

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRE ÜZERİNDE DengeDE DURABİLEN ROBOT TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Avni Hilmi PAZARBAŞI

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Şubat 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRE ÜZERİNDE DengeDE DURABİLEN ROBOT TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Avni Hilmi PAZARBAŞI
(518141021)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müştak Erhan YALÇIN

Şubat 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518141021 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Avni Hilmi PAZARBAŞI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KÜRE ÜZERİNDE DengeDE DURABİLEN ROBOT TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Müştak Erhan YALÇIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Volkan SEZER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Tuba AYHAN
Mef Üniversitesi

Teslim Tarihi : 9 Eylül 2019
Savunma Tarihi : 28 Şubat 2020





Dedem Avni Pazarbaşı anısına,



ÖNSÖZ

Eğitim öğretim hayatım boyunca, her zaman yanımda olan anne ve babama, lisans ve yüksek lisans öğrenimim süresince desteklerini esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. Müştak Erhan YALÇIN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen Elektrik Elektronik Mühendisi Ufuk Şahin'e, Kontrol ve Otomasyon Mühendisi Ahmet Caner Erdoğan'a, Makine Mühendisi Ersin Durmuş'a, Metalurji ve Malzeme Mühendisi Hatice Kübra Gümüş'e, Elektrik Elektronik Mühendisi Tayfun Gümüş'e ve son olarak kıymetli eşim Hüray Pazarbaşı'ya teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2019

Avni Hilmi Pazarbaşı
Kontrol ve Otomasyon Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Mobil Platformların Kullanım Alanları.....	1
1.2 Küre Üzerinde Dengede Duran Robotlar	2
1.3 Tez Çalışmasında Tasarlanan Robot	6
2. ROBOTA İLİŞKİN MEKANİK VE ELEKTRONİK TASARIM	9
2.1 Mekanik Tasarım.....	9
2.1.1 Gövde tasarımı	10
2.1.2 Motor seçimi	13
2.2 Elektronik Tasarım	17
2.2.1 Anakart tasarımı	17
2.2.2 Motor sürücü tasarımı.....	25
2.2.3 Ataletsel ölçüm birimi	32
2.2.4 Batarya.....	33
3. MATEMATİKSEL MODEL VE KONTROLÖR GELİŞTİRME	37
3.1 Robotu Dengede Tutan Kontrolcünün Geliştirilmesi.....	37
3.1.1 Matematiksel modelleme	38
3.1.2 Kontrolör geliştirme	39
3.1.3 Benzetim ortamının geliştirilmesi	40
3.1.4 Benzetim sonuçları	42
3.2 Motor Tork Kontrolcüsünün Geliştirmesi	57
4. DOĞRULAMA ÇALIŞMASI.....	61
4.1 Test Düzeneği.....	61
4.2 Doğrulama Testleri ve Sonuçları.....	66
5. SONUÇ	71
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	75



KISALTMALAR

ADC	: Analog Digital Converter
ARM	: Acorn RISC Machine
COM	: Communication
DA-DA	: Doğru Akım - Doğru Akım
DCM	: Direction cosine matrix
DMA	: Direct Memory Access
FTDI	: Future Technology Devices International
IMU	: Inertial Measurement Unit
I2C	: Inter - Integrated Circuit
JTAG	: Joint Test Action Group
Li-Po	: Lityum Polimer
LQG	: Linear Quadratic Gaussian
LQR	: Linear Quadratic Regulator
MOSFET	: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
PWM	: Pulse Width Modulation
SPI	: Serial Peripheral Interface
SRAM	: Static Random Access Memory
UART	: Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	: Universal Serial Bus



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Maxon DCX 22 fırçalı motoruna ait teknik özellikler	14
Çizelge 2.2 : Maxon GPX 22 gezegen dişli takımına ait teknik özellikler.....	15
Çizelge 2.3 : Maxon EASY 16 artırımı sayıcıya ait teknik özellikler.....	16





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Carnegie Mellon Üniversitesi'nde geliştirilen robot	3
Şekil 1.2 : Tohoku Gakuin Üniversitesi'nde geliştirilen robot.....	3
Şekil 1.3 : Fankhauser ve Gwerder'in çalışmalarında kullanılan robot	4
Şekil 1.4 : Çok yönlü teker	5
Şekil 1.5 : Robot üzerindeki birimlerin birbirleri ile ilişkisi.....	6
Şekil 1.6 : Tasarımı planlanan robota ilişkin görsel.....	7
Şekil 2.1 : Motor tutucu parça.....	10
Şekil 2.2 : Alt gövde plakası	11
Şekil 2.3 : Orta gövde plakası	12
Şekil 2.4 : Üst gövde plakası.....	12
Şekil 2.5 : Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de gösterilen gövde plakalarının montajlanması ile oluşan robot gövdesi.....	13
Şekil 2.6 : Maxon DCX 22 fırçalı motorun boyutlar	14
Şekil 2.7 : Maxon DCX 22 fırçalı motor	14
Şekil 2.8 : Maxon GPX 22 gezegen dişli takımının boyutları	15
Şekil 2.9 : Maxon GPX 22 gezegen dişli takımı.....	15
Şekil 2.10 : Maxon EASY 16 artırımı sayıcının boyutları	16
Şekil 2.11 : EASY 16 artırımı sayıcı.....	16
Şekil 2.12 : Motor, çok yönlü teker ve motor tutucu montaj resmi Şekil 2.7, Şekil 2.9 ve Şekil 2.11'de gösterilen motor, dişli takımı ve artırımı sayıcının montajlanmasıyla oluşan yapı	16
Şekil 2.13 : Motor, çok yönlü teker ve motor tutucu montaj resmi Şekil 2.12, Şekil 2.1 ve Şekil 1.4 'de gösterilen motor, çok yönlü teker ve motor tutucunun montaj resmi.....	17
Şekil 2.14 : STM32F411 Nucleo 64 geliştirme kartı	18
Şekil 2.15 : Film kapasite (solda) ve Ferrit filtre (sağda).....	18
Şekil 2.16 : Anakart şematik tasarımı.....	19
Şekil 2.17 : Motor sürücülerin anakarta bağlanacağı konnektörlere ait şematik tasarım.....	20
Şekil 2.18 : Nucleo 64 geliştirme kartının anakarta bağlanacağı konnektöre ait şematik tasarım.....	20
Şekil 2.19 : Anakart üzerinde RS485 haberleşmesini UART haberleşmesine çeviren kısmı ait şematik tasarım	21
Şekil 2.20 : Anakart üzerindeki 24V bara kapasiteleri ve diyoduna ait şematik tasarım.....	21
Şekil 2.21 : Anakart üzerindeki UART haberleşmelerine ve beslemelerine ilişkin şematik tasarım	22
Şekil 2.22 : Anakart üzerinde, motor sürücülerin besleme voltajlarının uygun olduğunu gösteren ledlere ilişkin şematik tasarım	22

Şekil 2.23 : Anakart üzerinde 24V gerilimden 5V elde edilmesini sağlayan kısma ilişkin şematik tasarım	23
Şekil 2.24 : Anakart üzerinde 5V gerilimden 3.3V gerilim elde edilmesini sağlayan kısma ilişkin şematik tasarım.....	23
Şekil 2.25 : Anakart baskı devre tasarımı.....	24
Şekil 2.26 : Anakartın çevre birimleri ile bağlantı portları	24
Şekil 2.27 : Anakart baskı devre tasarımının farklı açılardan görünümü.....	25
Şekil 2.28 : Üretilen anakart.....	25
Şekil 2.29 : STM32F103 Nucleo 32 geliştirme kartı	26
Şekil 2.30 : Motor sürücü şematik tasarımı.....	27
Şekil 2.31 : Motor sürücü kartta yer alan STM32F103 Nucleo 32 geliştirme kartının konnektörleri ve çevresel birimlerine ilişkin şematik tasarım	27
Şekil 2.32 : Artırımlı sayıcılardan motor dönüşü ile ilgili bilgilerin alındığı kısma ilişkin şematik tasarım.....	28
Şekil 2.33 : SPI arayüzüne sahip artırımlı sayıcılardan motor dönüşü ile ilgili bilgilerin alındığı kısma ilişkin şematik tasarım	28
Şekil 2.34 : Motor sürücü devre kısmına ilişkin şematik tasarım.....	29
Şekil 2.35 : Motor sürücü üzerinde 24 V gerilimi 5 V gerilime dönüştüren ve besleme gerilimlerini gösteren ledlere ilişkin şematik tasarım.....	29
Şekil 2.36 : Motor sürücü kartı, anakarta bağlayacak konektöre ilişkin şematik tasarım	30
Şekil 2.37 : Motor sürücü baskı devre tasarımı	30
Şekil 2.38 : Motor sürücünün çevre birimleri ile bağlantı portları	31
Şekil 2.39 : Motor sürücü baskı devre tasarımının farklı açılardan görünümü	31
Şekil 2.40 : Üretilen motor sürücü.....	32
Şekil 2.41 : Ataletsel ölçüm birimi	33
Şekil 2.42 : Batarya izleme ünitesi	34
Şekil 2.43 : Anakart, motor sürücüler ve IMU'nun bir aradaki görünümü.....	34
Şekil 2.44 : Üretilen anakart ve motor sürücünün bir aradaki görünümü.....	35
Şekil 3.1 : Azimut (γ) ve yönelim (ϕ) açıları.....	39
Şekil 3.2 : Kalman Filtresinin kullanıldığı kontrol mimarisi	39
Şekil 3.3 : Sistem ve kontrolcüyü içeren model	40
Şekil 3.4 : Giriş çıkış demeti içeren kısım.....	40
Şekil 3.5 : Kinematik fonksiyonu içeren kısım	41
Şekil 3.6 : LQG düzenleyici için kazanç matris seti seçen kısım.....	41
Şekil 3.7 : LQG düzenleyici ve model matrislerinin uygulandığı kısım.....	42
Şekil 3.8 : Gövdenin x eksenindeki konum referansı	43
Şekil 3.9 : Gövdenin x eksenindeki hız referansı	43
Şekil 3.10 : Gövdenin y eksenindeki konum referansı	43
Şekil 3.11 : Gövdenin y eksenindeki hız referansı	43
Şekil 3.12 : Gövdenin z eksenindeki konum referansı.....	44
Şekil 3.13 : Gövdenin z eksenindeki hız referansı.....	44
Şekil 3.14 : Topun x eksenindeki konum referansı.....	44
Şekil 3.15 : Topun x eksenindeki hız referansı.....	44
Şekil 3.16 : Topun y eksenindeki konum referansı.....	44
Şekil 3.17 : Topun y eksenindeki hız referansı.....	44
Şekil 3.18 : Gövdenin X eksenindeki konumunun Şekil 3.8'de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı	45

Şekil 3.19 : Gövdenin Y eksenindeki konumunun Şekil 3.10’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	45
Şekil 3.20 : Gövdenin Z eksenindeki konumunun Şekil 3.12’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	46
Şekil 3.21 : Gövdenin X eksenindeki hızının Şekil 3.9’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	46
Şekil 3.22 : Gövdenin Y eksenindeki hızının Şekil 3.11’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	46
Şekil 3.23 : Gövdenin Z eksenindeki hızının Şekil 3.13’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	46
Şekil 3.24 : Topun X eksenindeki konumunun Şekil 3.14’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	47
Şekil 3.25 : Topun Y eksenindeki konumunun Şekil 3.16’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	47
Şekil 3.26 : Topun X eksenindeki hızının Şekil 3.15’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı	47
Şekil 3.27 : Topun Y eksenindeki hızının Şekil 3.17’de verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı	47
Şekil 3.28 : Gövdenin X eksenindeki konumunun Şekil 3.8’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	48
Şekil 3.29 : Gövdenin Y eksenindeki konumunun Şekil 3.10’da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	48
Şekil 3.30 : Gövdenin Z eksenindeki konumunun Şekil 3.12’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	49
Şekil 3.31 : Gövdenin X eksenindeki hızının Şekil 3.9’da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	49
Şekil 3.32 : Gövdenin Y eksenindeki hızının Şekil 3.11’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	49
Şekil 3.33 : Gövdenin Z eksenindeki hızının Şekil 3.13’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.....	49
Şekil 3.34 : Gövdenin x eksenindeki konumunu ifade eden durum değişkeni Topun X eksenindeki konumunun Şekil 3.14’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı	50

Şekil 3.35 : Topun Y eksenindeki konumunun Şekil 3.16’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı	50
Şekil 3.36 : Topun X eksenindeki hızının Şekil 3.15’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı	50
Şekil 3.37 : Topun Y eksenindeki hızının Şekil 3.17’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı	50
Şekil 3.38 : Gövdenin X eksenindeki konumunun Şekil 3.8’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	51
Şekil 3.39 : Gövdenin Y eksenindeki konumunun Şekil 3.10’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	51
Şekil 3.40 : Gövdenin Z eksenindeki konumunun Şekil 3.12’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	52
Şekil 3.41 : Gövdenin X eksenindeki hızının Şekil 3.9’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	52
Şekil 3.42 : Gövdenin Y eksenindeki hızının Şekil 3.11’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	52
Şekil 3.43 : Gövdenin Z eksenindeki hızının Şekil 3.13’de verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	52
Şekil 3.44 : Topun X eksenindeki konumunun Şekil 3.14’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	53
Şekil 3.45 : Topun Y eksenindeki konumunun Şekil 3.16’da verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	53
Şekil 3.46 : Topun X eksenindeki hızının Şekil 3.15’de verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	53
Şekil 3.47 : Topun Y eksenindeki hızının Şekil 3.17’de verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	53
Şekil 3.48 : Gövdenin X eksenindeki konumunun Şekil 3.8’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	54
Şekil 3.49 : Gövdenin Y eksenindeki konumunun Şekil 3.10’da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	54
Şekil 3.50 : Gövdenin Z eksenindeki konumunun Şekil 3.12’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	55

Şekil 3.51 : Gövdenin X eksenindeki hızının Şekil 3.9’da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	55
Şekil 3.52 : Gövdenin Y eksenindeki hızının Şekil 3.11’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	55
Şekil 3.53 : Topun y eksenindeki konum referansı Gövdenin Z eksenindeki hızının Şekil 3.13’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.....	55
Şekil 3.54 : Topun X eksenindeki konumunun Şekil 3.14’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	56
Şekil 3.55 : Topun Y eksenindeki konumunun Şekil 3.16’da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	56
Şekil 3.56 : Topun X eksenindeki hızının Şekil 3.15’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	56
Şekil 3.57 : Topun Y eksenindeki hızının Şekil 3.17’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı	56
Şekil 3.58 : Fırçalı doğru akım motorunun benzetim ortamındaki modeli.....	57
Şekil 3.59 : Motor modelinin Simulink kütüphanesinde bulunan discrete PID bloğu ile kapalı çevrimine ilişkin model	57
Şekil 3.60 : Simulink PID bloğu ile tez kapsamında C kodu ile geliştirilen kontrolcülerin birarada çalıştığı model	58
Şekil 3.61 : Motor sürücüsünde koşacak, C kodu ile geliştirilen PI kontrolcü	59
Şekil 3.62 : C kodu ile geliştirilen ve Simulink kütüphanesinde bulunan PI kontrolcülerin etkidiği aynı sisteme ait çıkışları	59
Şekil 4.1 : Oluşturulan test düzeneği	61
Şekil 4.2 : USB arayüzünden UART arayüzüne dönüşüm sağlayan FTDI dönüştürücü	63
Şekil 4.3 : STM32F429 Nucleo 144 geliştirme kartının ve üzerindeki ST-LINK donanımı	63
Şekil 4.4 : Test düzeneğinin çalışmasına ilişkin, ekipman arayüzlerini de içeren şema	64
Şekil 4.5 : Test düzeneğinde yer alan potansiyometre ile üretilen tork referansı ...	66
Şekil 4.6 : Potansiyometre ile üretilen tork referansı ve motorun uyguladığı tork	67
Şekil 4.7 : Benzetim ortamında üretilen robotun x ekseninde bir noktaya gitmesi, beklemesi ve geri dönmesine ilişkin tork referansı	68
Şekil 4.8 : Benzetim ortamında üretilen tork referansı ve motor torku.....	69



KÜRE ÜZERİNDE DengeDE DURABİLEN ROBOT TASARIMI

ÖZET

Bu tez çalışması kapsamında; bulunduğu yer düzleminde bulunan serbest bir kürenin istenilen konuma hareketini ve bu küre üzerindeki gövdenin denge ve yönelimini sağlayan mekanizmanın, elektronik kartların ve kontrolcülerin geliştirilme süreçleri ile tasarım doğrulama çalışmaları anlatılmıştır. Çalışma kapsamında birbirlerine eşit mesafede bulunan, gövdeye bağlı sabit üç motor ve çok yönlü teker tahrikiyle dengesini ve hareketini sağlayan mekanizmanın, tasarımsal geliştirme süreçleri açıklanmış, Langrange denklemleriyle hareket denklemlerinin eldesinden bahsedilmiştir. Hareket denklemlerinin eldesinin ardından robotun dengede durmasını ve istenilen bir konuma yönlendirilmesini sağlayan iki farklı kontrolcü geliştirilmiştir. Geliştirilen LQR (Linear Quadratic Regulator) ve LQG (Linear Quadratic Gaussian) kontrolcülerin test giriş işaretlerine verdiği yanıtlar bozucu etki yokken ve bozucu etki varken incelenmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. LQR ve LGQ kontrolcülerin çıkışı olan motor tork işaretlerini uygulamak üzere doğru akım motorları için tork kontrolcüsü benzetim ortamında geliştirilmiştir. Robotun dengede durmasını sağlayacak kontrolcünün koşacağı ve anakart işlevi gören devre ile anakartan gelen referans tork işaretlerinin motorlar tarafından uygulanmasını sağlayan sürücü kartların; devrelerinin ve baskı devre plakalarının tasarlanması-geliştirilmesi anlatılmış, algılayıcı ve eyleyici seçimleri yapılmıştır. Tasarım çalışmasının tamamlanmasının ardından, tasarım doğrulama çalışmasına geçilmiştir. Robot gövdesinin mekanik tasarımında motorlar dışında hareketli parça bulunmaması sebebiyle gövdenin mekanik montajının dijital tasarım ortamında yapılması yeterli görülmüştür. Elektronik tasarımı yapılan anakart ve sürücü kartlar üretilmiş ve işlevselliği test edilmiştir. Anakartın çıktısı sürücü karta iletilecek olan motor tork kontrol işaretidir ancak sürücü kartların çıktısı doğrudan motorlara uygulanacak elektriksel sinyallerdir. Dolayısı ile doğrulama çalışmaları kapsamında kartlar arasındaki haberleşmelerin yapılabildiği ve sürücü kartın motor tork kontrolü yapabildiği gösterilmiştir. Bu amaçla bir test alyapısı oluşturulmuştur. Motor sürücü kart debug modda çalıştırılmış ve sürekli olarak yazmaçlarındaki değerler takip edilmiştir. Bununla beraber motor sürücü kartın haberleşme çıkışlarından biri sayesinde tork referans değeri ve sürekli olarak motorun çektiği akımın ölçülmesi ile hesaplanan motor tarafından uygulanan tork değeri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Motor sürücü karttan çıkan bilgi bir FTDI dönüştürücü ile bir bilgisayarın USB portu vasıtasıyla bir terminal programına aktarılmıştır. Toplanan bu veriler daha sonra incelenmiş ve istenilen tork değerlerinin motorlar tarafından uygulanabildiği gösterilmiştir.



DESIGN OF A ROBOT BALANCING ON A SPHERE

SUMMARY

There are many different types and a large number of mobile platforms designed to operate in air, land and water environments. These mobile platforms have an increasing usage area to serve quite different purposes such as search and rescue, agriculture, transportation, personal transportation, military activities, assistantship. Those who work on land within these platforms usually have more than one wheel, which leads to restrictions on their mobility and increased size. Yet, the smaller interior spaces are limited by the mobility of the existing platforms. A spherical single wheel and hence a mechanism to act on a single support point will prevent both the limitation of mobility and the enlargement of the vehicle's dimensions.

A vehicle positioned on the sphere offers a concept that takes up less space in crowded cities and has high mobility in heavy traffic environments. While vehicles with internal combustion engines are replaced by electric vehicles and consequently emission rates are reduced, with this concept, both environmentally friendly and high mobility personal vehicles can be produced.

The robot, which is in balance on the sphere, consists of mechanical, electromechanical and electronic parts. The body of the robot can consist of different heights and different number of layers. Up to today, different designs have been made to verify the concept, and some have been implemented. In the thesis study, previously developed robots are examined and their advantages and disadvantages are discussed. The differences of these robots generally come from body structures, drive systems or controller algorithms.

When the robots that are in balance on the sphere are examined, it is observed that their bodies consist of several layers and generally similar equipment is located in these layers. Generally, the bottom layer contains motor bracket parts, and the battery, while the middle layer contains motherboard and driver boards that keep the robot in balance and drive the motors as desired. In the upper layer, there is the internal measurement unit, which produces information about the instant position, speed and acceleration of the robot body. To transfer the propulsion applied by the motors to the sphere, omni-directional wheels were used.

The operating principle of the robot can be explained as follows, the IMU, which is located in the upper layer of the robot body, determines the orientation and angular position of the robot body and periodically shares this information with the motherboard. The controller algorithm is running on the motherboard, which keeps the robot body in balance. This controller calculates the torque values that the motors must apply in order for the robot body to execute reference behavior and sends this information to each motor driver. Motor drivers provide outputs from the power lines in accordance with the calculated control signs and enable the motors to execute the desired behavior.

The body of the robot, which was designed in the thesis study, consists of three layers with a height of 30 cm and a radius of 10 cm. The drive system of the robot consists of Maxon DCX 22 brushed motor and Maxon GPX22 planetary gear set mechanically compatible with this motor. Maxon EASY 16 incremental encoder, which is also mechanically compatible with the motor, has been used to get feedback from the motor. Motherboard and motor driver cards are designed and produced within the scope of thesis work. They have STM 32 F1 and F4 series microcontrollers. BNO055 IMU is preferred to get the feedback of the position, speed and acceleration values of the robot body. In order for the robot to stay in balance and follow the desired references, it was decided to use a state feedback control structure, and more than one structure was implemented in the simulation environment within the scope of the thesis and the simulation results were discussed.

