İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜT SAĞIM ROBOTU TASARIM VE İMALATI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hulusi ÖZÜDURUK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği Ve Kontrol Programı

Eylül 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜT SAĞIM ROBOTU TASARIM VE İMALATI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hulusi ÖZÜDURUK

(503101604)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği Ve Kontrol Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU

Eylül 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503101604 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hulusi ÖZÜDURUK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"SÜT SAĞIM ROBOTU TASARIM VE İMALATI"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ertan ÖZNERGİZ .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 02 Eylül 2014

Savunma Tarihi : 16 Eylül 2014

ÖNSÖZ

Mevcut sistem içerisinde çalışmaktan keyif alan biri haline gelmemde İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesindeki birçok hoca ve öğrenci etkili olmuştur. Onlara teşekkür etmek isterim.

Tezimin planlanması, yürütülmesi ve sonuçlandırılması ile ilgili süreçlerde, sürekli iletişim halinde olduğum ve bu süreçlerde birçok konuda yardımlarını aldığım danışman hocam Doç. Dr. Zeki Y. BAYRAKTAROĞLU'na teşekkür ederim.

Bu tezin yazımından önce sınıf arkadaşım olan, şu an aynı şirkette birlikte çalıştığımız arkadaşım makine mühendisi Ömür BAÇ'a bu süreçteki destek ve emeklerinden ötürü teşekkür ederim.

Birlikte çalıştığımız arkadaşım kontrol mühendisi Süleyman HEPGÜVEN'e bu süreçteki destek ve emeklerinden ötürü teşekkür ederim.

Tez konum olan projeyi destek kapsamına alarak düşüncelerimi gerçekleştirmeme yardımcı olmuş T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na teşekkür ederim.

Bir şey yapabilmenin cesaret etmek olduğunu bana gösteren aileme, beni hayatımın her anında yanımda olacaklarına inandırdıkları ve her an beni destekledikleri için teşekkür ederim.

Eylül 2014 Hulusi ÖZÜDURUK

Kontrol Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Süt Sağım Robotları 2
1.2. Süt Sağım Robotu ile Diğer Sağım Sistemlerinin Karşılaştırılması 4
1.3. Tez Çalışmasının Konusu, Kapsamı ve Amacı 5
2. MATEMATİKSEL MODELLEME **7**
2.1. Sistem Boyutlarının Belirlenmesi 7
2.2. Kinematik Modelleme 8
2.2.1. İleri kinematik 8
2.2.2. Ters kinematik 9
2.2.3. Kinematik simülasyonu 13
3. TASARIM **19**
3.1. Mekanik tasarım 19
3.1.1. Motor, redüktör ve enkoder seçimi 19
3.1.2. Mekanik analizler (mukavemet analizi) 24
3.1.3. Kayış- Kasnak seçimi ve montaj aşaması 28
3.2. Elektronik Tasarım 30
3.2.1. Malzeme seçimleri 30
3.2.1.1. Haberleşme protokolü seçimi 30
3.2.1.2. Motor sürücü seçimi 34
3.2.1.3. Bilgisayar ve işletim sistemi seçimi 35
3.2.1.4. Kamera seçimi 37
3.2.2. Elektronik sistemin kurulması 38
3.2.2.1. Sürücülerin ayarlanması 38
3.2.2.2. Motor ve sürücünün bağlantısının yapılması 40
4. KONTROL SİSTEMİ **43**
4.1. Motor Kontrolör Tasarımı 43
4.2. Yörünge Planlaması 43
4.3. Bilgisayar Programının Hazırlanması 45
4.3.1. Görsel arayüzün hazırlanması 45

4.3.2. Kamera ile meme konumu tespiti 47
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 51
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 57
KAYNAKLAR 59
EKLER 61
ÖZGEÇMİŞ 71

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Link uzunlukları. 8
Tablo 2.2: Süt sağım robotu Denevith-Hertenberg tablosu 9
Tablo 3.1: Birinci eksen motor, redüktör ve enkoder özellikleri. 22
Tablo 3.2: İkinci eksen motor, redüktör ve enkoder özellikleri 23
Tablo 3.3: CANBUS veri iletim hızı ve kablo uzunluğu karşılaştırma tablosu. 32
Tablo 3.4: Motor sürücülerinin özellikleri. 34
Tablo 3.5: Bilgisayar özellikleri. 36
Tablo 3.6: RPDO ve TPDO'ların taşıdıkları veriler ve iletim tipleri. 40
Tablo 3.7: Sürücü bağlantı konnektörleri. 40
Tablo 3.8: Motor hall sensor ve motor faz bağlantı konnektörleri. 41
Tablo 4.1: Sürücü geri besleme verilerinin dönüşüm oranları. 47
Tablo 5.1: Kamera ile meme prototipi tespiti. 55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Endüstriyel robotlar a) kaynak robotu b) boya robotu. 1
Şekil 1.2: Lely Astronout A4 süt sağım robotu a) arkadan b) önden görünüm. 2
Şekil 1.3: Merlin Robot süt sağım robotu. 3
Şekil 1.4: Baumatic MR-S1 süt sağım robotu. 3
Şekil 1.5: DeLaval VMS süt sağım robotu. 4
Şekil 1.6: Mlone süt sağım robotu. 4
Şekil 1.7: Örnek süt sağım ahırı (doru çiftlik). 5
Şekil 2.1: İnek modeli ve link uzunlukları tespiti. 7
Şekil 2.2: Süt sağım robotu eksen atamaları. 8
Şekil 2.3: Robot üstten görünüm. 10
Şekil 2.4: Kontrol sistemi blok diayagramı. 14
Şekil 2.5: Referans noktalar ile robot uç noktalarının karşılaştırılması. 14
Şekil 2.6: Erişilen noktalar. 15
Şekil 2.7: Ulaşılan noktalar ve yönelimler. 15
Şekil 2.8: Ulaşılan noktalar ve yönelimler (X-ekseni). 16
Şekil 2.9: Ulaşılan noktalar ve yönelimler (Y-ekseni) 16
Şekil 2.10: Ulaşılan noktalar ve yönelimler (Z-ekseni). 16
Şekil 2.11: Robot kolun 3-boyutlu çizimi. 17
Şekil 2.12: [0,5, 0,13, -1,25] Referans noktasına erişim. 17
Şekil 3.1: Birinci eksen tork analizi başlangıç durumu (a) ve bitiş durumu (b). 19
Şekil 3.2: Birinci eksen tork analizi (30 rpm hız ile 5 adet 180 derecelik hareket).. 19
Şekil 3.3: İkinci eksen tork analizi başlangıç (a) ve bitiş durumu (b). 20
Şekil 3.4: İkinci eksen tork analizi (5 rpm hız ile 90 derecelik hareket). 20
Şekil 3.5: Üçüncü eksen tork analizi başlangıç (a) ve bitiş durumu (b). 20
Şekil 3.6: Üçüncü eksen tork analizi (5 rpm hız ile 90 derecelik hareket). 21
Şekil 3.7: Dördüncü eksen tork analizi başlangıç (a) ve bitiş durumu (b). 21
Şekil 3.8: Dördüncü eksen tork analizi (5 rpm hız ile 90 derecelik hareket). 21
Şekil 3.9: Birinci eksen motor, redüktör ve enkoder (a) Yandan (b) Alttan 22
Şekil 3.10: İkinci eksen motor kombinasyonu yandan görünüm. 23
Şekil 3.11: Birinci, üçüncü ve dördüncü eksen motor tork hız karakteristiği [4]..... 23
Şekil 3.12: İkinci eksen motoru tork-hız karateristiği [5]..... 24
Şekil 3.13: Üst bağlantı. 24
Şekil 3.14: Birinci eklem üst parça. 25
Şekil 3.15: Birinci eklem alt parça 25
Şekil 3.16: İkinci eklem. 26
Şekil 3.17: Üçüncü eklem. 27
Şekil 3.18: Dördüncü eklem. 27
Şekil 3.19: T10 kayış yük taşıma kapasitleri [7]. 28
Şekil 3.20: Kayış bağlantıları montaj (a)ikinci, (b)üçüncü, (c) dördüncü eksen. 28
Şekil 3.21: Rulman yatakları ve eklem bağlantıları. 29
Şekil 3.22: Motor bağlantı parçası ve kayış gerdirme sistemi. 30
Şekil 3.23: Montaj sonrasında süt sağım robotu. 30

Şekil 3.24: CANBUS haberleşme hattı fiziksel bağlantısı. 31
Şekil 3.25: CANBUS haberleşme protokolü veri iletimi. 32
Şekil 3.26: CANBus mesajı veri yapısı. 32
Şekil 3.27: CANBUS SDO mesaj örneği. 33
Şekil 3.28: Motor sürücüleri [9]. a)EPOS2 70/10 b)EPOS2 24/5 34
Şekil 3.29: Canbus haberleşme hattı picoscope ekran görüntüsü. 35
Şekil 3.30: Canbus haberleşmesi bir adet kapalı çevrim mesajları. 35
Şekil 3.31: PCAN-USB [10]. 36
Şekil 3.32: Endüstriyel kamera. 37
Şekil 3.33: Lazer tarayıcı sensör. 37
Şekil 3.34: Microsoft Kinext XBOX 360. 38
Şekil 3.35: Birinci, üçüncü ve dördüncü eksen için motor ve enkoder tanıtımı. 39
Şekil 3.36: İkinci eksen için motor ve enkoder tanıtımı. 39
Şekil 3.37: Sürücülerin Node-ID ve Bitrate atamaları. 39
Şekil 3.38: Sürücü konnektörleri. 41
Şekil 3.39: Motor bağlantı konnetörleri. 41
Şekil 4.1: Yörünge planlaması. 44
Şekil 4.2: Robot hareket yörüngeleri. 45
Şekil 4.3: Süt sağım robotu program arayüzü. 46
Şekil 4.4: İnek Memesi [15], (b) Meme protipi tasarım ve (c) protoip. 48
Şekil 4.5: Süt sağım pompası yandan (a) ve alttan (b) görünümü. 48
Şekil 4.6: Meme koordinatının belirlenmesi 48
Şekil 4.7: Kamera ile meme prototipinin tespiti. 49
Şekil 5.1: Birinci eksen pozisyon takibi. 51
Şekil 5.2: İkinci eksen pozisyon takibi. 51
Şekil 5.3: Üçüncü eksen pozisyon takibi. 52
Şekil 5.4: Dördüncü eksen pozisyon takibi. 52
Şekil 5.5: Birinci eksen yörünge takip algoritması. 52
Şekil 5.6: İkinci eksen yörünge takip algoritması. 53
Şekil 5.7: Üçüncü eksen yörünge takip algoritması. 53
Şekil 5.8: Dördüncü eksen yörünge takip algoritması. 53
Şekil 5.9: X ekseni yörünge takip. 54
Şekil 5.10: Y ekseni yörünge takip. 54
Şekil 5.11: Z ekseni yörünge takip. 54
Şekil 5.12: Süt sağım robotu kontrol programı akış diyagramı. 56
Şekil 6.1: MESA SR400 TOF kamera [18]. 58
Şekil A.1: Süt sağım robotu kinematik simulasyon SIMULINK programı. 62
Şekil B.1: Süt sağım robotu CANBUS iletişimi picoscope çıktısı. 63
Şekil B.2: Birinci, üçüncü, dördüncü eksen motor detaylı çizim. 64
Şekil C.1: Birinci, üçüncü, dördüncü eksen redüktör detaylı çizim. 64
Şekil C.2: Birinci, üçüncü, dördüncü eksen enkoder detaylı çizimi. 64
Şekil C.3: İkinci eksen motorun detaylı çizimi. 65
Şekil C.4: İkinci eksen redüktör detaylı çizim 65
Şekil C.5: İkinci eksen enkoder detaylı çizim 65
Şekil C.6: Üst tutacak statik gerilme analizi 66
Şekil D.1: Birinci link üst parça gerilme analizi 66
Şekil D.2: Birinci link alt parça gerilme analizi 66

Şekil D.3: İkinci link gerilme analizi 67
Şekil D.4: Üçüncü link gerilme analizi 67
Şekil D.5: Dördüncü link gerilme analizi 67
Şekil E.1: Birinci eksen auto tuning pozisyon performansı 68
Şekil E.2: İkinci eksen auto tuning pozisyon performansı 68
Şekil E.3: Üçüncü eksen auto tuning pozisyon performansı 69
Şekil E.4: Dördüncü eksen auto tuning pozisyon performansı 69

SÜT SAĞIM ROBOTU TASARIM VE İMALATI

ÖZET

Bu tezde otomatik süt sağımı yapabilen robot kolun tasarım ve üretimi ele alınmıştır. Tasarım aşaması kendi içinde alt gruplara ayrılmaktadır. Mekanik ve elektronik tasarım alt konularının tamamlanmasının ardından üretim süreci tamamlanacak ve ölçüm cihazının montajı yapılarak deneysel olarak elde edilen veriler incelecektir.

Otomatik süt sağım robotu, süt sağım işlemini herhangi bir personel gerektirmeden ve manuel süt sağım makinalarına göre daha hızlı bir şekilde yapabilmektedir. Bu noktada hayvanları zorlayarak sağım noktalarına götürülürken oluşan sıkıntılar da ortadan kalkmış olacaktır.

Otomatik süt sağım robotları maliyetlerinden dolayı genellikle büyük çaplı çiftliklerde (en az 40-50 adet sağılan inek bulunan) kullanılmaktadır.

Sağım işlemi süreci ineklerin alıştırılarak kafes yapısına girmesi ile başlamaktadır. İneğin kafese girmesinin ardından kamera ile ineğin meme ucu konumlarının tespiti yapılacaktır. Bu işlemin ardından robotik kol süt sağım pompasını alarak kamera tarafından belirlenen koordinatlara götürerek sağım işlemini başlatacaktır. Sağım işleminin bitimin ardından sağım pompasını ilk konumuna götürecektir.

Süt sağım robotunu temelde mekanik ve elektronik aksam olarak iki kısımda inceleyebiliriz. Mekanik aksamda; gövde konstrüksiyonu, rulmanlar, cıvatalar ve diğer mekanik bağlama elemanları, elektronik aksamda; enkoderler, motorlar, motor sürücüleri, gömülü bilgisayar ve kamera bulunmaktadır. Ayrıca yine CANbus haberleşmesi ve bilgisayar programı bu bölümde bulunmaktadır.

Mekanik tasarım ve üretim, Robkon Robotik ve Otomasyon firması tarafından yapılmıştır. Bu bölümde motor, redüktör ve enkoderlerin seçimi bu bölümde yapılmıştır. Motor ve redüktörlerin seçiminde öncelikli olarak motor tipi fırçasız dc motor olarak belirlenmiştir. Motorların ve redüktörlerin tork değeri mekanik tasarım aşamında eklemlerin tork analizi sonucunda ortaya çıkmıştır. Motorların ve redüktörün seçiminin ardından bu seçime uygun enkoder ve motor sürücüsü seçimi yapılmıştır

Elektronik tasarım motor sürücülerinin ve gömülü bilgisayar bileşenlerinin seçimi ve haberleşme programını içermektedir. Motor sürücüleri ile gömülü bilgisayarın haberleşmesi için kullanılacak protokol seçiminde en önemli nokta, sürücülerden alınacak olan referansların aynı anda örneklenmesinin gerekliliğidir. Senkron örnekleme için ise CANopen protokolü kullanılmıştır.

Ortaya çıkması muhtemel problemlerin tasarım aşamasında giderilmesi için tasarım süreci uzun tutulmuş ve birçok problemin bu aşamada çözümü üretilmiştir. Üretim sürecinde karşılaşılan bazı problemlere ise bu süreçlerde müdahale edilebilmiştir.

Sistem tasarıma uygun olarak üretilmiş ve montajı yapılmıştır. Mekanik ve elektronik akşamlar tasarım aşamasındaki kriterlere uygun bulunmuş ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

DESIGNING AND MANUFACTURING OF MILKING ROBOT

SUMMARY

This thesis explains the modelling, design and control of milking robot. The Modeling phase has two sub groups of determination of length and number of joint and kinematic modeling. Design phase has two sub groups of mechanical and electronic modeling. Control phase include motor controller design and path planning algorithm. After that, experimental works are done and obtained data are discussed. The recommendations to increase system performance are given in the last section.

First milking machine which work with vacuum is patented in 1851 in England. Simply, milking machine consist of four teatcup, vacuum machine and bulk tank. Farmer attach teatcup to the udder one by one and start the vacuum machine. After the finishing of the milking, farmer stop the milking machine and takes the teatcup. This type of milking is takes long time in farm which has more than 50 cows. In big farms, milking process takes minimum 1 hour with eight milking machine and two workers. This type of milking has lower set up cost. However, it has higher long time operating cost like workers' salary.

First milking robots is produced in 1992 which Lely Astronaut. Milking robots has 24 hour working capacity and milking 40-50 cows in a day. It has a cow cage with two automatic gate, a four axis robotic arm with teat detection sensor (camera, laser) system, a teat cleaning system, a cow feeding system, a cow detection system, a cow identification system, a milk analyzing system and a milk cooling tank. Firstly, Robotic Milking system detect the cow in front of entrance door and entrance door is opened by the sytem. After the cow enters the cage, entrance door is closed and system checks the last milking of cow. If cow is milked in last three or four hour, exit door is opened and system waits the cow's exit. If cow isn't milk last three or four hour, milking process is started. After that, feeding system is activated and provender is given to cow. Robotic arm detect the teat position with teat detection system and take tke teat cleaning system. After clening the teats, robotic arm takes teat cups and attach them one by one. When milking is started, milk is started to analyz. If milk has no problem then milk is transfered to the milk cooling tank. Otherwise milk is discarded and farmer is warned by the robotic milking system. After the milking exit door opened and cow exit the cage. Robotic milking system waits the next cow.

Milking robot can be separated in to three fundamental areas; Modeling, Design and Control.

Modeling area, start with determination of number of axis and length of links. If this a cow model is created in simulation environment and starting with three axis and half meter length of joints, because of this determination is done by changing the number of axis and length of joints. Milking robot has four rotary axis. After the determination of link's lenght and axis number, robotic arm's work space is founded. After that forward and inverse kinematic modeling algorithm and simulation is generated. Kinematic simulation is made on MATLAB and V-Realm Builder.

In the design area, there are two main sub groups which are mechanical and electronic modeling. Mechanical model is provided by Robkon Robotic and

Automation company. In this study, selection of motor, gear and encoder is made. In order to select motor and gear, Torque analyze is made for each axis with different speed and acceleration. According to torque analyze motor and gear selection is selected in Maxon motor productions. Static analysis is made for all links and parts of robotic arm. Motors are mounted to the axis with belt-pulley system. 25 mm T10 series belt is used. After the analysis and production of parts, robotic arm is mounted.

Electronic modeling in design area consist of communication protocol, motor driver embedded computer, operating system and camera selection and setting up the electronic hardware. CANBUS is selected as communication protocol because of supporting synchronous communication and 1 mbps bandwidth. Motor driver is selected in Maxon EPOS2 controllers. These controller has current, speed and positioning controller and support CANOpen communication protocol. Peak System's PCAN-USB convertor is used for CANBus communication between motor drivers and computer. Windows 7 is used for operating system. Microsoft Kinect Xbox 360 is used for detecting cow's teat.

Motor Driver's PDO,COB-ID and Baud rate are determined and loaded. These parameters is loaded with EPOS Studio program. Driver is connected to the computer with USB cable and parameters is entered. CANBUS, encoder, motor phase and power cable are connected to motor driver.

In the control area motor controller parameters are selected. PID controller is used as control algorithm. PID controller parameters is assigned with EPOS2 auto tuning mode. Third degree path planning algorithm is used. Besides four different paths is defined for tracking system. First path is starting point to under to udder. Second path is under the udder to udder. Third path is udder to under the udder and last path is under the udder to starting point. Robotic arm tracks this path with third degree path planning algorithm with 20 ms sampling time. Haarcascade is used for cow's teat detection algorithm. OPENCV's traincascade.exe and createsamples.exe programs are used for generating the teat cascade. Createsample.exe program generate vector file using positive photos. Traincascade.exe program generate cascade using vector file and negative photos. Positive photos are consist of teat potohos and negative ptohotos are consist of other objects around the teats. CANBUS communication protocol is used with PCANBasic.API and PCANBasicCLR.h files.

Control program is crated using C++ CLR programming language. Microsoft Visual Studio 2010 is used for IDE. Program interface has CANBUS, Axis Control, Inverse Kinematic, Feedback section and Robot with Camera section. CANBUS section has initialize, uninitialize, reset button to use PCAN-USB convertor. Besides, CANBUS section has operational, preoperational, stop, and reset buton which used for CANBUS comminication with drivers. Axis Control section has four main group which are Torque, Speed, Position and Path. These are used for axis control. For example, Path Control is used for third axis position control with path planning algorithm. Inverse Kinematic section has three input textbox which when the inverse start is pressed robotic arm endpoint goes to the these points. Feedback section shows the driver and motors current, speed, position and mode. Also feedback values are written in text files for the analysis of control and path planning algorithm. Robot with Camera section has only one input which is start button. When this button is pressed, camera detects the teat position and robotic arm goes to the teat position using tracking and path planning algorithm.

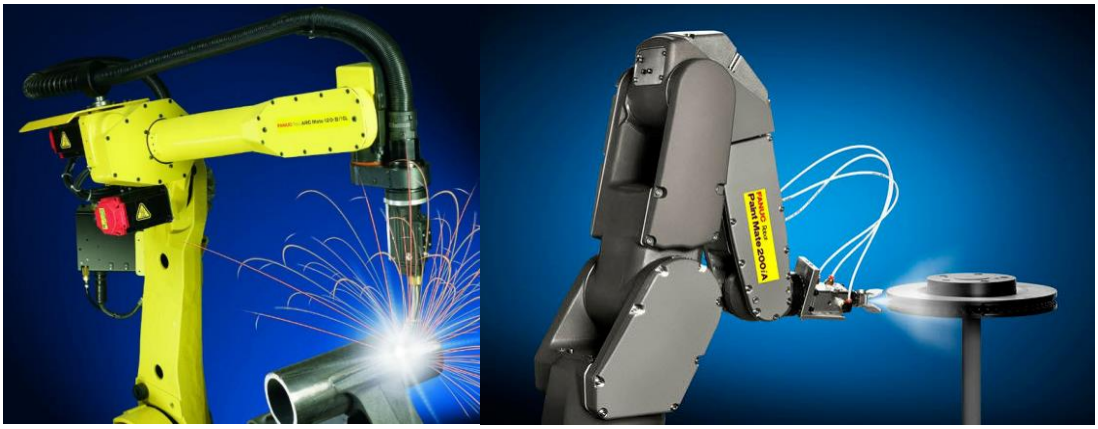
In the experimental studies seciton, udder model is designed and produced in 3D printer. Firsly, axis PID controller is tested one by one and feedback is analysis. When controller performance is equal to our expectations, inverse kinematic test are began. In the inverse kinematic test, robotic arm goes to the input position and this posiiton is measured and results are compared to the input. Final test of robotic arm is done by camera and model udder. Model udder is attached to the robotic arm working space and camera is mounted. Test are start with START button in Robot with Camera section. Camera detect the udder position and converts the position to the robotic arm. After that robotic arm goes to this poisition using tracking and path plannig algorithm. During the all test path planning algotithm is used. All feedback and referances are written in text different text files. These text files is analysis in MATLAB.

Result of experimantal studies Microsoft Kinect Camera is insufficent to the field experiment. In the future studies new camera must be used which has better proporties then Microsoft Kinect. Also, absolute encoders must be used on axis.

1. GİRİŞ

Endüstriyel robotlar ISO 8373 standartına göre endüstriyel uygulamalarda kullanılan, üç veya daha fazla programlanabilir ekseni olan, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir, çok amaçlı, uzayda sabitlenmiş veya hareketli manipülatör olarak ifade edilmektedir [1]. Endüstriyel robotlar, seri imalat yapan endüstrilerde aynı işin sürekli tekrarı insan tarafından gerçekleştirildiğinde kendisine veya imalat sürecine zarar verebilme ihtimalinin yüksek olması sebebiyle tercih edilmektedir. Ayrıca insan sağlığına zarar verebilme ihtimali bulunan işlemlerde örnek olarak boya işlemlerinde tercih edilmektedir. Endüstriyel robotlar bir veya daha fazla insanın yapabileceği bir işi daha hızlı bir şekilde tek başına yapabilme kapasitesine sahiptir.

Endüstriyel Robotlar, imalat endüstrisinde kaynak, boya, delme, kesme, taşıma vb. işlerde sıklıkla kullanılmaktadır.



a) b)

Şekil 1.1: Endüstriyel robotlar a) kaynak robotu b) boya robotu.

Endüstriyel robotların seri imalat konusundaki başarılı olması sonucunda farklı alanlara da açılmaya başlamıştır. Bu tez çalışmasında endüstriyel robotların hayvancılık sektöründe kullanıcak bir uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama süt sağım robotu olarak isimlendirilmiştir.

1.1. Süt Sağım Robotları

Süt sağım robotu bir adet robot kol ve bir kafes yapısından oluşmaktadır. İnekler kafesin içerisine girdikten sonra, ineklerin meme konumları lazer sensör veya kamera ile tespit edilerek robot kolun sağım pompalarını konuma götürmesi sağlanmaktadır. Sağım işlemi tamamlandıktan sonra pompaların ilk konumlarına gelmesi ve ön kapının açılmasının ardından sağım işlemi tamamlanmaktadır.

Endüstriyel robotlar süt sağım teknolojisine 2005 yılından itibaren girmeye başlamıştır. Bu konuda çalışma yapan firmalar ve robotlarıının özellileri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

1.1.1. Lely

Süt sağım robotunu 1992 yılında ilk olarak Lely Astronout ismiyle piyasaya çıkaran firmadır. Dört eskene sahip olan robot kol ineğin yan tarafından sağım işlemini yapmaktadır. İneğin meme ucu lazer sensör ile tespit edilmektedir. Sağım pomlarının hepsini üzerinde bulundurarak tek tek takmaktadır.



a) b)

Şekil 1.2: Lely Astronout A4 süt sağım robotu a) arkadan b) önden görünüm.

1.1.2. Fullwood

Merlin robot olarak isimlendirdikleri ve dört eksene sahip olan süt sağım robotu ineğin yan tarafından sağım işlemini gerçekleştirmektedir. İneğin meme ucu lazer sensör ile tespit edilmektedir. Sağım pompalarının hepsini üzerinde bulundurarak tek tek takmaktadır.



Şekil 1.3: Merlin Robot süt sağım robotu.

1.1.3. Baumatic Robotics

MR-S1 olarak isimlendirdikleri ve dört eksene sahip olan süt sağım robotu ineğin arka ayaklarının arasından sağım işlemini yapmaktadır. İneğin meme ucu konumu lazer sensör ile tespit edilmektedir. Süt sağım pompalarına üzerinde bulundurmamaktadır. Pompaları teker teker takma işlemini gerçekleştirmektedir.



Şekil 1.4: Baumatic MR-S1 süt sağım robotu.

1.1.4. DeLaval

DeLaval VMS olarak isimlendirdikleri ve dört eksene sahip olan süt sağım robotu ineğin yan tarafından sağım işlemini gerçekleştirmektedir. İneğin meme ucu lazer sensör ile tespit edilmektedir. Süt sağım pompalarına üzerinde bulundurmamaktadır. Pompaları teker teker takmaktadır.



Şekil 1.5: DeLaval VMS süt sağım robotu.

1.1.5. GEA Farm

Mlone robot olarak isimlendirdikleri ve dört eksene sahip olan süt sağım robotu ineğin yan tarafından sağım işlemini gerçekleştirmektedir. İneğin meme ucu kamera ile tespit edilmektedir. Sağım pompalarının hepsini üzerinde bulundurarak tek tek takmaktadır.



Şekil 1.6: Mlone süt sağım robotu.

1.2. Süt Sağım Robotu ile Diğer Sağım Sistemlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde süt sağım robotları ile diğer sağım sistemlerinin inek sağlığı, süt hijyeni vb. açılardan karşılaştırılmalarına yer verilecektir. Karşılaştırma süt sağım robotları ile süt sağım makinaları bulunan süt sağımhaneleri arasında yapılacaktır. Süt sağımhanelerinde inekler süt sağım makinası sayısı kadar gruplar halinde süt sağımhanesine götürülürler. Burada sağım kafeslerine sokulmalarının ardından ineklerin memeleri işçiler tarafından yıkanılır ve süt sağım pompaları işçiler tarafından inek memelerine takılır. Sağım işleminin bitiminin

ardından inekler süt sağımhanesinden çıkarılır ve bir sonraki grup içeri alınır. Bu yöntemde inekler sabah ve akşam olmak üzere iki kere sağım işlemine girmektedirler.



