

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

**BEŞ EKSENLİ BİR ROBOT KOLU
GERÇEKLEMESİ VE LABVIEW ORTAMINDA
GÖRÜNTÜ İŞLEME TEMELLİ KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selim KAYA

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Barış BORU

Eylül 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BEŞ EKSENLİ BİR ROBOT KOLU
GERÇEKLENMESİ VE LABVIEW ORTAMINDA
GÖRÜNTÜ İŞLEME TEMELLİ KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selim KAYA

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 18/09/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Yrd.Doç.Dr.
Barış BORU
Jüri Başkanı


Yrd.Doç.Dr.
Ahmet KARACA
Üye


Yrd.Doç.Dr.
Emre DANDIL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Selim KAYA

10.10.2017

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Barış BORU, tezimde kullandığım kinematik denklemlerin çıkarılmasında yardımcı olan Dr. Nurettin Gökhan ADAR, tez yazımında yardımlarını esirgemeyen Uzman Eren Safa TURHAN ve İbrahim Oğuzhan Fırat ATMACA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2014-50-01-015) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Tezin Hedefleri.....	8
1.2. Tezin Kapsamı.....	8
1.3. Tez Organizasyonu.....	9

BÖLÜM 2.

ROBOTİK	10
2.1. Robotik Teorik Bilgisi.....	11
2.1.1. Robot teknolojisine giriş.....	11
2.1.2. Robotların sınıflandırılması.....	12
2.2. Kinematik Analiz	15
2.2.1. Dönme matrisi.....	16
2.2.1.1. Euler açıları	17
2.2.1.2. Dönme (Roll) / Yükselme (Pitch) / Yalpa (Yaw)açıları	18
2.2.2. Öteleme vektörü.....	19
2.2.3. Homojen dönüşüm.....	20

2.2.4. Düz kinematik analiz.....	21
2.2.4.1. Denavit-hartenberg (DH) dönüşümü.....	22
2.2.5. Ters kinematik analiz.....	24
2.3. Robotik Sistem Bileşenleri.....	25
2.3.1 Motor ve aktuatörler.....	25
2.3.2. Sensör ve kodlayıcılar.....	28
2.3.3. Robot kolu denetleyicileri.....	30
 BÖLÜM 3.	
SİSTEM TASARIMI.....	31
3.1. Tasalanan Sistemin Temel Özellikleri.....	33
3.2. Mekanik Tasarım.....	34
3.3. Kinematik Denklemler.....	35
3.3.1. Robot kolunun ileri kinematik analizi	35
3.3.2. Robot kolunun ters kinematik analizi	38
3.4. Motor Seçimi.....	41
3.5. Ara Birim Kartı.....	45
 BÖLÜM 4.	
YAZILIMLARIN GERÇEKLENMESİ.....	49
4.1. Labview Programı.....	49
4.2. Görüntü İşleme.....	53
4.3. Robot Kolu Ters Kinematik Denklemi.....	60
4.4. Servo Motorlar İle Haberleşme.....	61
4.5. Web Üzerinden Kontrol.....	68
 BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	77

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	: Bilgisayar Destekli Üretim
TCP	: Geçiş Kontrol Protokolü
IP	: İnternet Protokolü
FPGA	: Programlanabilir Alan Kapı Dizisi
DH	: Denavit-Hartenberg
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
GPC	: Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol
RF	: Radio Frekansı
IEEE	: Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
DA	: Doğru Akım
ISDN	: Bütünleştirilmiş sayısal ağ hizmetleri
BRA	: İngilizce Robot Birliği
JIRA	: Japon Endüstriyel Robot Birliği
RIA	: Amerikan Robot Birliği
DOF	: Serbeslik Derecesi
AC	: Alternatif Akım
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
SPI	: Seri Çevresel Arabirim
SSID	: Servis Seti Tanımlayıcısı
UART	: Evrensel Asenkron iletim/Alma
URL	: Tekil Adres Lokasyonu
USB	: Evrensel Seri Veri yolu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Scara robot kolu	13
Şekil 2.2. Kartezyen robot kolu	13
Şekil 2.3. Silindirik robot kolu	14
Şekil 2.4. Küresel robot kolu	14
Şekil 2.5. Eklemlili robot kolu	15
Şekil 2.6. Z0 etrafında dönme.....	16
Şekil 2.7. Açılarını gösterimi.....	18
Şekil 2.8. $\Phi / \theta / \Psi$ açıları gösterilimi	19
Şekil 2.9. oxzyz'ni ötelenmiş çerçevesi	20
Şekil 2.10. Denavit-Hartenberg çerçeve ataması.....	23
Şekil 2.11. DC motor yapısı ve elemanları	26
Şekil 2.12. Step (adım) motor	27
Şekil 2.13. Servo motor yapısı ve elemanları	28
Şekil 2.14. Rotary encoderler.....	29
Şekil 2.15. Incremental encoderler.....	29
Şekil 3.1. Sistem blok diyagramı.....	31
Şekil 3.2. Robot kol.....	33
Şekil 3.3. Robot kolunun yerel koordinat sistemi.....	34
Şekil 3.4. Beş eklemlili robot kolunun eklem uzaklık değeri.....	34
Şekil 3.5. Servo motor ve genel teknik bilgileri.....	43
Şekil 3.6. Dynamiel AX-12A servo motor arkadan görünüşü ve redüktör grubu..	43
Şekil 3.7. Servo motorların plastik braketler ile farklı montaj şekilleri.....	44
Şekil 3.8. Zincir bağlantı sistemi	44
Şekil 3.9. Servo motorların bağlantı sistemi	45
Şekil 3.10. USB2Dynamixel	46
Şekil 3.11. Usb2Dynamixel bağlantı şekli.....	46
Şekil 3.12. Usb2Dynamixel haberleşme portları	46

Şekil 3.13. Usb2Dynamixel fonksiyon seçeneği	47
Şekil 3.14. Haberleşme şekilleri	47
Şekil 3.15. Deney düzeneği.....	48
Şekil 4.1. Yazılan Labview kodunun genel görüntüsü.....	52
Şekil 4.2. Labview’de görüntü alma programı	53
Şekil 4.3. Labview imaç extractcolorplane’nin blok diyagramı	54
Şekil 4.4. Labview’de yakalanacak görüntünün seçilmesi.....	55
Şekil 4.5. Labview’de yakalanacak görüntüyü seçme block diyagramı.....	56
Şekil 4.6. Program çalıştırıldığında front paneldeki görüntüsü.....	57
Şekil 4.7. Programa mathscript eklentisi ile obje konum takibi.....	58
Şekil 4.8. Görüntü işleme block diyagram programın son hali.....	58
Şekil 4.9. Piksel – MM dönüşümü.....	59
Şekil 4.10. Ters kinematik Labview ara yüzü.....	61
Şekil 4.11. Labview ile Dynamixel servo motorların haberleşmesi.....	62
Şekil 4.12. Dynamixel Write Word ile 1. servo motoru açığa gönderme.....	63
Şekil 4.13. Dynamixel Write Word ile 2. servo motoru açığa gönderme.....	63
Şekil 4.14. Bağlantı kontrolünü sağlayan SubVi’yı.....	64
Şekil 4.15. Bağlantı kontrolünü sağlayan SubVi’nın içeriği.....	65
Şekil 4.16. Servo motorların hızlarını ayarlayan SubVi.....	65
Şekil 4.17. Servo motorların hızlarını ayarlayan SubVi’nın içeriği.....	65
Şekil 4.18. Robot kolunu başlangıç pozisyonuna gönderen SubVi.....	65
Şekil 4.19. Görüntü işlemeyi gerçekleştiren SubVi.....	66
Şekil 4.20. Görüntü işlemeyi gerçekleştiren SubVi’nın içeriği.....	66
Şekil 4.21. Görüntü işlemeyi gerçekleştiren SubVi’nın içeriği.....	67
Şekil 4.22. Ters kinematik denklemlerin kullanıldığı SubVi.....	67
Şekil 4.23. Ters kinematik denklemlerin kullanıldığı SubVi’nın içeriği.....	68
Şekil 4.24. Robot kolunu kontrol etmek için oluşturulan web ara yüzü.....	69
Şekil 4.25. Sistemin akış diyagramı.....	70

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Eklemlerin limitleri (çalışma aralıkları).....	35
Tablo 3.2. Robot kolun D-H parametre tablosu.....	36
Tablo 5.1. Robot kolun 1. bölgede koordinat karşılaştırma tablosu.....	72
Tablo 5.2. Robot kolun 2. bölgede koordinat karşılaştırma tablosu.....	72

ÖZET

Anahtar kelimeler: Robot kolu, Labview, Görüntü işleme, Bilgisayar ile kontrol

İnsan hayatını kolaylaştıran, işlerini daha az iş gücü kullanarak ve daha kısa sürelerde yapmasını sağlayan teknolojiler arasında robotik önemli bir yere sahiptir. Robot kollarının özellikle endüstride çok geniş bir kullanıma sahip olması nedeniyle robotik çalışmalarının önemli bir kısmı robot kolları üzerine yoğunlaşmıştır. Tasarlanan dört serbestlik derecesine sahip robot kolunun kontrolü gerçek zamanlı olarak bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Robot kolu üzerine yerleştirilen kamera ile robot çalışma alanı izlenmektedir. Labview programında görüntü işleme ile analiz yapılmakta, daha önceden tanımlanan objeler tespit edildiği takdirde konumları belirlenmektedir. Konum verileri beş eksenli robot kolunun ters kinematik denklem ile servo motorların cisme ulaşması için gereken açıların hesaplanması amacıyla kullanılmıştır. Tüm bu hesaplama işlemleri Labview grafiksel programlama ortamında hazırlanan yazılım ile bilgisayarda gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir. Ayrıca robot kolunun manuel olarak motor açıları ile kontrol edilmesi mümkündür. Robot kontrolü için hazırlanan yazılıma internet üzerinden erişilebilmektedir. Bilgisayara bağlı arabirim ile gerekli elektriksel kontrol işaretleri mikrodenetleyici tarafından üretilerek robot kolunun konumlandırılması sağlanmaktadır. Çalışmada kullanılan robot kolu üzerinde Robotis firmasına ait Dynamixel servo motorlar kullanılmıştır. Bu çalışmada, hareket alanı içerisine bırakılan nesnenin konumu otomatik bulunarak, taşınması yapılan bir robot kolunun tasarlanması ve gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu birimler yüksek performansları ve düşük maliyetleri ile ön plana çıkmaktadır. Düşük maliyetli ve yeterli başarıma sahip bir yapı olarak ortaya çıkan bu çalışma ürünü endüstride, mühendislik alanında eğitim ve araştırma çalışmalarında uygulanma potansiyeli yüksektir.

REALIZATION OF A FIVE AXIS ROBOT ARM AND IMAGE PROCESSING BASED CONTROL OF ROBOT ARM ON LABVIEW

SUMMARY

Keywords: Robot arm, Labview, image processing, Control by computer

Robotics has an important place within the technologies which are making human life easier and enabling people to be more productive with less effort. An important part of the robotic work has focused on robot arms due to wide usage in industry, In this study, it is aimed to design and implemet a robotic arm that is able to define position of the object and move it automatically. Real time control of the designed 4 axis robotic arm is accomplished by the computer. Robot work area is monitored with a camera which is placed over the robot arm. Image processing and analyzng is made by Labview program. Previously defined objects can be positioned and determined. To reach object by 4 axis robot arm, reverse kinematic equations of robot arm is calculated and angle of servo motors are defined by using location data. All of these calculations is prepared by a real time software which is made with Labview graphical programming environment. It is also possible to control angles of the robot arm by manually operating the motors by software. Also the software which is prepared for controlling robot arm can be accessed via internet. Required control signals to move robot arm are produced by a micro controller which is connected to computer via an interface. In this study, Dynamixel servo motors which is a brand of Robotis company are selected and used. Low cost and enough perfonmaced result of this study has a potential to be adapted for industrial porpouses, educational and research studies.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Mikroişlemciler, gömülü sistemler, endüstriyel haberleşme, bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design-CAD), bilgisayar destekli üretim (Computer Aided Manufacturing-CAM), eyleyiciler, sensörler ve hareket kontrol sistemleri gibi alanlardaki gelişmeler nedeniyle, endüstriyel otomasyon, akıllı makine imalat ve üretim sistemleri çok kısa zamanda büyük bir hızla kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu hızlı gelişme endüstride robotların kullanımını artırılmasının yanında endüstriyel robotların gelişimine de ivme kazandırmıştır [1]. Günümüze kadar büyük bir gelişme gösteren robotlar, endüstri, sağlık, savunma, taşımacılıkta (konveyör sistemler), tıp, eğitim ve uzay teknolojisi gibi birçok farklı sektörde kullanılmaktadır.

Hızla gelişen teknoloji insan hayatını kolaylaştırmakta mesafe ve zaman sınırlarını azaltmaktadır. Robotik teknolojisi sayesinde insanların yaptığı birçok iş alanında robotları kullanarak daha az iş gücü ile daha kısa sürelerde maliyeti düşük ve performansı yüksek faydalar elde edilmesi amaçlanmaktadır. Zaten robot, Çek dilinde köle veya işçi anlamına gelmektedir. Robot birçok farklı görevi yapmak üzere programlana bilen bir makine olarak tanımlanmaktadır. Fakat sıradan bir makineyle arasındaki en belirgin fark, robotların birçok kez programlanabilmesi ve bünyelerinde mekanik sistemlerin ve eyleyicilerin yanında kapalı döngü denetleyici içermesinden kaynaklanmaktadır. Başka bir deyişle robot, genel anlamda kapalı döngü bilgisayar kontrollü bir endüstriyel manipulatördür.

Görüntü işleme ile robotlar ürün sayma, hata analizi, akıllı karar verme sistemleri, akıllı lojistik sistemler gibi endüstriyel uygulamalarla hayata girmektedir. Bu uygulamaların kullanımı ile endüstride yakın geçmişe kadar hayal dahi edilemeyecek

performansa ve kaliteye sahip insan müdahali gerektirmeyen yeni standartlar elde edilebilmektedir.

Robot bilim uygulamalı matematik, fizik, kontrol, makine, elektrik ve bilgisayar mühendisliği gibi birçok bilim dalını içine alan disiplinler arası bir bilimdir. Bu bilim dallarından makine mühendisliği robotların kinematik, mukavemet ve dinamik yapısı incelerken, matematik robotların hareketlerini tanımlayıp modelinin çıkarılması ile ilgilenir. Kontrol mühendisliği, kontrol algoritmaları geliştirerek sistemin istenilen hareketi gerçekleştirmesini sağlar. Elektrik mühendisliği, eyleyicilerin (aktüatör) ve algılayıcıların (sensör) tasarımıyla ilgilenir. Bilgisayar mühendisleri ise gerekli robot programlarının yapılmasında katkı sağlar.

Bu tez çalışması alanında mevcut literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu literatür çalışmalarıyla gerçekleştirilen çalışma arasındaki bağlantılı kısımlar kısaca aşağıda anlatılmıştır.

Adar ve arkadaşları (2013), yaptıkları çalışmada 5 serbestlik derecesine sahip bir robot kolunun dinamik modellemesini Lagrange-Euler denklemlerinden yardım alarak hareket denklemleri oluşturulmuştur. Euler-Lagrange denklemleri ile elde edilen dinamik denklemlerin sağlamasını yapmak için her bir uzva serbest düşme hareketi verilmiştir. Robot kolunun dinamik denklemlerinin yazılması ve her bir eklemin dinamik davranışını gözlemleyebilmek için Matlab/Simulink programından yararlanılmıştır. PID tip kontrol algoritması kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda verilen kübik eklem konum yörüngelerinin takip edildiği görülmüştür [2].

Kang ve arkadaşları (2012), yaptıkları çalışmada 6 serbestlik derecesine sahip bir robot kolu Denavit-Hartenberg (DH) dönüşümlerini kullanarak ters kinematik denklemleri oluşturulmuştur. Doğrulama ile gösterimini yapmak için C++ ve 3D OpenGL yazılımlarından faydalanılmıştır. Ayrıca Matlab Simulink ve MSC VisualNastran yazılımlarıyla da simule edilmiştir [3].

Eren (2006), Servo motorları PCI slotlarına takılan kendine ait hızlı işlemcisi ve giriş çıkış donanımları bulunan DSP'li kontrol kartları ile kontrol edilmektedir. Robot kolunun kinematik denklemi için Denavit-Hartenberg (DH) kullanılmıştır. Hareket kontrol organizasyonu gerçekleştirmek için Microsoft Visual Studio.NET dillerinden Visual C++.NET yazılımından yararlanılmıştır. Robot kolunun sanayi ortamında çalışma bilmesi için, kolun son uzuğu üzerine herhangi bir yörüngeyi takip edebilmeyi sağlayan hassas bir algılayıcı olan mikron bazında ölçüm yapabilen lazer sensör ve mafsallar üzerine ek bir enkoder yerleştirilmiştir [4].

Kruse ve arkadaşları (2015), 2 adet 7 serbestlik derecesine sahip robot kolu ve 1 adet gövdeden oluşan toplam 15 serbestlik derecesine sahip endüstriyel bir robot olan Yaskawa Motoman SDA10 üzerinde çalışılmıştır. Yaskawa Motoman'nın kendine ait kontrol kartlarıyla kontrolü sağlanmıştır. Görsel geri dönütler alabilmek için bir adet Sony XCD-X710CR kamera ve Microsoft Kinect sensör kullanılmıştır. Sistemin çalışmasında Matlab ve Microsoft Visual Studio.NET C# yazılımlarından faydalanılmıştır. ATI force/torque sensorü Motoman HSC kontrol kartına bağlanarak veri alınmaktadır. Yerel bir bilgisayardan kontrol edile bildiği gibi Ethernet ve TCP/IP protokolleri ile ağdanda erişim sağlanabilmektedir. Önceden farklı cisimlerin nasıl taşınacakları robot koluna öğretilmektedir. Farklı cisimleri ayırt etmek içinde barkotlardan yararlanılmaktadır [5].

Huang ve arkadaşları (2015), yaptıkları çalışmada 4 serbestlik derecesine sahip insan biçiminde esnek eklemlerden oluşan bir robot kolu üzerinde çalışılmıştır. Günlük hareketler sonucu oluşan sağlık problemlerinin geleneksel çin masajı yapan bir robot kolu ile iyileştirilmesi amaçlamaktadır. EP2C35F484C7 model ALTERA FPGA işlemci kullanılmıştır. Robot kolunun kinematik denklemlerinin çıkarılmasında Denavit-Hartenberg (DH) kullanılmıştır [6].

Gross ve arkadaşları (2013), Sistemin çalışmasında National Instruments LabVIEW yazılımından faydalanılmıştır. Robotics Dynamixel servo motorları aktivatör olarak

kullanılmıştır. Dynamixel servo motorları motor işlevi yanında sensör ve mikroişlemcide içinde bulundurur. Labview yazılımı x86 1.6GHz Atom işlemci, 1 GB ram 32 GB solid-state (SSD) hard disk sahip olan FitPC2 koşturulmuştur [7].

Rahman ve arkadaşları (2015), Rehabilitasyon ve üst uzuv hareket fonksiyonlarını iyileştirmek amaçlı giyilebilir 7 serbestlik derecesine sahip bir kol üzerinde çalışılmıştır. Kolun kinematik dönüşümleri için Denavit-Hartenberg (DH) kullanılmıştır. Bir bilgisayara bağlı FPGA (field-programmable gate array) kartı ve servo motorlar ile sistem oluşturulmuştur. TCP/IP protokolü kullanılarak network aracılığı ile de sistem kontrolü sağlanabilmektedir [8].

Karcı ve Tangel (2013), Mobil bir aracın üzerine monte edilmiş 5 eksenli bir robot kolu ve cisimleri bir ultrasonik sensör aracılığı ile tanıyıp boyutlarına göre ayırt edebilen, tümüyle otonom olarak çalışabilen FPGA tabanlı bir robotik sistem gerçekleştirilmiştir. Mobil robot kolu üzerindeki DC motor ve DC-servo motorların sürücü devreleri ayrıca tasarlanarak, motorların hız ve konum kontrolü yine VHDL kodu ile oluşturulan PWM (Pulse Width Modulation) kontrol sinyalleri aracılığıyla sağlanmıştır [9].

Dinham ve Fang (2014), Kenar belirleme algoritmaları içinden sobel'i kullanarak kaynak robotu üzerindeki kamera ile kaynak yapılacak yüzey üzerinde görüntü işleme uygulanmıştır. Görüntü işleme sonucunda kaynak yapılacak şerit belirlenerek kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir [10].

Kahya ve Arın (2014), yaptıkları çalışmada olgun meyvelerin yerini tespit etmek amaçlanmıştır. Görüntü işlemede Net Framework 4 ve Visual Studio C# programları kullanılmıştır. Görüntü almak için 3644 x 2748 piksel çözünürlüğe sahip kamera kullanılmış fakat gün ışığında, ışığın geliş yönüne göre renk değişiklikleri sonucu yanlış sonuçlar elde edilmiştir. Bunun üzerine endüstriyel kamera, 48 led'lik bir sistem ve gece alınan veriler ile hatalar azaltılmıştır [11].

Durmuş ve Temurtaş (2014), Çalışmada kullanılan altı eklemlı PUMA 560 robot kolunun dinamik model çözüm için Lagrange-Euler denklem sistemi kullanılmıştır. Algoritma olarak Genelleştirilmiş Öngörölü Kontrol (Generalized Predictive Control - GPC) algoritmasında CARIMA formunda (Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average) doğrusal bir işlem modeli kullanılmaktadır [12].

Uzer ve Arkadaşlarının (2010), “Görme Tabanlı Mobil Robot ile Farklı Renklerde Nesnelerin Gerçek Zamanlı Takibi” isimli çalışmalarında tasarlanan obje takibinde objenin arka plandan ayrıştırılması için nesnenin geometrik yapısı ve beraberinde nesnenin renginin kullanıldığı bir yöntem Matlab programı ile gerçekleştirilmiştir[13].

şahin ve Yalvaç’ın (2011) yazdığı “Wireless Controlled Mobile Exploration Robot” isimli başka bir çalışmada yine mikro denetleyici olarak PIC16F877A görölmektedir[14].

Ünlü (2007), “İnternet Üzerinden Mobil Bir Robotun Kontrolü” isimli tez çalışmasında kontrol kartı olarak PIC16F877A ve Doğru Akım (DA) Motorların sürülebilmesi için L298 entegresi kullanılmıştır. İnternet üzerinden sunucu ve istemci arasında bağlantı kurulmasını sağlayan kontrol programı, Borland Developer Studio 2005 programında nesne yönelimli bir dil olan C++ yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir [15].

Mevcut literatürde, internet kullanılarak robot kolu kontrolü üzerine birçok çalışmanın yapıldığı görölmektedir. Yılmaz (2005), “Web Tabanlı Mobil Robot Sistemi Tasarımı, Gerçeklenmesi ve Uygulanması” isimli çalışmaların da mikro denetleyici olarak biri efendi (master) diğeri köle (slave) olmak üzere iki adet PIC16F877 mikro denetleyicisi kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada, bilgisayara bağlı efendi mikro denetleyici internetten aldığı verileri RF (Radyo frekans) ile robot üzerinde bulunan köle mikro denetleyiciye göndererek robotun kontrolünü gerçekleştirmişlerdir.