Body plates are designed to be produced from 5mm thick 7000 series aluminum plates by laser cutting method. The 3 plates forming the robot body are connected to each other using stud bolts and nuts. Therefore, the positions where these connectors will be located on each plate are designed to be the same. At the bottom of the body plate at the bottom, there are motor holding parts. Therefore, the motor holding parts are positioned in the angle bisectors of the equilateral triangle, that is, to make 120 degrees with each other. In order to tolerate errors due to distance calculations and production, gap lines which are suitable for spherical wheels and related parts were opened instead of bolt holes. There are various holes on the plate for fixing the battery on the bottom plate and for the motor cables to pass. There are Motherboard and Motor Driver cards on the top of the middle plate. In the design, areas are dismantled to reduce weight, allow cable passages and fix electronic cards. On the top plate, IMU is placed.

The STM32F411 microcontroller development board on the motherboard is used directly because it has the programming interface and will speed up the production processes. DC-DC converter is used to operate with variable supply voltages at the input of the card. Cassette type connectors are used on the motherboard. Motor driver cards are directly attached to these connectors and no extra wiring is required. Various ports have been created on the motherboard that can communicate with motor Drivers and IMU. The motherboard was designed in Altium Designer 18 program.

Each of the motor driver circuits developed within the scope of the thesis work performs the tasks of communicating with the motherboard, reading incremental encoder data, running closed loop motor control codes and supplying power to the motors. It also provides the supply voltages of the incremental encoders. The STM32F103 microcontroller board is used directly on the Motor Driver for low cost and fast production. There are various ports on the driver board to communicate with the motherboard and different types of encoder. H-bridge MOSFET structure was created on the motor driver board to drive the motors and an integrated circuit was used for driving the MOSFET. Again, the current drawn by the motor was measured with the shunt resistor on this circuit. As with the motherboard, the motor driver board was also designed with Altium Designer 18 program.

The mathematical model of the system was created by obtaining steady-state equations with 3 inputs and 10 outputs. Lagrange energy equations approach is used to find steady-state matrices (A and B). Since the expressions obtained with Lagrange equations are non-linear, they are linearized around different points with the assumption that the motors will operate at relatively low speeds, thus the motors will apply relatively low torques. Linearization was made around 73 points depending on

the location of the body. After the linear models were obtained, simulation environment was created and controller development studies started. LQR and LQG controllers have been developed and their performance compared with and without disruptive effects. After the studies, it was decided to use the LQG controller, which operates more robust under disruptive effects.

The torque control algorithm in the motor drives consists of the PI controller. In the Simulink environment, a mathematical model related to the motor chosen within the scope of the thesis study was established and then the coefficients for the PI controller were determined. In the same environment, the algorithm was implemented with C code and it was proven that the code works correctly.

A study was carried out to verify the functionality of the robot designed during the thesis study. In this study, the functionality of the design was tried to be verified rather than the final products to be used in the project. Therefore, motherboard and motor driver cards has been produced as one and the torque references created have been shown to be applicable by the motor. For this purpose, a simulation has been made in which input signs are applied so that the robot goes to a certain position and returns to its original position. The torque values that the motors must apply during this simulation are logged. The logged data is embedded on the motherboard and is transferred to the driver card periodically by communication. In addition, it has been shown that torque control can be done with a potentiometer by giving a torque reference value. The voltage drop on the potentiometer was measured with the analog digital converter unit of the microcontroller on the driver board. A mathematical relationship has been established between the measured value and the torque that the motor must apply. In order to create a mechanical load on the motor, one end of the spring is fixed and the other end is connected to the rotor of the motor. With the variable torque value applied by the engine, the spring was tensioned in different amounts. The current drawn by the motor during the operation was measured with the sensitive shunt resistor on the driver card. The current applied by the motor is calculated by multiplying the measured current value by the motor's torque coefficient. The calculated torque value and reference torque value were transferred to an FTDI converter and then to the computer environment via the communication port of the motor driver board. The reference torque value applied to the motor and the torque applied by the motor are logged using TeraTerm, a terminal program in the computer environment. After the study, the reference torque value and the torque value of the motor were compared. At the end of the verification study, it has been shown that the motors can apply the desired torque values with an acceptable approximation.

As a result, within the scope of thesis work, the usage areas of robots that can balance on the sphere are explained. Some of the robots produced up to now have been examined and their strengths and weaknesses have been revealed. Mechanical and electronic design has been made for the ballboat. Controllers to keep the robot in balance were compared in simulation environment and simulation results were discussed. The torque control algorithm that will run on motor driver cards has been also developed in the simulation environment. Finally, a verification study about the concept developed in the thesis study has been made and the suitability of the design has been demonstrated.



1. GİRİŞ

1.1 Mobil Platformların Kullanım Alanları

Günümüzde hava, kara ve su ortamlarında çalışmak üzere tasarlanan oldukça farklı tipte ve fazla sayıda mobil platform bulunmaktadır. Bu mobil platformlar arama kurtarma, tarım, taşımacılık, kişisel ulaşım, askeri faaliyetler, asistanlık gibi oldukça farklı amaçlara hizmet edecek şekilde giderek artan kullanım alanlarına sahiptirler. Bu mobil aygıtlardan karada çalışmak üzere tasarlananları genellikle serbest haldeyken dengede olacak şekilde tasarlanmaktadır. Tasarımdan doğan bu kısıtlama, bazı aygıtların manevra kabiliyetlerinin azalıp, boyutlarının artmasında kaçınılmaz isterlere sebep olabilir. Örneğin günümüzde kullanılan otomobillerin büyük bir çoğunluğu dört tekerliklidir ve Ackerman Steering Geometrisi [1] kullanarak manevra yapmaktadır. Bu geometriye uygun olarak manevra yapan birçok başka mobil platform da bulunmaktadır. Kullanılan manevra sisteminin çalışma prensibi nedeniyle bu araçların manevra kabiliyeti oldukça kısıtlıdır. Örneğin bu araçlar bulundukları konumda oldukları yerde dönemezler ve yatay ekseninde, dikey ekseninde hareket etmeden hareket edemezler.

Geometrisi sebebiyle silindirik şeklindeki bir teker boyamsal ekseninde hareket edebilecekken, küre şeklindeki bir teker hem boyamsal hem yanal ekseninde bir fark olmaksızın hareket edebilir. Birden fazla teker ya da destek noktası yerine, uygun kontrol ve eylemlerle tek bir küre teker ve dolayısıyla tek destek noktası üzerinde hareket edecek bir mekanizma, bahsi geçen sorunlara çözüm getirebilir.

Gelişen teknoloji ile beraber kişisel asistan robotların kullanımında da artışlar gözlenmektedir. Müzelerde kullanılan rehber robotların, fabrikalarda kullanılan taşıma ve üretim robotlarının yanında insanların kişisel yaşam alanlarında farklı ihtiyaçları karşılamak için asistan robotlar kullanılmaktadır. Bu noktada, iç mekanların yapısal planından ve içeride bulunan nesnelerden kaynaklı yol planlama stratejilerine minimum düzeyde etki edecek bir hareket geometrisinin muhtemel avantajları, iç mekanların küçülmesi ve aynı ortamda birçok robotun çalışması ile giderek önem kazanmaktadır.

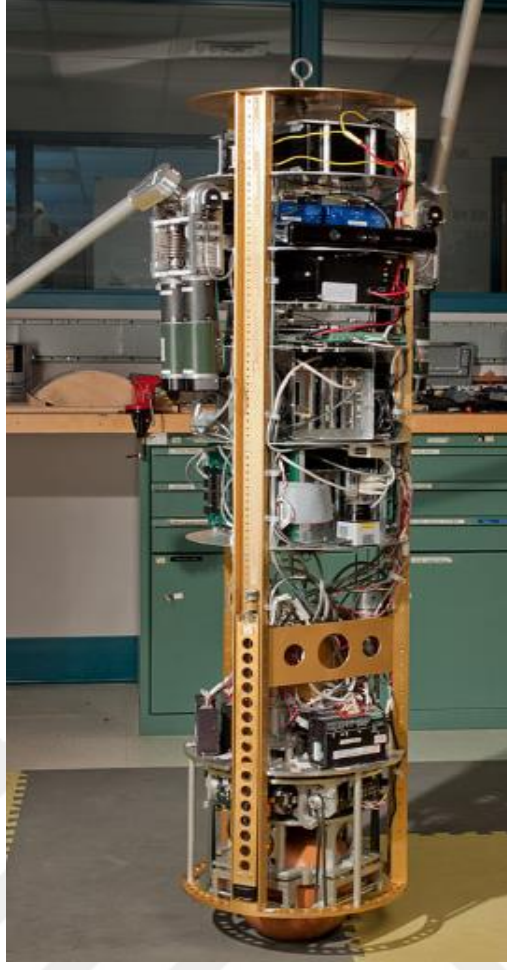
Piyasaya sürülen mobil aygıtlar için kütle ve hacim konularında optimal çözümler üretilmesine rağmen, otomobiller örnek verilecek olursa, bir binek araçta çoğunlukla sadece sürücü taşınmaktadır. Örneğin, 2015 yılında İngiltere’de binek araç başına 1,56 kişi taşınmış ve her yüz binek aracın 40’ı sadece sürücüyü taşımıştır [2]. Bu istatistikler, görece yüksek hacme ve düşük manevra kabiliyetine sahip araçlardan oluşan trafikte yoğunluğun artmasına ve enerji verimliliğinin azalmasına sebebiyet vermektedir.

Kişisel taşıma amacıyla kullanılan araçlar uzun süredir içten yanmalı motorlar kullanılarak üretilmekteydi ancak günümüzde gelişen teknoloji ile beraber emisyon salınımı olmayan tahrik sistemlerine sahip araçların kullanımı giderek artmaktadır. Emisyon salınımı olmayan araçlar zehirli gaz salınımı yapmadıkları için uygun boyut ve manevra kabiliyetlerinde üretildikleri takdirde hem dış hem de iç mekanlarda kullanılabileceklerdir.

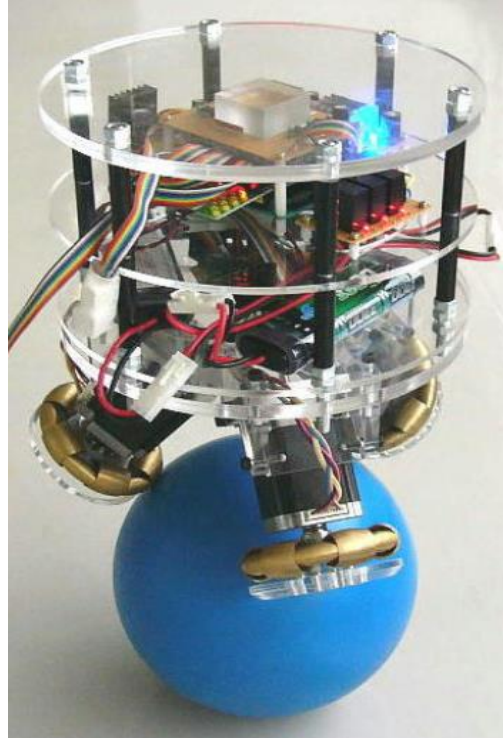
Manevra kabiliyetlerinin yüksek olması, açık ve kapalı alanlarda kullanılabilmesi ve kapladığı hacmin birçok mobil platforma göre düşük olması sebebiyle küre üzerinde dengede duran robot konsepti mobil cihazların isteklere uygun geliştirilmesi ve kullanımına ilişkin birçok soruna çözüm olabilecektir.

1.2 Küre Üzerinde Dengede Duran Robotlar

Küre üzerinde dengede duran robot mekanik, elektromekanik ve elektronik kısımlardan oluşmaktadır. Robotun gövdesi farklı yüksekliklerde ve farklı sayıda katmanlardan oluşabilmektedir. Katman sayıları ve işlevleri robot gövdesinin uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Ancak tüm örneklerde motorlar küreye tahrik verdiği için en alt katmanda konumlandırılmışlardır. Örnekler incelendiğinde güç kaynağının genellikle en alt katmanda konumlandırıldığından bahsedilebilir. Bu sayede sistemin kararlılık payı bir miktar daha iyileştirilmiş olmaktadır. İncelenen örneklerde ataletsel ölçme biriminin genellikle üst katmanda yer aldığı da gözlemlenmiştir. Bu sayede ölçüm hassasiyeti iyileştirilmiştir. Dolayısıyla kontrolcüye sağlanan geribesleme sinyaline karşın sistem hassasiyeti de iyileştirilmiştir. Şekil 1.1’de gösterilen Carnegie Mellon Üniversitesi’nde yapılan çalışmalar kapsamında kullanılan [3] ve Şekil 1.2’de gösterilen ve Tohoku Gakuin Üniversitesi’nde kullanılan [4] robotların gövde kısımları hizmet ettikleri amaçlar için farklı üretilmiş olsalarda gövde üzerindeki katmanların işlevleri benzerdir.

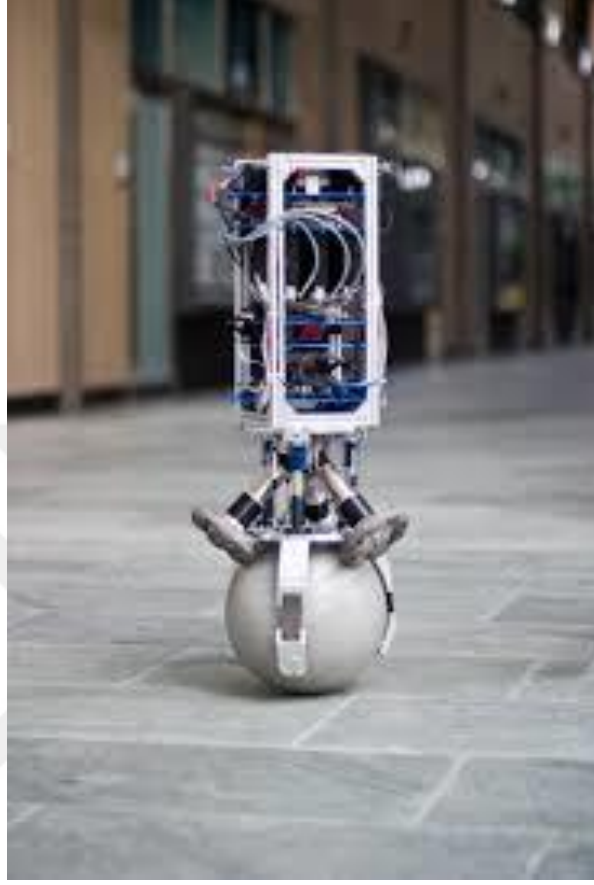


Şekil 1.1 : Carnegie Mellon Üniversitesi'nde geliştirilen robot.



Şekil 1.2 : Tohoku Gakuin Üniversitesi'nde geliştirilen robot.

Şekil 1.3’de gösterilen Fankhauser ve Gwerder’in 2010 yılında yaptıkları çalışmada kullanılan robotun gövdesi ise dikdörtgenler prizmasının ayrıtlarından meydana gelen bir çerçeve ve bu çerçevenin iç kısmına oturtulmuş bileşenlerden oluşmaktadır[5].



Şekil 1.3 : Fankhauser ve Gwerder’in çalışmalarında kullanılan robot.

Küre üzerinde dengede duran robotların mekanik konseptleri incelendiğinde genel olarak gövdenin en alt katmanında motorlar ve motor tutucu parçalar yer almaktadır. Motor tutucu parçalar dışında, gövde üzerinde motorlara ve elektronik kartlara enerji sağlayan batarya, alt kısımlara yakın konumlandırılmaktadır. Gövde üzerinde arttırımlı sayıcı ve şönt direnç gibi sensörlerden gelen verileri işleyen ve kontrol algoritmasının üzerinde koştuğu ve kontrol çıkışlarına uygun olarak motorlara elektriksel sinyaller gönderen motor sürücü devreler bulunmaktadır. Yine gövdenin genellikle üst kısımlarına yerleştirilmiş bir ataletsel ölçme sensörü (IMU) bulunmaktadır. Bu sensör vasıtasıyla gövdenin yere göre hangi istikamete doğru kaç derece yattığı bilgisi ve o anki çizgisel ve açısal hız bilgileri edinilmektedir.

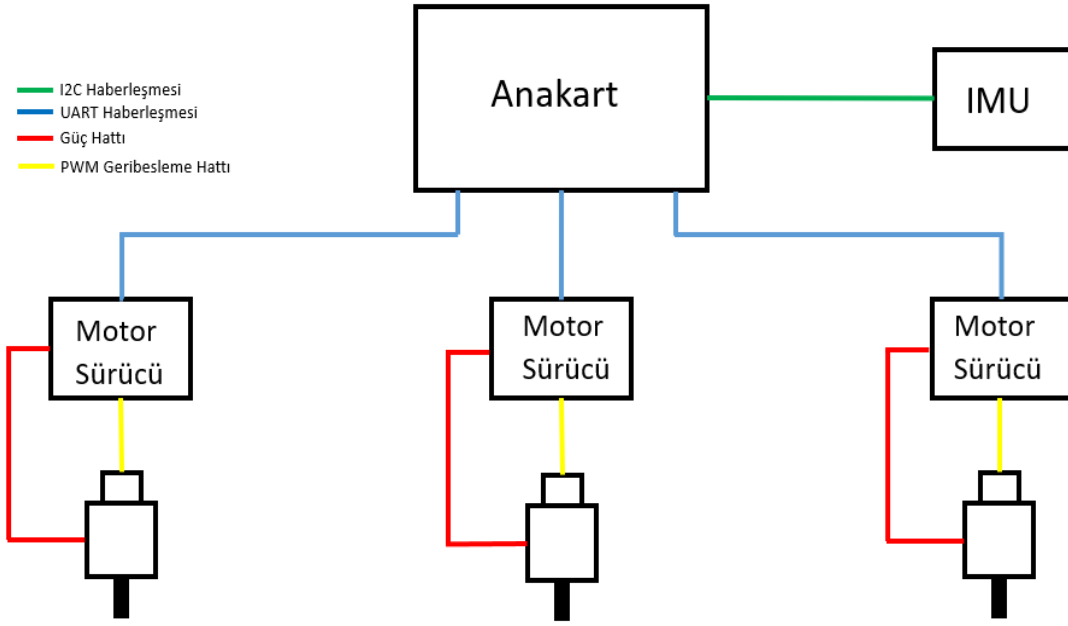
Motorların dairesel hareketlerini küreye aktarmak için ise Şekil 1.4’de gösterilen çok yönlü tekerler kullanılmıştır. Bu çok yönlü tekerler ile istenilen doğrultuda hareket aktarılırken diğer doğrultularda tekerleklerin küre üzerinde serbestçe kaymasını

sağlamaktadır. Böylece ideal durumda bir motor hareket ederken diğer motorların hareketini engelleyici sürtünme kuvveti oluşturmaması sağlanır.



Şekil 1.4 : Çok yönlü teker.

Robotun çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir. Öncelikle robot gövdesinde bulunan ataletsel ölçme ünitesi robotun hangi yönelimde ve hangi açısıl konumda olduğunu tespit eder ve bu bilgiyi periyodik olarak anakart ile haberleşme kanalı vasıtasıyla paylaşır. Anakart üzerinde bu bilgi ve kullanılan kontrolcünün doğası gereği gerekli diğer bilgiler işlenerek robotun dengeye ve referans işaretlere uygun konum ve hız değerlerine gelmesini sağlayacak şekilde motorlara uygulanması gereken kontrol işaretleri hesaplanır. Daha sonra bu bilgiler yine haberleşme hattı yardımı ile motor sürücülere ulaştırılır. Motor sürücü devrelerin herbiri arttırımlı sayıcı ve şönt dirençleri üzerinden okuduğu geribesleme bilgilerini kullanarak anakartta hesaplanan kontrol işaretlerinin uygulanmasını kapalı çevrimli bir kontrolcü yapısı ile sağlar. Motor sürücüler hesaplanan kontrol işaretlerine uygun olarak güç hatlarından çıkış sağlayarak motorların istenilen davranışı sergilemesini sağlarlar. Bu çalışma yapısı rutin olarak tekrarlanarak robotun dengede kalması sağlanır. Şekil 1.5’de robotun çalışması sırasında farklı bileşenlerin birbirleriyle olan ilişkileri gösterilmiştir.



Şekil 1.5 : Robot üzerindeki birimlerin birbirleri ile ilişkisi.

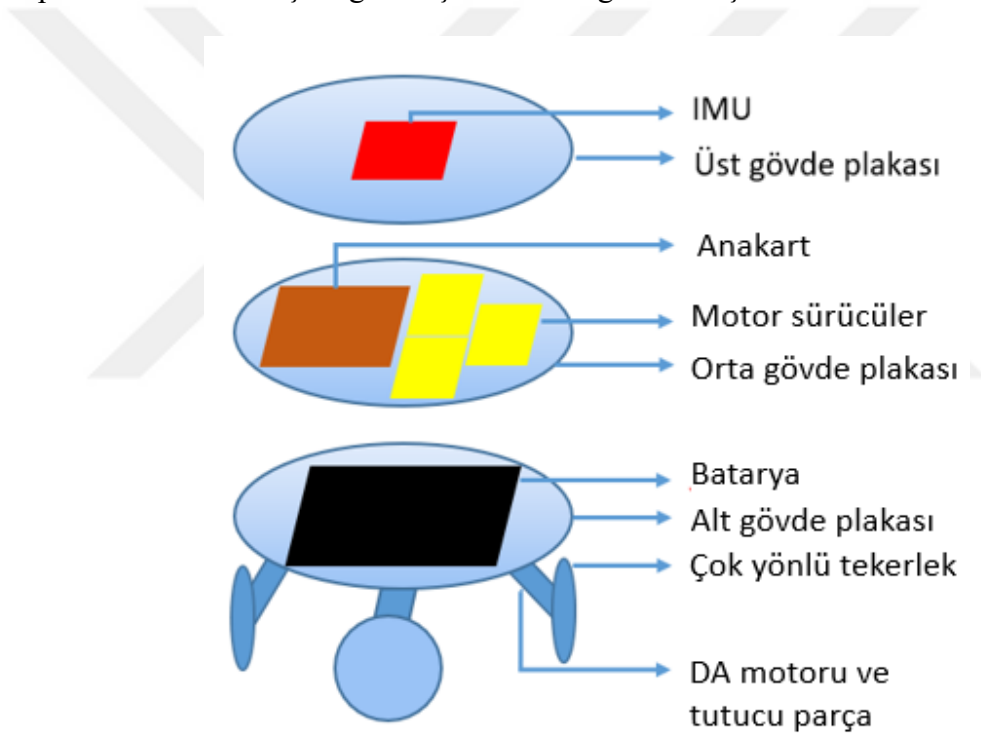
1.3 Tez Çalışmasında Tasarlanan Robot

Bu tez çalışmasında üç farklı motor ile tahrik edilen, gövdesi üç katmandan meydana gelen, ataletsel ölçüm birimi üzerinden robot gövdesinin yönelim değerlerini algılayan bir robot tasarımı planlanmıştır. Ayrıca üzerinde robotun dengede durmasını sağlayacak algoritmaları koşabilecek ve motorları sürebilecek elektronik kartlar ve elektronik kartlar ile motorların ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlayabilen bataryası yer alacaktır.