Şekil 1.7: Örnek süt sağım ahırı (doru çiftlik).

Süt sağımhanelerinde sağımı yapılan ineklerin sağımhaneye götürülürken zorlanması inekler strese girmekte ve agresiflikleri artmaktadır. İneklerin strese girmesi süt verimliliklerini azaltmaktadır. Süt sağım robotları kullanılarak sağım yapılan bir çiftlikte inekler sağım işlemine kendileri gittiklerinden dolayı stres, agresiflik vb. durumlar oluşmadığından dolayı süt verimi artmaktadır. Thedairysite.com sitesinde yer alan habere göre İngilterede Mr. Gibson isimli çiftlik sahibi süt üretiminde yıllık inek başına 1000 lt, Mr. Heintz ise çiftliğinde yıllık inek başına yaklaşık 2000 lt artış olduğunu bildirmektedir [2].

1.3. Tez Çalışmasının Konusu, Kapsamı ve Amacı

Bu tez çalışması ROBKON Robotik ve Otomasyon firmasının süt sağım robotunun robotik kontrolü ve meme konumunun tespiti aşamalarından oluşmaktadır. Süt sağım robotunun mekanik tasarımı bu proje kapsamında Robkon firmasında yapılmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Süt sağım robotu dört adet döner eksenden oluşmaktadır.

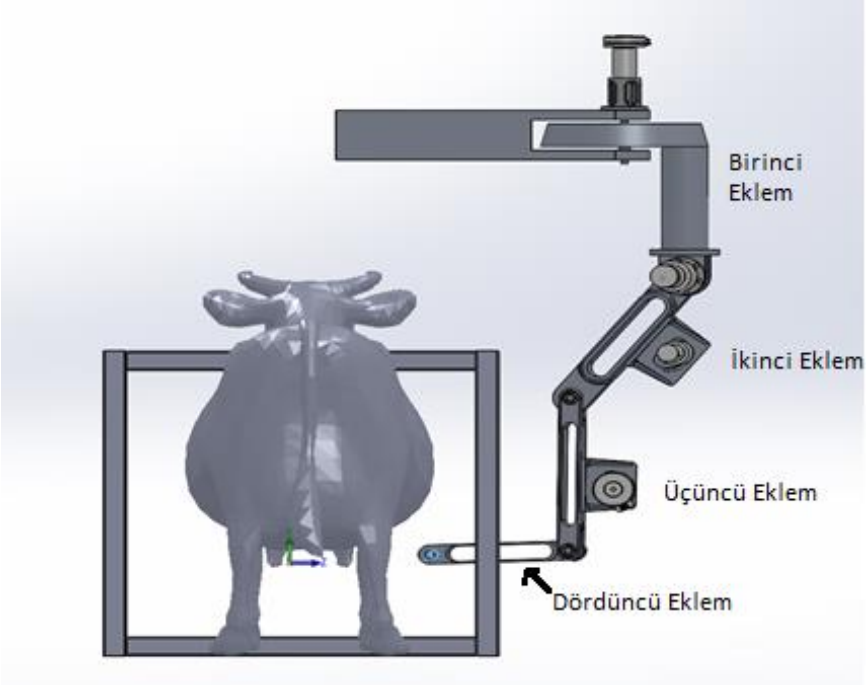
Tez çalışmasının birinci bölümünde süt sağım robotunun eksen sayısının belirlenmesi, eklem uzunluklarının belirlenmesi ile ileri ve ters kinematik modelleme ve benzetiminden oluşmaktadır. İkinci bölümde mekanik tasarımın tanıtılması, mukavemet analizi, malzeme ve komponent seçimleri ve kurulumları ele alınmıştır. Üçüncü bölümde kontrol algoritmalarının oluşturulması ve kameranın programlanması ele alınmıştır. Deneysel çalışmalar bölümünde robotun meme konumunun tespit edilmesi ve meme konumuna gitmesi ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Tez çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar ve bu konu ile ilgili yapılabilecek çalışmalar için yapılan öneriler sonuçla ve öneriler bölümünde bulunmaktadır.

2. MATEMATİKSEL MODELLEME

2.1. Sistem Boyutlarının Belirlenmesi

Süt sağım robotunun en az üç sertbeslik derecesine sahip olması gerekmektedir. Robotun uç noktasının yere paralel olması gerektiğinden dolayı robota bir eksen daha eklenerek toplam serbestlik derecesi dört olarak seçilmiştir.

Link uzunlukları belirlenirken ilk olarak solidworks'te tahmini uzunluklar baz alarak basit bir dört eksenli robot kol çizimi yapılmıştır. Burada eksenlerin tiplerinin de seçimi yapılmıştır. Bu seçim sonucunda tüm eksenler döner eksen olarak seçilmiştir. Daha sonra solidworks'te inek modeli kullanılarak robot kolun ineğin meme ucuna ulaşıp ulaşamadığı kontrol edilmiştir. Robotun link uzunlukları meme ucuna ulaşabilene kadar değiştirilmiştir.



Şekil 2.1: İnek modeli ve link uzunlukları tespiti.

Robotun memeye ulaşması durumunda link uzunlukları bu işlem sonucunda belirlenmiştir. Link uzunlukları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Link uzunlukları.

Eksen	Uzunluk
Birinci Link	350 mm
İkinci Link	400 mm
Üçüncü Link	400 mm
Dördüncü Link	300 mm

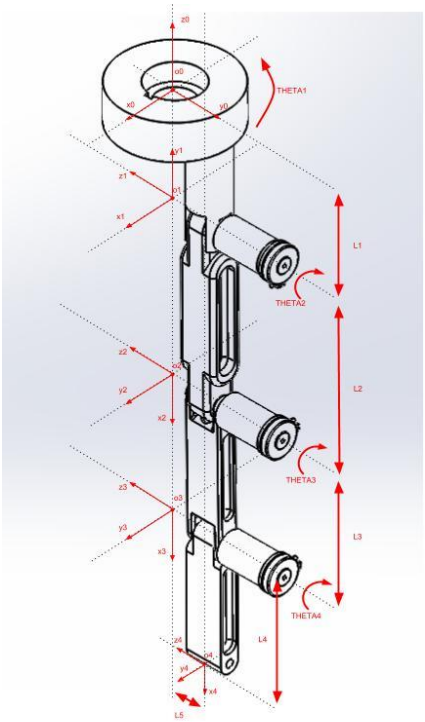
Uzunlukların belirlenmesinin ardından kinematik modelleme aşamasına geçilmiştir.

2.2. Kinematik Modelleme

Robot kolun 3-boyutlu uzayda belirli bir noktaya gitmesini sağlayacak motor pozisyonlarının belirlenmesi, robota ait ters kinematik modeli ile sağlanır. Model çıkarımında ilk olarak Denavit-Hartenberg Parametreleri belirlenmelidir. Bu parametreler yardımıyla ilk olarak ileri kinematik model, ardından ise ters kinematik model elde edilir [3].

2.2.1. İleri kinematik

Robotun çizimi Şekil 2.2'de görülmektedir. Denavit-Hartenberg Parametreleri bu çizime göre oluşturulmuştur.



Şekil 2.2: Süt sağım robotu eksen atamaları.

Eklemlere ilişkin eksen atamaları Denavith-Hartenberg Parametre çıkarımına uygun şekilde yapılmıştır. Her eklemin Z ekseni, dönme eksenini belirtmektedir. Elde edilen parametreler Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2: Süt sağım robotu Denevith-Hertenberg tablosu.

	a	α	d	θ
1	0	$-90°$	$-L1$	ϑ_1^*
2	$L2$	$0°$	0	$\vartheta_2^* - 90°$
3	$L3$	$0°$	0	ϑ_3^*
4	$L4$	$0°$	$L5$	ϑ_4^*

İleri Kinematik Modeli, Denavit-Hartenberg Tablosu ile elde edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen "base frame" ile "tool frame" arasındaki transformasyon matrisi Denklem 1.1'deki gibi edilmektedir. Matristeki d_x, d_y, d_z ifadeleride Denklem 1.2, 1.3 ve 1.4'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_1)\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & \cos(\theta_1)\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & \sin(\theta_1) & d_x \\ \sin(\theta_1)\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & \sin(\theta_1)\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & -\cos(\theta_1) & d_y \\ -\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & \sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & 0 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \textbf{(1.1)}$$

$$d_x = -L_5\sin(\theta_1) + \cos(\theta_1)\,[L_2\sin(\theta_2) + L_3\sin(\theta_2+\theta_3) + L_4\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4)] \quad \textbf{(1.2)}$$

$$d_y = L_5\cos(\theta_1) + \sin(\theta_1)\,[L_2\sin(\theta_2) + L_3\sin(\theta_2+\theta_3) + L_4\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4)] \quad \textbf{(1.3)}$$

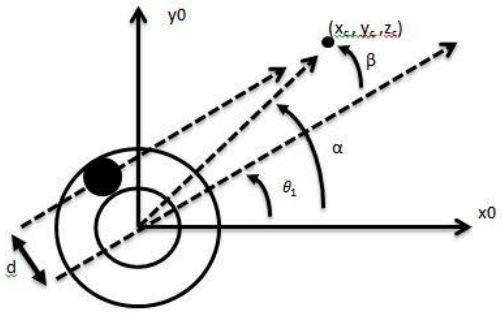
$$d_z = -L_1 - L_2\cos(\theta_2) - L_3\cos(\theta_2+\theta_3) - L_4\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) \quad \textbf{(1.4)}$$

Transformasyon matrisinde ilk 3x3'lük kısım uç noktanın motor pozisyonlarına göre oryantasyonunu, son sütunun ilk 3 satırı ise uç noktanın motor pozisyonlarına göre konumunu vermektedir.

2.2.2. Ters kinematik

Transformasyon matrisi, lineer olmayan terimlerin oldukça fazla olduğu bir yapı olarak karşımıza çıkmıştır. Belirli bir referans transformasyon matrisine göre motor pozisyonlarının elde edilmesi oldukça zordur. Bu nedenle, farklı bir yaklaşım ile konu ele alınmıştır. Bu yaklaşım, hem geometrik hem de analitik çözüm içermektedir.

İlk eklem açısı geometrik olarak incelenmiştir. Açı hesaplanırken Şekil 2.3'teki yapı kullanılmıştır.



Şekil 2.3: Robot üstten görünüm.

Birinci eklemde, dönme ekseni ile robot kol arasında bir eksen kaçıklığı olduğu için motor açısı, iki açı cinsinden ifade edilmiştir.

$$\theta_1 = \alpha - \beta \tag{1.5}$$

Burada α hedef noktanın x ve y koordinatlarına bağlı olarak elde edilebilir.

$$\alpha = atan2(y_c, x_c) \tag{1.6}$$

β açısı ise eksen kaçıklığı ve hedef noktanın xy düzlemine izdüşüm halinin orjine olan uzaklığı ile ifade edilebilir.

$$\beta = atan2(d, \sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d^2}) \tag{1.7}$$

$$\theta_1 = atan2(y_c, x_c) - atan2(d, \sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d^2}) \tag{1.8}$$

Ters kinematikte ilk ekleme ait açı hesaplandıktan sonra, diğer eklemlere geçilmiştir. Diğer eklemlerin açıları hesaplanırken, son eklemin yere paralel olma koşulu göz önüne alınmıştır. Yere paralel olma şartı, bazı kısıtları beraberinde getirmektedir. Bu kısıtların beraberinde getirdiği problemlerden en önemlisi çalışma uzayının daralmasıdır.

İlk ekleme ait açı geometrik yaklaşımla incelenmişti. Diğer eklemlere ait açılar ise analitik yöntemle elde edilmiştir. Ancak hesaplamaya geçilmeden önce kısıtlara ilişkin ifadeler oluşturulmuştur. Bunlardan ilki yere paralel olma koşulunu sağlayan son üç ekleme ait açıların toplam ifadesidir.

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = \frac{\pi}{2} \tag{1.9}$$

İkinci kısıt, ikinci link ile üçüncü link uzunluklarının birbirine eşit olmasıdır.

$$L_2 = L_3 \tag{1.10}$$

Üçüncü kısıt ise ileri kinematik ile elde edilen transformasyon matrisinin iki satırının lineer bağımlı olmasından kaynaklanmaktadır. Burada çözüm yapılırken matrisin son sütun ilk üç satır elemanı kullanılmıştır. Ancak bu üç elemandan iki tanesi birbirine lineer bağımlıdır. Elimizde iki denklem, üç bilinmeyen bulunduğundan çözüm elde edilemez. Bu kısıtı aşmak için, son iki eklemin birbirine bağlı hareket etmesi sağlanmıştır. Aşağıdaki ilişki kullanılmıştır.

$$2\theta_3 = \theta_4 \tag{1.11}$$

Son üç eklem açısını hesaplamak için kullanılan denklemler transformasyon matrisinden elde edilmiştir.

$$d_x = -L_5 \sin(\theta_1) + \cos(\theta_1)\,[L_2 \sin(\theta_2) + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)] \tag{1.12}$$

$$d_y = L_5 \cos(\theta_1) + \sin(\theta_1)\,[L_2 \sin(\theta_2) + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)] \tag{1.13}$$

$$d_z = -L_1 - L_2 \cos(\theta_2) - L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) - L_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \tag{1.14}$$

Denklemler düzenlenirse;

$$\frac{d_x + L_5 \sin(\theta_1)}{\cos(\theta_1)} - L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = L_2 \sin(\theta_2) + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \tag{1.15}$$

$$\frac{d_y + L_5 \cos(\theta_1)}{\sin(\theta_1)} - L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = L_2 \sin(\theta_2) + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \tag{1.16}$$

$$-d_z - L_1 - L_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = L_2 \cos(\theta_2) + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \tag{1.17}$$

Denklemlere bakıldığında (1.10.) ve (1.11.) numaralı denklemlerde θ_1 açısına göre belirsizlik durumları oluşmaktadır. Bu nedenle analitik çözüm θ_1 açısının sonucuna göre şekillenmektedir.

Birinci eksen açısının $\theta_1 \neq {}^{\pi}/_{2}$ || $\theta_1 \neq {}^{-\pi}/_{2}$ olması durumunda

Eğer $\theta_1 \neq {}^{\pi}/_{2}$ veya $\theta_1 \neq {}^{-\pi}/_{2}$ ise (1.10.) ve (1.12.) numaralı denklemler yardımıyla ve kısıtlar göz önünde bulundurularak çözüm yapıldığında;

$$\frac{\dfrac{d_x + L_5 \sin(\theta_1)}{\cos(\theta_1)} - L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)}{-d_z - L_1 - L_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)} = \frac{L_2 \sin(\theta_2) + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)}{L_2 \cos(\theta_2) + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)} \tag{1.18}$$

Burada trigonometrik toplam formülleri kullanılırsa;

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{2L_2 * \sin\left(\dfrac{2\theta_2 + \theta_3}{2}\right) * \cos(\theta_3)}{2L_2 * \cos\left(\dfrac{2\theta_2 + \theta_3}{2}\right) * \cos(\theta_3)} \tag{1.19}$$

$$A_1 = \frac{d_x + L_5 \sin(\theta_1)}{\cos(\theta_1)} - L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad \textbf{(1.20)}$$

$$A_2 = -d_z - L_1 - L_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad \textbf{(1.21)}$$

Elde edilir. Burada da başka bir kısıt ortaya çıkmaktadır. Tüm elde edilen denklemler sonuçta $\theta_3$açısının $\pi/2$ veya $-\pi/2$ çıkması durumunda geçersiz olmaktadır. Eğer bu kısıt sağlanırsa;

$$\theta_2 = 1.2 * atan2(A_1, A_2) - \frac{\pi}{10} \quad \textbf{(1.22)}$$

$$\theta_3 = \frac{\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 - \theta_2}{3} = \frac{\frac{\pi}{2} - \theta_2}{3} \quad \textbf{(1.23)}$$

$$\theta_4 = 2\theta_3 \quad \textbf{(1.24)}$$

Birinci eksen açısının $\boldsymbol{\theta_1 = \pi/2}$ || $\boldsymbol{\theta_1 = -\pi/2}$ olması durumunda

Eğer $\theta_1 = \pi/2$ veya $\theta_1 = -\pi/2$ ise Denklem 1.11 ve Denkelem 1.12 kullanılarak ve Denklem 1.9 ve Denklem 1.10 daki kısıtlar kullanılarak çözüm yapıldığında;

$$\frac{\frac{d_y + L_5 \sin(\theta_1)}{\cos(\theta_1)} - L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)}{-d_z - L_1 - L_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)} = \frac{L_2 \sin(\theta_2) + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)}{L_2 \cos(\theta_2) + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)} \quad \textbf{(1.25)}$$

Burada trigonometrik toplam formülleri kullanılırsa;

$$\frac{A_3}{A_4} = \frac{2L_2 * \sin\left(\frac{2\theta_2 + \theta_3}{2}\right) * \cos(\theta_3)}{2L_2 * \cos\left(\frac{2\theta_2 + \theta_3}{2}\right) * \cos(\theta_3)} \quad \textbf{(1.26)}$$

$$A_3 = \frac{d_y + L_5 \cos(\theta_1)}{\sin(\theta_1)} - L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = d_y - L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad \textbf{(1.27)}$$

$$A_4 = -d_z - L_1 - L_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad \textbf{(1.28)}$$

Burada da yine önceki çözüme benzer şekilde $\theta_3$açısının $\pi/2$ veya $-\pi/2$ çıkması durumunda denklemler geçersiz olmaktadır. Eğer bu koşul sağlanırsa;

$$\theta_2 = 1.2 * atan2(A_3, A_4) - \frac{\pi}{10} \quad \textbf{(1.29)}$$

$$\theta_3 = \frac{\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 - \theta_2}{3} = \frac{\frac{\pi}{2} - \theta_2}{3} \quad \textbf{(1.30)}$$

$$\theta_4 = 2\theta_3 \quad \textbf{(1.31)}$$

Bu çözümler ışığında simülasyon yapılmış ve verilen referans noktalarına göre robotun nasıl hareket ettiği gözlenmiştir. Son linkin yere paralel olma şartından gelen son üç eklem açısının

toplamının $\pi/2$ olma durumu nedeniyle robot uç noktasının verilen referans noktalarına çoğu bölgede gidemediği görülmüştür. Bu sonuç robotun çalışma uzayını oldukça küçültmektedir. Çalışma uzayını genişletmek adına, yere paralel olma durumu biraz esnek hale getirilmiştir.

A. Eğer hedef noktaya robotun uç noktası erişememişse ve bu hedef nokta robotun erişim alanı içinde ise dört durum söz konusudur.
B. Hedef noktanın X-ekseninin pozitif kısmında olması ve uç noktanın hedef noktaya X-eksenine göre geride kalması,
C. Hedef noktanın X-ekseninin pozitif kısmında olması ve uç noktanın hedef noktadan X-eksenine göre ileride olması,
D. Hedef noktanın X-ekseninin negatif kısmında olması ve uç noktanın hedef noktaya X-eksenine göre geride kalması.

Hedef noktanın X-ekseninin negatif kısmında olması ve uç noktanın hedef noktadan X-eksenine göre ileride olması durumlarıdır.

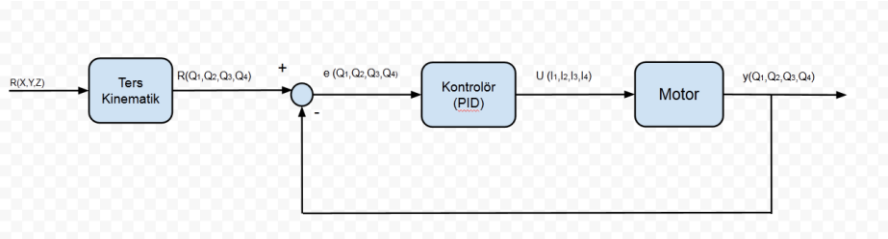
(A) ve (C) durumları oluştuğunda, son üç ekleme ait açıların toplamı belirli bir adım oranında azaltılır. Azaltma sonrasında, uç noktanın koordinatları hesaplanır ve hedef noktaya varıp varmadığı incelenir. Eğer ulaşamamışsa azaltma devam ettirilir.

(B) ve (D) durumları oluştuğunda, son üç ekleme ait açıların toplamı belirli bir adım oranında arttırılır. Arttırma sonrasında, azaltma da olduğu gibi uç noktanın koordinatları ileri kinematik ile hesaplanır ve hedefe varıp varmadığı incelenir. Bu arttırma hedef noktaya erişinceye kadar devam ettirilir.

Bu yöntem yere paralelliğin bozulmasına neden olsa da, çalışma uzayını önemli ölçüde arttırmıştır. Ancak hala robot kolun erişim alanı içinde bulunan ve yere paralel bir biçimde ulaşamadığı noktalar bulunmaktadır. Bu nedenle robotun etkileşime geçeceği nesneler, ulaşılabilen noktalara yerleştirilecektir.

2.2.3. Kinematik simülasyonu

Simülasyon MATLAB Simulink ortamında oluşturulmuştur. Yukarıda bahsedilen tüm denklemler Simulink MATLAB Function bloğu içinde MATLAB sentaksına uygun bir biçimde kodlanmıştır. Simülasyonda 3 boyutlu uzayda çeşitli nokta referansları verilerek robotun uç noktasının konumu incelenmiştir. Referans noktalar, robotun hem erişim alanı içinde hem de erişim alanı dışında olarak seçilmiştir. Sistemin blok diyagramı Şekil 2.4'te görülmektedir.



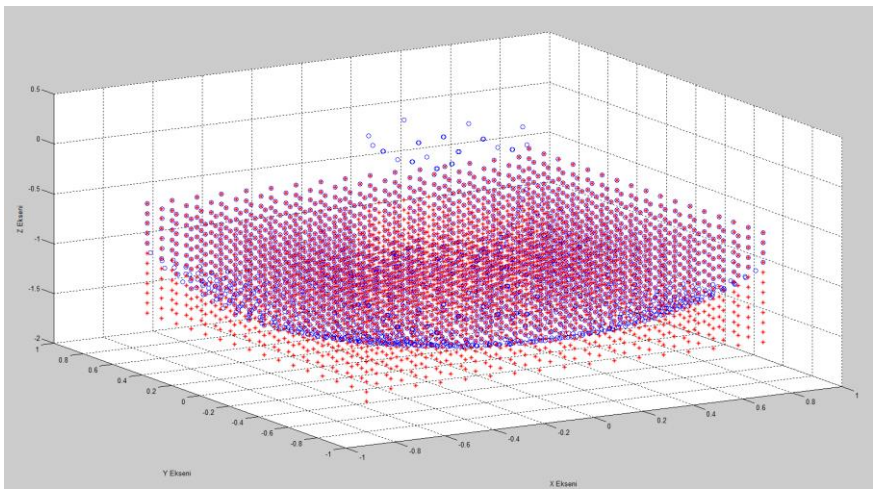
Şekil 2.4: Kontrol sistemi blok diayagramı.

Erişim alanı içindeki noktaların büyük bir çoğunluğuna robot uç noktası ulaşmıştır. Erişim alanı dışındaki noktalar ikiye ayrılmıştır. İlk bölüm, robotun ilk ekleminin iç çeperinde kalan noktalar, diğer bölüm ise robot kolun tam açık halinde iken bile ulaşamadığı noktalardır.

Robot kolun tam açık halde iken bile erişemediği noktalarda, robot kol sadece o noktaya yöneltilmektedir. İlk eklemin iç çeperi içinde kalan noktalarda, matematiksel ifadelerde köklü terimler bulunduğundan hatalar meydana gelmiştir. Bu hataları önlemek için, robot kol ilk konumuna götürülmektedir.

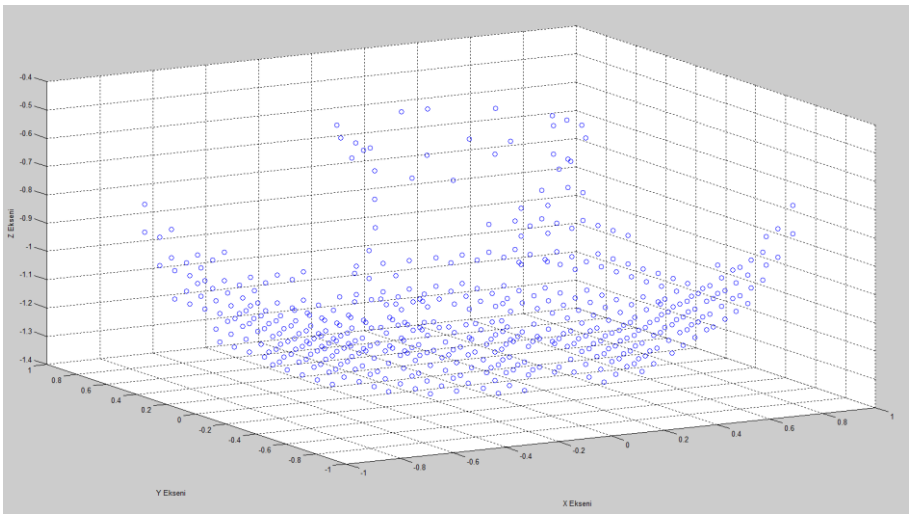
Ayrıca yukarıda bahsedildiği gibi olabildiğince çok noktaya erişim sağlanabilmesi için paralellik esnetilmiştir. Referans noktaya erişebilmek için küçük adım aralıklarıyla paralellik değiştirilmektedir. Bazı limit noktalarda, elde edilen son üç ekleme ait açıların toplamı hesaplama sırasında tekrara girmektedir. Bu durum kodun sonsuz döngüye girmesine neden olmaktadır. Bu problemi aşmak için, eğer hesaplanan toplam, iki önceki açı toplamına eşitse kod durdurulmuştur.

Simülasyon X-ekseninde [-0,8, 0,8], Y-ekseninde [-0,8, 0,8], Z-ekseninde [-1,6, -0,5] aralıklarında gerçekleştirildiğinde Şekil 2.5'teki sonuçlar elde edilmektedir.



Şekil 2.5: Referans noktalar ile robot uç noktalarının karşılaştırılması.

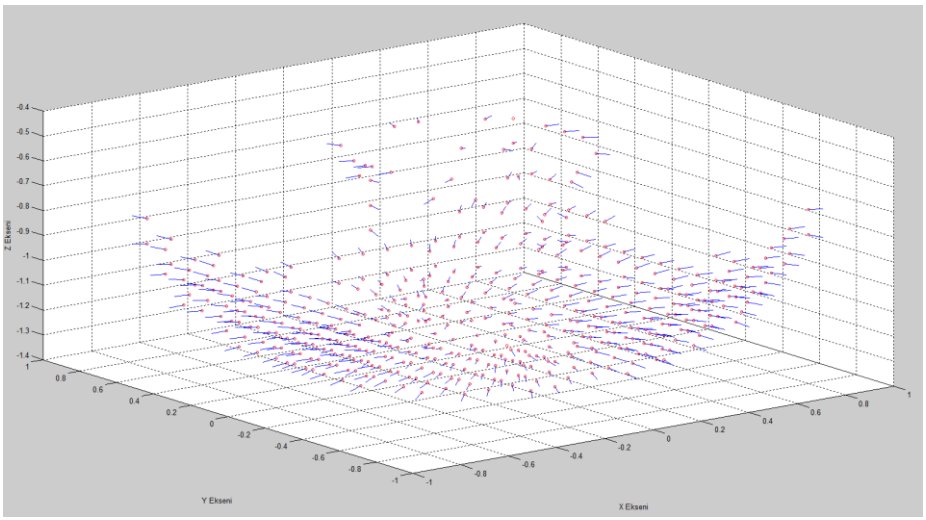
Şekil 2.5'te Robot kol uç noktasına verilen tüm referans noktalar kırmızı olarak gösterilmektedir. Mavi ile gösterilenler ise robot kolun uç nokta pozisyonlarını göstermektedir. Şekil 2.6'da görüldüğü üzere, robot kol en altta kalan referans noktalara erişememiştir. Daha detaylı incelemek için, ulaşılan noktalar gösterilirse;



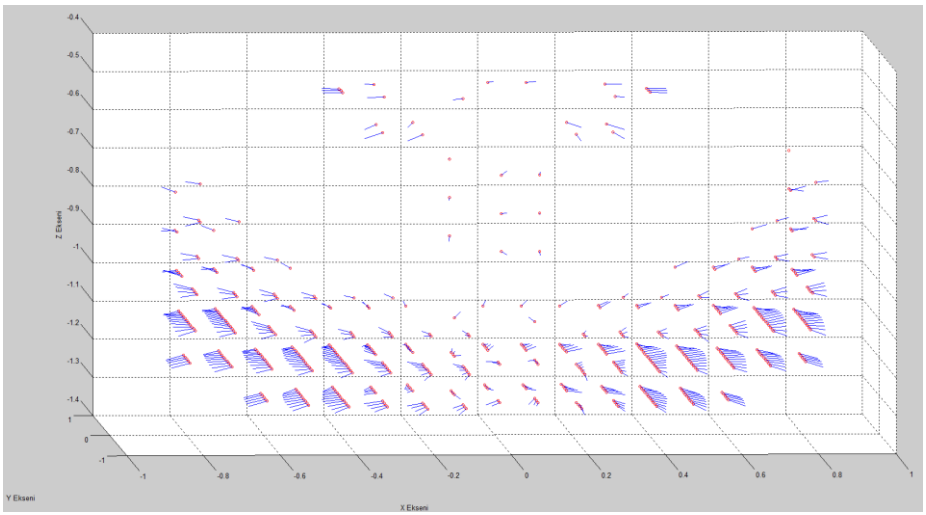
Şekil 2.6: Erişilen noktalar.

