

**ALTI EKSENLİ KÜRESEL BİLEKLİ ENDÜSTRİYEL ROBOTLARIN
TERS KİNEMATİK ÇÖZÜMÜNE GEOMETRİK YAKLAŞIM**

YÜKSEK LİSANS

Yusuf BUYRUK

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Barış GÖKÇE

İNTERNET VE BİLİŞİM TEKNOLOJİLERİ YÖNETİMİ

ANABİLİM DALI

Haziran, 2015

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALTI EKSENLİ KÜRESEL BİLEKLİ ENDÜSTRİYEL
ROBOTLARIN TERS KİNEMATİK ÇÖZÜMÜNE
GEOMETRİK YAKLAŞIM**

Yusuf BUYRUK

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Barış GÖKÇE

**İNTERNET VE BİLİŞİM TEKNOLOJİLERİ YÖNETMİ
ANABİLİM DALI**

Haziran, 2015

TEZ ONAY SAYFASI

Yusuf BUYRUK tarafından hazırlanan “Altı Eksenli Küresel Bilekli Endüstriyel Robotların Ters Kinematik Çözümüne Geometrik Yaklaşım” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 26/06/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnternet ve Bilişim Teknolojileri Yönetimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman :Yrd. Doç. Dr. Barış GÖKÇE

Başkan : Doç. Dr. Alparslan DUYSAK
Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Üye :Yrd. Doç. Dr. Barış GÖKÇE
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bekir ÇENGELCİ
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

02.07.2015

Yusuf BUYRUK

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

ALTI EKSENLİ KÜRESEL BİLEKLİ ENDÜSTRİYEL ROBOTLARIN
TERS KİNEMATİK ÇÖZÜMÜNE GEOMETRİK YAKLAŞIM

Yusuf BUYRUK
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnternet ve Bilişim Teknolojileri Yönetimi Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Barış GÖKÇE

Bu araştırmada, altı eksenli küresel bilekli endüstriyel robotların ters kinematik denklemin basit geometrik denklemler yardımı ile çözülebileceği gösterilmiştir. Hedef konum bilgileri belirtildiğinde, endüstriyel robotun eklem açısı değerlerinin bu hedefe ulaşması için, alması gereken değerlerin hesaplanması işlemi ters kinematik çözüm olarak adlandırılır. Ayrıca bu çalışmada, öne sürülen bu çözüm yöntemi kullanılarak, Rhino3D üç boyutlu modelleme yazılımı içinde çalışan ve bir altı eksenli küresel bilekli endüstriyel robotun benzetiminin yapılabildiği bir eklenti geliştirilmiştir. Geliştirilen bu eklenti, Rhino3D yazılımı içinde bulunan, Grasshopper3D parametrik tasarım yardımcı programı içinde geliştirilmiştir. Böylece, benzetimi yapılan endüstriyel robot, parametrik yazılım ortamında, parametrik değişkenlerle kontrol edilebilmektedir. Bir endüstriyel robotun benzetiminin yapılması, tekillik, erişebilirlik, eksen limitlerinin doğrulanması ve çarpışma hatalarının tespit edilebilmesi için önemlidir. Bu çalışma, bu hataların ortadan kaldırılmasına katkı sağlayacaktır.

2015, x + 65 sayfa

Anahtar Kelimeler: Ters Kinematik, Endüstriyel Robotlar, Küresel Bilek, Parametrik Modelleme, Rhino3d, Grasshopper3d

ABSTRACT
M.Sc Thesis

A SIMPLE GEOMETRIC APPROACH FOR THE INVERSE KINEMATICS OF 6R
SERIAL MANIPULATORS WITH EULER WRIST

Yusuf BUYRUK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Internet and Informatics Management

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Barış GÖKÇE

In this research, a simple geometric approach proposed for the inverse kinematics of 6R serial industrial robot manipulators with Euler wrist. For an industrial robot, inverse kinematics refers to solving angular values of its joints to reach a given desired position and orientation values. Also in this research, using this geometric method, a plug-in for Rhino3D modeling software has been developed, in which a six axis industrial robot with a spherical wrist can be simulated in a simulation environment. This plug-in has been developed in Grasshopper3D parametric modeling environment which is running inside Rhino3D modeling software. In this way, the industrial robot, which is simulated, can be controlled with parametric values. Simulating an industrial robot is important for detecting singularities, catching reachability errors, catching exceeding angular limits errors and collision detection.

2015, x + 65 pages

Key Words: Inverse Kinematics, Industrial Robots, Euler Wrist, Parametric Modelling, Rhino3d, Grasshopper3d

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tezdanışmanım Yrd. Do. Dr. Barış GKE'ye teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolay eşim Nurşen BUYRUK'a ve oğlum Emre BUYRUK'a teşekkür ederim.

Yusuf BUYRUK
AFYONKARAHİSAR, 2015

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. ROBOT TEKNOLOJİSİ VE ENDÜSTRİYEL ROBOTLAR.....	2
2.1 Robot Teknolojisi	2
2.2 Endüstriyel Robotlar	2
2.2.1 Endüstriyel Robot Tanımı ve Sınıflandırılması.....	3
2.2.2 Endüstriyel Robotların Programlanması	3
2.3 Altı Eksenli Euler Bilekli Bir Endüstriyel Robotun Anatomisi.....	3
2.3.1 Eklemler ve Bağlantılar	4
2.3.2 Euler Bileği.....	7
2.3.3 Dirsek Açısı	8
2.3.4 Uç Çerçeve	8
2.3.5 Başlangıç Konumu	10
2.4 İleri ve Ters Kinematik.....	11
2.4.1 Dönüşüm Matrisi	11
2.4.2 İleri Kinematik.....	11
2.4.3 Ters Kinematik	12
2.5 Tekillik Durumu	17
2.5.1 Baş Üstü Tekillik (Sonsuz Çözüm) Durumu.....	17
2.5.2 Genişletilmiş Konum Tekillik Durumu.....	18
2.5.3 Bilek Tekillik (Sonsuz Çözüm) Durumu.....	18
2.6 Parametrik Tasarım Ortamı Benzetim Yazılımları.....	19
2.6.1 KUKA prc.....	19
2.6.2 HAL.....	20
2.6.3 Robots.IO.....	21
2.6.4 Diğer Yazılım Eklentileri	21

3. MATERYAL ve METOT	23
3.1 Kuka KR210 Endüstriyel Robot	23
3.1.1 Kuka KR210 Robot Manipülatörü	24
3.1.2 VKRC2 Kontrol Paneli.....	25
3.1.3 KCP El Kumanda Paneli	26
3.1.4 KRL (Kuka Robot Language) Robot Programlama Dili.....	27
3.2 Üç Boyutlu Modelleme Araçları.....	28
3.2.1 Rhino3D Modelleme Yazılımı	28
3.2.2 Grasshopper3D Parametrik Modelleme Yazılım Eklentisi	29
3.3 Yazılım Geliştirme Araçları.....	30
3.3.1 C# Programlama Dili.....	30
3.3.2 IronPython Programlama Dili	30
3.3.3 Visual Studio Yazılım Geliştirme Ortamı ve .Net Kütüphanesi	30
3.3.4 Atan2(y, x) Yöntemi.....	31
3.4 Geometrik Çözüm Yöntemi.....	32
3.4.1 Geometrik Çözüm İşlem Adımları	32
3.4.1.1 Euler Bileğinin Konumunun Bulunması.....	33
3.4.1.2 A1 Açısının Bulunması (İleri/Geri)	34
3.4.1.3 Baş Üstü Tekillik Durumu	35
3.4.1.4 Bilek ve Omuz Arasındaki Uzaklığın Hesaplanması	35
3.4.1.5 Erişilebilirlik Hatasının Hesaplanması	36
3.4.1.6 A2 ve A3 Açılarının Bulunması (Yukarı/Aşağı)	37
3.4.1.7 Genişletilmiş Konum Hatası	39
3.4.1.8 A4, A5 ve A6 Açılarının Bulunması (Artı/Eksi)	39
3.4.1.9 Euler Bileği İçin Sonsuz Çözüm Hatası	40
3.5 Endüstriyel Robot Benzetim Ortamı.....	42
4. BULGULAR.....	47
4.1 Geometrik Çözüm Yönteminin Doğrulanması	47
4.1.1 Sonuçların Benzetim Ortamında Doğrulanması.....	47
4.1.2 Sonuçların Endüstriyel Robot Üzerinde Doğrulanması	48
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	52
6. KAYNAKLAR.....	54
İnternet Kaynakları	58
ÖZGEÇMİŞ.....	59

EKLER	60
EK 1: Selçuklu Deseni Takım Yolu (APT kodu).....	60
EK 2: Konum ve Yönelim Değerleri İle Tanımlanmış Endüstriyel Robot Programı (KRL kodu)	62
EK 3: Eksen Açısı Değerleri İle Tanımlanmış Endüstriyel Robot Programı (KRL kodu)	64

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A1	Endüstriyel robotun birinci eksen açısı değeri
A2	Endüstriyel robotun ikinci eksen (omuz) açısı değeri
A3	Endüstriyel robotun üçüncü eksen (dirsek) açısı değeri
A4	Endüstriyel robotun dördüncü eksen açısı değeri
A5	Endüstriyel robotun beşinci eksen (bilek) açısı değeri
A6	Endüstriyel robotun altıncı eksen açısı değeri
W	Küresel Bilek Konumu
p_x	Küresel Bilek Konumunun X eksen değeri
p_y	Küresel Bilek Konumunun Y eksen değeri
p_z	Küresel Bilek Konumunun Z eksen değeri
w_x	Küresel Bilek Ekleminin XZ düzlemindeki yansıtılmış görüntüsünün X eksen değeri
w_y	Küresel Bilek Ekleminin XZ düzlemindeki yansıtılmış görüntüsünün Y eksen değeri
w_z	Küresel Bilek Ekleminin XZ düzlemindeki yansıtılmış görüntüsünün Z eksen değeri
s_x	Omuz ekleminin XZ düzlemindeki yansıtılmış görüntüsünün X eksen değeri
s_y	Omuz ekleminin XZ düzlemindeki yansıtılmış görüntüsünün Y eksen değeri
s_z	Omuz ekleminin XZ düzlemindeki yansıtılmış görüntüsünün Z eksen değeri
d	Omuz ekleminin ile küresel bilek ekleminin arasındaki uzaklık
u	Endüstriyel robotun üst kol bağlantı uzunluğu
f	Endüstriyel robotun ön kol bağlantı uzunluğu

Kısaltmalar

FK	Forward Kinematics (İleri Kinematik)
IK	Inverse Kinematics (Ters Kinematik)
PLC	Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)
SDK	Software Development Kit (Yazılım Geliştirme Kiti)
IDE	Integrated Development Environment (Tümleşik Geliştirme Ortamı)
API	Application Programming Interface (Uygulama Geliştirme Arayüzü)
KRC	Kuka Robot Controller (Kuka Robot Kontrol Paneli)
KCP	Kuka Control Panel (Kuka El Kumanda Paneli)
KRL	Kuka Robot Language (Kuka Robot Programlama Dili)
CAD	Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAM	Computer-Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörü üzerinde, robotun başlangıç konumunda omuz, dirsek ve bilek eklemleri ve uç nokta	4
Şekil 2.2	Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün yedi adet bağlantı bileşeni (İnt.Kyn.3)	5
Şekil 2.3	Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün altı adet bağlantı eklemi ve bu eklemlerin dönme eksenleri (İnt.Kyn.3)	6
Şekil 2.4	Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatöründe, robotun başlangıç konumunda üst kol, ön kol ve el bağlantıları ile dirsek açısı	8
Şekil 2.5	Kuka KR210 Quantec endüstriyel robot manipülatöründe, robotun başlangıç konumunda uç çerçeve	9
Şekil 2.6	İleri ve ters kinematik arasındaki bağlantının şematik gösterimi	12
Şekil 2.7	Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün ileri/geri ve yukarı/aşağı konumları	16
Şekil 2.8	Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün baş üstü tekillik durumu (Anonim 2003)	17
Şekil 2.9	Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün genişletilmiş konum tekillik durumu (Anonim 2003)	18
Şekil 2.10	Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün bilek tekillik durumu (Anonim 2003)	19
Şekil 3.1	Kuka KR210 altı eksenli küresel bilekli endüstriyel robot manipülatörü	25
Şekil 3.2	VKRC2 Kuka endüstriyel robot kontrol kabini	26
Şekil 3.3	Kuka KCP el kumanda paneli	27
Şekil 3.4	Grasshopper3D parametrik tasarım ortamı ekran görüntüsü	29
Şekil 3.5	Geometrik çözüm akış şeması	32
Şekil 3.6	A1 açısı, el uzunluğu, uç çerçeve ve küresel bilek	33
Şekil 3.7	Kuka KR210 endüstriyel robot modeli için robotun ileri ve geri durumları için iki farklı A1 açısı (İnt.Kyn.3)	34
Şekil 3.8	Kuka KR210 endüstriyel robot üzerinde A1 açısı sıfır iken küresel bilek ve omuz ekleminin XZ düzlemindeki konumları (Anonim 2003) .	35

Şekil 3.9	Kuka KR210 endüstriyel robot modeli için robotun dirsek konumunun yukarı ve aşağı durumları için iki farklı A2 ve A3 açısı (İnt.Kyn.3)	37
Şekil 3.10	Üst kol, ön kol ve uzaklık değerleri ile üç kenarı bilinen üçgen oluşur...	38
Şekil 3.11	Grasshopper3D endüstriyel robot benzetim ortamı bileşenleri	43
Şekil 3.12	Ters Kinematik bileşenine ait kod parçası	44
Şekil 3.13	Grasshopper3D endüstriyel robot benzetim ortamı ekran görüntüsü	45
Şekil 4.1	Selçuklu deseni	47
Şekil 4.2	Benzetim ortamında KR 210 endüstriyel robot manipülatörü ve selçuklu desenine ait takım yolu	48
Şekil 4.3	Koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile hedef tanımlanarak yapılan robot programının ekran görüntüsü	48
Şekil 4.4	Koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile hedef tanımlanarak yapılan robot programının KCP el kumanda paneli ekranındaki görüntüsü	49
Şekil 4.5	Endüstriyel robotun eksen açıları ile hedef tanımlanarak yapılan robot programının ekran görüntüsü	49
Şekil 4.6	Endüstriyel robotun eksen açıları ile hedef tanımlanarak yapılan robot programının KCP el kumanda paneli ekranındaki görüntüsü	50
Şekil 4.7	Endüstriyel robot programlarının yürütülmesi	50
Şekil 4.8	Koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile yapılan endüstriyel robot programı işlem ürünü (solda) ve endüstriyel robot eksen açıları ile yapılan endüstriyel robot programı işlem ürünü (sağda)	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Bazı endüstriyel robot üreticilerinin, endüstriyel robotun başlangıç konumu için kabul etmiş oldukları, başlangıç açısı değerleri	11
Çizelge 2.2 Bu çalışmada, robotun başlangıç konumunda, eksen açıları ve eklemlerin dönme eksenleri çizelgede belirtildiği şekilde varsayılan olarak kabul edilmiştir	11
Çizelge 3.1 Bu çalışmada kullanılacak olan KR210 endüstriyel robot manipülatörüne ait teknik veriler çizelgede belirtilmiştir (Anonim 2000)	24
Çizelge 3.2 Kuka KR20 endüstriyel robot manipülatörü eksen limitleri ve açısal hız limit değerleri	25

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Endüstriyel robotlar günümüz otomasyon teknolojilerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Altı eksenli endüstriyel robotlar geniş bir çalışma uzayına sahip olmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle altı eksenli ve ardışık üç eksenin bir noktada kesişmesi ile oluşmuş Euler bilekli endüstriyel robotlar (KUKA KR 210, ABB IRB 6600, MOTOMAN ES165D, gibi...) otomasyon teknolojilerinde çok fazla tercih edilir. Ancak, altı eksenli bir endüstriyel robotun yapısı, matematik işlemler ile hesaplanabilmesi açısından oldukça karmaşıktır. Euler bilekli endüstriyel robotların ters kinematik denklemlerinin çözümü, eklem kaçıklıklı endüstriyel robotlara göre daha kolaydır. Bu nedenle Euler bilekli endüstriyel robotlar günümüz otomasyon teknolojilerinde oldukça yaygın olarak kullanılır. Bu çalışmada altı eksenli Euler bilekli bir endüstriyel robotun ters kinematik denklemi geometrik olarak incelenmiş ve ters kinematik çözüm için basit geometrik yöntem öne sürülmüştür. Bu yöntem kullanılarak parametrik modelleme ortamı içinde altı eksenli Euler bilekli endüstriyel robotun benzetiminin yapılmasına olanak sağlayan bir eklenti yazılmış ve çalışmanın sonuçları paylaşılmıştır.

Bir endüstriyel robotun yazılım ve donanım olarak kontrol edilebilmesi, endüstriyel robotların bilgisayar ortamında benzetimlerinin yapılabilmesi, çarpma kontrolü, erişilebilirlik, eksen limitlerinin aşılması, tekillik gibi hataların tespit edilebilmesi ve endüstriyel robotun bilgisayar ortamında çevrimdışı programlanabilmesi için bir endüstriyel robotun ileri yönlü ve ters yönlü kinematik hesaplamalarının yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, öne sürülen geometrik yöntemin doğruluğunun test edilmesi için, öne sürülen geometrik yöntem ile geliştirilen parametrik modelleme ortamı eklenti yazılımı ile endüstriyel robotun bilgisayar ortamında benzetimi yapılmıştır. Ayrıca, öne sürülen geometrik yöntemin doğruluğunun test edilmesi için, endüstriyel robotun izlemesi gereken yörüngeleri tanımlayan bir takım yolu için, endüstriyel robotun alması gereken açı değerleri yine bu geometrik yöntem ile elde edilmiştir. Bu takım yolu ile bir üretim yapılmıştır. Ayrıca bu takım yolundan yola çıkarak elde edilen eksen açıları ile hedef tanımlanarak yine aynı üretim yapılmış ve üretimin sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. ROBOT TEKNOLOJİSİ VE ENDÜSTRİYEL ROBOTLAR

2.1 Robot Teknolojisi

Robot kelimesi, ilk defa olarak Çek yazar Karel Čapek'in 1920 yılında yazdığı "Rossum'un Evrensel Robotları" adlı eserinde yer almış ve daha sonra tüm dünyada kullanılmaya başlanmıştır. Çek dilinde "köle" anlamına gelmektedir. Eserde robotlar insanlara hizmet etmek için üretilmiştir (İnt.Kyn.1).

1940'lı yıllarda Isaac Asimov robotlarla ilgili roman ve hikayeleriyle teknolojiye ışık tutmuş, hatta robotların davranışları ile ilgili kanunlar önermiştir. Bunlar;

- a. Birinci Kanun: Robot, hiçbir zaman insana zarar verecek hareketler yapmamalı, ancak, insanın zarar görebileceği durumlarda hareketsiz kalmamalıdır.
- b. İkinci Kanun: Birinci kanunu çiğnememek şartı ile, robot her zaman insana itaat etmelidir.
- c. Üçüncü Kanun: Birinci veya ikinci kanunları çiğnememek şartı ile, robot kendini korumalıdır (Clarke 1993).

Robot sözcüğü, Amerikan Robot Endüstrisi Birliği (RIA) tarafından, programlanmış değişik hareketlerle, malzeme, parça, takım veya özel araçlar taşıyabilen, yeniden programlanabilme özelliğine sahip, çok amaçlı bir manipülatör" olarak tanımlanmaktadır (Arıkan 2010).

2.2 Endüstriyel Robotlar

Robot deyince insan benzeri makineler akla gelse de robotların çok azı insana benzer. Ancak endüstriyel robotların büyük çoğunluğunun insan koluna benzediği söylenebilir. Günümüzde endüstriyel robotların en büyük kullanım alanı endüstriyel üretim ve montaj hatlarıdır. Özellikle otomotiv endüstrisinde çok sayıda robot kullanılmaktadır. Bunların çoğu kol şeklindeki robotlardır. Bunlar parçaları monte eden, birleştiren, kaynak ve boya yapan robotlardır.

2.2.1 Endüstriyel Robot Tanımı ve Sınıflandırılması

ISO 8373 standardında, bir endüstriyel robot, endüstriyel uygulamalarda kullanılan sabit veya hareketli olabilen, üç veya daha fazla programlanabilir eksene sahip, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir çok amaçlı manipülatör şeklinde tanımlanmıştır (Anonim 2012).

Endüstriyel robotlar yaygın olarak, eklemli (mafsallı), SCARA, delta (paralel) ve kartezyen olmak üzere dört grupta sınıflandırılırlar (İnt.Kyn.2).