Robotun gövdesinde maliyetinin az olması ve üretim kolaylığı sağlamasından dolayı alüminyum malzeme tercih edilmiştir. Robotun gövdesinde yer alan üç farklı plaka saplamalar ve somunlarla birbirine bağlanmıştır. Alt gövde plakasında motor tutucu parçalar ve batarya, orta plakada elektronik kartlar ve üst plakada ataletsel ölçüm birimi yer alacaktır. Üç plakadan meydana gelen robot gövdesi yüksekliğinin 30 cm olmasına karar verilmiştir. Robot gövdesini, yarıçapı yaklaşık 10cm olan küre üzerinde dengede tutabilmek için nominal gerilimi 12V, nominal torku 29.5 mNm ve nominal hızı 4000 rpm olan Maxon DCX 22[6] fırçalı motor seçilmiştir. Bu motor ile mekanik olarak uyumlu Maxon GPX 22[7] gezegen dişli takımı 28:1 çevirme oranı konfigürasyonu ile seçilmiştir. Motor milinin hareketini gözlemlemek için ise yine seçilen motor ile mekanik olarak uyumlu Maxon EASY 16[8] artırımı sayıcı tur başına 1024 pals verecek konfigürasyon ile seçilmiştir.

Ataletsel ölçüm birimi ve motor sürücüler ile haberleşen ve her bir kontrol döngüsünde üç farklı motorun uygulaması gereken tork değerlerini hesaplayan bir anakartın tasarlanmasına karar verilmiştir. Bu ana kartın ürettiği kontrol işaretlerini motorlara uygulamak için üzerinde H köprü[9] transistör yapısı ve şönt direnç barındıran motor sürücü kart tasarımına karar verilmiştir.

Robotun dengede durması için gövdenin açısal konum, hız ve ivme değerlerini algılayan bir ataletsel ölçüm birimi kullanılmasına karar verilmiştir. Üzerinde BNO055 [10] entegresi ve bir mikrodenetleyici barından Adafruit firmasının üretimi IMU modülü piyasadan ucuza bulunması ve üzerindeki mikrodenetleyici ile algılayıcı verilerini işleyerek daha iyi sonuçlar vermesi sebebiyle tercih edilmiştir. Tasarımı planlanan robota ilişkin görsel Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6 : Tasarımı planlanan robota ilişkin görsel.

Şekil 1.5'de verildiği gibi anakart ve ataletsel ölçüm birimi arasında veri alışverişi yapmak için I2C[11] haberleşmesi seçilmiştir. Bu haberleşme ile ataletsel ölçüm biriminde algılanan robot gövdesine ilişkin yönelim bilgileri anakarta aktarılacaktır. Anakart ile motor sürücüler arasında ise UART[12] haberleşmesi kullanılmasına karar verilmiştir. Bu haberleşme ile anakartta hesaplanan her bir motora ilişkin tork değeri motor sürücülere aktarılacaktır. Motor sürücüler H köprü devresi üzerinden motorlara güç beslemesi sağlayacak ve arttırımlı sayıcıdan motor milinin konum verisini okuyacaktır.

Robotun dengede durabilmesini sağlayacak kontrol algoritması için durum geribeslemeli bir kontrol yapısının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu kontrolörün hangi yapıda olacağına karar vermek için benzetim ortamında geliştirme ve test faaliyetleri yapılacaktır.

Tezin 2.1. bölümünde robotun gövdesi ve motor tutucularına ilişkin mekanik tasarımı verilmiştir. Elektronik tasarıma ilişkin yapılan çalışmalar 2.2 bölümünde anlatılmıştır. Robotun dengede durması için geliştirilen kontrolcü ve benzetim sonuçları 3. ve sisteme ilişkin yapılan doğrulama çalışması 4. bölümünde anlatılmıştır.



2. ROBOTA İLİŞKİN MEKANİK VE ELEKTRONİK TASARIM

Bu bölümde ön tasarımı Şekil 1.6’da verilen küre üzerinde dengede durabilen robota ilişkin mekanik ve elektronik sistemlere ilişkin tasarımlar açıklanacaktır.

Mekanik tasarım robotun gövdesini oluşturacağı gibi elektronik kartların, IMU modülünün ve motorların sabitleneceği platformları da oluşturacaktır. Dolayısıyla mekanik tasarım neticesinde diğer komponentlere ilişkin hacim kısıtlamaları da net olarak belirlenecektir.

Elektronik tasarım sırasında ön tasarımda karar verilen bir anakart ve üç motor sürücü kartın, mekanik tasarımdan gelen kısıtlamalara da bağlı olarak tasarımı açıklanacaktır. Mekanik tasarımda belirlenen DA motorlarını sürebilecek kabiliyette motor sürücüler tasarlanacaktır. Sistemin tamamının güç dağıtımını yapacak olan anakartın güç hattı da bu DA motorlarının ihtiyaç duyacağı elektriksel güç göz önüne alınarak geliştirilecektir. Robot gövdesinin yönelimini algılayacak IMU’nun desteklediği haberleşme arayüzleri de anakartın tasarımında dikkate alınacak ve anakartın bu arayüzlerden en az birini desteklemesi sağlanacaktır.

2.1. Mekanik Tasarım

Küre üzerinde dengede duran robotun mekanik tasarımı alt, orta ve üst olmak üzere 3 adet gövde plakası, 3 adet motor tutucu, motor, çok yönlü teker ve bağlayıcılardan oluşmaktadır.

Robotun mekanik tasarımındaki ana kriterler, küresel teker üzerinde dengesini koruyacak şekilde küreye birden fazla noktadan tahrik uygulanması; tahrik, kontrol ve algılama elemanlarının da dengeyi bozmayacak şekilde yerleştirilebilmesidir. Robotun dengeli olması elektronik ve kontrolcü tasarımlarını zorlaştırmayacaktır.

Bu kriterler göz önünde bulundurularak yapılan tasarım, tahrik elemanlarının küresel tekere temas noktalarının oluşturduğu düzlemde bir eşkenar üçgen çizmesi üzerinedir. Bu üçgenin her bir köşesinde birbirinden bağımsız tahrik elemanlarına, yani motorlara bağlı birer çok yönlü teker bulunmaktadır.

Küresel teker ve çok yönlü tekerler arasında oluşan kuvvet bağıını açıklamak için verilecek bir örnek, iki tekerin zıt yönde ve eşit miktarda uygulayacağı tahrik ile oluşacak bileşke kuvvet üçüncü temas noktasındaki dönme yönüne dik olacağından, bu kuvvet üçüncü tekerin üzerindeki kauçuk silindirler aracılığıyla serbest olarak geçecek, üçüncü tekerin tahrikine herhangi bir etkisi olmayacaktır.

Tahrikin en verimli şekilde aktarılması için, temas noktaları, küresel tekerin merkezi ve azimut arasında 45 derecelik bir açı olması gerekmektedir. Dolayısıyla, tekerlerin ve motorların bu açıda yerleştirilmesine elverişli şekilde motor tutucu parçalar tasarlanmıştır. Şekil 2.1’de gösterilen motor tutucu parçalar, ayrıca gövde alt plakasına sabitleneceği için azimuta dik bir düzlemde bir yüzeyi olması gerekmektedir.



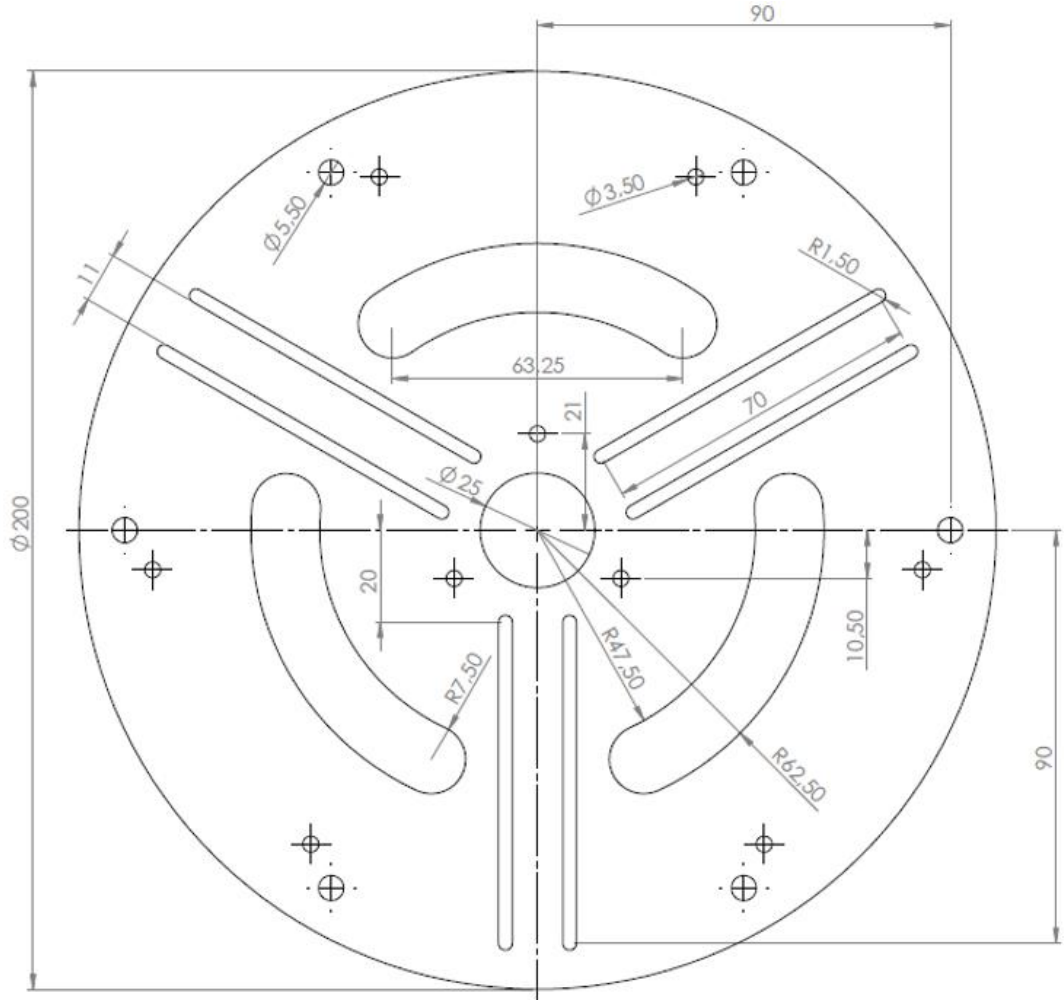
Şekil 2.1 : Motor tutucu parça.

Parçalar, mil göbeğine, motor ve alt plaka sabitleme cıvatalarına denk gelecek deliklerin, alüminyum levha üzerinde kesilip, bahsedilen yüzey açılara denk gelecek şekilde bükülmesiyle imal edilmiştir. Böylece montaj ve üretimden doğacak hataların minimize edilmesi ve mümkün olduğunca basit tasarım yapılması hedeflenmiştir.

2.1.1 Gövde tasarımı

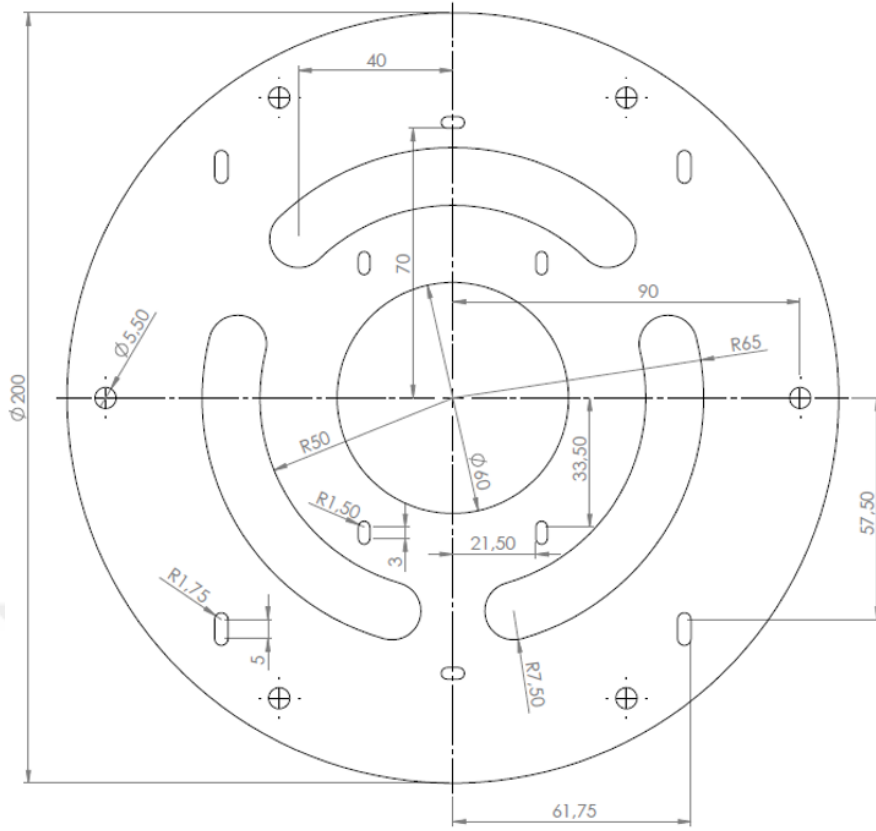
Gövde temelde 3 farklı plakadan meydana gelmektedir. 5 mm kalınlığında ve 200 mm çapındaki bu plakalar 6 adet metrik 5 saplama ve 36 tane metrik 5 somun ile bir arada tutulmaktadır. Şekil 2.2’de gösterilen alt plaka için temel ister gövde ve küresel tekerin bahsedilen bağlantıyı taşıyacak olması sebebiyle motor tutucu parçanın yerleştirilecek şekilde tasarlanmasıdır. Bu nedenle motor tutucu parçaları eşkenar üçgenin açışortaylarına, yani birbirleri ile 120 derece yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Farklı motor, küresel teker ve ilgili parçalara uygun, mesafe hesaplarından ve üretimden kaynaklanabilecek hataları tolere edebilmek için cıvata delikleri yerine

boşluk hatları açılmıştır. Alt plakanın üst kısmında batarya yer almaktadır. Bataryanın burada konumlandırılmasının en önemli sebebi ise ağırlık merkezinin mümkün olduğunca robotun alt kısmına yakın tutulmak istenmesidir. 5.5 mm çaplı delikler metrik 5 saplamaların geçebilmesi, 3.5 mm çaplı delikler ise bataryayı sabitleyecek bağlayıcıların geçebilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Merkezdeki 25 mm çaplı delik ve 120 derece açıyla yerleştirilen 15 mm genişliğindeki açılı kanallar ise kabloların yerleşmesi ve ağırlığın düşürülmesi için açılmıştır.

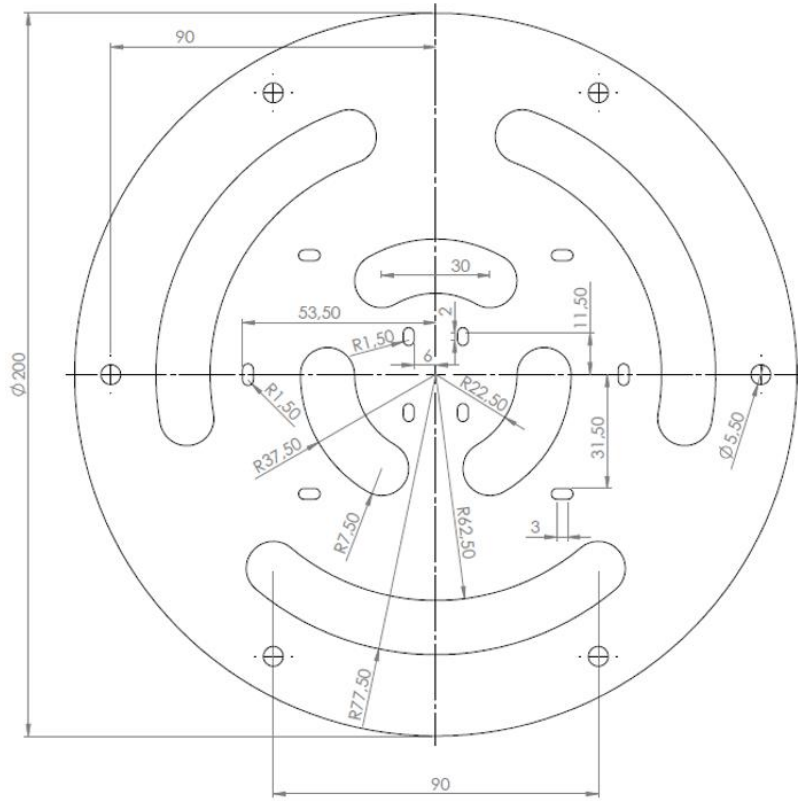


Şekil 2.2 : Alt gövde plakası.

Orta plakanın üst kısmında anakart ve sürücülerin yer alması hedeflenmiştir. Orta plakanın tasarımı sırasında mümkün olduğunca ağırlığı azaltmak, robot üzerinde yer alacak kabloların geçişini sağlamak ve anakart ile sürücülerini sabitleyebilecek bağlantı noktalarını oluşturmak hedeflenmiştir. 5.5 mm çapındaki delikler plakaları birbirine bağlayacak 6 adet metrik 5 saplama için oluşturulmuş, 6 mm ve 8.5 mm uzunluğundaki kanallar ise elektronik kartların sabitlenmesi amacıyla açılmıştır. Şekil 2.3’de orta plakaya ait Şekil 2.4’de ise üst plakaya ait tasarım yer almaktadır.



Şekil 2.3 : Orta gövde plakası.

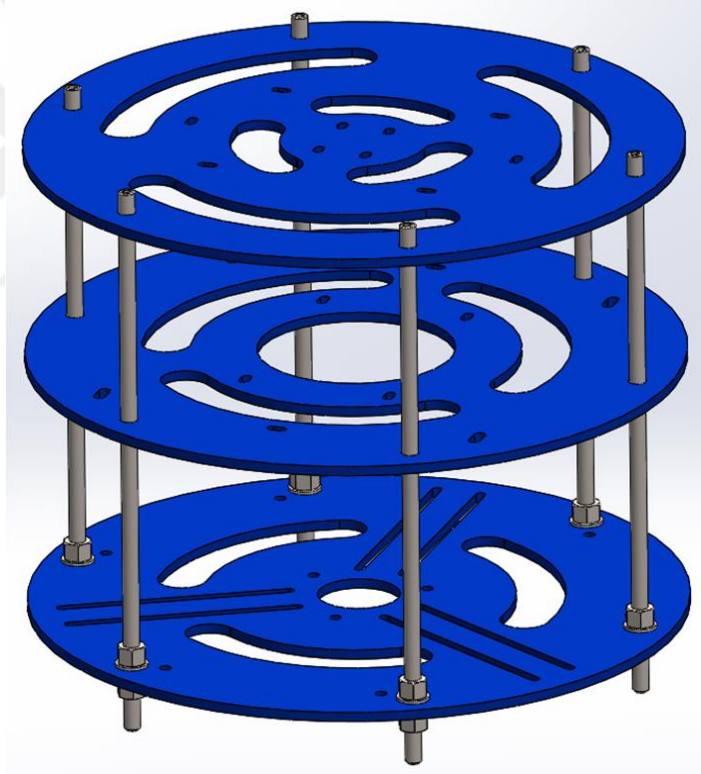


Şekil 2.4 : Üst gövde plakası.

Üst plaka üzerinde bulunan IMU konum ve yönelim bilgisini algılamaktadır. Bu ünitenin sahip olacağı çözünürlüğü en verimli şekilde kullanmak için hareket merkezine, yani küresel tekere en uzak noktaya yerleştirilmesi doğru bir karar olacaktır. Bu sebeple Şekil 2.4’de görülebileceği gibi üst plakanın üst yüzü IMU kartının yerleştirileceği şekilde tasarlanmıştır.

IMU’nun plaka merkezine montajlanması için 3 mm genişliğinde 5 mm uzunluğundaki kanallar oluşturulmuştur. Robot gövdesini bir arada tutacak metrik 5 saplamalar için diğer plakalarda olduğu gibi 6 adet 5.5 mm genişliğinde delik açılmıştır.

Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de gösterilen gövde plakalarının montajlanmış hali yani gövde Şekil 2.5’de verilmiştir.

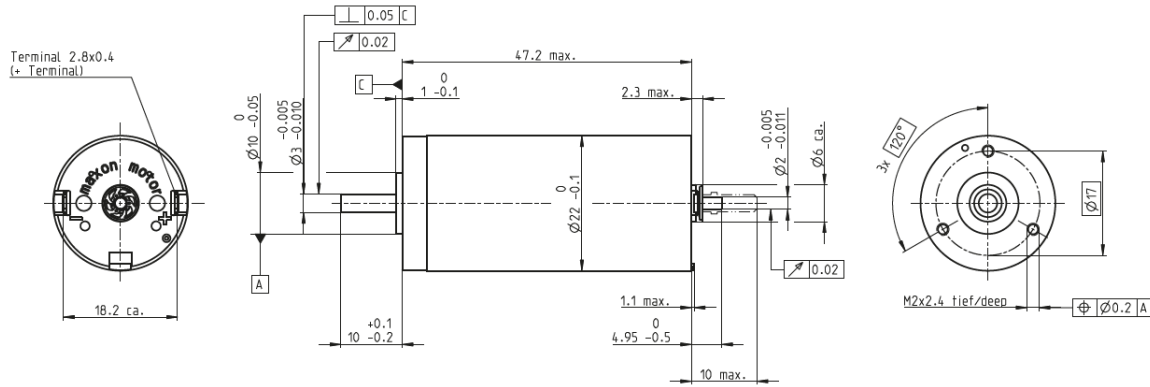


Şekil 2.5 : Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de gösterilen gövde plakalarının montajlanması ile oluşan robot gövdesi.