Bu noktalardaki robot kolun yönelimleri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Daha iyi görüş için bu grafik farklı açılardan gösterilmiştir.

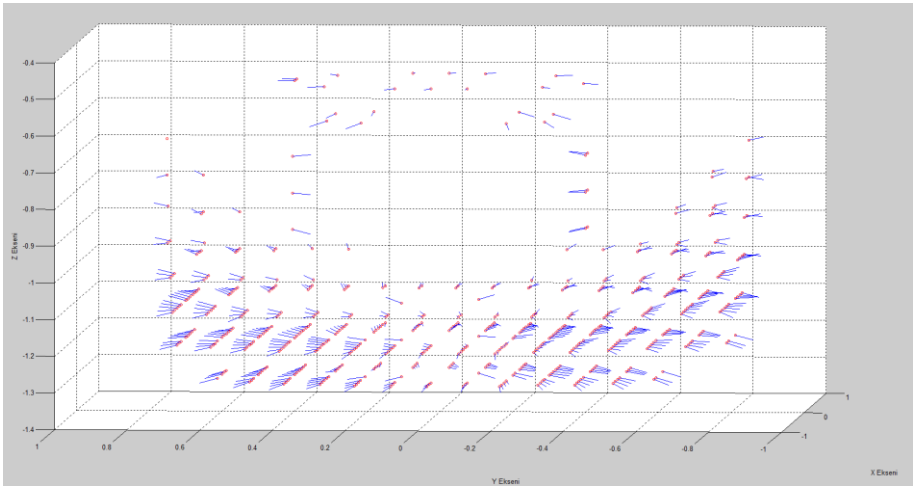
Şekil 2.7, 2.8, 2.9 ve 2.10'dan da görüldüğü üzere robot kol belli X,Y,Z aralıklarında yere tam paralel veya paralele yakın bir şekilde konumlandırılabilmektedir. Eğer robot kolun etkileşime geçeceği nesneler bu referans noktalara yerleştirilirse, sorunsuz bir biçimde robot kol işlevini yerine getirebilir.



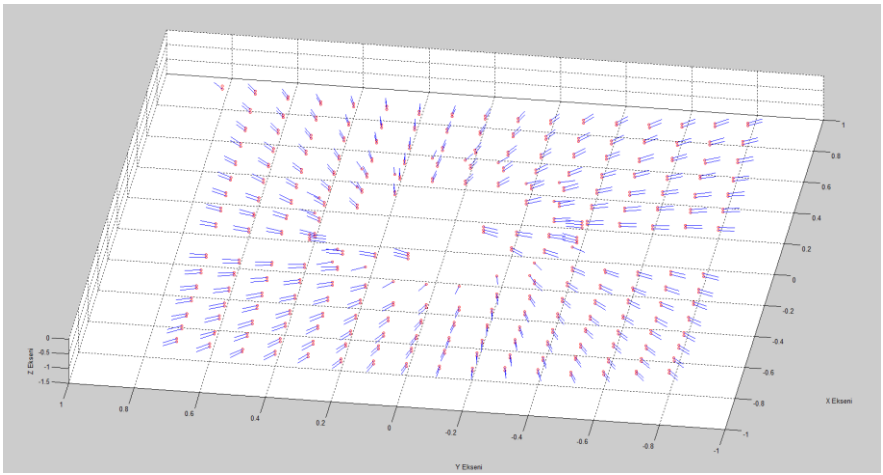
Şekil 2.7: Ulaşılan noktalar ve yönelimler.



Şekil 2.8: Ulaşılan noktalar ve yönelimler (X-ekseni).



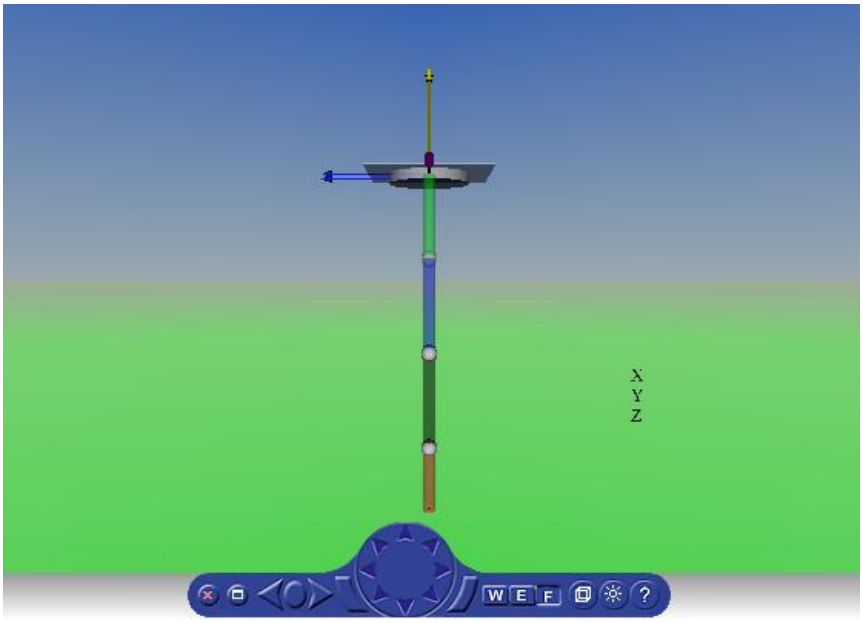
Şekil 2.9: Ulaşılan noktalar ve yönelimler (Y-ekseni)



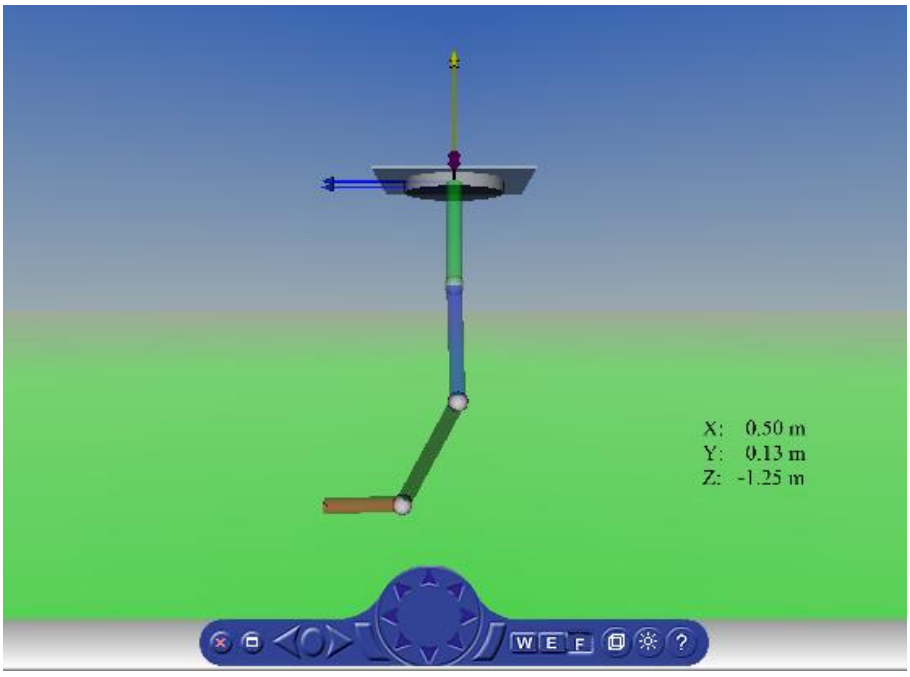
Şekil 2.10: Ulaşılan noktalar ve yönelimler (Z-ekseni).

Grafiklerden elde edilen çıktıları kuvvetlendirmek amaçlı olarak V-Realm Builder ile robot kolun 3-boyutlu çizimi yapılmıştır. Çizim Şekil 11'de görülmektedir. Simülasyonlarda bu çizimlerden yararlanılarak robot kolun istenilen konumlardaki eksen açıları üç boyutlu ortamda gözlenmiştir.

Grafikteki yere paralelliği sağlayan noktalardan bir tanesi referans olarak animasyona gönderildiğinde robot kol Şekil 2.12'deki yönelimi almaktadır.



Şekil 2.11: Robot kolun 3-boyutlu çizimi.



Şekil 2.12: [0,5, 0,13, -1,25] Referans noktasına erişim.

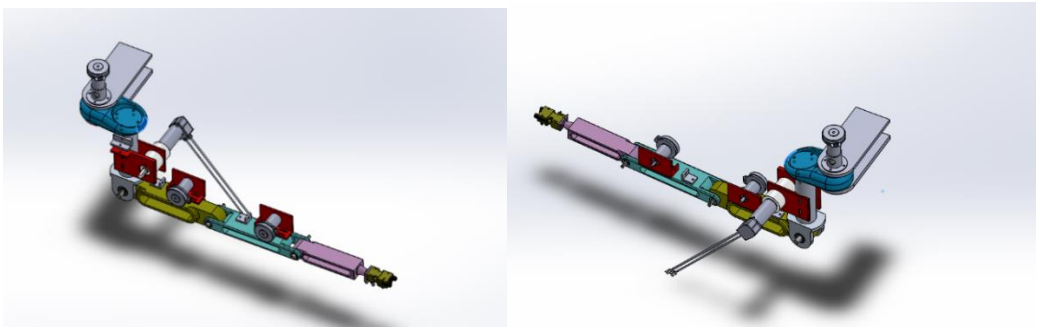
3. TASARIM

3.1. Mekanik tasarım

3.1.1. Motor, redüktör ve enkoder seçimi

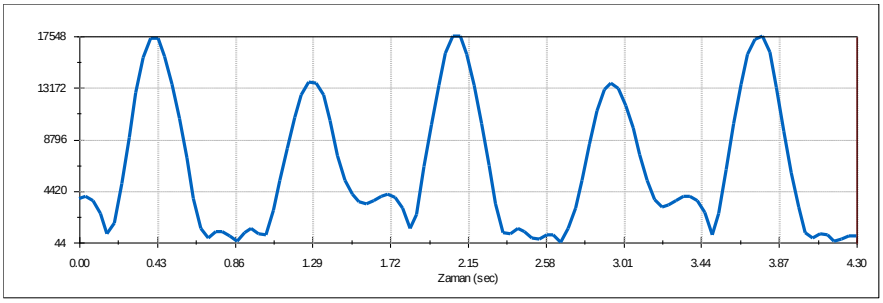
Bu projede Maxon Motor firmasının EC Motor kategorisinden servo motorlar kullanılmıştır. Kullanılan motorların seçiminde ilk olarak tork analizi yapılmıştır. Yapılan tork analizleri sonucunda ortaya çıkan tork değerini karşılayabilecek motor ve redüktör kombinasyonları seçilmiştir.

Solidworks'de yapılan analizler sonucunda ortaya çıkan eksenler için istenilen yer değişimini istenilen zamanda alması için gerekli Tork-Zaman grafikleri birinci eksen için Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de, ikinci eksen için Şekil 3.3 ve 3.4'te, üçüncü eksen için Şekil 3.5 ve 3.6'da ve son olarak dördüncü eksen için Şekil 3.7 ve 3.8'de verilmiştir.

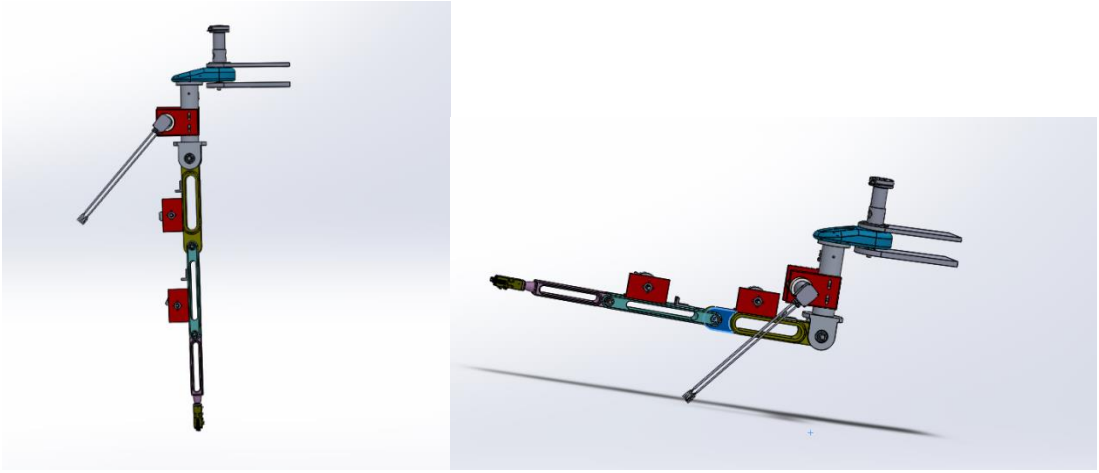


a) b)

Şekil 3.1: Birinci eksen tork analizi başlangıç durumu (a) ve bitiş durumu (b).

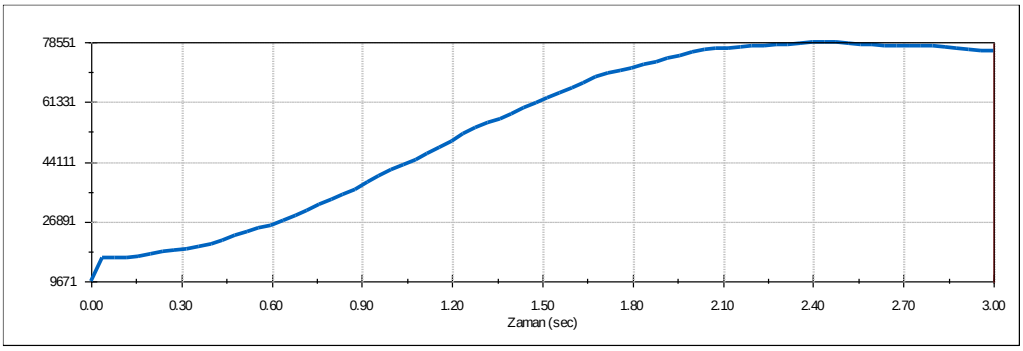


Şekil 3.2: Birinci eksen tork analizi (30 rpm hız ile 5 adet 180 derecelik hareket).

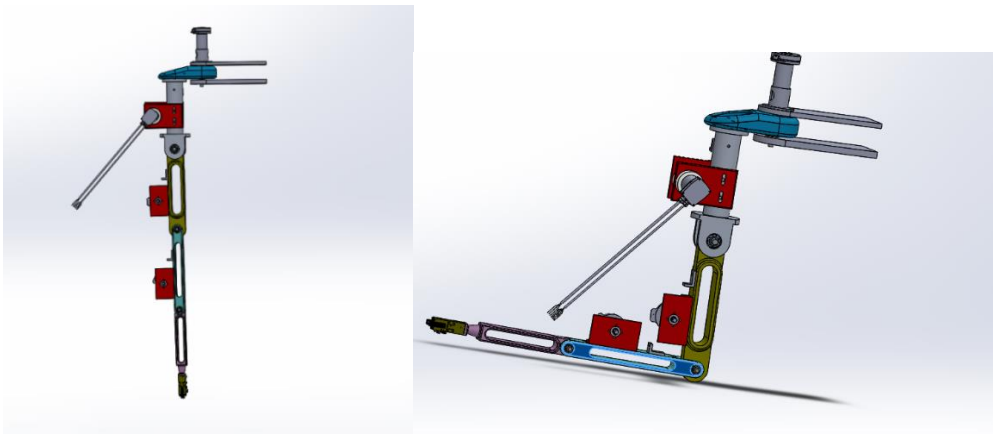


a) b)

Şekil 3.3: İkinci eksen tork analizi başlangıç (a) ve bitiş durumu (b).

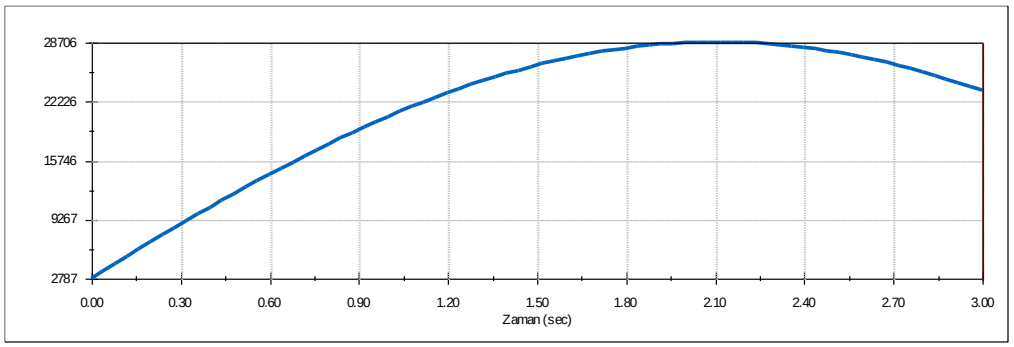


Şekil 3.4: İkinci eksen tork analizi (5 rpm hız ile 90 derecelik hareket).

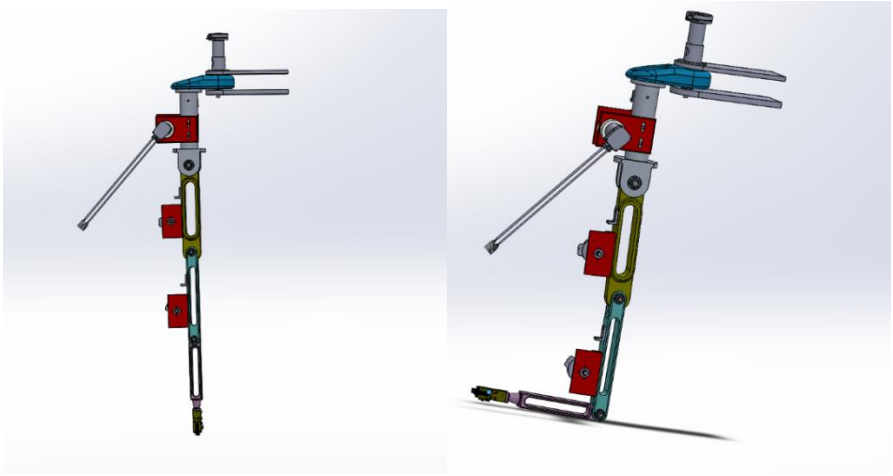


a) b)

Şekil 3.5: Üçüncü eksen tork analizi başlangıç (a) ve bitiş durumu (b).

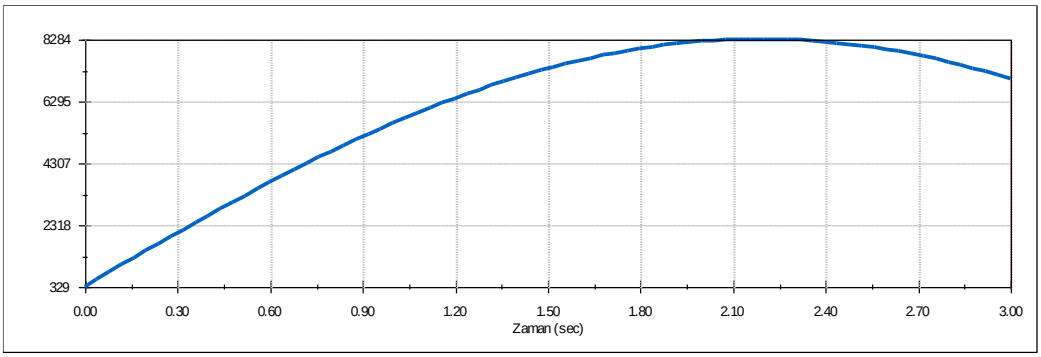


Şekil 3.6: Üçüncü eksen tork analizi (5 rpm hız ile 90 derecelik hareket).



a) b)

Şekil 3.7: Dördüncü eksen tork analizi başlangıç (a) ve bitiş durumu (b).



Şekil 3.8: Dördüncü eksen tork analizi (5 rpm hız ile 90 derecelik hareket).

Tork-Zaman grafiğinin elde edilmesinin ardından Maxon-Motor firmasının online katalogundan yapılan seçimde maliyetlerde gözönünde bulundurulduğunda seçilen motor, redüktör, enkonder kombinasyonu birinci, üçüncü ve dördüncü eksende maksimum 30 Nm tork üretebilecek kapasitede seçilmiştir. Kombinasyon bilgileri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Ayrıca kombinasyon 473369 kombinasyon numarası ile maxon online katalogdan kontrol edilebilir. Motor, Redüktör, Enkoder kombinasyonu Şekil 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.1: Birinci eksen motor, redüktör ve enkoder özellikleri.

	EC 90 Flat, Brushless 244879		Plenatary GearHead GP52C 223091
Motor Gücü	90 Watt	Çeivrme Oranı	66:1
Besleme Gerilimi	48 V	Max. Devamlı Tork	30
Max. Hız	5000 rpm	Max. Ani Tork	45
Max. Tork	533 mNm		Encoder MILE 800-6400 CPT (411965)
Max. Akım	2,27 A	Çözünürlük	3200
		Kanal Sayısı	2



a) b)

Şekil 3.9: Birinci eksen motor, redüktör ve enkoder (a) Yandan (b) Alttan

İkinci Eksenin Tork-Zaman grafiği incelendiğinde seçilmesi gereken motorun 80 Nm tork üretebilecek kapasitede olması gerekmektedir. Maxon-Motor firmasının katalogları incelendiğinde bu ihtiyacı karşılayabilecek olan motor, redüktör ve enkoder kombinasyonu 120 Nm tork üretebilecek kapasitede seçilmiştir. Kombinasyon bilgileri Tablo 2.4'te

verilmiştir. Ayrıca kombinasyon 276580 kombinasyon numarası ile maxon online katalogdan kontrol edilebilir. Motor, Redüktör, Enkoder kombinasyonu Şekil 3.10'da verilmiştir.

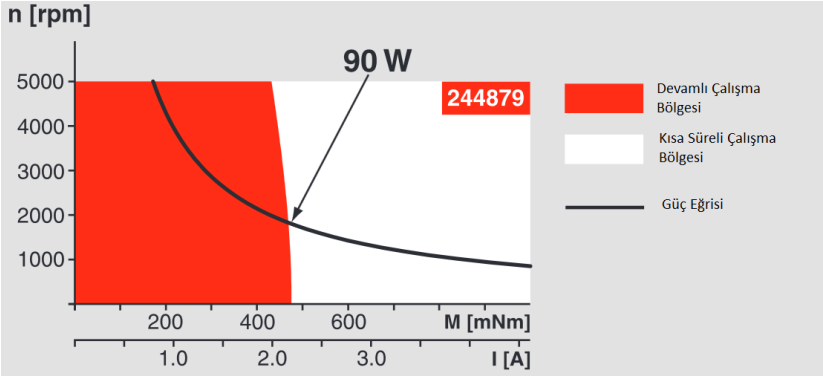
Tablo 3.2: İkinci eksen motor, redüktör ve enkoder özellikleri.

	EC 60 Flat, Brushless 167131		Plenatary GearHead GP81A 110413
Motor Gücü	400 Watt	Çevirme Oranı	308:1
Besleme Gerilimi	48 V	Max. Devamlı Tork	120
Max. Hız	7000 rpm	Max.Ani Tork	180
Max. Tork	830 mNm		Encoder (137959)
Max. Akım	5,85 A	Çözünürlük	500
		Kanal Sayısı	3

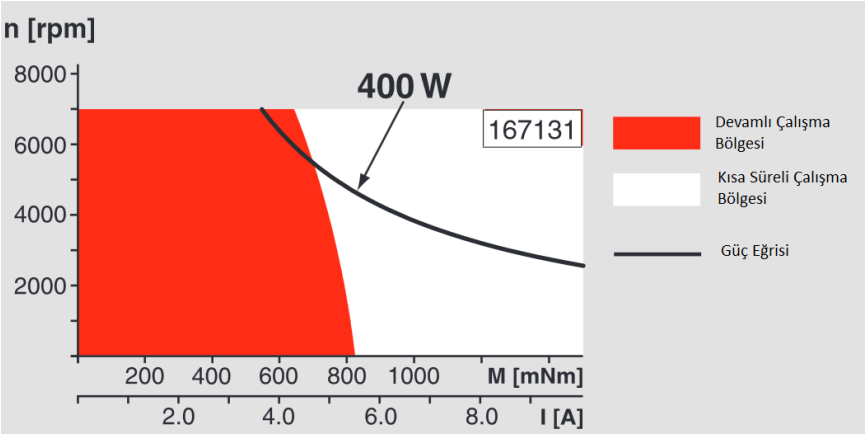


Şekil 3.10: İkinci eksen motor kombinasyonu yandan görünüm.

Motorların Tork-Hız karakteristikleri Şekil 3.11 [3] ve Şekil 3.12'de [4] verilmiştir.



Şekil 3.11: Birinci, üçüncü ve dördüncü eksen motor tork hız karakteristiği [4].

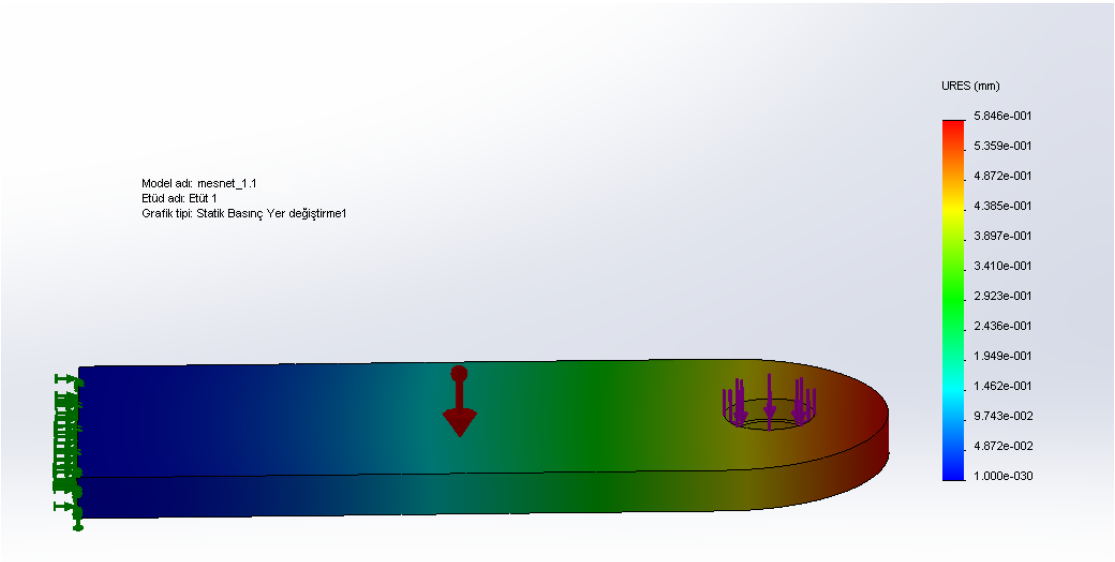


Şekil 3.12: İkinci eksen motoru tork-hız karateristiği [5].