Kontrol işlemleri için PHP ve JavaScript programlama dilleri kullanılarak web arayüzünü oluşturmuştur. PHP veri tabanı fonksiyonları için kullanılırken, JavaScript kodları ile zamanlama ve tazeleme (fresh-up) fonksiyonları için kullanılmıştır [16].

Thi Hai Linh ve Kung (2014), düz ve ters kinematik denklemler ile beş eksenli bir robot kolunun gerçekleştirilmesini sağlamışlardır. Denavit-Hartenberg notasyonu kullanılarak kinematik denklemler oluşturulmuştur. VHDL donanım tanımlama dili kullanılarak FPGA tabanlı otonom sistemler robot kolunda gerçekleştirilmiştir. Matlab ve simulink kullanılarak yapılan sistemin simülasyonu ve analizleri yapılmıştır [19].

Pfurner (2016), yaptığı çalışmada 7 serbestlik derecesine sahip anthropomorphic robot kolunu Denavit-Hartenberg gösteriminden yararlanılarak kinematik denklemlerini oluşturmuştur. Farklı tasarımıyla oluşabilecek çakışmaların önlenmesi sağlanmıştır [20].

Tamayo ve arkadaşları (2017), ters kinematik denklemler ile yapay sinir ağı kullanarak humanoid bir robot gerçekleştirmişlerdir. Yapılan robot da aktüatör olarak Robotis RX-28 servo motorları kullanmıştır. Elektronik sistemin gerçekleştirilmesinde Robotis RB-100 ve CM-700 kartları kullanılmıştır. Ters kinematik denklem olaraksa temel jacobian kullanılmıştır [21].

Ali ve arkadaşları (2017), yaptıkları çalışmada 6 DOF robot kolunu Denavit-Hartenberg gösterimini kullanarak ters kinematik çözümlerini elde etmiştir. Sensör olarak Kinect sensör kullanmıştır. Çalışmada Matlab ve Visual Studio 2015 C# programları ile kontrol ve analizler yapılmıştır [22].

Thai ve Paulishen (2011), oluşturulan robotis bioloid sistem CM-5, CM-5100 ve CM-700 kontrol kartları kullanılır. CM-5, CM-5100 ve CM-700 kontrol kartları RS-232 ile ZigBee ve USB2Dynamixel'e bağlanır. RS-232 ile ZigBee usb portu ile bilgisayara bağlanarak Windows ve Linux işletim sistemlerine kurulan RoboPlus, Visual Basic,

C++, C#, Labview ve Matlab gibi yazılımları ile programlanır. Servo motor olarak Dynamixel AX-12+ kullanılır [23].

Bu çalışmada Robotis firmasına ait Dynamixel servo motorları ve Dynamixel servo motorları ile uyumlu çalışan Usb2Dynamixel arabirim kartı kullanılmıştır. Bu çalışmanın öncesinde yapılan “ Web Üzerinden Labview Kullanarak Altı Eksenli Robot Kolu Kontrolü” isimli çalışmada RC tipi servo motorlar ve Arduino mikro denetleyici kullanılmıştır [24]. RC servo motorların hassasiyetlerinin düşük olması nedeniyle robot kolu istenilen kararlılıkta çalıştırılamamaktadır. Daha sonrasında “6 Serbestlik Derecesine Sahip Robot Kolunun Görüntü İşleme ve İnternet Üzerinden Kontrolü” isimli çalışmada kullanılan Dynamixel servo motorların hassasiyetleri 0.29 derecedir [25]. Dynamixel servo motorların konum kontrolleri dijital olarak yapılmakta ve en önemlisi konum bilgilerini dijital olarak geri besleme yaparak göndermektedir. Bu çalışma arabirim olarak seçilen Usb2Dynamixel bilgisayardan gönderilen verileri RS-485 iletişim ile servo motorlara göndererek konum kontrolünü geri beslemeli olarak yapmaktadır. Bu iki makalenin üzerine inşa edilen çalışma, incelenerek sistemin eksik yönleri giderilmiştir. Çalışmada kullanılan robot kolu ilk olarak 6 eksenli olarak tasarlanmıştır. Fakat görüntü işleme yapmak için kullanılan kameranın görüş alanı içerisinde 6 eksenli robot kolunun kullanımının gereksiz olduğu yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştı. Hem maliyeti hem de robotun ağırlığını azaltarak daha performanslı çalışması için 5 eksenli robot kolu kullanılmıştır. Robot kolu kontrolü için bu çalışmada grafiksel programlama dili olan Labview kullanarak kontrol algoritması yazılmıştır. Labview, grafiksel programlama kabiliyetleri yanında birçok donanımla entegre ve gerçek zamanlı olarak çalışabilmesi ile öne çıkmaktadır. Ayrıca internet üzerinden gerçek zamanlı olarak beş eksenli robot kolunun kontrolün sağlanması ve izlenmesi için ekstra herhangi bir web sayfası yazmaya gerek duyulmamaktadır. Labview programı ile oluşturulan ön panel web sayfası haline dönüştürülebilmektedir. Objenin konumun belirlenmesi için Labview programı kullanılır. Kameradan alınan görüntü Labview programı ile siyah-beyaz haline getirilir ve bu görüntüler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilir. Görüntülerin gri tonlara dönüştürülmesinin sebebi görüntü işlemenin performansını artırmak ve haberleşmenin hızlı olmasını sağlamak içindir. Önceden tanıtılan objenin boyutları ile eşleştirme

yaparak objenin tanınması sağlanır. Tanınan objenin, konumu da yine Labview programıyla tespit edilir.

1.1. Tezin Hedefleri

Günümüzde büyük bir ivme ile gelişen robotik teknolojisinin diğer bilişim teknolojileri ile bir arada kullanarak, insan hayatını kolaylaştıran, daha az iş gücü kullanarak daha kısa sürelerde daha az maliyette ve yüksek kalitede işlerin yapılmasını sağlamak amaçlanmaktadır. Özellikle son yıllarda mobil cihazların ve internet kullanımının yaygınlaşması, mesafe ve zaman sınırlarını azaltmaktadır. İnternet bankacılığı, e devlet, akıllı evler ve insansız fabrikalar bu gelişmelerin ürünüdür. Yapılan çalışmada bütün bu gelişmelerin ışığında robotların uzaktan ve yakın mesafeden kullanılarak insanlara fayda sağlaması amaçlanmaktadır.

1.2. Tezin Kapsamı

Gelişmiş ve gelişmekte olan toplumların en büyük problemlerinden biriside yapılacak işin çok zamanı ise sınırlı olmasıdır. Yoğun iş yaşantısı yüzünden insanların kendisine ve ailesine yeterli zamanı ayıramadığı görülmektedir. Bu yoğun iş temposunun insanların ruh ve beden sağlığı üzerinde de olumsuz etkileri olmaktadır. İnsanların rutin olarak yaptığı birçok iş robotlar kullanılarak daha hızlı, daha kaliteli ve düşük maliyetle yapılmasını mümkündür. Özellikle hızla gelişen teknolojiyle birlikte robotlar işte, evde ve eğlence sektöründe kullanılması beklenmektedir. İnsansız fabrikalar, ev temizleme robotları, otomatik kontrol edilen araçlar, ameliyatlarda kullanılan robotlar ve yemek yapan robot gibi insanların yaptıkları birçok işi robotlara yaptırarak, insanların eğlence, sosyal ve sportif faaliyetlerle geçireceği düşünülmektedir.

1.3. Tez Organizasyonu

Robotik çalışmalarının önemli bir kısmı robot kolları üzerinedir. Yapılan çalışmada gerçekleştirilen robot kolu birçok alanda ve ortamda kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. İsterseniz lokalden bir bilgisayar başından veya internetin olduğu dünyanın herhangi bir yerinden gerçekleştirilen robot kolunu kontrolü mümkündür. Ayrıca önceden tanıtılan bir cisim görüntü işleme aracılığıyla koordinatları belirlenerek robot kolu ile yakalanabildiği gibi robot kolu manuel olarakta kontrol edilebilmektedir. Bu çalışma endüstride, mühendislik alanında eğitimde ve araştırma çalışmalarında kullanılması daha uygundur. Hazırlanan çalışmada giriş bölümünde yapılan sistem hakkında genel bilgi verilmiş ve konu ile alakalı mevcut literatür taraması anlatılmıştır. Bölüm ikide robotiğin tarihi gelişimi, robot kollarında kullanılan metotlar ve sistemlerle ilgili konulara değinilmiştir. Bölüm üçte sistemin tasarımı, kullanılan elemanlar ve metotlar hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde ise robot kolunun kontrolünde kullanılan yazılımlar ve sistem içinde nasıl kullanıldığı irdelenmiştir. Beşinci bölümde ise çalışma ile ilgili sonuç ve öneriler aktarılmıştır.

BÖLÜM 2. ROBOTİK

Gömülü sistemler, mikroişlemciler, endüstriyel haberleşme, endüstriyel otomasyon ve savunma sanayi gibi alanlarda yaşanan teknolojik gelişmelerin yanı sıra, ticari rekabetinde artması sonucu endüstride insan faktörünün ve iş gücü maliyetlerinin azaltılarak, kalitenin artırılması amacıyla, firmalar robot teknolojilerine yönelmek zorunda kalmıştır. RIA (Amerikan Robot Enstitüsü) robotları şu şekilde tanımlamaktadır: “Robot, çeşitli görevleri yapmak maksadıyla değişik şekillerde programlanmış hareketlerle; nesnelerin, gereçlerin, gereçlerin ya da özel düzeneklerin taşınması için tasarlanmış çok işlevli bir manipülatördür”. BRA (İngiliz Robot Birliği) ve JIRA (Japon Endüstriyel Robot Birliği) gibi ulusal robot birliklerinin robot tanımları arasında farklılıklar olsa da birbirine benzerdir ve genellikle endüstriyel robotları tanımlamaktadırlar. Bunun sebebi robotların endüstride daha aktif olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Robotik teknolojilerinin en fazla endüstride kullanılması robot kollarının popüleritesini ve çeşitliliğini artırmıştır. Günümüzde birçok fabrikanın üretim bandında, robot kolları insanların yerine tercih edilmeye başlanmıştır. Böylece insan gücünün getirdiği maliyetlerin yanı sıra meslek hastalıklarının da önüne geçilmiştir. Devamlı aynı işi yapan işçilerde iş kazası riski artmakta ve çıkan ürünün kalitesinde kayıplar meydana gelmektedir. Ayrıca robotlar daha hassas işleri daha kısa sürede ve bıkmadan yapabilmektedir.

2.1. Robot Teorik Bilgisi

Bu bölüm içerisinde robot ile ilgili temel teorik bilgiler verilmektedir. Ayrıca robot çeşitleri ve onların çalışma mantıkları anlatılmıştır. Robot teknolojilerinde kullanılan matematik bilgisinden de söz edilmiştir.

2.1.1. Robot teknolojisine giriş

Robotik bilimi uygulamalı matematik, fizik, kontrol, makine, elektrik ve bilgisayar mühendisliği gibi birçok bilim dalını içine alan disiplinler arası bir bilimdir. “Robot” terimi, ilk olarak Çek yazar Karel Capek’tin 1920 yılında “R.U.R” veya “Rossum's Universal Robots” ismiyle yazdığı tiyatro oyununda geçmiştir. International Federation of Robotics (IFR) ilk endüstriyel robotun 1959 tarihinde George Devol ve Joseph Engelberger tarafından geliştirdiği bilgisini sunmaktadır. Bu robotun iki ton ağırlığında, hidrolik aktüatörler kullanılarak oluşturduğu ve hata payının 1/10.000 inç. olduğu belirtilmektedir.

Robotlar, endüstri, sağlık, savunma, taşımacılıkta (konveyör sistemler), eğitim ve uzay teknolojisi gibi birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Endüstride kullanılan robotlar ise daha çok robot kollarından oluşmaktadır. Robot kolların en zayıf parçası ellerdir. Bu parçaların hassasiyetini artırmak için çalışmalar devam etmektedir. Gelecekte endüstride insansız fabrikaların gerçekleşmesinde robot kollarının ve robot teknolojilerin önemi büyük olacaktır.

Bir robot temel olarak beş parçadan oluşur. Bunlar mekanik kısım, tutaç, motorlar, kontroller ve sensörlerdir. Mekanik kısmı, robotun iskelet kısmını oluşturur. Mekanik bölümler taşıyıcılar, güç ileten parçalar, yapısal parçalar ve akuplaj bölümleridir. Mekanik bölümler, servis parçaları ve temel yapı parçaları olarak ikiye ayrılabilir. Mekaniğin servis parçalarını el veya elin yerini tutan öğütme, boyama, kaynak ve sıkıştırma araçları oluşturur. Tutaç asıl işi yapan, robotun en uç noktası ve uygulamada aktif olarak kullanılan parçadır. Eklemleri ve tutacı hareket ettirmek için motorlar

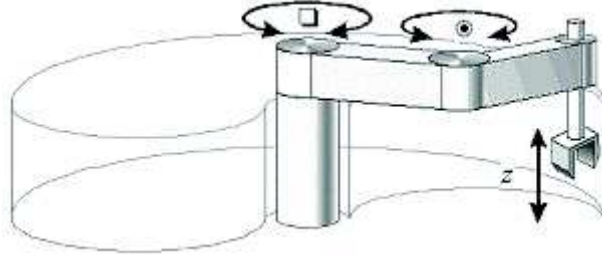
kullanılır. En çok kullanılan motorlar servo ve hidrolik motorlardır. Girişi işleyip robotun yapması gereken görevi bildiren kısma micro denetleyici denir. Sensörler, robotun görevini yapması için robota giriş ve geri dönüş verisi almasını sağlar. Yaptıkları işe ve sensörün özelliğine göre her zaman kullanılmayabilirler.

2.1.2. Robotların sınıflandırılması

Robotlar kontrol tekniğine, eklem türüne, serbestlik derecesine, boyutuna, yaptığı işe, çalıştığı ortama ve daha birçok özelliklerine göre sınıflandırmak mümkündür. Kullanılan kontrol şekline göre adaptif olmayan, adaptif olan ve akıllı robotlar olarak üçe ayrılır. Adaptif olmayan robotlar üzerinde sensör donanımı bulundurmeyen robotlardır. Akıllı robotlar ise adaptif robotlarda mevcut bulunan sensörlerin haricinde, bellek ve çevrenin ayrıntılı bir modelini bulunmaktadır. Kullanılan eklem türüne göre prizmatik, helisel, silindirik, düzlemsel, küresel veya döner eklem olarak sınıflandırılabilir. Serbestlik derecesine göre (DOF) sınıflandırma ise robotun, enine veya dönme hareketi yapan bütün eklemlerin toplanması ile bulunur. Serbestlik derecesi arttıkça robotun karmaşıklığı da artacağından bu yöntem robotun karmaşıklığını anlama açısından önemli bir sınıflandırma şeklidir. Serbestlik derecesi ikinin üstünde olan robotların çalışma uzayında bulunan bir noktaya ulaşmak için birden fazla seçeneği vardır. Bu da robotun karmaşıklığını artırır. Boyutuna göre nano robotlar, mikro robotlar şeklinde sınıflandırılabilirler. Yaptığı işe göre kaynak robotu, boyama robotu, araştırma robotu, sanayi robotu, arama kurtarma robotu, biyolojik robotlar, askeri robotlar ve buna benzer şekillerde de sınıflandırılabilir. Çalıştığı ortama göre havada, suda, karada, çölde vb. şekillerde sınıflandırılabilir.

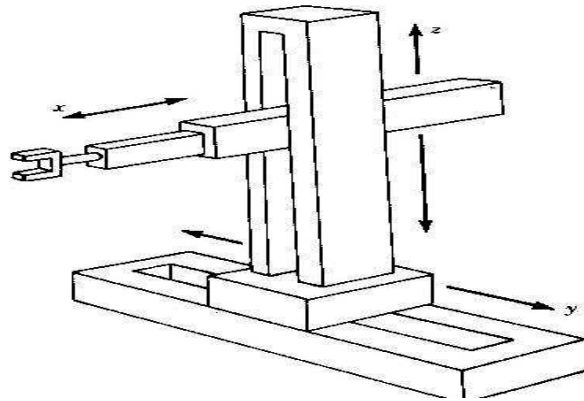
Robotun nasıl çalıştığını anlamada nasıl hareketini ettiğini anlama önemlidir. Robotların 2 temel hareketi vardır. Bunlar Dönme (Rotational) hareketi ve Enine (Transverse) harekettir. Dönme hareketi bir eksen etrafında dönme hareketidir. Enine hareket ise ileri doğru sabit bir harekettir. Endüstride aktif olarak kullanılan robot kolları ise scara, kartezyen, silindirik, küresel ve eklemlili robot kolları diye sınıflandırılabilir.

Scara robot kolu: Yüksek hız ve iş kapasitesine sahiptir. Eklem yerlerinde elektrik motoru ağız kısmında ise pnömatik motorlar bulunur. Pnömatik motor robot kolunun esneklik kazanmasını sağlar. Montaj uygulamalarında ve dolgu uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Şekil 2.1.'de scara robot kolu görünmektedir.



Şekil 2.1. Scara robot kolu [30].

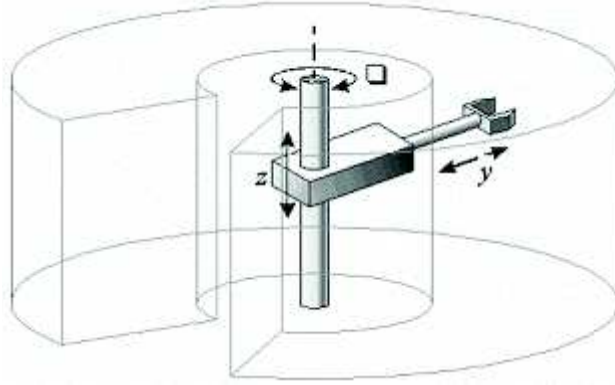
Kartezyen robotlar: X, Y, Z eksenlerinde doğrusal olarak hareket eder. Üç tane kayar tip eklemden oluşur. Kartezyen robotlar tutma ve taşıma yeteneği yanında mekanik yönden güçlü olması ağır ve büyük boyutlu cisimleri taşımak için ideal bir robot türü olmuştur. Çalışma uzayında hareket yeteneği düşük fakat basittir. Eklemlerde kullanılan manipülatörler genellikle elektrik motorudur bazen pnömatik motorlarda kullanıla bilmektedir. Şekil 2.2.'de kartezyen robot kolu görünmektedir.



Şekil 2.2. Kartezyen Robot kolu [30].

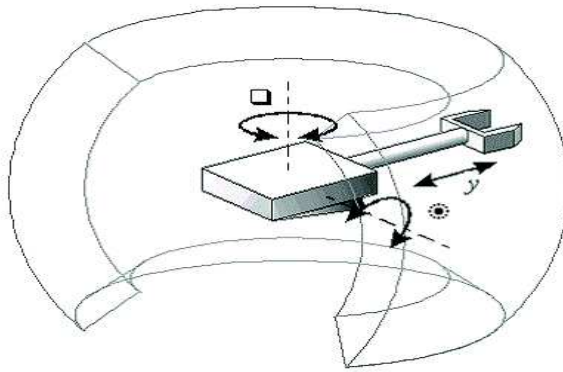
Silindirik robot kolları: Bir tane döner iki adet kayar eklemden oluşur. Yüksek dönüş yeteneği ve hareket etme kapasitesi yönünden kartezyen robot kolundan üstündür. Mekanik yapısı bakımından sağlamdır. Bilek konumunun doğruluğu yatay harekete

bağlı olarak düşer. Büyük boyutlu cisimleri çalışma alanı içerisinde tutma ve taşıma görevini yerine getirir. Hidrolik, pnömatik ve elektrik motorlu isteğe göre kullanılabilir de en fazla hidrolik motor tercih edilir. Şekil 2.3.'de silindirik robot kolu görünmektedir.



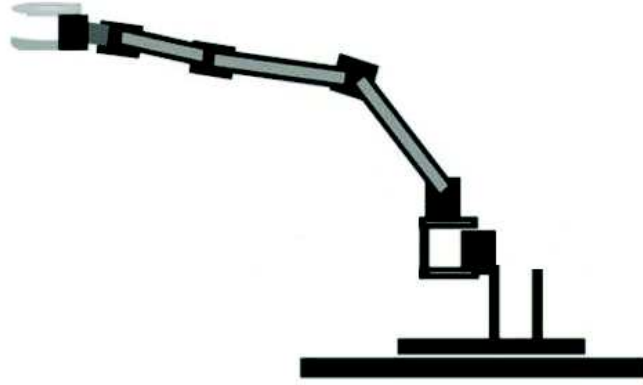
Şekil 2.3. Silindirik robot kolu [30].

Küresel robot kolları: Polar koordinatlı robot kolu olarak da adlandırılır. Bir tane kayar, iki tane döner tip eklemden oluşur. Mekanik olarak diğer robot kollarına kıyasla güçlü olmaması yanında karmaşık olması piyasada tercih edilmesini azaltmaktadır. Küresel çalışma şekline sahip olduğundan yazılımsal olarak programlanması zordur. Hareket alanları kolların büyüklüğü ile sınırlıdır. Motor olarak elektrik motorları tercih edilir. Genellikle pres, döküm, kaynak, eğme, bükme, yapıştırma ve makine montajı gibi işlemlerde kullanılır. Şekil 2.4.'de küresel robot kolu görünmektedir.



Şekil 2.4. Küresel robot kolu [30].

Eklemlı robot kolları: Mafsallı robot kolları diye de adlandırılır. İnsan kol yapısı esas alınır. En az 3 döner eklemi olan robot koludur. Tüm eklemleri döner olduğu için çalışma uzayında en yetenekli robottur. Robotun hareket serbestliği eklem sayısı ile doğru orantılıdır. Genellikle elektrik motorlar tercih edilir. Bu tip robotlar boyama, gaz kaynağı, ark kaynağı, püskürme, montaj ve yüzey temizleme makineleri gibi endüstride birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılır. Şekil 2.5.’te eklemlı robot kolunun şekli görölmektedir.



Şekil 2.5. Eklemlı robot kolu.