2.1.2 Motor seçimi

Sistemin matematiksel modelinin kurulmasının ardından yapılan analizler ile motorun karşılaması gereken tork değerleri ve mekanik tasarım çalışması sırasında yapılan analizler ile de motorun kapladığı hacmin ve şeklinin kısıtları ortaya çıkmıştır. Bu durum neticesinde boyutları Şekil 2.6’da, teknik özellikleri Çizelge 2.1 de verilen

Maxon firmasına ait Şekil 2.7’de gösterilen DCX 22L fırçalı DA motoru kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 2.6 : Maxon DCX 22 fırçalı motorun boyutları.

Nominal Gerilim	12 V
Nominal Hız	4000 rpm
Nominal Tork	29.5 mNm
Nominal Current	1.3 A
Tork Sabiti	22.9 mNm/A
Hız Sabiti	416 rpm/mNm
Mekanik Zaman Sabiti	3.14 ms
Rotor ataleti	9 gcm ²
Ağırlık	95 gram

Çizelge 2.1 : Maxon DCX 22 fırçalı motoruna ait teknik özellikler.

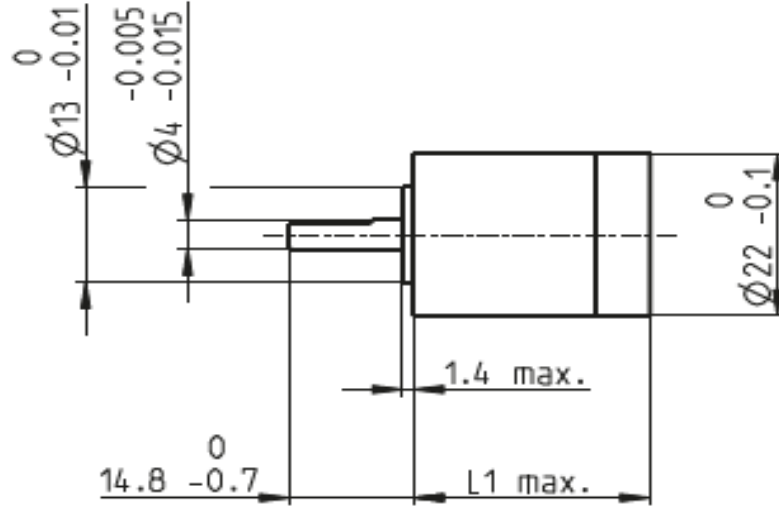


Şekil 2.7 : Maxon DCX 22 fırçalı motor.

Seçilen DA motorunun devrini azaltmak ve torkunu artırabilmek için redüktör kullanılmasına karar verilmiştir. Küre üzerinde dengede duran robotun çalışmasında motorların farklı yönlerde hızlı bir şekilde değişen tork değerleri uygulaması beklendiğinden ve hacim kısıtlarından ötürü gezegen dişli takımlı redüktör yapısının kullanılmasına karar verilmiştir.

Seçilen DA motoru ile mekanik montaj açısından birebir uyumlu olarak üretilmiş boyutları Şekil 2.8’de, teknik özellikleri Çizelge 2.2’de verilen Maxon firmasına ait

Şekil 2.9’da gösterilen GPX 22 gezegen dişli takımlı redüktörün 28:1 çevirme oranı sağlayacak konfigürasyonda kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 2.8 : Maxon GPX 22 gezegen dişli takımının boyutları.

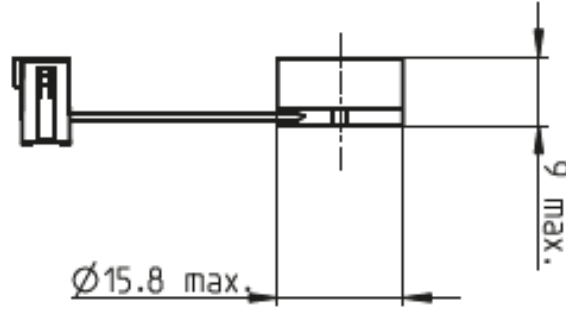
Sürekli iletilebilen maksimum güç	24 W
Kısa süreli iletilebilen maksimum güç	30 W
Sürekli iletilebilen maksimum tork	0.5 Nm
Kısa süreli iletilebilen maksimum tork	0.6 Nm
Maksimum verimlilik	% 81
Ağırlık	58 gram

Çizelge 2.2 : Maxon GPX 22 gezegen dişli takımına ait teknik özellikler.



Şekil 2.9 : Maxon GPX 22 gezegen dişli takımı.

Boyutları Şekil 2.10’da, teknik özellikleri Çizelge 2.3’de verilen Maxon firmasına ait ve seçilen DA motoru ile mekanik montaj açısından birebir uyumlu olan Şekil 2.11’de gösterilen EASY 16 artırılmış sayıcının algılayıcı olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Bu sayede istenen tork değerleri sağlanırken, hacim kısıtlarına da uyulmuş olmaktadır ve gezegen dişli takımına sahip olmasından ötürü sıralı dişli mekanizmalarına nazaran daha hassas iletim sağlanabilmektedir. Bu sayede kontrolcü çıkışında hesaplanan değer çok daha az gecikme ile sisteme uygulanmaktadır.



Şekil 2.10 : Maxon EASY 16 artırımlı sayıcının boyutları.

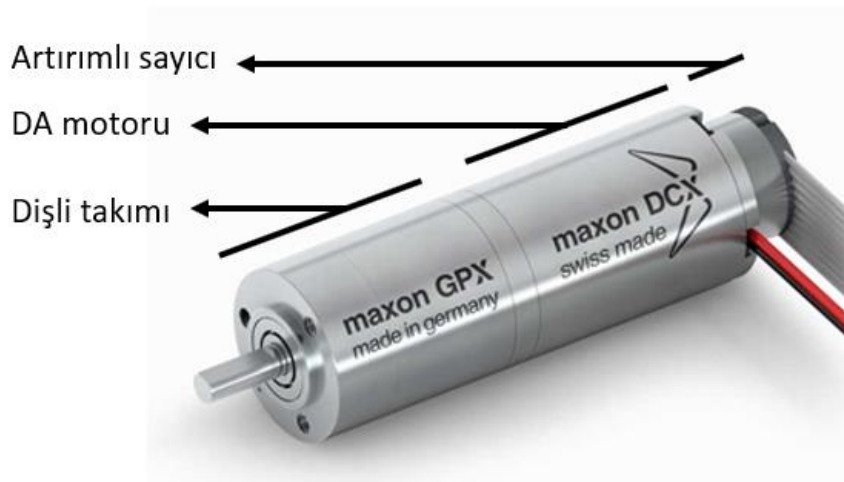
Dönüş başına üretilen pals	1024
Kanal sayısı	3
Maksimum çalışma frekansı	1600 kHz
Maksimum hız	30000 rpm

Çizelge 2.3 : Maxon EASY 16 artırımlı sayıcıya ait teknik özellikler.



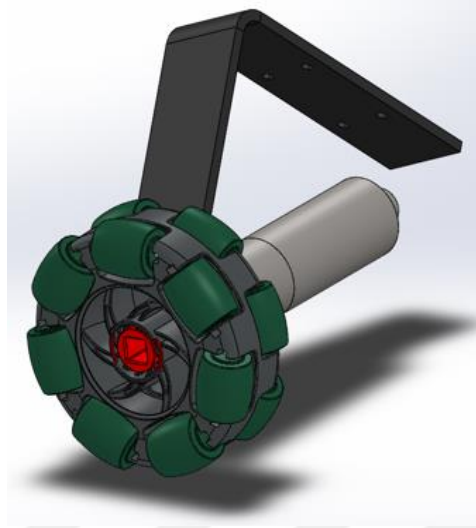
Şekil 2.11 : EASY 16 artırımlı sayıcı.

Şekil 2.7’de gösterilen motor, Şekil 2.9’da gösterilen gezegen dişli takımı ve Şekil 2.11’de gösterilen artırımlı sayıcının montajlanmış hali Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Şekil 2.7, Şekil 2.9 ve Şekil 2.11’de gösterilen motor, dişli takımı ve artırımlı sayıcının montajlanmasıyla oluşan yapı.

Şekil 2.13’de tahrik elemanları olan, Şekil 2.12’de gösterilen motor-dişli-artırımlı sayıcı, Şekil 2.1’de verilen motor tutucu ve Şekil 1.4’de gösterilen çok yönlü tekerin montajlanmış görseli yer almaktadır.



Şekil 2.13 : Şekil 2.12, Şekil 2.1 ve Şekil 1.4 ‘de gösterilen motor, çok yönlü teker ve motor tutucunun montaj resmi.

2.2 Elektronik Tasarım

Elektronik sistemi oluşturan bileşenler aşağıda listelenmiştir.

- Anakart
- Motor sürücüler
- Ataletsel ölçme ünitesi
- Batarya

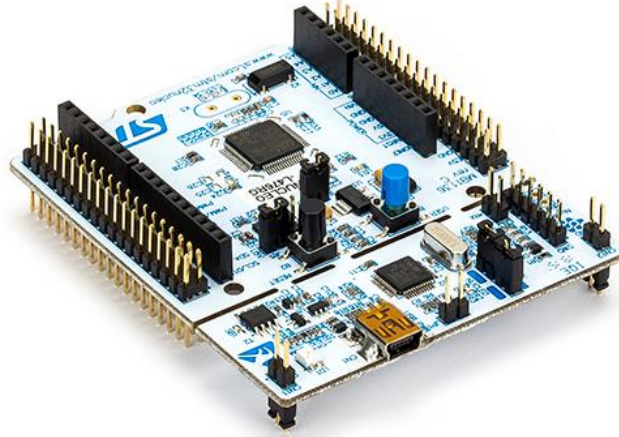
Bu bileşenlerden anakart ve motor sürücüler tez çalışması bünyesinde tasarlanmış olup, ataletsel ölçme birimi ve batarya piyasada bulunabilen hazır ürünlerden sistem gereksinimlerini sağlayacak şekilde seçilmiştir.

2.2.1 Anakart tasarımı

Tez çalışması kapsamında geliştirilen anakart; kontrolcü algoritmasını koşma ve motor sürücülerle ve ataletsel ölçme ünitesi ile haberleşme görevlerini icra etmektedir. Aynı zamanda anakarta bağlı diğer tüm kartlara enerji sağlayabilmektedir.

Anakart üzerinde 100 MHz kristal hızında, 128 kb SRAM’e sahip, 64 pinli ve 32 bitlik STM32F411[13] mikrodenetleyici barındıran Şekil 2.14’de gösterilen Nucleo64[14] geliştirme kartı doğrudan kullanılmıştır. Bu geliştirme kartının düşük maliyetli olması,

mikrodenetleyiciyi programlamak için gerekli donanımın üzerinde barınması ve üretim süreçlerini hızlandırabilecek olması sebebiyle geliştirilen anakarta doğrudan montajlanacak şekilde tasarım yapılmıştır. Bu sayede mikrokontrolör kartına herhangi bir zarar gelmesi durumunda Nucleo64 geliştirme kartının değişimi ile anakartın kullanılmaya devam edilmesi de hedeflenmiştir.



Şekil 2.14 : STM32F411 Nucleo 64 geliştirme kartı.

Robotun çalışması sırasında kullanılan LiPo bataryanın voltajının giderek azalacağı göz önünde bulundurularak; anakartın besleme voltajı 9V ile 28V değerleri arasında olabilecek şekilde tasarım yapılmıştır. Anakart üzerinde yer alan DA-DA gerilim azaltan dönüştürücü (buck converter)[9] ile 5V ve 3.3V besleme gerilimlerine ihtiyaç duyan devre elemanları için besleme gerilimleri elde edilmiştir.

Motor sürücülerin güç besleme hatlarında oluşabilecek gürültüleri engelleyebilmek için Şekil 2.15’de (solda) gösterilen film kapasiteler kullanılmıştır. İletişim hatlarında oluşabilecek gürültüleri azaltmak için ise Şekil 2.15’de (sağda) gösterilen ferrit filtreler kullanılmıştır.

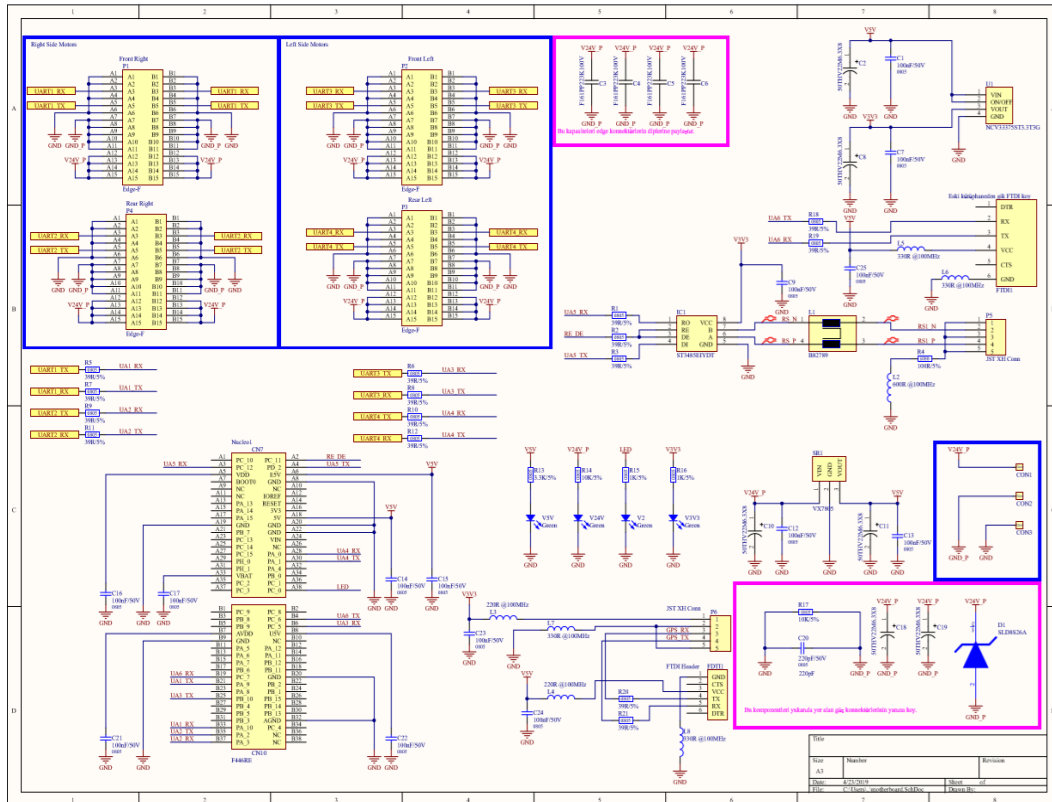


Şekil 2.15 : Film kapasite (solda) ve Ferrit filtre (sağda).

Anakart üzerinde dört adet kaset (cart) tipi konnektör yer almaktadır. Bu konnektörler vasıtasıyla anakarta bağlı herhangi bir kartın besleme gerilimi ve anakart ile haberleşmesi sağlanmıştır. Anakart üzerinde yer alan dört adet konnektörden 3 tanesine motor sürücülerin takılması hedeflenmiştir. Geriye kalan 1 adet konnektör gelecekteki çalışmalarda eklenebilecek herhangi bir ekipman için düşünülmüş ve tasarıma eklenmiştir.

Motor sürücüler ile anakartın haberleşmeleri UART protokolü ile sağlanırken, ataletsel ölçme birimi ile haberleşme I2C protokolü ile sağlanmıştır. Anakart üzerinde çeşitli modüller ile haberleşme sağlayabilmek amacıyla RS485[11], SPI[11] protokollerini destekleyecek donanımlar eklenmiştir. Yine anakart üzerinde artırımı sayıcı verisini okuyabilecek enkoder giriş filtresi konulmuştur.

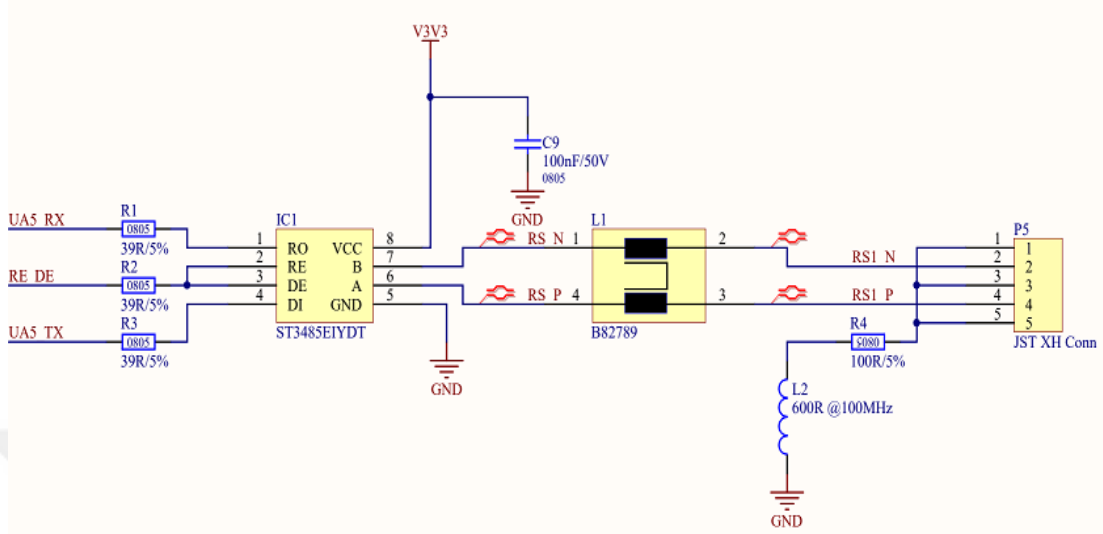
Anakartın Şekil 2.16'da gösterilen şematik tasarımı Altium Designer 18 programında tasarlanmıştır. Anakartın şematik tasarımında farklı işlevlere sahip kısımlar aşağıda daha detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.16 : Anakart şematik tasarımı.

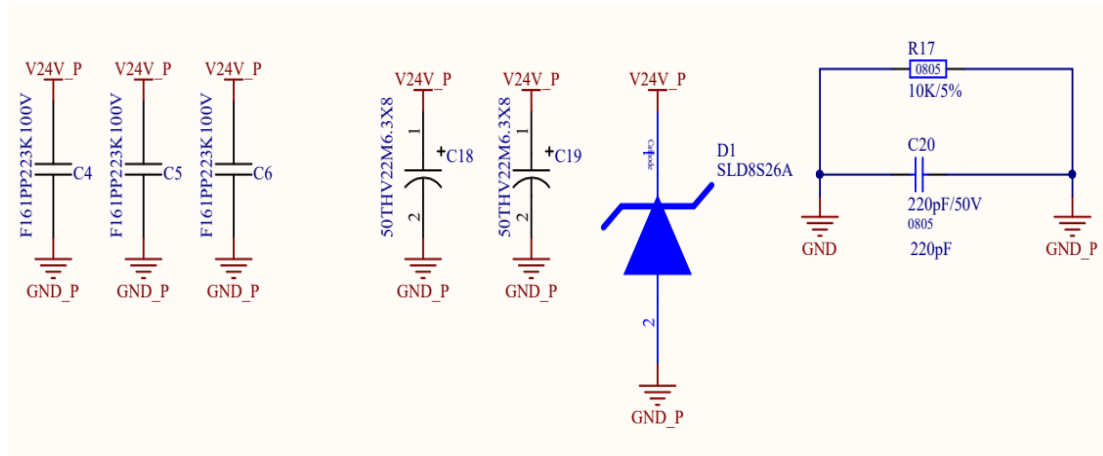
Şekil 2.17'de anakarta, sürücü kartların bağlanacağı konnektörler görülmektedir. Bu konnektörlerde besleme hatları birden fazla pine yayılarak, akımın geçeceği alanın artırılması hedeflenmiştir.

Şekil 2.19’da anakart üzerinde yer alan UART haberleşmesini RS485 haberleşmesine dönüştüren kısım yer almaktadır. Bu yapıda ST3485EIYDT[15] entegre devresi kullanılmıştır.



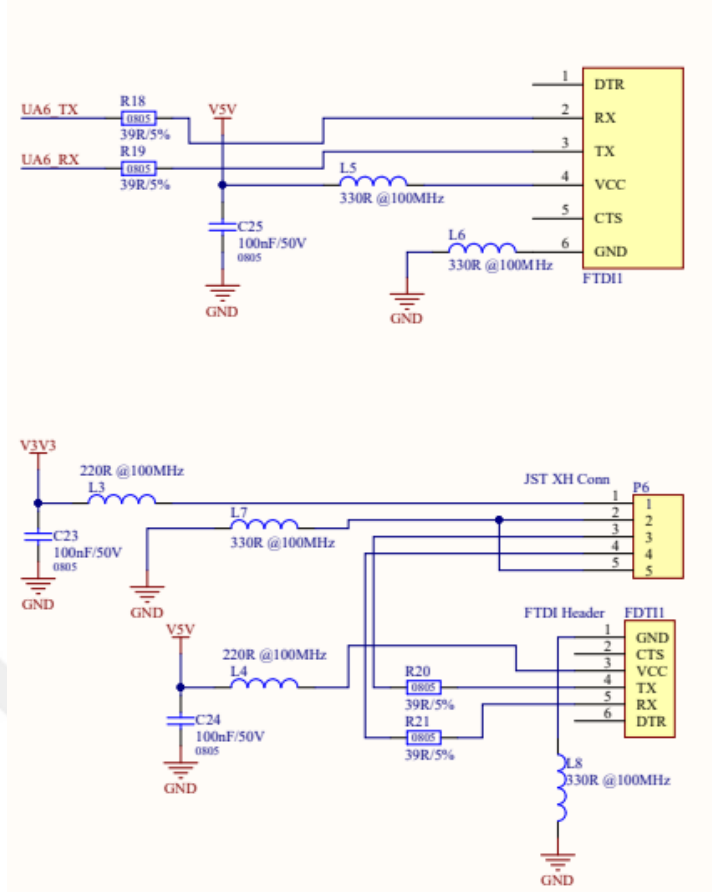
Şekil 2.19 : Anakart üzerinde RS485 haberleşmesini UART haberleşmesine çeviren kısma ait şematik tasarım.

Şekil 2.20’de yer alan kısımda ise anakartın üzerindeki 24V bara kapasiteleri görülmektedir. Burada film ve alüminyum kapasiteler kullanılmıştır. Ayrıca SLD8S26A[16] diyodu kullanılarak motorlar sebebiyle bara gerilimin yükselmesi engellenmiştir.