3.1.2. Mekanik analizler (mukavemet analizi)

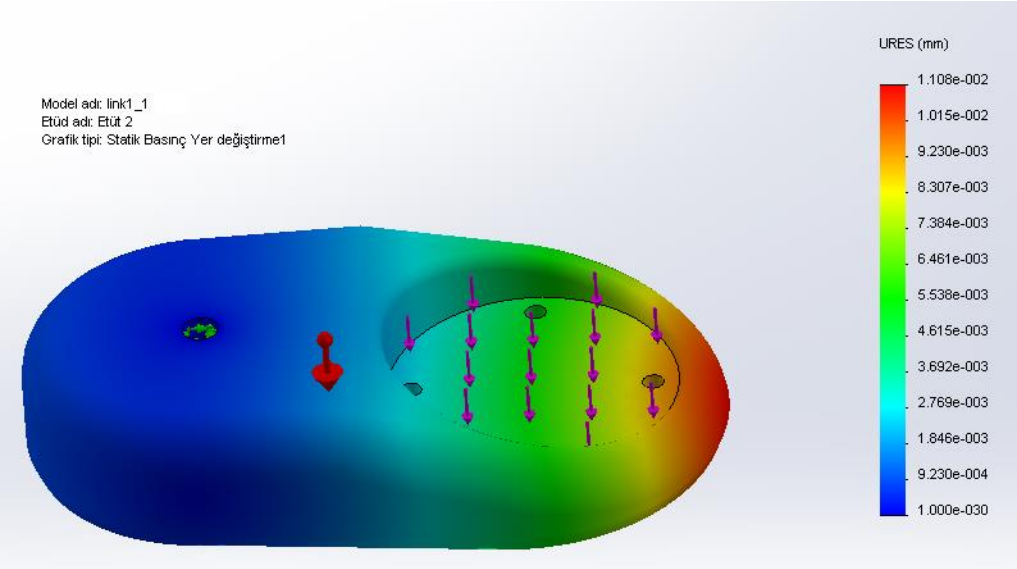
Bu bölümde süt sağım robotunun yük taşıyan ana parçalarının statik yer değiştirme analiz sonuçlarından bahsedilecektir. Çalışma kapsamında dinamik analiz yapılmamasının sebebi eksen hızlarının maksimum 10 rpm gibi düşük bir hıza sahip olmasıdır. Bu hızlarda dinamik analiz yapılmasına gerek görülmemiştir. Diğer statik analizler EK 5'te bulunmaktadır.

Üst bağlantı: Süt sağım robotunun bağlantı noktası ve birinci motorun bağlantı nokasınında bulunan iki adet paralel iki mesnet bulunmaktadır. Robotun toplam ağırlığı 30 kg'dır. Bağlantı noktasına 500 N bir kuvvet uygulanmıştır ve elde edilen analiz sonucuna göre maksimum yer değiştirme miktarı 0.5 mm olmaktadır. Maksimum yer değiştirme değeri ihmal edilebilir bir büyüklüktür.

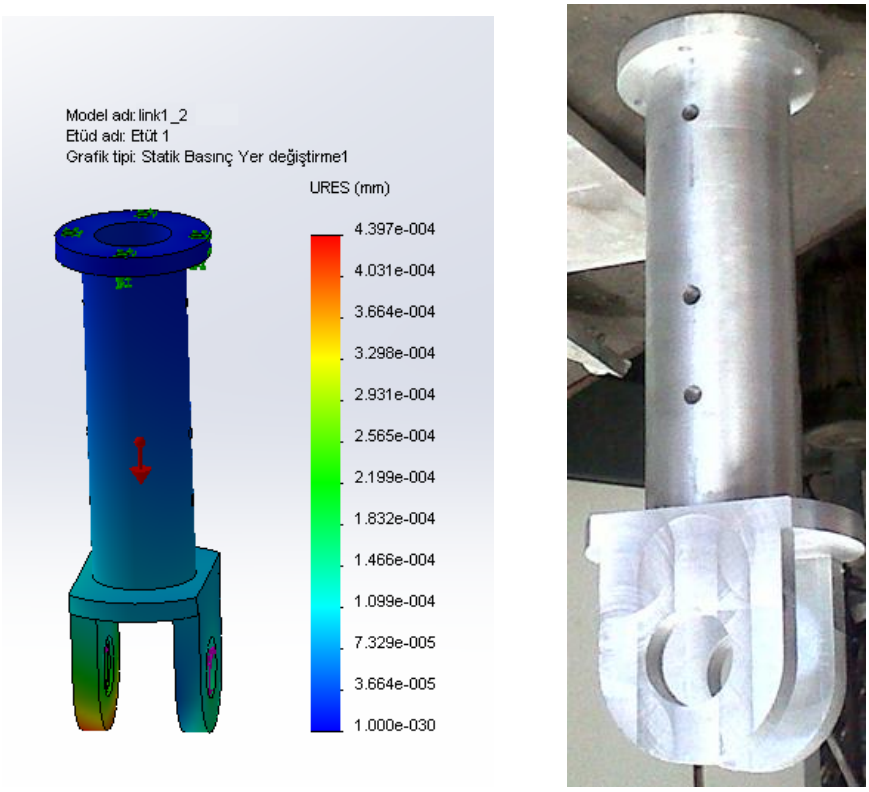


Şekil 3.13:Üst bağlantı mukavemet analizi.

Birinci link: Birinci döner eksen ile ikinci döner eksen arasındaki bağlantıyı sağlayan iki adet yapıdan oluşmaktadır. Parçalara 300 N yük uygulanmıştır. Test sonuçları Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de verilmiştir. İlk parçada maksimum yerdeğiştirme 0,011 mm, ikinci parçada ise 0,0004 mm olmaktadır. Analiz sonuçlarında ortaya çıkan sonuçlar ihmal edilebilir büyüklüktedirler.



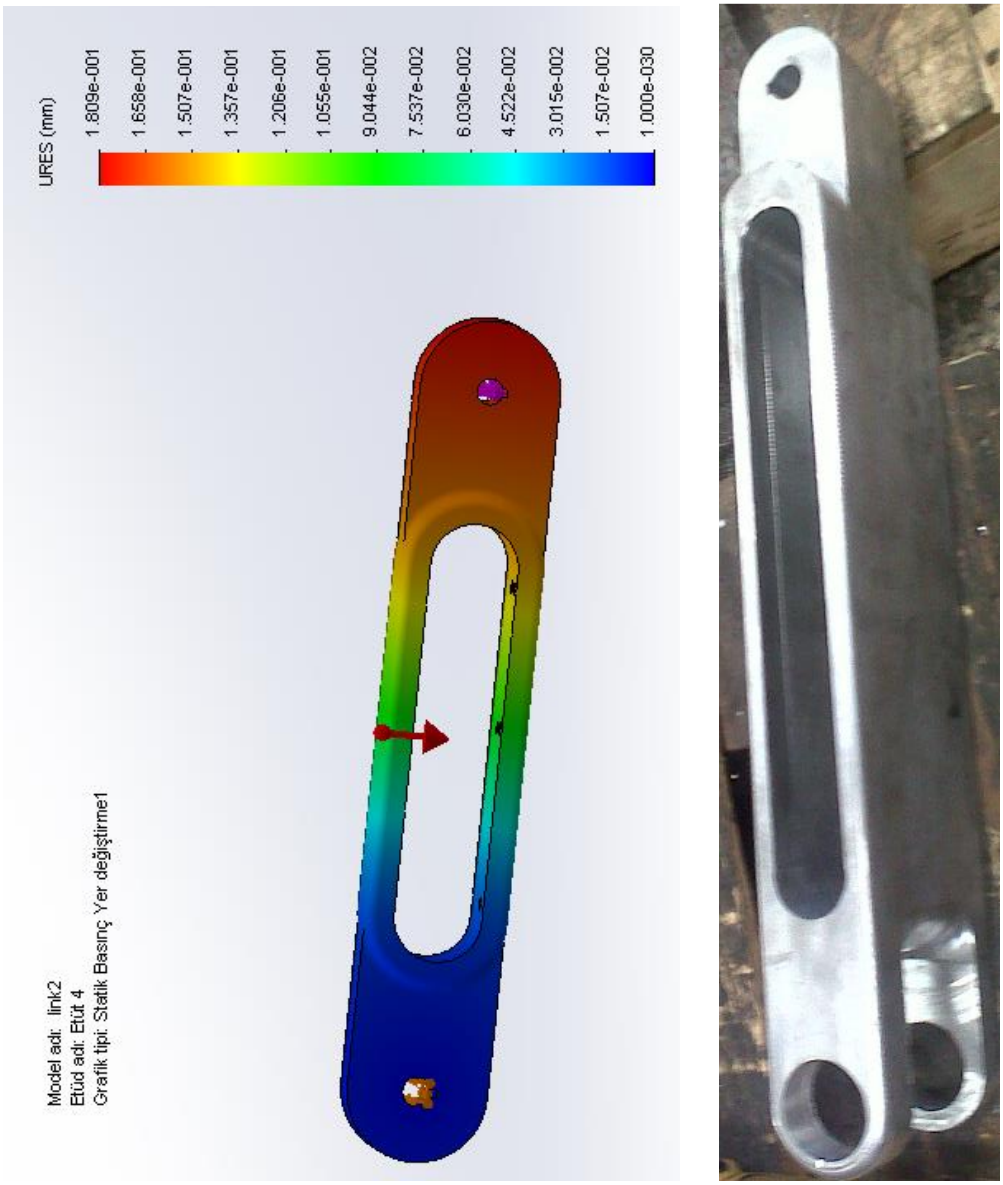
Şekil 3.14: Birinci link üst parça mukavemet analizi.



a) b)

Şekil 3.15: Birinci link alt parça mukavemet analizi.

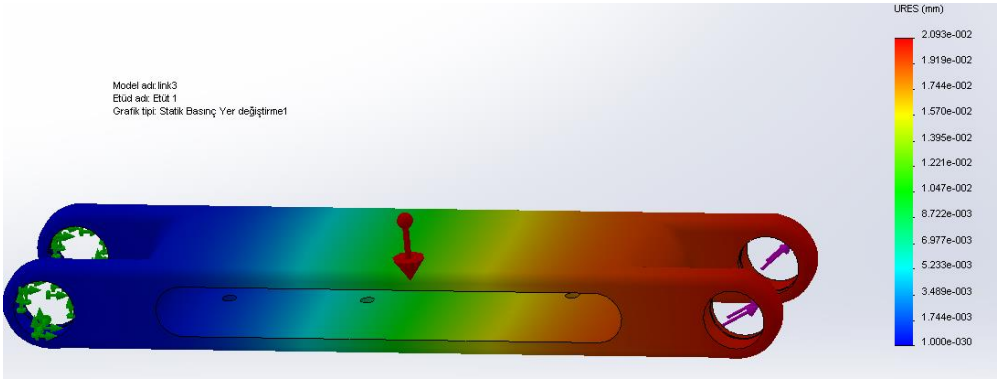
İkinci link: İkinci döner eksen ile üçüncü döner eksen arasındaki bağlantıyı sağlayan parça Şekil 3.16'da verilmiştir. Yapılan statik analizde yerçekimi kuvvetine ek olarak parçanın ucuna 200 N yük uygulanmıştır. Analiz sonucunda maksimum yerdeğiştirme 0,18 mm olarak elde edilmiştir. Ortaya çıkan değer ihmal edilebilir bir değerdir.



a) b)

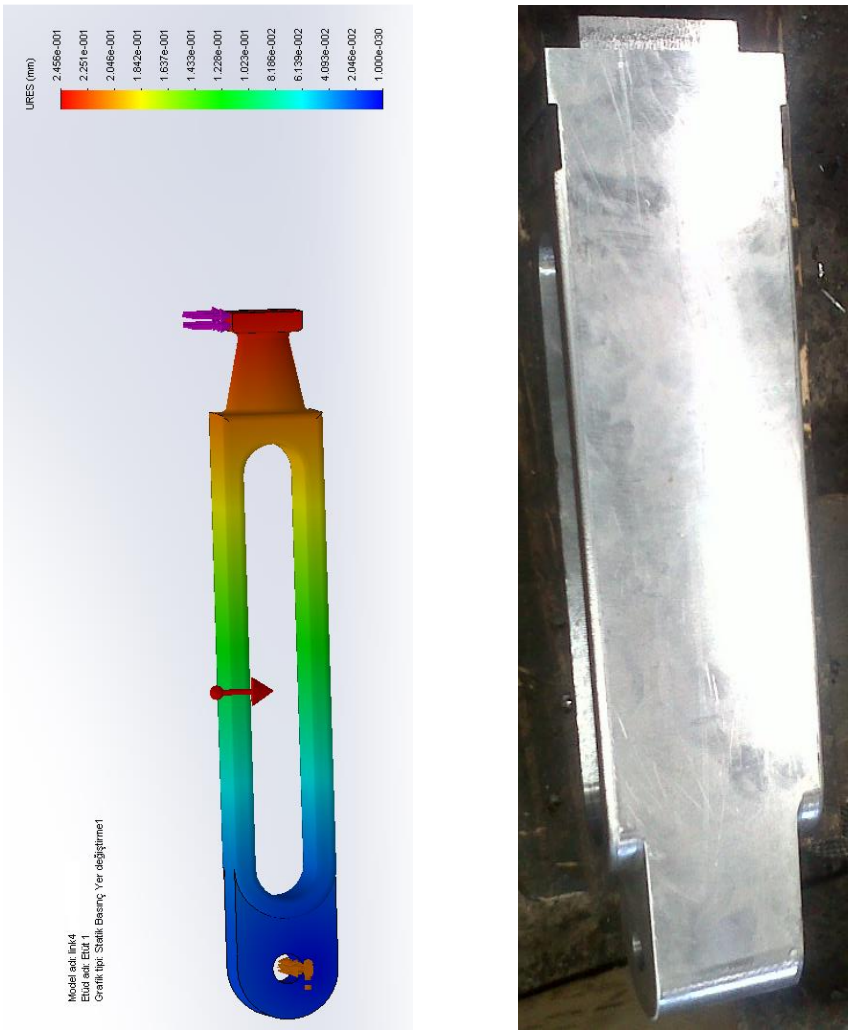
Şekil 3.16: İkinci link mukavemet analizi.

Üçüncü link: Üçüncü döner eksen ile dördüncü döner eksen arasındaki bağlantıyı sağlayan parça Şekil 3.17'de verilmiştir. Parçaya yerçekimi kuvvetine ek olarak uç noktaya 150 N yük uygulanmıştır. Yapılan statik analiz sonucunda maksimum yerdeğiştirme miktarı 0.02 mm olarak elde edilmiştir ve bu değer ihmal edilebilir bir değerdir.



Şekil 3.17: Üçüncü link mukavemet analizi.

Dördüncü link: Dördüncü döner eksen ile robotun uç kısmı arasındaki bağlantıyı sağlayan parça Şekil 3.18'de verilmiştir. Parçaya yerçekimi kuvvetine ek olarak uç noktaya 100 N kuvvet eklenmiştir. Yapılan statik analiz sonucunda maksimum yerdeğiştirme miktarı 0.026 mm olarak elde edilmiştir ve bu değer ihmal edilebilir bir değerdir.



a) b)

Şekil 3.18: Dördüncü link mukavemet analizi.

3.1.3. Kayış- Kasnak seçimi ve montaj aşaması

Kayış kasnak seçiminde ilk olarak kayış modeli seçilmiştir. Piyasada kolay bulunabilen T tipi kayış seçimi yapılmıştır. Bu kayışlar yüksek kuvvetleri taşıyabilme kapasitesine sahiptirler. Kayışların maksimum taşıması gereken yük miktarı hesaplamasında kasnak yarıçapı ile orantılı olarak Denklem 3.1 kullanılmıştır [6]. Diğer kuvvetler ihmal edilmiştir.

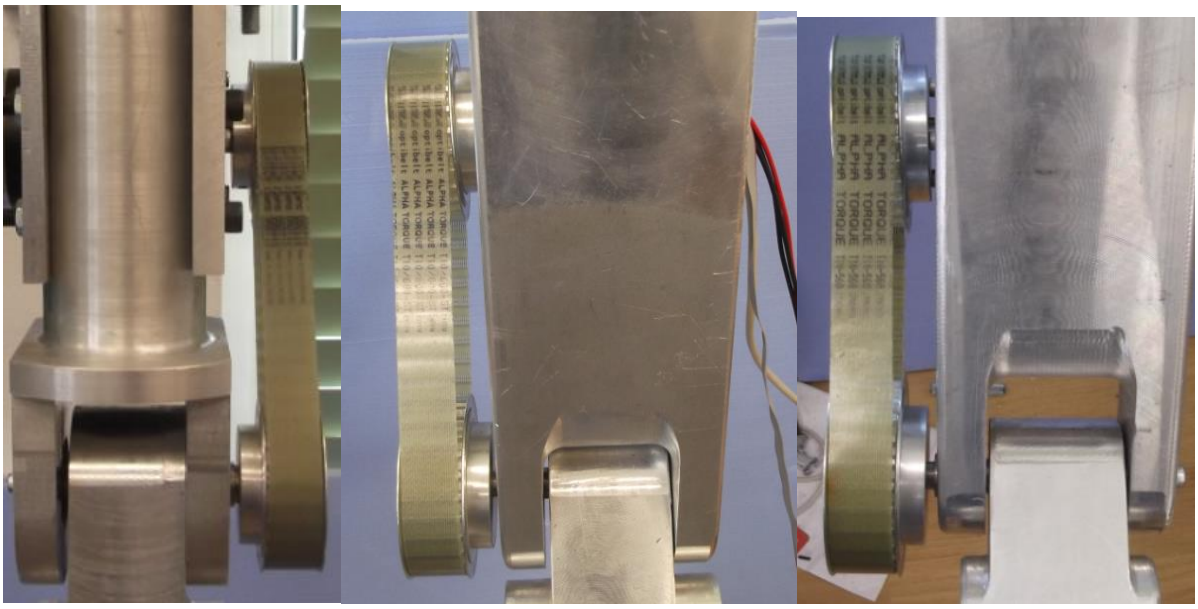
$$T=F.r \quad \textbf{(3.1)}$$

Gerekli tork miktarı maksimum 80 Nm olmaktadır. Bu şekilde yapılan iteratif hesaplamalar sonucunda 25mm genişlikte T10 kayış ve 27 dişli kasnak (4 cm yarıçaplı) kullanılmasında karar kılınmıştır. T10 kayışlar 2200 N yük taşıma kapasitesine sahiptirler [6]. Kullanılan kayışlar T10 660 mm x 25 mm, T10 600 mm x 25 mm, T10 560mm x 25 mm kayışlar kullanılmıştır.

Kayış Genişliği	b [mm]	16	25	32	50	75	100	150
Kuvvet Taşıma Kapasitesi	F_{adm} [N]	1400	2200	2800	4400	6600	8800	13200

Şekil 3.19: T10 kayış yük taşıma kapasitleri [7].

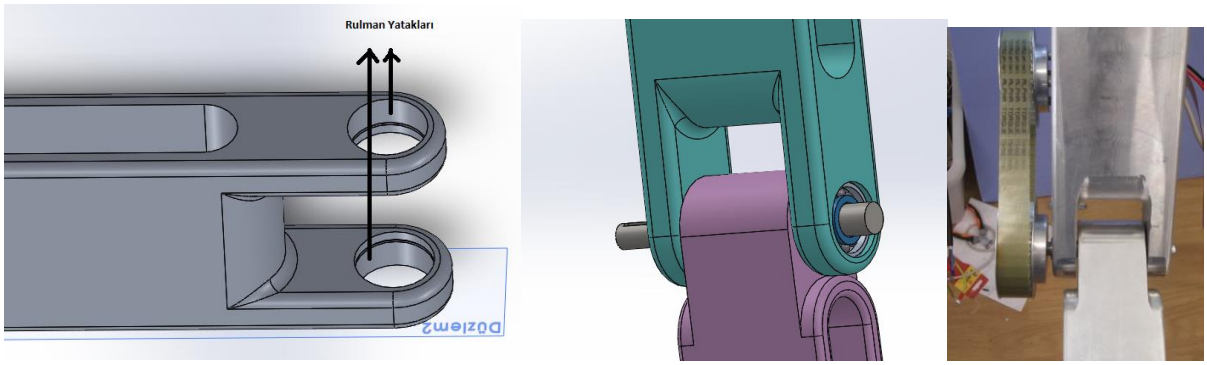
Kullanılan kayış-kasnak mekanizmalarının montaj sonrası durumu ve eksen montajları Şekil 3.20'de verilmiştir.



a) b) c)

Şekil 3.20: Kayış bağlantıları montaj (a)ikinci, (b)üçüncü, (c) dördüncü eksen.

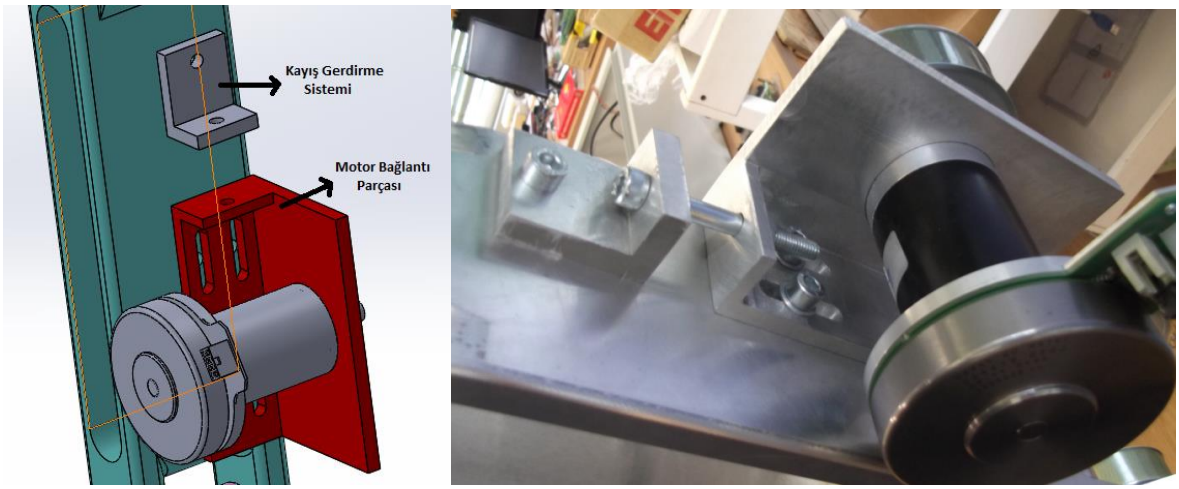
Süt Sağım Robotunun montajı sürecinde ilk olarak üçüncü döner eksenin montajı yapılmıştır. Döner eksen montajlarında ilk olarak rulman üçüncü ekleme montajlanmıştır. Daha sonra milin kamaları yerleştirilmiş ve diğer rulmanın montajı mile yapılmıştır. Bu aşamadan sonra dördüncü eklem bağlantı noktası ile üçüncü eklem bağlantı noktası birleştirilmiş, mil ve rulman birlikte monte edilerek iki eksenin montajı tamamlanmıştır. Daha sonra kasnakların montajı yapılmıştır. Montaj işlemi daha sonra sırasıyla üçüncü, ikinci ve birinci eksen olmak üzere aynı sıralama ile devam etmiştir.



a) b) c)

Şekil 3.21: Rulman yatakları ve eklem bağlantıları.

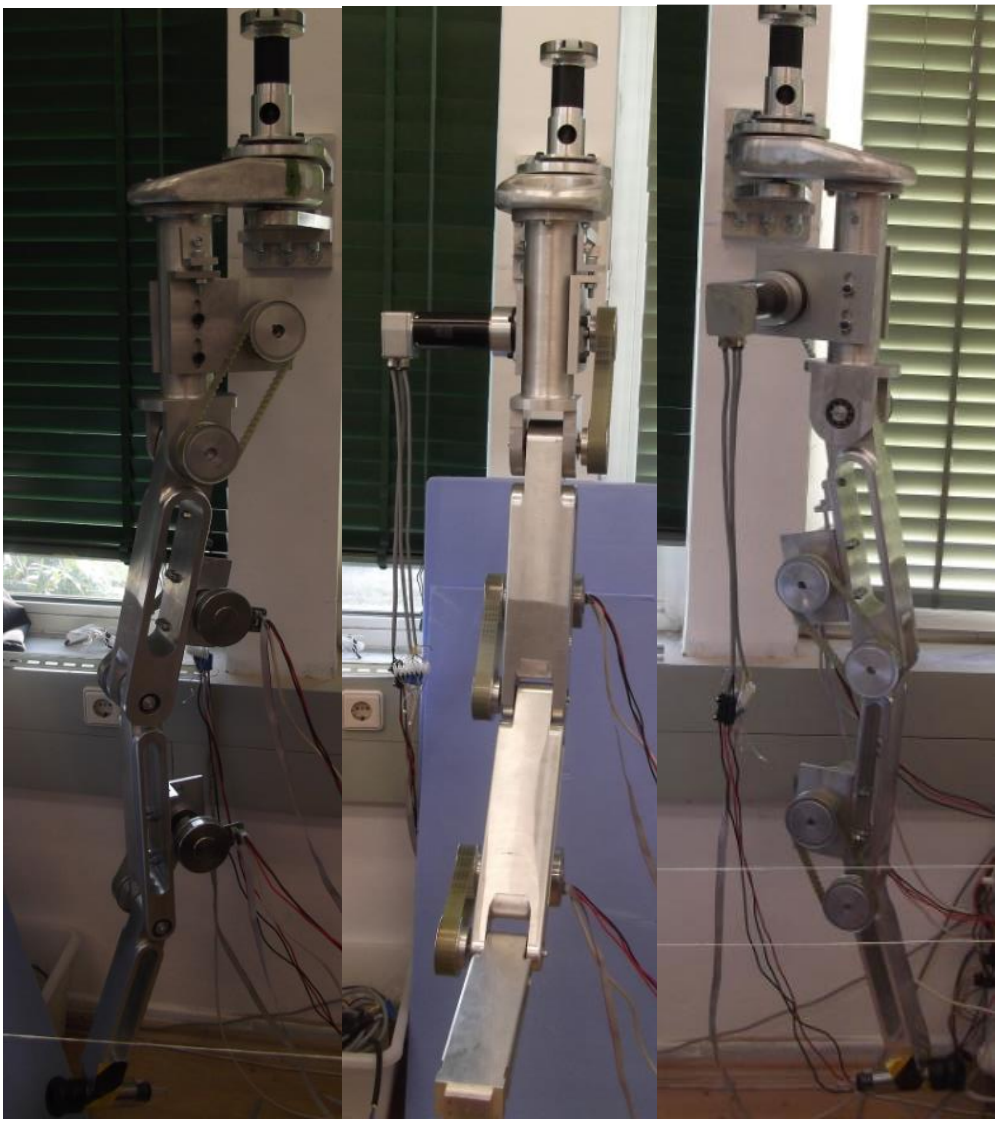
Döner eksenlerin montajının ardından motorların montajı gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında ilk olarak motor bağlantı parçaları eklemlere takılmış ancak tam olarak sabitlenmemiştir. Üst tarafta bulunan kayış gerdirme sistemi sayesinde motor bağlantı parçaları kayış istenilen gerginlik seviyesine gelinceye kadar yukarı çekilmiştir. Kayış gerginliği istenilen seviyeye gelince motor bağlantı parçasının montajı tam olarak yapılmaktadır.



a) b)

Şekil 3.22: Motor bağlantı parçası ve kayış gerdirme sistemi.

Montaj işlemlerinin ardından robotun genel görünümü Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23: Montaj sonrasında süt sağım robotu.

3.2. Elektronik Tasarım

3.2.1. Malzeme seçimleri

3.2.1.1. Haberleşme protokolü seçimi

Sürücüler ile gömülü bilgisayar arasında kullanılacak olan haberleşme protokolünün seçiminde en önemli noktayı sürücülere gönderilecek referans pozisyonlarının dört sürücüye aynı anda ulaştırılması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı haberleşme protokolü sürücülere veriyi belirli gecikmeler ile taşıyabilmeli ancak sürücüler bu verileri aynı anda uygulamaya koymalıdır. Bu konuda yapılan araştırmalar sonucunda CANBUS haberleşme protokolünde karar kılınmıştır. Projede sürücülerin CANBus Haberleşme protokolünün bir üst protokolü

olan CANOpen desteklemesi gerekmektedir. Bilgisayarın ise CANBus protokolünü desteklemesi yeterlidir. Bu konu ile ilgili daha detaylı bilgi için çalışmamızda yaralandığımız Embedded Networking with CAN and CANOpen [8] isimli kaynağa bakabilirler.

3.2.1.1.1. CANBUS protokolü özellikleri

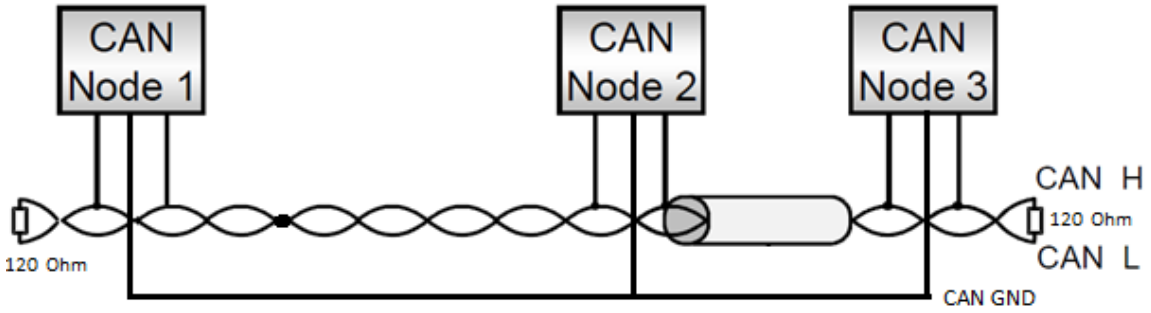
CANBus haberleşme protokolü CAN_H, CAN_L, ve CAN_GND olmak üzere üç kablo üzerinden veri iletimini geçekleştirir.

