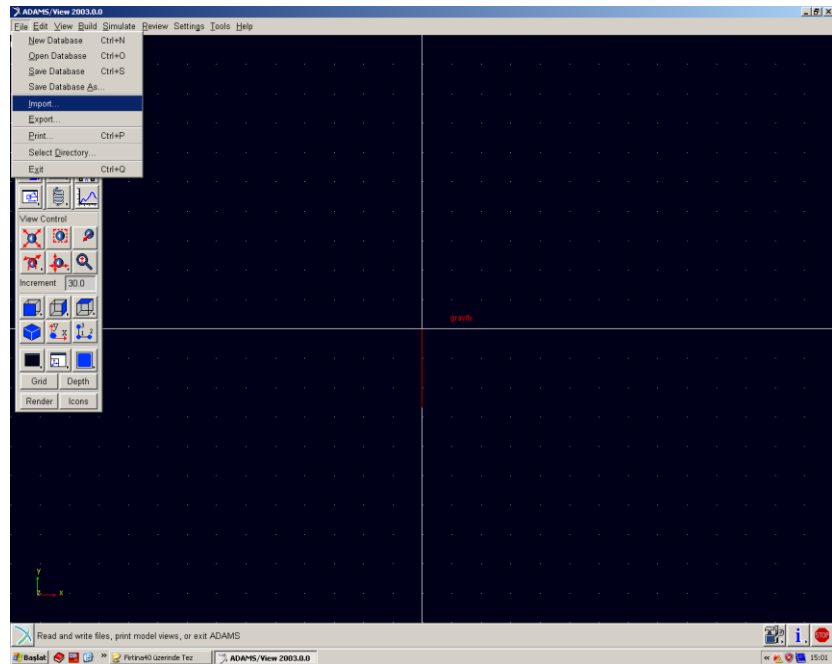
Adams programında bir mekanizmanın analizini yaparken sistemi sarkaç örneğinde görüldüğü gibi Adams programının ara yüzünde tasarlanabildiği gibi bir başka tasarım programında tasarlanan bir sistem de Adams programına aktarılabilir. Buna bir örnek teşkil etmesi amacıyla krank-biyel mekanizmasının analizini yaparken sistem bir tasarım programı olan PRO-Engineer programında tasarlanıp Adams programına aktarılacaktır.. Sistemin PRO-Engineer da tasarlanmış hali Şekil3.1'de mevcuttur.



Şekil B.2. Krank biyel mekanizmasının modeli

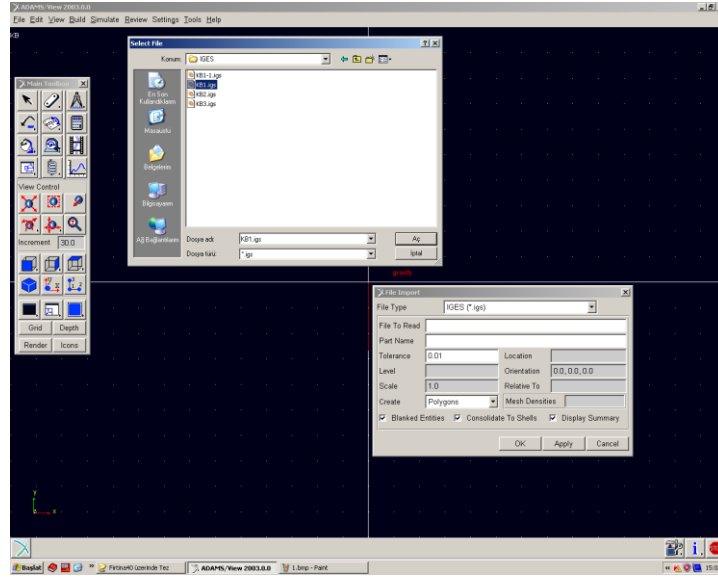
Sistemin Adams Programına Atılması ve Analiz

Program açıldığında FİLE ikonunun altından import seçilir.



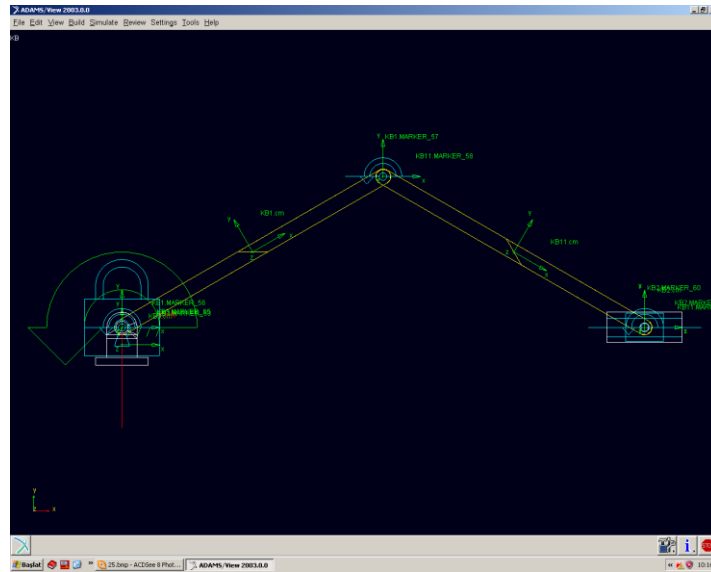
Şekil B.3. Adams programında import gösterimi