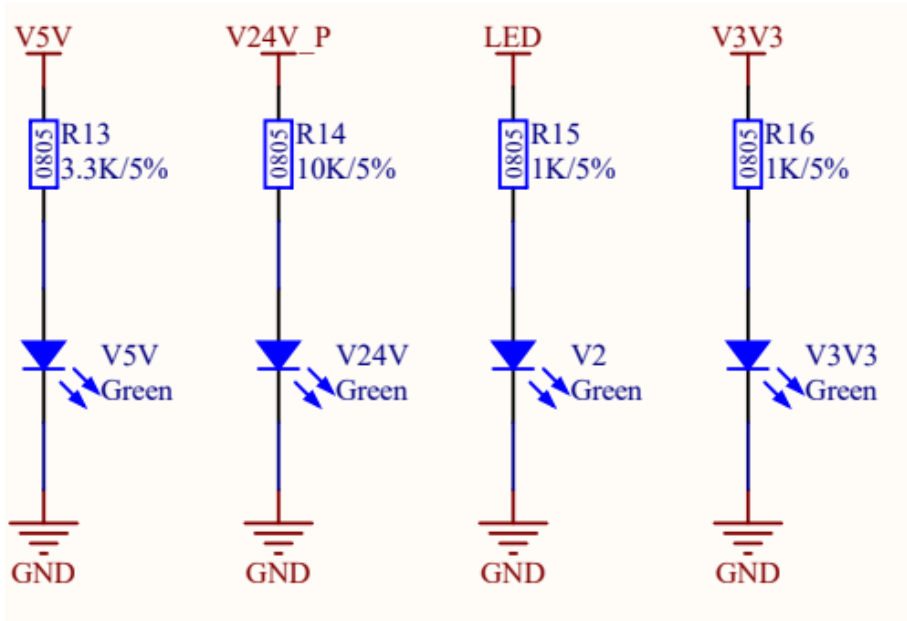
Şekil 2.20 : Anakart üzerindeki 24V bara kapasiteleri ve diyoduna ait şematik tasarım.

Şekil 2.21’de ise anakart ve motor sürücülerin kontrolcü sinyali, artırımli sayıcı verisi gibi bilgileri birbirleri ile paylaşmalarını sağlayan UART haberleşme bağlantıları ve buna ilişkin besleme bağlantıları gösterilmiştir. Haberleşme hatlarında filtreleme amacıyla ferit ve kapasitör gibi pasif devre elemanları kullanılmıştır.



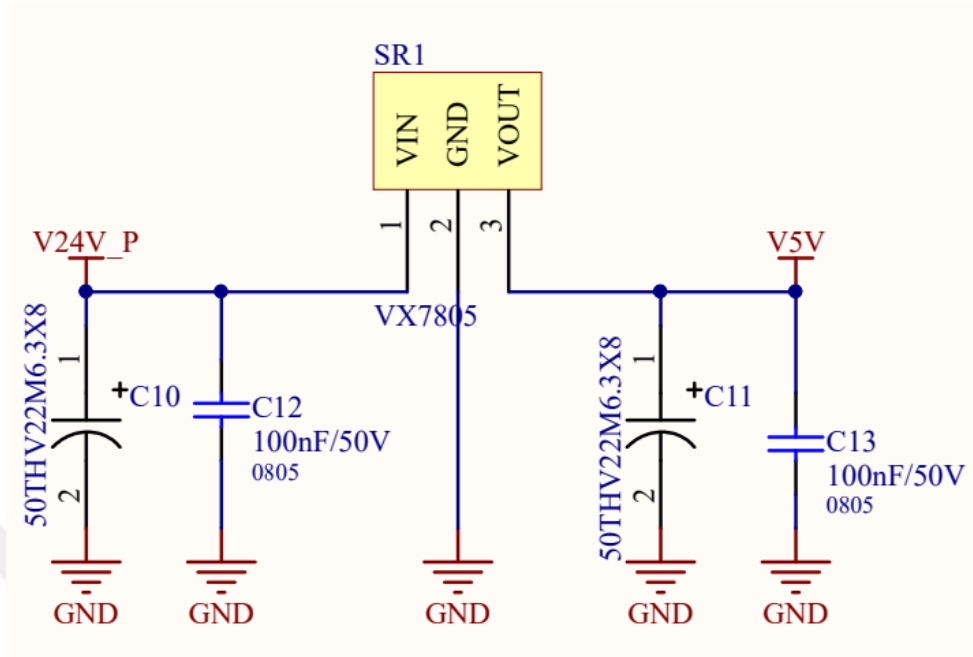
Şekil 2.21 : Anakart üzerindeki UART haberleşmelerine ve beslemelerine ilişkin şematik tasarım.

Şekil 2.22’de motor sürücü kartların besleme hatlarında enerji olduğunda yanacak olan ledler gösterilmiştir.



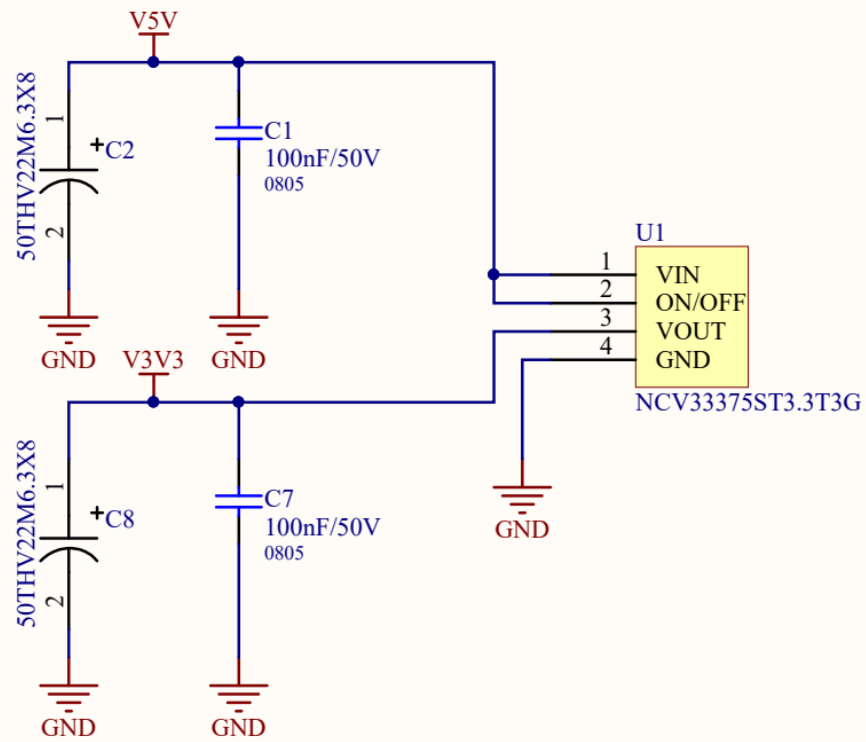
Şekil 2.22 : Anakart üzerinde, motor sürücülerin besleme voltajlarının uygun olduğunu gösteren ledlere ilişkin şematik tasarım.

Şekil 2.23’de 24 V gerilimi 5 V gerilime dönüştüren kısım gösterilmiştir. Bu amaçla VX7805[17] gerilim azaltan dönüştürücü kullanılmıştır.



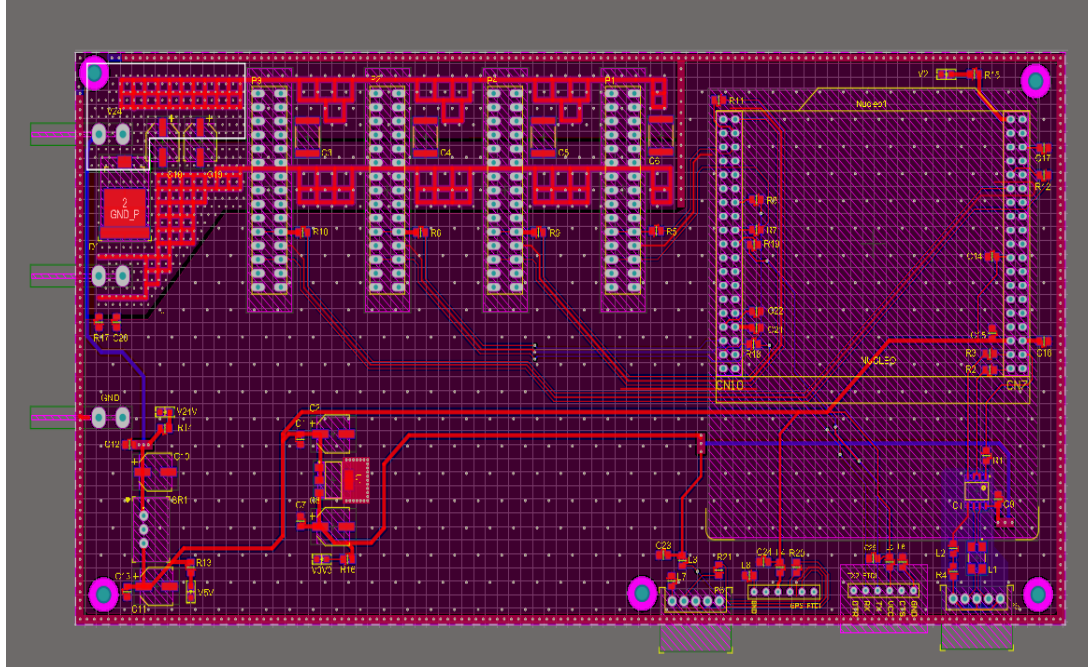
Şekil 2.23 : Anakart üzerinde 24V gerilimden 5V elde edilmesini sağlayan kısma ilişkin şematik tasarım.

Şekil 2.24’de 5 V gerilimi 3.3 V gerilime dönüştüren kısım gösterilmiştir. Bu amaçla NCV33375ST3[18] lineer gerilim regülatörü kullanılmıştır.



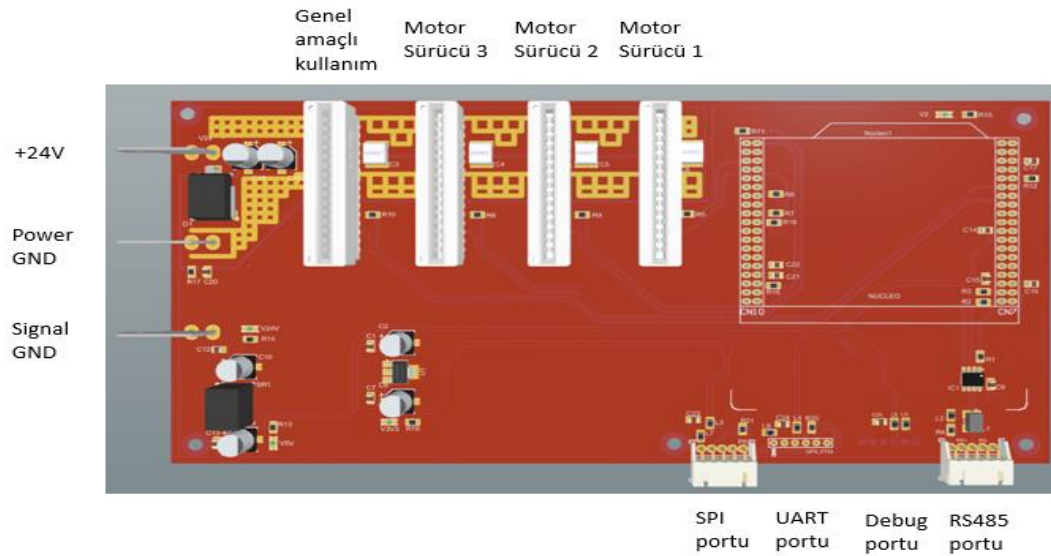
Şekil 2.24 : Anakart üzerinde 5V gerilimden 3.3V gerilim elde edilmesini sağlayan kısma ilişkin şematik tasarım.

Anakartın Şekil 2.25’de gösterilen baskı devre tasarımı Altium Designer 18[19] programında tasarlanmıştır. Baskı devre tasarımı çift katlı olacak şekilde yapılmıştır. Kablosuz haberleşme ekipmanları gibi görece yüksek frekanslı ekipmanlar kullanılmadığı için dört katlı baskı devre tasarımına ihtiyaç duyulmamıştır.



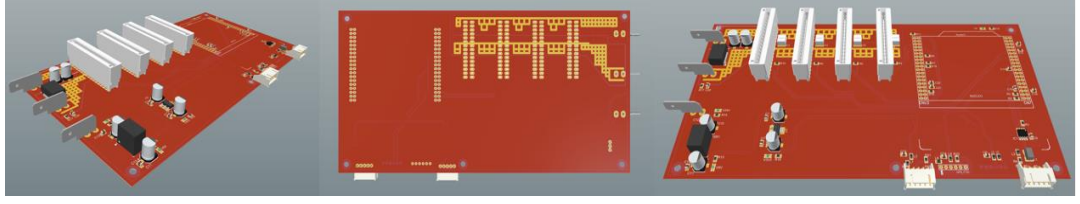
Şekil 2.25 : Anakart baskı devre tasarımı.

Şekil 2.26’da anakartın baskı devre tasarımının 3 boyutlu modeli üzerinde sürücüler ve diğer çevre birimleri ile etkileşime geçebileceği portları gösterilmiştir.



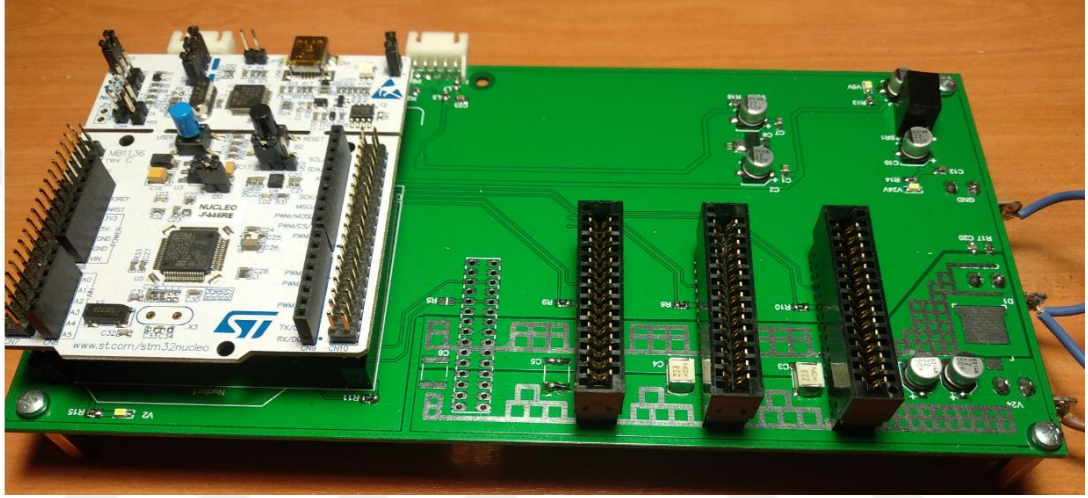
Şekil 2.26 : Anakartın çevre birimleri ile bağlantı portları.

Şekil 2.27’de baskı devrenin ve üzerinde bulunan komponentlerin 3 boyutlu modeli çapraz, alt ve üst olacak şekilde farkı açılardan gösterilmiştir.



Şekil 2.27 : Anakart baskı devre tasarımının farklı açılardan görünümü.

Şekil 2.28’de baskı devrenin ve üzerinde bulunan komponentlerin üretilmiş ve montajlanmış son hali gösterilmiştir. Üretim ve montajlama sırasında dizgi makinası kullanılmamış, el ile lehimleme yapılarak kart dizgisi yapılmıştır.



Şekil 2.28 : Üretilen anakart.

2.2.2 Motor sürücü tasarımı

Tez çalışması kapsamında geliştirilen motor sürücü devrelerin herbiri anakart ile haberleşme, artırılmış sayıcı verilerini okuma, kapalı çevrim motor kontrol kodlarını koşma ve motorlara güç sağlama görevlerini icra etmektedir. Aynı zamanda artırılmış sayıcıların besleme gerilimlerini sağlamaktadır.

Motor sürücü devresi üzerinde 72 Mhz kristal hızında, 20kb SRAM’e sahip, 32 pinli ve 32 bitlik STM32F103 mikrodenetleyici[20] barındıran Şekil 2.29’da gösterilen Nucleo32 geliştirme kartı doğrudan kullanılmıştır.

STM32F103 Nucleo32 geliştirme kartı, anakartta kullanılan STM32F411 Nucleo 64 geliştirme kartında olduğu gibi düşük maliyetli olması ve üretim süreçlerini hızlandırabilecek olması sebebiyle geliştirilen motor sürücüye doğrudan montajlanacak şekilde tasarım yapılmıştır. Bu sayede mikrokontrolör kartına herhangi bir zarar gelmesi durumunda Nucleo32 geliştirme kartının değişimi ile motor sürücü kartın kullanılmaya devam edilmesi hedeflenmiştir.



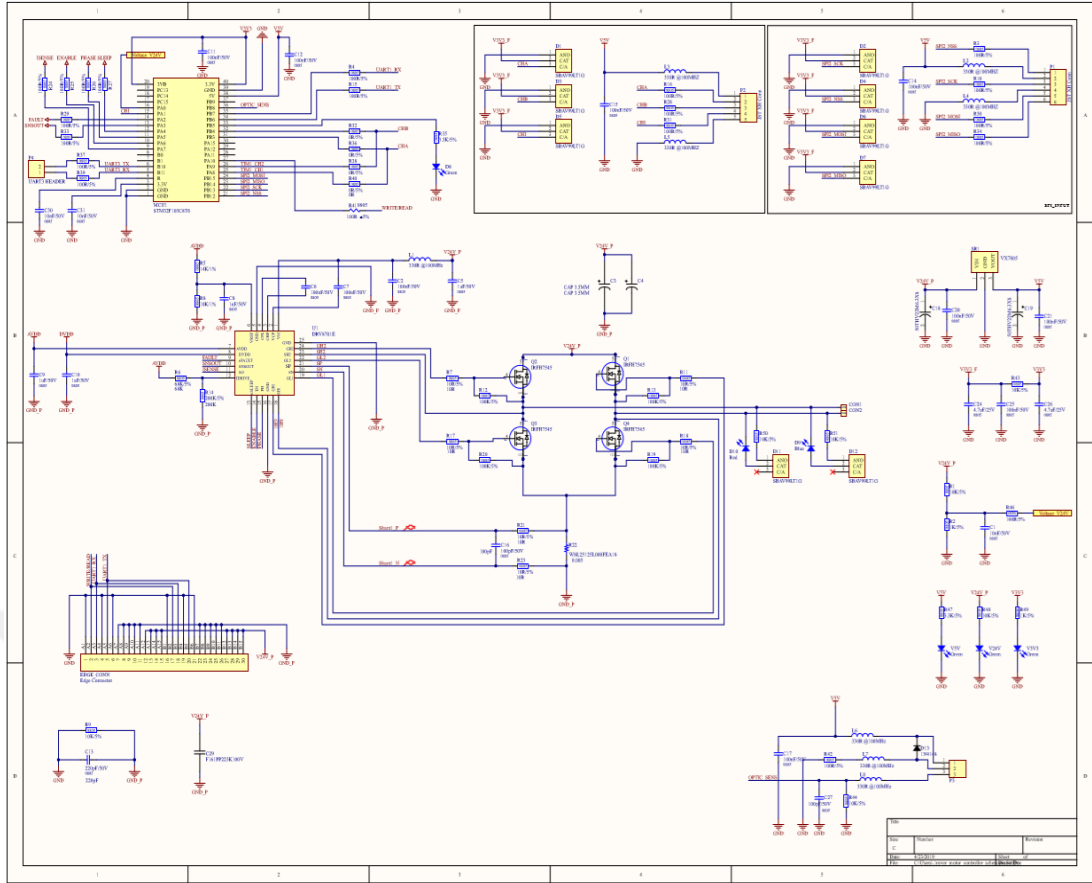
Şekil 2.29 : STM32F103 Nucleo 32 geliştirme kartı.

Motor sürücünün besleme voltajı anakart üzerinden yayılan hat vasıtasıyla batarya üzerinden sağlanır. Robotun çalışması sırasında voltajın giderek azalması söz konusu olacağı için tıpkı anakartta olduğu gibi motor sürücülerde de besleme voltajı 9V ile 28V değerleri arasında olabilecek şekilde tasarım yapılmıştır. Motor sürücü üzerinde yer alan DA-DA gerilim azaltan dönüştürücü[9] (buck converter) ile 5V gerilim elde edilmiştir. Bu gerilim ile Nucleo32 geliştirme kartı enerjilendirmiştir. 3.3V besleme gerilimi ise Nucleo32 geliştirme kartı üzerinden sağlanmıştır.

Motor sürücü kart üzerinde diğer birimlerle etkileşime geçmesini sağlayan 5 adet konnektör kullanılmıştır. Bunlardan birincisi anakart üzerinde bulunan kaset tipi konnektörün karşılığıdır. Faston tipindeki konnektör ise motora enerji vermek için kullanılmıştır. Kart üzerinde bulunan diğer konnektörler ise farklı tipteki artırımı sayıcıları okumak için tasarlanmıştır. Bu amaçla Motor sürücü kartı üzerine SPI haberleşme protokolünü ve artırımı sayıcı verilerini okuyabilecek enkoder giriş filtresi donanımları eklenmiştir.