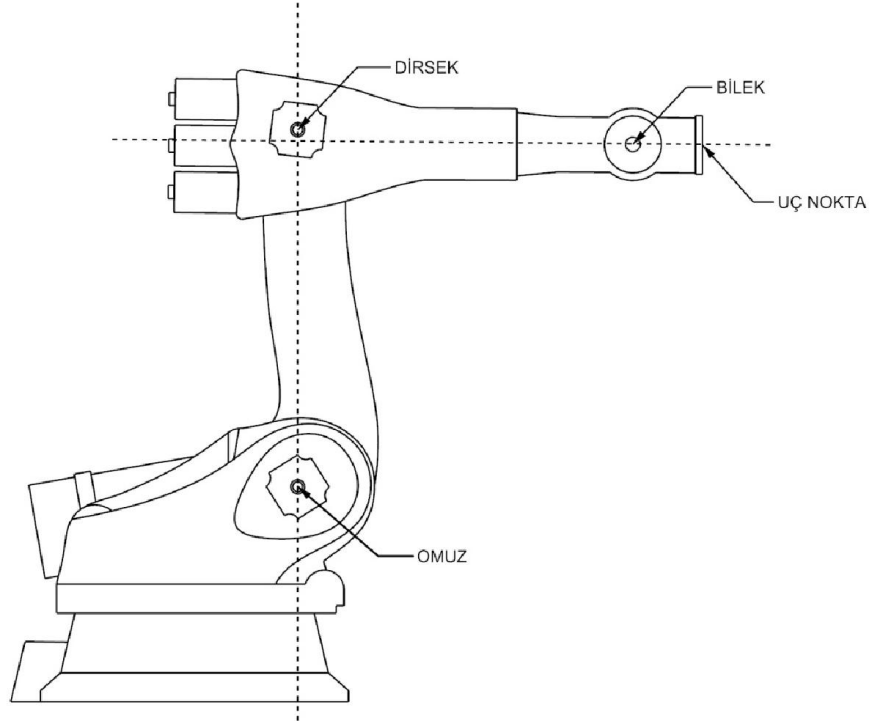
2.2.2 Endüstriyel Robotların Programlanması

Endüstriyel robotlar çevrimiçi ve çevrimdışı olmak üzere iki farklı şekilde programlanabilirler. Çevrimiçi programlama; robotun izlemesi gereken komutların sırası ile robotun hareket ettirilmesi ve kaydedilmesi ile yapılır. Çevrimdışı programlama ise; bilgisayar ortamında robotun izlemesi gereken komutların bilgisayar programı yardımıyla oluşturulması ile yapılır. Çevrimdışı programlama yapılırken robotun karşılaşılabileceği hataların önceden tespit edilmesi gerekir. Bu nedenle çevrimdışı programlama oluşturulurken çarpışma, erişilebilirlik, eksen limitlerinin aşılması ve teklik gibi hataların tespit edilebilmesi açısından endüstriyel robotun bilgisayar ortamında benzetiminin yapılması gerekir. Endüstriyel robotun bilgisayar ortamında benzetiminin yapılabilmesi için ise belirlenen hedef doğrultusunda endüstriyel robotun açı değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu işlem, ters kinematik çözüm ile yapılmaktadır (Bottazzi and Fonseca 2006).

2.3 Altı Eksenli Euler Bilekli Bir Endüstriyel Robotun Anatomisi

Altı eksenli Euler bilekli tipik bir endüstriyel robot yedi adet bağlantı ve bu bağlantıların bağlanma noktası olan altı adet eklemden oluşur. Şekil 2.1'de Kuka marka KR210 model bir endüstriyel robotun başlangıç pozisyonu gösterilmektedir. Endüstriyel robot üreticileri tarafından üretilen Euler bilekli altı eksenli endüstriyel robotlarda genellikle bu eklemler omuz eklemi, dirsek eklemi, bilek eklemi ve uç nokta robotun başlangıç konumunda aynı düzlemde bulunurlar ve omuz ile dirsek eklemi

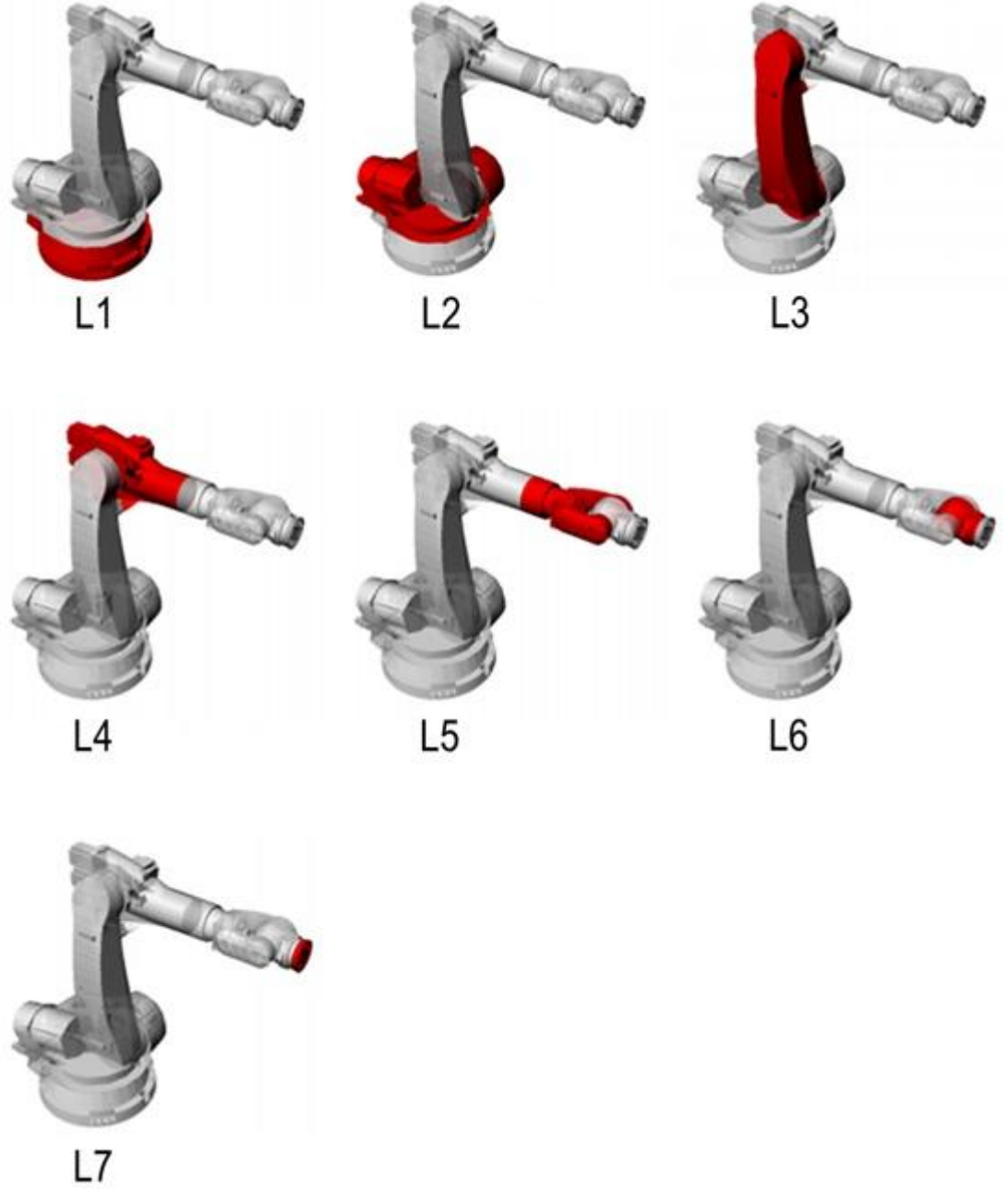
dikey olarak, bilek ve uç nokta ise yatay olarak hizalanmıştır. Burada, omuz eklemi ikinci dönme eklemi olup gövdenin alt kısmında konumlandırıldığı görülmektedir. Üçüncü dönme eklemi olan dirsek ekleminin omuz ekleminin üst kısmında konumlandırıldığı ve omuz eklemi ile dikey olarak hizalandığı görülür. Şekilde 2.1’de bilek eklemi ve uç nokta başlangıç konumunda yatay olarak hizalandığı görülmektedir (Anonim 2000).



Şekil 2.1 Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörü üzerinde, robotun başlangıç konumunda omuz, dirsek ve bilek eklemleri ve uç nokta.

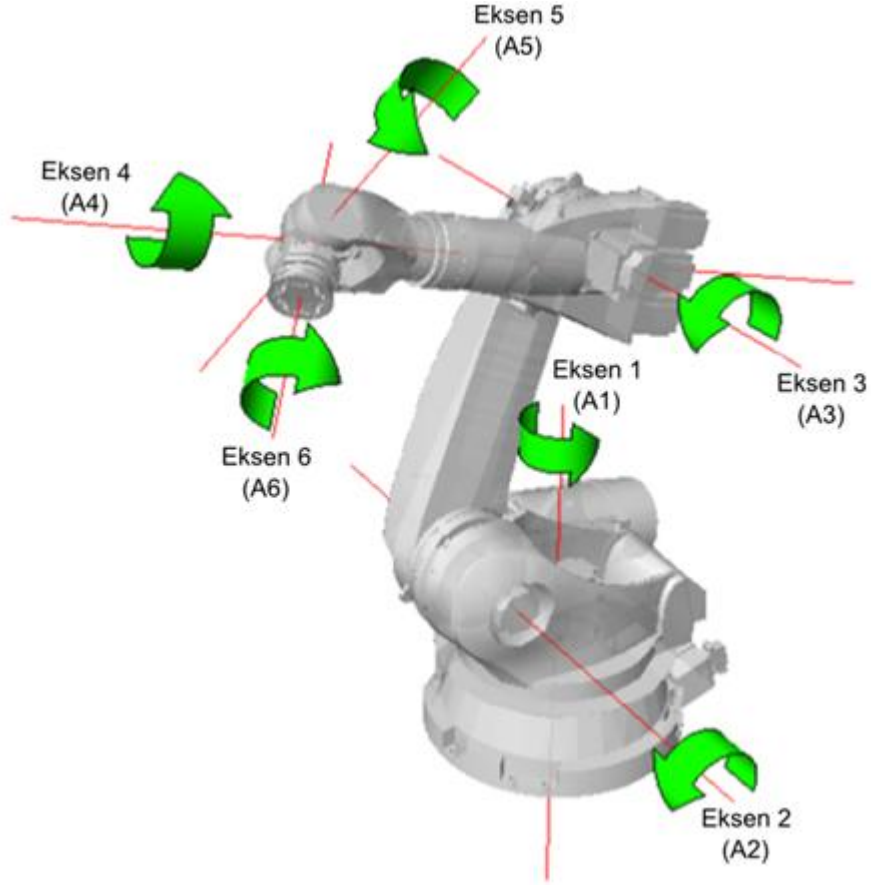
2.3.1 Eklemler ve Bağlantılar

Altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robot yedi adet bağlantı ve bu bağlantıların bağlanma noktaları olan altı adet eklemden oluşur. Şekil 2.2’de KR210 endüstriyel robot manipülatörünün yedi adet bağlantı bileşeni gösterilmiştir. Bu şekilde, L3 bileşeni endüstriyel robotun üst kol bağlantısını, L4 ve L5 bileşenleri endüstriyel robotun ön kol bağlantısını, L6 ve L7 bileşenleri endüstriyel robotun el bağlantısını oluşturur.



Şekil 2.2 Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün yedi adet bağlantı bileşeni (İnt.Kyn.3).

Şekil 2.3'te Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün altı adet bağlantı eklemi ve bu eklemlerin dönme eksenleri gösterilmiştir. Bu şekilde, A4, A5 ve A6 bağlantı eklemlerinin kesişim noktası endüstriyel robotun küresel bilek eklemi, A2 bağlantı eklemi endüstriyel robotun omuz eklemi, A3 bağlantı eklemi endüstriyel robotun dirsek eklemi gösterir.



Şekil 2.3 Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün altı adet bağlantı eklemi ve bu eklemlerin dönme eksenleri (İnt.Kyn.3).

Bu çalışmada, çalışmaya konu olan ve çalışmada sıkça kullanılacak olan eklemler ve bu eklemler arasında kalan uzaklıklar aşağıdaki şekilde adlandırılmış ve tanımlanmıştır.

- a) Omuz
- b) Üst Kol
- c) Dirsek
- d) Ön Kol
- e) Bilek
- f) El
- g) Uç Nokta

Omuz: Endüstriyel robotun ikinci dönme eklemidir. Y ekseninde dönme yapar. Robotun başlangıç konumunda dirsek eklemi ile dikey olarak hizalanmıştır.

Üst Kol: Omuz ve dirsek eklemlerinin arasındaki bağlantıdır. Robotun başlangıç konumunda dikey konumdadır.

Dirsek: Endüstriyel robotun üçüncü dönme eklemidir. Y ekseninde dönme yapar. Üst kol ve ön kol bağlantılarının bağlanma noktasıdır. Robotun başlangıç konumunda omuz eklemi ile dikey olarak hizalanmıştır.

Ön Kol: Dirsek ve bilek eklemlerinin arasındaki bağlantıdır. Robotun başlangıç konumunda yatay konumda hizalanmış olmayabilir.

Bilek: Endüstriyel robotun beşinci dönme eklemidir. Y ekseninde dönme yapar. Ayrıca dördüncü ve altıncı eklemlerin dönme eksenleri bu noktada kesişir. Bu sayede, bu nokta küresel serbestlik kazanır. Robotun başlangıç konumunda uç nokta ile yatay olarak hizalanmıştır.

El: Bilek ile uç nokta arasındaki bağlantıdır. Robotun başlangıç konumunda yatay olarak hizalanmıştır.

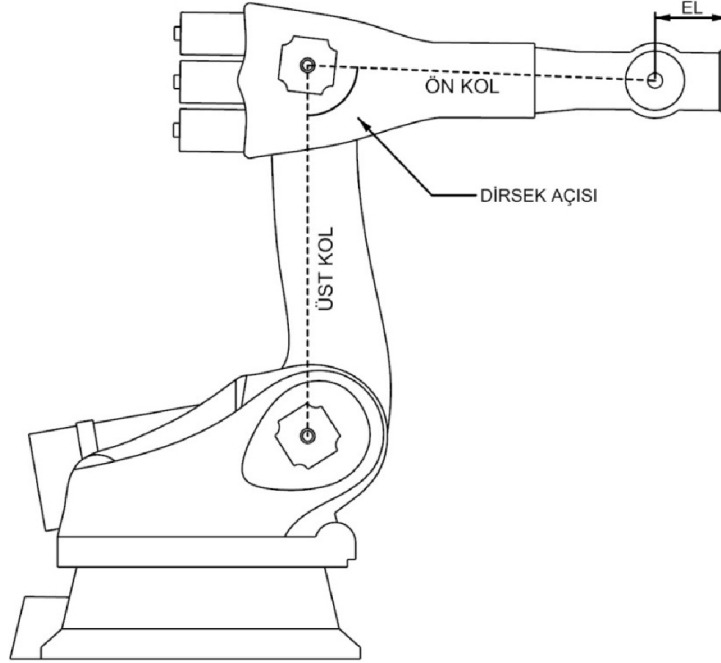
Uç Nokta: Robotun uç noktasıdır. Ters ve ileri yönlü kinematik denklem çözümlerinde kullanılan uç çerçeve, bu noktaya konumlandırılır. Robotun başlangıç konumunda, bilek eklemi ile yatay olarak hizalanmıştır.

2.3.2 Euler Bileği

Euler bileği, endüstriyel robotun ardışık son üç eksenin bir noktada kesişmesi ile ortaya çıkan bağlantı eklemidir. Bunun sonucunda bu bağlantı eklemi küresel bir serbestlik kazanır. Bu sayede, matematik olarak hesaplanabilme açısından karmaşık bir yapıda olan altı eksenli bir endüstriyel robotun yapısı, daha basit matematik işlemler ile ifade edilebilir (Aydın ve Küçük 2006).

2.3.3 Dirsek Açısı

Altı eksenli endüstriyel robot manipülatörlerinde robotun başlangıç konumunda üst kol genellikle dikey olarak hizalanmış olmasına rağmen, ön kol yatay olarak hizalanmış olmayabilir. Bu durumda ters kinematik çözümün yapılabilmesi için robotun başlangıç konumunda üst kol ile ön kol arasında kalan açının önceden bilinmesi gerekir. Bazı robot modellerinde, robotun başlangıç konumunda bu açı $\pi/2$ değerinden küçük iken, bazı robot modellerinde robotun başlangıç konumunda bu açı $\pi/2$ değerinden büyük olabilir. Bu çalışmada kullanılacak olan Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörü için dirsek açısı değeri Şekil 2.4'te görülmekte olup, Kuka KR210 endüstriyel robotun başlangıç konumunda bu değer $\pi/2$ değerinden küçüktür (Anonim 2000).



Şekil 2.4 Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatöründe, robotun başlangıç konumunda üst kol, ön kol ve el bağlantıları ile dirsek açısı.

2.3.4 Uç Çerçeve

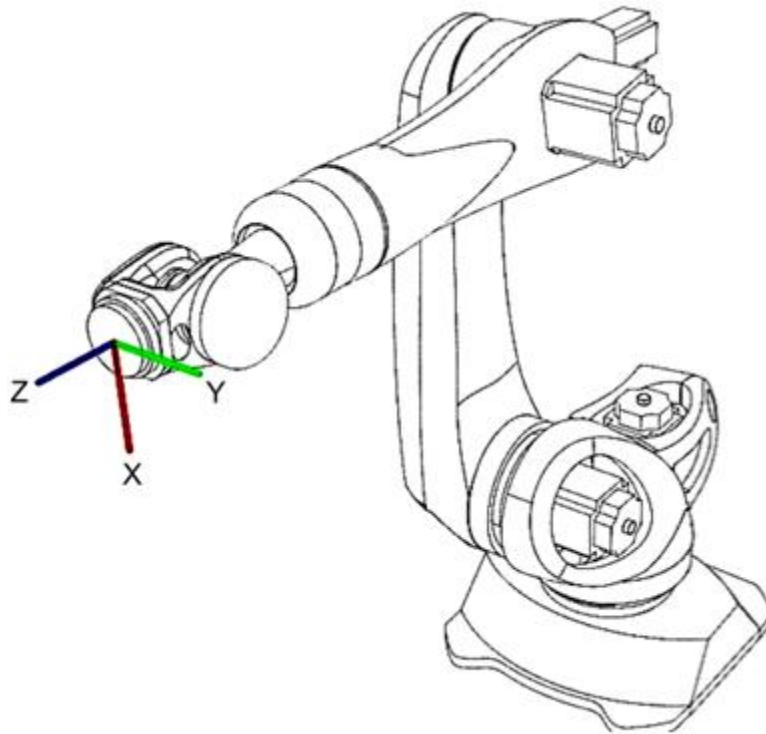
Endüstriyel robotun uç noktasına yerleştirilen koordinat sistemidir. Konum bilgilerinin tanımlandığı bir nokta (uç nokta) ile yönelim bilgilerinin tanımlandığı üç adet birim vektörden oluşur. Robotun başlangıç noktasında Euler bileği ile yatay olarak hizalanmıştır.

Birçok robot üreticisi (ABB, KUKA, vd.) tarafından üretilen endüstriyel robot modellerinde, robotun başlangıç konumunda uç çerçeve dönüşüm matrisi ve yine bu çalışmada da, endüstriyel robotun başlangıç konumunda, uç çerçevesi için varsayılan değer, Denklem 2.1'de tanımlanmıştır.

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ -1 & 0 & 0 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Bazı endüstriyel robot üreticilerinin (Motoman, Fanuc, vs.) endüstriyel robotun başlangıç konumu için, varsayılan olarak kabul ettikleri uç çerçeve değeri Denklem 2.1'deki uç çerçeve değerinden farklı olabilir. Bu çalışmanın sonuçları bu endüstriyel robot üreticilerinin üretmiş oldukları endüstriyel robotlar için de uyarlanabilir.

Şekil 2.5'te Kuka KR210 Quantec model endüstriyel robot üzerinde konumlandırılmış olan uç çerçeve gösterilmiştir. Uç çerçevenin X birim vektörü kırmızı, Y birim vektörü yeşil ve Z birim vektörü mavi olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Kuka KR210 Quantec endüstriyel robot manipülatöründe, robotun başlangıç konumunda uç çerçeve.

2.3.5 Başlangıç Konumu

Endüstriyel robot üreticileri robotun başlangıç konumu için farklı açı değerlerini varsayılan değer olarak kabul ederler. Çizelge 2.1'de bu açı değerleri için örnekler verilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan KR210 model endüstriyel robot için ikinci açı değeri $-\pi/2$, üçüncü eksen için açı değeri $\pi/2$ olmasına rağmen bu çalışmanın sonuçlarının tüm endüstriyel robotlara uygulanabilmesi için ve Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi diğer endüstriyel robot üreticileri yaygın olarak tüm eksen başlangıç açı değerlerini sıfır olarak kabul ettiği için bu çalışmada da yine tüm eksen açıları başlangıç değerleri sıfır olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı endüstriyel robot üreticilerinin, endüstriyel robotun başlangıç konumu için kabul etmiş oldukları, başlangıç açı değerleri.

Endüstriyel Robot Üreticisi	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Kuka	0	$-\pi/2$	$\pi/2$	0	0	0
ABB	0	0	0	0	0	0
Fanuc	0	0	0	0	0	0
Motoman	0	0	0	0	0	0
Kawasaki	0	0	0	0	0	0
Staubli	0	0	0	0	0	0
Comau	0	0	0	0	0	0

Çizelge 2.2'de bu çalışmada öne sürülen geometrik çözüm yöntemi ile elde edilen eksen açı değerlerinin dönme merkezleri ve varsayılan olarak kabul edilen değerler gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Bu çalışmada, robotun başlangıç konumunda, eksen açıları ve eklemlerin dönme eksenleri çizelgede belirtildiği şekilde varsayılan olarak kabul edilmiştir.

Eklemler Açılı	Varsayılan Değer	Dönme Eksen
A1	0	Z
A2 (Omuz)	0	Y
A3 (Dirsek)	0	Y
A4	0	Z
A5 (Bilek)	0	Y
A6	0	Z

Bu çalışmada tüm eksen açı değerleri sıfır olarak kabul edilmiştir. Ancak, anlatılan yöntemle elde edilen açı değerleri temel aritmetik işlemler yardımı ile, istenilen farklı endüstriyel robot üreticilerinin üretmiş olduğu endüstriyel robota uygun eksen açı değerlerine dönüştürülebilir.