2.2. Kinematik Analiz

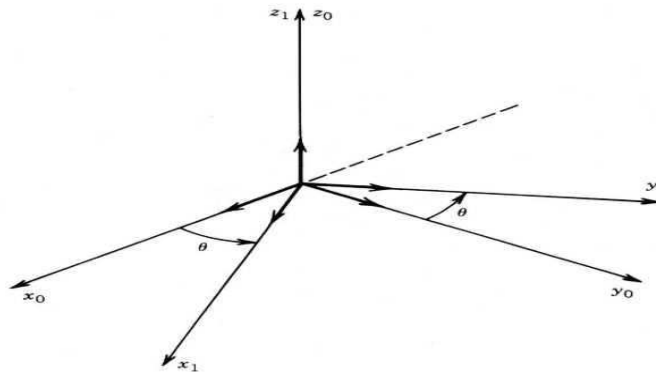
Robot koluna ilişkin yörünge planlaması, iş planlaması, kontrol ve dinamik problemleri ele alınmadan önce bu robot kolun kinematik ilişkilerinin ve modelinin oluşturularak gerekli analizin yapılması gerekir. Robot kollarının kinematik ilişkileri iki farklı yolda oluşturabilir. Birincisi elin zemine göre konum ve yönelimini eklem değişkenleri cinsinden belirleyen “düz kinematik” ilişkileridir. İkincisi ise elin zemine göre verilen konum ve yönelimini sağlayacak olan eklem değişkenlerini belirleyen “ters kinematik” ilişkileridir. Ters kinematik ilişkilerin çözümü, robot kolun serbestlik derecesine, döner ve kayar eklemlerinin sayısına, sıralanışına bağlı olan, genelde lineer olmayan bağlaşıık denklemlerin çözümünü kapsar. Robot kol eklemlerle birbirine bağlanmış rijit cisimlerin açık uçlu kinematik zinciri olarak kabul edilir. Zincirin bir ucu yere bağlı iken diğer ucu sonlandırıcıya bağlıdır. Sonuçta bu yapının

hareketi her bir uzvun diğerine göre hareketlerinin toplamından oluşturulur. Bunun için önce bir rijit cismin uzaydaki konumunu ve yönelimini belirtmek için dönme matrisi ve öteleme vektörü oluşturulur. Bu matris ve vektörü birleştirmek için homojen dönüşüm gösterimi kullanılır [26].

2.2.1. Dönme matrisi

Şekil 2.6.'da gösterilen $\{i_0, j_0, k_0\}$ $x_0y_0z_0$ koordinat çerçevesi için, $\{i_1, j_1, k_1\}$ $x_1y_1z_1$ koordinat çerçevesi için birim vektörler olsun. 1. koordinat çerçevesi 0. koordinat çerçevesinde z_0 eksenini etrafında θ açısı kadar döndürülerek elde edilmiştir. Bu iki koordinat çerçevesi arasındaki dönüşüm eşitlik Formül (2.1) ile bulunur. Buradaki R_1^0 matrisi 1. koordinat çerçevesinden 0. koordinat çerçevesine dönme matrisini göstermektedir. 1. koordinat çerçevesi 0. koordinat çerçevesinden belli bir dönme ile elde edildiğinden bu matris dönme matrisi adını alır [26].

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} i_0 i_1 & j_0 i_1 & k_0 i_1 \\ i_0 j_1 & j_0 j_1 & k_0 j_1 \\ i_0 k_1 & j_0 k_1 & k_0 k_1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$



Şekil 2.6. Z0 etrafında dönme [26].

Böylece $i_0 i_1 = \cos \theta$, $j_0 i_1 = -\sin \theta$, $i_0 j_1 = \sin \theta$, $j_0 j_1 = \cos \theta$, $k_0 k_1 = 1$ bulunur.

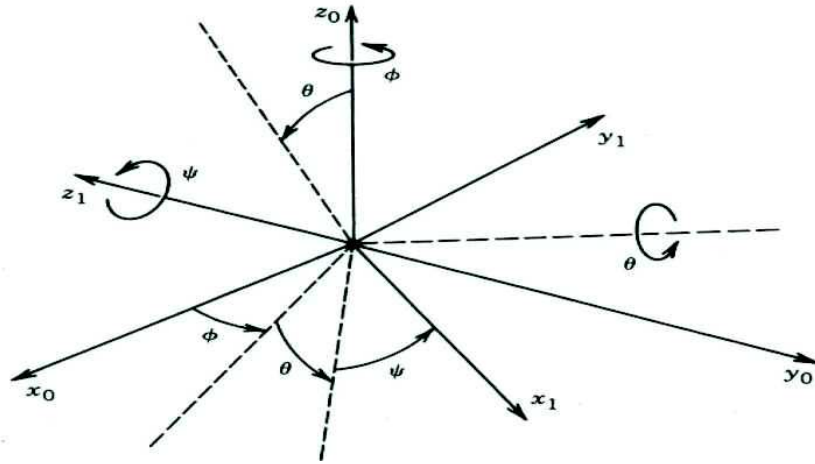
$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Dönme matrisi (2.2)'de elde edilir. R_1^0 gösterilimi yerine dönme eksenini ve açısını belirten $R_{z,\theta}$ gösterilimi de kullanılabilir. Koordinat çerçeveleri etrafında dönme tek olmayabilir, böylece devam eden şekilde $x_1 y_1 z_1, x_2 y_2 z_2, x_3 y_3 z_3 \dots$ koordinat çerçeveleri elde edilebilir. Aslında sonuçta elde edilen koordinat çerçevesi sadece üç eksen etrafında (x, y, z) belirli açılarla dönmüştür. Bu açıların tanımlanması için iki tane gösterilim mevcuttur.

1. Euler açıları gösterilimi
2. Dönme (Roll) / Yükselme (Pitch) / Yalpa (Yaw) açıları gösterilimi

2.2.1.1. Euler açıları

Euler açıları sırasıyla z eksenini etrafında Φ açısı kadar, y eksenini etrafında θ açısı kadar, tekrar z eksenini etrafında Ψ açısı kadar dönmelere karşılık gelmektedir. Euler açıları gösterilimi Şekil 2.7.'de gösterilmiştir [26].



Şekil 2.7. Açılar gösterimi [26].

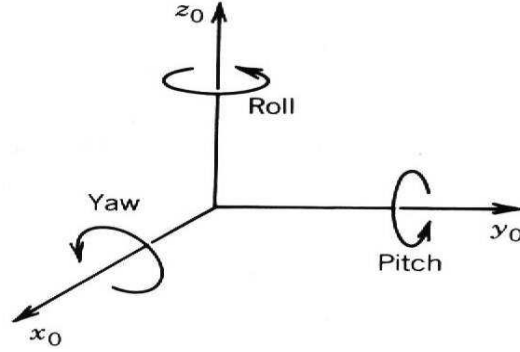
Burada $\cos = c$, $\sin = s$ olmak üzere dönme matrisi şu şekilde elde edilir. Toplam, Euler matrisi formül (2.3) 'de görülmektedir.

$$\begin{aligned}
 R_1^0 &= R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{x,\psi} \\
 &= \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3) \\
 &= \begin{bmatrix} c\phi c\theta c\psi - s\theta s\psi & -c\phi c\theta s\psi - s\theta c\psi & c\phi s\theta \\ s\phi c\theta c\psi + c\theta s\psi & -s\phi c\theta s\psi + c\theta c\psi & s\phi s\theta \\ -s\theta c\psi & s\theta s\psi & c\theta \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

2.2.1.2. Dönme (Roll) / Yükselme (Pitch) / Yalpa (Yaw) açıları

Dönme (Roll) / Yükselme (Pitch) / Yalpa (Yaw) açıları sırasıyla z eksenini etrafında Φ açısı kadar, y eksenini etrafında θ açısı kadar ve x eksenini etrafında Ψ açısı kadar

dönmelere karşılık gelmektedir. Roll /Pitch / Yaw açıları gösterilimi Şekil 2.8.’de verilmiştir [26].



Şekil 2.8. $\Phi / \theta / \Psi$ açıları gösterilimi.

Burada toplam öteleme matrisinin oluşumu ve değeri (2.4) ’de gösterilmektedir.

$$R_0^1 = R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{x,\varphi}$$

$$= \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & s\varphi & c\varphi \end{bmatrix}$$

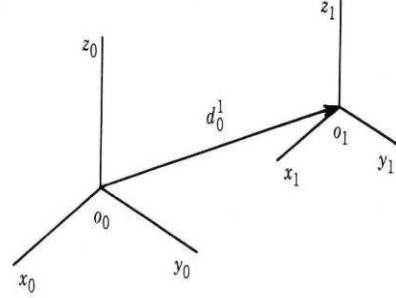
(2.4)

$$= \begin{bmatrix} c\phi c\theta & -s\phi c\varphi + c\phi s\theta s\varphi & s\phi s\varphi + c\phi s\theta c\varphi \\ s\phi s\theta & c\phi c\varphi + s\phi s\theta s\varphi & -c\phi s\varphi + s\phi s\theta c\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix}$$

2.2.2. Öteleme vektörü

Şekil 2.9.’da gösterildiği üzere oxyz’den d kadar bir öteleme ile elde edilmiş oxyz koordinat çerçevesi düşünelim. Bu iki koordinat çerçevesi arasındaki dönüşüm

öteleme vektörü d_0^1 ile tanımlanır formül (2.5)'de gösterildiği gibi öteleme vektörü ifadesi ile temsil edilir [26].



Şekil 2.9. oxyz'ni ötelenmiş çerçevesi.

$$d_o^1 = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.2.3. Homojen dönüşüm

Üç boyutlu uzayda koordinat çerçeveleri arasındaki dönüşüm dönme matrisleri ve öteleme vektörleri yardımıyla yapılır. Her ikisinin birlikte gösterilimi için yani koordinat çerçeveleri arasında hem dönmenin, hem de ötelemenin var olduğu durumda homojen dönüşüm matrisleri kullanılır. Homojen dönüşüm matrisleri formül (2.6) daki gibi elde edilir [26].

$$T_o^1 = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & \\ & R_o^1 & & d_o^1 \\ & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]_{4 \times 4} \quad (2.6)$$

Burada elde edilen T_1^0 matrisi 1. koordinat çerçevesinden 0. koordinat çerçevesine homojen dönüşüm matrisini göstermektedir. T_1^0 matrisini 4x4 boyutundan kare matris olduğuna dikkat edilmelidir. Bu homojen matris oluşturulurken matrisin tersinin alınabilmesi için yapılmıştır. T_1^0 matrisindeki $T_{4,4}$ elemanı olan 1 tüm elemanların bire bir ölçeklendiğini göstermektedir. Bu elde ettiğimiz genel kalıba bağlı olarak temel homojen dönüşüm matrisleri formül (2.7)'de gösterilmektedir [26].

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} c\phi & 0 & s\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\phi & 0 & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$d_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} d_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} d_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2.4. Düz kinematik analiz

Robotikte düz kinematikler manipülatörün verilen eklem değişken değerleri için sonlandırıcının konumunu ve yönelimini bulmak olarak tanımlanabilir. Eklem değişkenleri, eklemin döner olması durumunda uzuvlar arasındaki açı, eklemin kayar olması durumunda uzuv uzanma miktarıdır. Bu değişkenler için gösterilimler aşağıda formül (2.8)'de verilmiştir [26].

$$q_i = \begin{bmatrix} \theta_i & \text{döner eklem için} \\ d_i & \text{kayar eklem için} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Şimdi T_{i-1}^i 'in çerçeve i 'den çerçeve i-1'e homojen dönüşüm matrisi olduğunu düşünelim. Burada T_{i-1}^i matrisinin sabit olmadığına, manipülatörün hareketiyle değiştiğine dikkat edilmelidir. Sonlandırıcının konumunu ve yönelimini temel (base) koordinat çerçevesinde elde etmek için homojen dönüşüm matrisine H dersek formül (2.9)'daki gibi görebilir.

$$H = T_0^n = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot \dots \cdot T_{n-1}^n \quad (2.9)$$

2.2.4.1. Denavit-hartenberg (DH) dönüşümü

Denavit ve Hartenberg 1955 yılında sistematik bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde aşağıdaki kurallara göre önce koordinat çerçeveleri atanır, daha sonra dönüşüm için gerekli uzuv ve eklem parametreleri bulunur. Yöntem dokuz adımdan oluşmaktadır ve bu adımlar aşağıda verilmiştir [28].

1. Eklem eksenleri $z_0 \dots z_{n-1}$ 'i konumlandır.
2. Temel çerçeve sağ el kuralına göre düzenlenir. $i = 1, \dots, n-1$ için adım 3-5'i tekrarla.
3. Merkez o_i 'yi yerleştir. Eğer z_i ile z_{i-1} kesişiyorsa o_i 'yi bu noktaya yerleştir. Eğer z_i ile z_{i-1} paralelse o_i 'yi eklem i üzerine yerleştir.
4. x_i 'yi yerleştir. Eğer z_i ile z_{i-1} kesişiyorsa ikisinin oluşturduğu düzleme dik olarak x_i 'yi yerleştir. Eğer z_i ile z_{i-1} paralelse bunların ortak normalleri boyunca o_i 'ye doğru x_i 'yi yerleştir.
5. Sağ el çerçevesini tamamlayacak şekilde y_i 'yi yerleştir.
6. Sonlandırıcı çerçevesi o_n, x_n, y_n, z_n 'i yerleştir. Bu yerleşim sonlandırıcı tipine göre değişir. Bu ilk altı adım koordinat çerçevelerinin yerleştirilmesi için kullanılır, daha sonraki üç adım bize eklem ve uzuv parametrelerini verir.

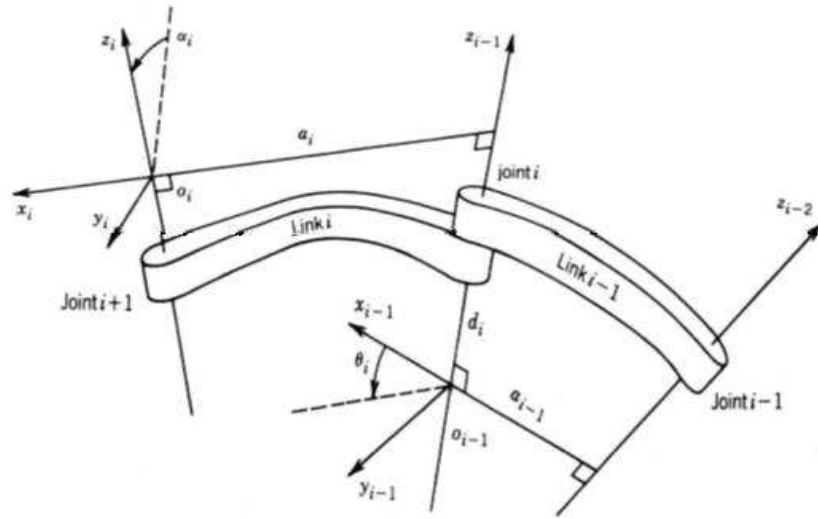
7. Daha sonra eklem ve uzuv parametreleri belirle. Bu parametreler aşağıdaki gibidir ve Şekil 2.10.'un üzerinde gösterilmiştir.

Uzuv uzunluğu a_i : x_i boyunca o_i 'den x_i ve z_{i-1} 'nin kesişimlerine olan uzaklık

Uzuv ofseti d_i : z_{i-1} boyunca o_{i-1} 'den x_i ve z_{i-1} 'in kesişimlerine olan uzaklık.

Uzuv büküm α_i : x_i etrafında z_{i-1} ile z_i arasındaki açı

Eklem açısı θ_i : z_{i-1} etrafında x_{i-1} ile x_i arasındaki açı



Şekil 2.10. Denavit-Hartenberg çerçeve ataması.

8. Aşağıdaki matrise bağlı olarak iki çerçeve arasındaki homojen dönüşüm matrisini formül (2.10) ile hesaplanır.

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

9. Sonlandırıcı koordinat çerçevesinden temel çerçevesine dönüşüm matrisini formül (2.11)'ile hesaplanır.

$$T_0^n = T_0^1 . T_1^2 . T_2^3 \dots T_{n-1}^n \quad (2.11)$$

2.2.5. Ters kinematik analiz

Ters kinematik verilen sonlandırıcı konumuna ulaşmak için gerekli eklem değişken değerlerini bulmaktır. Ters kinematik problemlerinde düz kinematiklerin tersi biçimde homojen dönüşüm matrisleriyle oluşturulan doğrusal olmayan denklemlerin çözülmesi istenir. Bu eşitliklerin kapalı formda doğrudan çözülmesi çok zordur, bu yüzden çözüm için etkin ve sistematik yöntemler gerektirir. Bu tip eşitliklerin çözümü için iki ana yöntem mevcuttur:

1. Kapalı Form Yaklaşımı: Kapalı form yaklaşımı homojen dönüşüm matrisinden elde edilen eşitliklere bağlı olarak genel eklem değişkenleri çözümü elde etmeyi sağlar. Böylece çok hızlı hesaplamaların gerektiği çevrim içi robot uygulamaları için pratik ve hızlı bir yaklaşım sağlar. Ayrıca çoklu çözümlerin olduğu durumlarda bu çözümlerden sadece birini seçerek çözüm karmaşasını ortadan kaldırır. Kapalı form yaklaşımı iki alt başlıkta incelenir.

- a. Geometrik yaklaşım: Bu yaklaşım manipülatör duruşuna bağlı olarak oluşan geometrik şekilden yararlanır. Bu sebeple ters konum kinematiklerinin çözümünde tercih edilir
- b. Cebirsel yaklaşım: Bu yaklaşım manipülatörün parametreleri ve eklem değişkenleri arasındaki cebirsel ilişkilerden yararlanır. Çoğunlukla ters yönelim kinematiğinin çözümünde tercih edilir.

2. Sayısal Yaklaşım: Bu yaklaşım manipülatörün diferansiyel kinematik eşitliklerinden ve eklem değişkenlerinin başlangıç değerlerinden yararlanarak eklem değişkenlerinin sayısal değerlerini bulur.

Robotların kinematik denklemlerini elde ederken birçok problemle karşılaşılır. Bunların temelinde yatan problem ise üç eklemden sonra bir konuma ulaşmanın birden farklı yollarının olmasıdır. Bir robotun eklem açıları verildiğinde, uç noktasını ve yönünü belirleyen probleme ileri kinematik problemi; robotun verilen bir uç nokta konfigürasyonu için eklem açılarını belirleyen problem ise ters kinematik problemi olarak ifade edilmektedir. Robotun ileri kinematik haritası için exponansiyellerin çarpımını kullanarak, ters kinematik problemlerin çözümüne geometrik bir algoritma geliştirmek mümkündür. Ters kinematik problem, uygun alt problemlere indirgenerek çözülebilir.

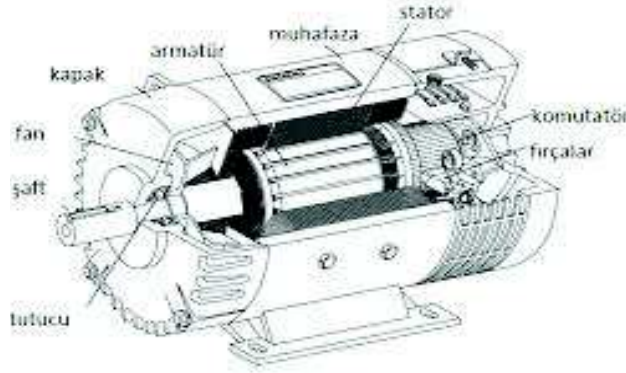
2.3. Robotik Sistem Bileşenleri

2.3.1. Motor ve aktuatörler

Elektriksel aktuatörler; Elektriksel kumanda sinyalini mekanik harekete dönüştürürler. Bu tür aktuatörlerin başlıca çeşitleri;

1. Dönme hareketi üretmek üzere kullanılan, step ve servo motorları gibi tahrik sistemleri.
2. Hidrolik/pnömatik akışı kontrol etmek üzere kullanılan solenoid valfte olduğu gibi, solenoid tip sistemler.
3. Bir ısıtıcı ya da bir motor gibi bazı elektrikli cihazların açılıp kapanmasında kullanılan mekanik swiçler, diyotlar, tristörler ve transistorler, röleler gibi açma-kapama sistemleri.
4. Elektrik motorları; Elektrik motorları bütün mekatronik sistemlerde en fazla kullanılan aktuatörlerdendir. Bunlar Doğru Akım Motorları (DC),

Alternatif Akım Motorları (AC), step motorları ve servo motorlar gibi sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.11. ' de klasik bir DC motor gösterilmektedir.



Şekil 2.11. DC motor yapısı ve elemanları.

DC motorda bobin şekilde görüldüğü gibi, rotor adı verilen ve manyetik malzemeden yapılmış bir silindir üzerine sarılır. Rotor, statör tarafından oluşturulan manyetik alan içinde serbestçe dönebilecek şekilde monte edilmiştir. Rotora sarılı olan bobinin uçları komütatör ve karbon fırçalar yardımıyla doğru akım kaynağından enerji almaktadır. Ancak günümüzde fırça aşınma probleminden kaçınmak üzere fırçasız DC motorları tasarlanmıştır. Fırçasız DC motorlarında bobin statör üzerine sarılmakta ve rotorda daimi mıknatıs kullanılmaktadır.

Alternatif Akım (AC) Motorları: Alternatif akım motorları özellikle takım tezgâhları gibi imalat sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. AC motorlar fırçasız çalışırlar, daha güvenilir, daha sağlamdırlar. Çok az bakım gerektirirler. Tek fazlı ve çok fazlı olarak sınıflandırıldığı gibi indüksiyon ve senkron motorlar şeklinde de gruplandırılmaktadır. AC senkron motorların yapısı değişken frekansla kontrol edilebilir.

Step Motorları: Step motoru, daimi manyetli veya değişken relüktanslı bir DC motorun özel bir çeşitlidir. Step motoru kendisine uygulanan elektrik darbelerini adım olarak isimlendirilen ayrık rotor hareketine dönüştürür. Bir adımı, bir dereceye

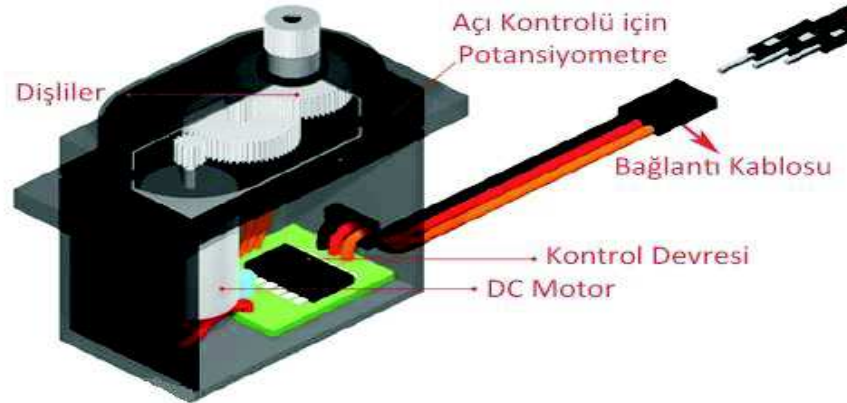
karşılık gelen bir step motorunun 1 devir yapabilmesi için 360 puls (darbe) uygulanması gerekir. Step motorları genellikle düşük hızlı ve düşük momentli olmasına karşılık hassas hareket kontrolü için çok uygundur. Bu motorlarla belli bir devir sayısına karşılık gelen hareket elde edilebildiği gibi, devrin belli oranına karşılık gelen hareketleri de gerçekleştirmek mümkündür. Şekil 2.12.'de step motor görülmektedir.



Şekil 2.12. Step (adım) motor [31].