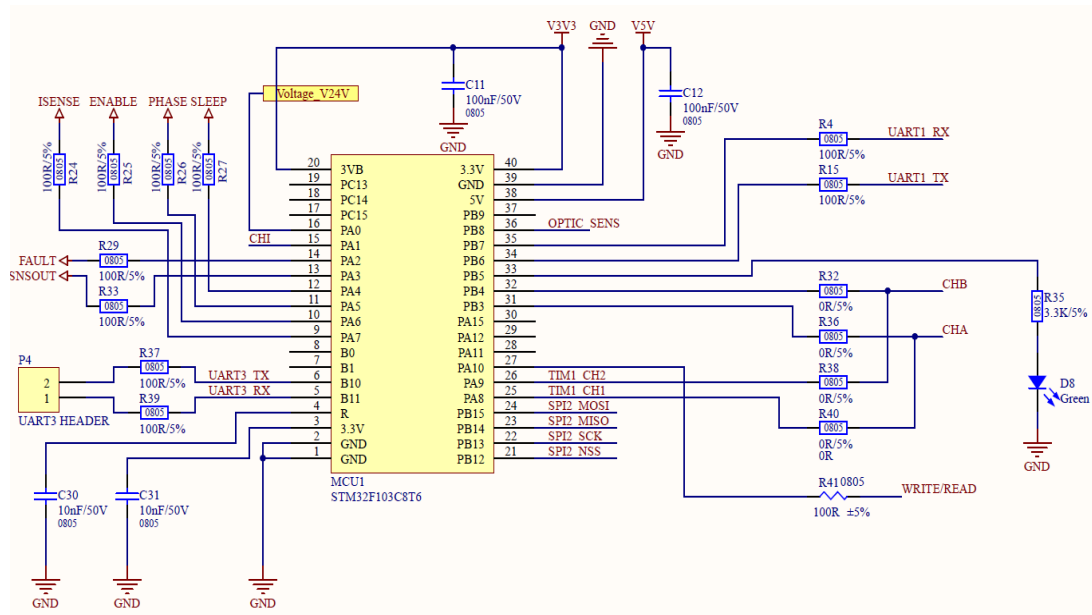
Motor sürücü kartı üzerinde H-köprü motor sürücü devresinde anahtarlama elemanları olarak IRFH7545 MOSFET[21] kullanılmıştır. MOSFET sürmek için ise DRV8701E entegresi[22] kullanılmıştır. Bu entegre devrede şarj pompası yapısının bulunması sayesinde %100 görev döngüsü (duty cycle) ile MOSFET sürülmesi mümkün kılınmıştır. Yine bu entegre devre üzerinde bulunan şönt direnç kuvvetlendiricisi sayesinde H-köprü motor sürücü devresinin çektiği akım hesaplanmaktadır. Akım bilgisi ve artırımı sayıcı verisi sayesinde motor sürücülerin kapalı çevrim tork, hız ve konum kontrolü yapabilmeleri mümkün kılınmıştır.

Motor sürücünün Şekil 2.30'da gösterilen şematik tasarımı Altium Designer 18 programında tasarlanmıştır. Motor sürücü kartın şematik tasarımında farklı işlevlere sahip kısımlar aşağıda daha detaylı olarak açıklanmıştır.



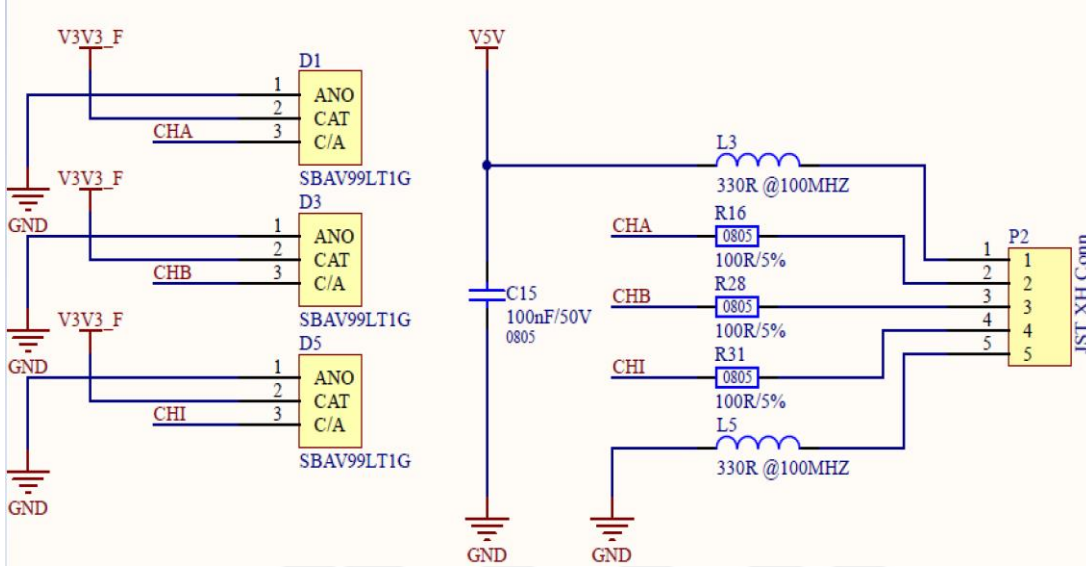
Şekil 2.30 : Motor sürücü şematik tasarımı.

Şekil 2.31’de motor sürücü karta, STM32F103 Nucleo 32 kartının bağlanacağı konnektörler ve STM32F103 Nucleo 32 geliştirme kartının istenilen konfigürasyonda çalışabilmesi için gerekli bazı çevresel birimler görülmektedir.



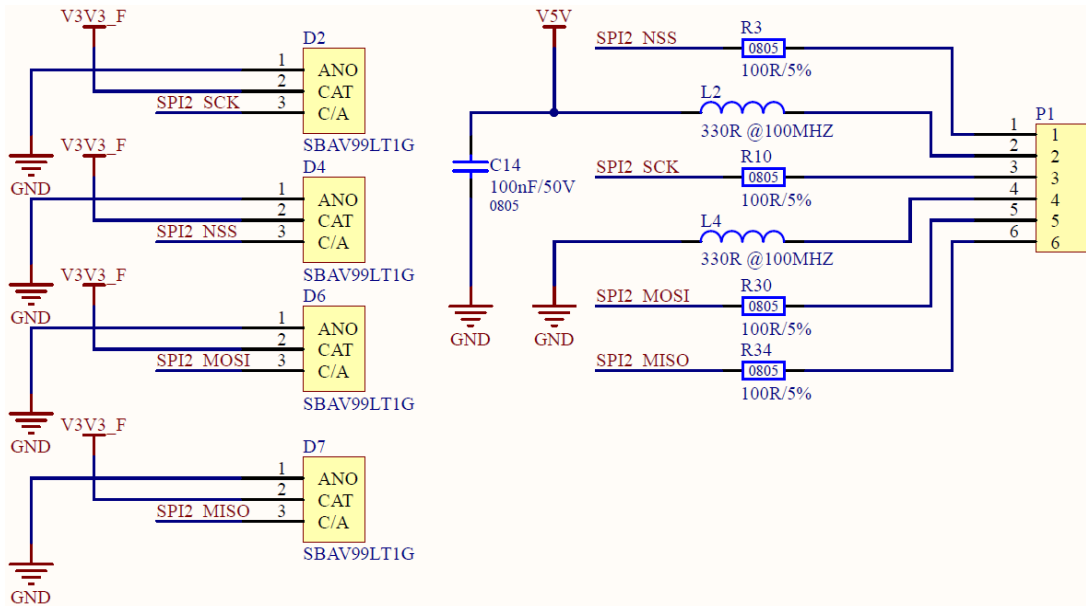
Şekil 2.31 : Motor sürücü kartta yer alan STM32F103 Nucleo 32 geliştirme kartının konnektörleri ve çevresel birimlerine ilişkin şematik tasarım.

Şekil 2.32’de motorların üzerinde bulunan artırılmış sayıcılardan gelen verilerin alındığı kısma ilişkin şematik tasarım gösterilmiştir. Motorlarda kullanılan artırılmış sayıcılardan iki kanal dönüş, bir kanal tur bilgisi geleceği için tasarım da buna göre yapılmıştır.



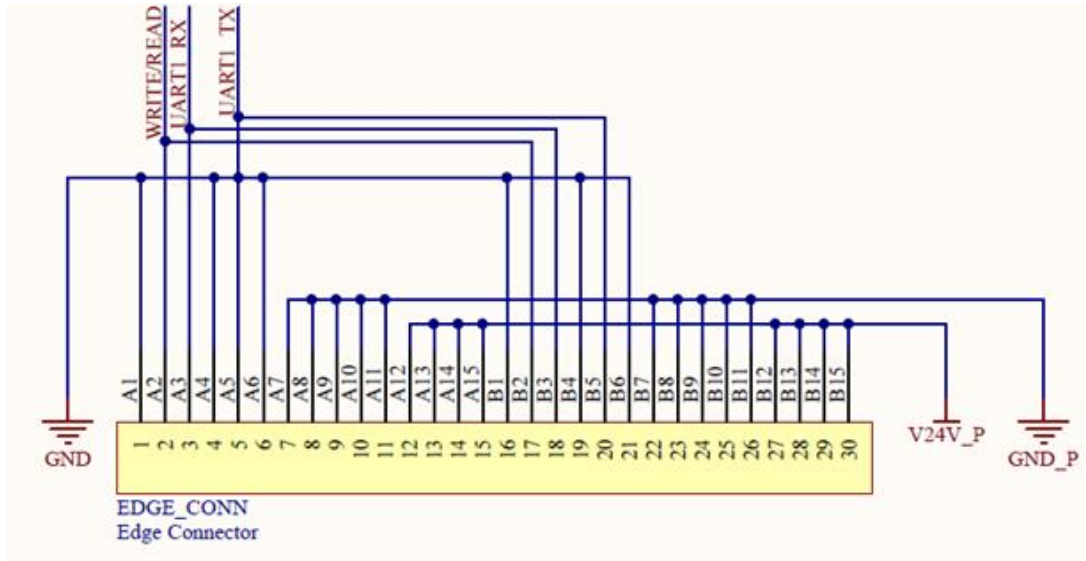
Şekil 2.32 : Artırılmış sayıcılardan motor dönüşü ile ilgili bilgilerin alındığı kısma ilişkin şematik tasarım.

Şekil 2.33’de ise SPI arayüzü olan artırılmış sayıcılardan motor dönüşü bilgisini almak için kullanılabilecek kısım yer almaktadır. Tez çalışması kapsamında bu tarz artırılmış sayıcılar kullanılmamış olsa bile gelecekte doğabilecek isterler için tasarıma eklenmiştir.



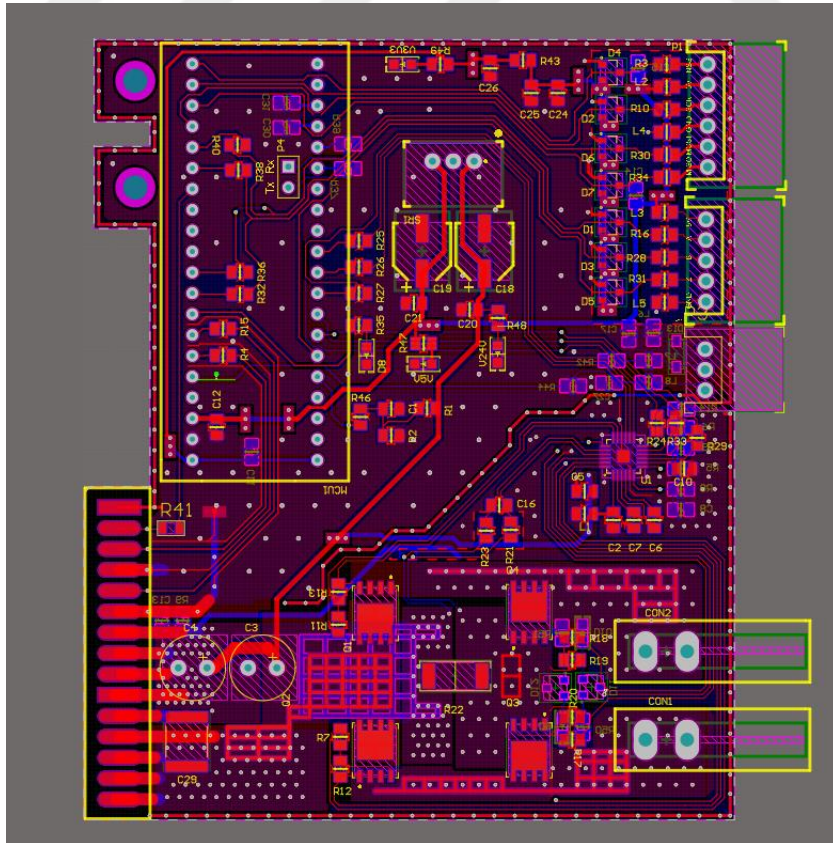
Şekil 2.33 : SPI arayüzüne sahip artırılmış sayıcılardan motor dönüşü ile ilgili bilgilerin alındığı kısma ilişkin şematik tasarım.

Motor sürücü kartın, anakarta montajlanacağı kısımda yer alan konnektöre ilişkin şematik tasarım Şekil 2.36’de gösterilmiştir. Besleme hatları birden fazla pine yayılarak, akımın geçeceği alanın artırılması hedeflenmiştir.



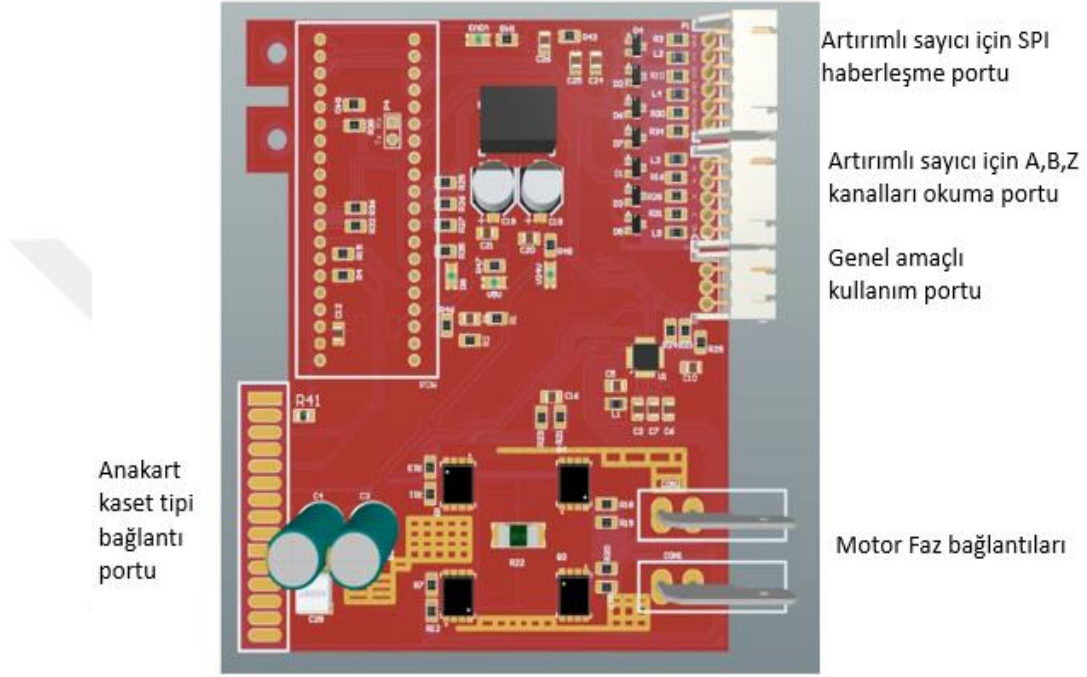
Şekil 2.36 : Motor sürücü kartı, anakarta bağlayacak konnektöre ilişkin şematik tasarım.

Motor sürücünün Şekil 2.37’da gösterilen baskı devre tasarımı Altium Designer 18 programında tasarlanmıştır.



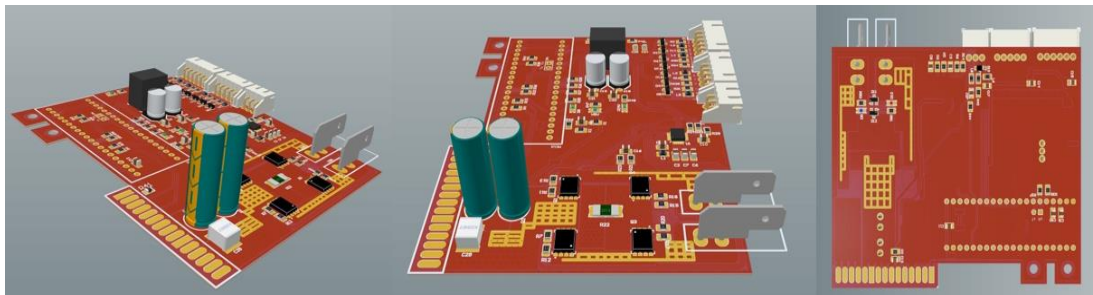
Şekil 2.37 : Motor sürücü baskı devre tasarımı.

Şekil 2.38’de motor sürücünün baskı devre tasarımının 3 boyutlu modeli üzerinde sürücüler ve diğer çevre birimleri ile etkileşime geçebileceği anakart kaset tipi bağlantı portu, SPI haberleşmesini destekleyen artırılmış sayıcılar için haberleşme portu, doğrudan A, B, Z darbe modülasyonu ile geribesleme sağlayan artırılmış sayıcılar için okuma portu, daha sonra eklenebilecek elemanları destekleyebilecek analog ya da dijital giriş-çıkış pini olarak kullanılabilecek portları gösterilmiştir.



Şekil 2.38 : Motor sürücünün çevre birimleri ile bağlantı portları.

Şekil 2.39’de motor sürücü baskı devrenin ve üzerinde bulunan komponentlerin 3 boyutlu modeli çapraz, üst ve alt olmak üzere farklı açılardan gösterilmiştir.



Şekil 2.39 : Motor sürücü baskı devre tasarımının farklı açılardan görünümü.

Şekil 2.40’de baskı devrenin ve üzerinde bulunan komponentlerin üretilmiş ve montajlanmış son hali gösterilmiştir. Üretim ve montajlama sırasında dizgi makinası kullanılmamış, el ile lehimleme yapılarak kart dizgisi yapılmıştır. STM32F103 geliştirme kartının motor sürücü karta montajı da dişi pin konnektörü ile yapılmıştır.



Şekil 2.40 : Üretilen motor sürücü.

2.2.3 Ataletsel ölçme birimi

Ataletsel ölçme birimi (IMU); dönü ölçer ve jiroskop ile yaptığı ölçümler neticesinde üzerinde bulunduğu nesnenin üç boyutlu uzayda yönelimini ve ivmesini belirlememizi sağlar. Bu verilerin elde edilmesi ile fiziksel ilkelere uygun hesaplamalar ile açısal hız, doğrusal hız, açısal ivme, dördey gibi veriler elde edilebilir.

Ataletsel ölçme birimi içerisinde farklı fiziksel prensiplere dayanan ölçüm teknikleri ile çalışan birden fazla ölçüm birimi bulunmaktadır. Temelde dönü ölçer ve jiroskop gibi iki farklı sensör içermesi gerekirken pratikte daha fazla sensör ile yapılan ölçümlerden oluşan verilerin işlenmesi ile daha kesin sonuçlar vermesi sağlanmaktadır.

Dönü ölçer ve jiroskopun verileri tek başlarına sensörlerin doğası gereği pek kullanışlı değildir. Bu sebepten ötürü genellikle verileri bir filtreden geçirilir ve bu iş içinde genellikle Kalman Filtresi kullanılır. Ancak sensör sayısı artırılarak filtreye giren veri sayısı arttırılabilir ve bu durumda daha güvenilir sensör verileri elde edilebilir.

Proje kapsamında ataletsel ölçüm birimi olarak, üzerinde Bosch üretimi BNO055[10] entegre devresi ve ARM Cortex-M0 mikrokontrolör bulunan Adafruit firmasının üretimi sensör seçilmiştir. Bu sensör üzerinde jiroskop, dönüölçer, manyetometre ve sıcaklık ölçme birimi bulunmaktadır. Bu sensörü diğer birçok ucuz ataletsel ölçme

biriminden ayıran en önemli farkı ise üzerinde bulunan mikrokontrolör ile farklı algılayıcılardan gelen verileri Kalman Filtresi[23] ile işleyip dışarıya mutlak oryantasyon bilgisi verebilmesidir. Şekil 2.41’da Adafruit BNO055 9 serbestlik dereceli mutlak oryantasyon algılayıcısına ait görsel yer almaktadır.



Şekil 2.41 : Ataletsel ölçüm birimi.

Bu sensörü kullanarak elde edilebilecek bilgiler aşağıdaki gibidir.

- Mutlak konum (Euler Vektörü yada dördey)
- Açısal hız vektörü
- İvme vektörü (üç eksenli ivme, yerçekimi ve doğrusal hareket)
- Manyetik alan şiddeti vektörü (üç eksenli manyetik alan ölçümü)
- Doğrusal ivme vektörü (üç eksenli ivme vektörü)
- Yerçekimi vektörü (üç eksenli yerçekimi vektörü)
- Sıcaklık

2.2.4 Batarya

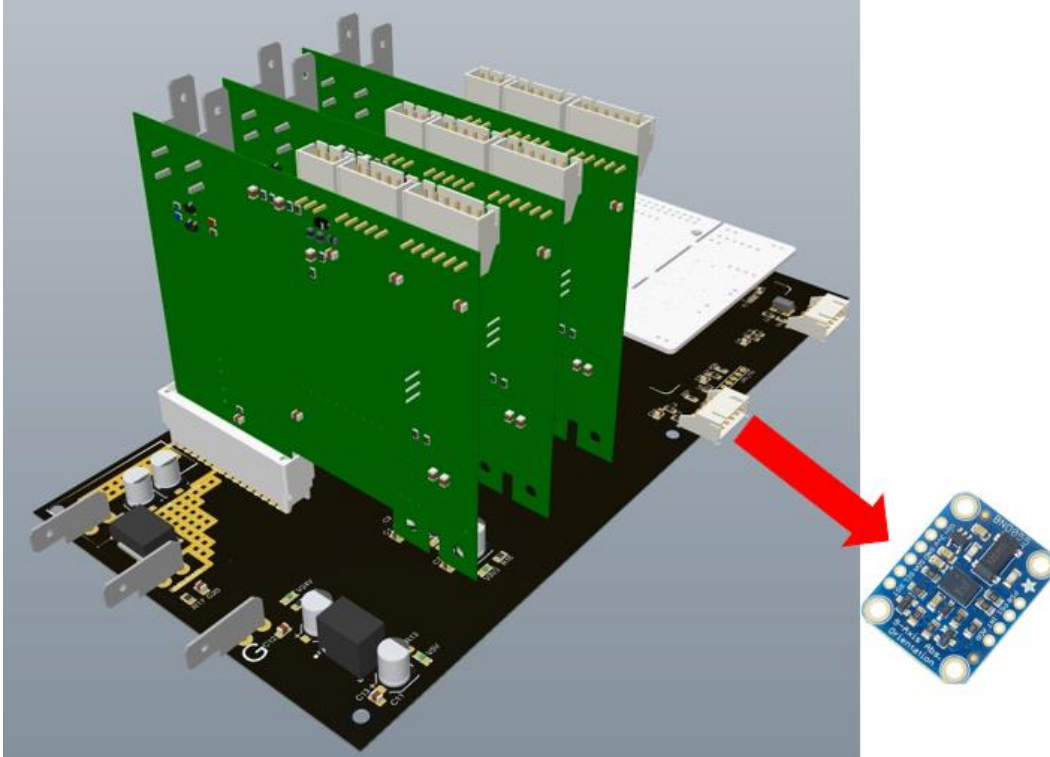
Topun üzerinde duran robot geliştirilmesi projesi kapsamında robot üzerinde bulunan ekipmanlardan en ağır batarya olacağından ağırlığı karşısında en çok enerji verebilen tipteki Lityum Polimer (Li-Po) bataryalar tercih edilmiştir. Li-Po bataryalarda bulunan her bir pil hücresinin nominal gerilimi 3.7 V’tur. Dolayısıyla geliştirilen anakart ve sürücüler doğrudan bu batarya üzerinden besleneceği için 6 hücreli bir batarya

seçilmiştir. Li-Po bataryaların her bir hücreindeki voltajın dengelenmemesi sonucunda bataryanın sağlığının kötü etkilenmesi ve hatta yangın riski söz konusu olduğu için Şekil 2.42’da gösterilen batarya izleme ünitesi ile kullanılmasına karar verilmiştir. Bu ünite bataryanın toplam gerilimi yada herhangi bir hücrenin gerilimi önceden belirlenen seviyenin altına indiğinde sesli uyarıda bulunmaktadır. Bu sayede bataryada oluşabilecek riskli durumlara karşı önlem alınabilecektir.