Karşımıza file import penceresi açılır. Açılan pencerede gerekli bilgiler (parça adı, parçanın bulunduğu klasör) girilerek mekanizmanın parçaları çalışma ekranına sırayla çağrılır.



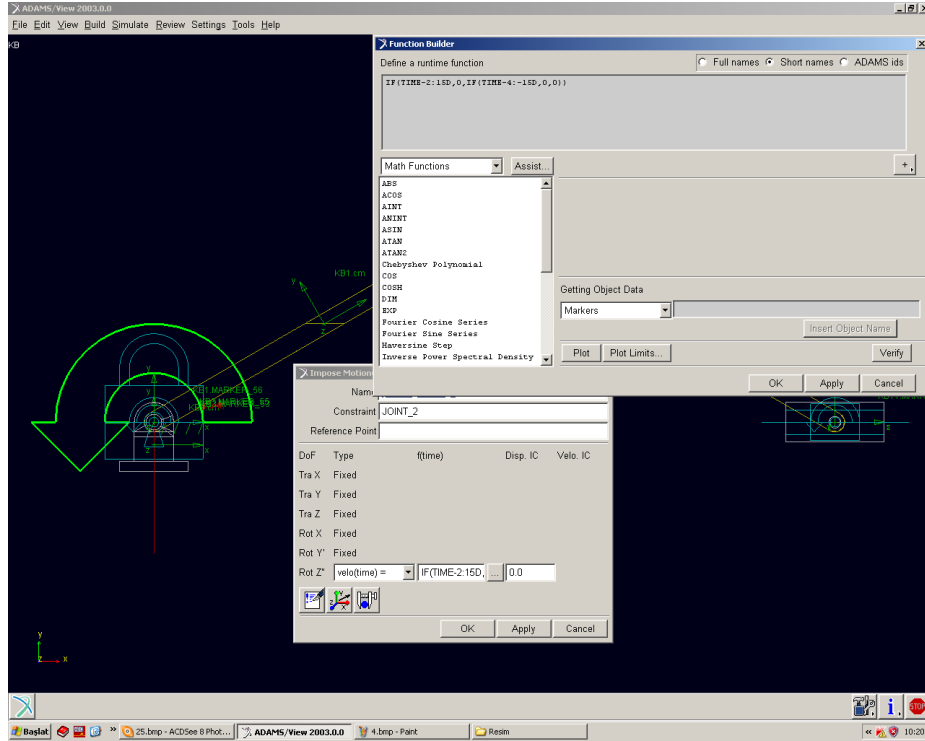
Şekil B.4. Çalışma ekranına parça çağırılması

Birbirinden bağımsız olarak gelen parçalar önce birbirlerine mafsallanır daha sonra malzemeleri atanır.



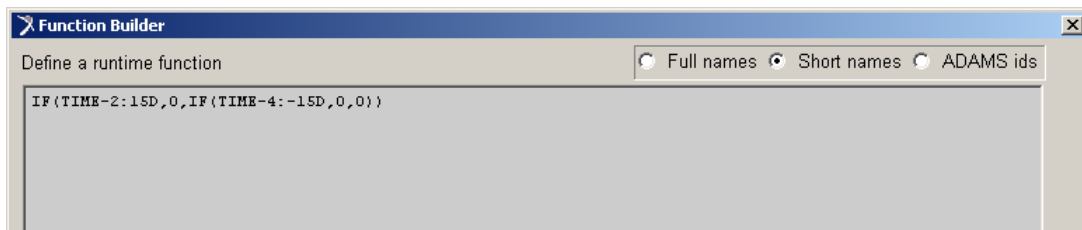
Şekil B.5. Mafsalların eklenmiş hali

Sistemde yüklerden bağımsız olarak hareketi inceleneceği için ve a açısının değişimiyle kayar mafsalsın x yönündeki hareketini inceleneceği için burada a açısına bir hareket tanımlanır. Bunun için a açısının değişimini sağlayan döner mafsalsın üzerinden hareket düzenleme ekranı açılır.