2.4 İleri ve Ters Kinematik

2.4.1 Dönüşüm Matrisi

Kinematik denklemlerin çözümünde dönüşüm matrisleri kullanılır. Bir koordinat sisteminin başka bir koordinat sistemine göre dönme ve ötelenme miktarı 4x4 boyutlarında bir dönüşüm matrisi ile gösterilir. Bu dönüşüm matrisinin ilk üç sütununda dönme miktarını tanımlayan birim vektörlere ait değerler, dördüncü sütunda ise ötelenme miktarını tutan konum değerleri bulunur. Denklem 2.2'de bir dönüşüm matrisi görülmektedir. Bu dönüşüm matrisinin dördüncü sütununda bulunan x, y, z ile belirtilen değerler dönüşüm matrisinin konumunu tanımlamaktadır. r_{11} , r_{21} ve r_{31} ile gösterilen alanlar dönüşüm matrisinin X birim vektörüne ait konum bilgilerini; r_{12} , r_{22} ve r_{32} ile gösterilen alanlar dönüşüm matrisinin Y birim vektörüne ait konum bilgilerini; r_{13} , r_{23} ve r_{33} ile gösterilen alanlar dönüşüm matrisinin Z birim vektörüne ait konum bilgilerini göstermektedir (Bingül ve Küçük 2009).

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

2.4.2 İleri Kinematik

Bir endüstriyel robotun eklem açıları verildiğinde, bu endüstriyel robotun uç noktasının bu açı değerlerinde aldığı konum ve yönelim bilgilerinin (End Frame) hesaplanması işlemi ileri kinematik çözüm olarak adlandırılır.

Altı eksenli bir endüstriyel robotun ileri yönlü kinematik denklemin çözümü için, önce her eksene bir koordinat sistemi yerleştirilir ve bu koordinat sistemi kendinden bir önceki koordinat sistemine göre dönüşüm matrisi ile tanımlanır. Denklem 2.3'te bu

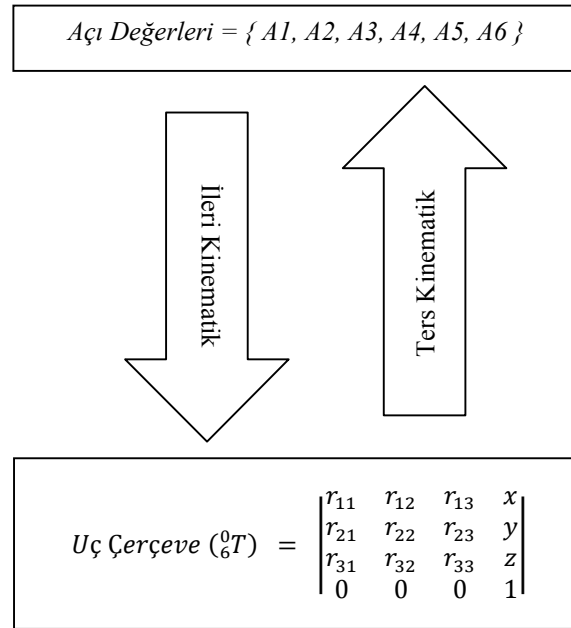
dönüşüm matrislerinin ardışık olarak çarpımı ile ileri yönlü kinematik çözümü gösteren denklem gösterilmiştir. Denklem 2.3'te görüldüğü gibi ileri kinematik çözüm altı adet 4x4 boyutlu dönüşüm matrisinin ardışık olarak çarpımı ile elde edilir (Craig 2005).

$${}^0T = {}^0T_1T_2T_3T_4T_5T_6T \quad (2.3)$$

2.4.3 Ters Kinematik

Bir endüstriyel robotun uç noktası için konum ve yönelim bilgileri verildiğinde, bağlantı açılarının alması gereken değerlerin hesaplanması işlemi ters kinematik çözüm olarak adlandırılır (Bingül ve Küçük 2009).

Şekil 2.6'da ileri ve ters kinematik arasındaki ilişki gösterilmiş ve bu iki işlem arasında ters yönlü bir bağlantı olduğu görülmektedir.



Şekil 2.6 İleri ve ters kinematik arasındaki bağlantının şematik gösterimi.

İleri kinematik denklem için her zaman bir çözüm vardır. Yani tüm eksen açıları için bir açı değeri tanımlandığında robotun alacağı konum ve ulaşacağı uç çerçeve yalnızca bir tanedir. Ancak ters kinematik denklemler için bir çözüm olmayabileceği gibi birden çok çözüm de olabilir. Yani bir hedef uç çerçeve tanımlandığında, bu çerçeve robotun ulaşamayabileceği bir konumda olabileceği gibi robot bu uç çerçeveye birden çok

çözüm ile de ulaşabilir. Ters kinematik denklemlerin çözümleri ileri kinematik denklemlere göre daha zordur. Çünkü ileri kinematik çözüm yalnızca altı adet 4x4 matrisin ileri yönlü çarpılması ile elde edilebilirken ters kinematik denklem çözümleri daha karmaşık denklemler ile elde edilebilir (Bingül ve Küçük 2009).

Ters kinematik denklemler için uygulanacak ters kinematik çözüm yöntemi endüstriyel robotun yapısı ile ilgilidir. Ters kinematik çözümler kapalı-form çözümleri (closed-form solutions) ve sayısal çözümler (numerical solutions) olmak üzere iki grupta incelenir. Kapalı form çözümleri, analitik olarak ya da dört ya da daha az dereceli polinomlar ile ifade edilebilen ve kesin sonuç üreten ters kinematik çözümlerdir. Sayısal çözümler ise yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi döngüsel olarak tekrarlanan (iterative) ters kinematik çözümlerdir ve yaklaşık sonuç üretir. Bu nedenle, sayısal çözümler, analitik çözümlerden çok daha fazla işlem yükü gerektirir ve bundan dolayı sayısal çözümler bilgisayar ortamında analitik çözümlere göre daha yavaşlardır ve bilgisayar ortamında endüstriyel robotların ters kinematik çözümleri için öncelikle analitik çözümler tercih edilir (Craig 2005).

Bu çalışmada, altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robotun bilgisayar ortamında kontrol edilebilmesi için analitik bir çözüm yöntemi olan basit geometrik çözüm yöntemi öne sürülmüştür. Bu yöntem ile endüstriyel robotun anatomisi tamamen geometrik olarak incelenerek basit geometrik denklemler yardımıyla kesin sonuçlar üreten ters kinematik çözüm elde edilir.

Endüstriyel robotlar gereksinimden fazla ekleme sahip olan (redundant) ya da gereksinimden fazla ekleme sahip olmayan (non-redundant) olmak üzere iki farklı tipte olabilir. Bir endüstriyel robotun yalnızca gereksinimi kadar ekleme sahip olması (non-redundant) demek, üç boyutlu hareket serbestliğine sahip olabileceği, yani erişim alanı içinde tanımlanan tüm hedef konum ve yönelimlere erişebileceği en az sayıda ekleme sahip olması demektir. Bu hareket serbestliğini sağlayacak eklem sayısından daha fazla ekleme sahip olması durumunda (redundant) ise ters kinematik çözümler oldukça karmaşık olup çoğunlukla ancak sayısal yöntemler ile ters kinematik çözüm mümkün olmaktadır. Bazı durumlarda tamamen analitik çözüm yöntemleri ile ters

kinematik çözüm mümkün olmayabilir. Ancak, yarı analitik çözüm olarak adlandırılan eklem değişkenlerinden bazılarının analitik olarak çözüldüğü diğerlerinin ise sayısal olarak çözüldüğü çözüm yöntemi uygulanması mümkün olabilir (Bingül ve Küçük 2009).

Analitik ters kinematik çözümler kendi içinde cebirsel (algebraic) ve geometrik (geometric) olmak üzere iki alt grupta incelenir. Geometrik çözüm ve cebirsel çözüm arasındaki sınırlar bazı durumlarda çok belirgin olmasa da temel olarak probleme çözüm yaklaşımları farklıdır (Craig 2005).

Ters kinematik denklem çözümleri için yukarıdaki belirtilen farklı yöntemlerle önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu alanda Pieper (1968) tarafından yapılmış olan ardışık üç eksenin kesiştiği altı eksenli endüstriyel robot manipülatörleri için analitik çözüm, Lee ve Ziegler (1983) tarafından yapılmış olan küresel bilekli altı eksenli bir endüstriyel robot manipülatörü olan PUMA endüstriyel robot manipülatörü üzerinde geometrik çözüm, Duffy (1980) ve Paul (1981) tarafından yapılmış olan ters kinematik çözüme cebirsel yaklaşım yöntemleri kapalı-form çözümlere örnek verilebilir. Tsai ve Morgan (1985) tarafından yapılmış olan beş ve altı serbestlik derecesine sahip endüstriyel robot manipülatörleri üzerindeki süreklilik yöntemi, Morris ve Mansor (1997, 1998), Hasan vd. (2006), Lou ve Brunn (1999) tarafından yapılan yapay sinir ağları tabanlı ters kinematik çözüm çalışmaları ters kinematik çözüm alanında yapılan sayısal çözümlere örnek olarak verilebilir.

Ülkemizde Kocaeli Üniversitesi'nde eklem kaçıklıklı (offset wrist) endüstriyel robotların ters kinematik çözümü üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Kucuk ve Bingul 2014, Bingul vd. 2005). Orta Doğu Üniversitesi'nde endüstriyel robot manipülatörlerinin ters kinematik çözümleri ve ters kinematik çözümlerin kinematik ve topolojik analizleri üzerine yapılan çalışmalar ülkemizde yine bu alanda yapılan çalışmalardandır (Balkan vd. 2000, 2001, Özgören 1999, 2002).

Analitik ters kinematik denklem çözümlerinde dönüşüm matrisinin tersini alarak ters kinematik çözüm işlemine başlanır. Denklem 2.4'te gösterildiği gibi A koordinat sistemi

B koordinat sistemine göre bir dönüşüm matrisi ile tanımlanmış ise B koordinat sistemi A koordinat sistemine göre bu dönüşüm matrisinin tersi ile tanımlanabilir. Bir 4x4 boyutlu dönüşüm matrisinin tersini alma işlemi yapılırken önce ilk üç satır ve ilk üç sütunun oluşturduğu 3x3 boyutlu alanın devriği alınmaktadır. 3x3 boyutlu bir matrisin devriğinin alınması işlemi Denklem 2.5'te gösterildiği gibidir. Denklem 2.6'da ise bir dönüşüm matrisinin tersini alma işlemi gösterilmiştir. Bu işlem yapılırken Denklem 2.5'te elde edilen bu 3x3 boyutlu matrisin önce -1 katsayısı ile çarpılması ve sonrasında dönüşüm matrisinin dördüncü sütununda bulunan konum bilgileri ile çarpılması sonucu dönüşüm matrisinin tersinin konum bilgileri elde edilir ve yine dönüşüm matrisinin tersinin dördüncü sütuna yazılır. Bir dönüşüm matrisi ile bu dönüşüm matrisinin tersinin çarpımının sonucunun birim matris olduğu Denklem 2.7'de gösterilmiştir (Bingül ve Küçük 2009).

$$[{}^A_B T]^{-1} = {}^B_A T \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} a & d & g \\ b & e & h \\ c & f & i \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$[{}^0_1 T]^{-1} = {}^0_1 T = \begin{bmatrix} {}^0_1 R^T & -{}^0_1 R^T {}^0_1 P \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$[{}^0_1 T]^{-1} {}^0_1 T = I \quad (2.7)$$

Yukarıdaki denklemler yardımıyla altı eksenli bir endüstriyel robotun ters kinematik denklemin analitik çözümü için başlangıç adımı Denklem 2.8'de ifade edildiği gibidir (Bingül ve Küçük 2009).

$$[{}^0_1 T]^{-1} {}^0_6 T = {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T \quad (2.8a)$$

$$[{}^0_1 T {}^1_2 T]^{-1} {}^0_6 T = {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T \quad (2.8b)$$

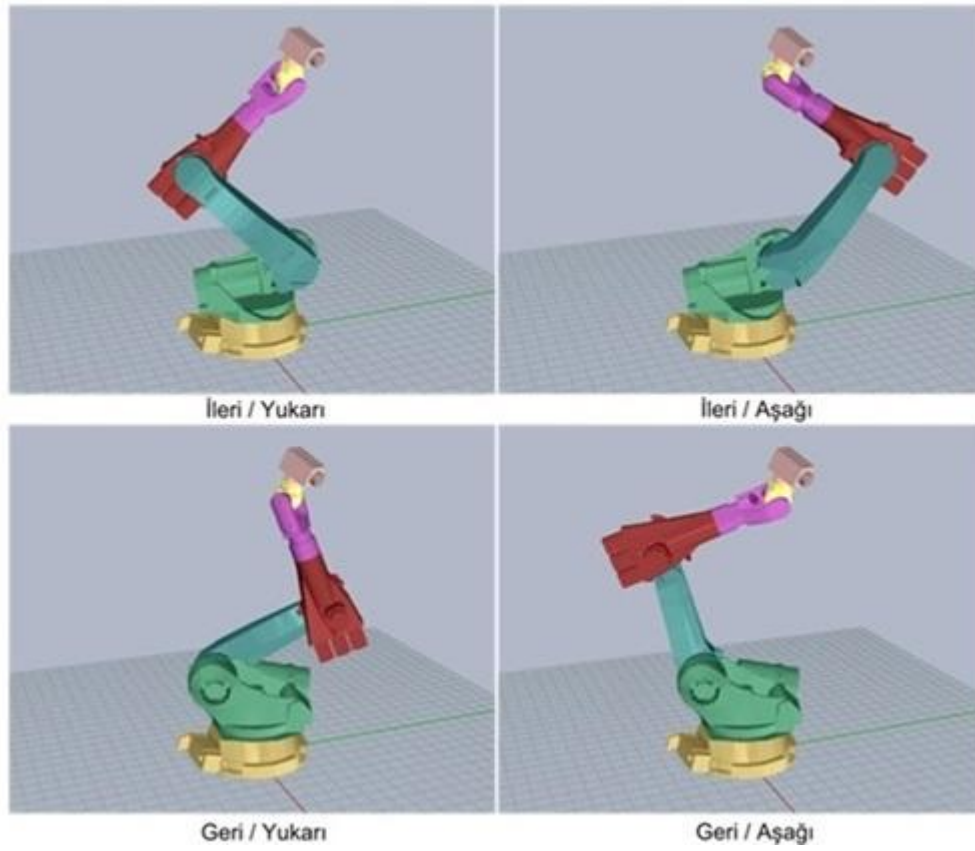
$$[{}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T]^{-1} {}^0_6 T = {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T \quad (2.8c)$$

$$[{}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T]^{-1} {}^0_6 T = {}^4_5 T {}^5_6 T \quad (2.8d)$$

$$[{}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T]^{-1} {}^0_6 T = {}^5_6 T \quad (2.8e)$$

Bu çalışmanın konusu olan altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robot için ileri / geri durumu, dirsek yukarı / aşağı durumu ve son üç eksen açısı için A5 açısının artı /

eksi durumu olduğu dikkate alındığında, bilek tekillik hatası ya da baş üstü tekillik hatası istisnaları dışında, ters kinematik çözüm kümesi için birbirinden farklı sekiz çözüm kümesi ortaya çıkabilir. Şekil 2.7'de ileri / geri ve dirsek yukarı / aşağı durumları gösterilmiştir. Şekil 2.7'de bu çalışmada kullanılan Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün tanımlanmış olan aynı uç çerçeve dönüşüm matrisi için yapılan ters kinematik çözüm sonucunda elde edilen ileri / geri ve dirsek yukarı / dirsek aşağı olmak üzere dört farklı çözüm kümesi gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün ileri/geri ve yukarı/aşağı konumları.

Ayrıca A5 açısının artı ve eksi olduğu iki farklı durumda son üç eklem açısının alabileceği değerler için iki farklı çözüm kümesi arasındaki bağlantı ise Denklem 2.9'da gösterilmektedir.

$$A4_{(Artı)} = A4_{(Eksi)} + \pi \quad (2.9a)$$

$$A5_{(Artı)} = -A5_{(Eksi)} \quad (2.9b)$$

$$A6_{(Artı)} = A6_{(Eksi)} + \pi \quad (2.9c)$$

2.5 Tekillik Durumu

Tekillik durumu; ters kinematik denklemin sonsuz sayıda çözümünün olması durumudur. Endüstriyel robotlarda baş üstü tekillik durumu, genişletilmiş konum tekillik durumu, bilek tekillik durumu olmak üzere üç tip tekillik durumu tanımlanmıştır. Endüstriyel robotun kontrol edilmesi için ya da endüstriyel robotun bilgisayar ortamında simülasyonunun yapılabilmesi için bu tekillik durumlarının tespit edilmesi gerekmektedir (Anonim 2003). Bu çalışmada öne sürülen geometrik çözüm yöntemi ile, tanımları yapılan farklı üç tip tekillik durumunun hesaplanması yapılabilecektir.

2.5.1 Baş Üstü Tekillik (Sonsuz Çözüm) Durumu

Baş üstü tekillik durumu; orijin noktası, birinci dönme eksenini ve küresel bileğinin aynı izdüşümde olması durumudur. Ters kinematik denklem için sonsuz sayıda çözüm vardır. Şekil 2.8'de KR210 endüstriyel robot manipulatöründe baş üstü tekillik durumu gösterilmiş olup, küresel bileğin ve birinci dönme ekseninin dikey olarak hizalanmış olduğu görülmektedir (Anonim 2003).



Şekil 2.8 Kuka KR210 endüstriyel robot manipulatörünün baş üstü tekillik durumu (Anonim 2003).

2.5.2 Genişletilmiş Konum Tekillik Durumu

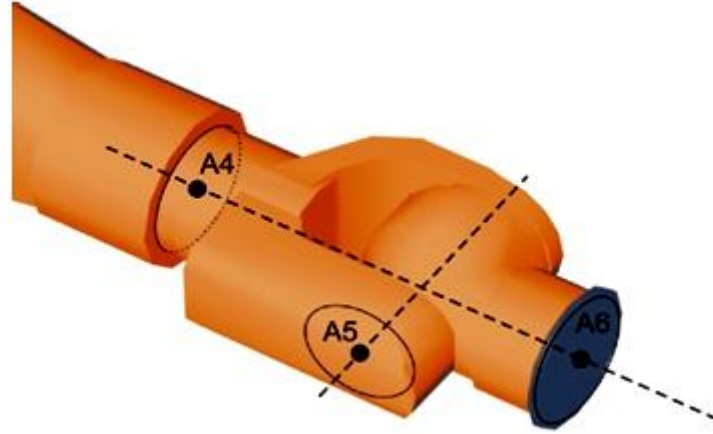
Genişletilmiş konum tekillik durumu; küresel bilek, dirsek ve omuz eklemlerinin aynı doğru üzerinde olması durumudur. Bu durum tekillik olarak adlandırılmasına rağmen aslında bir ters kinematik çözüm vardır. Ancak uç çerçevenin konumu robotun erişebileceği çalışma uzayının sınırına çok yakındır ve bu nedenle uç çerçevedeki çok küçük hızlanma ve konum değişiklikleri omuz ve dirsek eklemlerinde çok büyük hızlanmalara neden olmaktadır. Bu nedenle bu durum ters kinematik çözüm yapılırken hesaplanması gereken bir durumdur. Şekil 2.9'da genişletilmiş konum tekillik konumu gösterilmiş olup küresel bilek ekleminin dirsek ekleminin ve omuz ekleminin bir doğru oluşturduğu görülmektedir (Anonim 2003).



Şekil 2.9 Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün genişletilmiş konum tekillik durumu (Anonim 2003).

2.5.3 Bilek Tekillik (Sonsuz Çözüm) Durumu

Bilek tekillik durumu; dördüncü ve altıncı eksenlerin aynı doğru üzerinde olması durumudur. Ters kinematik denklem çözümünün sonsuz sayıda çözümü vardır. Şekil 2.10'da KR210 endüstriyel robotu için bilek tekillik durumu gösterilmiştir. Dördüncü ve altıncı dönme eksenleri aynı doğru üzerinde çakışmakta olduğu görülmektedir (Anonim 2003).



Şekil 2.10 Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörünün bilek tekillik durumu (Anonim 2003).

2.6 Parametrik Tasarım Ortamı Benzetim Yazılımları

Grasshopper3D parametrik yazılım ortamı için geliştirilmiş olan ve endüstriyel robotların benzetiminin yapılabildiği benzer diğer yazılımlar aşağıda listelenmiştir.