Servo motorlar: Servo motorlar, dinamik yük ve hız değişikliği, pozisyonlama, periyodik çalışma, yüksek kararlılık ihtiyaçlarında kullanılırlar. Rotorunda sabit mıknatıslar bulunan, modern elektronik sürücüler ile kontrol edilen senkron motorlardır. DC servo motorlardaki gibi komütatör ve fırça elemanları olmadığından güvenilir, kararlı ve küçük boyutlarda imal edilirler. Üç faz sargılarına uygulanan sinüs şeklindeki akım ile hava aralığında bir döner alan oluşturulur.

Motor, aktarma organı ve yükten oluşan mekanik servo sisteminin hız, moment veya pozisyon değişkenlerinden herhangi birinin, bu değişkenle ilgili verilen referans değerine uygun olarak hareket ettirilmesini sağlayan elektronik güç elemanlarıdır. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu ile çalışan, analog veya dijital yapıda sürücülerdir. Geri besleme olarak hall sensör, resolver, artımlı encoder veya mutlak (sin/cos) encoder kullanılır. Şekil 2.13.'te servo motor görülmektedir.



Şekil 2.13. Servo motor yapısı ve elemanları [32].

2.3.2. Sensörler ve kodlayıcılar

Mekatronik sistemler, ortamda meydana gelen olayları sensörleri kullanarak fark ederler. Mekatronik sistemdeki; mekanik, manyetik, ısı, optik ve kimyasal değişimler elektrik voltajına veya akımına sensörler vasıtasıyla dönüştürülür. Sensörler, insanoğlunun gözleri, kulakları, burnu ve dili gibi duyu organlarının yaptığı fonksiyonlara benzer işlem görürler. Yani algılayıcı olarak çalışırlar. Duyu organları aldıkları bilgileri beyne iletirler. Sensörlerse topladıkları bilgileri endüstriyel otomasyonda beyne karşılık gelen mikro işlemciye iletir. Sensörler endüstriyel otomasyonda kapalı devre sistemin çıkış büyüklüğünü sürekli algılayarak girişe müdahale ederler. Daha genel bir ifadeyle, ortamdaki bilgileri değerlendirirler, sonucu aktüatöre gönderirler ve aktüatör ortamı düzeltmek üzere müdahale eder.

Kodlayıcılar (Encoder): dönme hareketini ardışık sayısal sinyallere çevirerek dönme hızı ve dönme sayısı hakkında bilgi verir. Manyetik veya optik olarak çalışır. Doğrusal ve döner olmak üzere ikiye ayrılır.

Rotary Encoderler: Döner encoderlar da konum bilgisinin veriliş tarzına göre artımlı ve mutlak olmak üzere ikiye ayrılır. Optik sensörlerde ışık kaynağı, alıcı ve üzerinde yarık ya da çizgiler kullanılır. Şekil 2.14.'de Rotary encoder resmi görülmektedir.

Incremental Encoder: Artımlı (incremental) encoderda disk yarıklı ise ışık, yarıktan geçerek alıcıya gelir. Yansımalı tipte ise ışık, üzerine siyah ve beyaz çizgiler çizilmiş disk üzerinden yansır. Şekil 2.15. 'de incremental encoder resmi görülmektedir.



Şekil 2.14. Döner encoderler [33].



Şekil 2.15. Artımlı encoderlar [33].

Robotik çalışmalarda mesafe ölçümü, dokunmayı algılama, uzayda bulunduğu konumu ve hedef konumu bulmak için sensörler ve kodlayıcılar kullanılır. Tıp alanındaki cerrahi operasyonlarda ve endüstride üretim bandında yapılacak hassas işlemlerde vb. sensörler ve kodlayıcıların hassasiyeti daha büyük önem kazanır.

2.3.3. Robot kolu denetleyicileri

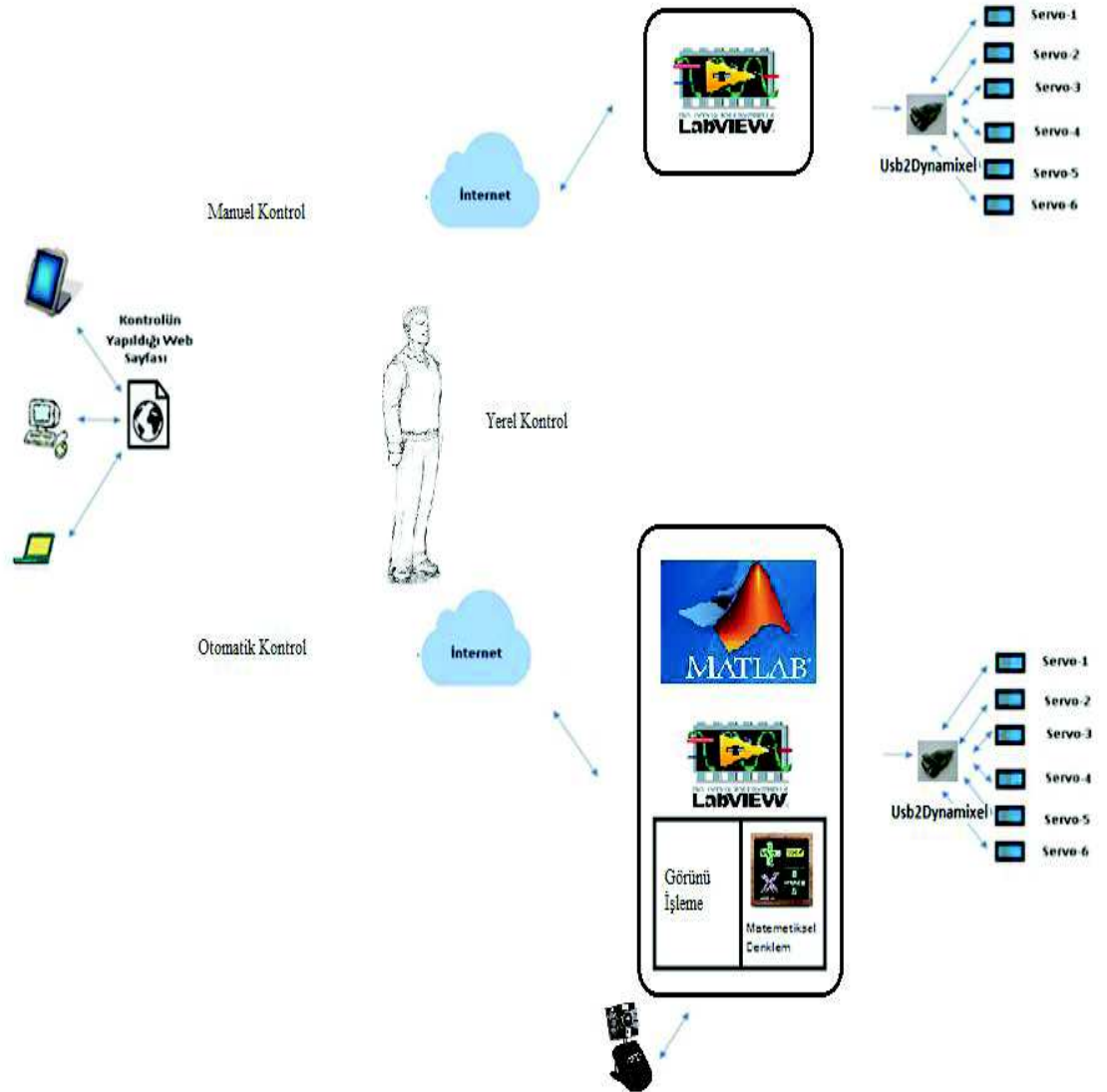
Robot kolunun algoritmaya uygun hareket etmesi için motorlara gerekli veriler denetleyiciler kullanılarak sağlanır. Bu denetleyiciler yapılan çalışmaya göre farklılıklar gösterebilir. FPGA, Arduino, Usb2Dynamixel, zigbee, PIC ve raspberry pi gibi birçok denetleyici örnek olarak verilebilir. Özellikle robot kolu konum kontrol uygulamalarında maliyet, hız ve esneklikleri nedeni ile mikro denetleyiciler tercih edilir. Bunun yanında Robot kolu için özel olarak tasarlandığı da görülmektedir. Genel olarak mikro denetleyiciler aşağıdaki birimlerden oluşur:

1. Bir microişlemci çekirdeği (CPU)
2. Program ve veri belleği (ROM, RAM...)
3. Giriş / Çıkış (I / O) birimleri
4. Saat darbe üreteçleri
5. Zamanlayıcı / Sayıcı birimleri
6. Kesme kontrol birimleri
7. A / D ve D / A (Analog / Dijital – Dijital / Analog) çeviriciler
8. Darbe genişlik üretici (PWM)
9. Seri haberleşme birimi (UART, RS-232, CAN, I²C vb.)
10. Diğer çevre birimleri

Mikro denetleyici konumları hesaplama, motorlar için kontrol sinyallerini gönderme vb.

BÖLÜM 3. SİSTEM TASARIMI

Bu tez çalışması kapsamında önerilen ve tasarımı gerçekleştirilen 4 serbestlik derecesine sahip robot kolunun görüntü işleme ve internet üzerinden kontrolünün sistem blok diyagramı Şekil 3.1.'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Sistem blok diyagramı.

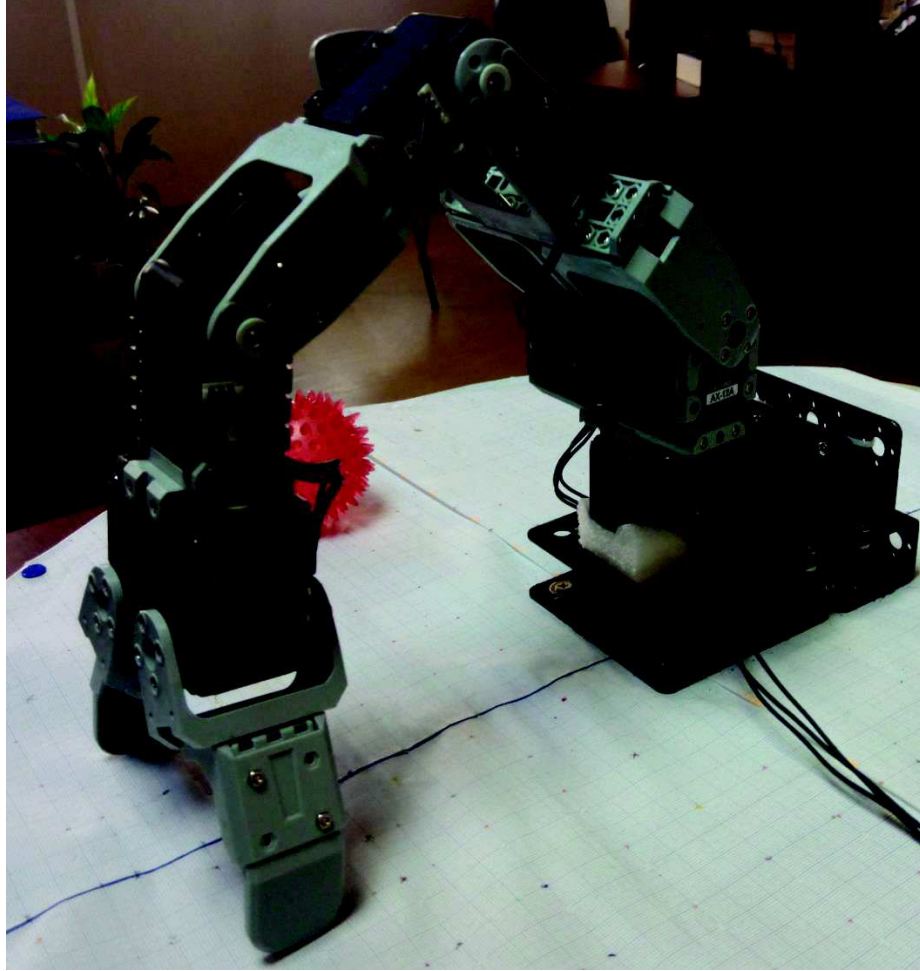
3.1. Tasarlanan Sisteminin Temel Özellikleri

Sistemin kontrolü için Labview programı çevre birimlerle haberleşip genel algoritmayı yürütür, matlab ile ters kinematik hesaplamalar yapılarak Usb2Dynamixel kontrol kartına gönderilecek şekilde tasarlanmıştır. Web ara yüzü sayesinde kullanıcıya manuel olarak istediği konumlara robot kolu yönlendirebilme imkânı sunulmuştur. Veya daha önceden tanımlanan objenin konumuna otomatik olarak robot kolunu yönlendirerek objeyi herhangi bir alana taşıyabilmektedir.

Bu sistem yerel olarak kullanılabildiği gibi yerel bilgisayarın IP adresiyle uzaktan bağlanılarak yönetilmesi de mümkündür. Eğer istenirse sisteme bir domain ile ilişkilendirilerek bu domain üzerinden de kontrol sağlanabilmektedir. Uzaktaki kullanıcı web ara yüzünden robot kolunu manuel ya da görüntü işleme ile otomatik kontrol edebilmektedir. Uzaktaki kullanıcının manuel kontrol veya görüntü işleme ile otomatik kontrol işlemini gerçekleştirdiği web ara yüzü Şekil 4.14.'te görülmektedir. Manuel kontrolde web ara yüzünden servo motorunun açılarını güncellemesi ile oluşan değişiklikler Labview programında gerekli işlemlerden sonra USB portu ile Usb2Dynamixel kontrol kartına ulaşır. Motorlara bu veriler RS485 protokolü ile robot kolunun mekanik hareketini sağlayacak servo motorlara ulaştırılmaktadır. Bu değişiklikler yerel bilgisayara bağlı kamera ile görüntü alınarak tekrar Labview Programına iletilerek web sayfasında ve yerel bilgisayarda görüntünün oluşmasını sağlamaktadır. Görüntü işleme butonunun seçilmesi ile daha önceden görüntü işleme ile tespit edilen obje kırmızı bir kare içine alır ve konum bilgilerini robotun ters kinematik denklemine sokarak objeyi tutması için her bir servo motorunun kaç derece dönmesi gerektiğini hesaplar ve ekranda görüntüler. Kullanıcı web ara yüzünden görüntü işleme butonunu seçmesi ile web sayfasında görüntülenen veriler motorlara ulaştırılarak robot kolunun obje konumuna yönelmesi sağlanır. Robot kolu objeyi mevcut konumundan alarak bizim belirlediğimiz koordinata kadar taşıdıktan sonra objeyi bırakmaktadır.

3.2. Mekanik Tasarım

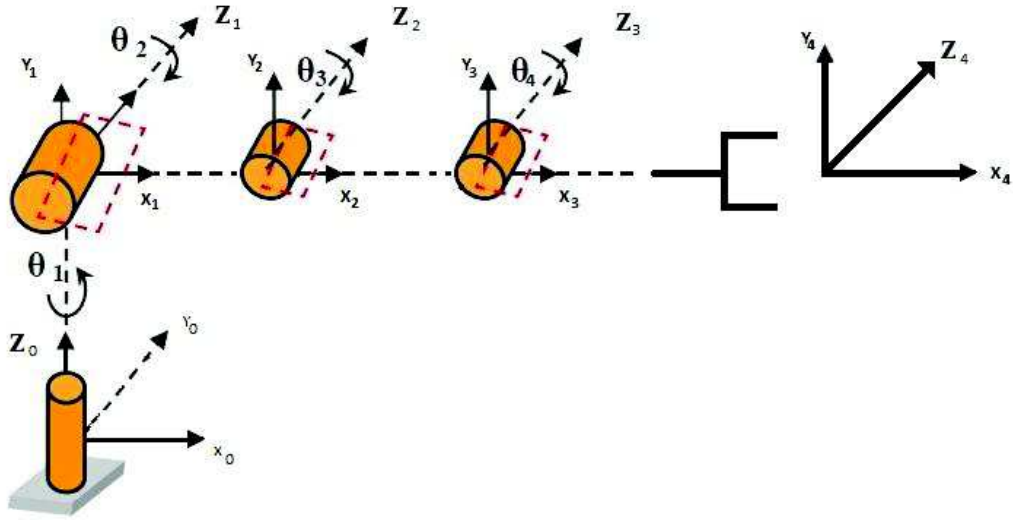
Bu tez kapsamında beş eklemlilik dört özgürlük derecesine sahip (4 DOF) robot kolu kullanılmıştır. Bu robot kolu tasarlanırken hızlı, hassas ve tekrarlı hareketler yapmaya uygun olması hedeflenmiştir. Belirlenen ve gerçekleştirilen robot kol aşağıdaki Şekil 3.2.'de sunulmuştur. Kullanılan robot kolu eklemlilik Puma robot kolu ailesine mensup olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan tasarım içerisinde bulunan uzuvlar ve ölçeksel gereklilikleri sağlamak için plastik bağlantı braketleri kullanılmıştır. Gerçeklenen sistemde tercih edilen AX-12A servo motorları gövdeleri uzuvlarına dahil edilmiştir. Gerçeklenen robot kolunda bir eklemlilik için gerekli olan tork bir adet AX-12A motor tarafından karşılanamadığından iki adet AX-12A motor kullanılmıştır. Yazılımsal olarak da bu motorların eş zamanlı ve aynı açı değerleri ile çalışması sağlanmıştır.



Şekil 3.2. Robot kol.

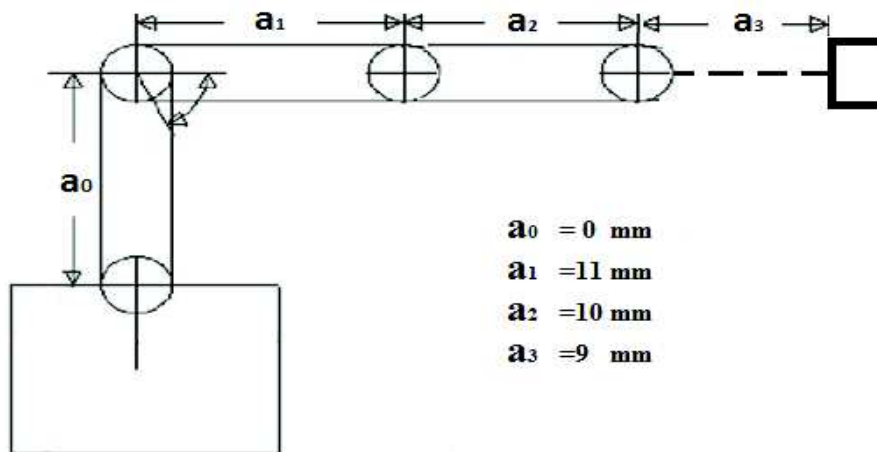
Robot kolunun eklemlerinin üç tanesi menteşe işlevi yapmaktadır. Buna karşı bir eklemler ekseninde dönme hareketi yapmaktadır. Son eklemler ise tutma işlevini yerine getirmektedir. Bu robot kolu dikey mafsallı bir robot yapıya sahiptir.

Robot kolun beş işlevsel eklemleri sırasıyla taban, omuz, dirsek, bilek ve tutadır. Robot kolunun koordinat sistemi Şekil 3.3.'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Robot kolun yerel koordinat sistemi.

Robot kolun eklemleri arasındaki uzaklık değerleri Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Beş eklemlili robot kolunun eklemler uzaklık değerleri.

Robot kolun her bir ekleminin mekanik sınırlarından kaynaklı, en büyük ve en küçük açı değerleri, Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Eklemlerin limitleri (çalışma aralıkları)

EKLEM	EN KÜÇÜK	EN BÜYÜK
TABAN	0	180
OMUZ	-120	170
DİRSEK	-120	170
BİLEK	-120	170
TUTAÇ	0	150

3.3. Kinematik Denklemler

3.3.1. Robot kolun ileri kinematik analizi

Bu çalışma kapsamında insan koluna çok yakın olan standart mafsallı beş eksenli robot kol için ileri kinematik çözüm kümesine ulaşılmıştır. D-H parametre yöntemine göre eklemlere referans çerçeveleri atanmıştır. Her bir eklemin yerel koordinatlarından önceki bölümlerde anlatılan D-H parametre tablosu oluşturma yöntemi kullanılarak çıkarılmıştır. Tablo 3.2. 'de bu parametreler görülmektedir.

Tablo 3.2. Robot kolun D-H parametre tablosu

Eklem	θ_i Derece	d_i mm	a_i mm	α_i Derece
1	θ_1	0	0	90
2	θ_2	0	a_1	0
3	θ_3	0	a_2	0
4	θ_4	0	a_3	0

D-H parametre tablosundan yararlanılarak robot kolun her bir eklemine temsil eden dönüşüm matrisleri elde edilir. Birbirini izleyen her bir eklem için dönüşüm işlemi, Tablo 3.2.'de ki parametre değerlerinin A_n ($n=1.....4$) matrislerine yerleştirilmesi ile elde edilir. Örnek olarak A_1 0 ve 1. çerçeveler arasında ilişkiyi temsil eder (Sin 90= 1; cos 90 =0, alfa = 90 derece, C1 de $\cos \theta_1$ 'i temsil eder) . A_1 'den A_4 'e bu işlemler yapılır. Her bir eklem matris karşılığı ve toplam dönüşüm matrisi sırasıyla (3.1) – (3.6) 'da görülmektedir.

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & c_2 a_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & s_2 a_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & c_3 a_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & s_3 a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & c_4 a_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & s_4 a_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$T_0^4 = A_1 A_2 A_3 A_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$C_i = \cos \theta_i$ $S_i = \sin \theta_i$ alınarak 4 matrisin çarpımı sonucunda (3.5) görülen matris göre formül (3.6)'dan p_x koordinatı, formül (3.7)'den p_y koordinatı ve formül (3.8)'den p_z koordinatı elde edilmiş olur.

$$p_x = (c_1 c_2)(c_3 c_4 a_4 - s_3 s_4 a_4 + c_3 a_3) - (s_2 c_1)(s_3 c_4 a_4 + c_3 s_4 a_4 + s_3 a_3) + c_1 c_2 a_2 \quad (3.6)$$

$$p_y = (s_1 c_2)(c_3 c_4 a_4 - s_3 s_4 a_4 + c_3 a_3) - (s_2 s_1)(s_3 c_4 a_4 + c_3 s_4 a_4 + s_3 a_3) + s_1 c_2 a_2 \quad (3.7)$$

$$p_z = s_2(c_3 c_4 a_4 - s_3 s_4 a_4 + c_3 a_3) + c_2(s_3 c_4 a_4 + c_3 s_4 a_4 + s_3 a_3) + s_2 a_2 \quad (3.8)$$

3.3.2. Robot kolun ters kinematik çözümü

Serbestlik derecesi üçten fazla olan ($\text{DOF} > 3$) robot kolu konfigürasyonların da birden çok çözüm kümesinin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Çalışmamızda kullanılan robot kolunun serbestlik derecesi üçten fazla olduğundan dolayı birden çok çözüm kümesine sahiptir. Bu sebepten çözüm kümesinin indirgenmesi için değişik tekniklerin kullanılması ve kısıtlamaların uygulanması gerekmektedir.

Gerçek zamanlı kontrol uygulamaları gerçekleştirilirken robot kollarına ait ters kinematik problemin kesin çözümü olması tercih edilir. Kesin çözüm, problemin analitik olarak çözülmesiyle elde edilir. Çoğunlukla analitik çözüm, birbirini takip eden üç eksen bir noktada kesiştiğinde (Euler bileği) veya paralel olduğunda gerçekleştirilebilir. Genellikle endüstriyel robotlar analitik çözüm gerçekleştirilecek şekilde tasarlanırlar bu da her koşulda Euler bileğinin kullanılmasıyla mümkündür. Bu çalışmada da Euler bileğinden yararlanılmıştır.