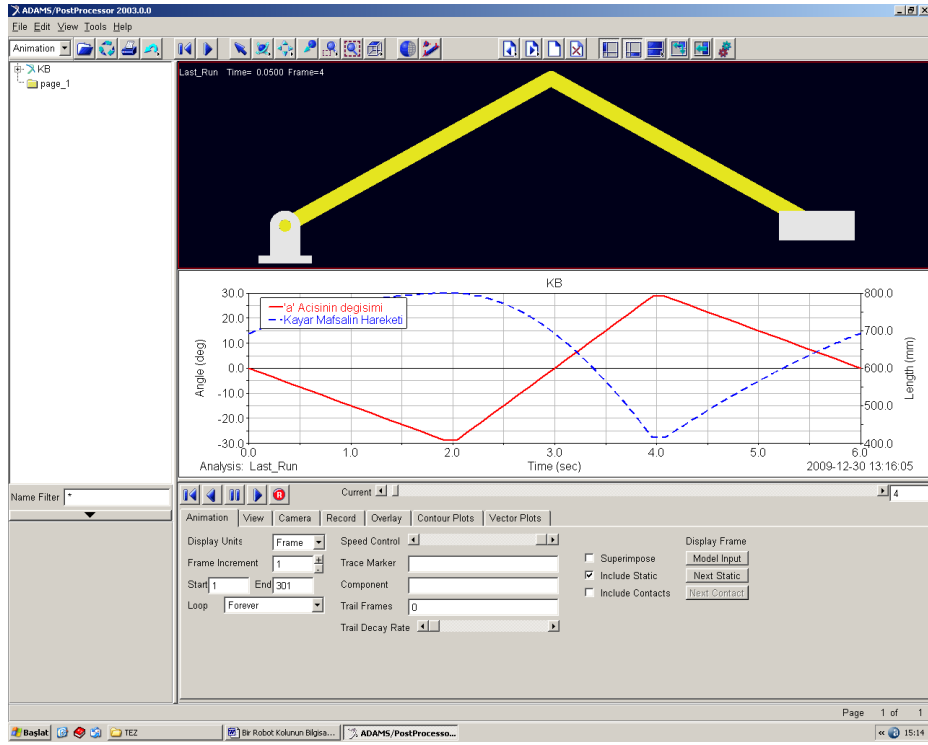
Şekil B.6. Sisteme hareket eklenmesi

Bu ekranda fonksiyon yazım kısmına a açısının ne kadar sürede kaç derece yapması isteniyorsa onun fonksiyonu yazılır. Bu analizde saniyede 15 derecelik bir hız girilir. Hareket 2 saniye (+) yönde, 2 saniye (-) yönde olarak tekrarlanır. Bunun için mafsala yazmamız gereken fonksiyon $IF (TIME-2:15D,0,IF (TIME-4:-15D,0,0))$ dir. (Şekil3.7)

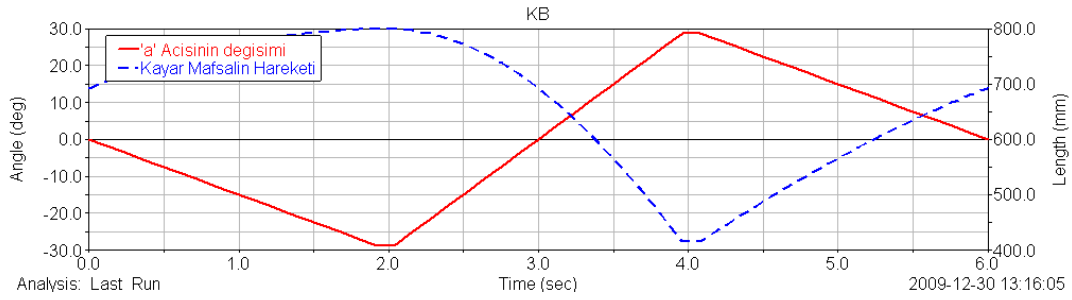


Şekil B.7. Fonksiyon yükleme

Simülasyonu çalıştırdığımızda a açısına bağlı olarak kayar mafsalin x ekseninde hareket ettiğini görülür ve bu hareketin grafiğini çıkartılır.



Şekil B.8. Simülasyon ekranı



Şekil B.9. “a” açısının değişimi ve kayar mafsalin hareket grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Demet YILMAZ, 02.02.1984 de Bandırma' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bandırma'da tamamladı. 2006 yılında İstanbul Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2006-2007 tarihleri arasında İstanbul'da Pakform otomatik paketleme makinaları firmasında mühendis olarak çalıştı. 2007 yılından itibaren 1.Ana Bakım Merkez Komutanlığı'nda mühendis olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk annesidir.