1. KUKA|prc
2. HAL
3. Robots.IO
4. Diğer Yazılım Eklentileri

2.6.1 KUKA|prc

Endüstriyel robotlar, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ve Bilgisayar Destekli Üretim (CAM) alanında da yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu süreç sırasıyla, üretimi yapılması planlanan parçanın önce CAD ortamında üç boyutlu tasarımının yapılması, CAM ortamında bu üç boyutlu model üzerinde takım yollarının hesaplanması ve son olarak robotun çarpma, erişilebilirlik ve tekillik gibi hataların kontrol edilebildiği, endüstriyel robot benzetim ortamında hesaplanan takım yollarının işlenerek robot koduna dönüştürülmesi işlem adımlarından oluşur. Ancak, bu süreç izlenirken istenmeyen bir sonuç ile ilgili bir geribildirim alınırsa sürecin önceki adımlarında değişiklikler yaparak işlem adımları tekrarlanır. Viyana Teknoloji Üniversitesi'nden Sigrid Brell-Cokcan ve Johannes Braumann, eğer işlem yapılacak yüzeyler, eğriler ile ya da eğriler yardımı ile

oluşturulan geometrik yüzeyler ile ifade edilebilecek basitlikte ise bu üretim süreci için farklı bir iş akışı önermişlerdir. Bu iş akışında, Grasshopper3D parametrik tasarım ortamında aynı sahne içinde, basit takım yolları oluşturulup, parametreler yardımı ile kontrol edilebilmekte, endüstriyel robotun benzetimi yapılabilmekte, endüstriyel robot ile ilgili erişilebilirlik, çarpışma tekillik gibi hatalar tespit edilebilmekte ve robot kodu oluşturulabilmektedir. Bütün işlemler aynı sahnede yapılabildiği için herhangi bir hata oluşması durumunda ya da değişiklik yapılmak istenildiği durumlarda aynı işlem adımında ve aynı sahne üzerinde olması nedeniyle yapılan bu değişikliğin, üretim işleminin diğer adımlarına etkisi anlık olarak izlenebilmektedir (Braumann and Brell-Cokcan 2010, 2011a, 2012a).

Ayrıca, KUKA|prc parametrik endüstriyel robot kontrol yazılımı içerisinde, açık kaynaklı geliştirme platformu devre kartı olan Arduino ile seri bağlantı üzerinden veri alıp, veri göndermeye olanak sağlayan bileşenler bulunmaktadır (Braumann and Brell-Cokcan 2012b). Endüstriyel robotların bilgisayar destekli üretim alanında kullanılması ile farklı mimari yüzeylerin üretimine kolaylıklar sağlamaktadır (Aigner and Brell-Cokcan 2009). İşlenecek bir formun katmanlara ayrılması ile oluşan katmanın yanal yüzeylerin işlenmesi ve katmanların tekrar bir araya getirilmesi işlem adımlarından oluşan bir üretim yönteminde (Flank Milling) endüstriyel robotlar kullanılabilir (Brell-Çokcan *et al.* 2009). Ayrıca endüstriyel robotların bilgisayar destekli üretim alanında kullanılması ile mimari alanda serbest biçimli yüzeylerin (freeform surfaces) üretiminde de endüstriyel robotlar kullanılabilir (Braumann and Brell-Cokcan 2011b). KUKA|prc parametrik endüstriyel robot kontrol yazılımı ile bu üretim tekniklerinin endüstriyel robotlar ile yapılabileceği yazılım geliştirici ekip tarafından örnek çalışmalarla gösterilmiştir.

2.6.2 HAL

2011 yılından itibaren, Thibault Schwartz adlı mimar ve yazılım geliştirici tarafından geliştirilmeye başlanmış olan çevrimdışı endüstriyel robot programlama ortamıdır. Bu Grasshopper3D parametrik yazılım eklentisi 154 adet bileşenden oluşmakta ve ABB, Kuka ve Universal Robot marka endüstriyel robotlar için çevrimdışı programlama

ortamı sunmaktadır. İçinde, tanımlanmış 39 adet robot bulunan; ABB, Kuka ve Universal Robot kütüphanesi hazır olarak gelmektedir. Ayrıca, bileşenler yardımıyla bunların dışında bir endüstriyel robot tanımlanabilir. Erişilebilirlik, eksen limitlerinin aşılması, tekillik çarpışma gibi hataların tespit edilmesine olanak sağlar. Birden çok endüstriyel robotun aynı sahne üzerinde benzetiminin yapılmasına ve bu robotlar arasında da çarpışma testleri yapılmasına olanak sağlar. Doğrusal ve dönel harici eksenler desteklenmektedir. ABB, Kuka ve Universal Robot marka endüstriyel robotlar için robot kodu oluşturulabilir. Eklenti yazılımı ayrıca, ABB marka endüstriyel robot kabineye bağlanıp kontrol kabini ile iletişim kurulmasına ve anlık veri aktarılmasına olanak sağlamaktadır (Schwartz 2013, İnt.Kyn.4).

2.6.3 Robots.IO

Robots.IO yazılım eklentisi KUKA|prc ve HAL ile birlikte, endüstriyel robot benzetiminin yapılabilirdiği en kapsamlı üç Grasshopper3D parametrik yazılım eklentisinden birisidir. Robots.IO ve RoboFold firmalarının kurucusu olan Gregory Epps tarafından yazılım geliştirilmiş olup yine Gregory Epps önderliğinde Florent Michel ve Vince Huyghe adlı yazılım geliştiriciler tarafından geliştirilmektedir. Bu yazılım eklentisi ile HAL ve KUKA|prc adlı yazılım eklentilerinde olduğu gibi altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robotun benzetimi yapılabilmekte ve erişilebilirlik, tekillik, çarpışma ve eksen limitlerinin aşımı hataları tespit edilebilmektedir (İnt.Kyn.5, İnt.Kyn.6). Ancak parametrik yazılım eklentisinde, metal levhaların istenilen noktalardan ve istenilen şiddette bükülmesi ile metal yüzeyler elde edilmesi şeklindeki üretim sürecinde endüstriyel robotların kullanımına odaklanılmıştır (Epps and Verma 2013, Epps 2014).

2.6.4 Diğer Yazılım Eklentileri

Bundan sonraki yazılım eklentileri, "Diğer Yazılım Eklentileri" başlığı altında incelenmiştir. Bundan önceki üç kapsamlı parametrik yazılım eklentisinde kullanılan ters kinematik denklemler, geliştiriciler tarafından bir ters kinematik modelin matematiğinin yazılımsal olarak geliştirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu bölümde

incelenecek olan parametrik yazılım eklentilerinde kullanılan ters kinematik çözümler ise, Rhino3D yazılımının ya da Grasshopper3D parametrik tasarım ortamının sunduğu bir takım kolaylıklar ve araçlar kullanılarak oluşturulmuştur.

CRANE: Brian Harms adlı yazılım geliştirici tarafından 2012 yılında Staubli endüstriyel robot üreticisi tarafından üretilen altı eksenli küresel bilekli endüstriyel robotların bilgisayar ortamında benzetiminin yapılmasına olanak sağlamak amacıyla geliştirilmiştir (Johns and Foley 2014, İnt.Kyn.7). Bu yazılım eklentisinde kullanılan ters kinematik denklemin tanımlandığı betik içinde Rhino3D programının sunduğu yazılım kolaylıkları ve hazır araçlar (düzlemler ve vektörler ile döndürme ve öteleme işlemleri, çember-çember kesişim işlemi gibi) kullanılmıştır.

Lobster_IK: Daniel Piker adlı yazılım geliştirici tarafından geliştirilmiştir. Altı eksenli küresel bilekli endüstriyel robotların benzetiminin yapılabileceği bir Grasshopper3D parametrik yazılım tanım sayfasıdır. Yani, bu eklenti, bir programlama dili aracılığı ile geliştirilmemiştir. Grasshopper3D parametrik yazılım ortamındaki araçlar kullanılarak hazırlanmıştır (İnt.Kyn.3).

Mussel: Ryan Luke Johns adlı yazılım geliştirici tarafından, Lobster_IK adlı tanım sayfasının daha da geliştirilmesi ile oluşturulmuştur. ABB robotlar için robot kodu oluşturulabilir. (Johns and Foley 2014, İnt.Kyn.8, İnt.Kyn.9).

Scorpion: Khaled ElAshry, Vincent Huyghe ve Ruairi Glynn adlı yazılım geliştiriciler tarafından oluşturulan Grasshopper3D parametrik yazılım tanım sayfasıdır. Grasshopper3D içindeki bileşenler yardımıyla oluşturulmuştur. Bundan önceki yazılım eklentilerinden farklı olarak, Universal Robots marka endüstriyel robot üreticisinin üretmiş olduğu endüstriyel robotlar için geliştirilmiştir. Bu endüstriyel robotlar, küresel bilekli olmayan endüstriyel robotlar, yani eklem kaçıklıklı altı eksenli endüstriyel robotlardır (İnt.Kyn.10, İnt.Kyn.11).

3. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada, altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robot için önerilen geometrik çözüm yöntemi Visual Studio yazılım geliştirme ortamında IronPython ve C# programlama dilleri kullanılarak yazılımsal olarak ifade edilmiştir. Bu çalışmada, elde edilen yazılım ile bir Kuka KR210 marka endüstriyel robotun benzetiminin yapılabildiği, Rhino3D üç boyutlu endüstriyel tasarım programında, parametrik olarak kontrol edilebilen özellikte bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. Bu benzetim ortamında;

- a) altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robotun benzetimi bilgisayar ortamında yapılabilir,
- b) hedef konum değerleri girildiğinde, endüstriyel robotun bu hedefe ulaşması için gereken eksen açı değerleri elde edilebilir,
- c) erişilebilirlik hataları tespit edilebilir,
- d) eksen limitlerinin aşılması hataları tespit edilebilir,
- e) baş üstü tekillik, küresel bilek tekillik, genişletilmiş konum hataları tespit edilebilir.

3.1 Kuka KR210 Endüstriyel Robot

Bu çalışmada Kuka marka endüstriyel robot üreticisinin üretmiş olduğu KR210 model bir endüstriyel robot kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan Kuka KR210 model endüstriyel robot; altı eksenli küresel bilekli bir Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörü, bir VKRC2 kontrol paneli, bir KCP el kumanda paneli ve KRL robot programlama dili bileşenlerinden oluşmaktadır. Çevrimiçi ya da çevrimdışı olmak üzere iki farklı şekilde programlanabilmektedir. Robotun KCP kumanda paneli yardımıyla belli bir konuma getirilmesi ve bu konum bilgilerinin kaydedilmesi ve sonrasında bu komutların bir sonsuz döngü içinde çalıştırılması çevrimiçi programlama olarak adlandırılır. Robotun izlemesi gereken komutların bilgisayar ortamında önceden hazırlanması işlemi ise çevrimdışı programlama olarak adlandırılır (Anonim 2000).

3.1.1 Kuka KR210 Robot Manipulatörü

Kuka KR210 endüstriyel robot manipulatörü, altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robot manipulatördür. Kuka KR210 endüstriyel robot manipulatörünün son üç eksen bir noktada kesişmektedir. Bu nokta küresel bilek olarak adlandırılmaktadır. Endüstriyel robot üreticisi tarafından tanımlanmış olan taşıma yükü 210 kg olup, maksimum erişim mesafesi 2700 mm'dir. Tavana ya da zemine monte edilebilir özelliktedir. Ayrıca temiz oda ve dökümhaneler için özel olarak üretilmiş ve iyi yalıtılmış özellikte modelleri de bulunmaktadır. Tekrarlanabilirliği ± 0.06 mm olup toplam 1267 kg ağırlığındadır. Koruma sınıflandırılması IP65 ve gürültü düzeyi 75 dB'in altındadır. Kullanılan sürücü sistemleri ve elektromekanik fırçasız servo motorlar ISO 9283 standardına uygundur. Robot çalışır durumda iken ortam sıcaklığı $+10$ °C ile $+55$ °C arasında olmalıdır. Çizelge 3.1'de bu değerler çizelge üzerinde gösterilmiştir (Anonim 2000).

Çizelge 3.1 Bu çalışmada kullanılacak olan KR210 endüstriyel robot manipulatörüne ait teknik veriler çizelgede belirtilmiştir (Anonim 2000).

Özellik	Değer
Maksimum Erişim Mesafesi	2700 mm
Taşıma yükü	210 kg
Eksen sayısı	6
Montaj Tipi	Tavan, Zemin
Özel Tipler	Temiz Oda, Dökümhane
Konum Tekrarlanabilirliği	$\pm 0,06$ mm
Kontrol Paneli	VKRC2
Toplam Ağırlık	1267 kg
Çalışma Ortam Sıcaklığı	$+10$ °C ile $+55$ °C arası
Koruma Sınıflandırması	IP 65
Gürültü Düzeyi	< 75 dB

Bu çalışmada kullanılacak olan Kuka marka KR210 endüstriyel robotun, üretici firma tarafından tanımlanmış olan eksen limitleri ve açısal hız limit değerleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Kuka KR20 endüstriyel robot manipülatörü eksen limitleri ve açısal hız limit değerleri

Eksen	Eksen Açı Limiti	Eksen Açı Hız Limiti
A1	$\pm 185^\circ$	86°/s
A2 (Omuz)	$0^\circ/-146^\circ$	84°/s
A3 (Dirsek)	$+155^\circ/-119^\circ$	84°/s
A4	$\pm 350^\circ$	100°/s
A5 (Bilek)	$\pm 125^\circ$	110°/s
A6	$\pm 350^\circ$	184°/s

Şekil 3.1'de bu çalışmada kullanılacak olan Kuka endüstriyel robot üreticisi tarafından üretilmiş olan altı eksenli küresel bilekli KR210 model endüstriyel robot manipülatörü görülmektedir.



Şekil 3.1 Kuka KR210 altı eksenli küresel bilekli endüstriyel robot manipülatörü.

3.1.2 VKRC2 Kontrol Paneli

VKRC2 kontrol paneli, içinde bulunan sürücüler ve PC modülü yardımı ile KR210 endüstriyel robotun kontrol edilebilmesini sağlar. Kontrol kabini içerisinde, altı adet servo motor sürücüsü, sürücü kartları ve Windows 95 işletim sisteminin bulunduğu bir dahili PC bulunmaktadır (Anonim 2010).

Şekil 3.2'de bu çalışmada kullanılacak olan Kuka endüstriyel robot üreticisinin üretmiş olduğu VKRC2 model kontrol kabini görülmektedir. VKRC2 model kontrol kabinine program aktarımı CD-ROM ya da ethernet bağlantısı üzerinden yapılabilmektedir. VKRC2 kontrol kabinine ek donanım yardımı olmadan USB üzerinden program aktarımı yapılamamaktadır. Acil durdurma butonu, endüstriyel robot manipülatörü, PLC ve DeviceNET bağlantıları kontrol kabinine bağlanır.



Şekil 3.2 VKRC2 Kuka endüstriyel robot kontrol kabini.

3.1.3 KCP El Kumanda Paneli

Kuka Kontrol Paneli (KCP), üzerinde endüstriyel robotun ve kontrol panelinin kontrol edilmesini sağlayan düğmeler ve bir ekran bulunan endüstriyel robot bileşenidir. KCP kumanda paneli VKRC2 kontrol paneline bağlanır. Standart kablo uzunluğu 10 metredir. Endüstriyel robot programı işletilirken, kumanda paneli üzerindeki ekran üzerinden komut satırları izlenebilir. Yine robotun anlık konum bilgileri, değişkenler ve hatalar bu ekran üzerinden görülebilmektedir (Anonim 2010). Şekil 3.3'te bu çalışmada kullanılacak olan kumanda paneli görülmektedir.



Şekil 3.3 Kuka KCP el kumanda paneli.

3.1.4 KRL (Kuka Robot Language) Robot Programlama Dili

KRL robot programlama dili, Kuka robot üreticisi tarafından üretilmiş olan endüstriyel robotların programlanmasında kullanılan robot programlama dilidir. Bir noktadan bir noktaya gitme bu programlama dilinde PTP, LIN ve CIRC olmak üzere üç farklı komut ile yapılabilmektedir. PTP komutu endüstriyel robotun bir hedef konuma gitmesi için kullanılan bir komuttur. PTP komutu ile endüstriyel robot, bu hedef komuta gidiş süresince gelişigüzel bir yörünge izleyebilir. LIN komutu yine PTP komutunda olduğu gibi endüstriyel robotun belli bir konuma gitmesi için kullanılan bir komuttur. Ancak, LIN komutunda endüstriyel robot, hedef konuma ulaşma süresince çizgi çizen bir yörüngeyi izlemelidir. CIRC komutu ise, üç nokta ile tanımlanan dairesel bir yörünge ile endüstriyel robotun bir konumdan hedef konuma ulaşması için kullanılan komuttur. Bu üç komutun, bir önceki konuma göre göreceli olarak tanımlandığı, PTP_REL, LIN_REL ve CIRC_REL olan biçimleri de vardır. Bu komutlarda kullanılan hedef konum bilgisi, çerçeve olarak tanımlanır ve X, Y, Z, A, B, C, S ve T olmak üzere alt bileşenleri bulunur. Denklem 3.1'de örnek bir LIN komutu görülmektedir. X, Y ve Z konum bilgisi, A, B, C ise Euler ZYX açısı setini göstermektedir. Robot bir hedef konuma sekiz farklı şekilde ulaşabilir. S ve T değişkenleri ise robotun hedef konuma ulaşırken alması gereken pozisyonu tanımlar. S ve T alt bileşenlerinden sonra gelen B harfi ise sayının ikilik sayı tabanında olduğunu gösterir. S ve T alt bileşenleri B harfi

kullanılmadan onluk sayı tabanında da tanımlanabilir. Burada belirtilen tüm bileşenlerin kullanılması zorunlu değildir. Bu alt bileşenlerden bazıları ihmal edilebilir. Bu durumda en son kullanılmış olan alt bileşen değeri kullanılır. Denklem 3.2'de ise bu duruma örnek olan bir LIN_REL komutu gösterilmiştir. Ayrıca LIN ve PTP komutlarının kullanımında, sadece eksen açıları ile bir hedef tanımlanabilmektedir. Denklem 3.3'te ise yalnızca açılardan tanımlanmış ve Kuka KR210 endüstriyel robotun başlangıç konumunu (Home) temsil eden bir PTP komutu gösterilmiştir. Hız bilgisi ise \$VEL.CP değişkenine m/s cinsinden belirtilen bir değer olarak atanabilir. Denklem 3.4'te hız bilgisinin tanımlandığı örnek bir komut satırı gösterilmiştir (Anonim 2003).

$$LIN = \{X 1000, Y 0, Z 500, A 45, B 0, C 20, S 'B 010', T 'B 000010'\} \quad (3.1)$$

$$LIN_REL = \{X 1000, Z 500\} \quad (3.2)$$

$$PTP = \{A1 0, A2 - 90, A3 90, A4 0, A5 0, A6 0\} \quad (3.3)$$

$$\$V ELCP = 0.533333 \quad (3.4)$$

3.2 Üç Boyutlu Modelleme Araçları

Bu çalışmada, Rhino3D üç boyutlu modelleme yazılımı ve Rhino3D modelleme yazılımı içinde eklenti olarak çalışan Grasshopper3D parametrik modelleme yazılım eklentisi kullanılmıştır.

3.2.1 Rhino3D Modelleme Yazılımı

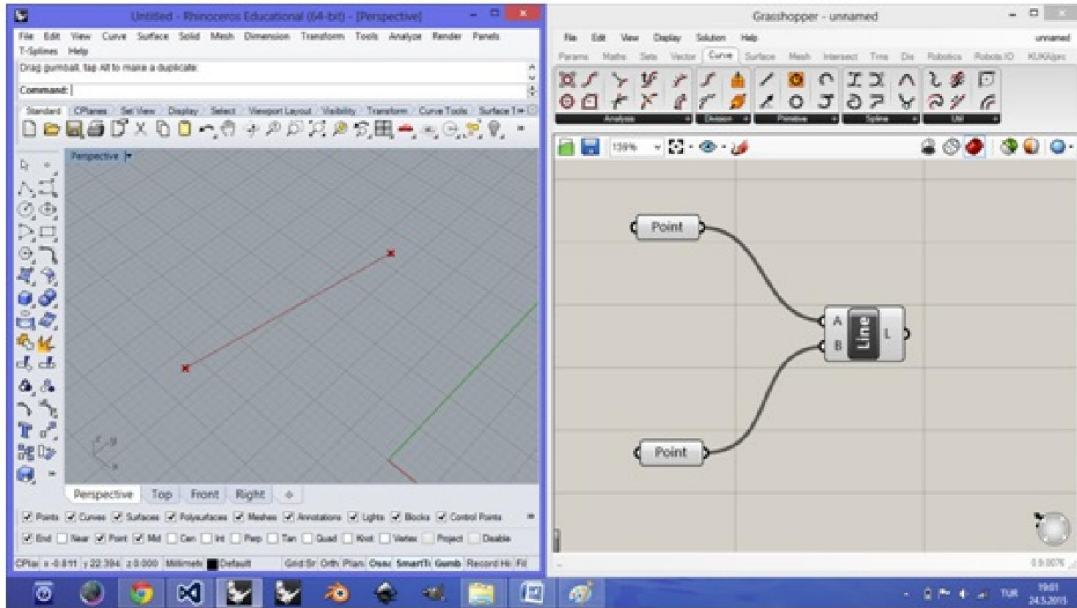
1980 yılında Amerika'da Robert McNeel ve ortakları adlı bir kuruluş tarafından Autodesk firmasının üretmiş olduğu AutoCAD yazılımı için bir eklenti olarak geliştirilmeye başlanmıştır. Daha sonra, ayrı bir program olarak piyasaya sürülen Rhino3D modelleme yazılımı, NURBS geometrik yüzeyler ile modelleme imkanı sunar. Özellikle; endüstriyel tasarım, takı tasarımı, deniz araçları tasarımı ve mimarlık alanlarında en fazla kullanılan yazılımlardan birisi olmanın yanında otomotiv tasarımı, tersine mühendislik, ürün prototipleme, grafik tasarım ve multimedya alanlarında da sıkça kullanılmaktadır. Windows işletim sistemi ve Mac OSX işletim sistemlerinde çalışan sürümleri vardır. IronPython programlama dili ve programın kendine özgü betik dili olan RhinoScript ile betik programlama yapılabilir. .Net dilleri ile eklenti

geliştirilebildiği gibi C++ dili ile de eklenti geliştirilebilmesine olanak sağlayan yazılım geliştirme kiti (SDK) bulunmaktadır (İnt.Kyn.12, İnt.Kyn.13). Bu çalışmada Rhino3D yazılımının tercih edilmesinin nedeni SolidWorks programı ile birlikte CAD/CAM alanında en fazla kullanılan yazılımlardan birisi olmasıdır.