Euler bilekli robotlarda bilek merkezinin konumunu bulma Denklem (3.9)'da görüldüğü gibi kolaylıkla bulunabilir.

$$p_4 = p_6 - d_6 a_6 \quad (3.9)$$

Denklemde, P_4 ilk dört dönüşüm matrisinin çarpılmasıyla elde edilen matrisin 4. kolonudur. p_6 ana koordinat sistemine göre uç işlevcinin konumu, yani 0_6T homojen dönüşüm matrisinin 4. Kolonudur. a_6 ise yine aynı matrisin 3. Kolondur. d_6 ise robota ait bir D-H değişkenidir. Bu bileğin yerleştirildiği beş serbestlik derecesine sahip bir robotun ilk önce ilk üç eklemi, sonrada geri kalan son iki eklemi analitik olarak kolayca çözülür.

Uç noktasının ileri kinematik denklemleri homojen dönüşüm matrislerinin seri bir şekilde çarpılması ile eşitlik (3.5)'ten elde edilmiştir. Elde edilen eşitlik aşağıda tekrar yazılmıştır.

$$T_0^4 = A_1 A_2 A_3 A_4 \quad (3.10)$$

A_1 matrisinin tersi alınarak ters kinematik analizine başlanır. Bulduğumuz A_1^{-1} matrisi ile 1'den 4'e kadar bulduğumuz dönüşüm matrisi çarpılır ve toplam dönüşüm matrisini A_1 matrisinin tersinin çarpımına eşitlenir. Daha sonra matris elemanları eşitliğinden açı değerleri bulunur.

$$A_1^{-1} T_0^4 = \underbrace{A_1^{-1} A_1 A_2 A_3 A_4}_{I_4} \quad (3.11)$$

$$\theta_1 = \arctan 2(p_x / p_y) \quad (3.12)$$

$$c3 = (x^2 + y^2 + z^2 - a2^2 - a3^2) / (2 * a2 * a3) \quad (3.13)$$

$$s3 = -\sqrt{(1 - c3^2)} \quad (3.14)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(s3, c3) \quad (3.15)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}((a2 + a3 * c3) * z - a3 * s3 * \sqrt{(x^2 + y^2)}, (a2 + a3 * c3) * \sqrt{(x^2 + y^2)} + a3 * s3 * z) \quad (3.16)$$

$$\text{Tinv01} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\text{Tinv12} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a2*\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a2*\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\text{Tinv23} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a3*\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & a3*\sin\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\text{dk} = \begin{bmatrix} 0,7071 & 0 & 0,7071 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ -0,7071 & 0 & 0,7071 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\text{Tinv34} = \text{Tinv23}'.\text{Tinv12}'.\text{Tinv01}'.\text{dk} \quad (3.21)$$

$$Q_4 = \text{atan2}(\text{Tinv34}(2,1), \text{Tinv34}(1,1)) \quad (3.22)$$

Formül (3.12)'den θ_1 açısı, (3.16) 'dan θ_2 açısı, (3.15)'den θ_3 açısı ve (3.22)'den θ_4 açısı elde edilmiş olur. θ_5 açısı ise gripper temsil eder ve matematiksel denklemde dikkate alınmaz.

3.3. Motor Seçimi

Servo motorlar, içerisinde kontrolörü bulunan hız ve konum kontrolü yapabilen motorlardır. Servo motorlar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Farklı alanlarda kullanılmasının sebepleri:

1. Yüksek tork
2. Doğru konumlama
3. Kolay kurulum
4. Kontrol kolaylığı
5. Ekonomik oluşu
6. Güvenilir oluşu

Servo motorlar, diğer motorlara göre 1 devir/dakikalık hız bölgelerinin altında kararlı çalışabilen, moment ve hız kontrolü yapan akıllı motorlardan oluşmaktadır. Hassasiyetin yanında tork, hız ve sağlamlık servo motorların seçilmesinde etkili olmuştur. Tasarlanan sistemin mekanik uyum göz önünde tutulduğunda performans ve kaliteyi artırmamıza da servo motorlar etken olmuştur. Planlanan sistemde kullanılacak yazılımlar ile servo motorlar uyum içinde çalışmaktadır.

Bu çalışmada Robotis marka Dynmixel AX-12A modelinde bir servo motor tercih edilmiştir.

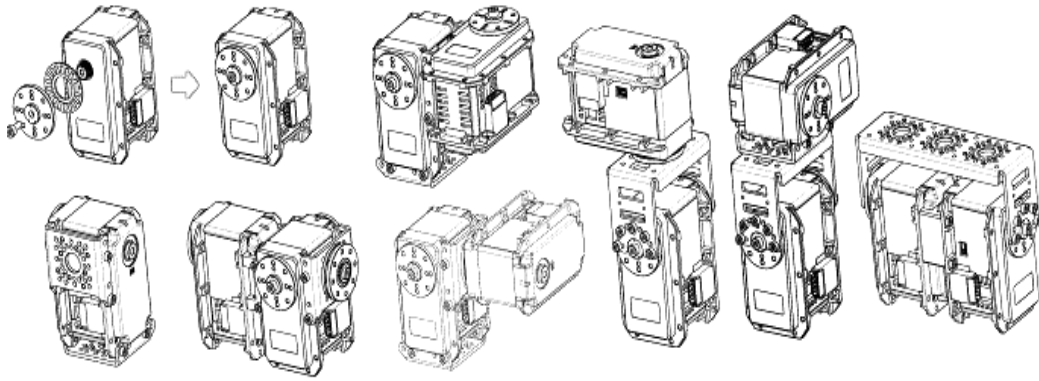
Özellikleri;

- a. Ağırlık: 54.6 gr.

- b. Boyut: 32mm X 50mm X 40mm
- c. Hassasiyet: 0.29 derece
- d. Tork: 1.5 N.m (12V, 1.5A)
- e. Dönme açısı: 0-300 derece
- f. Voltaj: 9-12 V

AX-12A motor 300 derece hareket kabiliyetini 10 bitlik enkoder ile 1024 (2^{10}) adımda ölçerek kontrol etmektedir.

$300 \text{ derece} / 1023 \text{ adım} = 0.29 \text{ derece/adım}$ hassasiyetindedir. Yani 1 adımda 0.29 derece hareket etmektedir. AX serisi servo motorlar hakkında özet bilgi Şekil 3.5.'te verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan AX-12A'nın görünümü ve montaj şekilleri Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'de yer almaktadır.

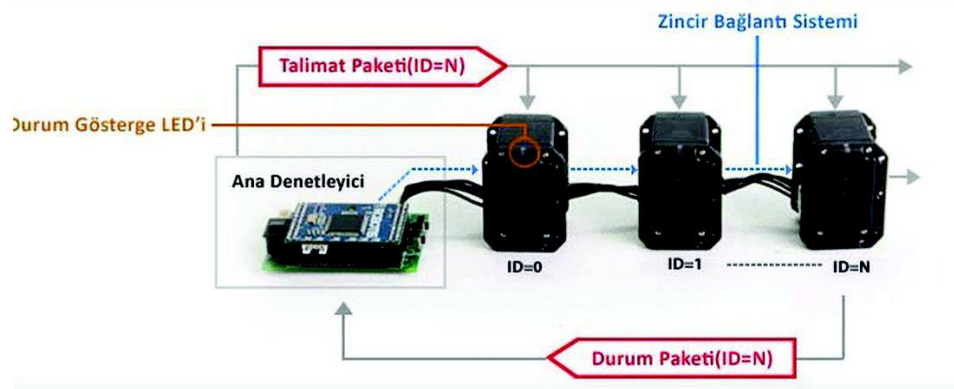


Şekil 3.7. Servo motorların plastik braketler ile farklı montaj şekilleri.

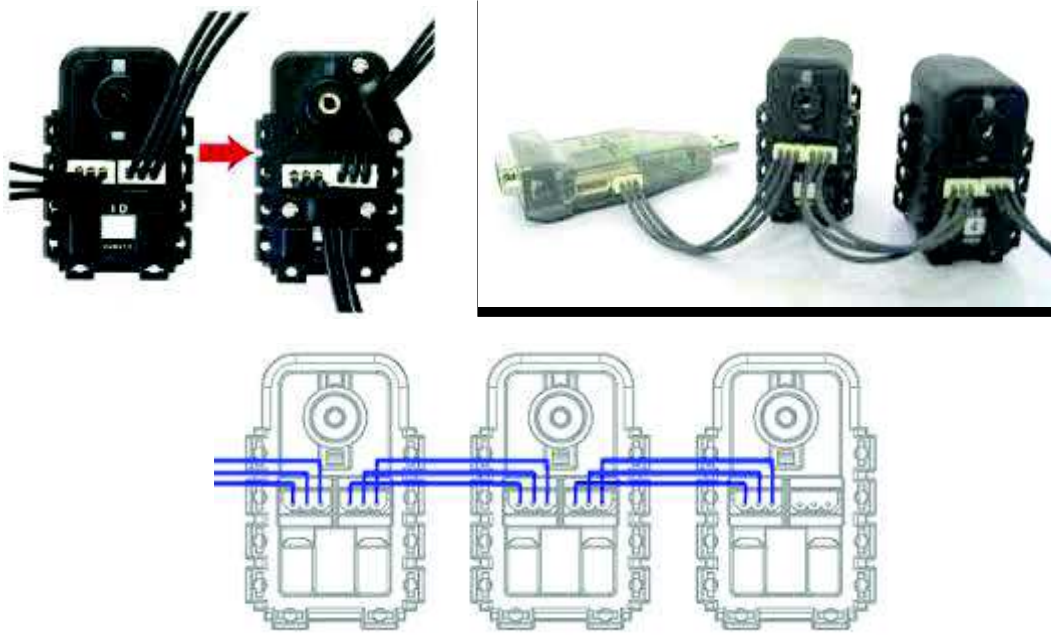
Dynamixel motorlar ağ tabanlı kontrol özelliğine sahiptir. Kendilerine has özel kimlik numaraları (ID) olan Dynamixel'ler "Bus Port" üzerinden paket haberleşmeyle kontrol edilir. Modellerine göre TTL, RS 485 ve benzeri standartları desteklerler.

Zincir bağlantı sistemi (Daisy Chain) ile Dynamixel motorların fiziksel bağlantısı pratik bir şekilde yapılabilir. Şekil 3.8.'de zincir bağlantı sistemi görülmektedir. Şekil 3.9.'da ise servo motorların bağlantı sistemi görülmektedir.

Dynamixel motorlarda durum gösterge fonksiyonları vardır. LED ve Kapatma (Tork-Kapa) fonksiyonları yüksek sıcaklık, aşırı yükleme, aşırı voltaj ve düşük voltaj durumlarına göre ayarlanabilir.



Şekil 3.8. Zincir bağlantı sistemi [35].



Şekil 3.9. Servo motorların bağlantı sistemi.

Kontrolün hareket başlama ve bitiş aşamalarında, uyum kontrol marjı ve eğim kontrol fonksiyonları bulunmaktadır.

Ayrıca Dynamixel motorlarda PID Kazanç (Gain) Kontrol, Oranlı Kazanç (Gain), Türev Kazanç (Gain) kullanmaktadır. Bu değerler otomatik veya kullanıcı kontrollü olarak belirlenebilmektedir.

Tork sınırları 1024 adımda, maksimum torktan serbest dönüş kadar sınırlandırılabilir.

Benzer motorlara göre daha yüksek gerilim kullanması ve dolayısıyla daha az akım ihtiyacı bulunmaktadır. Bu nedenle daha verimli ve kararlı çalışmaktadır. Kullanıldıkları robotik sistemlerini başarımını artırmaktadır.

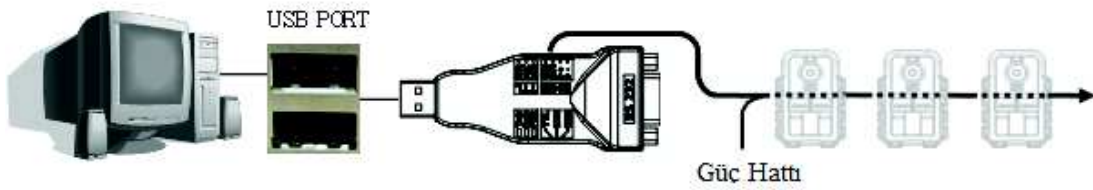
3.5. Ara Birim Kartı

USB2Dynamixel bilgisayar'dan doğrudan dynamixel motorları çalıştırmak için kullanılan bir cihazdır. USB2Dynamixel bilgisayarın USB portuna bağlanır ve çeşitli Dynamixel bağlantıları için 3P ve 4P konnektörleri kullanılır. Şekil 3.10'da

USB2Dynamixel görülmektedir. Şekil 3.11.'de ise Usb2Dynamixel'in PC'ye USB portundan bağlantı şekli görülmektedir.



Şekil 3.10. USB2Dynamixel [36].



Şekil 3.11. Usb2Dynamixel bağlantı şekli [36].

Bu kontrol kartı motorlarla 3 değişik şekilde bağlantısı yapılabilir. Bunlar serial connector, 4P connector, 3P connector dır. Şekil 3.12.'de Usb2Dynamixel haberleşme portları gösterilmektedir. Usb2Dynamixel içerisinde USB'den half duplex seri haberleşme (RS232 ve RS485) dönüştürücüsü yer almaktadır.



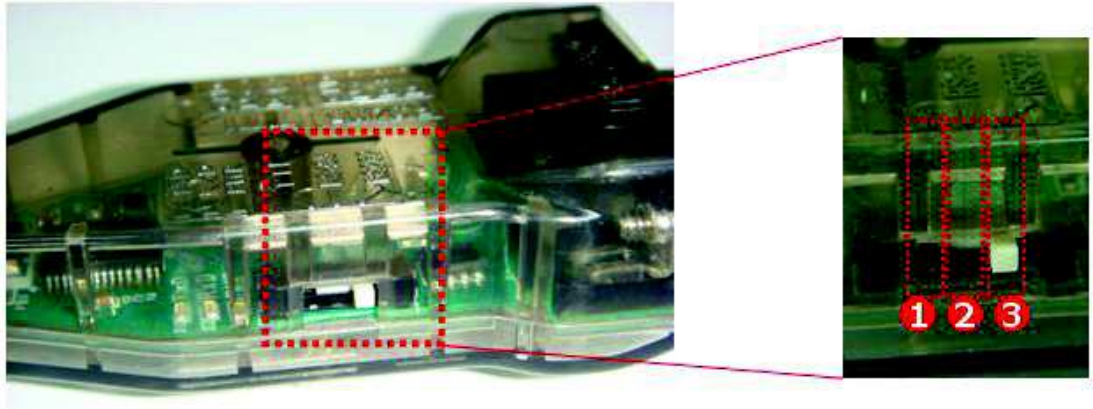
Şekil 3.12. Usb2Dynamixel haberleşme portları [36].

Yapılan çalışmada 3P connector kısmı kullanılmıştır. Bu kısımda artı (+), eksi (-) ve sinyal çıkışları bulunmaktadır. Şekil 3.13.'de Usb2Dynamixel fonksiyon seçeneği görülmektedir.



Şekil 3.13. Usb2Dynamixel fonksiyon seçeneği kullanımı [36].

USB2Dynamixel’de bulunan haberleşme fonksiyonlarından hangisini kullanacağımızı 3’lü switch aracılığı ile seçim gerçekleştirilir. Status Display LED ise gücün var olduğunu ve TXD (Data writing), RXD (Data reading) durumlarını gösterir. Şekil 3.14.’de haberleşme şekilleri görülmektedir.

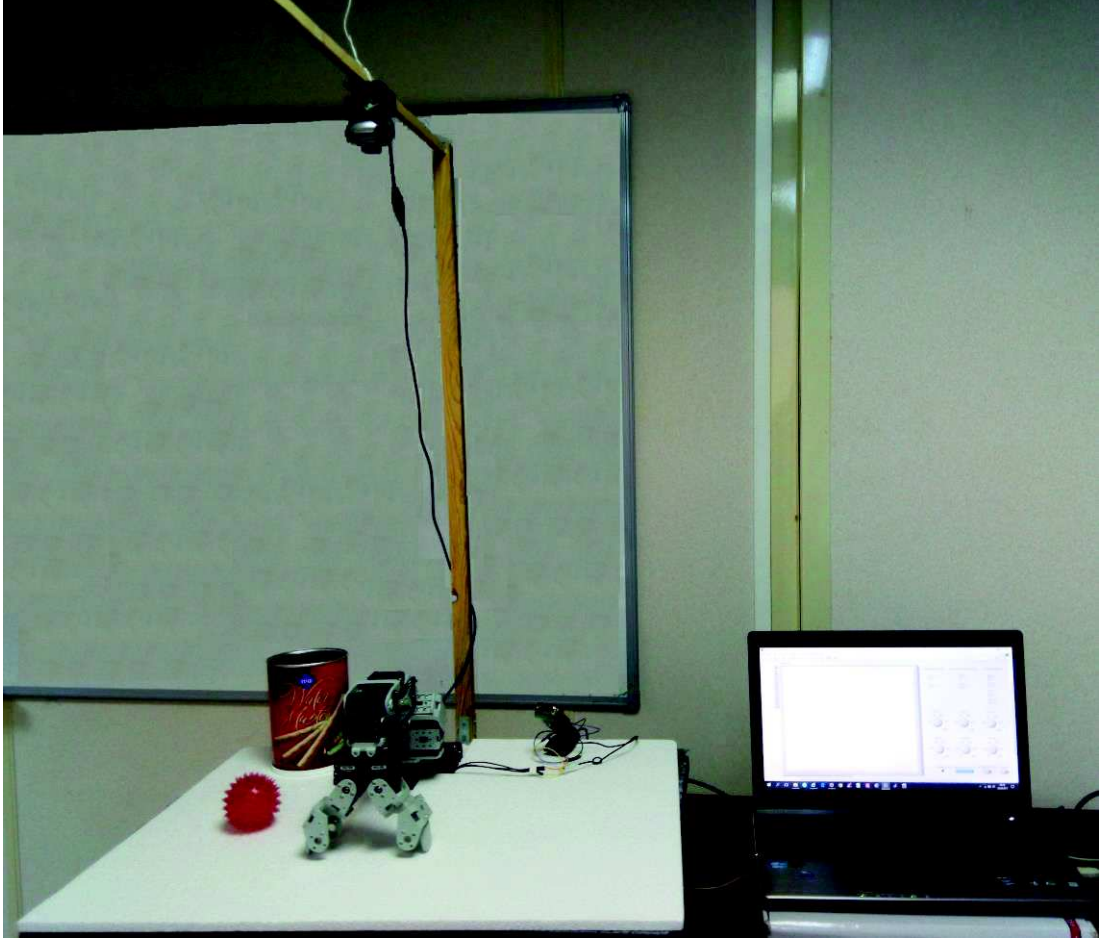


Şekil 3.14. Haberleşme şekilleri [36].

1. TTL communication: AX serisi motorlar gibi 3 pinli bağlantıyı kullanmak için seçilir.
2. RS485 communication: DX serisi motorlar gibi 4 pinli bağlantıyı kullanmak için seçilir.
3. RS232 communication: CM-5,CM-510 gibi bir seri kablo kullanarak kontrol edilenler için kullanılır.

Yapılan çalışmada AX-12A motorları ile uyumlu olması için TTL iletişim şekli kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.15.'de görülmektedir. Deney düzeneğinde robot kolu ve üzerine sabitlenmiş kamera bulunmaktadır. Ayrıca algoritmanın işletileceği bilgisayar ve bu verileri robot kolundaki 7 adet AX-12A motorlara aktaracak USB2Dynamixel kartı görülmektedir. Deneyler sırasında kullanılan test cismi de görselde görülmektedir.



Şekil 3.15. Deney düzeneği.

BÖLÜM 4. YAZILIMLARIN GERÇEKLENMESİ

4.1. Labview Programı

Labview, Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench kelimelerinin kısaltılmasından elde edilen bir isimdir ve bir programlama ortamını tanımlar. Bu programda, içinden veri akan hatlar yardımıyla fonksiyonel noktaları birbirine bağlayarak bir grafik gösterim üzerinden programlama yapılmaktadır. Labview; C, C++ veya Java gibi geleneksel dillerden farklıdır. Bu dillerde programı metin yazarak yapılmaktadır, fakat Labview’de görsel olarak veri akış programcılığı tekniği kullanılmaktadır. Labview, işlerinin bir parçası olarak bir programa ihtiyaç duyan bilim insanları ve mühendisler için tasarlanmış, interaktif bir program geliştirme ve uygulama sistemidir. Labview çok güçlü bir programlama dili kullanır ve birçok Labview kullanıcısı onu “G” (Graphical’den gelmektedir.) olarak isimlendirir. Geleneksel programlama dilleri ile haftalar veya aylar içerisinde yazılabilecek olan programlar, Labview kullanılarak saatler içerisinde tamamlanabilmektedir. Çünkü Labview, verileri analiz etmek, ölçümlerini almak ve sonuçlarını kullanıcıya sunmak için özel olarak geliştirilmiştir. Labview ayrıca gelişmiş bir grafiksel kullanıcı ara yüzüne sahiptir. Labview; özellikle dış ekipmanlar ile bağlantı kurmak veri işlemek ve işlenen verileri bilgisayara bağlı donanımlar ile çeşitli şekillerde göndermek için kullanılabilir.

Labview, programlama işleriniz esnasında size yardımcı olabilecek ve hafıza işgal etmeden kullanabileceğiniz çok geniş bir fonksiyon ve alt program kütüphanelerine sahiptir. Labview, Data Acquisition (DAQ) ve General Purpose Interface Bus (GPIB) için kod kütüphaneleri gibi spesifik kütüphane uygulamalarını ve seri aygıt kontrolü, veri analizi, veri sunumu, veri depolama ve internet üzerinden haberleşme gibi farklı

uygulamalarını içermektedir. Analiz kütüphanesi; sinyal üretme, sinyal işleme filtreleri, Windows istatistikleri ve regresyonları, lineer cebir ve array aritmetiği gibi çok yönlü ve kullanışlı fonksiyonları bünyesinde barındırmaktadır.

1986 yılından bugüne kadar her türlü platformda kullanılabilir hale gelen Labview kendi içerisinde çok büyük bir içeriğe sahiptir. Endüstride çok büyük alanlara hükmetmektedir. Mühendislik, İstatistik, Kimya, Fizik vb. alanlarda verinin kullanılabilmesi her alanda çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Test ölçme ve kontrol sistemlerinin vazgeçilmezi olmayı hedefleyen Labview, National Instrument bünyesinde geliştirilen veri toplama kartları, modüler enstrümantasyon sistemleri, kompakt kartlar ile dünya piyasasında önemli yer edinmiştir. 2011 yılında multisim programını da bünyesine katan National Instruments sanal enstrümantasyon uygulamalarını devre simülasyon programlarında da kullanılabilir hale getirmektedir.