CAN_L, haberleşme hattında taşınan bilgiye göre üzerinde 2,5 V ve 1,5 V olmak üzere iki farklı gerilim taşımaktadır.

CAN_H, haberleşme hattında taşınan bilgiye göre üzerinde 2,5 V ve 3,5 V olmak üzere iki farklı gerilim taşımaktadır.

CAN_GND, haberleşme hattının topraklama bağlantısıdır. Hattaki tüm cihazlar ortak bir topraklama kullanıyorsa bağlantısının yapılmasına gerek bulunmaktadır.

CANBus hattı 127 adet nesneye (cihaz) kadar haberleşme ağını genişletebilmektedir. Bu nesnelerden her birini kendine özel 0 ile 127 arasında Node-ID'sine (Cihaz Numarası) sahip olmak zorundadır. Node-ID'ler kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Örnek CANBus haberleşme ağı Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24: CANBUS haberleşme hattı fiziksel bağlantısı.

3.2.1.1.2. CANBUS veri iletim hızı:

CANBus haberleşme Protokolü, haberleşme hattının uzunluğuna göre 1 Mbps kadar hıza ulaşabilmektedir. CANBus protokolünün, haberleşme hattının uzunluğu ile desteklediği hız arasındaki tablo Tablo 2.5'te verilmiştir.

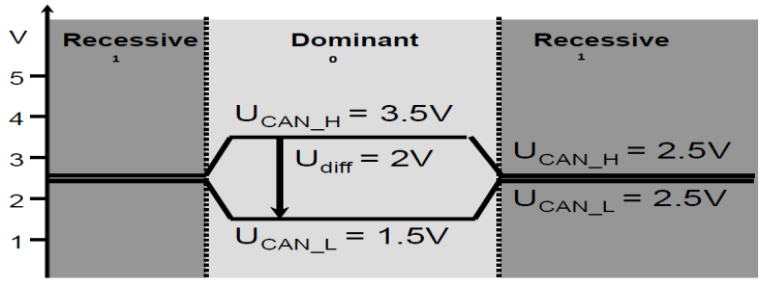
Tablo 3.3: CANBUS veri iletim hızı ve kablo uzunluğu karşılaştırma tablosu.

Veri İletim Hızı	Maksimum Kablo Mesafesi
1 Mbps	40 Metre
500 Kbps	100 Metre
250 Kbps	200 Metre
125 Kbps	500 Metre
10 Kbps	6 Kilometre

Projede Kullanılan haberleşme ağı 40 m'den daha az olacağından veri iletim hızı olarak 1 Mbps kullanılmıştır.

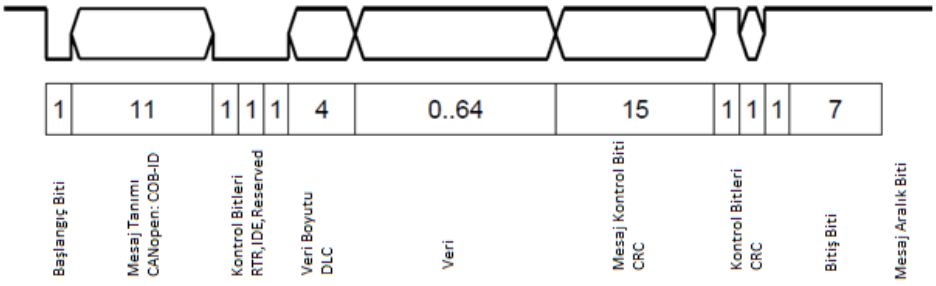
3.2.1.1.3. CANBUS veri iletimi

CANBUS haberleşme protokolünde veri iletimi CAN_L ve CAN_H arasında gerilim farkı ile gerçekleştirilir. Gerilim farkının 2V olması bitsel 0, gerilim farkının 0 V olması durumda bitsel 1 durumu ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.25'te haberleşme hattında bulunan verinin üç bitlik kısmı (101) bulunmaktadır.



Şekil 3.25: CANBUS haberleşme protokolü veri iletimi.

CANBUS harberleşme protokolünde veriler 128 bitlik mesajlar şeklinde iletilirler. CANBus mesajı ve içerdiği veri bölümleri Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26: CANBus mesajı veri yapısı.

3.2.1.1.4. Canbus mesajları

CANBUS haberleşme protokolünde kullanım amaçlarına göre ayrılmış iki adet mesaj tipi bulunmaktadır. Bunlar Servis mesajları (SDO, Service Data Object) ve işlem mesajları (PDO, Process Data Object) olarak adlandırılırlar. PDO'lar SDO'lara göre daha hızlı veri iletimini sağlamaktadır.

Servis mesajları (SDO)

SDO'lar genellikle haberleşme hattında bulunan cihazların ayarlarını değiştirmek için kullanılmaktadırlar. SDO'lar sadece master tarafından gönderilebilir. Diğer cihazlar sadece gelen SDO mesajlarına cevap verebilmektedirler. Bilgi alınabilmesi için iki adet mesaj kullanıldığından veri iletimi yavaş olmaktadır. Örnek SDO mesajı yapısı Şekil 3.27'de verilmiştir.

600h+ID	8	40h	04h	60h	00h	00h	00h	00h	00h
CAN-ID	*DLC*	*Command*	*Object L*	*Object H*	*Sub-Index*	*Byte 0*	*Byte 1*	*Byte 2*	*Byte 3*

Şekil 3.27: CANBUS SDO mesaj örneği.

İşlem mesajları (PDO)

PDO'lar önceden tanımlanmış durumlarda, önceden tanımlanmış verilerin iletimini sağlamaktadır. PDO 'lar veri iletimini daha önceden yapılan tanımlamalara göre yaptığından bir mesaj ile veri iletimi tamamlanabilmektedir. Bu sebepten dolayı veri iletimi SDO'lara göre daha hızlı olmaktadır.

Haberleşme ağına bağlı her cihaz için 512 adet PDO tanımlanabilmektedir.

PDO'lar gönderme (transmit, TPDO) ve alma (receive, RPDO) olmak üzere ikiye ayrılır. TPDO'lar cihazlardan alınan verilerin haberleşme ağına gönderilmesine sağlamaktadırlar. Örnek olarak motor sürücünün hız verisinin bilgisayara iletilmesi TPDO kullanılarak iletilebilir.

RPDO ise haberleşme ağından alınan verilerin cihaza iletilmesini sağlamaktadır. Örnek olarak motor sürücüsüne gönderilecek olan konum bilgisi RPDO kullanılarak iletilebilir.

PDO'lar cihazlarda en az dört tanımlı olarak gelmektedirler. İstenildiği taktirde bu sayı 512'ye kadar artırılabilmektedir. PDO'ların önceden tanımlı durumları ve önceden tanımlı verileri değiştirmek için SDO'lar veya cihazların USB bağlantısı ile bilgisayar üzerinden

değişiklik yapılabilmektedir. SDO'lar ile değişiklik yapılabilmesi için cihazın PreOperational NMT durumuna geçmesi gerekmektedir. [8]

3.2.1.2. Motor sürücü seçimi

Motor sürücüleri Maxon-Motor firmasından seçilmiştir. Projede konum kontrolü yapılacağından dolayı, sürücülerin pozisyon kontrolörü bulundurması gerekmektedir. Sürücü seçimi motorları sürebilecek kapasitede seçilmiştir.

Birinci, Üçüncü ve Dördüncü eksenlerdeki motorları sürebilmek için EPOS2 24/5 modeli seçilmiştir. İkinci eksende is Maxon-Motor firmasının EPOS2 70/10 modeli seçilmiştir.



a b

Şekil 3.28: Motor sürücüleri [9] a)EPOS2 70/10 b)EPOS2 24/5.

Motor Sürücülerinin özellikleri Tablo 2.6'da gözükmektedir.

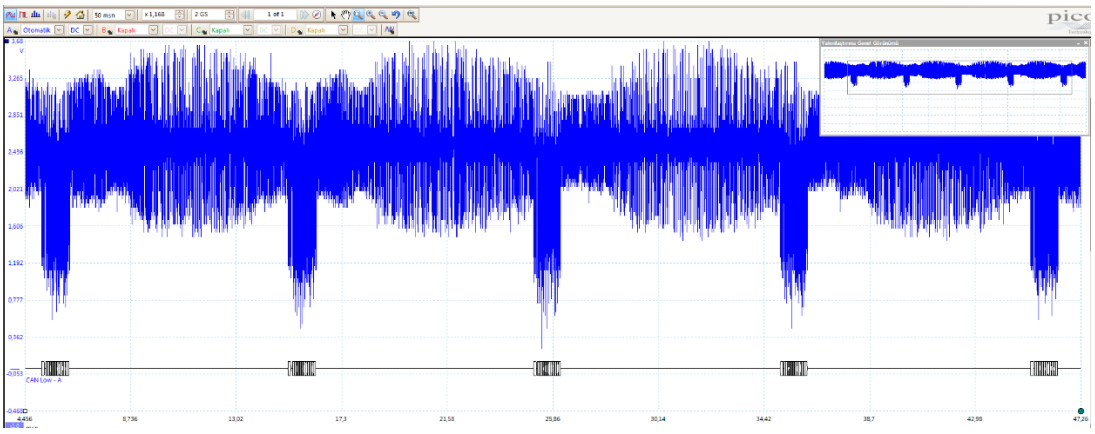
Tablo 3.4: Motor sürücülerinin özellikleri.

	EPOS2 24/5	EPOS2 70/10
Güç	120 W	700 W
Çalışma Gerilimi	11-24 V	11-70 V
Max. Çalışma Akımı	5 A	10 A
Kontrolörler	Konum, Hız, Akım	Konum, Hız, Akım
Haberleşme Protokolleri	CANOpen, RS232, USB	CANOpen, RS232, USB

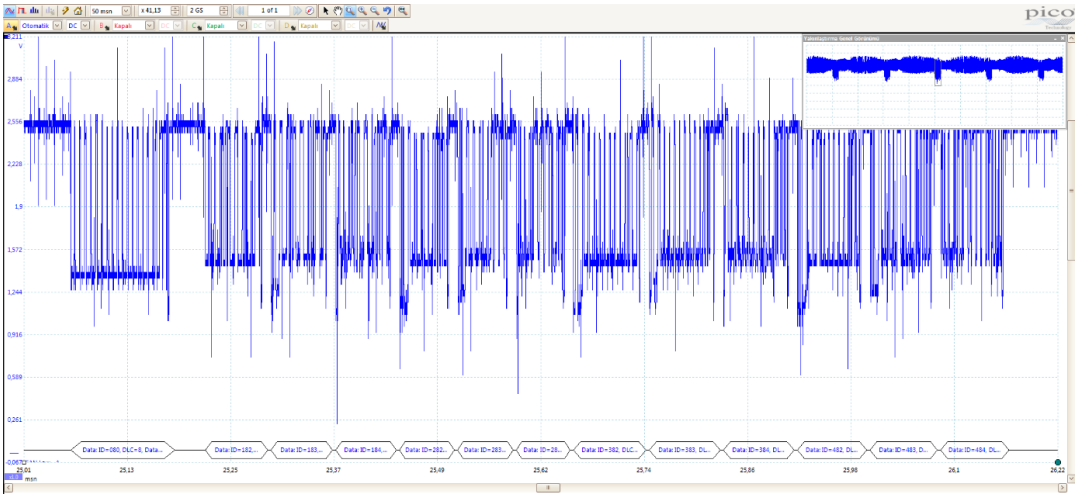
Sürücülerin kullanılabilmesi için bir adet 24 V 20 A ve bir adet 48V 21A güç kaynakları kullanılmıştır. EPOS2 24/5 sürücüler 24V 20A güç kaynağı ile beslenmiştir. EPOS 2 70/10 sürücü ise 48V 21A güç kaynağı ile beslenmiştir.

3.2.1.3. Bilgisayar ve işletim sistemi seçimi

İşletim sistemi, uygulama programları ile klavye, monitör, RS232 vb. fiziksel sistemlerin haberleşmesini sağlayan sistem çağrı ve fonksiyonlarından oluşmaktadır. İşletim sistemleri genel olarak gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan işletim sistemleri olarak ikiye ayrılabilir.



Şekil 3.29: Canbus haberleşme hattı picoscope ekran görüntüsü.



Şekil 3.30: Canbus haberleşmesi bir adet kapalı çevrim mesajları.

Projede öncelikli olarak isterlerimizin belirlenmesi gerekmektedir. Projede kapalı çevrim süremizin 5 ms olması yeterli olmaktadır. Bu durumda kapalı çevrimin başlatılacağı zamanlayıcıda 50-100 µs gecikme kabul edilebilir bir kayıp olarak kabul edilmektedir. Windows 7'de kullandığımız zamanlayıcı ile bu koşul sağlanabildiğinden dolayı işletim sistemi olarak Windows 7 seçilmiştir. Bilgisayar ile sürücülere arasındaki iletişim mesajlarının 5 çevrimlik bir bölümü Şekil 3.29'da verilmiştir. Mesajların bir çevrimlik içeriği Şekil 30'da bulunmaktadır. Ayrıca daha detaylı mesaj içerik ve zamanları Ek B'de bulunmaktadır.

Canbus Hattı mesajları dikkatli olarak incelendiği durumda kapalı çevrimin ilk mesajı olan senkron mesajları (ID=0x080) arasındaki sürenin sırasıyla 9,92 ms ve 9,95 ms olduğu görülmektedir. Kapalı çevrimin 10 ms olduğu dikkate alındığında 0,08 ms ve 0,05 ms çevrim hatası olduğu görülmektedir. Bu hata ihmal edilebilir bir hatadır.

Elimizde bulunan bilgisayarda CANBUS mesajlarını okumak ve göndermek mümkün olmadığından bir adet CANBUS protokolünü USB protokolüne dönüştürecek dönüştürücü ihtiyacı ortaya çıkmıştır. USB-CAN dönüştürücü olarak Peak System tarafından üretilen PCAN-USB ürünü kullanılmıştır. Ürünle birlikte gelen açık kaynak kod dosyaları ve örnekleri kullanımı kolaylaştırmaktadır. Gelen kaynak kod dosyaları arasından PCANBasicClr.h dosyası kullanılarak gerekli programlamalar yapılmıştır. Ürün Şekil 3.31'de görülmektedir.



Şekil 3.31: PCAN-USB [10].

Bilgisayar seçiminde ilk olarak projede gerek duyulabilecek giriş-çıkışlar ve işletim sistemi belirlenmiştir. Projede işletim sistemi olarak windows 7 kullanaılabileceğini yukarıda bahsetmiştik. Ayrıca elimizde Peak System tarafından üretilmiş olan PCAN-USB çevirici bulunmasından dolayı masaüstü bilgisayar kullanılarak projedeki isterlerimizi karşılama imkanı olmasından dolayı masaüstü bilgisayar kullanılmıştır. Kullanılan bilgisayarın özellikleri Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 3.5: Bilgisayar özellikleri.

Özellikler	Adet / Miktar
RAM	4 Gb
USB 2.0	4
CANBUS	1
VGA	1
İşlemci	2.3 Ghz (*4)

3.2.1.4. Kamera seçimi

Kamera meme konumunun üç boyutlu konumunu tespit için kullanılmıştır. Bu konum tespiti üç farklı yöntemle tespit edilebilmektedir. Bunlar iki adet kamera kullanmak, lazer tarayıcı kullanmak ve kamera ile derinlik sensörünü birlikte barındıran kinect kullanmaktır.

3.2.1.4.1. İki adet endüstriyel kamera ile konum tespiti

Proje başlangıcında iki adet kamera kullanılması planlanmaktaydı. Bu kameralardan biri meme hizasında kafese monte edilecek, diğeri ise robotun ucunda bulunacaktı. Bu şekilde meme konumunun üç boyutlu konumu elde edilecekti. Bu şekilde bir adet kamera ile elde edemediğimiz derinlik bilgisi ikinci kameradan almayı planlamıştık. Ancak kameralar arasında senkronizasyonun sağlanamayabileceğinden dolayı hata oranının yüksek olabilecek olması sebebiyle bu sistem kullanılmamıştır.



Şekil 3.32: Endüstriyel kamera.

3.2.1.4.2. Lazer tarıyıcı ile konum tespiti

Robotun ucuna konulacak bir lazer tarayıcı ile istenilen bir hassasiyette konum tespiti yapılabilmektedir. Ancak lazer tarayıcı sensörlerinin fiyatlarının yüksek olması dolayısıyla kullanılmamıştır.



Şekil 3.33: Lazer tarayıcı sensör.

3.2.1.4.3. Kinect (kamera ve derinlik sensörü) ile konum tespiti

Algılayıcı seçimi süreci sonucunda son olarak robotik projelerinde sıkça kullanılan PrimeSense firmasının patentlerine sahip olduğu Kinect cihazının kullanılmasına karar verildi. Kinect üzerinde IR Light (Kızıl Ötesi), CMOS Depth Image (Derinlik Sensörü) ve Color Image Sensörü bulundurmaktadır. Konum hassasiyeti, lazer tarayıcından daha olmasına karşılık projemizde istenilen hassasiyet için yeterlidir. Sensörlerden gelen bilgilerin senkron olması hata payını düşürmektedir. Öneriler bölümünde detaylı olarak bahsedilecek olan piyasada aynı amaçlar için kullanılan ürünlerde benzer çalışma prensiplerine sahip bulunmaktadır.

Kinect kullanılmasına karar verilmesinin ardından hangi ürün seçimine geçildi. Piyasada bulunan Kinect ürünleri Microsoft Kinect, Asus Xtion ve PrimeSense Carmine'dir. Microsoft'un ürünün piyasada kolaylıkla bulunabilmesi ve kaynakların fazla olması sebebiyle projede kullanılmıştır.



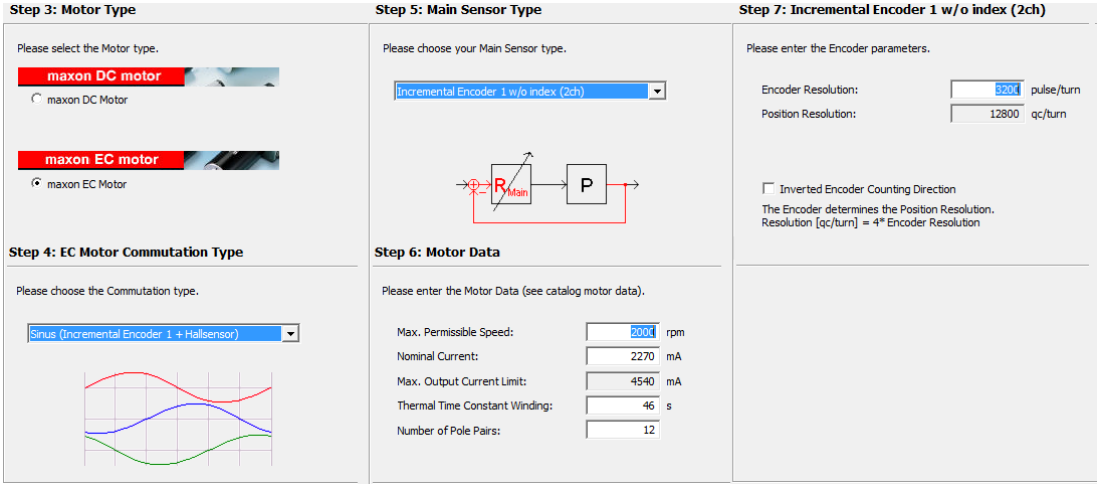
Şekil 3.34: Microsoft Kinext XBOX 360.

3.2.2. Elektronik sistemin kurulması

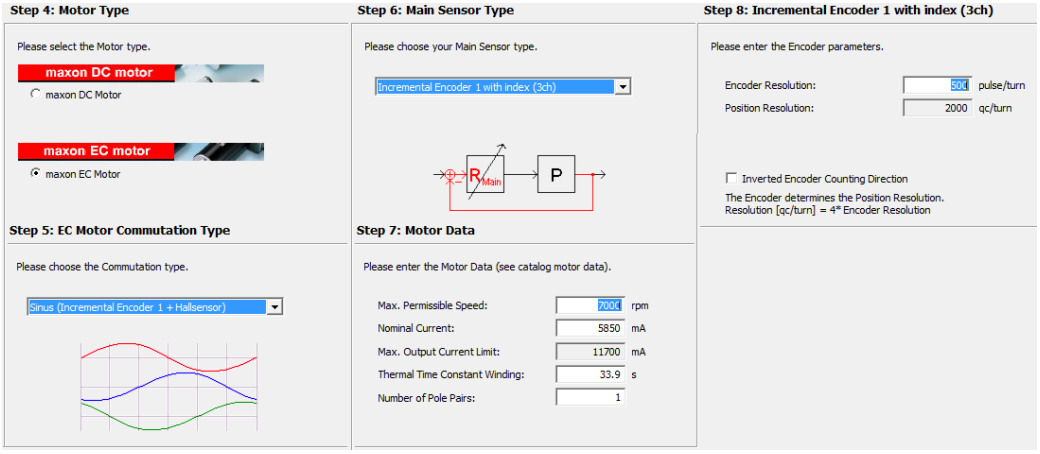
3.2.2.1. Sürücülerin ayarlanması

Süt sağım robotu üzerinde bulunan dört adet motorun kontrolü için Maxon Motor firmasının EPOS2 model sürücülerinde seçim yapıldığından bahsedilmişti. Bu bölümde sürücülere motorların tanıtılması, haberleşme protokolü ayarlarının yapılmasında bahsedielcektir.

Bu sürücülere ilk olarak motorların tanıtılması gerekmektedir. Enkoder ve motorların tanıtım işleminde gereken parametreler ve tanıtım ekranları birinci, üçüncü, dördüncü eksen için Şekil 3.35'te ikinci eksen için Şekil 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.35: Birinci, üçüncü ve dördüncü eksen için motor ve enkoder tanıtımı.



Şekil 3.36: İkinci eksen için motor ve enkoder tanıtımı.

Motor ve Enkoderlerin sürücüye tanıtılmasının ardından sürücülere Node-ID atamaları yapılmıştır. Bu aşamada sürücülerin CAN Bitrate'i otomatik olarak ayarlanmak istendiğinden dolayı 9 olarak atanmıştır.Eksenlere atanan Node-ID'ler sırasıyla Şekil 3.37'de verilmiştir.



Şekil 3.37: Sürücülerin Node-ID ve Bitrate atamaları.

Bir sonraki aşamada sürücülerin RPDO'larının ve kullanılması gereken iletim tipi atamalarının yapılması gerekmektedir. Bütün sürücülerde RPDO ayarları aynı şekilde ayarlanmıştır. RPDO'ların ayarlarının yapılmasının ardından TPDO'lar parametreleri ayarlanmıştır. RPDO ve TPDO'ların taşıdıkları veriler ve iletim tipi seçimleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: RPDO ve TPDO'ların taşıdıkları veriler ve iletim tipleri.

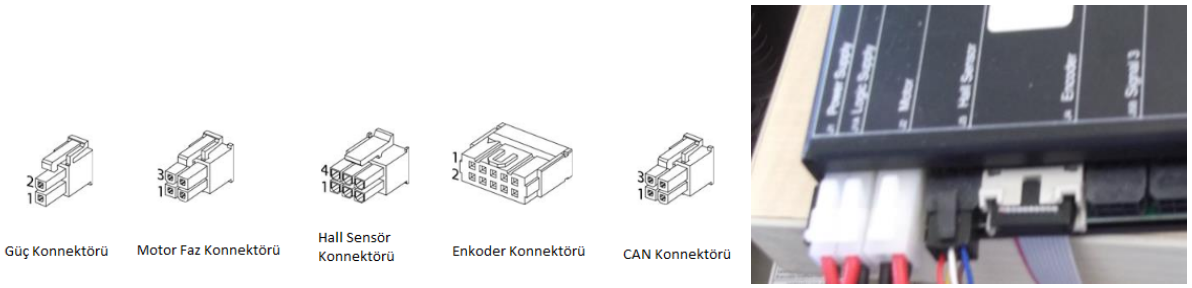
	Veri	
RPDO1	ControlWord, Modef Of Operation	Asenkron
RPDO2	Current Mode Setting Value	Senkron
RPDO3	Target Velocity	Senkron
RPDO4	Target Position	Senkron
TPDO1	StatusWord, Modes Of Operation Display	Senkron
TPDO2	Current Actual Value	Senkron
TPDO3	Velocity Actual Value	Senkron
TPDO4	Position Actual Value	Senkron

3.2.2.2. Motor ve sürücünün bağlantısının yapılması

Motorların ve Sürücülerin bağlantısı yapılırken kullanılan konnektörler Şekil 3.38'de, bağlantı şeması Tablo 3.7'de verilmiştir.

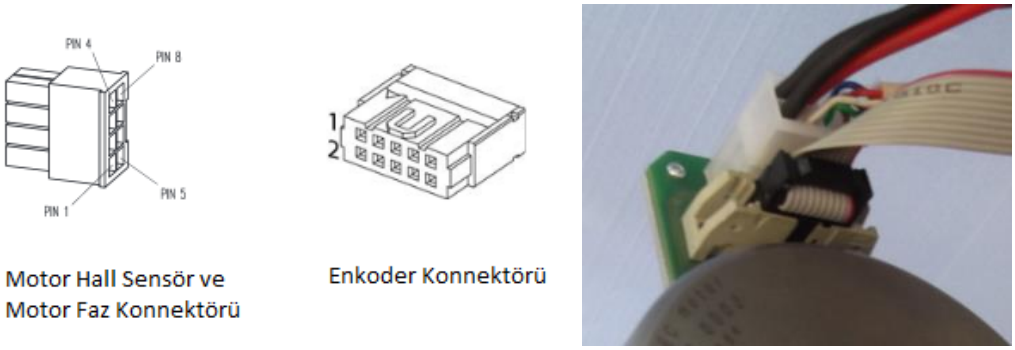
Tablo 3.7: Sürücü bağlantı konnektörleri.

	Güç Konnektörü	Motor Faz Konnektörü	Hall Sensör Konnektörü	Enkoder Konnektörü	CAN Konnektörü
1	Ground	Faz A	HallSensor 1	-	CAN High
2	+ VDC	Faz B	HallSensor 2	+5 VDC	CAN Low
3		Faz C	HallSensor 3	Ground	CANGround
4		Cable Shield	Ground	-	Cable Shield
5			+5 VDC	Channel A\	
6			Cable Shield	Channel A	
7				Channel B\	
8				Channel B\	
9				Channel I\	
10				Channel I	



Şekil 3.38: Sürücü konnektörleri.

Sürücü konnektörleri hazırlandıktan sonra kablonun motora bağlanabilmesi için gerekli konnektör ve kablolar hazırlanmıştır.



Şekil 3.39: Motor bağlantı konnetörleri.

Tablo 3.8: Motor hall sensor ve motor faz bağlantı konnektörleri.

	Hall Sensör Konnektörü	Enkoder Konnektörü
1	Hall Sensor 1	-
2	Hall Sensor 2	+5 VDC
3	+5 VDC (Hall Sensor)	Ground
4	Faz C	-
5	Hall Sensor 3	Channel A\
6	Ground	Channel A
7	Faz A	Channel B\
8	Faz B	Channel B\
9		Channel I\
10		Channel I

4. KONTROL SİSTEMİ

4.1. Motor Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde eksenlerde bulunan motorların pozisyon kontrolör katsayılarının elde edilmesi yer almaktadır. Montaj işlemlerinin tamamlanmasının ardından kontrolör parametreleri ilk olarak sürücülerin otomatik ayarlama (auto tuning) yöntemi ile belirlenmiştir. Auto tuning Maxon EPOS studio programı ile motor sürücülerine bağlanılarak motor tanıtımı yapıldıktan sonra yapılmaktadır. Kontrolör ayarlama işleminde otomatik ve hassas olmak üzere iki farklı seçenek bulunmaktadır. Hassas ayarlama yönteminde istenilen kontrolör tasarımı yapılmakta ve performans isterlerine göre daha hızlı veya yavaş oturması istenilirse değişiklikler yapılabilmektedir. Bu çalışmada otomatik ayarlama seçeneği kullanılmış ve performans sonuçlarının iyi olmasından dolayı diğer seçeneğe geçilmemiştir.

Belirlenen parametreler ve kontrolör performansları Ek E'de verilmiştir.