3.2.2 Grasshopper3D Parametrik Modelleme Yazılım Eklentisi

2007 yılında Robert McNeel ve ortakları adlı şirket bünyesinde David Rutten tarafından geliştirilmiş olan görsel programlama ortamıdır. Parametrik modelleme yapılmasına olanak sağlar. Yani, üç boyutlu modeller, bir parametrik modelleme ortamına eklenen bileşenlerin parametrelerinin değiştirilmesi yardımıyla oluşturulur. Parametrik modelleme ortamında ayrıca C# ve VB.NET ve IronPython dilleri ile özelleştirilmiş bileşenler de yazılabilir (İnt.Kyn.14, İnt.Kyn.15, Payne and Issa 2009).

Şekil 3.4'te Grasshopper3D parametrik tasarım ortamı ekran görüntüsü görülmektedir. Parametrik tasarım sahnesinde, iki adet nokta bileşeni ve bir adet çizgi bileşeni görülmektedir. Nokta bileşenleri çizgi bileşenine girdi olarak bağlanmıştır. Rhino3D üç boyutlu modelleme ortamında, Grasshopper3D parametrik yazılım ortamında oluşturulan bu çizgi görülmektedir.



Şekil 3.4 Grasshopper3D parametrik tasarım ortamı ekran görüntüsü.

3.3 Yazılım Geliştirme Araçları

Bu çalışmada, IDE (tümleşik yazılım geliştirme ortamı) olarak Visual Studio Express 2013 yazılım geliştirme ortamında, IronPython ve C# programlama dilleri ve .NET kütüphaneleri ve Rhino3D eklenti geliştirme araçları kullanılarak eklenti geliştirilmiştir.

3.3.1 C# Programlama Dili

C# programlama dili Microsoft firması tarafından geliştirilen nesne tabanlı bir dildir. C# 5.0 sürümü, 2012 yılında piyasaya sürülmüştür. Anders Hejlsberg öncülüğündeki bir ekip tarafından geliştirilmiştir. ECMA-334 ve ISO/IEC 23270:2006 standartlarına uygun olarak geliştirilmiştir. Java diline benzerlik gösterir (İnt.Kyn.16). Rhino3D modelleme ortamı için eklenti geliştirme dillerinden birisidir.

3.3.2 IronPython Programlama Dili

Jim Hugunin tarafından geliştirilen, 2006 yılında piyasaya sürülen, açık kaynak kodlu Python programlama dilinin .Net yazılım ortamında çalışan uyarlamasıdır. Rhino3D üç boyutlu modelleme programı için betik programlama dilidir. Python programlama dili ayrıca, Rhino3D üç boyutlu modelleme programının yanında 3dsMax, Blender, Cinema4D, Lightwave, Houdini, Maya, Modo, MotionBuilder, SoftImage üç boyutlu modelleme programları için, Nuke video düzenleme programı için ve GIMP, Inkscape, Scribus, PaintShop Pro gibi grafik düzenleme programları için de betik programlama dilidir (İnt.Kyn.17).

3.3.3 Visual Studio Yazılım Geliştirme Ortamı ve .Net Kütüphanesi

.NET kütüphanesi Microsoft firması tarafından geliştirilen yazılım geliştirme platformudur. Geliştirilmesine 1990 yılında başlanmış, 2000 yılında piyasaya sürülmüştür. Java yazılım geliştirme platformu ile benzerlik göstermektedir. Visual Studio Geliştirme Ortamı, yine Microsoft firması tarafından geliştirilen yazılım geliştirme ortamıdır (İnt.Kyn.18). Bu çalışmada .Net 4.5 versiyonu ve Visual Studio 2013 Desktop Express sürümleri kullanılmıştır.

3.3.4 Atan2(y, x) Yöntemi

Atan2 yöntemi .NET Kütüphanesi System.Math sınıfı içerisinde Math.Atan2(y,x) olarak tanımlanmış bir yöntemdir. XY düzlemde, koordinatları bilinen bir noktanın, orijin noktası merkezinde, +X ekseninden itibaren yaptığı dönme açısını tanımlar ve Denklem 3.5'te gösterildiği şekilde tanımlanır (İnt.Kyn.19).

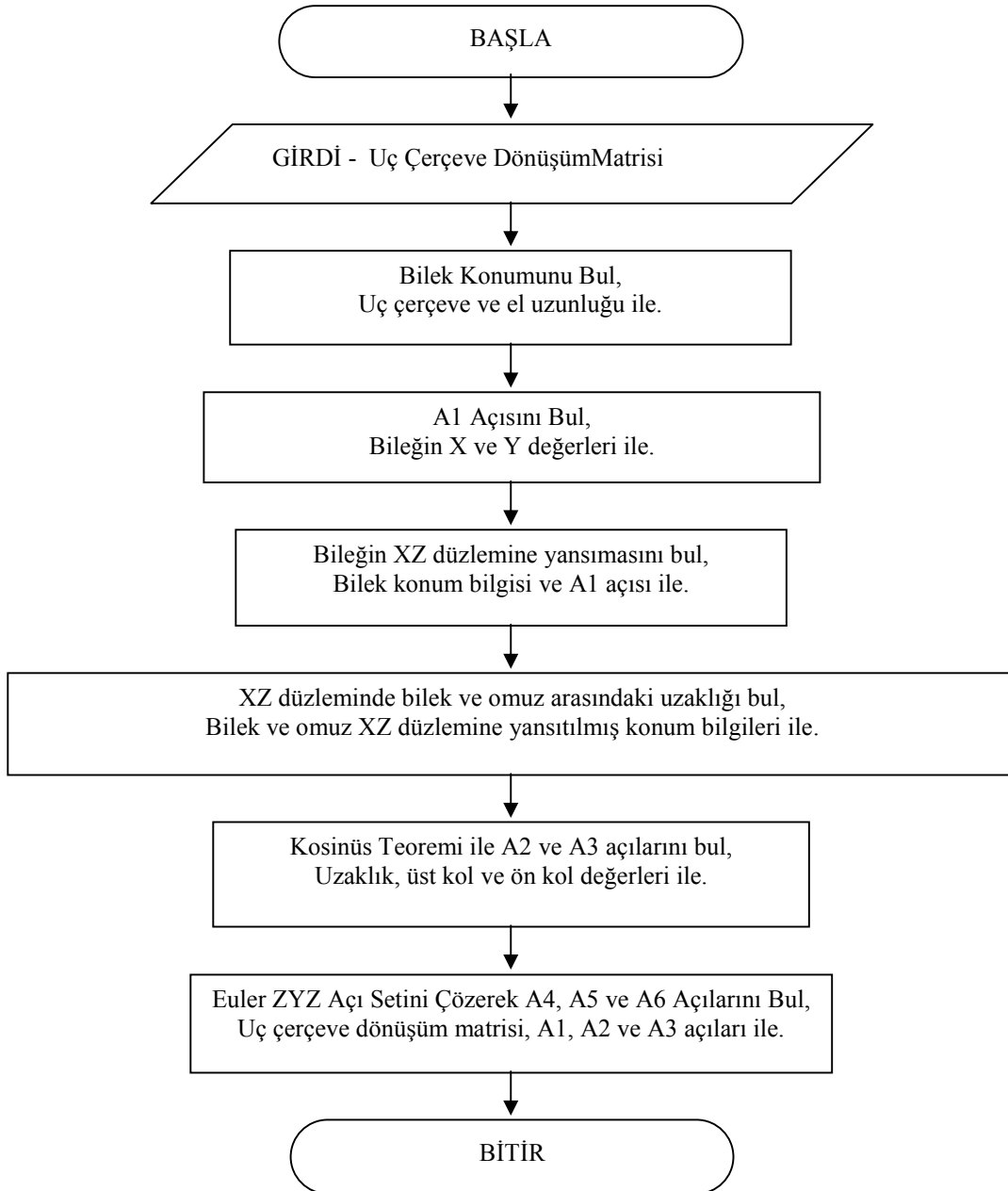
$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \tan^{-1}(y/x) & x > 0 \\ \tan^{-1}(y/x) + \pi & y \geq 0, x < 0 \\ \tan^{-1}(y/x) - \pi & y < 0, x < 0 \\ \pi/2 & y > 0, x = 0 \\ -\pi/2 & y < 0, x = 0 \\ \text{tanımsız} & y = 0, x = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

.NET kütüphanesi içinde Math.Atan2(0, 0) yönteminin aldığı değer 0 olarak tanımlanmasına rağmen, gerçekte (0, 0) noktasında bu fonksiyonun sonsuz adet çözümü olduğu için atan2(0, 0) değeri tanımsızdır. Bu yöntemin (0, 0) noktasında tanımsız olması, baş üstü sonsuz çözüm durumu ve bilek sonsuz çözüm durumunun oluşmasına neden olur.

3.4 Geometrik Çözüm Yöntemi

3.4.1 Geometrik Çözüm İşlem Adımları

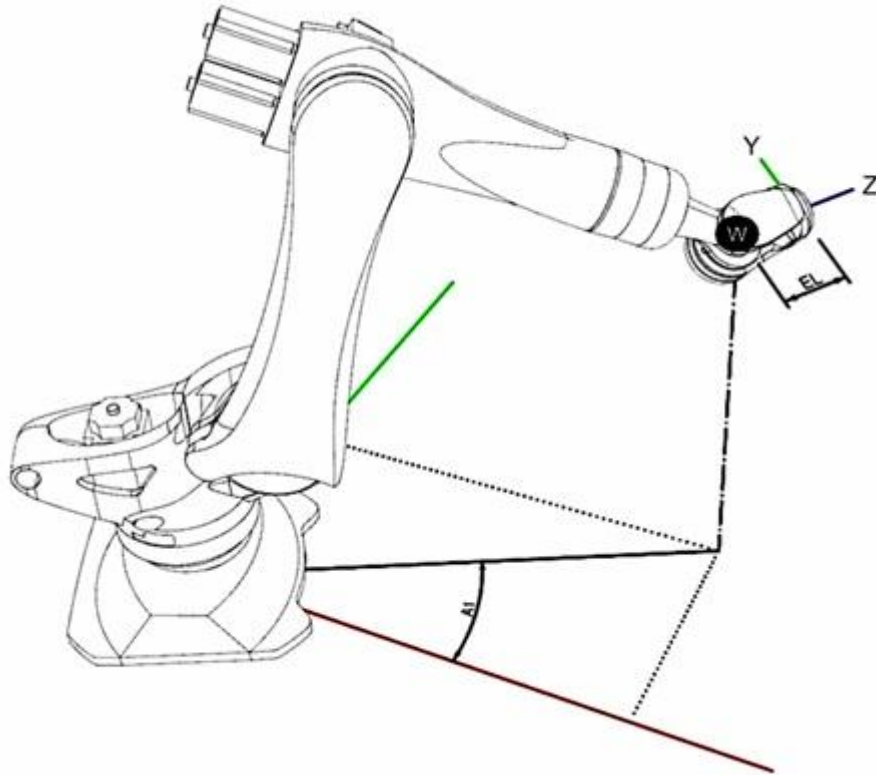
Geometrik çözümün işlem adımları Şekil 3.5'te gösterildiği gibidir ve geometrik çözüm işlem adımlarında; önce A1 açısı, sonra A3 açısı sonra A2 açısı bulunur. Küresel bilek, A4, A5 ve A6 açıları ile Euler ZYZ dönüşümü yaptığı için bu son üç açı aynı işlem adımında birlikte çözülür.



Şekil 3.5 Geometrik çözüm akış şeması.

3.4.1.1 Euler Bileğinin Konumunun Bulunması

Altı eksenli Euler bilekli bir endüstriyel robotun uç noktası için hedef dönüşüm matrisi verildiğinde, Euler bileğinin konumu, uç noktanın konumunun uç çerçevenin Z vektörü doğrultusuna eksi yönde el uzunluğu kadar ötelenmesi ile bulunur. Şekil 3.6'da bu işlem şekil üzerinde gösterilmiştir. Z eksenini mavi renk ile gösterilmiş, küresel bilek konumu ise W harfi ile gösterilmiştir.



Şekil 3.6 A1 açısı, el uzunluğu, uç çerçeve ve küresel bilek.

Denklem 3.6'da dönüşüm matrisinin üçüncü sütununda Z vektörüne ait konum bilgilerini tutan r_{13} , r_{23} ve r_{33} değerleri ve uç noktanın konum bilgilerini tutan x , y , z değerleri, Denklem 3.3'te kullanılması ile küresel bileğin konum değerleri, yani p_x , p_y , p_z değerleri bulunur.

Denklem 3.7'de bulunan el değeri ise endüstriyel robot üreticilerinin, üretmiş oldukları endüstriyel robotların teknik özelliklerini gösteren dokümanlardan elde edilebilir. Bu çalışmada kullanılan KR210 robotu için bu değer, 230 mm'dir (Anonim 2000).

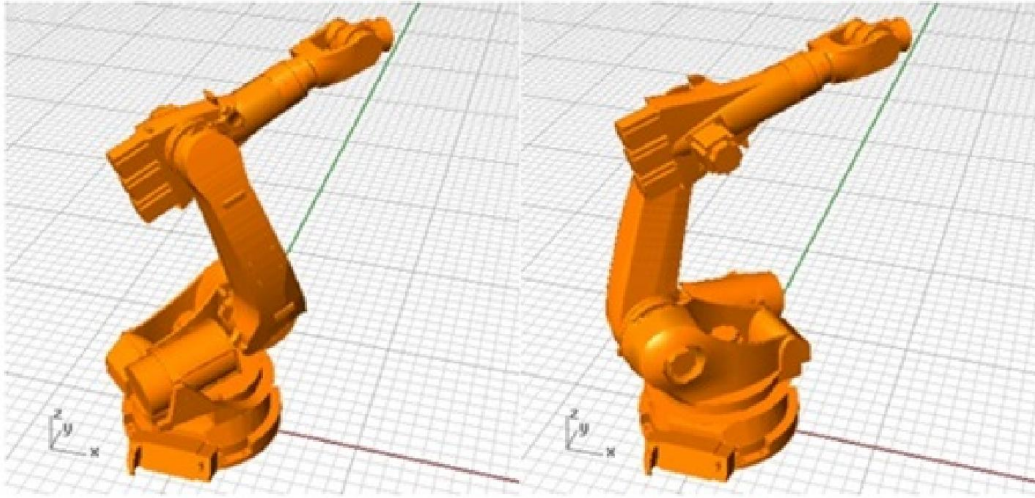
$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - el \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.4.1.2 A1 Açısının Bulunması (İleri/Geri)

Euler bileğinin konumunun XY düzlemindeki izdüşümünden yola çıkarak A1 açısı bulunur. Şekil 3.6'da küresel bilek konumunun XY üzerindeki izdüşümü ve bu noktanın +X eksenine ile yaptığı açı görülebilir.

Robotun ileri ve geri durumları için iki farklı A1 açısı çözümü vardır. Şekil 3.7'te bu ileri ve geri durumları görülmektedir.



Şekil 3.7 Kuka KR210 endüstriyel robot modeli için robotun ileri ve geri durumları için iki farklı A1 açısı (İnt.Kyn.3).

Denklem 3.8'de A1 açısı için ileri ve geri durumu olmak üzere iki farklı çözüm verilmiştir.

$$A1_{(ileri)} = atan2(p_y, p_x) \quad (3.8a)$$

$$A1_{(geri)} = atan2(-p_y, -p_x) \quad (3.8b)$$

3.4.1.3 Baş Üstü Tekillik Durumu

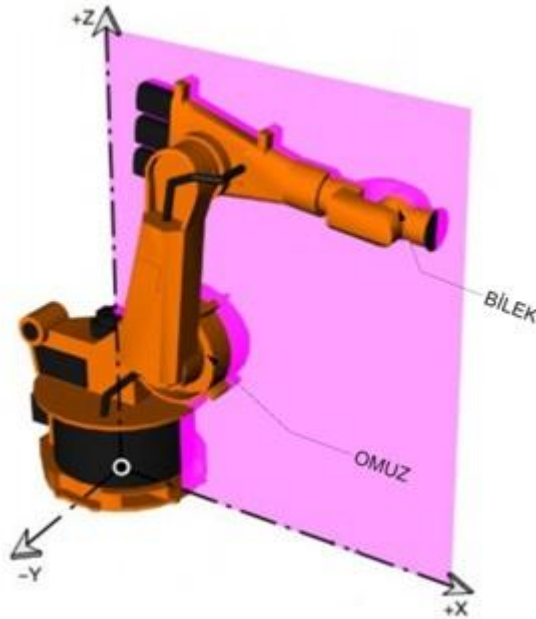
Euler bileğinin izdüşümü orijinde olması durumunda ters kinematik için sonsuz adet çözüm kümesi oluşur. Bunun nedeni atan2 fonksiyonu (0, 0) noktasında tanımsız olmasıdır. Bu durum baş üstü tekillik durumu (Overhead Singularity) olarak adlandırılır. Denklem 3.9'da baş üstü tekillik durumu ifade edilmiş, Şekil 2.8'de ise şekil üzerinde gösterilmiştir.

$$\text{atan2}(p_y, p_x) \rightarrow \text{atan2}(0, 0) = \text{tanımsız} \quad (3.9)$$

3.4.1.4 Bilek ve Omuz Arasındaki Uzaklığın Hesaplanması

Bilek ve omuz arasındaki uzaklık değeri yalnızca A3 açısının aldığı değere bağlı olarak değişir. Yani, bilek ve omuz arasındaki uzaklık değeri A1 açısından bağımsızdır.

A1 açısı sıfır olduğunda bilek ve omuz eklemlerinin konumları aynı XZ düzleminde olacağı için, bu durum, bu iki nokta arasındaki uzaklığı hesaplamada bize kolaylık sağlar. Şekil 3.8'de A1 açısı sıfır olduğunda endüstriyel robotun bilek ve omuz ekleminin XZ düzleminde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8 Kuka KR210 endüstriyel robot üzerinde A1 açısı sıfır iken küresel bilek ve omuz ekleminin XZ düzlemindeki konumları (Anonim 2003).

Euler bileğinin XY düzleminde, bulunan A1 açı değeri kadar ters yönde Z ekseninde döndürülmesi ile Euler bileğinin XZ düzlemine yansıtılmış görüntüsü bulunur. Endüstriyel robotun A1 açı değeri sıfır iken, Euler bileğinin hangi konumda olacağı Denklem 3.10'da gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$\text{Bileğin XZ düzlemine yansması} = \begin{vmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos A1 & \sin A1 & 0 \\ -\sin A1 & \cos A1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{vmatrix} \quad (3.10)$$

A1 açısı sıfır iken omuz ekleminin konum değeri endüstriyel robotun teknik verilerine bakılarak elde edilebilir. Bu değer, Kuka KR210 endüstriyel robot modelinde, robotun başlangıç konumunda omuzun, orijinden X eksenindeki uzaklığı 350 mm ve Z ekseninde uzaklığı 750 mm'dir (Anonim 2000) ve Denklem 3.11'de birinci ve üçüncü satırındaki değerler bu şekilde elde edilir.

$$\text{Omuz ekleminin XZ düzlemine yansması} = \begin{vmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{vmatrix} \quad (3.11)$$

Yukarıdaki değerler bilindiğinde, bu iki nokta arasındaki uzaklık Denklem 3.12'de belirtildiği şekilde hesaplanabilir.

$$x = w_x - s_x \quad (3.12a)$$

$$z = w_z - s_z \quad (3.12b)$$

$$d = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (3.12c)$$

3.4.1.5 Erişilebilirlik Hatasının Hesaplanması

Elde edilen bu uzaklık değeri robotun üst kol ve ön kol bağlantı uzunlukları toplamından fazla ya da farklarından az olmamalıdır. Eğer bu iki nokta arasındaki uzaklık, ön kol ve üst kol toplamlarından fazla ise, ya da farklarından az ise robot bu konuma erişemez ve erişilebilirlik hatası oluşur ve ters kinematik denklem için çözüm kümesi boştur. Yani tanımlanan uç çerçeve değeri robotun çalışma uzayının dışındadır ve robot bu noktaya erişemez.

Erişilebilirlik hatasının oluşma koşulu Denklem 3.13'te gösterildiği şekildedir.