Labview ekranı front panel ve block diagram olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Sırası ile bu iki kısım blok diyagram ve ön panel olarak adlandırılır. Blok diyagram görsel programlama dillerinde kod yazma bölümüne, ön panel ise kullanıcı ara yüzünün hazırlandığı formlara karşılık gelmektedir. Ön panelde ve blok diyagramda kullanılan iki önemli araç paleti vardır. Ön panelde kullanılan palete “kontrol paleti”, blok diyagramda kullanılan palete ise “fonksiyon paleti” adı verilmiştir.

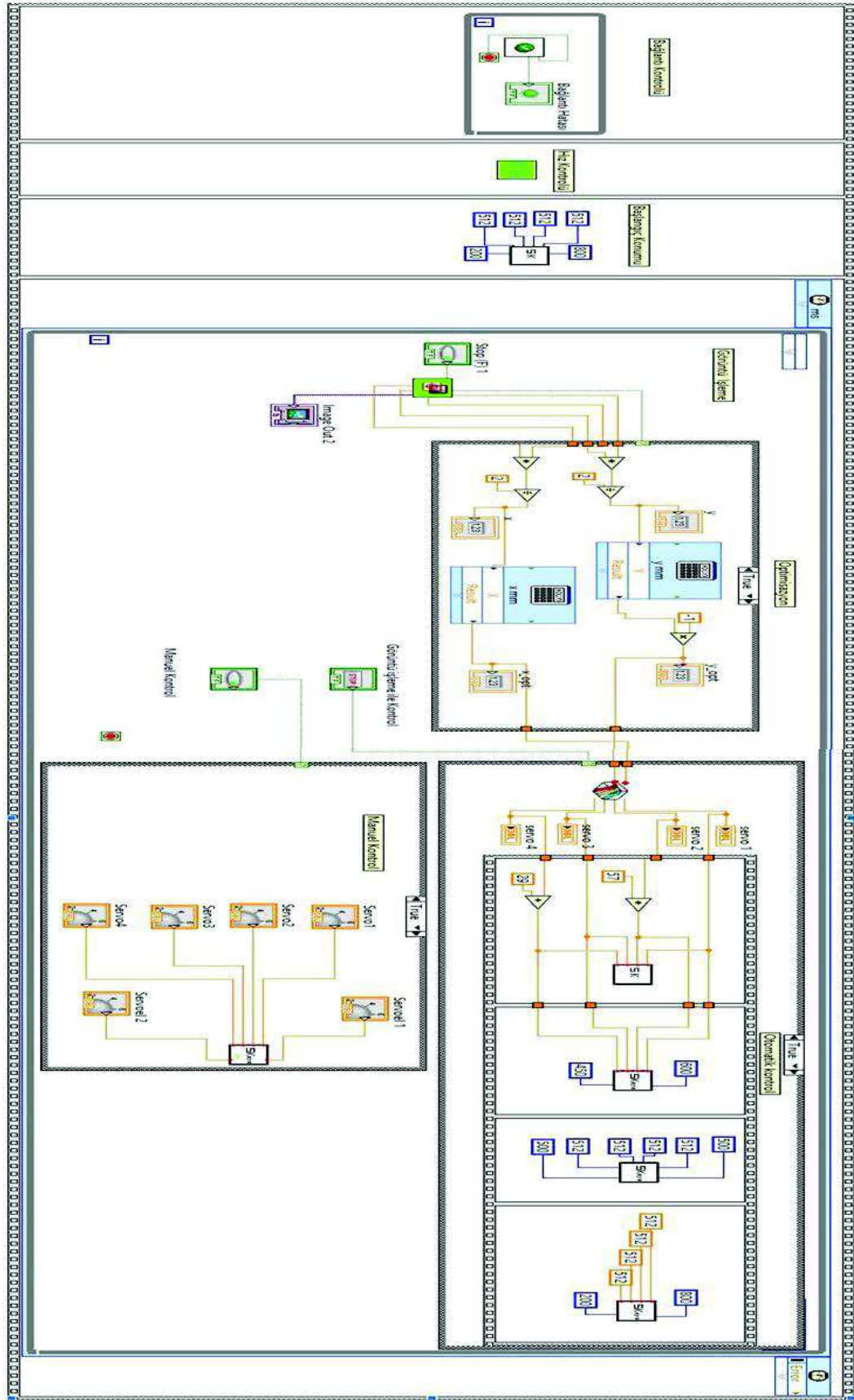
Labview’in kullanıldığı işlemlerden bazıları:

- a. Kap atışını simüle etme
- b. Dondurma yapım sürecini kontrol etme
- c. Uzay mekiğinde hidrojen gazı sızıntısını belirleme
- d. Bebek deve kuşlarının beslenme alışkanlıklarının izleme
- e. Güç kalitesini analiz etmek için güç sistemlerini modelleme
- f. Laboratuvar farelerinde deneyin fiziksel etkilerini ölçme

- g. Servo ve step motor hareketini kontrol etme
- h. Bilgisayarlardaki ve diğer elektronik cihazlardaki devre kartlarını test etme
- i. Sanal gerçeklik sistemlerinde hareketi simüle etme
- j. Helyum doldurulmuş bir zeplini web üzerinden uzaktan kontrol etme
- k. TPS raporunuz için otomatik olarak kapak sayfası oluşturma

Labview'in sunduğu bir özellik de önceden çalışılan projeleri yeni bir proje içine dâhil edebilmesidir. Labview'de yazılan her program başka bir programda alt program olarak çağrılabilir. Bu sayede ölçeklenebilir ve modüler yazılımlar ortaya çıkarılabilir.

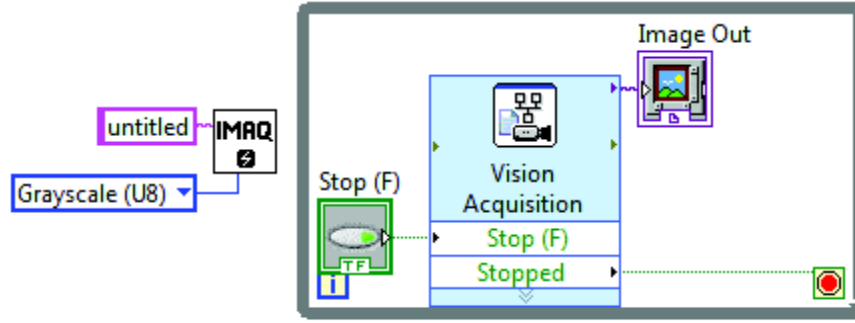
Bu çalışmada yazılan Labview kodunun genel görüntüsü Şekil 4.1'de görülmektedir.



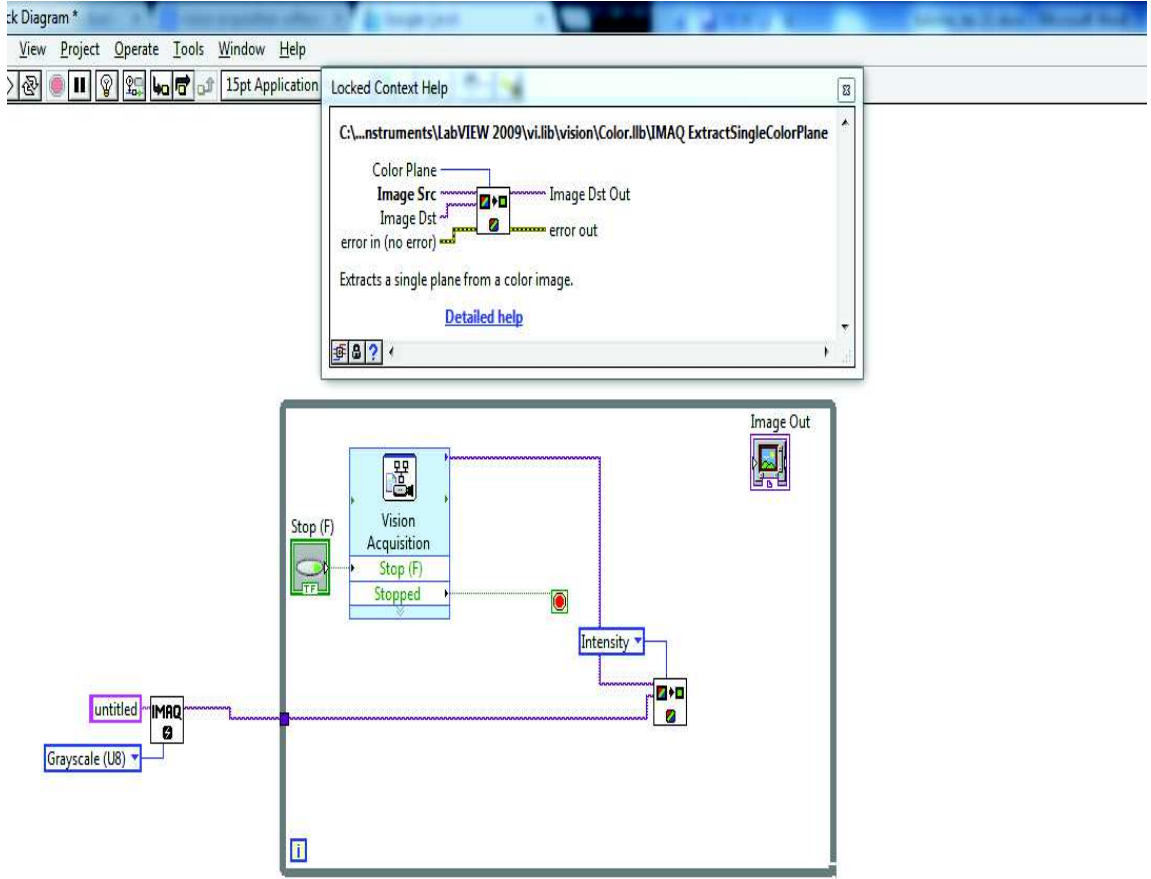
Şekil 4.1. Yazılan Labview kodunun genel görüntüsü.

4.2. Görüntü İşleme

Vision acquisition software eklentisi ile Labview programında PC'ye bağlı kameradan görüntü gerçek zamanlı olarak alınabilir. Şekil 4.2.'de Labview programının görüntü alma kısmı görülmektedir. Yapılan çalışmada görüntü işleme hızını artırmak için resimler siyah beyaz olarak alınmıştır. Labview imaq extract color plane ile kameradan gelen görüntü gri tonlamalara çevrilir. Şekil 4.3.'te Labview imaq extract color plane'nin blok diyagramı görülmektedir. Vision acquisition asistanı ile usb kameradan bir döngü içerisinde görüntü sürekli tazelenerek ekrana aktarılmaktadır.



Şekil 4.2. Labview'de görüntü alma programı.



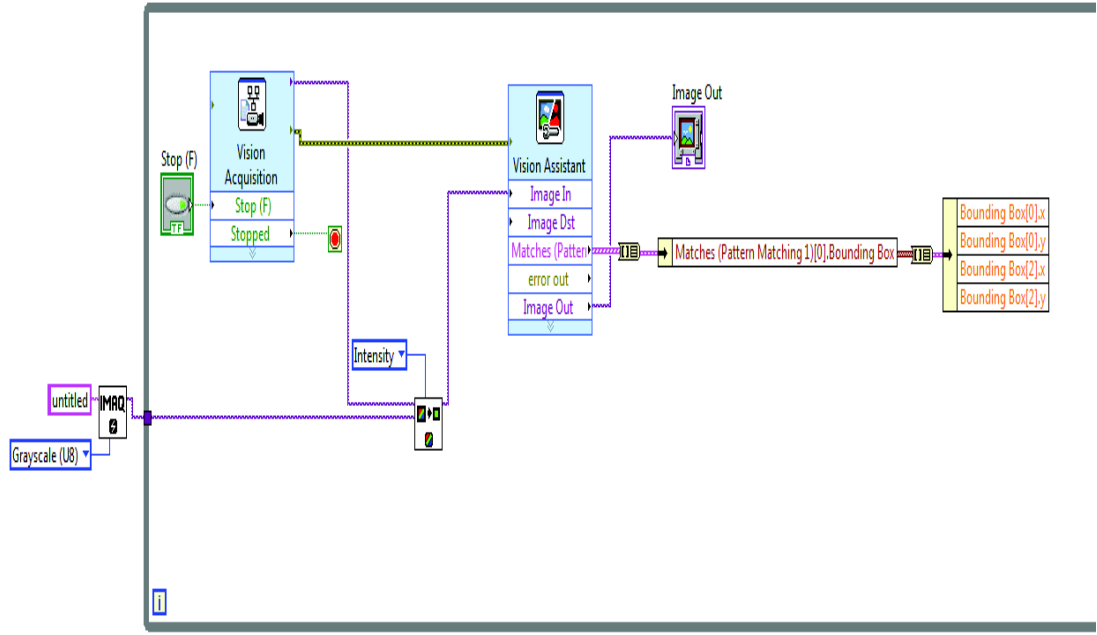
Şekil 4.3. Labview imaq extractcolorplane'nin blok diyagramı.

Labview'de görüntü işlemeyi yapabilmek için vision development module driverına ihtiyaç duyulmaktadır. Vision development module kurduktan sonra Labview'de de vision assistant aktif olacaktır. Labview programında gerekli driverlar kurulduktan ve program elemanlarının bağlantıları yapıldıktan sonra görüntü işleme ile konumu belirlenecek cismin programa tanıtılması gerekmektedir. Labview programı çalıştırılarak usb kameranın görüş açısı içerisinde resim çekilir. Çekilen resim kaydedildikten sonra vision assistant içerisinde koordinatı öğrenilmek istenen cisim dörtgen, yuvarlak veya isteğe göre seçilebilmektedir. Biz çalışmamızda dörtgen şeklinde cismimizi seçmeyi tercih ettik. Seçme işlemi yapıldıktan sonra cismin programa tanıtılma işlemi tamamlanmış olur. Şekil 4.4.'te Labview'de yakalanacak görüntünün seçilmesi görülmektedir.



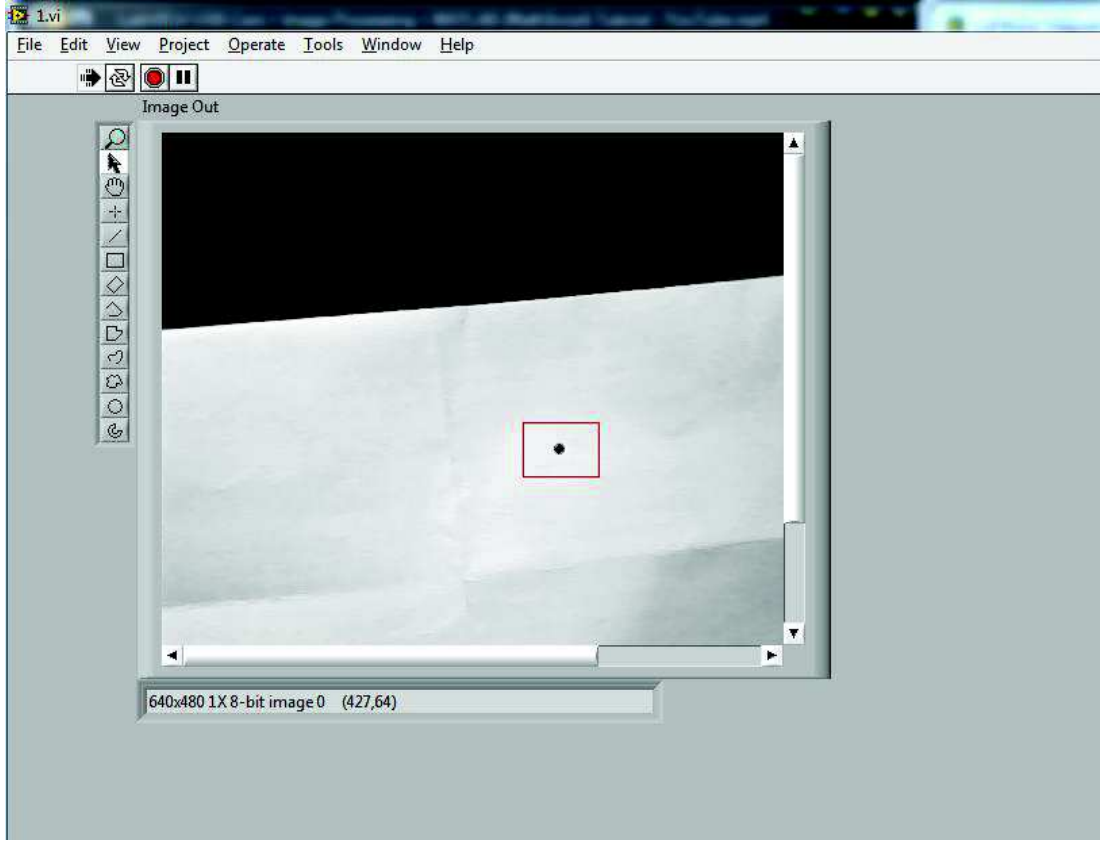
Şekil 4.4. Labview’de yakalanacak görüntünün seçilmesi.

Görüntü işlemekten gelen görüntü koordinatlarını dizilere çevirmemiz gerekmektedir. Bunun için vision assistant’ın matches(pattern matching) ucuna programming array to cluster eklenir. Onun ucuna unbundle by name eklenir. Unbundle by namede özelliklerinden bounding box’ı seçip sınırlayıcı olmasını sağlar. Unbundle by name ucunada array to cluster eklenir ve onun ucunada yeniden unbundle by name eklenir. Unbundle by name’yi dörtlü hale getirip sırasıyla sağ tık select itemden x1,y1,x2,y2 şeklinde ayarlanır. Bu işlemden son gerçek zamanlı usb kameradan gelen cismin koordinatları elde edilmiş olur. Şekil 4.5.’te Labview’de yakalanacak görüntüyü seçme block diyagramı görülmektedir.



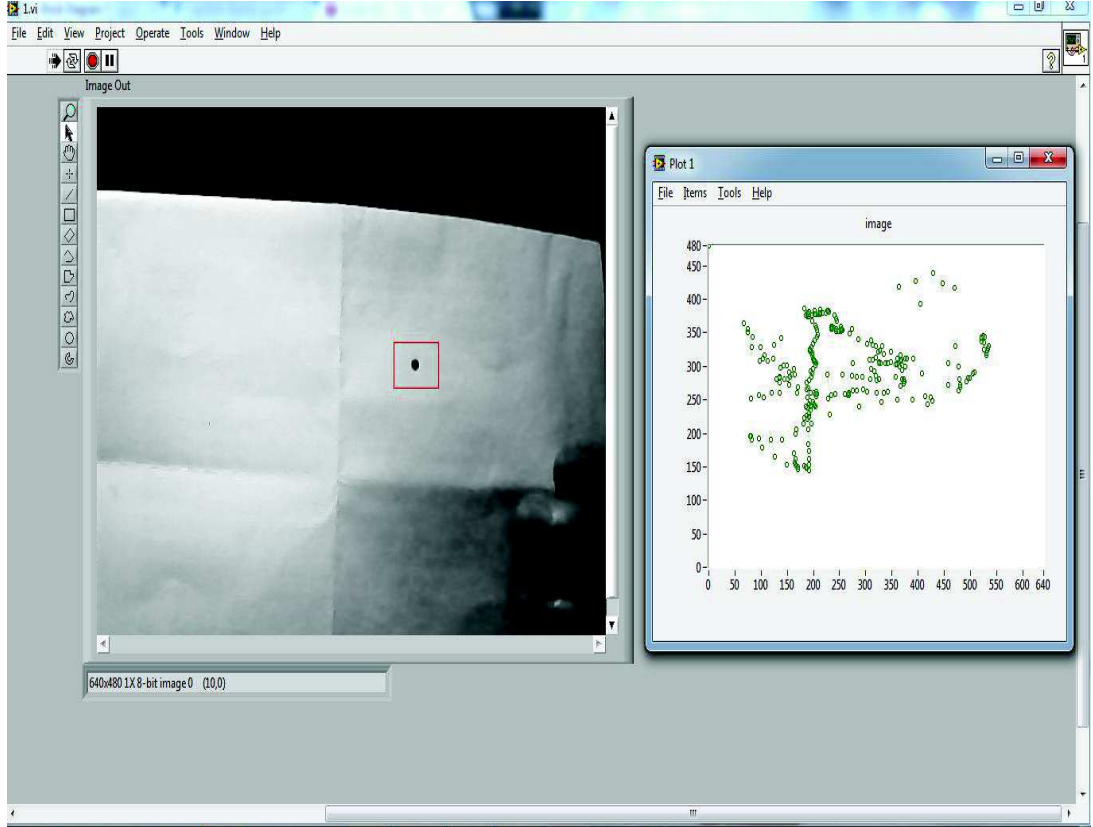
Şekil 4.5. Labview’de yakalanacak görüntüyü seçme block diyagramı.

Yapılan çalışmada cismin tam orta noktasının koordinatı öğrenmek istediğimizden x1, x2 verileri toplanıp ikiye bölünerek x koordinatı bulunur. Aynı şekilde y1, y2 verileri toplanıp ikiye bölünerek y koordinatı elde edilmiş olur. Tüm bu işlemleri yaptıktan sonra artık görüntü yakalama yapılabilir.

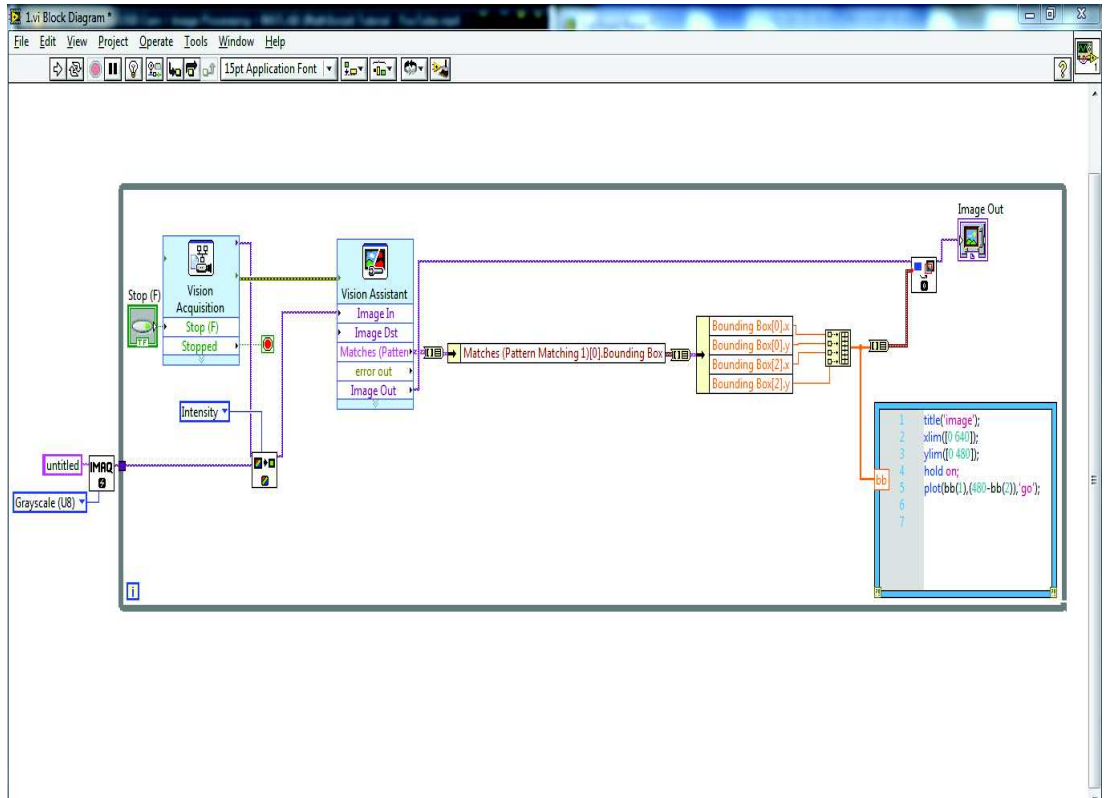


Şekil 4.6. Program çalıştırıldığında front paneldeki görüntüsü.