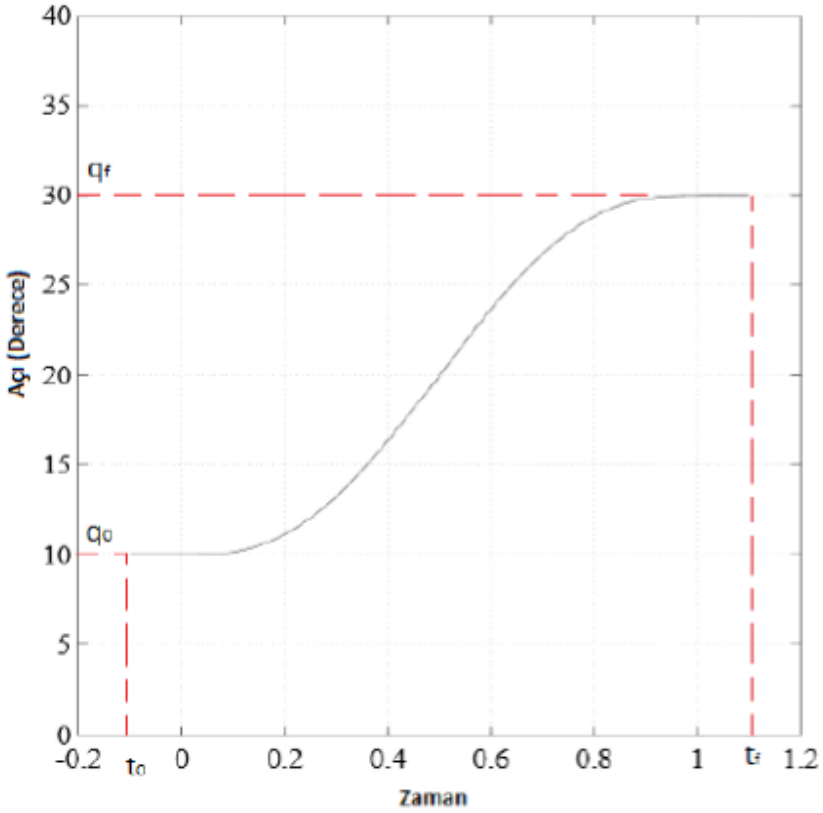
Otomatik ayarlama ile bulunan parametrelerin performanslarının yeterli olması sebebiyle kontrolör tasarımı yapılmamıştır.

4.2. Yörünge Planlaması

Robotun daha düzgün ve yumuşak hareket edebilmesi için yörünge planlaması yapılmıştır. Yörünge planlanması yapılmadığı durumda robot verilen koordinatlarına çok hızlı bir şekilde gitmesinden dolayı robotun uç noktasında salınım oluşmaktadır. Yörünge planlaması ile bu durum ortadan kaldırılmıştır. Yörünge planlaması olarak üçüncü dereceden bir algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan matematiksel modeli denklem 5.1'de, yörünge ise Şekil 4.1'de verilmiştir [11].

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \tag{5.1}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ v_0 \\ q_f \\ v_f \end{bmatrix} \tag{5.2}$$



Şekil 4.1: Yörünge planlaması.

Bu bölümde süt sağım robotunun ineğe ve çevreye zarar vermemesi için bulunmaması gereken koordinatlardan kaçınması için izlenilecek yörüngelerin oluşturulmasından bahsedilecektir. Yörünge planlamasında süreç dört aşamada incelenmiştir.

- İnek memesinin 5 cm altındaki koordinata hareket
- İnek memesinin koordinatlarına hareket
- Sağım işleminin ardından inek memesinin 5 cm altına hareket
- İlk konuma Dönüş

Kısıtlar her aşama için ayrı ayrı koyulmasına karşılık genel kısıtlar tüm aşamalar için geçerli olmaktadır. Aşamalarda sırası ile izlenilen yörüngelerin oluşturulması kameradan gelen inek memesi koordinatları ile olmaktadır.

İnek memesinin 15 cm altındaki koordinata hareket

Kameradan inek memesinin koordinatının gelmesinin ardından robot başlangıç konumundan meme koordinatının, z ekseninde 5 cm aşağısındaki koordinatlara götürülecektir. Bu işlem sırasında robotun kol üçüncü dereceden bir yörünge planlaması ve 500 adet örnek ile hareket edecektir. Bu yaklaşım 20 ms'lik 500 çevrim sonucunda tamamlanmış olacaktır.

İnek memesinin koordinatlarına hareket

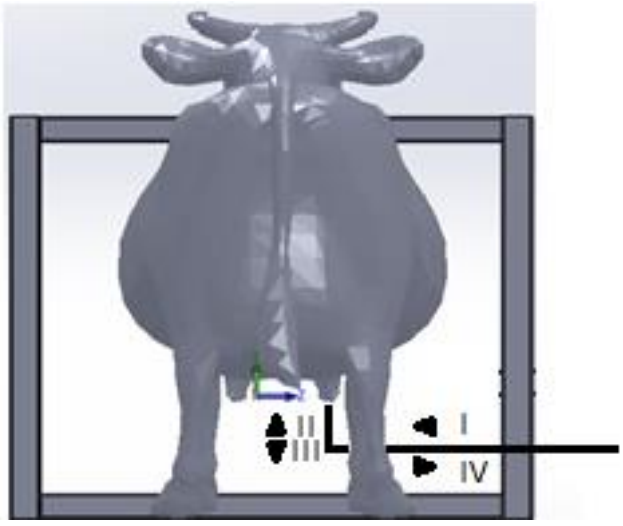
İlk yörünge haketinin tamamlanmasının ardından robot sadece z ekseninde üçüncü dereceden bir yörünge planlaması ve 500 adet örnekleme ile memeye yaklaşacaktır. Bu yaklaşım 20 ms'lik 500 çevrim sonucunda olacaktır. Bu hareket sırasında istenilen koordinatlara ulaşıldığı ayrıca kamera ile kontrol edilecektir.

Sağım işleminin ardından inek memesinin 15 cm altına hareket

Sağım işleminin ardından robot inek memesi koordinatlarının z ekseninde 15 cm altına çekilecektir. Bu yaklaşım 20 ms'lik 500 çevrim sonucunda olacaktır. Bu hareket sırasında istenilen koordinatlara ulaşıldığı ayrıca kamera ile kontrol edilecektir.

İlk konuma dönüş

Son yörüngede robot kol başlangıç konumuna gidecektir. Bu aşama 20 ms aralıklarla 500 adet referans gönderilmesi ile olacaktır. Bütün yörüngeler Şekil 4.2'de verilmiştir.



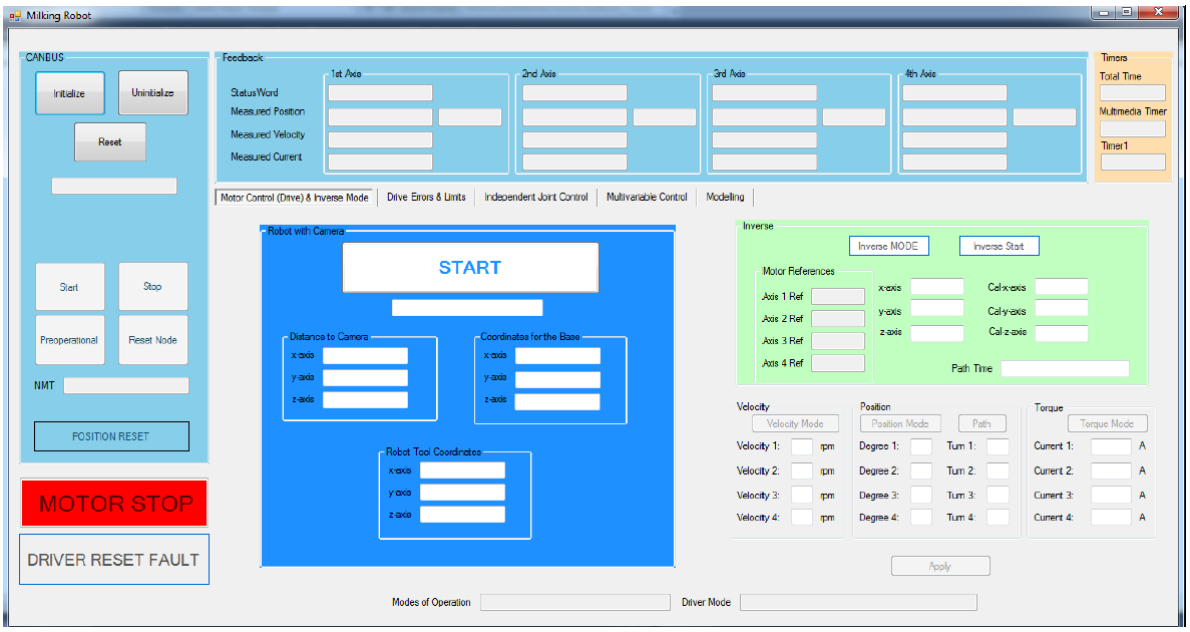
Şekil 4.2: Robot hareket yörüngeleri.

4.3. Bilgisayar Programının Hazırlanması

Bilgisayar programı hazırlanırken ilk olarak proglamlama ortamı ve dili seçilmiştir. Bu seçimde ücretsiz programlama dili arasından C++ seçilmiştir. Bu seçimde gömülü bilgisayarın ve kameranın kaynak dosyalarının C++ dilinde yazılmış olmasıdır.

4.3.1. Görsel arayüzün hazırlanması

Süt sağım robotunun deneysel çalışmlarında ihtiyaç duyulmasından dolayı ilk olarak görsel arayüz tasarımı yapılmıştır. Görsel arayüz Şekil 4.3'te bulunmaktadır.



Şekil 4.3:Süt sağım robotu program arayüzü.

Görsel arayüz programında sol kısımda bulunan mavi bölüm CANBUS haberleşme protokolünün devreye alınması, resetlenmesi, devreden çıkarılması ile CANBUS durumlarına geçiş butonları bulunmaktadır. Ayrıca pozisyonun sıfırlanması butonuda bu kısımda bulunmaktadır.

CANBUS bölümünün altında motor hareketinin durdurulması ve sürücüdeki hataların giderilmesi butonları bulunmaktadır.

Programın üst orta kısmında bulunan açık mavi renkli arka planlı FeedBack bölümünde sürücülerden gelen sürücülerin bulunduğu durum, pozisyon (açı ve tur), hız (rpm) ve akım (A) değerleri bulunmaktadır.

Arayüzün sağ üst köşesinde sarı arka planlı Timer bölümü bulunmaktadır. Bu bölümde kontrol çevrim süresi (ms) ve toplam deney çalışması bulunmaktadır. Toplam deney çalışması süresi alınan geri besleme verilerinin analizinde kullanmaktadır.

Arayüzün orta kısmında mavi arka planlı olarak bulunan bölümde sistemin kameradan alınan ve meme konumunun tespiti yapılarak elde edilen koordinatlar ve bu referanslara ulaşabilmek için gerekli referans değerleri bulunmaktadır. Start butonuna basılarak robotun meme konumuna gitmesi sağlanmaktadır. Bu hareket sırasında robot ilk olarak gitmesi gereken yörüngeleri oluşturmakta ardından harekete başlamaktadır.

Ara yüzün sağ orta kısmında bulunan yeşil arka planlı Inverse bölümünde robota verilecek koordinat girişi ve bu koordinata ulaşabilmesi için gerekli referansların oluşturulması ve InverseStart butonuna basılarak istenilen konuma hareket etmesi sağlanır.

Inverse bölümünün altında bulunan bölümde ise robotun eksenlerine istenilen akım, hız ve pozisyon türünde referans bilgisi girişi bulunmaktadır. Bu bölümde bulunan Apply butonuna basılarak robotun istenilen referansa göre eksenlerin hareketi sağlanır.

Bu arayüz deneysel çalışmalar esnasında kullanılmıştır. Motorların kontrolör algoritmaları bu arayüz ile kontrol edilmiştir. Kameradan alınan geri besleme ile meme koordinatının tespiti ile ilgili algoritmalar Kamera ile Meme Konumu Tespiti konusunda bahsedilmiştir.

Kontrol programı oluşturulurken ilk olarak CANBUS mesajlarının gönderilip okunabilmesi için Peak System firmasının PCAN-USB çeviricisinin CANBUS kaynak dosyaları (PCANBasicCLR.h) programa dahil edilerek gerekli tanımlamalar yapılmıştır. Tanımlamaların ardından program arayüzünde bulunan butonların, veri giriş ve çıkışlarının (TextBox) gerekli tanımlamaları yapılmıştır.

Sürücü geri beslemelerinin anlamlandırılması yapılmıştır. Yapılan anlamlandırmalar ve dönüşümler Tablo 4.1'de verilmiştir. Tabloda RDO=Redüktör dönüşüm oranı, EÇ= Enkoder çözünürlüğü ifade etmektedir.

Tablo 4.1: Sürücü geri besleme verilerinin dönüşüm oranları.

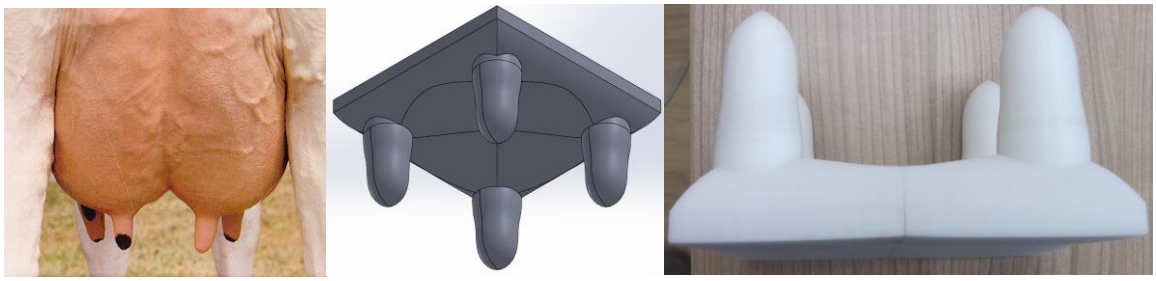
	Hız	Konum
Dönüşüm Oranı	Veri / RDO	Veri*360 / (4* EÇ * RDO)
Birinci, Üçüncü, Dördüncü Eksen	Veri / 66	Veri*360 / (4*3200*66)
İkinci Eksen	Veri / 308	Veri*360 / (4*3200*308)

Sürücüden alınan zaman, geri besleme ve referans verilerinin (Akım,Hız, Konum) yapılacak analizler için dosyalara yazılması için gerekli tanımlamalar yapılarak bu programlama aşaması tamamlanmıştır. Dosyalara yazılan veriler Matlab programına alınarak gerekli grafik çıktıları elde edilmiştir.

4.3.2. Kamera ile meme konumu tespiti

Kameradan gelen bilgilerin analizi aşamasında ilk olarak meme konumunun tespiti için kullanılacak yöntemler seçilmiştir. Tespit yöntemi olarak yüz tanıma sistemlerinde kullanılmakta olan HaarCascade yöntemi seçilmiştir [12]. Bu yöntemde ilk olarak örnek meme resimleri toplanmıştır. Toplanılan resimlerle tespit edilmek istenilen meme ve tespit edilmek istenilmeyen diğer kısımlar kullanılarak cascade algoritması oluşturulmaktadır. Cascade algoritması oluşturma işleminde OpenCV'nin traincascade.exe ve cratesamples.exe programları kullanılmıştır [13]. Robotun denemelerinin yapılabilmesi için 3 boyutlu yazıcı kullanılarak meme prototipi üretilmiştir. Meme prototipinin tasarımı sırasında inek meme

istatistikleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda en uygun meme boyu 6-7 cm uzunluğunda ve meme çapı 3-4 cm olmaktadır [14]. Üretilen meme protoipi ve tasarımı Şekil 4.4'te verilmiştir.



a) b) c)

Şekil 4.4: İnek Memesi [15], (b) Meme protipi tasarım ve (c) protoip.

Ayrıca denemelerde kullanılmak üzere bir adet süt sağım pompası tedarik edilmiştir.



Şekil 4.5: Süt sağım pompası yandan (a) ve alttan (b) görünümü.

Microsoft Kinect'in OpenKinect, OpenNI ve Microsoft Kinect SDK aralarında olmak üzere birden fazla sürücüsü bulunmaktadır. Bu çalışmada Microsoft Kinect SDK sürücüsü kullanılmıştır. Cascade algoritmasının hazırlanması ve derinlilik bilgisinin alınmasının ardından tespiti yapılan meme koordinatları çıkarılmıştır. Programda ilk olarak kameradan fotoğraf alınmaktadır [16]. Alınan fotoğraf üzerinden öncelikli olarak derinlik bilgisi ve orta nokta ile meme arasındaki piksel sayısını alınmaktadır [17].



Şekil 4.6: Meme koordinatının belirlenmesi.

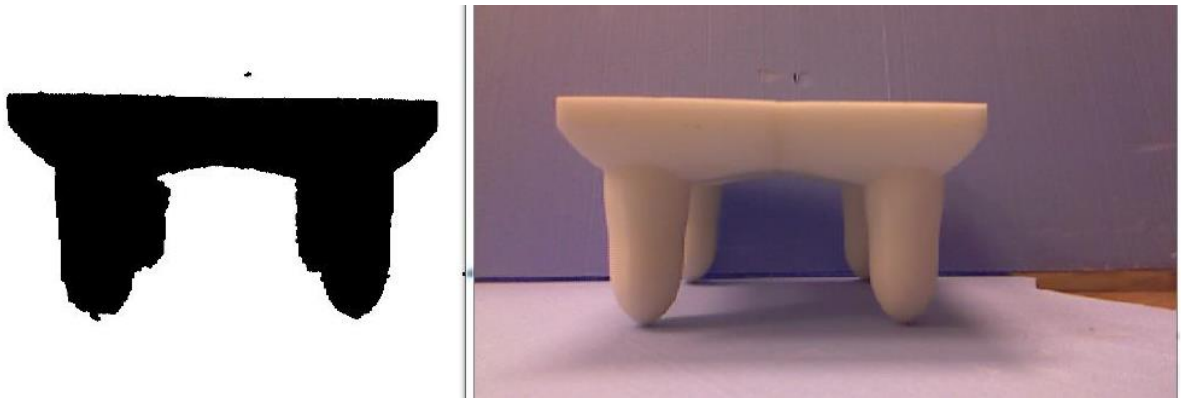
Bu işlem iki meme içinde yapılmaktadır. Bu işlemin ardından derinlik bilgisi kullanılarak bir pikselin ne kadarlık bir büyüklükte (örn. 3mm X 3mm) olduğu bilgisi elde edilerek memenin kameraya göre konumu elde edilmektedir. Derinlik ile piksel boyutları arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir. d_1 ilk memenin derinliğini, d_2 ilk memenin derinliğini, d_0 orta noktanın o düzlemdeki tahmini derinliğini ifade etmektedir. Bu çalışmada iki memenin aynı düzlemde olduğunu varsayımı yapılmıştır.

$$(x_1 * p)^2 + (y_1 * p)^2 + d_0^2 = d_1^2 \quad \textbf{(4.1)}$$

$$(x_2 * p)^2 + (y_2 * p)^2 + d_0^2 = d_2^2 \quad \textbf{(4.2)}$$

$$p = \sqrt{\frac{d_2^2 - d_1^2}{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2}} \quad \textbf{(4.3)}$$

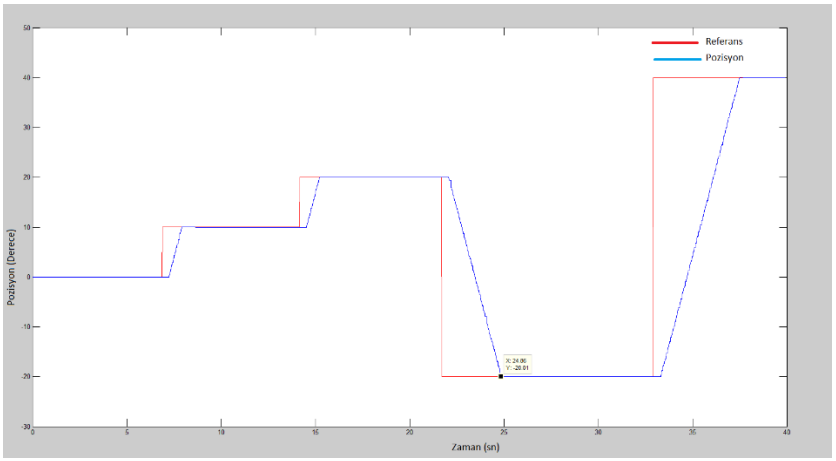
Kameranın robota olan uzaklıklarının bilinmesinden dolayı kameraya göre elde edilen koordinat robota göre tekrar hesaplanarak robotun ulaşması gereken koordinat düzlemi ortaya çıkmaktadır. Kamera ile tespit edilen meme protipini algoritma sonucu çıktısı Şekil 4.7'dedir.



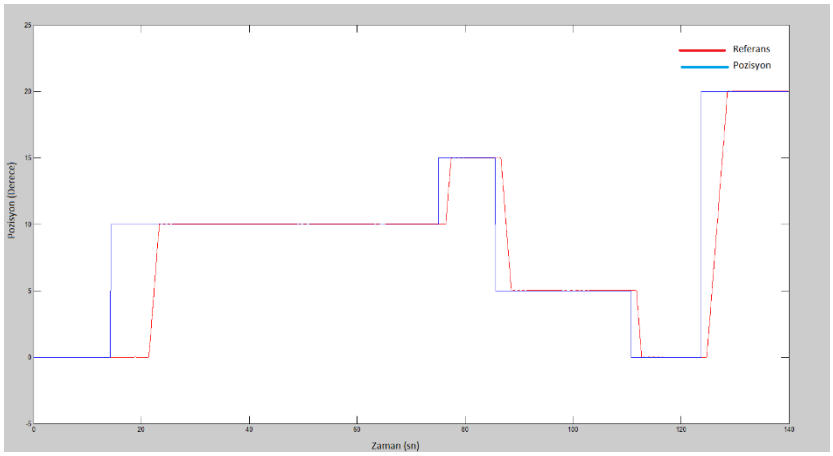
Şekil 4.7: Kamera ile meme prototipinin tespiti.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

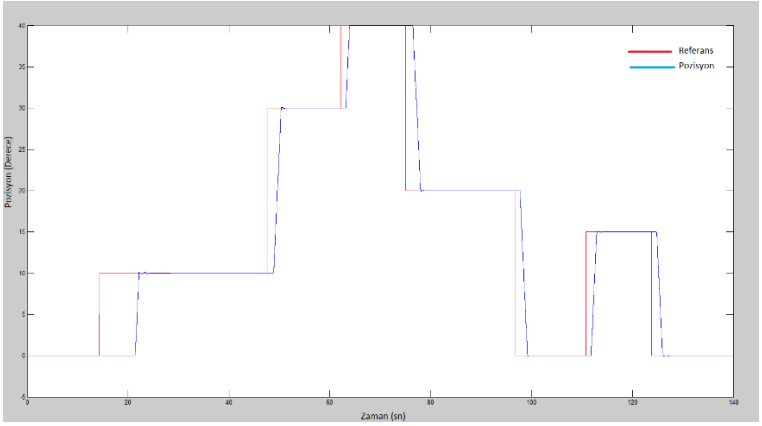
Deneysel çalışmalarda süt sağım robotunun montajının tamamlanmasının ardından ilk olarak eksenlerin motor kontrolör tasarımlarının performansları ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sırasında motor sürücülerine referans pozisyon (açı) değerleri gönderilmektedir. Motorların gönderilen referansa gittiği gözlemlenmiştir. Daha sonra verilen referans ve motorun çevrim süresinde (10 ms) bulunduğu pozisyon text dosyasına yazdırılmış ve bu verilet MATLAB ortamında grafiksel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların grafiksel çıktısı birinci eksen için Şekil 5.1'de, ikinci eksen için Şekil 5.2'de, üçüncü eksen için Şekil 5.3'de ve dördüncü eksen için Şekil 5.4'te verilmiştir.



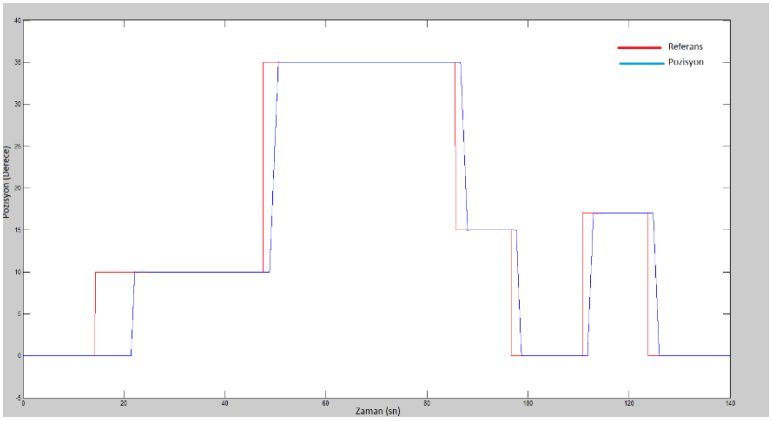
Şekil 5.1: Birinci eksen pozisyon takibi.



Şekil 5.2: İkinci eksen pozisyon takibi.

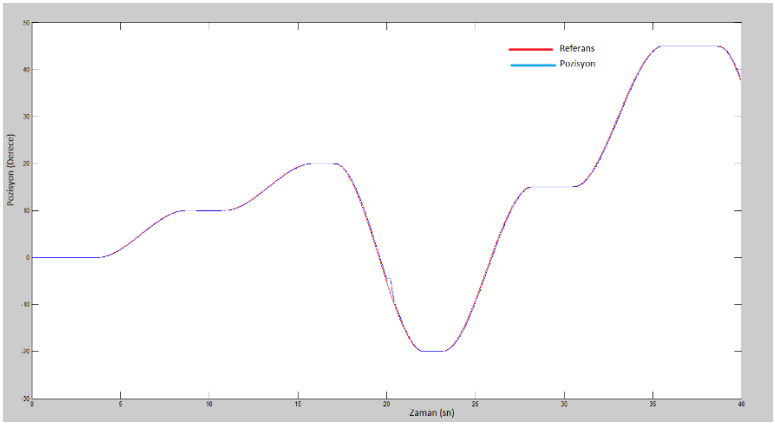


Şekil 5.3: Üçüncü eksen pozisyon takibi.

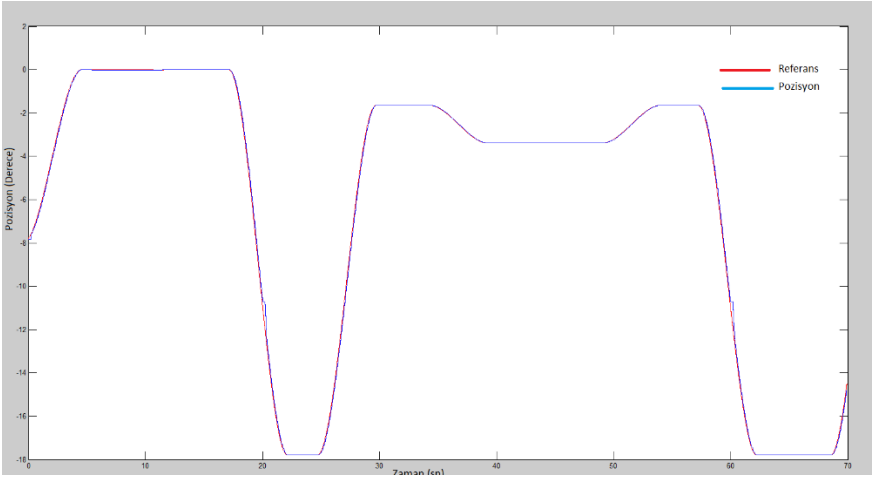


Şekil 5.4: Dördüncü eksen pozisyon takibi.

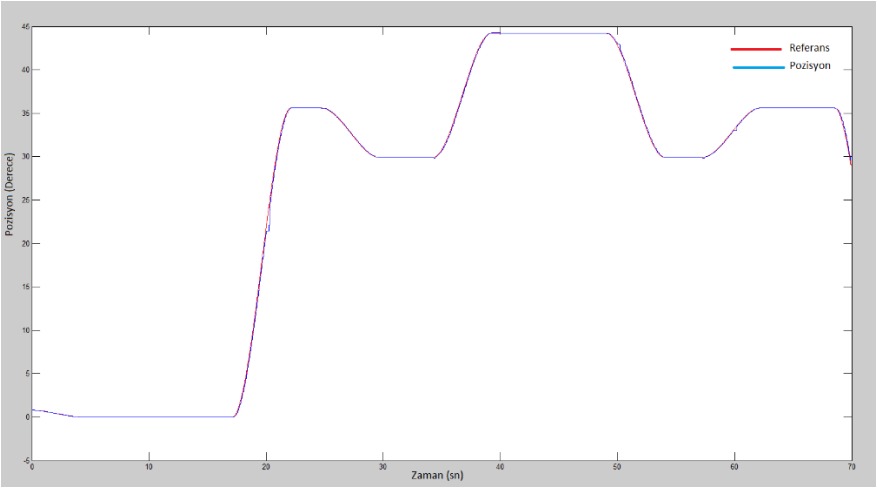
Bir sonraki aşamada yörünge planlama algoritmasının eksenler üzerinde çalıştırılmıştır. Bu aşamada üretilen yörünge planlaması ve motorun her çevrim süresinde alınan pozisyonları text dosyasına yazdırılmış ve MATLAB ortamında çizdirilmiştir. Çizdirilen sonuçlar incelendiğinde Yörünge algoritmasının çok iyi bir şekilde çalıştığı ve motorun algoritmayı çok iyi bir şekilde takip ettiği görülmüştür. İlgili grafikler birinci eksen için Şekil 5.5'te, ikinci eksen için 5.6'da, üçüncü eksen için 5.7'de ve dördüncü eksen için 5.8'de verilmiştir.