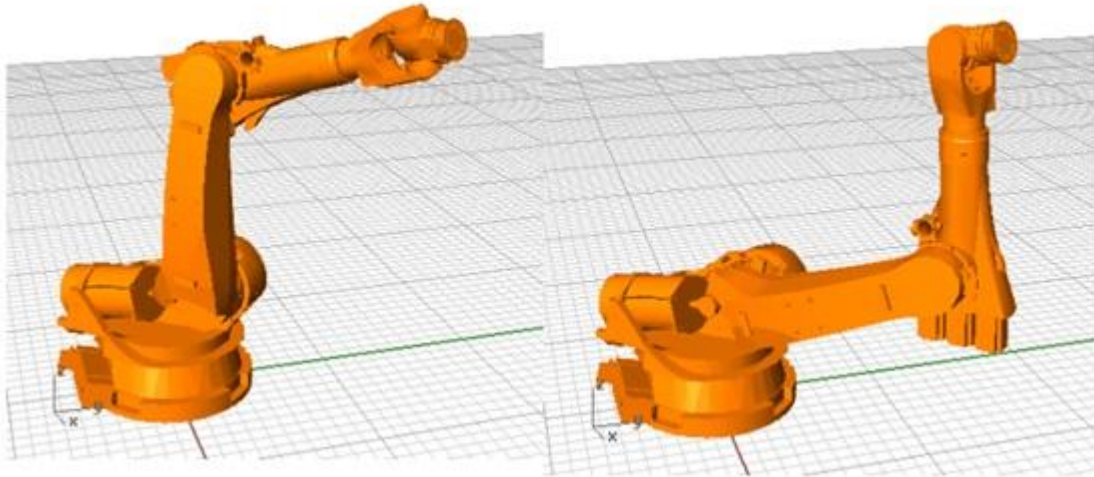
$$\text{Üst Kol} = u$$

$$\text{Ön Kol} = f$$

$$d > (u + f) \quad \text{ya da} \quad d < \text{abs}(u - f) \quad (3.13)$$

3.4.1.6 A2 ve A3 Açılarının Bulunması (Yukarı/Aşağı)

A2 ve A3 açıları için, robotun dirsek konumunun yukarı ve aşağı olduğu iki farklı çözüm kümesi vardır. Robotun dirsek konumunun yukarı ve aşağı durumları Şekil 3.9'da görüldüğü gibidir.



Şekil 3.9 Kuka KR210 endüstriyel robot modeli için robotun dirsek konumunun yukarı ve aşağı durumları için iki farklı A2 ve A3 açısı (İnt.Kyn.3).

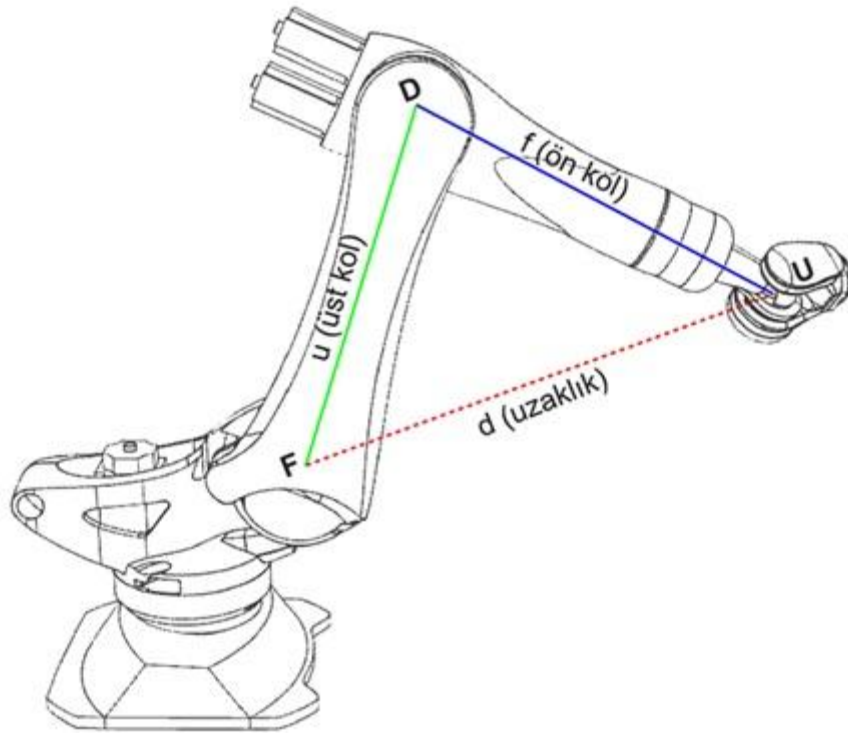
Bir üçgende üç kenar uzunluğu biliniyor ise bu üçgenin iç açıları Kosinüs Teoremi ile hesaplanabilir. Kosinüs Teoremi ile Denklem 3.14'te ve Denklem 3.15'te gösterilen eşitlikler elde edilir.

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C \quad (3.14)$$

$$\cos C = (a^2 + b^2 - c^2) / 2ab \quad (3.15)$$

Bir endüstriyel robotun üst kol ve ön kol bağlantı uzunlukları endüstriyel robotun teknik verilerinden elde edilebilir. Bu çalışmada kullanılacak olan KR210 endüstriyel robot için üst kol bağlantı uzunluğu değeri 1250 mm, ön kol bağlantı uzunluğu değeri ise yaklaşık olarak 1101.37 mm'dir (Anonim 2000).

Bilek ve omuz arasındaki uzaklık değerinin hesaplanması işlemi Denklem 3.12'de gösterilmiştir. Bu durumda, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, üç kenar uzunluğu bilinen bir üçgen oluşur.



Şekil 3.10 Üst kol, ön kol ve uzaklık değerleri ile üç kenarı bilinen üçgen oluşur.

Kosinüs teoremi denkleminde yola çıkarak, Denklem 3.16 ve Denklem 3.17 denklemleri elde edilir.

$$\cos D = (u^2 + f^2 - d^2) / 2uf \quad (3.16)$$

$$\cos F = (u - f \cos D) / d \quad (3.17)$$

Denklem 3.16'da ve Denklem 3.17'de elde edilen bu değerler, Denklem 3.18'de kullanılarak dirsek konumu yukarı ve aşağı olmak üzere iki farklı A3 açısı, yani dirsek

açısı, ve yine bu değerler Denklem 3.19'da kullanılarak dirsek yukarı ve aşağı olmak üzere iki farklı A2 açısı yani omuz açısı değerleri hesaplanabilir.

$$A3_{(Yukarı)} = DirsekAçısı - \cos^{-1} \cos D \quad (3.18a)$$

$$A3_{(Aşağı)} = DirsekAçısı + \cos^{-1} \cos D \quad (3.18b)$$

$$A2_{(Yukarı)} = \text{atan2}(x, z) - \cos^{-1} \cos F \quad (3.19a)$$

$$A2_{(Aşağı)} = \text{atan2}(x, z) + \cos^{-1} \cos F \quad (3.19b)$$

3.4.1.7 Genişletilmiş Konum Hatası

Endüstriyel robot üreticileri, üretmiş oldukları endüstriyel robotun özelliklerine göre dirsek eklemi için belirli bir genişletilmiş konum tolerans açısı değeri tanımlarlar. Bu açı değeri robotun teknik verilerinden elde edilebilir. Genişletilmiş konum hatası Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Denklem 3.20'de ifade edilen karşılaştırma işlemi, altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robot için genişletilmiş konum hatasının oluşma koşuludur.

$$\cos^{-1} - \cos D \geq Tolerans_{(Dirsek)} \quad (3.20)$$

3.4.1.8 A4, A5 ve A6 Açılarının Bulunması (Artı/Eksi)

Uç çerçevedeki yönelim bilgilerini tutan normal vektörlerine ait değerler uç çerçeve dönüşüm matrisinin ilk üç sütununda bulunur. Bu ilk üç sütundaki normal vektörleri, önce XY düzleminde A1 açısı miktarı kadar ters yönde, sonra XZ düzleminde A2, A3 ve $\pi/2$ açı değerlerinin toplamı kadar ters yönde döndürülerek elde edilen dönüşüm matrisi ile, Euler ZYZ normal vektörleri elde edilir. Bu işlem Denklem 3.21'de gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$\theta = A2 + A3 + \pi/2 \quad (3.21a)$$

$$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos A1 & \sin A1 & 0 \\ -\sin A1 & \cos A1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} \quad (3.21b)$$

Euler ZYZ dönüşüm matrisi, normal vektörlerin önce Z ekseninde, sonra Y eksenin ve sonra Z eksenin döndürülmesi ile elde edilen vektörlerdir. Euler ZYZ açısı seti, Denklem 3.18 ve Denklem 3.19'da ifade edilen denklemler yardımıyla hesaplanabilir ve Euler ZYZ dönüşüm işleminin görüldüğü gibi iki farklı çözüm kümesi vardır. Yani A4, A5 ve A6 açıları için iki farklı çözüm kümesi vardır. Denklem 3.22'de görülen çözüm kümesinde A5 açısı her zaman sıfır değerinden büyük, Denklem 3.23'te görülen çözüm kümesinde ise, A5 açısı her zaman sıfırdan küçük bir değer alır (Eberly 2008).

Çözüm I (A5 > 0 ise);

$$A4_{(Artı)} = \text{atan2}(z_2, z_1) \quad (3.22a)$$

$$A5_{(Artı)} = \cos^{-1}(z_3) \quad (3.22b)$$

$$A6_{(Artı)} = \text{atan2}(y_3, -x_3) \quad (3.22c)$$

Çözüm II (A5 < 0 ise);

$$A4_{(Eksi)} = \text{atan2}(-z_2, -z_1) \quad (3.23a)$$

$$A5_{(Eksi)} = -\cos^{-1}(z_3) \quad (3.23b)$$

$$A6_{(Eksi)} = \text{atan2}(-y_3, x_3) \quad (3.23c)$$

3.4.1.9 Euler Bileği İçin Sonsuz Çözüm Hatası

Denklem 3.22'de A5 açısının sıfırdan büyük olduğu durumlar için, Denklem 3.23'te ise A5 açısının sıfırdan küçük olduğu durumlar için çözüm kümesi gösterilmiş, ancak A5 açısının 0 ya da π olduğu durumlar için çözüm önerilmemiştir. Çünkü A5 açısının 0 ya da π olduğu durumlarda Euler bileği için sonsuz çözüm hatası ortaya çıkar ve bu durumda ters kinematik denklem için sonsuz adet çözüm vardır (Eberly 2008).

Endüstriyel Robot üreticileri, Euler bileği sonsuz çözüm hatasını tanımlarken, üretmiş oldukları endüstriyel robotun özelliklerine göre, bilek eklem açısı için belirli bir tolerans açısı değeri tanımlar. Bu açı değeri robotun teknik verilerinden elde edilebilir. Bu çalışmada kullanılan Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörü için Euler bileği sonsuz çözüm hatası ($-0.01812^\circ \leq A5 \leq 0.01812^\circ$) koşulu ile tanımlanmıştır (Anonim 2003). Bu değer ile yapılacak karşılaştırma işlemleri sonucunda Euler bileği sonsuz

çözüm hatası tespit edilebilir. Denklem 3.24a'da A5 açısının sıfır olduğu durumdaki Euler bileği sonsuz çözüm hatası oluşma koşulu ifade edilmiştir. Denklem 3.24b'de ise bu sonsuz çözüm hatasındaki belirsizlik durumu denklem olarak gösterilmiştir.

Hata I ($A5 \cong 0$ ise);

$$\cos^{-1}(z_3) \leq Tolerans_{(Bilek)} \quad (3.24a)$$

$$A4_0 + A6_0 = atan2(x_2, y_2) \quad (3.24b)$$

$$A5_0 = 0 \quad (3.24c)$$

Denklem 3.25a'da A5 açısının π sayısına eşit olduğu durumdaki Euler bileği sonsuz çözüm hatası oluşma koşulu ifade edilmiştir. Denklem 3.25b'de ise bu sonsuz çözüm hatasındaki belirsizlik durumu denklem olarak gösterilmiştir. Ancak, hemen hemen bütün endüstriyel robotlar için, A5 açısı π değerini aldığı zaman zaten A5 açısı için tanımlanan eksen limitinin dışında bir değer almış olacakları için, bu belirsizlik durumu ile karşılaşmayacaktır. Örnek olarak, Çizelge 3.2'de bu çalışmada kullanılacak olan Kuka KR210 endüstriyel robot manipülatörü için tanımlanmış olan eksen açı limitleri görülmektedir. Bu çizelgede A5 eksen açı limiti değeri $\pm 125^\circ$ olarak gösterilmiştir. Yani, A5 açısı radyan cinsinden π değerini aldığı zaman, zaten eksen açı limitlerinin dışına da çıkmış olmaktadır. Bu nedenden dolayı Kuka KR210 endüstriyel robot modelinde, Denklem 3.25'te tanımlanan belirsizlik durumu ile karşılaşma olasılığı yoktur. Bu endüstriyel robot modelinden yalnızca Denklem 3.24'te tanımlanmış olan Euler bileği sonsuz çözüm hatası ile karşılaşılma olasılığı bulunmaktadır.

Hata II ($A5 \cong \pi$ ise);

$$\cos^{-1}(-z_3) \leq Tolerans_{(Bilek)} \quad (3.25a)$$

$$A4_\pi + A6_\pi = atan2(-x_2, -y_2) \quad (3.25b)$$

$$A5_\pi = \pi \quad (3.25c)$$

3.5 Endüstriyel Robot Benzetim Ortamı

Bu çalışmada, altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robotun ters kinematik çözümü için öne sürülen basit geometrik yöntem kullanılarak, bu özellikteki bir endüstriyel robotun parametrik tasarım ortamında benzetimi yapılabilen, bir benzetim ortamı eklentisi geliştirilmiştir. Bu benzetim ortamı eklentisi, Rhino3D üç boyutlu modelleme programı üzerine eklenti olarak kurulan ve Rhino3D üç boyutlu modelleme programı ile tümleşik olarak çalışan Grasshopper3D parametrik modelleme ortamında çalışacak şekilde geliştirilmiştir. Bu sayede, benzetimi yapılan endüstriyel robot, parametrik tasarım ortamında, parametrik olarak kontrol edilebilmektedir. Bu benzetim ortamının geliştirilmesinde IronPython betik dili ve C# programlama dili kullanılmıştır. Editör olarak, program bünyesinde bulunan, Grasshopper Python Betik Editörü ve Visual Studio 2013 Express for Desktop yazılım geliştirme ortamı kullanılmıştır.

Endüstriyel robot benzetim ortamında dört adet bileşen bulunmaktadır.

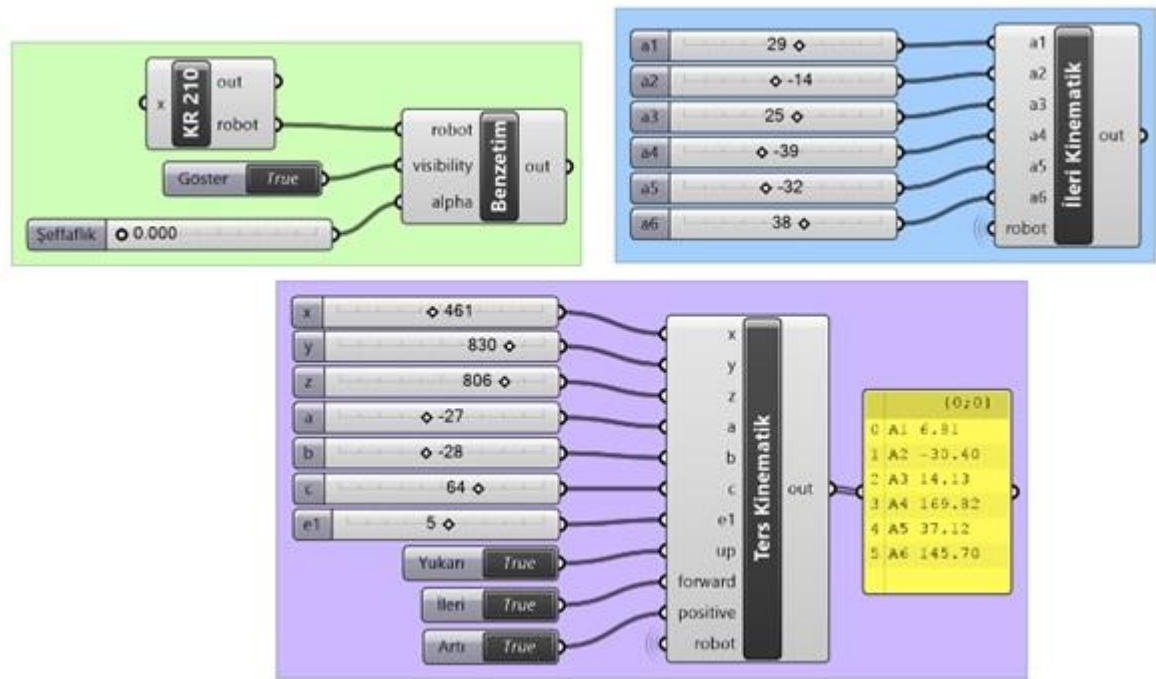
- a. KR 210 Bileşeni
- b. Benzetim Bileşeni
- c. İleri Kinematik Bileşeni
- d. Ters Kinematik Bileşeni

KR 210 bileşeni, endüstriyel robotun teknik özelliklerinin tanımlandığı bileşendir. Bir adet *robot* adlı çıkış parametresi vardır. Bu çıkış parametresi, diğer bileşenlerde, robot özelliklerinin tanımlandığı giriş parametresi olarak kullanılmaktadır.

Benzetim bileşeni, endüstriyel robotun benzetim özelliklerinin tanımlandığı bileşendir. Benzetim bileşeni üzerinde, göster/gizle, şeffaflık değeri ve robot parametreleri olmak üzere üç adet giriş parametresi bulunmaktadır.

İleri kinematik bileşeni, açı değerleri girilerek endüstriyel robotun benzetiminin yapılabileceği bileşendir. İleri kinematik bileşeni üzerinde, endüstriyel robotun teknik özelliklerinin tanımlandığı bir robot parametresi ve endüstriyel robotun açı değerlerinin girilebileceği altı adet giriş parametresi bulunmaktadır.

Ters kinematik bileşeni, uç çerçeve tanımlanarak, endüstriyel robotun benzetiminin yapılabileceği bileşendir. Bu bileşen üzerinde uç çerçevenin ve bir adet harici eksenin tanımlanabileceği giriş parametreleri, endüstriyel robotun teknik özelliklerinin tanımlandığı robot parametresi ve endüstriyel robotun ileri/geri, yukarı/aşağı ve artı/eksi parametrelerinin tanımlandığı giriş parametreleri bulunmaktadır. Ayrıca bu bileşen üzerinde, giriş parametreleri tanımlandığında endüstriyel robotun alacağı açı değerlerinin görülebildiği bir adet çıkış parametresi bulunmaktadır. Bu dört adet bileşen Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11 Grasshopper3D endüstriyel robot benzetim ortamı bileşenleri.

Şekil 3.12'de ters kinematik bileşenine ait kod parçası görülmektedir. Bu kod parçası içinde *pointFrame* değişkeni uç çerçeve bilgilerini tutan nesnedir. Yapıcı değişkenler ile konum bilgileri tanımlanır. *ZYX* özellik ataması ile yönelim bilgileri tanımlanır. *viewport_rotation* değişkeni ile harici dönel eksen açı değeri hesaplanır. *toolFrame* ve *baseFrame* değişkenleri endüstriyel robota ait çalışma çerçevesi ve araç çerçevesi değerlerinin tanımlandığı nesnelere atılır. *Solve (forward, up, positive)* yöntemi üç adet parametre alır. Bu parametreler ile endüstriyel robotun ileri / geri, dirsek yukarı / aşağı, artı / eksi durumları tanımlanır. Tanımlanan değerler ile ekran yenilenir ve endüstriyel robotun eksenlerine ait açı değerleri çıktı olarak yazdırılır.

```

pointFrame = Arm.Frame(x, y, z)
pointFrame.ZYX = (math.radians(a), math.radians(b), math.radians(c))
viewport_rotation = math.radians(e1) - robot.robot.E1
robot.robot.E1 = math.radians(e1)

toolFrame = Arm.Frame(360, 0, 100)
toolFrame.ZYX = (-math.pi / 2, 0, math.pi / 2)

baseFrame = Arm.Frame(400, 400, 1400)
baseFrame.ZYX = (-math.pi / 2, 0, 0)

robot.robot.ToolFrame = toolFrame
robot.robot.BaseFrame = baseFrame
robot.robot.RobTarget = pointFrame

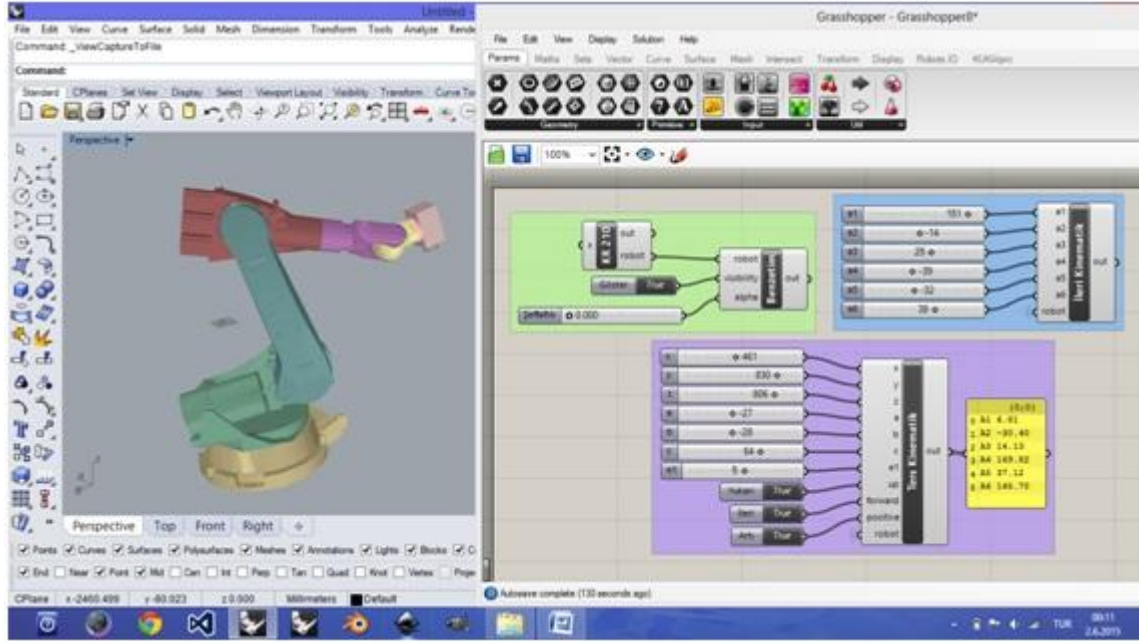
robot.robot.Solve(forward, up, positive)
if (abs(viewport_rotation) > 1e-10):
    doc.Views.ActiveView.ActiveViewport.Rotate(viewport_rotation,
    doc.Views.Redraw()

print ("A1 %.2f" % math.degrees(robot.robot.A1))
print ("A2 %.2f" % math.degrees(robot.robot.A2))
print ("A3 %.2f" % math.degrees(robot.robot.A3))
print ("A4 %.2f" % math.degrees(robot.robot.A4))
print ("A5 %.2f" % math.degrees(robot.robot.A5))
print ("A6 %.2f" % math.degrees(robot.robot.A6))

```

Şekil 3.12 Ters Kinematik bileşenine ait kod parçası.