Yukarıdaki Şekil 4.6’da görüleceği üzere kâğıt üzerinde vision assistant tarafından tanımlanan siyah noktayı yakalanarak x ve y deki koordinatlarını vermektedir. Mathscript ile array formatındaki konumları alınabilmektedir. Ayrıca mathscript ile x ve y deki koordinatlar belirlenir ve plot ile grafik oluşturup hold on ile sürekli değişen konumları kaydedilebilmektedir. Şekil 4.7.’de Programdaki mathscript eklentisi ile obje konum takibi görülmektedir.



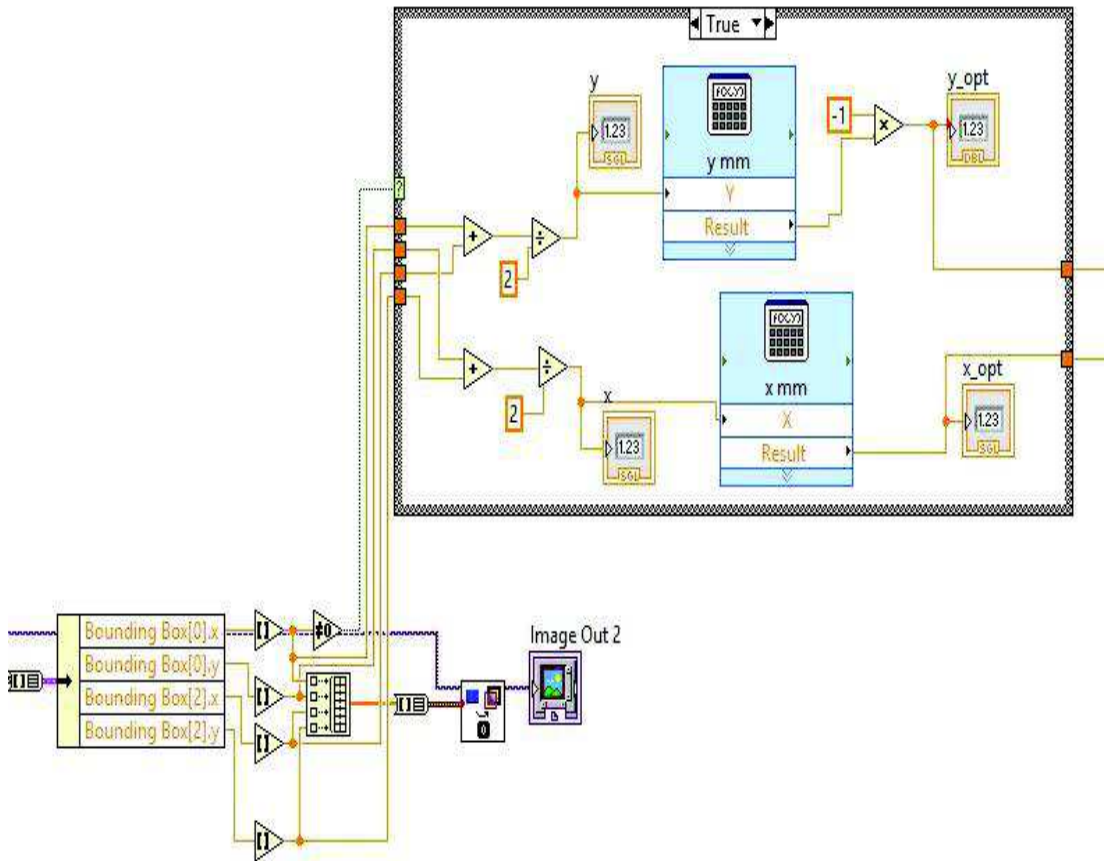
Şekil 4.7. Programdaki mathscript eklentisi ile obje konum takibi.



Şekil 4.8. Görüntü işleme block diyagram programın son hali.

Labview'de yapılan görüntü işleme block diyagram programının son hali Şekil 4.8. deki gibi görülmektedir. Görüntü alma ve görüntüyü işlemenin sürekli olması gerektiği için while döngüsü içinde olmalıdır. Görüntü özellikleriyle ilgili işlem bir kere yapıldığı için döngü dışında yer almaktadır.

Labview programında almış olduğumuz görüntü işlemleri hızlı yapabilmek için $X=640$, $Y=480$ pikselden oluşmaktadır. Ancak robot kinematik denklemlerinde elde etmiş olduğumuz değerlerde P_x , P_y ve P_z milimetre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu değerleri pikselden milimetreye dönüştürmek için kamera görüntü açısı tabla uzaklığı ve konumlandırma dikkate alınarak dönüşüm işlemini yapmak için bir dizi matematiksel işlem yapılmıştır.



Şekil 4.9. Piksel – MM dönüşümü.

Kullandığımız milimetre ölçüleri ise kameranin gördüğü alanın ölçülerek bulunmasından elde edilmiştir. Kameranin gördüğü alanda $X=560$ mm ve $Y=420$ mm'den oluşmaktadır. Şekil 4.9.'da görünen $X1$ ve $X2$ noktaları ile $Y1$ ve $Y2$ noktaları görüntü alma işlemi sırasında objenin kare olarak seçilmiş olmasından dolayı dört köşegenden oluşan değerleri kapsamaktadır. Buradaki değerler toplanıp ikiye bölünmeyle elde edilmiştir. Formül (4.1) ve (4.2)'de görünen X mm ile Y mm yazan kutucuklar Labview programında kullanılan ve dönüşüm formüllerini içeren bloklardır.

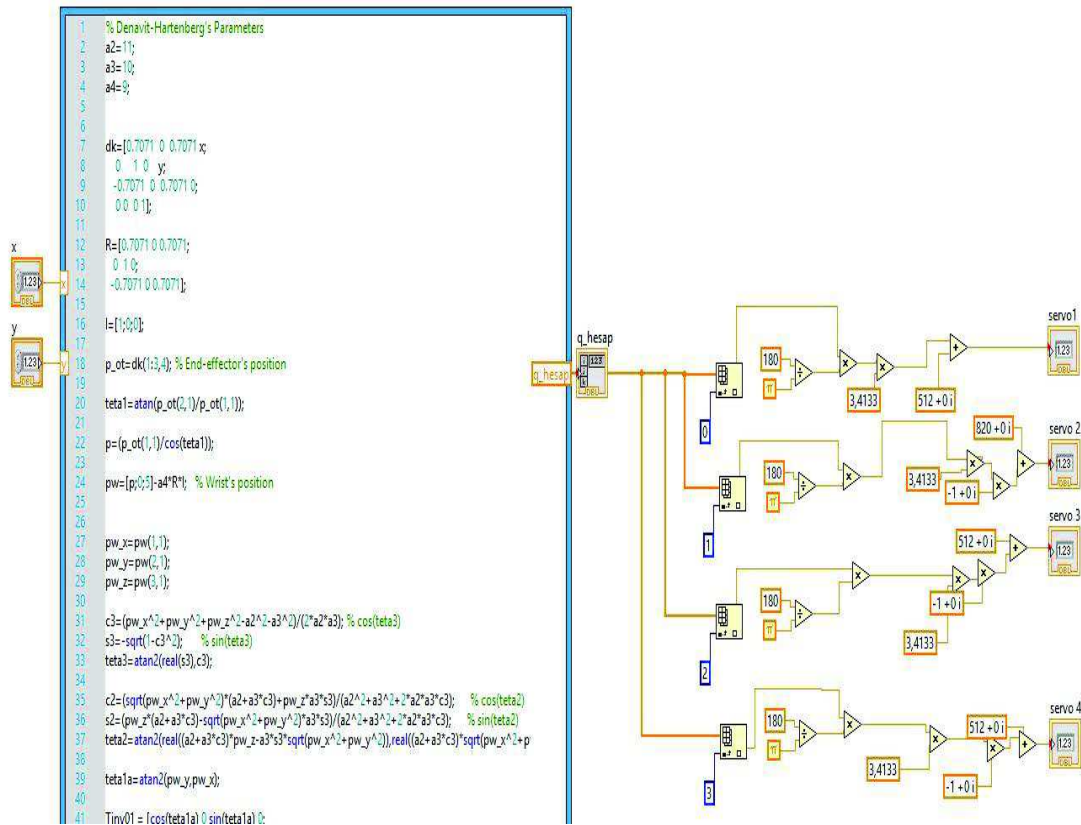
$$((Y.51)/640)-26,5 \quad (4.1)$$

$$38-((X.38)/480)-4 \quad (4.2)$$

4.3. Robot Kolu Ters Kinematik Denklemi

Daha önceki bölümde verilen formül (3.12)'de θ_1 açısı, (3,16) 'da θ_2 açısı, (3.15)'de θ_3 açısı ve (3.22)'de θ_4 açısının daki ters kinematik denklemler kullanılmıştır. Labview görüntü işleme ardından dönüşüm işlemleri ile elde edilen x , y , z koordinat noktaları öncelikle gerekli ötelemeler yapılarak robot temel eksen koordinat düzlemine yerleştirilmiştir.

Sistemimizdeki robot kol hazırlanan bu kontrol programıyla görüntü işlemeden alınan uç işlevcisi koordinatlarına ve bilgisayar ortamında üretilen eklem açılarına göre hareket yeteneği kazanır. Matris işlemlerini daha kolaylıkla yapabilmesi ve denklem çözümü için daha kullanışlı çözümler sunması nedeniyle ters kinematik hesaplar matlab programına yaptırılması tercih edilmiştir. Aşağıda Şekil 4.10.'da kontrol programının kullanıcı ara yüzüne yazılan ters kinematik denklemlerin görünüşü bulunmaktadır.

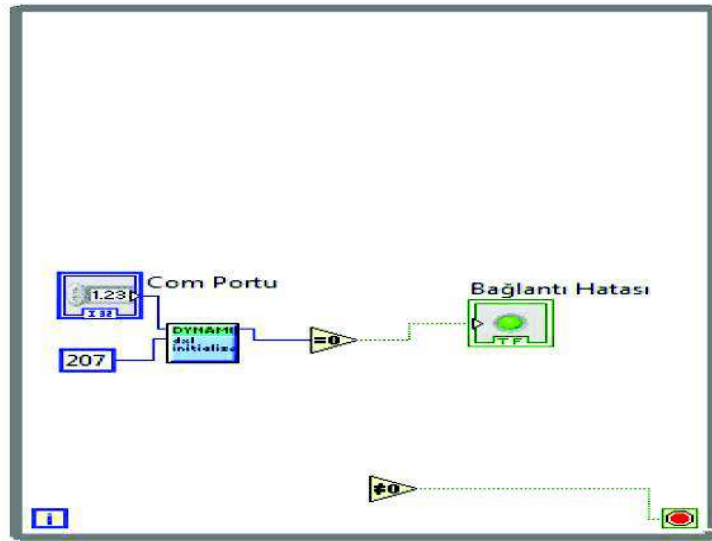


Şekil 4.10. Ters kinematik Labview ara yüzü.

Ters kinematik denklemin hesaplaması için yazılan Matlab kodunun çalışması için MathScript Node kullanılır. MathScript Node verileri gerçek zamanlı olarak Matlab'a göndererek sonuçları Labview'e aktarmasını sağlamaktadır. Labview programında yazılan görüntü işleme kısmından çıkan x ve y verilerinin Matlab koduna veri olarak girişi de sağlanır.

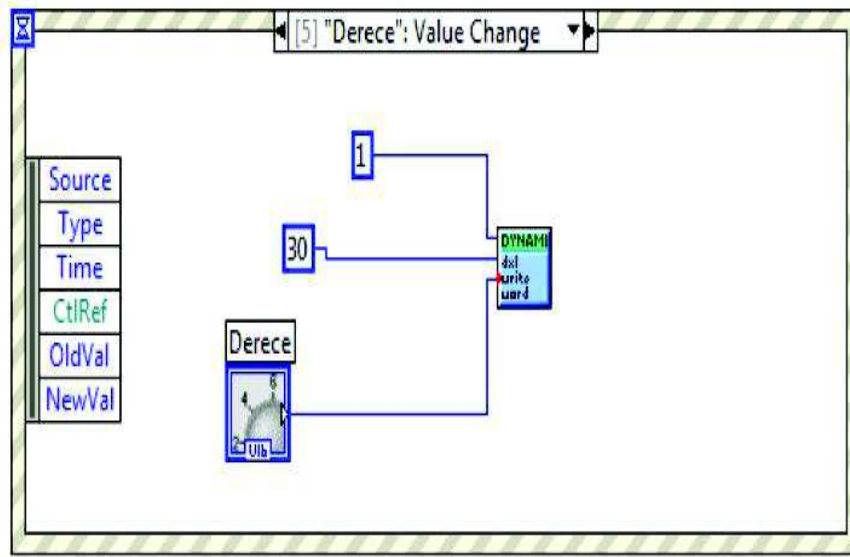
4.4. Servo Motorlar İle Haberleşme

Matlab ortamından elde edilen açı değerlerinin servo motorlara gönderilmesi Labview programlama dili kullanılarak yapılmıştır.



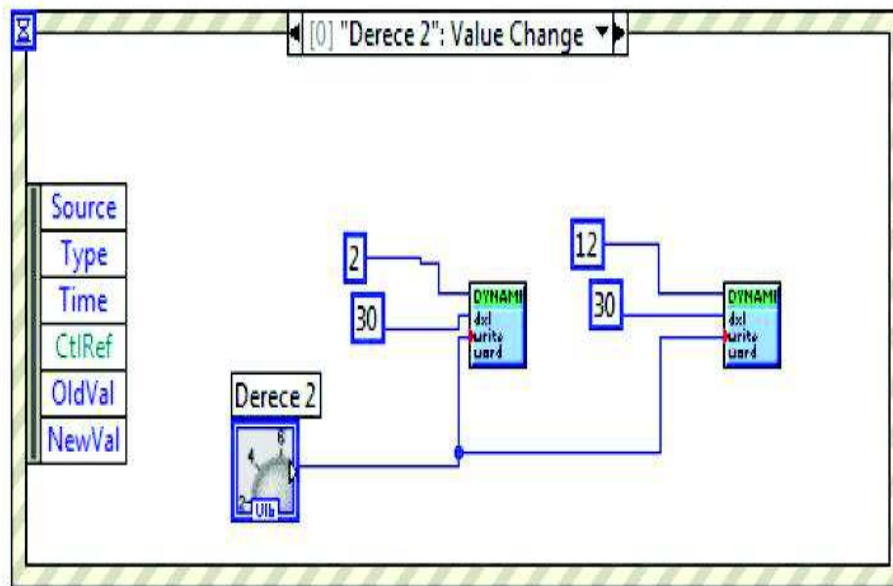
Şekil 4.11. Labview ile Dynamixel servo motorların haberleşmesi.

Şekil 4.11’de görülen dynamixel initialize haberleşmeyi sağlayan Vi’dır. Dynamixel initialize’in devindex ucuna Usb2dynamixel’i hangi porta bağladıysak onu ayarlamak için com portu control butonu yerleştirilmiştir. Baud rate ucuna sistemimizde kullanılan baud rate 207 olduğu için constant ile 207 yazılır. Function return ucundan çıkan değer eğer sıfır olur ise bağlantıda hatası olduğunu göstermek için bağlantı hatası indikatör’ünü koyarak front panelde görünmesi sağlanır. Robot kolunda bulunan yedi adet servo motorun bağlanmasının ardından robot kolunu başlangıç pozisyonuna göndermektedir. Robot kolu dört eksenlidir fakat yedi servo motoruyla çalışmaktadır. Bunun nedeni ise ikinci eksen oluşun fazla yüklenmeden dolayı ikinci eksen motorunun hata vermesini önlemek ve robot kolunun elinin cismi almasını kolaylaştırmak için iki tane servo motorunun kullanmasındandır. Programda her bir motoru tek tek pozisyonlarına göndermek için ise Şekil 4.12.’de Dynamixel Write Word kullanılmaktadır.



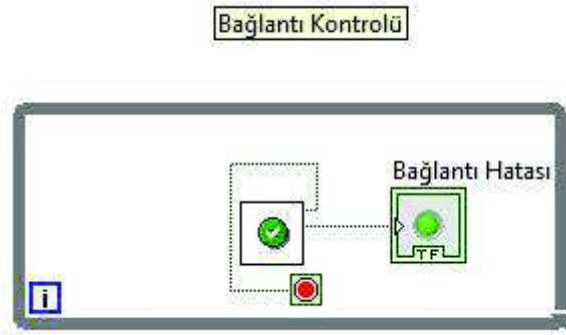
Şekil 4.12. Dynamixel Write Word ile 1. servo motoru açığa gönderme.

Şekil 4.12’de görünen Dynamixel Write Word’te 1 yazan kısım motor ID’lerini tanımlamak için kullanılmaktadır. 30 yazan kısmı ise adresi ifade eder. Derece kontrol butonu ise robotun hedefe ulaşması için her bir servonun gitmesi gereken dereceyi ifade eder. Bu şekilde event structure içerisinde birbirine benzer programlar bulunmaktadır. Örneğin üçüncü servo motor için ID number 3 ve derece 3 kontrol butonu bulunurken adres kısmı yedi servo içinde değeri 30’dur. Fakat ikinci servo da ve robot kolunun elinde iki adet servo motor kullanılmasından dolayı program biraz daha farklıdır. Şekil 4.13.’te ikinci eksene ait program kısmı bulunmaktadır.

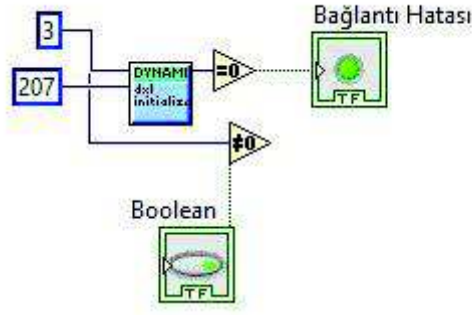


Şekil 4.13. Dynamixel Write Word ile 2. servo motoru açığa gönderme.

İki adet servo olmasından dolayı programdan gelecek değerler 2 ve 12 ID numarasına sahip motorlara paralel bağlanarak gönderilmesi sağlanmıştır. Yapılan çalışmada ilk olarak Şekil 4.14.'de görülen SubVi sayesinde servo motorlar ile bağlantı kontrol edilir. Şekil 4.15.'te bağlantı kontrolünü sağlayan SubVi'nin içeriği görülmektedir. Şekil 4.16.'da robot kolundaki servo motorların hız ayarlarının yapıldığı SubVi görülmektedir. Şekil 4.17.'de servo motorların hız ayarlarının yapıldığı SubVi'nin içeriği görülmektedir. Şekil 4.18.'de robot kolu başlangıç konumuna getiren SubVi görülmektedir. Görüntü işleme aracılığı ile cisimin konumunu belirlediğimiz SubVi ve içeriği Şekil 4.19. ile Şekil 4.20.'de görülmektedir. Gerekli dönüşümlerin yapıldığı SubVi Şekil 4.21'de görülmektedir. Şekil 4.22. ve Şekil 4.23'te ters kinematik denklemler aracılığı ile görüntü işlemeden gelen koordinatlara ulaşmamız için gerekli açı değerlerinin elde edildiği SubVi ve açılımı görülmektedir. Açı değerleri hesaplanarak Şekil 4.24.'teki ara yüzden görüldükten sonra, görüntü işleme butonuna basılarak cisim yakalanabileceği gibi robot kolu manuel olarak da kontrol edilebilir. Görüntü işlemede timed loop döngüsü kullanılmıştır. Timed loop döngüsü ise bir veya daha fazla SubVi veya framerler, belirttiğimiz dönemde döngü sırasıyla her yineleme için yürütülür. Programın SubVi olmasından dolayı bu döngü bizim için en ideali olmuştur. Yazılan programda beş adet SubVi kullanılmıştır. Bunlar bağlantı kontrolü, Hız kontrolü, görüntü işleme, ters kinematik denklemler ve servo kontrolü için oluşturulmuştur. SubVi'leri kullanmamızın sebebi ise kod karmaşıklığını ortadan kaldırmak ve okunabilirliğini artırmaktır.



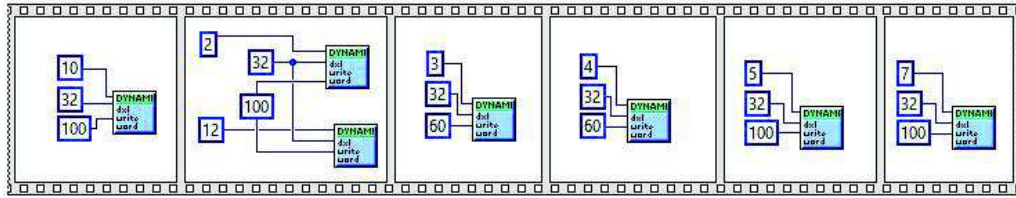
Şekil 4.14. Bağlantı kontrolünü sağlayan SubVi'yi.



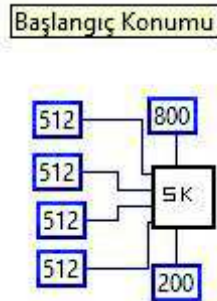
Şekil 4.15. Bağlantı kontrolünü sağlayan SubVi'nın içeriği.



Şekil 4.16. Servo motorların hızlarını ayarlayan SubVi.

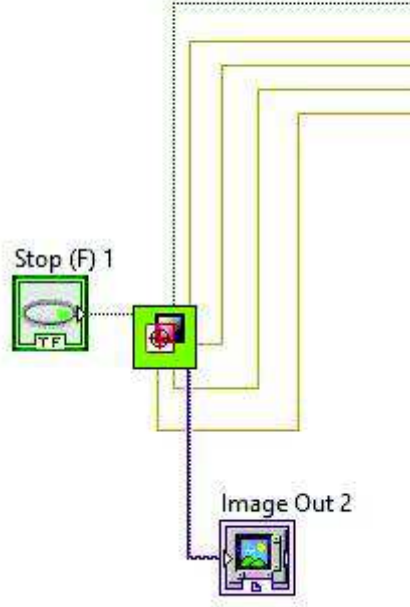


Şekil 4.17. Servo motorların hızlarını ayarlayan SubVi'nın içeriği.