Şekil 2.42 : Batarya izleme ünitesi.

Tez kapsamında tasarımı yapılan elektronik bileşenler olan anakart, motor sürücüler ve IMU’nun bir aradaki görünümü Şekil 2.43’de verilmiştir.



Şekil 2.43 : Anakart, motor sürücüler ve IMU’nun bir aradaki görünümü.

Üretilen anakart ve üzerine yerleştirilen STM32F411 Nucleo 64 geliştirme kartı ile motor sürücü ve üzerine yerleştirilen STM32F103 Nucleo 32 geliştirme kartı bir arada Şekil 2.44’de gösterilmiştir.



Şekil 2.44 : Üretilen anakart ve motor sürücünün bir aradaki görünümü.



3. MATEMATİKSEL MODEL VE KONTROLÖR GELİŞTİRME

3.1 Robotu Dengede Tutan Kontrolcünün Geliştirilmesi

Üç tane çok yönlü teker ile küre üstünde denge kontrolü çalışmalarına Fankhauser ve Gwerder'in 2010 yılında hazırladığı "Modeling and Control of a Ballbot" isimli çalışma örnek gösterilebilir [5]. Çalışmada oldukça karmaşık ve uzun dinamik denklemlerin açısı, açısal hız ve tork durumları ile farklı bölgelerde lineerleştirilip, kazanç değiştiren Lineer karesel regülatör (LQR) mekanizmasıyla DA motorlara tork referanslarının üretilmesi gösterilmiştir.

LQR kontrolcü yapısı 1960 yılında ortaya atılmış ve bir çok araştırmada kullanılmıştır.[24]. LQR kontrolcü yapısında sisteme ait durum değişkenlerinin hata değerleri geri beslenmektedir bu sebeple sisteme ait kutupların herbirinin istenilen noktalara atandığı düşünülebilir. Fakat Fankhauser ve Gwerder'in çalışmasında kullandığı kontrolör yapısı step motor gibi hız referansı ile tahrik sağlayan sistemlerin kontrolüne cevap verememektedir.

Kumagai ve Ochiai'nin 2008 yılında yaptığı çalışma ise benzer bir sistemin step motorlara hız referansı üreterek kontrolüne örnek verilebilir [4]. Bu çalışmada açısı ve açısal hız geribeslemesinin ve konum ve yönelim referanslarının deneysel yöntemlerle belirlenen kazanç değerleriyle süperpozisyonu sonucu bir ivme komutu ve nümerik integrasyonla hız komutu elde ederek, step motorlar tahrik edilmektedir.

Fankhauser ve Gwerder'in çalışmasına nazaran çok daha kolay bir kontrol yöntemi sunan Kumagai ve Ochiai'nin çalışması, kullandıkları yönteme analitik bir açıklama getirememektedir. Robotun denge konumunda kalmasını sağlamak kullanılan kontrolcü yapısından ziyade kalibrasyon sürecine bağımlı kalmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında robotun mekanik tasarım süreçleri, algılayıcı ve eyleyici seçimleri ile robotun dengede durmasını sağlayan kontrolcülerin Kumagai ve Ochiai'nin makalesinde gösterilen metodun, Fankhauser ve Gwerder'in çalışmasında açıklanan model üzerinde, bazı kazançların lineer kontrolörlerle güçlendirildiği benzetimi incelenecektir.

3.1.1 Matematiksel modelleme

Sistem basitçe, iki eksenle birden kendini dengeleme hareketi yapan, fakat bu hareket sırasında bu iki düzlemin oluşturduğu düzlemdeki herhangi bir eksenle mesnetlenmemiş bir ters sarkaç olarak düşünebilir. Dolayısıyla sarkacın yapacağı açı değişimleri lineer olmayan etkilerle sistem dinamiğini sürekli değiştirecektir.

Sistem girişleri üç adet motorun uyguladığı tahrik torkları; durum ve çıkışları ise gövdenin x, y ve z eksenlerindeki sapma açıları ve açısal hızları ve küre tekerin x ve y eksenlerindeki açısal konumu ve açısal hızı olarak ele alınmıştır. Bu sayede azimut açısından kaynaklanacak etkiler ve mekanizmanın yer değiştirmesi düzgün bir şekilde hesaplanabilecektir. Sistem küreden ziyade gövdenin z eksenindeki hareketinden az da olsa etkilenecektir, bu sebeple kürenin z eksenindeki hareketi durum denklemlerine dahil edilmemiştir. Sistemin durum uzay modeli denklem (3.1)'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu & C &= I_{10 \times 10} \\ y &= Cx + Du & D &= 0_{10 \times 3} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Sistem girişleri (u) denklem (3.2)'de gösterilmiştir.

$$u = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T \quad (3.2)$$

Sistem durumları (x) denklem (3.3)'de gösterilmiştir.

$$x = [\theta_x \ \dot{\theta}_x \ \theta_y \ \dot{\theta}_y \ \theta_z \ \dot{\theta}_z \ \phi_x \ \dot{\phi}_x \ \phi_y \ \dot{\phi}_y]^T \quad (3.3)$$

Sistem çıkışları (y) denklem (3.4)'de gösterilmiştir.

$$y = [\theta_x \ \dot{\theta}_x \ \theta_y \ \dot{\theta}_y \ \theta_z \ \dot{\theta}_z \ \phi_x \ \dot{\phi}_x \ \phi_y \ \dot{\phi}_y]^T \quad (3.4)$$

Sistem modelindeki A ve B matrislerini bulmak için (3.5)'de gösterilen Lagrange enerji denklemleri yaklaşımı kullanılmıştır.

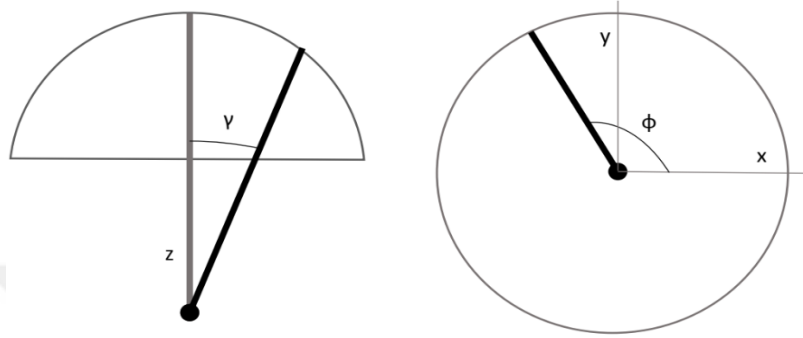
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^T + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T - F_{dış} = 0 \quad (3.5)$$

Sistem girişleri, durumları ve çıkışlarından oluşan 13 farklı değişken (u,x,y) Lagrange denklemleri ile elde edilen A ve B matrislerinin doğrudan kullanımı söz konusu değildir. Bu sebepten dolayı sistem farklı noktalar etrafında lineerleştirilmiştir. Lineerleştirme yapılırken geliştirilen sistemin çalışmaya başlarken tam olarak dik olduğu denge noktasına yakın olacağı düşünülerek görece düşük hızlarda çalışacağı ve bu sebeple motorların görece düşük seviyelerde tork uygulayacağı varsayılmıştır.

Lineerleştirme Şekil 3.1’de gösterildiği gibi azimut (γ) ve yönelim (ϕ) açılarına göre seçilen farklı noktalar etrafında yapılmıştır. Lineerleştirme noktası olarak seçilen azimut açıları (3.6)’da, yönelim açıları ise (3.7)’de gösterilmiştir.

$$\gamma = [2 \ 4 \ 6 \ 8 \ 10 \ 12 \ 14 \ 16 \ 18 \ 20]^\circ \quad (3.6)$$

$$\phi = [22.5 \ 67.5 \ 112.5 \ 157.5 \ 202.5 \ 247.5 \ 292.5 \ 337.5]^\circ \quad (3.7)$$

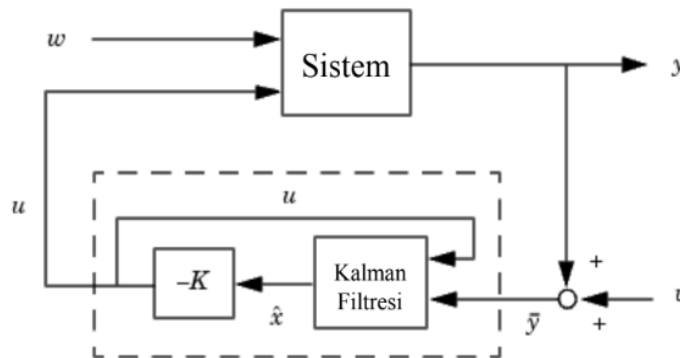


Şekil 3.1 : Azimut (γ) ve yönelim (ϕ) açıları.

(3.6) ve (3.7) de gösterilen noktalar dışında birde sistem, tüm durum değişkenlerinin 0 olduğu denge noktasında lineerleştirilmiştir.

3.1.2 Kontrolör geliştirme

Lineerleştirilmiş sistem modelinin elde edilmesinin ardından LQR ve Şekil 3.2’de gösterilen Lineer karesel Gaussian (LQG) kontrolcü[25] kullanılmıştır. LQG basit olarak Kalman Filtresive LQR kontrolcünün bir arada çalışmasıyla meydana gelen yapıdır. LQG yapısında, Kalman Filtresi’nin alınan gürültülü ölçümleri kullanarak gelecektekileri tahmin etmesi ve sinyali mümkün olduğunca gürültüden arındırmasının ardından bu sinyaller LQR kontrolcü yapısına verilir. Bu sebeple ölçüm gürültüsü ve bozucu etkiler söz konusu olduğunda sadece LQR yapısının kullanıldığı sistemlere nazaran LQG yapısı daha gürbüzdür[26].



Şekil 3.2 : Kalman Filtresinin kullanıldığı kontrol mimarisi.

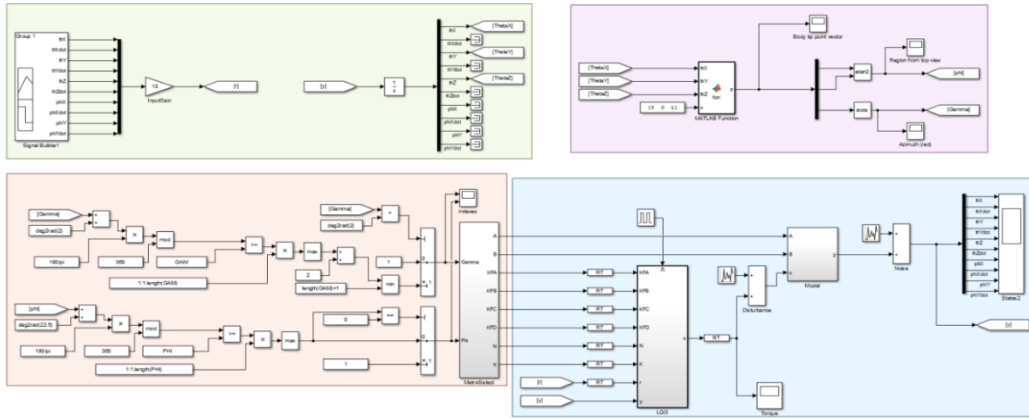
Q matrisi (3.8)'de R matrisi ise (3.9)'da gösterildiği gibi seçilmiştir.

$$Q = I_{10}[100 \ 50 \ 100 \ 50 \ 40 \ 20 \ 20 \ 10 \ 20 \ 10] \quad (3.8)$$

$$R = I_3[100 \ 100 \ 100] \quad (3.9)$$

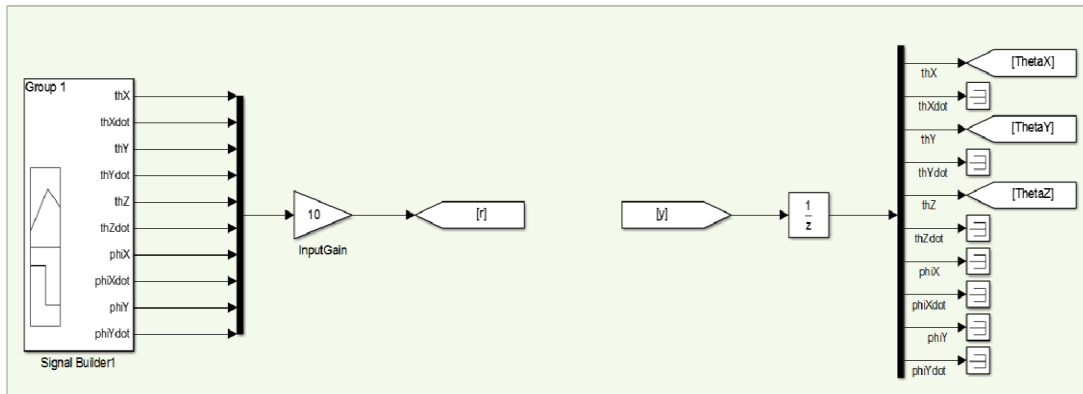
3.1.3 Benzetim ortamının geliştirilmesi

Sistemin matematiksel modeli ve LQR, LQG kontrolcü yapıları Simulink benzetim ortamında modellenmiştir. Şekil 3.3'de Simulink ortamında geliştirilen benzetim ortamı yer almaktadır.



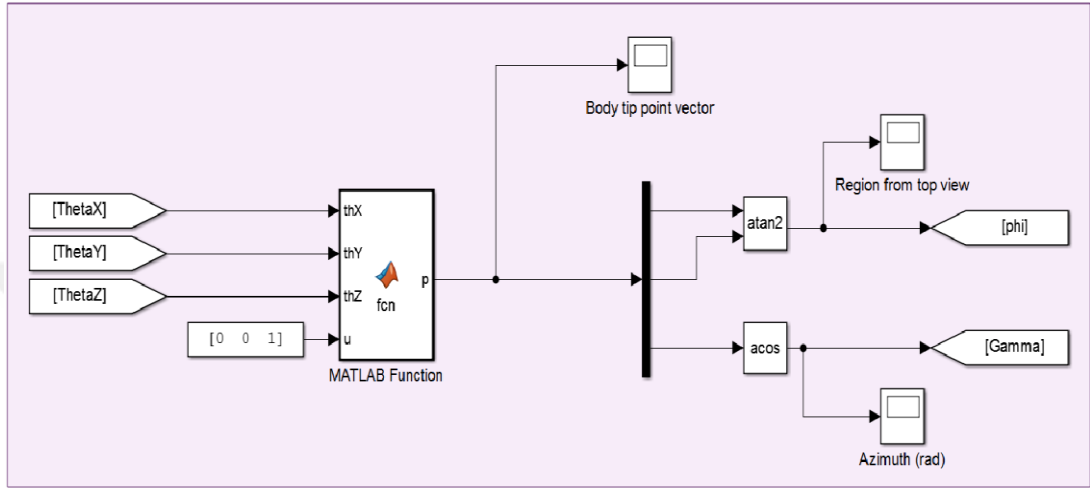
Şekil 3.3 : Sistem ve kontrolcüyü içeren model.

Benzetim ortamı işlevlerine göre dört farklı ana bölüme ayrılmaktadır. Şekil 3.4'de görülen kısım giriş çıkış demetini içermektedir. Burada sistemin durum vektörünün referansları sinyal üretici aracılığıyla verilmiştir. Örneğin, nihai sistemin hareketsiz ve dik durması istenirse bu vektörün tüm elemanları sıfır olacaktır. Yada Y eksenine göre yatması ve X ekseninde ivmelenmesi isteniyorsa thetaY ve phiYdot referansları verilmelidir. Bu kısımda ayrıca gövde yönelimini algılamak için gerekli sistem durum geribeslemeleri de elde edilmektedir.



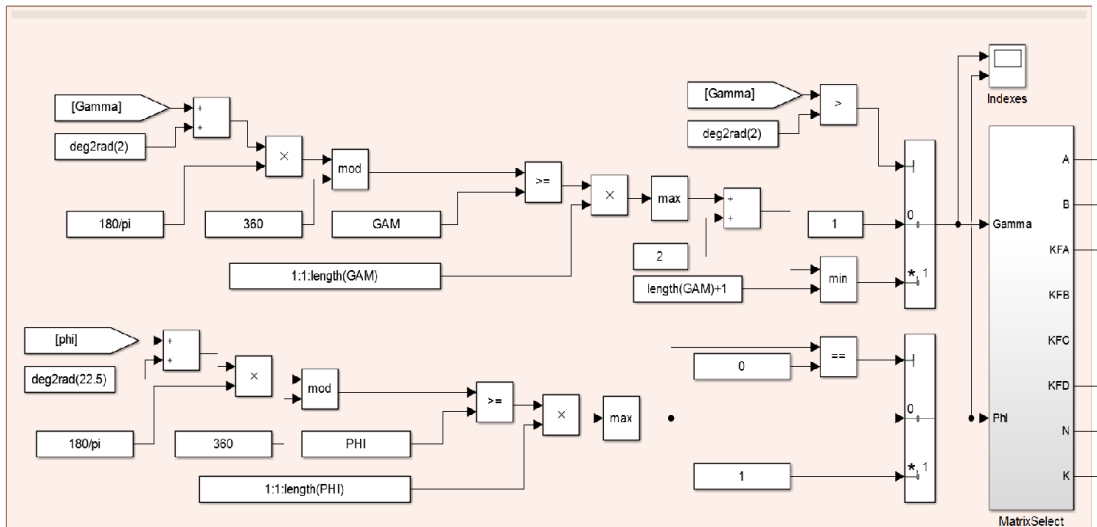
Şekil 3.4 : Giriş çıkış demeti içeren kısım.

Şekil 3.5’de kinematik fonksiyonu içeren benzetim modeli kısmı yer almaktadır ve bu kısımda direction cosine matrix (DCM) aracılığıyla top merkezindeki koordinat sistemine göre gövde uç noktasının konumunu belirten vektör ve yer düzlemine ve azimuta göre açıları elde edilmektedir. Elde edilen vektör benzetim sonuçlarının daha görsel bir yolla algılanabilmesinde, açılar ise yönelim bölgesine uygun lineerleştirme matrislerinin seçiminde kullanılacaktır.



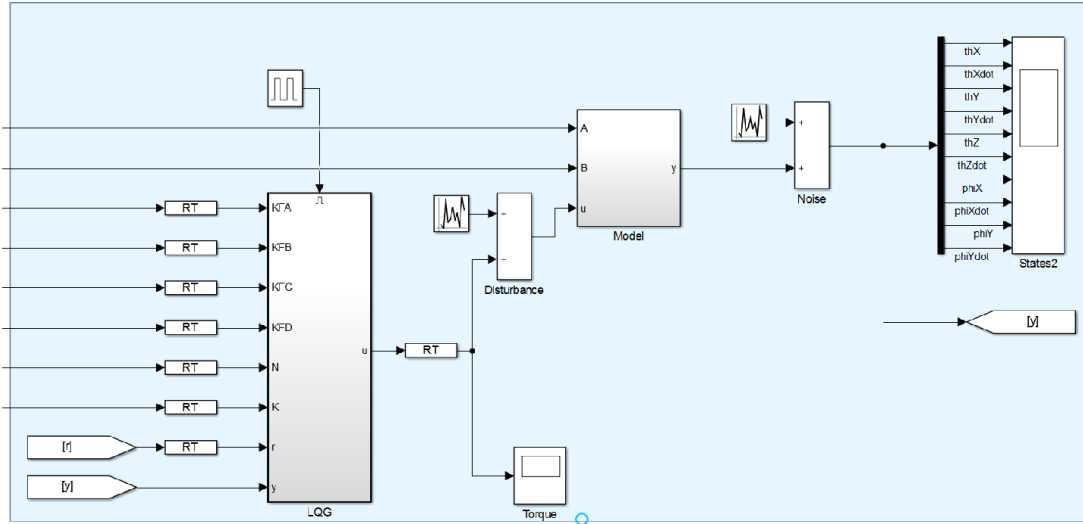
Şekil 3.5 : Kinematik fonksiyonu içeren kısım.

Şekil 3.6’da gösterilen kısımda ise LQG düzenleyici için matris seti seçimi yapılmaktadır. Hesaplanan gamma ve phi açılarının düştüğü bölgenin, lineerleştirme matrislerinin hangi elemanlarına denk geldiğini çıkaran basit bir vektör aritmetiğiyle bu iki açının indisleri çıkarılıp, LQG algoritmasının elemanı olan model, kalman filtre durum uzay matrisleri ve geribesleme matrisleri bu indislerle seçilir. Bu matrisler, farklı gamma ve phi açılarının kombinasyonlarına göre elde edilmiştir.



Şekil 3.6 : LQG düzenleyici için kazanç matris seti seçen kısım.

LQG düzenleyici ve model matrisleri Şekil 3.7’de gösterilen kısımda uygulanmaktadır. LQG alt sistemi, kodun gömüleceği sistemin performansının benzetimini yapmak amacıyla belirlenen örnekleme zamanında çalışacaktır. Bu alt sistem her bir motor için kontrol işareti olarak bir tork vektörü çıkarmaktadır. Elde edilen tork vektörünün model matrisleri üzerindeki bozuculu ve bozucusuz etkilerinin, sistem çıkışlarına (durumlarına) etkisi en sonda gözlemlenebilmektedir. Bu durumlara bir gürültü vektörü de eklenip sistem performansı incelenebilmektedir.