Şekil 3.13'te Grasshopper3D benzetim ortamı içinde yazılımı geliştirilen benzetim ortamına ait dört adet bileşen ve bu bileşenler üzerindeki parametreler değiştirilerek Rhino3D modelleme ortamında endüstriyel robotun benzetiminin yapıldığı ekran görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Grasshopper3D endüstriyel robot benzetim ortamı ekran görüntüsü.

Bu çalışmada kullanılan ve yazılımı geliştirilen endüstriyel robot benzetim ortamının, bu alandaki diğer benzetim ortamlarından en önemli farkı, bileşen içinde bulunan ve yazılımı geliştirilen ters kinematik bileşenin, öne sürülen geometrik yöntem ile tanımlanmış olmasıdır.

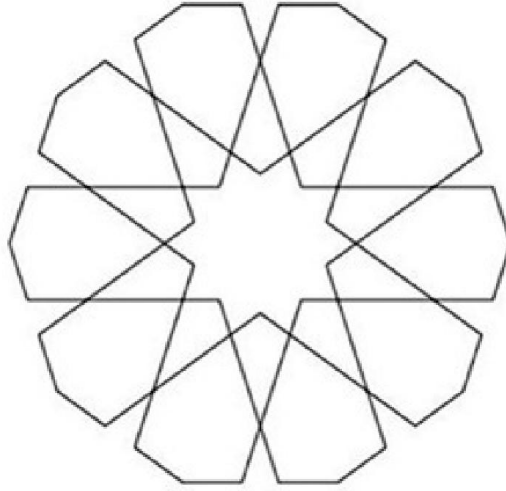
Bir diğer önemli farkı ise belirli bir alanda kullanılmak için özelleşmiş olmasıdır. Bu alandaki diğer benzetim ortamları da farklı alanlarda kullanılmak için özelleşmiş yazılımlarıdır. Örneğin, KUKA|prc yazılımı, basitleştirilmiş görevler için hem üretim hem de benzetim ortamı olmak için özelleşmiştir. Robots.IO yazılımı, metallerin bükülerek istenilen formu aldığı bir üretim sürecinde kullanılmak için özelleşmiş olup yazılım içerisinde, bu alanda kullanılmak için geliştirilmiş olan bir takım özel araçlar bulunur. HAL yazılımı, çok daha genel amaçlı ve endüstriyel robotların kullanıldığı bir çok alan için özelleşmiş modüller bulundurmaktadır. Bu çalışmada anlatılan, yazılımı geliştirilen benzetim ortamı ise, 3D Robotic Milling olarak adlandırılan bir üretim alanında yardımcı araç olarak kullanılmak için özelleşmiştir. 3D Robotic Milling, strafor, ahşap, doğal taş gibi malzemelerin hammadde olarak kullanıldığı, üretim sürecinde endüstriyel robotların kullanıldığı, bilgisayar destekli üretim sürecidir. Yazılımı geliştirilen benzetim ortamı ise bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli üretim (CAM) programlarının tamamlayıcısı olma özelliğindedir. Yani bu

programlar sayesinde elde edilen takım yolları bu benzetim ortamında uç çerçeve olarak tanımlandığında endüstriyel robotun alacağı açı değerleri tespit edilebilir ve endüstriyel robot ile ilgili hatalar tespit edilebilir. Ayrıca, bu çalışmada yazılımı geliştirilen benzetim ortamında, endüstriyel robot ile birlikte bir adet harici dönel eksenin de benzetimi yapılabilmektedir. Harici dönel eksen yine bu alan için özelleşmiş bir özelliktir.

4. BULGULAR

4.1 Geometrik Çözüm Yönteminin Doğrulanması

Bu araştırmada öne sürölen geometrik yöntemin doğrulanması sürecinde, Şekil 4.1'de gösterilen "Selçuklu Deseni" adı verilen geometrik desen, bilgisayar destekli tasarım ortamı olan Rhino3D üç boyutlu modelleme ortamında çizilmiş ve bilgisayar destekli üretim ortamında takım yolları oluşturulmuştur.

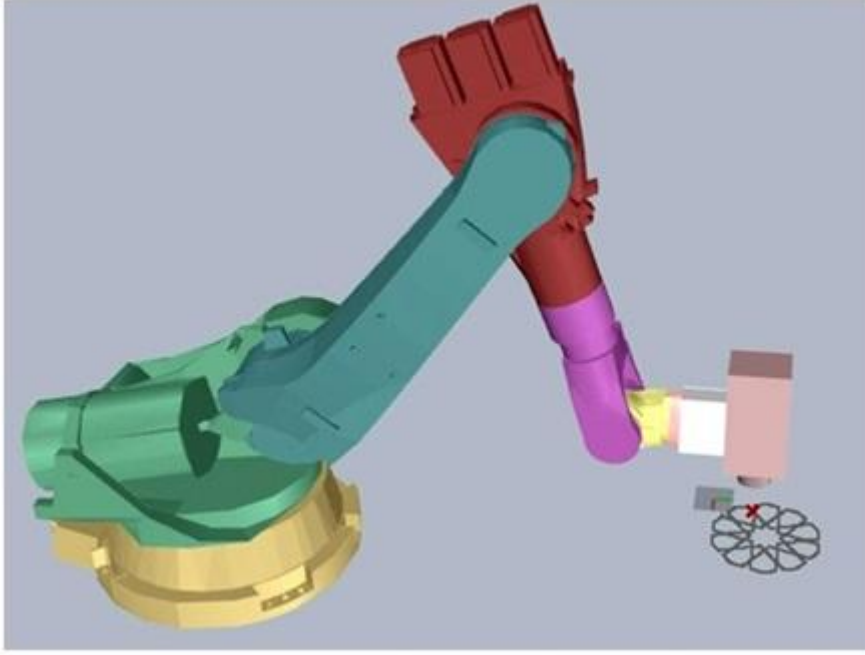


Şekil 4.1 Selçuklu deseni.

Oluşturulan takım yolları bilgisayar ortamında ve KR 210 endüstriyel robot manipölatörü ile yapılan üretim işleminde kullanılmış ve bu çalışmada öne sürölen geometrik yöntemin doğruluğu araştırılmıştır.

4.1.1 Sonuçların Benzetim Ortamında Doğrulanması

Oluşturulan takım yolları, önce bilgisayar ortamında, geliştirilen parametrik yazılım ortamında benzetimi yapılmış ve tekillik, erişilebilirlik, eksen limitlerinin doğrulanması ve çarpışma hatalarına karşı test edilmiştir. Bu doğrulama sırasında, endüstriyel robota ait olan çalışma çerçevesi (Base Frame) ve araç çerçevesi (Tool Frame) değerleri bu benzetim ortamına birebir aktarılmış ve gerçek üretim ortamı, benzetim ortamında oluşturulmuştur. Şekil 4.2'de benzetim ortamında oluşturulan takım yollarının doğrulandığı sahne görölmektedir.



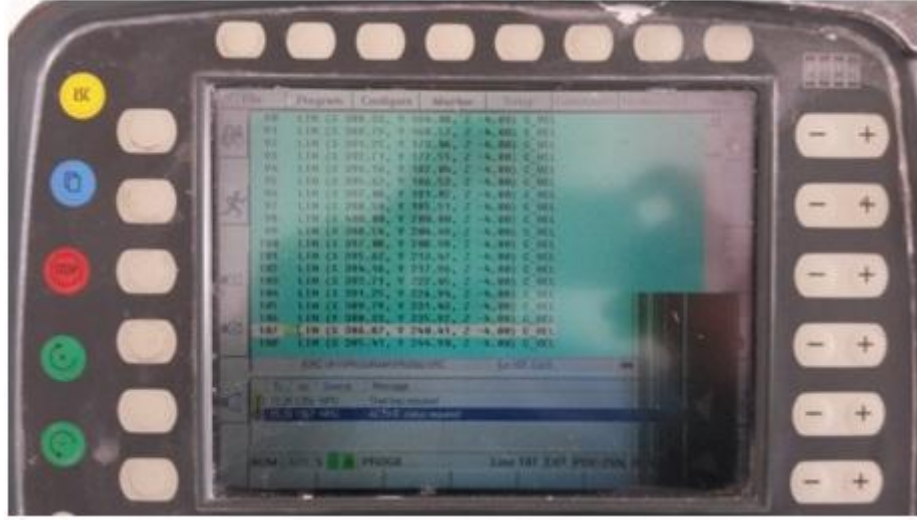
Şekil 4.2 Benzetim ortamında KR 210 endüstriyel robot manipülatörü ve Selçuklu desenine ait takım yolu.

4.1.2 Sonuçların Endüstriyel Robot Üzerinde Doğrulanması

KR 210 endüstriyel robot için koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile bir hedef tanımlanabilir. Selçuklu deseni takım yoluna ait, koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile hedef tanımlanarak yapılan robot programının ekran görüntüsü Şekil 4.3'te görülmektedir. Şekil 4.4'te bu programın KR 210 endüstriyel robot el kumanda panelindeki ekran görüntüsü görülmektedir.

```
PTP {X 100.00, Y 37.54, Z 6.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_PTP
$VEL.CP=0.023365
LIN {X 100.00, Y 37.54, Z 1.00} C_VEL
LIN {X 100.00, Y 37.54, Z -4.00} C_VEL
$VEL.CP=0.011683
LIN {X 103.82, Y 34.77, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 107.64, Y 31.99, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 111.46, Y 29.21, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 115.28, Y 26.44, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 119.10, Y 23.66, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 122.92, Y 20.89, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 126.74, Y 18.11, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 130.56, Y 15.34, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 134.38, Y 12.56, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 138.20, Y 9.79, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 142.92, Y 9.79, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 147.64, Y 9.79, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 152.36, Y 9.79, Z -4.00} C_VEL
LIN {X 157.08, Y 9.79, Z -4.00} C_VEL
```

Şekil 4.3 Koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile hedef tanımlanarak yapılan robot programı



Şekil 4.4 Koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile hedef tanımlanarak yapılan robot programının KCP el kumanda paneli ekranındaki görüntüsü.

Aynı zamanda, robotun eksen açıları ile endüstriyel robot için hedef tanımlanabilir. Endüstriyel robotun açı değerleri ise, bu çalışmada öne sürülen geometrik yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.5'te ise endüstriyel robotun eksen açıları ile hedef tanımlanmış ve yine aynı Selçuklu deseni takım yoluna ait endüstriyel robot programının ekran görüntüsü görülmektedir. Şekil 4.6'da ise eksen açıları ile tanımlanmış endüstriyel robot programının KCP el kumanda paneli üzerindeki ekran görüntüsü görülmektedir.

```

PTP {A1 -3.96, A2 -51.15, A3 125.99, A4 -4.92, A5 -76.33, A6 9.71} C_PTP
PTP {A1 -3.96, A2 -50.86, A3 125.96, A4 -4.91, A5 -76.59, A6 9.69} C_PTP
PTP {A1 -3.96, A2 -50.57, A3 125.92, A4 -4.90, A5 -76.84, A6 9.66} C_PTP
PTP {A1 -3.81, A2 -50.61, A3 126.09, A4 -4.75, A5 -76.97, A6 9.61} C_PTP
PTP {A1 -3.66, A2 -50.64, A3 126.26, A4 -4.59, A5 -77.10, A6 9.57} C_PTP
PTP {A1 -3.51, A2 -50.68, A3 126.42, A4 -4.43, A5 -77.23, A6 9.52} C_PTP
PTP {A1 -3.35, A2 -50.71, A3 126.59, A4 -4.27, A5 -77.35, A6 9.47} C_PTP
PTP {A1 -3.20, A2 -50.75, A3 126.75, A4 -4.12, A5 -77.48, A6 9.42} C_PTP
PTP {A1 -3.05, A2 -50.78, A3 126.92, A4 -3.96, A5 -77.61, A6 9.37} C_PTP
PTP {A1 -2.89, A2 -50.81, A3 127.08, A4 -3.80, A5 -77.74, A6 9.33} C_PTP
PTP {A1 -2.74, A2 -50.85, A3 127.25, A4 -3.64, A5 -77.86, A6 9.28} C_PTP
PTP {A1 -2.58, A2 -50.88, A3 127.41, A4 -3.48, A5 -77.99, A6 9.24} C_PTP
PTP {A1 -2.43, A2 -50.91, A3 127.57, A4 -3.32, A5 -78.12, A6 9.19} C_PTP
PTP {A1 -2.23, A2 -50.92, A3 127.58, A4 -3.11, A5 -78.12, A6 9.14} C_PTP
PTP {A1 -2.02, A2 -50.92, A3 127.60, A4 -2.90, A5 -78.13, A6 9.09} C_PTP
PTP {A1 -1.82, A2 -50.93, A3 127.61, A4 -2.70, A5 -78.13, A6 9.05} C_PTP
PTP {A1 -1.62, A2 -50.93, A3 127.62, A4 -2.49, A5 -78.14, A6 9.00} C_PTP
PTP {A1 -1.42, A2 -50.94, A3 127.63, A4 -2.28, A5 -78.14, A6 8.95} C_PTP

```

Şekil 4.5 Endüstriyel robotun eksen açıları ile hedef tanımlanarak yapılan robot programı



Şekil 4.6 Endüstriyel robotun eksen açıları ile hedef tanımlanarak yapılan robot programının KCP el kumanda paneli ekranındaki görüntüsü.

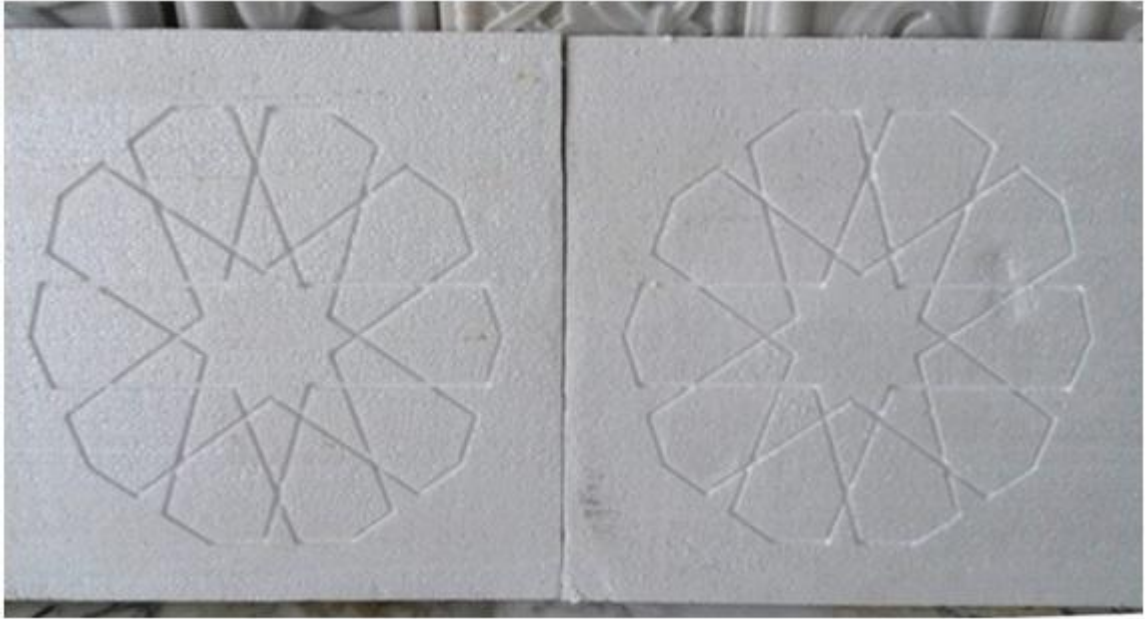
Her iki endüstriyel robot programı da aynı program olup, Selçuklu Deseni takım yolunun işlenmesi programıdır. Birinci program koordinat ekseninde konum ve yönelim bilgileri ile tanımlanmış, ikinci program ise eksen açıları ile tanımlanmıştır. Şekil 4.7'de bu iki endüstriyel robot programının işlem süreci görülmektedir.



Şekil 4.7 Endüstriyel robot programlarının yürütülmesi.

Koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile tanımlanan hedef bilgileri kullanılarak elde edilen endüstriyel robot eksen açıları bu çalışmada öne sürülen geometrik yöntem ile elde edilmiştir. Bu iki program çalıştırıldığında aynı sonucun alınması ve endüstriyel robotun takip edeceği yörüngenin aynı olması beklenmektedir.

Şekil 4.8'de bu iki programın yürütülmesi ile elde edilen işlem sonuçları bir arada görülebilmektedir. Solda, koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile yapılan endüstriyel robot programı işlem ürünü, sağda ise endüstriyel robot eksen açıları ile yapılan endüstriyel robot programı işlem ürünü görülmektedir. Bu iki işlemdeki herhangi eşdeğer iki çizgi çiftinin rastlantısal olarak birbirinin benzeri olma olasılığı çok küçüktür. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi iki farklı yöntemle aynı şekil işlem ürünü olarak elde edilebilmiştir. Tüm eşdeğer çizgi çiftlerinin benzer olması, önerilen ters kinematik çözümün doğruluğu hakkında bilgi verir.



Şekil 4.8 Koordinat sisteminde konum ve yönelim bilgileri ile yapılan endüstriyel robot programı işlem ürünü (solda) ve endüstriyel robot eksen açıları ile yapılan endüstriyel robot programı işlem ürünü (sağda).

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma, altı eksenli küresel bilekli ve robotun başlangıç konumunda omuz, dirsek, bilek ve uç noktası aynı XZ düzleminde olan endüstriyel robotların ters kinematik çözümüne geometrik çözüm önermektedir. Bu çalışmanın sonuçları birçok endüstriyel robot üreticisinin ürettiği güncel robot modellerinin ters kinematik çözümü için uygulanabilir. Ayrıca öne sürülen geometrik çözüm yöntemi, analitik çözüm yöntemi olduğu için, kesin sonuç üretir ve bilgisayar ortamında işlem yükü azdır. Bu nedenle endüstriyel robotların bilgisayar ortamında benzetimlerinin yapılmasında ve endüstriyel robotların bilgisayar ile kontrolü alanlarında kullanılmak için sayısal yöntemlere göre daha uygundur.

Endüstriyel robot üreticilerinin üretmiş olduğu bir çok robot modeli bu tipte olmasına rağmen, bu tipte olmayan altı eksenli küresel bilekli endüstriyel robotlar da vardır. Endüstriyel robot üreticilerinin ürettiği bazı robot modellerinde (PUMA gibi) omuz eklemi, robotun başlangıç konumunda XZ düzleminde değildir. PUMA endüstriyel robot modellerinde de A1 açısı sıfır iken omuz, dirsek ve bilek eklemleri aynı XZ düzleminde olacağı için, bu çalışmada öne sürülen geometrik yöntem bu tipteki robotlar için de uyarlanabilir.

Ayrıca altı eksenli olan, ancak küresel bilekli olmayan eklem kaçıklıklı endüstriyel robotlar (Universal Robots gibi) bulunmaktadır. Bu çalışmanın sonucu bu tipteki endüstriyel robotlar için uygulanamaz. Bu çalışmada anlatılan geometrik yöntem, yalnızca küresel bilekli altı eksenli endüstriyel robotlar için uygulanabilir.

Robotun başlangıç konumundaki uç çerçeve dönüşüm matrisi bazı robot üreticileri tarafından bu çalışmada belirtilen değerden farklı şekilde tanımlanmış olabilir. Bu çalışmada kullanılacak olan uç çerçeve dönüşüm matrisini elde etmek için, verilen uç çerçeve dönüşüm matrisindeki birim vektörlerin işaretlerini ve yerlerini değiştirerek istenilen uç çerçeve dönüşüm matrisi elde edilebilir.

Ayrıca bu çalışmada, robotun başlangıç konumunda, robotun tüm açı değerleri sıfır olarak kabul edilmiştir. Yine, endüstriyel robot üreticilerinin üretmiş olduğu endüstriyel

robot modellerinde farklı aç değerleri kabul edilmiş olabilir. Bu durumda, istenilen aç değerleri elde etmek için, basit aritmetik işlemler yardımıyla uyarlamalar yapılabilir.

Ülkemizde altı eksenli küresel bilekli endüstriyel robot üretimi yapılmamaktadır. Bu çalışmanın sonucu, ülkemizde üretimi yapılabilecek olan altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robotun matematik olarak ifade edilmesinde ve endüstriyel robot kontrol yazılımının oluşturulmasında kullanılabilir.