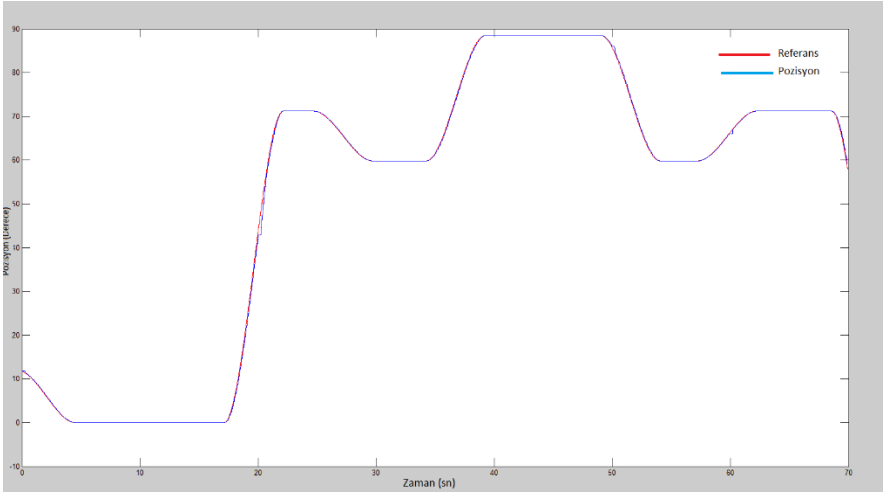
Şekil 5.5: Birinci eksen yörünge takip algoritması.



Şekil 5.6: İkinci eksen yörünge takip algoritması.



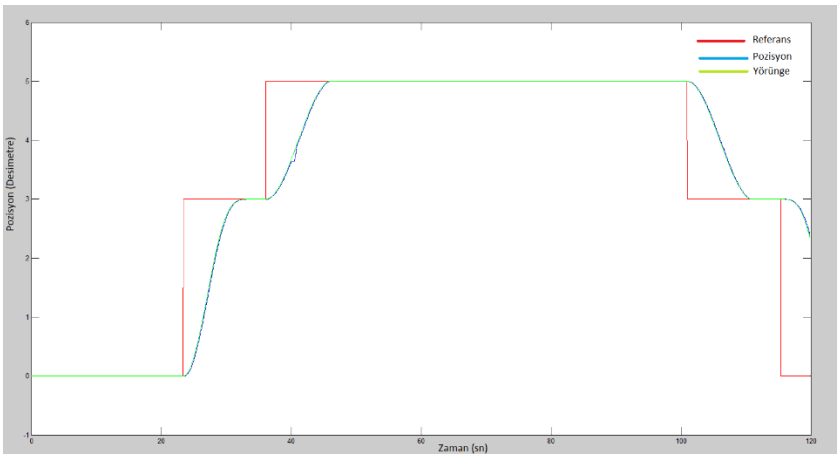
Şekil 5.7: Üçüncü eksen yörünge takip algoritması.



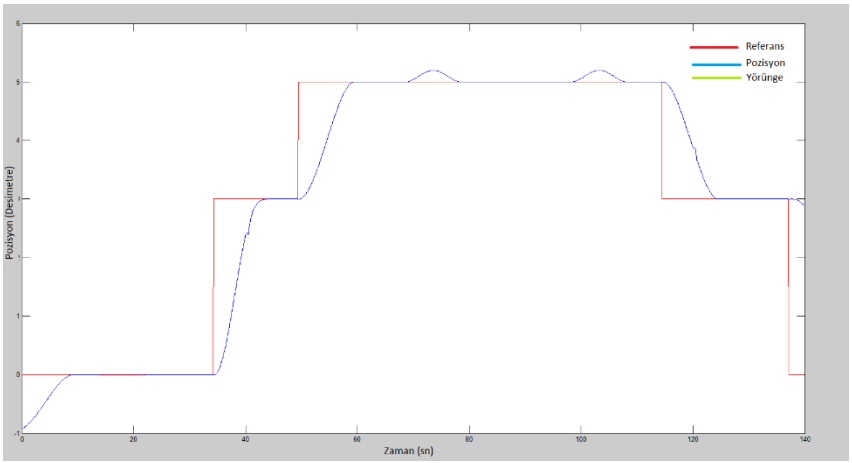
Şekil 5.8: Dördüncü eksen yörünge takip algoritması.

Deneysel çalışmaların robot kontrolünün son aşamasında robot kolun verilen bir koordinata yönelim sağlaması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma sırasında robota verilen koordinat ters kinematik kullanılarak eksen açılarına dönüştürülmekte ve eksenlerin bu

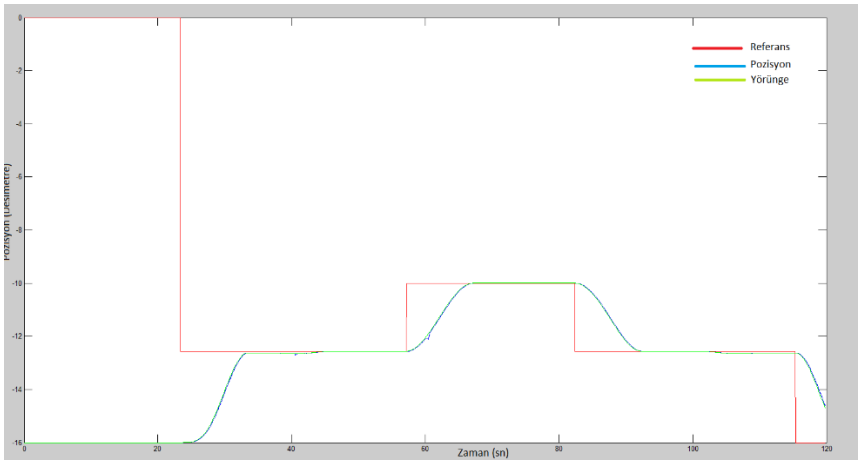
verilen açılara gitmesi sağlanmaktadır. Bu işlem sırasında bulunulaan koordinat verisi motor pozisyonları ve ileri kinematik denklem ile hesaplanmaktadır. Gerekli değerler text dosyasına yazdırılmakta ve MATLAB ortamında grafiksel olarak incelenmektedir. X ekseni için Şekil 5.9'da, Y ekseni için Şekil 5.10'da ve Z ekseni için Şekil 5.11'de grafiksel çıktılar verilmiştir.



Şekil 5.9: X ekseni yörünge takip.



Şekil 5.10: Y ekseni yörünge takip.



Şekil 5.11: Z ekseni yörünge takip.

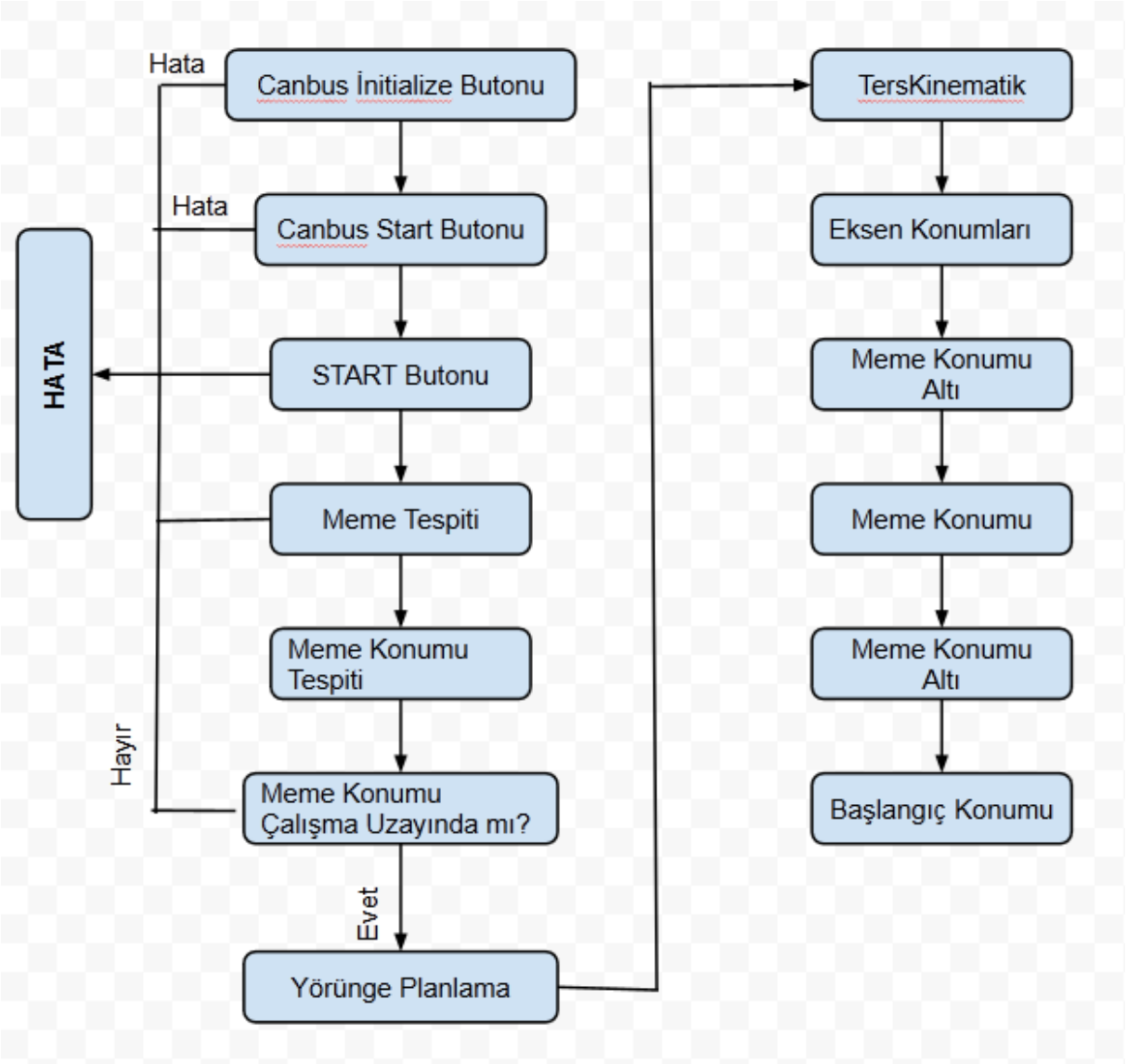
Robotun deneysel çalışmalarının ardından kamera ile ilgili deneysel çalışmalara geçilmiştir. Kamera ile yapılan çalışmalarda düşük yüzdeli bir başarı elde edilmiştir. Yapılan on adet testin derinlik bilgileri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Kamera ile meme prototipi tespiti.

Test no	Gerçek uzaklık	Tespit edilen uzaklık	Hata Oranı
1	60 cm	0	%100
2	60 cm	62	%3,33
3	60 cm	0	%100
4	60 cm	0	%100
5	60 cm	65 cm	%8,33
6	60 cm	0	%100
7	60 cm	0	%100
8	60 cm	0	%100
9	60 cm	57 cm	%5
10	60 cm	0	%100

Deneysel sonuçlarda görüldüğü üzere kamera ile meme konumu tespitinde hata payı çok yüksektir. Yapılan on adet testin yedisinde meme prototipi tespit edilememiş tespiti yapılan üç testte ise %8 hata ile meme prototipi tespiti yapılabilmiştir. Hataların yüksek olmasının birincil sebebi kullanılan kameranın yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır.

Süt Sağım Robotu programı akış diyagramı şekil 5.13'teki verilmiştir. Programda Canbus bölümünde bulunan İnitialize butona basılmalıdır. Canbus hattında bir sorun varsa program hata vermektedir. Sorun yok ise Canbus bölümünde bulunan start butonuna basılır. Sürücülerden hata gelmediği durumda "Robot with Camera" bölümünde bulunan START butonuna basılmalıdır. START butonuna basılmadan ayrı bir program olan meme tespit programı çalıştırılmalıdır. Bu bölümden sonra herhangi bir kullancı girişine gerek yoktur. Programda meme konumu tespit edilemediğinde program "Meme Bulunamadı" hatası vermektedir. Meme konumu tespit edildiği durumda meme konumunun çalışma uzayında olması kontrol edilir. Daha sonra yörünge planlaması yapılır ve ters kinematik model kullanılarak eksen konumları elde edilir ve robot belirlenen yörüngeleri takip ederek meme konumu gidip ilk konumuna gelir.



Şekil 5.12: Süt sağım robotu kontrol programı akış diyagramı.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

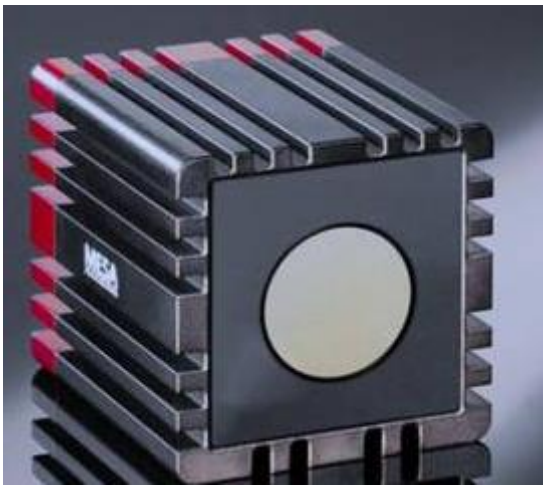
Yapılan bu çalışma sonucunda dört eksenli 30 kg ağırlığında ve bir süt sağım robotu ortaya çıkmıştır. Eksenlerde bulunan enkoderler aracılığıyla robotun uç noktasının konumu hesaplanmaktadır. Kameradan gelen konum bilgisi robotun robotun sıfır noktasına göre yeniden yorumlandıktan sonra ters kinematik model aracılığı ile eksen pozisyonları elde edilmektedir. Bu şekil robot inek memesi konumuna hareket etmektedir.

Eksenlerde kullanılan maxon motor ve sürücülerin performansları iyi sonuçlar vermektedir. Sürücülerin otomatik ayarlama modu ile elde edilen kontrolör beklentilerin üzerinde bir sonuç vermiştir. Deneysel çalışmalar bölümünde görüldüğü üzere sistem %1'in altında bir aşımla istenilen konuma gidebilmektedir. Projede hızın önemli olmamasından dolayı 2-3 sn'lik yerleşme zamanı proje gereksinimlerini karşılamaktadır. Maxon motorlarının tek eksikliği artımsal enkoder bulundurmasıdır. Bundan dolayı sistem her başlatıldığında başlangıç konumunun tanıtılması gerekmektedir. Bu durum için bu çalışmada linkler manuel olarak fiziksel sınırlara getirilmekte ve konum ataması bu bilinen sınırlara göre yapılmaktadır. Bu durumdan kaçınılması için motorların mutlak enkoderi seçilmesi gerekmektedir. Mutlak enkoderli motor bulunamadığı durumda eksenlere fazladan mutlak enkoder bağlanması gerekmektedir. Bu durumda sistem başladığında mutlak enkoderden konum bilgisi alınarak sürücüde bulunan artımsal enkodere bu konum değerinin ataması yapılmalıdır.

Süt sağım robotu tasarımında bazı değişiklikler yapılarak sistemin hafifletilmesi ve maliyet azaltılması sağlanabilir. Kullanılan fırçasız DC motorlar yerine bazı eksenlerde hidrolik sistemler kullanılarak değişiklik yapılabilir. Örnek olarak ikinci eksende bulunan motor-redüktör sistemi yaklaşık 5 kg bir ağırlığa sahiptir. Ayrıca sistemin maliyeti yaklaşık 5000 TL tutmaktadır. Yeni bir tasarımda bu sistem yerine daha düşük maliyetli bir hidrolik sistem kullanılabilir.

Sistemde görülen en önemli sorun meme konumu tespitinde kullanılan kameranın uygun özellikleri taşımamasıdır. Gerek boyutlarının büyük olmasından dolayı gerek çözünürlük vb. özelliklerinin düşü olmasından dolayı yeterli performans elde edilememiştir. Kamera olarak

TOF (Time of Flight) kameralar kullanılması daha uygundur. Ayrıca kullanılacak olan kameranın boyut (max 10 mm x 10 mm x 10 mm) ve ağırlığının robotun ucuna montajının yapılabilmesi için istenilen değerler arasında olması gerekmektedir. Piyasada bulunabilen MESA SR4000 marka kamera kullanım için uygundur.



Şekil 6.1: MESA SR400 TOF kamera [18].

Sistemde motor-redüktör sistemleri ile eksen milleri arasında kullanılan kayış-kasnak ile aktarım yapılması ileride bazı problemler çıkarabileceğinden ötürü motor-redüktör sistemlerinin eksenlere direkt bağlantısının yapılması daha uygun olacaktır.

Prototip iç ortamda çalışma şartları için hazırlandığından dolayı saha çalışmalarında kullanılmak üzere süt sağım robotunun asılabileceği bir ayak tasarımı yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **BS ISO 8373** (2012). Robots and Robotic Devices-Vocabulary.

[2] **Url-1** <http://www.thedairysite.com/articles/2163/automatic-milking-how-effective-is-it>, alındığı tarih : 25.08.2014

[3] **Siciliano, B., ve Khatib, O.** (2008). *Handbook of robotics*, Fifth Edition, Springer, Berlin.

[4] **Url-2** < http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8813854916638/14-237-EN-Jun.pdf >, alındığı tarih : 20.08.2014

[5] **Url-3** < http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8813560463390/14-196-EN.pdf >, alındığı tarih : 20.08.2014

[6] **Url-4** < http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8813574389790/14-347-348-349-351-EN.pdf >, alındığı tarih : 20.08.2014

[7] **Serway, A. R., ve Beichner, J. R.** (2000). *Physics for scientist and engineers*, Fifth Edition, Brooks / Cole.

[8] **Url-5** < http://www.beltingonline.com/t20-standard-breco-open-length-timing-belt-1740 > , alındığı tarih : 10.08.2014

[9] **Pfeiffer, O., Ayre, A. ve Keydel, C.** (2003). *Embedded networking with CAN and CANOpen*, RTC Books,San Clemente.

[10] **Url-6** < http://www.peak-system.com/PCAN-USB.199.0.html?&L=1>, alındığı tarih : 17.06.2014

[11] **Spong, M.W., Hucthinson, S. ve Vidyasar M.** (2005). *Robot modeling and control*, First Edition, Wiley.

[12] **Baggio, D.L., Emami, S., Escriva, D. M., Levgen, K., Mahmood, N., Saragih, J. ve Shilkrot, R.**(2012). *Mastering OpenCv with practical computer vision projects*, Packt Publishing, Birmingham.

[13] **Url-7** < http://docs.opencv.org/doc/user_guide/ug_traincascade.html>, alındığı tarih : 17.07.2014

[14] **Url-8** < http://www.veteriner.cc/sigir/sigirlarda_secim.asp>, alındığı tarih : 10.07.2014

[15] **Url-9** < http://www.besiyemi.com/sigirlarda-meme-uclarinin-alinmasi-islemi/>,alındığı tarih : 10.08.2014

[16] **Laganiere, R.** (2011). *OpenCV computer vision applicaiton programming cookbook*, Packt Publishing, Birmingham.

[17] **Bradski, G. ve Kaehler, A.** (2008). *Learning OpenCV*, First edition, O'Reilly Media, Sebastopol.

[18] **Url-10** < http://www.mesa-imaging.ch/products/sr4000/>, alındığı tarih : 10.07.2014

EKLER

EK A: Süt sağım robotu kinematik simulasyon SIMULINK programı.

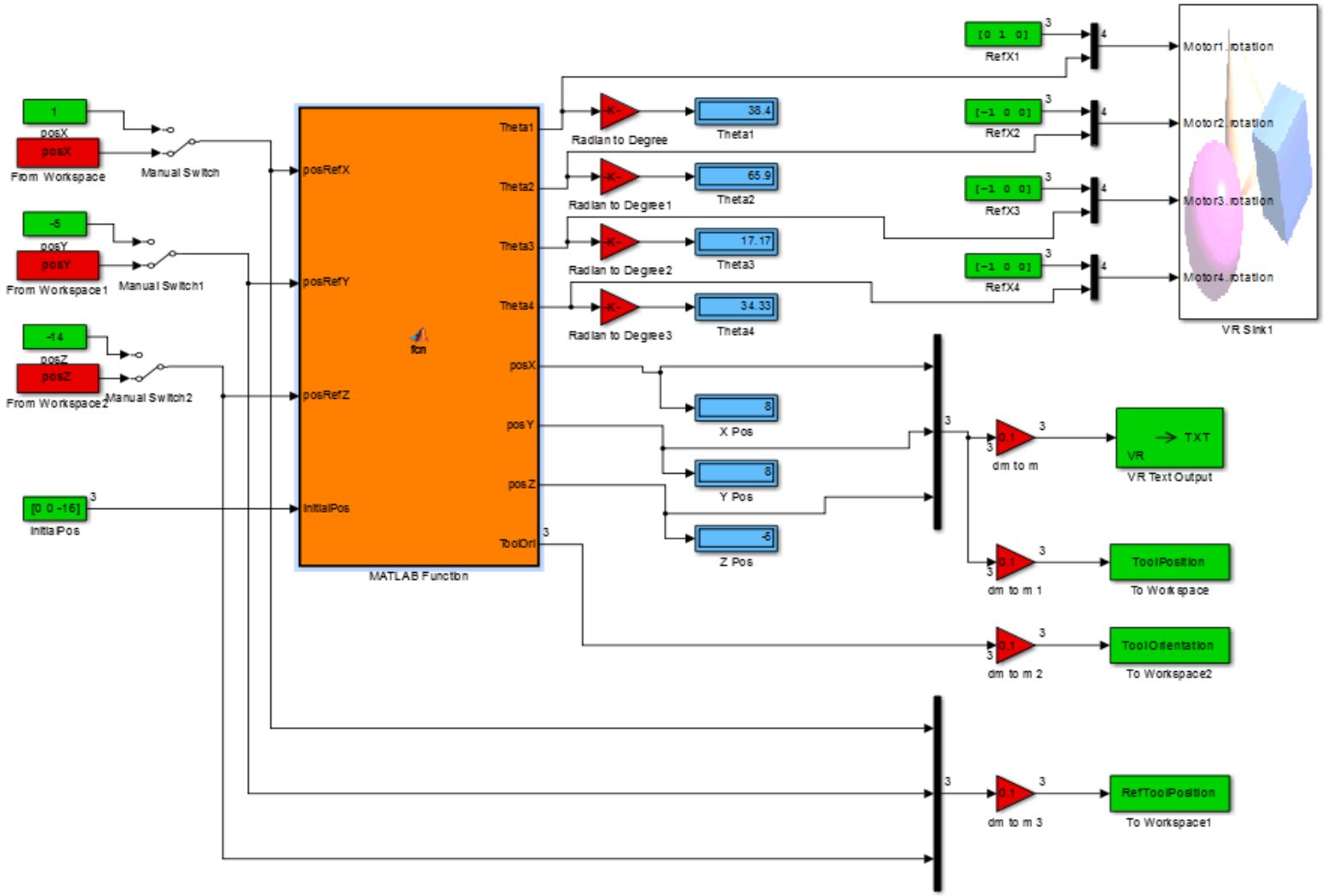
EK B: Süt sağım robotu CANBUS iletişimi picoscope çıktısı.

EK C: Kullanılan motorların teknik çizimleri.

EK D: Süt sağım robotu statik gerilme analizleri.

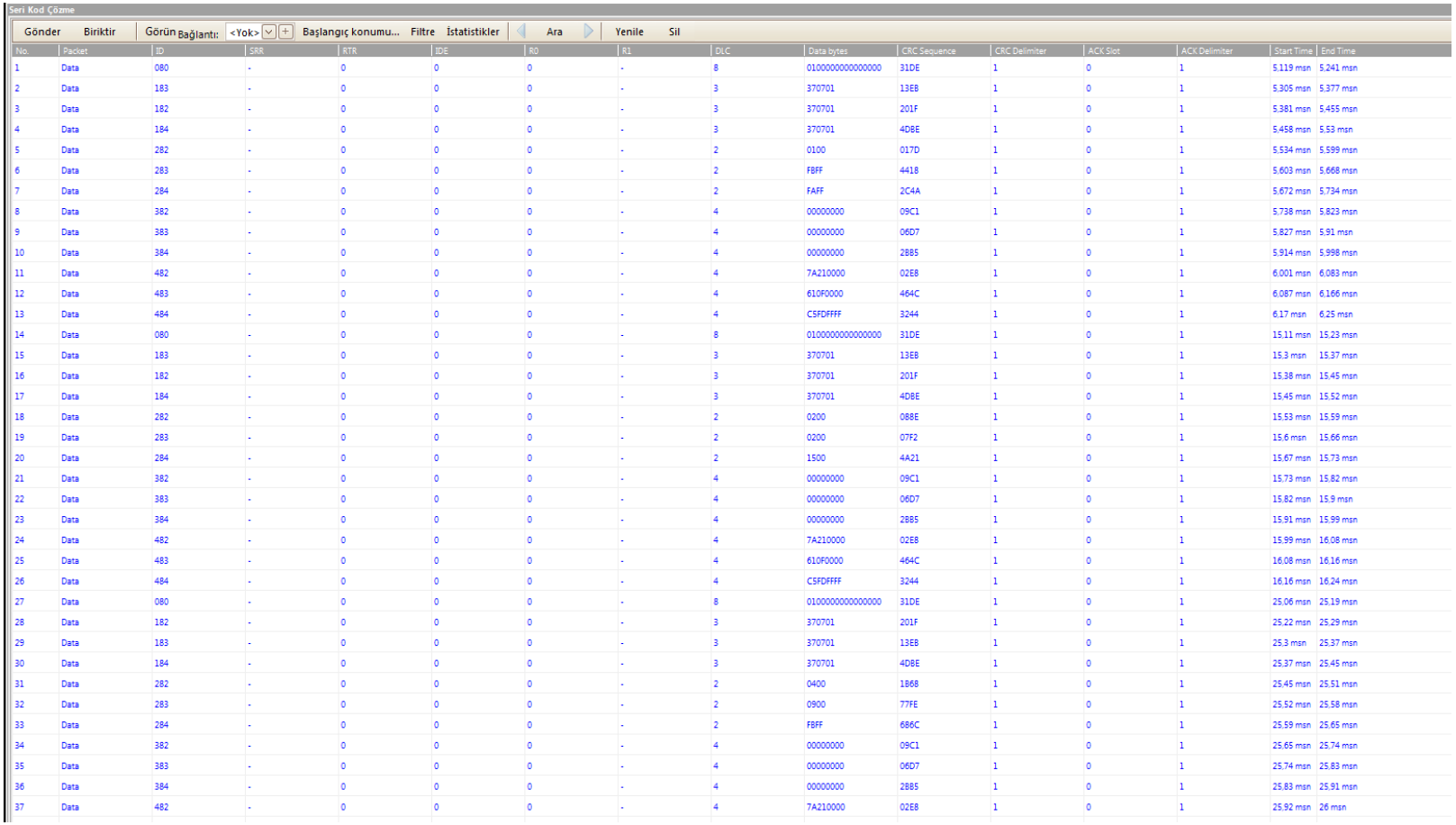
EK E: Sürücülerin "Auto Tuning" ile belirlenen kontrolör katsayıları.

EK A



Şekil A.1: Süt sağım robotu kinematik simulasyon SIMULINK programı.