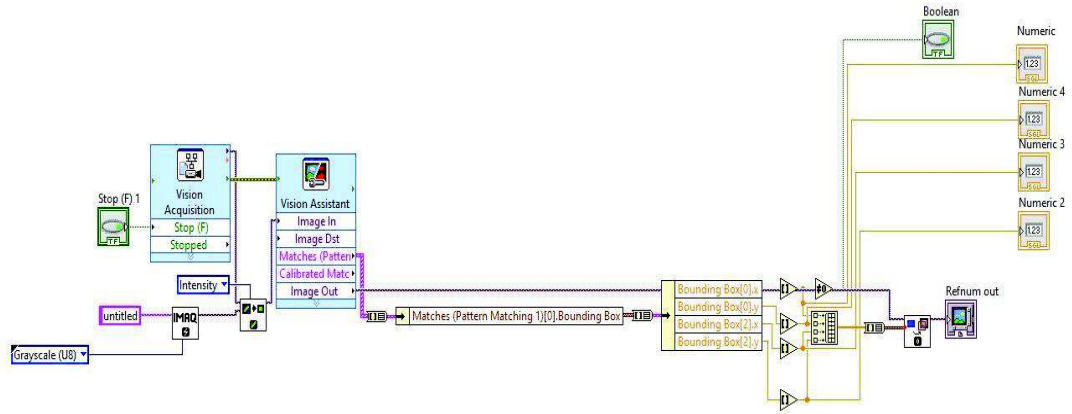


Şekil 4.18. Robot kolunu başlangıç pozisyonuna gönderen SubVi.

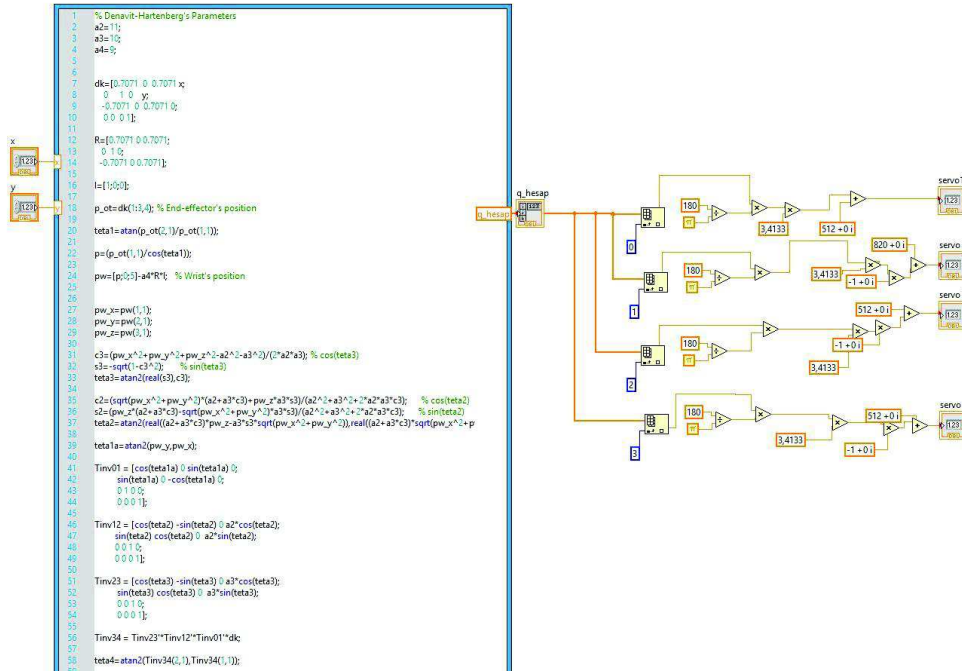
Görüntü İşleme



Şekil 4.19. Görüntü işlemeyi gerçekleştiren SubVi.



Şekil 4.20. Görüntü işlemeyi gerçekleştiren SubVi'nın içeriği.



Şekil 4.23. Ters kinematik denklemlerin kullanıldığı SubVi'nin içeriği.

4.5. Web Üzerinden Kontrol

Labview programı ile hazırlanan projeler bir web sayfası aracılığıyla kontrolü ve gösterimi gayet kolaydır. Yeniden bir web sayfası hazırlamadan Labview programının menülerinden Tools => Options => Web Server alanından http port, ssl port root directory, Visible VIs ve Browser Access List bilgileri girilerek ayarlamalar yapılır.

Web Publishing Tools alanından da hazırlayacağınız web sayfasının URL, başlık, içerik ve alt alan bilgileri girilerek web sayfası kolaylıkla oluşturulur.

Labview programıyla ilgili kodlar yazıldıktan sonra Şekil 4.24'de görülen web sayfaları aracılığı ile beş eksenli robot kolunun kontrolü otomatik ve manuel olarak yapılmaktadır. Web ara yüzünden veya kamera görüntüsünden görüntü işleme ile elde edilen veriler Labview programında yazılan kodlar sayesinde yerel bilgisayarın USB portu ile Usb2Dynamixel kontrol kartından veriler iletilerek kontrol sağlanmaktadır.

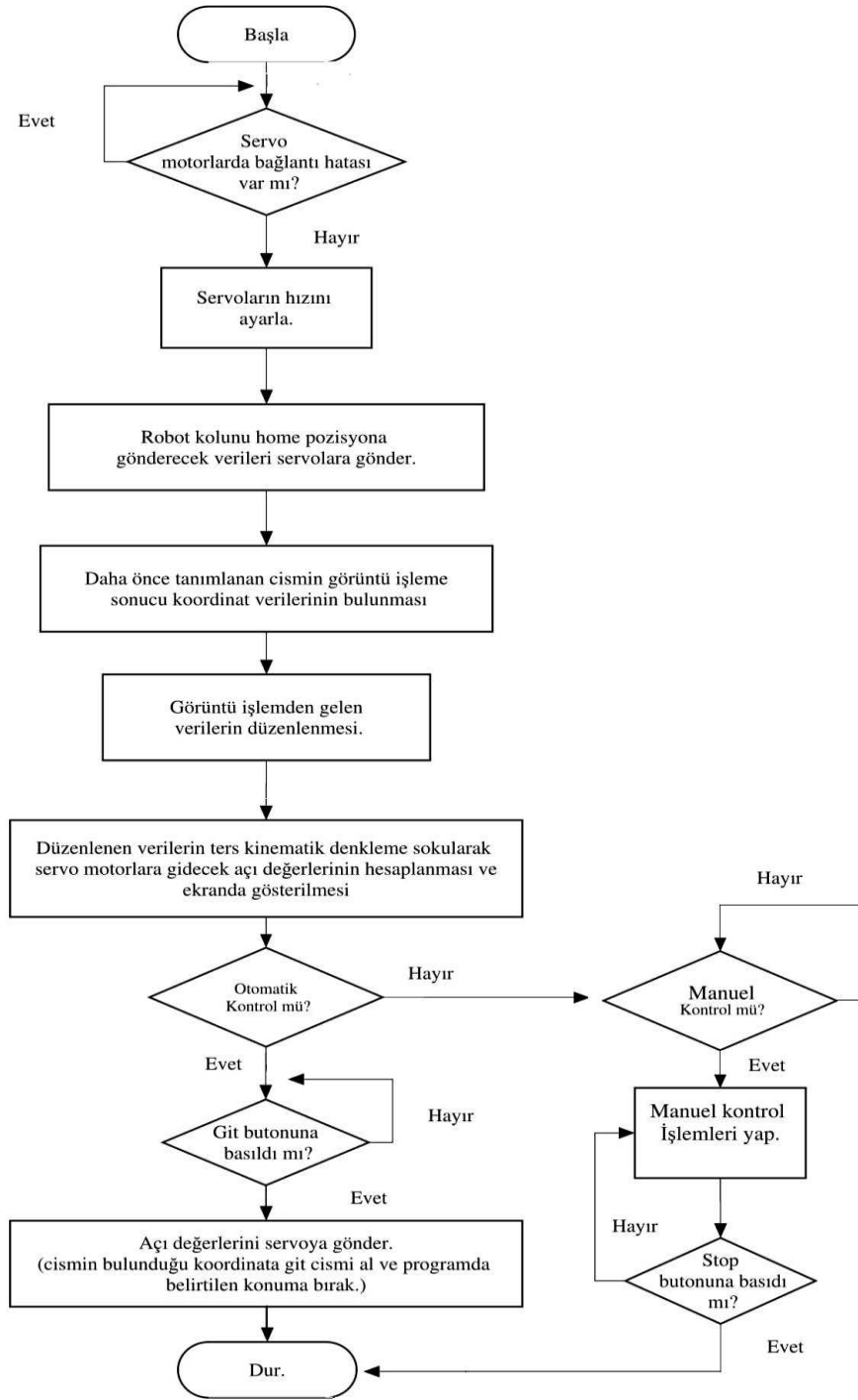
Hazırlanan bu web sayfası Localhost'dan kendi bilgisayarında çalıştırabileceği gibi uzaktan IP ile bağlanarak da başka bilgisayarlardan da çalışabilir. Bir alan adı alınarak sunucu aracılığı ile tablet, telefon ve bilgisayar üzerinden de çalıştırılabilir.



Şekil 4.24. Robot kolunu kontrol etmek için oluşturulan web ara yüzü.

Bu ara yüzden usb kamera aracılığı ile anlık görüntü alınmakta ve görüntü işleme ile cisim işaretlenmekte servo motorlara gönderilecek koordinatlar görülebilmektedir. Servoların yazılıma bağlantısında hata olup olmadığı konulan led ışığı ile kontrol edilebilecektir. Görüntü işleme butonuna basarak ekranda görülen değerleri servo motorlara göndererek cisimin alınıp bizim istediğimiz koordinatlara bırakılması sağlanabilmektedir. Bu ara yüz aracılığı ile hem usb kameradan anlık olarak ortam izlenmekte hem de servo motorlar kontrol edilebilmektedir.

Şekil 4.25.'te sistemin algoritması görülmektedir.



Şekil 4.25. Sistemin akış diyagramı.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada beş eksenli bir robot kolunun görüntü işleme algoritmasının Labview görsel programlama dili ile entegre bir şekilde çalışması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca internet teknolojisinin faydalarından da yararlanılmıştır. Önerilen bu çalışma literatürdeki diğer çalışmalardan en temel farkı daha önceden tanımlanan bir cismin otomatik olarak alınarak istenilen bir konuma taşınmasıdır. Ayrıca çalışmada kullanılan Labview programının esnek programlama yapısı ve grafiksel ara yüzünün web yazılımları ile gerçek zamanlı olarak entegre bir biçimde çalışabilir olması çalışmada önemli diğer bir avantajdır. Çalışmaya kamera eklenmesiyle robot kolunun uzaktan yönetimi daha kolay hale gelmesi yanında görüntü işleme yapılması sağlanmıştır. Tablo 5.1. ve Tablo 5.2. bölgelere göre cismin koordinatı ile robot kolunun elinin orta bölgesinin koordinatları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda ortalama fark 0,28 mm olarak bulunmuştur. Bu oran robot kolunun tasarımında hedeflenen kriterleri sağlamaktadır. Robot kolu son eklemine bağlanan tutaç tam açıldığında x mm açıklığa sahiptir. Bu tasarıma göre kavranması istenen nesneler hata oranından çok daha büyük olduğundan istenilen başarımlar elde edilmiştir. Boyutu daha küçük cisimler üzerinde çalışılacaksa ya da hassasiyetin artırılması gerekiyorsa, robot kolunda kullanılan plastik malzemeler yerine metal braketler kullanılmalıdır. Ayrıca kullanılan servo motorların redüktör gurupları sıfır boşluklu özel redüktörler ile değiştirilmelidir. Özetle ortaya çıkan hata kullanılan mekanik malzemelerin yeterli kalitede olmamasından kaynaklanmaktadır. Görüntü işleme ile elde edilen algılama başarımının artırılması ve kapsama alanının genişletilmesi için daha kaliteli kamera, birden fazla kamera, kızıl ötesi kamera çözümlerinden biri tercih edilerek kullanılmalıdır.

Tablo 5.1. Robot kolun 1. bölgede koordinat karşılaştırma tablosu

Cismin X Koordinatı	Cismin Y Koordinatı	Robotun X Koordinatı	Robotun Y Koordinatı	Fark (mm)
5	10	5,1	10,1	0,14
10	5	10,1	5,1	0,14
10	10	10	10	0
10	15	9,7	14,7	0,42
15	10	14,8	9,7	0,36
15	15	15	15	0
15	20	14,7	19,3	0,7
20	15	19,3	14,7	0,7
23	7	22,7	6,7	0,42
7	23	6,7	22,7	0,42
Ortalama Fark				0,28

Tablo 5.2 Robot kolun 2. bölgede koordinat karşılaştırma tablosu

Cismin X Koordinatı	Cismin Y Koordinatı	Robotun X Koordinatı	Robotun Y Koordinatı	Fark (mm)
-5	10	-5,1	10,1	0,14
-10	5	-10,1	5,1	0,14
-10	10	-10	10	0
-10	15	-9,7	14,7	0,42
-15	10	-14,8	9,7	0,36
-15	15	-15	15	0
-15	20	-14,7	19,3	0,7
-20	15	-19,3	14,7	0,7
-23	7	-22,7	6,7	0,42
-7	23	-6,7	22,7	0,42
Ortalama Fark				0,28

Bundan sonraki çalışmalar da yapay zekâ algoritmaları kullanarak daha performanslı hale getirilebileceği öngörülmektedir. Çalışmada robot koluna Labview üzerinden yönetim sağlandığından platformdan bağımsız çalışmamaktadır. İleride yapılacak

alışmalar ile robot kolunun platformdan bağımsız hale getirilmesi faydalı olacaktır. Ayrıca Labview web üzerinden kontrolünde sağladığı avantajlar güncel web tarayıcılar da eklenti hatalarıyla karşılaşmaktadır. Bu sorunların giderilmesi ve LabVIEW Web UI Builder kütüphane sorunları giderilerek sabit versiyonun sunulması çok faydalı olacaktır. Ayrıca sistemde yazılımın çalıştırıldığı bilgisayar yerine gömülü sistemler veya mini bilgisayarlar kullanarak kompakt ve daha az maliyetli bir düzenek elde edilebilir.

Bu çalışmalar sonucunda ” Web Üzerinden Labview Kullanarak Altı Eksenli Robot Kolu Kontrolü” ve “6 Serbestlik Derecesine Sahip Robot Kolunun Görüntü İşleme ve İnternet Üzerinden Kontrolü” isimli iki bildiri yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Bingül, Z., Küçük, S., Robot Kinematiği, Umuttepe yayınları 1. Baskı: Nisan 2015, ISBN:978-605-5100-47-6.
- [2] Adar, G., Ören, H., Kozan, R., 5 serbestlik dereceli robot kolunun modellenmesi ve kontrolü. SAÜ. Fen Bil. Der. 17. Cilt, 1. Sayı, s. 155-160, 2013 SAU J. Sci. Vol 17, No 1, p. 155-160, 2013.
- [3] Ho T., Kang* C., Lee S. “Efficient Closed-Form Solution of Inverse Kinematics for a Specific Six-DOF Arm” International Journal of Control, Automation, and Systems ISSN:1598-6446 2005.
- [4] İlker, E. 2006 “Gereğinden Çok Serbestlik Dereceli Robot Kolu Kontrol Sistemi Tasarımı ve Uygulaması” Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- [5] Kruse, D., Wen J.T., Radke J. R., “A Sensor-Based Dual-Arm Tele-Robotic System” IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 12, no. 1, january 2015.
- [6] Huang, Y., Li, J., Huang, Q., Souères, P. “Anthropomorphic robotic arm with integrated elastic joints for TCM remedial massage” Robotica, 33, pp 348-365 doi:10.1017/ S0263574714 000228-2015.
- [7] Gross, R., Falcon, J., Oh, P.Y. 2013” A Scalable Software Toolkit for Miniature Humanoids Software Toolkit for Miniature Humanoids” Department Mechanical Engineering Mechanics Drexel University 3141 Chestnut Street Philadelphia, PA 19104 US National Instruments.
- [8] Rahman, M. H., Rahman, M. J., Cristobal, O. L., Saad, M., Kenné J. P., Archambault, P. S. (2015). “Development of a whole arm wearable robotic exoskeleton for rehabilitation and to assist upper limb movements.” Robotica, 33, pp 19-39 doi:10.1017/S0263574714000034.
- [9] Karıcı, H., Tangel, A., “Design and Prototype Implementation of a 5-Dof Mobile Robot Arm Based on FPGA” Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 31, No 2, 2016.
- [10] Dinham , M., Fang, G.” Detection of Fillet Eld Joints Using an Adaptive Line Growing Algorithm for Robotic Arc Welding” School of Computing, Engineering&Mathematics,Universityof Western Sydney, Australia Roboticsand Computer-Integrated Manufacturing 30(2014)229–243.

- [11] Kahya, E., Arın, S. “Görüntü Renk Kod Analizi İle Meyvenin Yerinin Tespiti Üzerine Bir Araştırma” Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi Journal of Tekirdag Agricultural Faculty, 2014.
- [12] Durmuş , B., Temurtaş, H. “Öngörülü Kontrol ile Altı Eklemlili bir Robot Kolumun Eklem Esaslı Yörünge Kontrolü” Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik& Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 2010.
- [13] Uzer, M.S., Yılmaz, N., ve Bayrak, M. “Görme Tabanlı Mobil Robot ile Farklı Renklerde Nesnelerin Gerçek Zamanlı Takibi” Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 25, No 4, 2010.
- [14] Metin, U., İlter, Ö., Altay A. “Yerli İmkânlar ile Geliştirilen DA Servo Sürücü ve 5 Eksenli Robot Kol Uygulaması” Lisans bitirme tezi, İstanbul Üniversitesi Makina Mühendisliği, 2008.
- [15] İbrahim Ş. , Mehmet Y. ,” Wireless Controlled Mobile Exploration Robot”, 5th International Computer & Instructional Technologies Symposium, 22-24 September 2011, Fırat University, Elazığ- Turkey.
- [16] Ünlü, B. İnternet Üzerinden Mobil Bir Robotun Kontrolü Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007.
- [17] Yılmaz N. , Sağıroğlu Ş. ve Bayrak M. “Web tabanlı AR-GE Robotu: SUGAR-1”, ASYUINISTA 2004, Akıllı Sistemler ve Uygulamaları Sempozyumu, YTÜ, İstanbul, 127-130, 23-25 Haziran 2004.
- [18] Yılmaz N. , Web Tabanlı Mobil Robot Sistemi Tasarımı, Gerçekleştirilmesi ve Uygulamaları, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [19] Thi Hai Linh B., Kung Y., “Digital Hardware Realization of Forward and Inverse Kinematics for a Five-Axis Articulated Robot Arm”, Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2015, Article ID 906505, 10 pages.
- [20] Pfüner M., “Closed Form Inverse Kinematics Solution For a Redundant Anthropomorphic Robot Arm”, Available online 17 May 2016, University of Innsbruck, Technikerstr. 13, 6020Innsbruck, Austria
- [21] Alejandro J. Malo Tamayo, Pablo Vera Bustamante, Jéssica Jazmín Maldonado Ramos, Andrés Enríquez Cobo , “Inverse models and robust parametric-step neuro-control of a Humanoid Robot”.
- [22] Mohammed Ö. Ali, Hui Liu, Norbert Stoll, Kerstin Thürow, “Kinematic Analysis of 6DOF Arms for H2O Mobile Robots And Labware Manipulation For Transportation in science Labs”, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, DOI:10.14313/JAMRIS_4-2016/30.

- [23] C. N. Thai and M. Paulishen, "Using Robotis Bioloid Systems for Educational" University of Georgia Biological and Agricultural Engineering Department Athens GA 30602-4435
DOI: 10.1109/SECON.2011.5752954.
- [24] Kaya, S., Boru, B., Turhan, E. S., Atalı, G. "Web Üzerinden Labview Kullanarak Altı Eksenli Robot Kolu Kontrolü" ISITES2014 Karabük – Türkiye.
- [25] Kaya, S., Boru, B., Turhan, E. S., Atalı, G. "6 Serbestlik Derecesine Sahip Robot Kolunun Görüntü İşleme ve İnternet Üzerinden Kontrolü" ISTEC2014 Doha- Katar.
- [26] Güzel, M. S. 2008 "Altı Eksenli Robot Kolu Hareketsel Karakterisliğinin Görsel Programlanması ve Gerçek Zamanlı Uygulamaları" Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- [27] Mikkelsen, J. 1998. A Machine Vision System Controlling a Lynxarm Robot along a Path, University of Cape Town, South Africa.
- [28] J.Denavit, R.S.Hartenberg, A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 1955: 23, 215–221.
- [29] Reddy A. C., "Difference Between Denavit - Hartenberg (D-H) Classical And Modified Conventions For Forward Kinematics Of Robots With Case Study" International Conference on Advanced Materials and manufacturing Technologies (AMMT) December 18-20, 2014 JNTUH College of Engineering Hyderabad.
- [30] <http://www.mekatronikmuhendisligi.com/robotun-kollari.html>. Erişim Tarihi: 15.09.2017.
- [31] http://www.inverter-plc.net/servo_sistem/step_motorlar.html. Erişim Tarihi: 15.09.2017.
- [32] <http://1voltage.com/malzeme-bilgisi/servo-motor-nedir-ve-servo-motor-yapisi>. Erişim Tarihi: 15.09.2017.
- [33] <http://elektrikloji.blogspot.com.tr/2015/07/enkoder-nedir-cesitli-nelerdir.html>. Erişim Tarihi: 15.09.2017.
- [34] <http://tdrobotica.co/servomotor-dynamixel-ax-12a153-kg-cm59-rpm/202.html>. Erişim Tarihi: 15.09.2017.
- [35] <https://www.generationrobots.com/en/401691-dynamixel-mx-12w-servo-motor.html>. Erişim Tarihi: 15.09.2017.
- [36] <http://www.voidcn.com/article/p-vbsfdxfab-bu.html>. Erişim Tarihi: 15.09.2017.

ÖZGEÇMİŞ

Selim KAYA, 22.08.1984 tarihinde Malatya’da dünyaya geldi. İlk, orta ve lise eğitimini Malatya’da tamamladı. 15.06.2003 tarihinde Hacı Hüseyin Kölük Anadolu Ticaret Meslek Lisesi Bilişim Teknolojileri Bölümü’nden mezun oldu. 31.05.2010 tarihinde Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi Kamu Yönetimi Bölümü’nden mezun oldu. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Sistemleri Öğretmenliği Bölümü’ne yerleşti. 17.08.2012 yılında bu bölümden mezun oldu. 17.02.2014 tarihinde Fen Bilimleri Enstitüsü Bilişim Sistemleri Enstitü Anabilim dalında Yüksek lisansını bitirdi. 14.07.2016 tarihinde Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nden Mezun oldu. Halen Hoca Ahmet Yesevi Uluslararası Türk-Kazak Üniversitesi Bilişim Teknolojileri ve Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği ile Sakarya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisansda eğitimi devam etmektedir. 05.02.2007 tarihinde Sakarya Üniversitesi’nde çalışmaya başladı. Şuan Sakarya Üniversitesi Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı’nda sistem yöneticisi olarak çalışmaktadır.