Endüstriyel robotların, CNC olarak üretim alanında kullanılabilmesine olanak sağlayan ve CAD/CAM programlarının tamamlayıcısı olan endüstriyel robot çevrimdışı programlama ve benzetim yazılımları vardır. Yine bu çalışmanın sonucu, altı eksenli küresel bilekli bir endüstriyel robot çevrimdışı programlama ve benzetim yazılımının oluşturulmasında kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Aigner, A. and Brell-Cokcan, S. (2009). Surface Structures and Robot Milling. Innovative Design & Construction Technologies - Building Complex Shapes And Beyond, Milan Politecnico University, Milano, 6-7 May, 433-445.
- Anonim, 2012. MEGEP, Endüstriyel Otomasyon. Teknolojileri. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara.
- Anonim, 2003. KR C2/ KR C3 Expert Programming Manual. KUKA Roboter GmbH, Augsburg.
- Anonim, 2000. KR210 Technical Specifications Datasheet. KUKA Roboter GmbH, Augsburg.
- Anonim 2010. Controller KR C2 Edition2005 Specifications. KUKA Roboter GmbH, Augsburg.
- Arıkan, S. (2010). Endüstriyel Robotlar ve Üretimde Uygulama Alanları. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Aydin, Y. and Kucuk, S. (2006). Quaternion based inverse kinematics for industrial robot manipulators with Euler wrist. 2006 ICM IEEE International Conference on Mechatronics, Budapest, 3-5 July, 581-586.
- Balkan, T., Özgören, M. K., Arıkan, M. S. and Baykurt, H. M. (2000). A method of inverse kinematics solution including singular and multiple configurations for a class of robotic manipulators. *Mechanism And Machine Theory*, **35**: 1221-1237.
- Balkan, T., Özgören, M. K., Arıkan, M. S. and Baykurt, H. M. (2001). A kinematic structure-based classification and compact kinematic equations for six-dof industrial robotic manipulators. *Mechanism And Machine Theory*, **36**: 817-832.
- Bingül, Z. ve Küçük, S. (2009). Robot Kinematiği. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Bingul, Z., Ertunc, H. M. and Oysu, C. (2005). Comparison of inverse kinematics solutions using neural network for 6R robot manipulator with offset. 2005 ICSC IEEE Congress on Computational Intelligence Methods and Applications, Istanbul, 15-17 December, 5-pp.

- Braumann, J. and Brell-Cokcan, S. (2011). Parametric Robot Control. Integrated CAD/CAM for Architectural Design. ACADIA 11: Integration Through Computation, Banff, Canada, 11-16 October, 242-251.
- Braumann, J. and Brell-Cokcan, S. (2011). Computer Numeric Controlled Manufacturing for Freeform Surfaces in Architecture. In: D. Kuhlmann, S. Brell-Cokcan, K. Schinegger (Eds.), *Emotion in Architecture*, Institut für Architekturwissenschaften, Wien, 20-25.
- Braumann, J. and Brell-Cokcan, S. (2012). Real-Time Robot Simulation and Control for Architectural Design. In 30th eCAADe Conference, Prague, 12-14 September.
- Braumann, J., and Brell-Cokcan, S. (2012). Digital and Physical Computing for Industrial Robots In Architecture: Interfacing Arduino with industrial robots. In Proceedings of the 17th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Chennai, 317-326.
- Brell-Cokcan, S., Reis, M., Schmiedhofer and H., Braumann, J. (2009). Digital Design to Digital Production. Flank Milling. The New Realm of Architectural Design - 27th eCAADe Conference Proceedings, Istanbul, 16-19 September, 323-330.
- Brell-Cokcan and S., Braumann, J. (2010). A New Parametric Design Tool for Robot Milling. In Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, New York, 21-24 October, 357-363.
- Bottazzi, V. S. and Fonseca, J. C. (2006). Off-line programming industrial robots based in the information extracted from neutral files generated by the commercial CAD tools. In: Huat LK (Ed.) , *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*, Pro Literatur Verlag, Germany, 349-364.
- Clarke, R. (1993). *Asimov's laws of robotics: implications for information technology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Craig, J. J. (2005). *Introduction to robotics: mechanics and control (Vol. 3)*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, USA.

- Duffy, J. (1980). *Analysis Of Mechanisms And Robot Manipulators*. Halsted Press John Wiley, London, UK, 56-120.
- Eberly, D. (2008). Euler angle formulas. Geometric Tools, LLC, Technical Report.
- Epps, G. and Verma, S. (2013). Curved Folding: Design to fabrication process of RoboFold. In *Shape Modeling International*, Bournemouth University, Poole, 10-12 July, 75-83.
- Epps, G. (2014), RoboFold and Robots.IO. *Architectural Design*. Wiley Online Library, 84: 68–69.
- Hasan, A.T., Hamouda, A.M.S., Ismail, N. and Al-Assadi, H.M.A.A., (2006). An adaptive learning algorithm to solve the inverse kinematics problem of a 6 DOF serial robot. *Advances in Engineering Software*, **37**: 432–438.
- Johns, R. L. and Foley, N. (2014). Bandsawn Bands. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*, Springer International Publishing, Switzerland, 17-32.
- Kucuk, S. and Bingul, Z. (2014). Inverse kinematics solutions for industrial robot manipulators with offset wrists. *Applied Mathematical Modelling*, **38**: 1983-1999.
- Lee, C. G. and Ziegler, M. (1983). Geometric approach in solving inverse kinematics of PUMA robots. *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions on, 6: 695-706.
- Lou, Y.F. and Brunn, P., (1999). A hybrid artificial neural network inverse kinematic solution for accurate robot path control. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I. *Journal of Systems and Control Engineering*, **213**: 23–32.
- Morris, A.S. and Mansor, A., (1997). Finding The Inverse Kinematics of Robot Arm Using Artificial Neural Network With Lookup Table. *Robotica*, **15**: 617–625.
- Morris, A.S. and Mansor, A., (1998). Robot Inverse kinematics using an adaptive back propagation algorithm and radial basis function with a look up table. *Robotica*, **16**: 433–444.

- Özgören, M. K. (1999). Kinematic analysis of a manipulator with its position and velocity related singular configurations. *Mechanism and Machine Theory*, **34**: 1075-1101.
- Özgören, M. K. (2002). Topological analysis of 6-joint serial manipulators and their inverse kinematic solutions. *Mechanism and Machine Theory*, **37**: 511-547.
- Paul, R.P., (1981). Robot Manipulators: Mathematics. Programming and Control. MIT Press, Cambridge, USA.
- Payne, A. and Issa R. (2009). The Grasshopper Primer, Second Edition. Robert McNeel & Associates. Seattle, USA.
- Peiper, D. L. (1968). The kinematics of manipulators under computer control. Ph.D. Thesis, Stanford University, California, USA.
- Schwartz, T. (2013). HAL. In Rob| Arch 2012. Springer Vienna. 14-18 Dec, 92-101.
- Tsai, L. W. and Morgan, A. P. (1985). Solving the kinematics of the most general six- and five-degree-of-freedom manipulators by continuation methods. *Journal of Mechanical Design*, **107**: 189-200.

İnternet Kaynakları

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Robot>, 27.05.2015
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_robot,13.05.2015
3. <http://www.grasshopper3d.com/group/lobster>, 24.05.2015
4. <http://hal.thibaultschwartz.com/>, 21.05.2015
5. <http://robofold.com/>, 27.05.2015
6. <http://robots.io/wp/>, 27.05.2015
7. <http://cranerobotics.com/about-crane/>, 27.05.2015
8. <http://www.grasshopper3d.com/group/mussel>, 27.05.2015
9. <http://www.gshed.com/work/mussel/>, 27.05.2014
10. <http://www.grasshopper3d.com/group/scorpion>, 27.05.2015
11. <http://thinkingrobotics.tumblr.com/>, 27.05.2015
12. http://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros_3D, 21.05.2015
13. <http://www.rhino3d.com/>, 21.05.2015
14. <http://www.grasshopper3d.com/>, 21.05.2015
15. http://en.wikipedia.org/wiki/Grasshopper_3D, 21.05.2015
16. http://en.wikipedia.org/wiki/C_Sharp_%28programming_language%29,
21.05.2015
17. [http://en.wikipedia.org/wiki/Python_\(programming_language\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language)), 21.05.2015
18. http://en.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio, 21.05.2015
19. <http://en.wikipedia.org/wiki/Atan2>, 21.05.2015

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yusuf Buyruk
Doğum Yeri ve Tarihi : İscehisar / 18.12.1979
Yabancı Dili : İngilizce, Fransızca
İletişim (Telefon/e-posta) : 0090 536 233 30 46 / yusufbuyruk@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Hasanoğlan Atatürk Anadolu Öğretmen Lisesi
(1993-1997)
Lisans : Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi
Biyoloji Öğretmenliği (1997-2001)
Yüksek Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : M.E.B. Okul ve Kurumlarda Öğretmenlik Görevi
(2001-2015)
M.E.B.Yurtdışı Öğretmenlik Görevi
Fransa, Strazburg (2010-2012)

Yayımları (SCI ve diğer) :

Diğer konular :

EKLER

EK 1: Selçuklu Deseni Takım Yolu (APT kodu)

```
PARTNM/C:\SELCUKLU_DESENI.3DM
STKBOX/0.000000,9.788700,-50.000000,400.000000,390.211700,0.000000
MODE/UNIT,4
TLCHPT/0.000000,0.000000,0.000000
MACHINE/0
MOPNM/ENGRAVING
MSYS/0.000000,0.000000,0.000000,1.000000,0.000000,0.000000,0.000000,1.000000,0
.000000,0.000000,0.000000,1.000000
FEDSET/PLUNGE,87.620003,MMPM
FEDSET/APPROACH,43.810001,MMPM
FEDSET/ENGAGE,32.856998,MMPM
FEDSET/CUT,43.810001,MMPM
FEDSET/RETRACT,32.856998,MMPM
FEDSET/DEPART,87.620003,MMPM
FEDSET/TRANSFER,87.620003,MMPM
CUTTER/6.000000,0.000000,3.000000,0.000000,0.000000,0.000000,90.000000
LOADTL/2,LENGTH,90.000000
COOLNT/NONE
TLDATA/2,2,0,0,0.000000
RAPID
SPINDL/RPM,12936,CLW
GOTO/100.000000,37.540152,6.000000
FEDRAT/MMPM,87.620003
GOTO/100.000000,37.540152,-4.000000
FEDRAT/MMPM,43.810001
GOTO/138.196601,9.788697,-4.000000
GOTO/185.410197,9.788697,-4.000000
GOTO/232.623792,155.097202,-4.000000
GOTO/385.410197,155.097202,-4.000000
GOTO/400.000000,200.000000,-4.000000
GOTO/385.410197,244.902798,-4.000000
GOTO/232.623792,244.902798,-4.000000
GOTO/185.410197,390.211303,-4.000000
GOTO/138.196601,390.211303,-4.000000
GOTO/100.000000,362.459848,-4.000000
GOTO/147.213596,217.151343,-4.000000
GOTO/23.606798,127.345747,-4.000000
GOTO/38.196601,82.442950,-4.000000
GOTO/76.393202,54.691494,-4.000000
GOTO/200.000000,144.497090,-4.000000
```

GOTO/323.606798,54.691494,-4.000000
GOTO/361.803399,82.442950,-4.000000
GOTO/376.393202,127.345747,-4.000000
GOTO/252.786405,217.151343,-4.000000
GOTO/300.000000,362.459848,-4.000000
GOTO/261.803399,390.211303,-4.000000
GOTO/214.589803,390.211303,-4.000000
GOTO/167.376208,244.902798,-4.000000
GOTO/14.589803,244.902798,-4.000000
GOTO/0.000000,200.000000,-4.000000
GOTO/14.589803,155.097202,-4.000000
GOTO/167.376208,155.097202,-4.000000
GOTO/214.589803,9.788697,-4.000000
GOTO/261.803399,9.788697,-4.000000
GOTO/300.000000,37.540152,-4.000000
GOTO/252.786405,182.848657,-4.000000
GOTO/376.393202,272.654253,-4.000000
GOTO/361.803399,317.557050,-4.000000
GOTO/323.606798,345.308506,-4.000000
GOTO/200.000000,255.502910,-4.000000
GOTO/76.393202,345.308506,-4.000000
GOTO/38.196601,317.557050,-4.000000
GOTO/23.606798,272.654253,-4.000000
GOTO/147.213596,182.848657,-4.000000
GOTO/100.000000,37.540152,-4.000000
RAPID
GOTO/100.000000,37.540152,6.000000
FINI

EK 2: Konum ve Yönelim Değerleri İle Tanımlanmış Endüstriyel Robot Programı (KRL kodu)

```
&ACCESS RVP
DEF LIN()
;FOLD INIT
GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ()
INTERRUPT ON 3
BAS (#INITMOV, 0)
BAS (#VEL_PTP, 10)
BAS (#ACC_PTP, 10)
PTP $POS_ACT
$APO.CDIS=0.1
$APO.CORI=1
$APO.CVEL=100
$APO.CPTP=50
BAS (#VEL_PTP, 75)
$IPO_MODE=#BASE
$BASE={X 1843.601, Y 182.4751, Z 265.993, A -90.86661, B -0.650646, C
1.196414}
$TOOL={X 382.7976, Y 51.40096, Z 274.7169, A 0.046400, B -89.75691, C 7.72800}
;ENDFOLD
PTP {X 100.00, Y 37.54, Z 6.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_PTP
$VEL.CP=0.023365
LIN {X 100.00, Y 37.54, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
$VEL.CP=0.011683
LIN {X 138.20, Y 9.79, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 185.41, Y 9.79, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 232.62, Y 155.10, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 385.41, Y 155.10, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 400.00, Y 200.00, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 385.41, Y 244.90, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 232.62, Y 244.90, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 185.41, Y 390.21, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 138.20, Y 390.21, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 100.00, Y 362.46, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 147.21, Y 217.15, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 23.61, Y 127.35, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 38.20, Y 82.44, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 76.39, Y 54.69, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 200.00, Y 144.50, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 323.61, Y 54.69, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 361.80, Y 82.44, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 376.39, Y 127.35, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
```

```
LIN {X 252.79, Y 217.15, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 300.00, Y 362.46, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 261.80, Y 390.21, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 214.59, Y 390.21, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 167.38, Y 244.90, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 14.59, Y 244.90, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 0.00, Y 200.00, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 14.59, Y 155.10, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 167.38, Y 155.10, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 214.59, Y 9.79, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 261.80, Y 9.79, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 300.00, Y 37.54, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 252.79, Y 182.85, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 376.39, Y 272.65, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 361.80, Y 317.56, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 323.61, Y 345.31, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 200.00, Y 255.50, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 76.39, Y 345.31, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 38.20, Y 317.56, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 23.61, Y 272.65, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 147.21, Y 182.85, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 100.00, Y 37.54, Z -4.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
LIN {X 100.00, Y 37.54, Z 6.00, A 90.00, B -0.00, C 0.00} C_VEL
END
```

EK 3: Eksen Aç ı Değerleri İle Tanımlanmış Endüstriyel Robot Programı (KRL kodu)

```
&ACCESS RVP
DEF PTP ()
;FOLD INIT
GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ()
INTERRUPT ON 3
BAS (#INITMOV, 0)
BAS (#VEL_PTP, 10)
BAS (#ACC_PTP, 10)
PTP $POS_ACT
$APO.CDIS=0.1
$APO.CORI=1
$APO.CVEL=100
$APO.CPTP=50
BAS (#VEL_PTP, 75)
$IPO_MODE=#BASE
$BASE={X 1843.601, Y 182.4751, Z 265.993, A -90.86661, B -0.650646, C
1.196414}
$TOOL={X 382.7976, Y 51.40096, Z 274.7169, A 0.046400, B -89.75691, C 7.72800}
;-A1, A2-90, A3+90, -A4-180, -A5, 180-A6
;ENDFOLD
PTP {A1 -3.96, A2 -51.15, A3 125.99, A4 -4.92, A5 -76.33, A6 9.71} C_PTP
$VEL.CP=0.023365
PTP {A1 -3.96, A2 -50.57, A3 125.92, A4 -4.90, A5 -76.84, A6 9.66} C_PTP
$VEL.CP=0.011683
PTP {A1 -2.43, A2 -50.91, A3 127.57, A4 -3.32, A5 -78.12, A6 9.19} C_PTP
PTP {A1 -0.41, A2 -50.96, A3 127.67, A4 -1.25, A5 -78.15, A6 8.71} C_PTP
PTP {A1 1.54, A2 -49.22, A3 119.73, A4 -359.24, A5 -71.94, A6 8.17} C_PTP
PTP {A1 7.42, A2 -49.16, A3 119.20, A4 -353.04, A5 -71.61, A6 6.05} C_PTP
PTP {A1 7.77, A2 -48.45, A3 116.59, A4 -352.59, A5 -69.74, A6 5.67} C_PTP
PTP {A1 7.05, A2 -47.73, A3 114.14, A4 -353.28, A5 -68.00, A6 5.74} C_PTP
PTP {A1 1.50, A2 -47.81, A3 114.66, A4 -359.26, A5 -68.28, A6 8.14} C_PTP
PTP {A1 -0.13, A2 -45.07, A3 106.14, A4 -1.07, A5 -62.51, A6 8.94} C_PTP
PTP {A1 -1.70, A2 -45.02, A3 106.05, A4 -2.84, A5 -62.50, A6 9.80} C_PTP
PTP {A1 -3.04, A2 -45.51, A3 107.57, A4 -4.30, A5 -63.57, A6 10.44} C_PTP
PTP {A1 -1.65, A2 -48.20, A3 116.15, A4 -2.64, A5 -69.41, A6 9.42} C_PTP
PTP {A1 -6.64, A2 -49.30, A3 120.57, A4 -7.80, A5 -72.86, A6 10.93} C_PTP
PTP {A1 -6.29, A2 -49.93, A3 123.13, A4 -7.37, A5 -74.77, A6 10.55} C_PTP
PTP {A1 -4.87, A2 -50.34, A3 124.87, A4 -5.86, A5 -76.05, A6 9.99} C_PTP
PTP {A1 0.28, A2 -49.36, A3 120.32, A4 -0.57, A5 -72.40, A6 8.61} C_PTP
PTP {A1 5.36, A2 -50.53, A3 125.04, A4 -355.32, A5 -75.99, A6 7.18} C_PTP
PTP {A1 6.81, A2 -50.18, A3 123.34, A4 -353.79, A5 -74.69, A6 6.63} C_PTP
PTP {A1 7.20, A2 -49.57, A3 120.79, A4 -353.32, A5 -72.78, A6 6.28} C_PTP
```

PTP {A1 2.26, A2 -48.28, A3 116.22, A4 -358.46, A5 -69.39, A6 7.85} C_PTP
PTP {A1 3.74, A2 -45.65, A3 107.69, A4 -356.73, A5 -63.52, A6 6.90} C_PTP
PTP {A1 2.42, A2 -45.10, A3 106.12, A4 -358.19, A5 -62.47, A6 7.55} C_PTP
PTP {A1 0.85, A2 -45.09, A3 106.15, A4 -359.97, A5 -62.50, A6 8.41} C_PTP
PTP {A1 -0.88, A2 -47.77, A3 114.62, A4 -1.82, A5 -68.30, A6 9.14} C_PTP
PTP {A1 -6.41, A2 -47.46, A3 113.92, A4 -7.79, A5 -68.09, A6 11.53} C_PTP
PTP {A1 -7.16, A2 -48.16, A3 116.35, A4 -8.50, A5 -69.84, A6 11.57} C_PTP
PTP {A1 -6.84, A2 -48.89, A3 118.96, A4 -8.07, A5 -71.70, A6 11.17} C_PTP
PTP {A1 -0.98, A2 -49.17, A3 119.69, A4 -1.89, A5 -71.96, A6 9.06} C_PTP
PTP {A1 0.84, A2 -50.99, A3 127.69, A4 -359.97, A5 -78.15, A6 8.42} C_PTP
PTP {A1 2.87, A2 -51.01, A3 127.65, A4 -357.91, A5 -78.09, A6 7.94} C_PTP
PTP {A1 4.43, A2 -50.73, A3 126.06, A4 -356.29, A5 -76.80, A6 7.49} C_PTP
PTP {A1 2.29, A2 -48.82, A3 118.16, A4 -358.44, A5 -70.78, A6 7.87} C_PTP
PTP {A1 6.62, A2 -47.26, A3 112.61, A4 -353.69, A5 -66.92, A6 5.80} C_PTP
PTP {A1 5.96, A2 -46.46, A3 110.08, A4 -354.33, A5 -65.18, A6 5.91} C_PTP
PTP {A1 4.58, A2 -45.97, A3 108.63, A4 -355.82, A5 -64.16, A6 6.51} C_PTP
PTP {A1 0.32, A2 -47.61, A3 114.05, A4 -0.54, A5 -67.87, A6 8.64} C_PTP
PTP {A1 -3.88, A2 -45.80, A3 108.48, A4 -5.22, A5 -64.22, A6 10.82} C_PTP
PTP {A1 -5.28, A2 -46.23, A3 109.89, A4 -6.71, A5 -65.26, A6 11.40} C_PTP
PTP {A1 -5.96, A2 -47.01, A3 112.40, A4 -7.37, A5 -67.00, A6 11.49} C_PTP
PTP {A1 -1.71, A2 -48.74, A3 118.09, A4 -2.68, A5 -70.81, A6 9.37} C_PTP
PTP {A1 -3.96, A2 -50.57, A3 125.92, A4 -4.90, A5 -76.84, A6 9.66} C_PTP
PTP {A1 -3.96, A2 -51.15, A3 125.99, A4 -4.92, A5 -76.33, A6 9.71} C_PTP
END