EK B

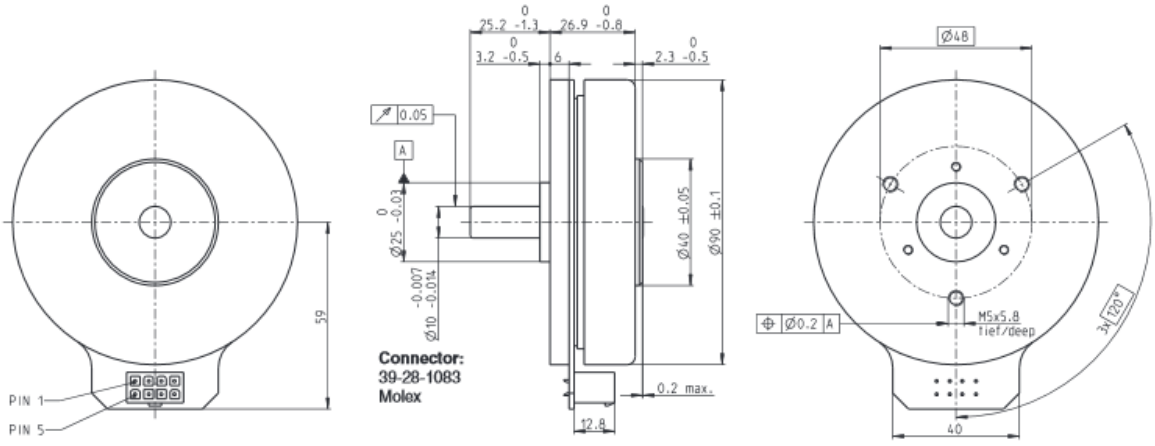

Seri Kod Çözme

Gönder Biriktir Görün Bağlantı: <Yok> Başlangıç konumu... Filtre İstatistikler Ara Yenile Sil

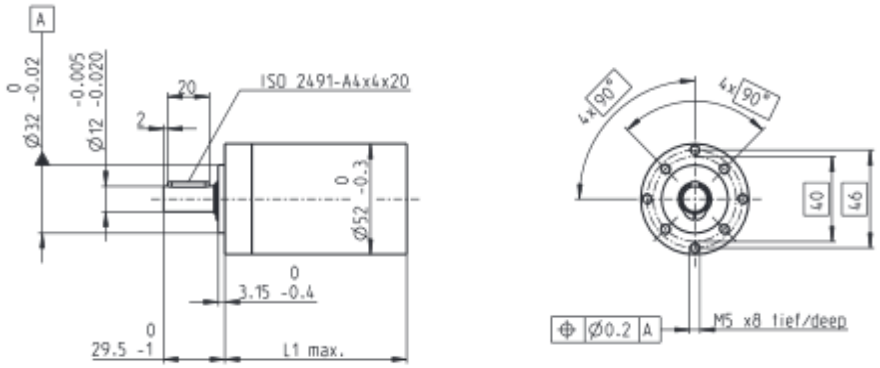
No.	Packet	ID	SRR	RTR	IDE	R0	R1	DLC	Data bytes	CRC Sequence	CRC Delimiter	ACK Slot	ACK Delimiter	Start Time	End Time
1	Data	080	-	0	0	0	-	8	0100000000000000	31DE	1	0	1	5,119 msn	5,241 msn
2	Data	183	-	0	0	0	-	3	370701	13EB	1	0	1	5,305 msn	5,377 msn
3	Data	182	-	0	0	0	-	3	370701	201F	1	0	1	5,381 msn	5,455 msn
4	Data	184	-	0	0	0	-	3	370701	4DBE	1	0	1	5,458 msn	5,53 msn
5	Data	282	-	0	0	0	-	2	0100	017D	1	0	1	5,534 msn	5,599 msn
6	Data	283	-	0	0	0	-	2	FBFF	4418	1	0	1	5,603 msn	5,668 msn
7	Data	284	-	0	0	0	-	2	FAFF	2C4A	1	0	1	5,672 msn	5,734 msn
8	Data	382	-	0	0	0	-	4	00000000	09C1	1	0	1	5,738 msn	5,823 msn
9	Data	383	-	0	0	0	-	4	00000000	06D7	1	0	1	5,827 msn	5,91 msn
10	Data	384	-	0	0	0	-	4	00000000	2BB5	1	0	1	5,914 msn	5,998 msn
11	Data	482	-	0	0	0	-	4	7A210000	02E8	1	0	1	6,001 msn	6,083 msn
12	Data	483	-	0	0	0	-	4	610F0000	464C	1	0	1	6,087 msn	6,166 msn
13	Data	484	-	0	0	0	-	4	C5FDFFFF	3244	1	0	1	6,17 msn	6,25 msn
14	Data	080	-	0	0	0	-	8	0100000000000000	31DE	1	0	1	15,11 msn	15,23 msn
15	Data	183	-	0	0	0	-	3	370701	13EB	1	0	1	15,3 msn	15,37 msn
16	Data	182	-	0	0	0	-	3	370701	201F	1	0	1	15,38 msn	15,45 msn
17	Data	184	-	0	0	0	-	3	370701	4DBE	1	0	1	15,45 msn	15,52 msn
18	Data	282	-	0	0	0	-	2	0200	08BE	1	0	1	15,53 msn	15,59 msn
19	Data	283	-	0	0	0	-	2	0200	07F2	1	0	1	15,6 msn	15,66 msn
20	Data	284	-	0	0	0	-	2	1500	4A21	1	0	1	15,67 msn	15,73 msn
21	Data	382	-	0	0	0	-	4	00000000	09C1	1	0	1	15,73 msn	15,82 msn
22	Data	383	-	0	0	0	-	4	00000000	06D7	1	0	1	15,82 msn	15,9 msn
23	Data	384	-	0	0	0	-	4	00000000	2BB5	1	0	1	15,91 msn	15,99 msn
24	Data	482	-	0	0	0	-	4	7A210000	02E8	1	0	1	15,99 msn	16,08 msn
25	Data	483	-	0	0	0	-	4	610F0000	464C	1	0	1	16,08 msn	16,16 msn
26	Data	484	-	0	0	0	-	4	C5FDFFFF	3244	1	0	1	16,16 msn	16,24 msn
27	Data	080	-	0	0	0	-	8	0100000000000000	31DE	1	0	1	25,06 msn	25,19 msn
28	Data	182	-	0	0	0	-	3	370701	201F	1	0	1	25,22 msn	25,29 msn
29	Data	183	-	0	0	0	-	3	370701	13EB	1	0	1	25,3 msn	25,37 msn
30	Data	184	-	0	0	0	-	3	370701	4DBE	1	0	1	25,37 msn	25,45 msn
31	Data	282	-	0	0	0	-	2	0400	1B68	1	0	1	25,45 msn	25,51 msn
32	Data	283	-	0	0	0	-	2	0900	77FE	1	0	1	25,52 msn	25,58 msn
33	Data	284	-	0	0	0	-	2	FBFF	686C	1	0	1	25,59 msn	25,65 msn
34	Data	382	-	0	0	0	-	4	00000000	09C1	1	0	1	25,65 msn	25,74 msn
35	Data	383	-	0	0	0	-	4	00000000	06D7	1	0	1	25,74 msn	25,83 msn
36	Data	384	-	0	0	0	-	4	00000000	2BB5	1	0	1	25,83 msn	25,91 msn
37	Data	482	-	0	0	0	-	4	7A210000	02E8	1	0	1	25,92 msn	26 msn

Şekil B.1: Süt sağım robotu CANBUS iletişimi picoscope çıktısı.

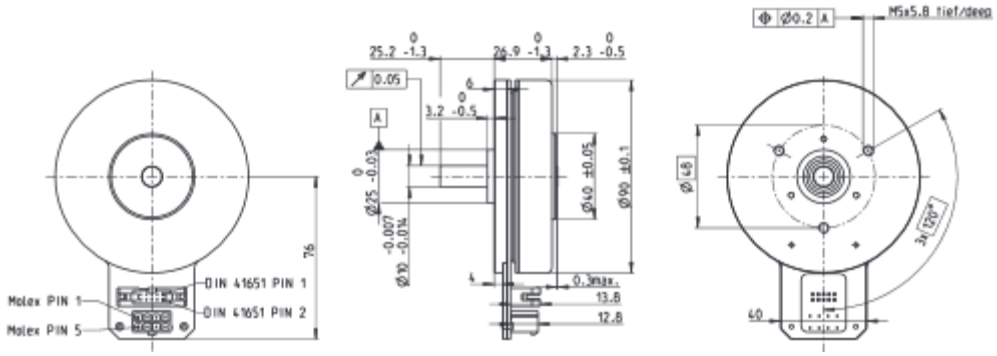
EK C



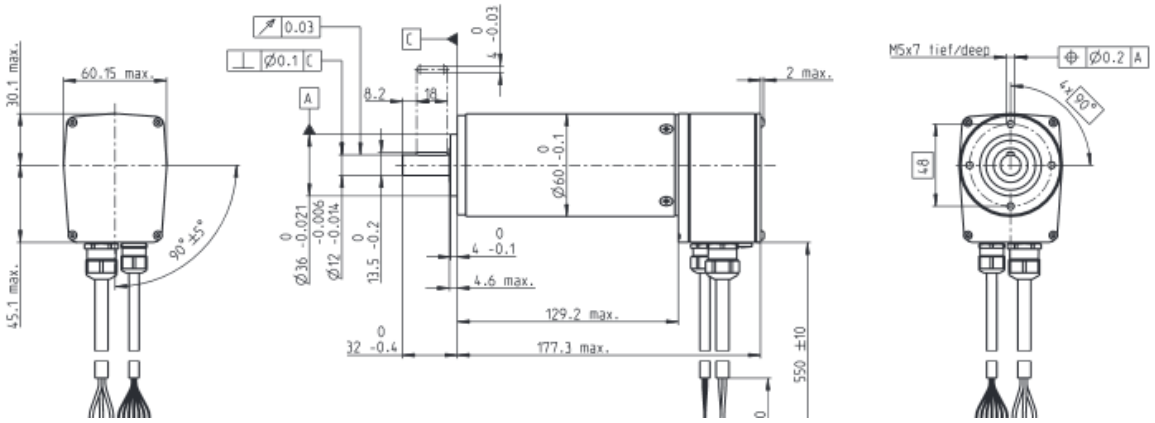
Şekil C.1: Birinci, üçüncü, dördüncü eksen motor detaylı çizim.



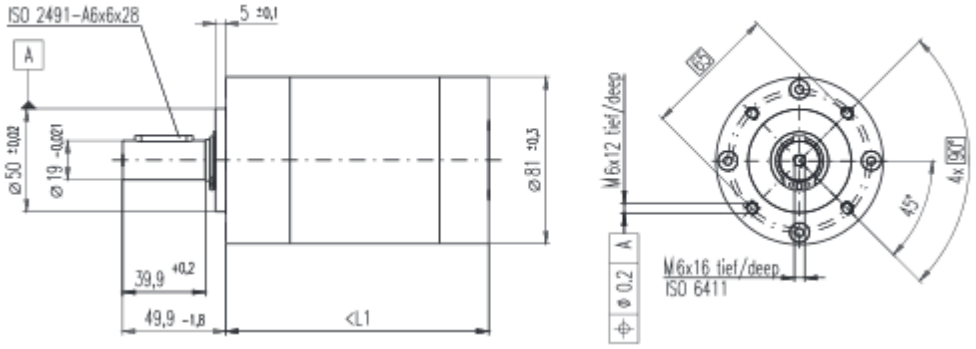
Şekil C.2: Birinci, üçüncü, dördüncü eksen redüktör detaylı çizim.



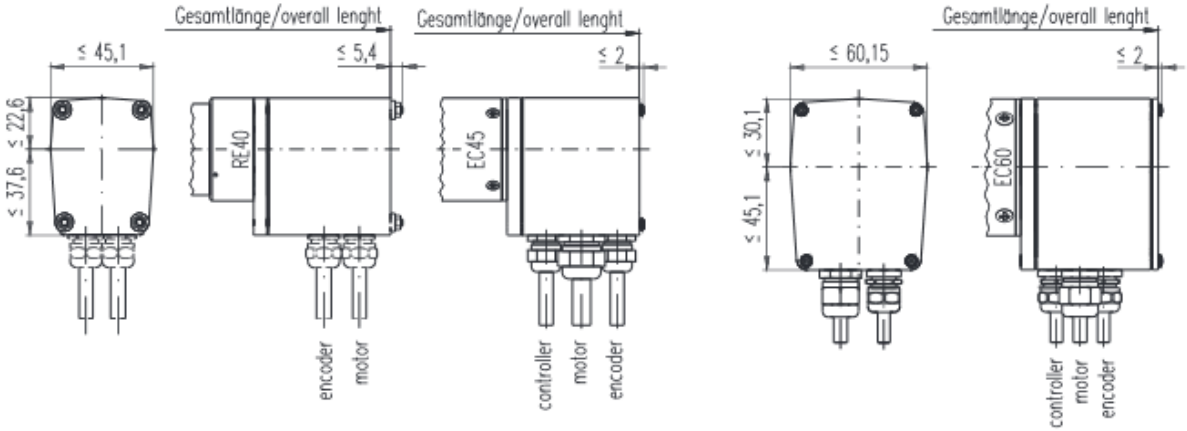
Şekil C.3: Birinci, üçüncü, dördüncü eksen enkoder detaylı çizimi.



Şekil C.4: İkinci eksen motorun detaylı çizimi.

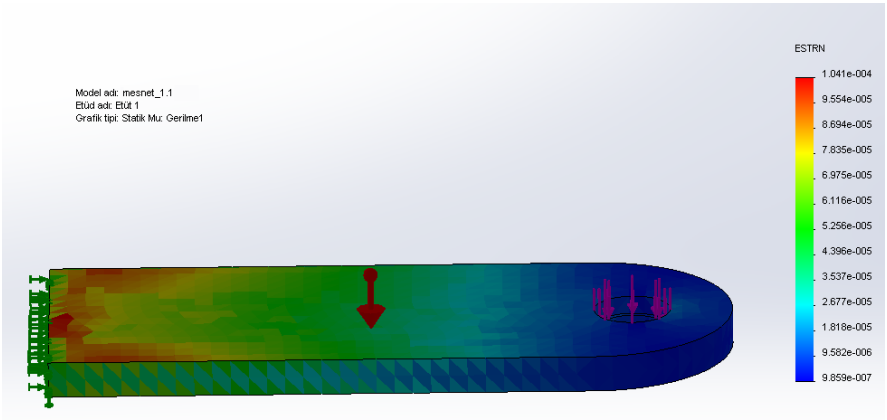


Şekil C.5: İkinci eksen redüktör detaylı çizim.

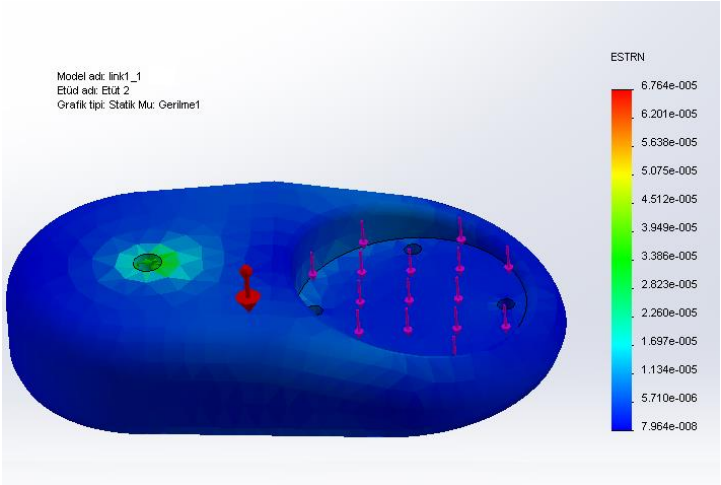


Şekil C.6: İkinci eksen enkoder detaylı çizim.

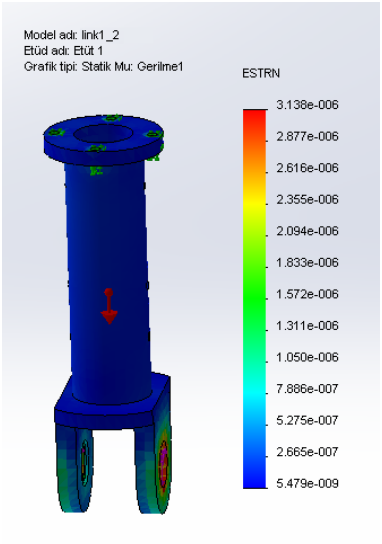
EK D



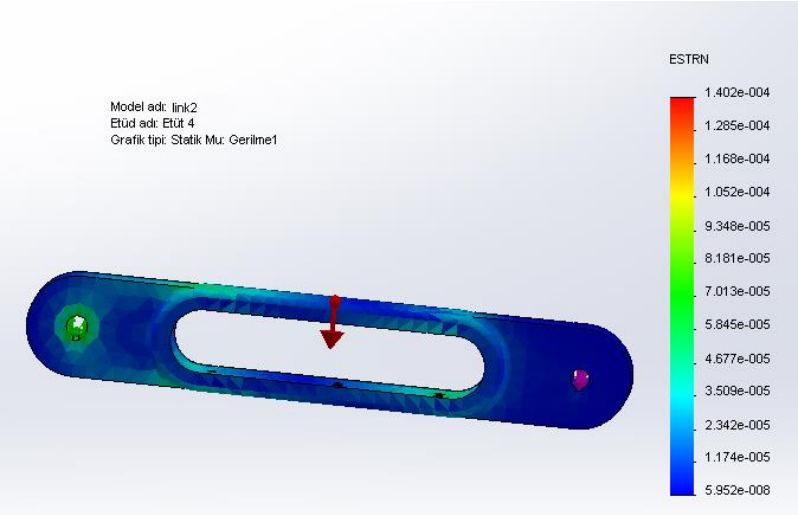
Şekil D.1:Üst tutacak statik gerilme analizi.



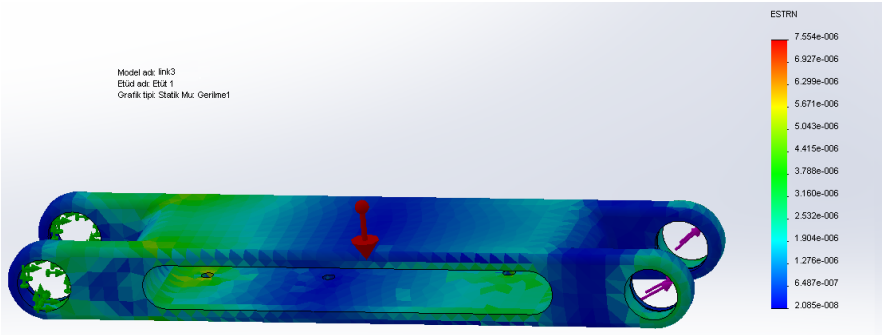
Şekil D.2 : Birinci eklem üst parça gerilme analizi.



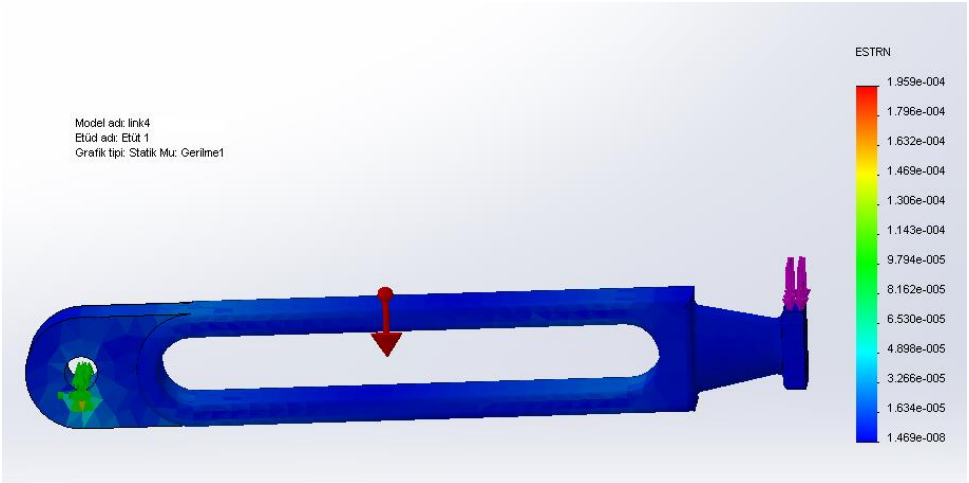
Şekil D.3: Birinci eklem alt parça gerilme analizi.



Şekil D.4: İkinci eklem gerilme analizi.

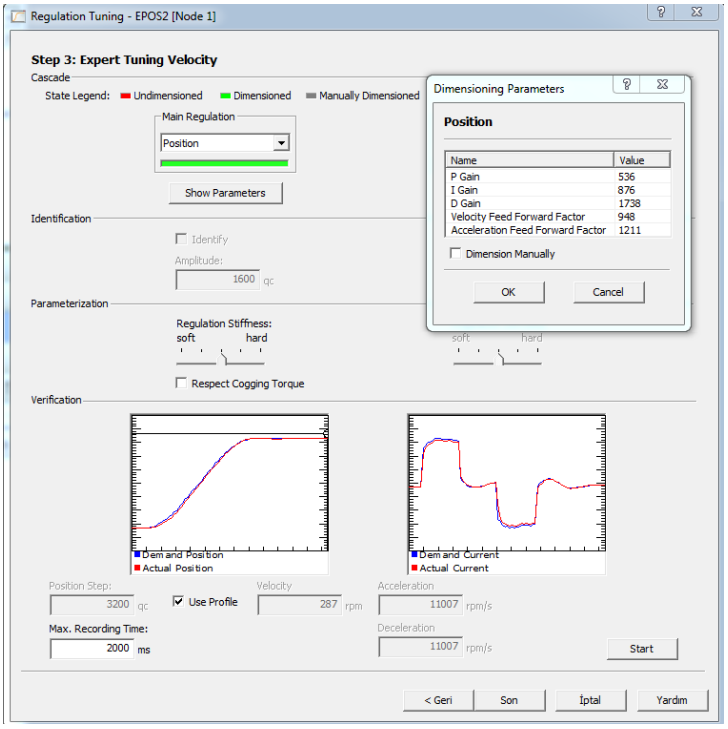


Şekil D.5: Üçüncü eklem gerilme analizi.

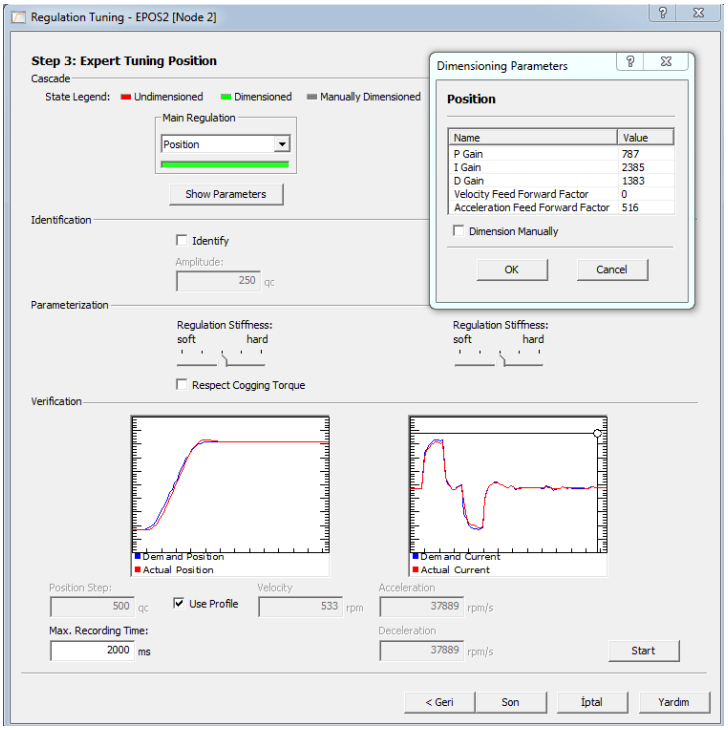


Şekil D.6: Dördüncü eklem gerilme analizi.

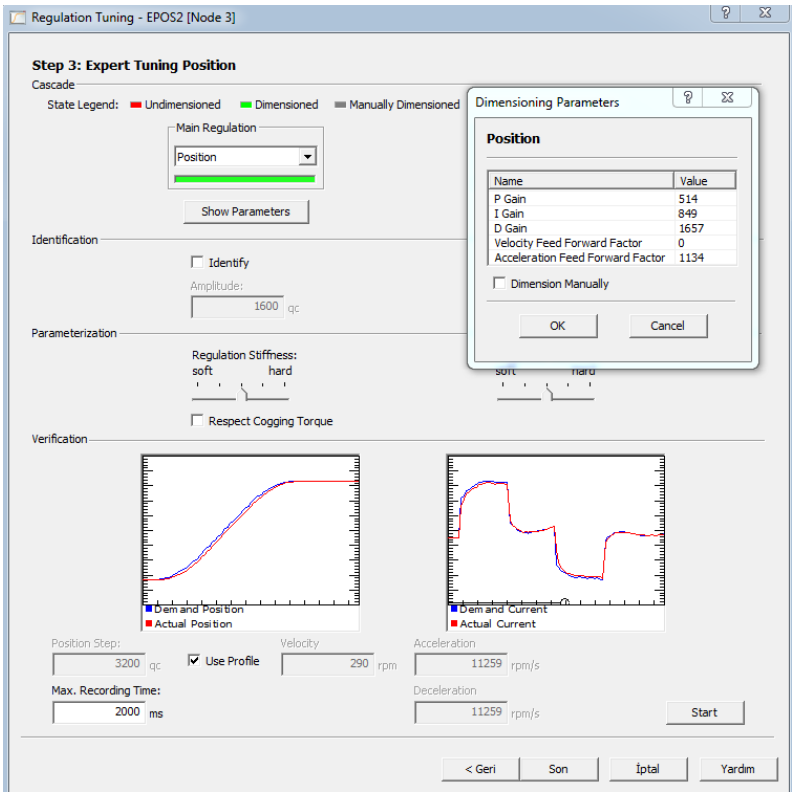
EK E



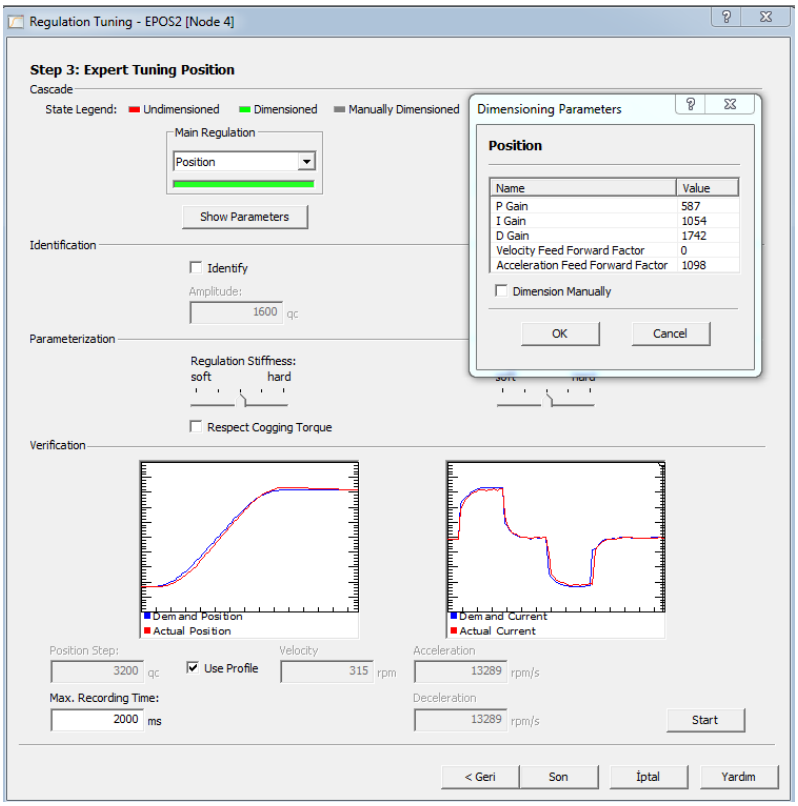
Şekil E.1: Birinci eksen auto tuning pozisyon performansı.



Şekil E.2: İkinci eksen auto tuning pozisyon performansı.



Şekil E.3: Üçüncü eksen auto tuning pozisyon performansı.



Şekil E.4: Dördüncü eksen auto tuning pozisyon performansı.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hulusi ÖZÜDURUK

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 05.10.1988

Adres: Gümüş Arayıcı Sok. Mimar Sinan Mah. No:30/1 Üsküdar İstanbul

E-Posta: hulusi1486@hotmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, Kontrol Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Hulusi Özüduruk, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde lisans eğitimi sırasında mekatronik ve kontrol sistemleri ile ilgili çalışmalar yaptı. Yüksek lisansını yaptığı sistem dinamiği ve kontrol alanında akademik çalışmaların uygulamada yerini bulması gerektiği fikriyle endüstrideki bu yönde olan çalışmaları inceledi. Bu süreçte TÜBİTAK 1512 girişimcilik programına proje hazırlayıp bu proje için Girişimcilik Sermayesi Desteği almaya hak kazandı ve 2013 yılında Robkon Robotoik ve Otomasyon San.Tic.Ltd.Şti. ismiyle kendi şirketini kurdu. Halen kendi şirketinde akademik değeri olan ürünlerin geliştirilmesiyle ilgili çalışmalarını sürdürmektedir.