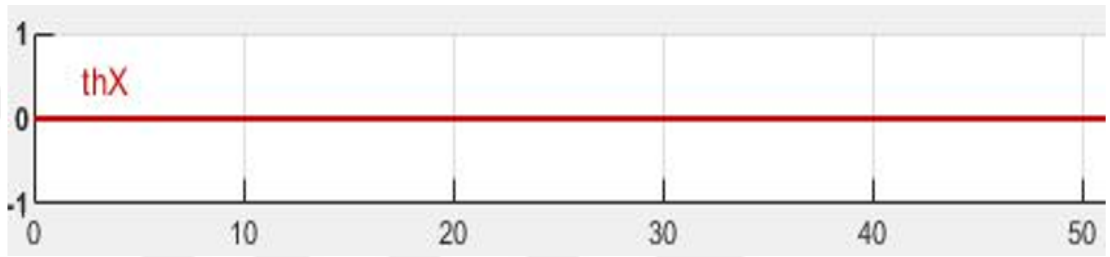
Şekil 3.7 : LQG düzenleyici ve model matrislerinin uygulandığı kısım.

3.1.4 Benzetim sonuçları

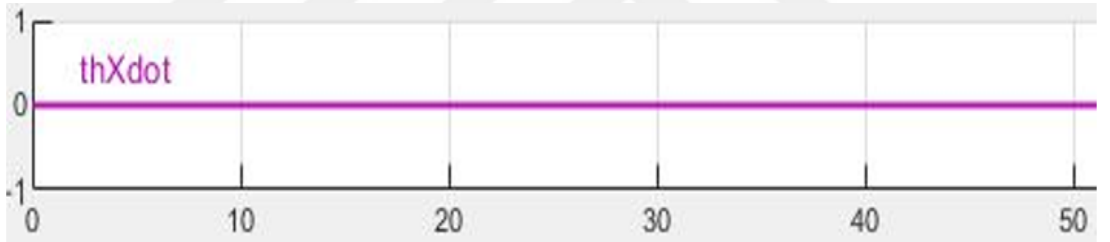
Sisteme benzetim ortamında LQR ve LQG düzenleyici yapılarının kontrolcü olarak ayrı ayrı kullanılmıştır. LQR ve LQG yapılarının kullanıldığı durumlarda aşağıda bahsedilen referans işaretler uygulanmış ve sonuçları gözlenmiştir. Burada denklem (3.4)’de yer alan tüm değişkenlere referans işaret uygulanmıştır. Buna göre, Şekil 3.8’de gösterilen “thX” gövdenin x eksenindeki konum Şekil 3.9’da gösterilen “thXdot” x eksenindeki hız, Şekil 3.10’da gösterilen “thY” gövdenin y eksenindeki konum, Şekil 3.11’de gösterilen “thYdot” y eksenindeki hız ve Şekil 3.12’de gösterilen “thZ” gövdenin z eksenindeki konum, Şekil 3.13’de gösterilen “thZdot” z eksenindeki hız referansları 0 olarak verilmiştir. Verilen referans işaretlere göre gövdenin x,y,z eksenlerinde herhangi bir hareket yapmaması beklenmektedir Şekil 3.14’de gösterilen “phiX” topun x eksenindeki konum referansını göstermektedir. Buna göre topun x ekseninde -12 radyan konuma gidip orada 10 saniye bekledikten sonra başlangıç pozisyonuna dönmesi beklenmektedir. Şekil 3.15’de gösterilen “phiXdot” topun x eksenindeki hızını göstermektedir ve verilen referans işarete göre

0 olması beklenmektedir. Şekil 3.16’da gösterilen “ ϕY ” topun y eksenindeki konumunu göstermektedir. Buna göre topun y ekseninde 10 radyan konuma gidip 10 saniye bekledikten sonra başlangıç pozisyonuna dönmesi beklenmektedir. Şekil 3.17’de gösterilen “ $\phi Ydot$ ” topun y eksenindeki hızını göstermektedir ve verilen referans işarete göre 0 olması beklenmektedir.

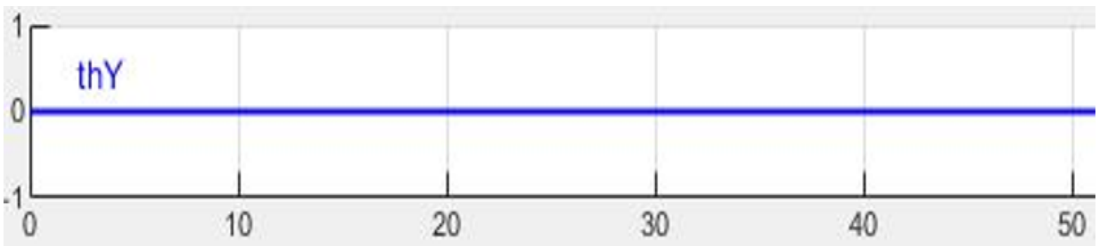
Özetle bu referans işaret seti uygulandığında beklenti, gövdenin hareket etmemesi ve topun 28. saniyede x ve y eksenlerinde istenilen konumlara gitmeye başlaması, 30. saniyede istenilen konumlarda olması, 40. saniyeye kadar bu konumlarda beklemesi ve 42. saniyede başlangıç konumuna geri dönmesi beklenmektedir.



Şekil 3.8 : Gövdenin x eksenindeki hız referansı.



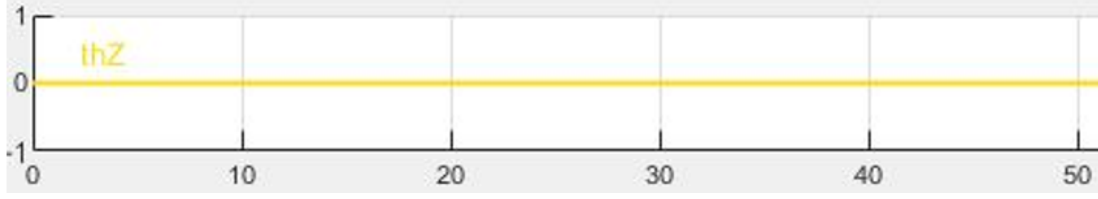
Şekil 3.9 : Gövdenin x eksenindeki hız referansı.



Şekil 3.10 : Gövdenin y eksenindeki konum referansı.



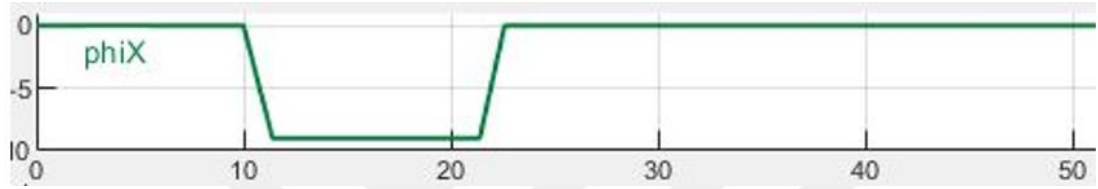
Şekil 3.11 : Gövdenin y eksenindeki hız referansı.



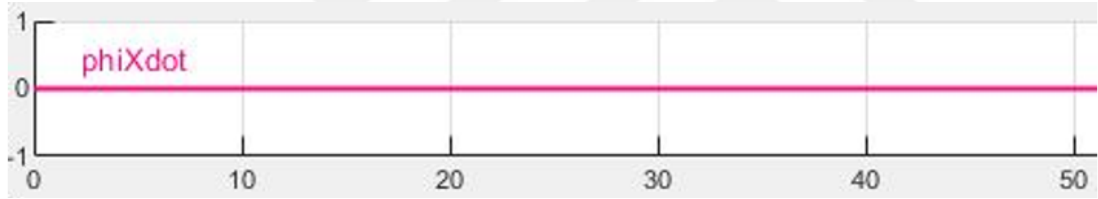
Şekil 3.12 : Gövdenin z eksenindeki konum referansı.



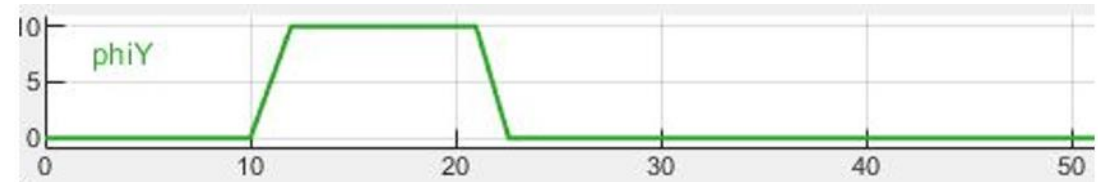
Şekil 3.13 : Gövdenin z eksenindeki hız referansı.



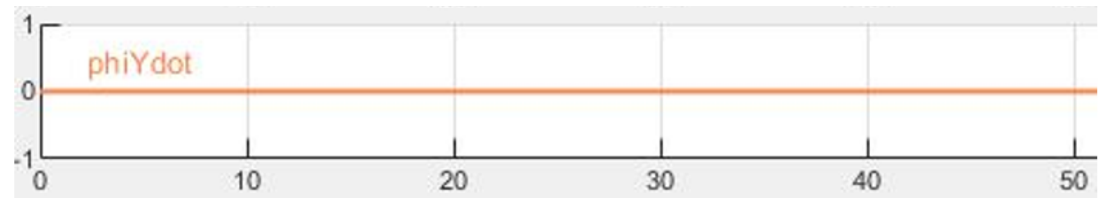
Şekil 3.14 : Topun x eksenindeki konum referansı.



Şekil 3.15 : Topun x eksenindeki hız referansı.



Şekil 3.16 : Topun y eksenindeki konum referansı.

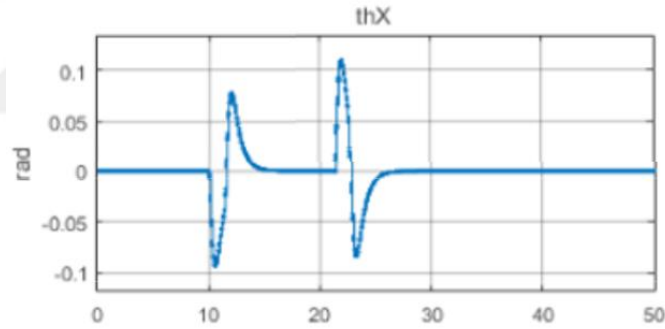


Şekil 3.17 : Topun y eksenindeki hız referansı.

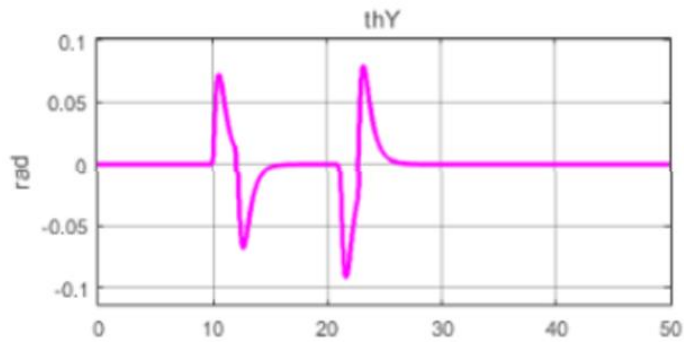
Gürültü ve bozucu etkiler olmadan LQR yapısının kullanıldığı durumda benzetim sonuçları denklem (3.4)'de yer alan tüm sistem çıkışları olacak şekilde aşağıda gösterilmiştir. Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de görüleceği üzere “phiX” topun x eksenindeki konumu ve “phiY” topun y eksenindeki konumu Şekil 3.14 ve Şekil

3.16’da verilen referans işaretleri başarılı bir şekilde takip etmiştir. Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de görülen “phiXdot” ve “phiYdot” topun x ve y eksenlerindeki hızları, Şekil 3.24 ve Şekil 3.26’da verilen konumlardaki değişikliklere bağlı olarak değişmiştir. Konumun değişmeye başladığı anlarda hızlı değişim gösterip, konumun sabit olduğu durumlarda değişmemesi hızların konum referanslarındaki değişimlerin etkisi dışında sabit kalarak beklenen davranışı sergilediklerini göstermiştir.

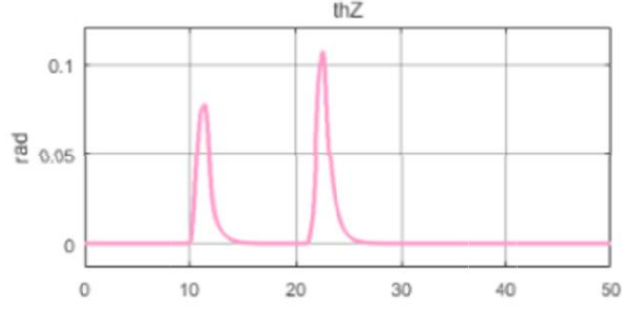
Şekil 3.18’de ve Şekil 3. Şekil 3.19’da topun hareket etmesine bağlı olarak gövde üzerindeki eylemsizlik etkisi, gövdenin x ve y eksenlerindeki konumlarında görülmektedir. Topun dönme hareketine uygun olarak gövdenin hareket etmesi Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de gösterilen gövdenin x ve y eksenlerindeki hızlarında da görülmektedir. Şekil 3.20’de ise gövdenin z ekseninde yaptığı hareket gözlenmektedir. Bunun sebebi ise 3 eksenindeki hareketin birbirinden bağımsız olmamasıdır. Bu harekete uygun olarak Şekil 3.23’de gösterilen z eksenindeki hız oluşmuştur. LQR kontrolcü yapısı ile gürültü eklenmeden yapılan benzetim sonuçları incelendiğinde robotun dengede durabileceği görülmektedir.



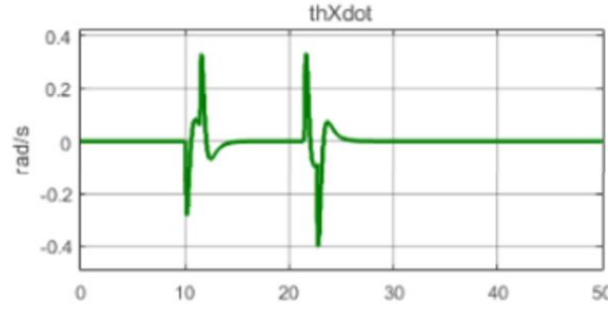
Şekil 3.18 : Gövdenin X eksenindeki konumunun Şekil 3.8’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



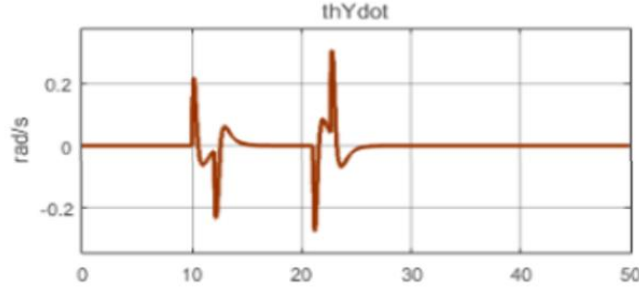
Şekil 3.19 : Gövdenin Y eksenindeki konumunun Şekil 3.10’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



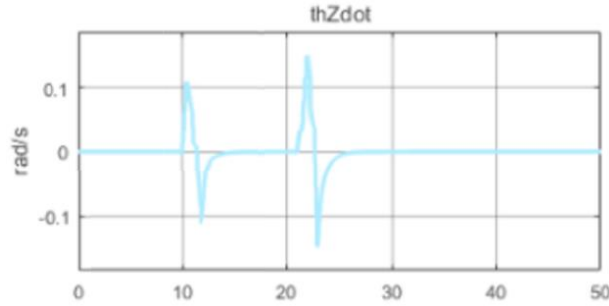
Şekil 3.20 : Gövdenin Z eksenindeki konumunun Şekil 3.12’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



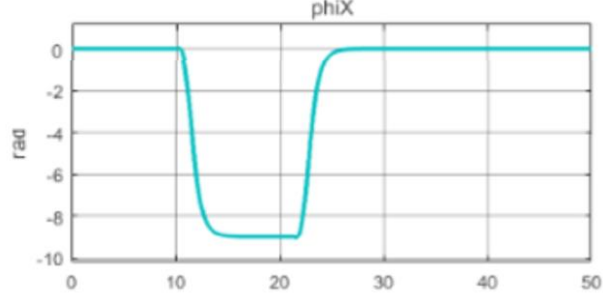
Şekil 3.21 : Gövdenin X eksenindeki hızının Şekil 3.9’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



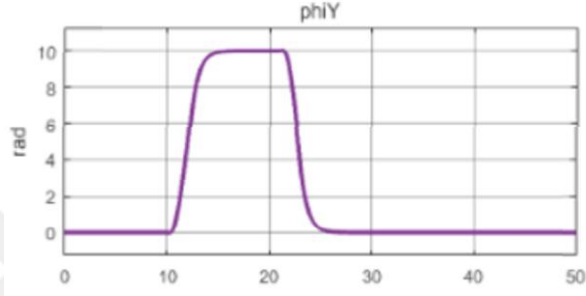
Şekil 3.22 : Gövdenin Y eksenindeki hızının Şekil 3.11’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



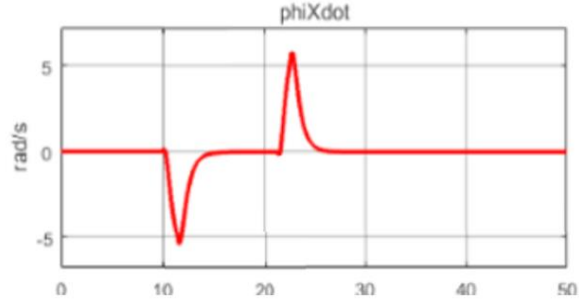
Şekil 3.23 : Gövdenin Z eksenindeki hızının Şekil 3.13’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



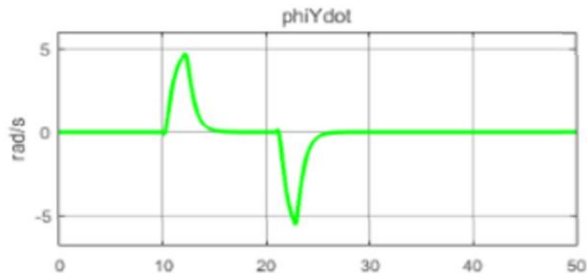
Şekil 3.24 : Topun X eksenindeki konumunun Şekil 3.14’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



Şekil 3.25 : Topun Y eksenindeki konumunun Şekil 3.16’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



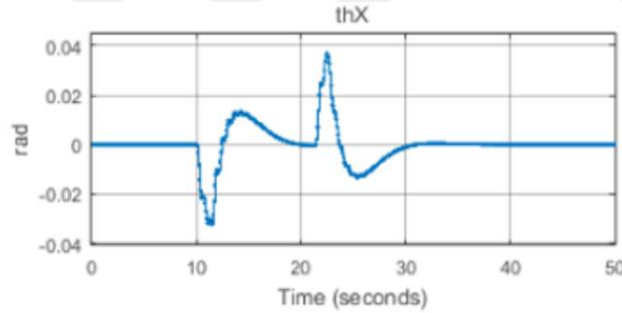
Şekil 3.26 : Topun X eksenindeki hızının Şekil 3.15 ’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



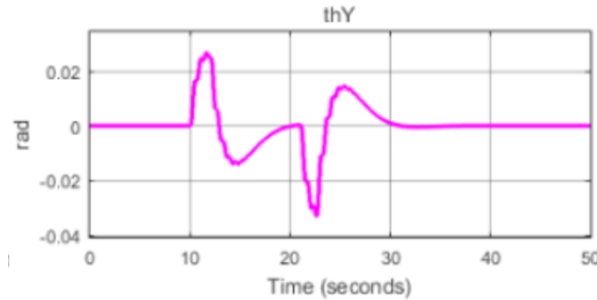
Şekil 3.27 : Topun Y eksenindeki hızının Şekil 3.17’de verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.

Gürültü ve bozucu etkiler olmadan LQG yapısının kullanıldığı durumda benzetim sonuçları denklem (3.4)'de yer alan tüm sistem çıkışları olacak şekilde aşağıda gösterilmiştir. Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'de görüleceği gibi topun x eksenindeki konumu ve topun y eksenindeki konumu verilen referans işaretleri takip etmiştir. Ancak Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de görülen sonuçlarla kıyaslandıklarında verilen referansları daha yavaş takip ettikleri söylenebilir. Kalman Filtresi'nin tahmin etme yapısı bulundurması bu duruma sebebiyet vermektedir. LQR kullanılan yapıda kontrolcü sistemin öz değerlerini doğrudan istenilen noktaya atamaya çalışırken, bu yapıda filtrenin dinamikleri de kontrol işaretine etki etmektedir.

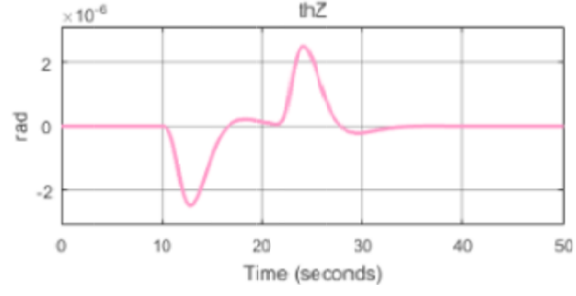
Şekil 3.36 ve Şekil 3.37'de gösterilen topun x ve y eksenlerindeki hızları da konuma bağlı olarak LQR uygulanan duruma göre daha yavaş değişmiştir. Topun referans işaretleri LQR kullanılan yapıya bağlı olarak daha yavaş takip etmesi Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da görülen gövdenin x,y ve z eksenlerindeki eylemsizlikten doğan hareketlerinin genliğinin daha az olmasına ve daha uzun sürelerde değişmesine sebebiyet vermiştir. Buna bağlı olarak Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'de gösterilen gövdenin x,y ve z eksenlerindeki hızlarının da daha az genlikte olmasına ve daha uzun sürelerde değişmesine neden olmuştur.



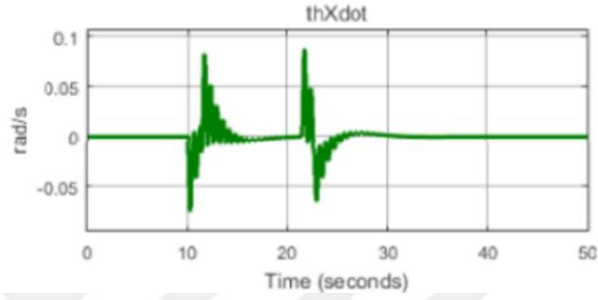
Şekil 3.28 : Gövdenin X eksenindeki konumunun Şekil 3.8'de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



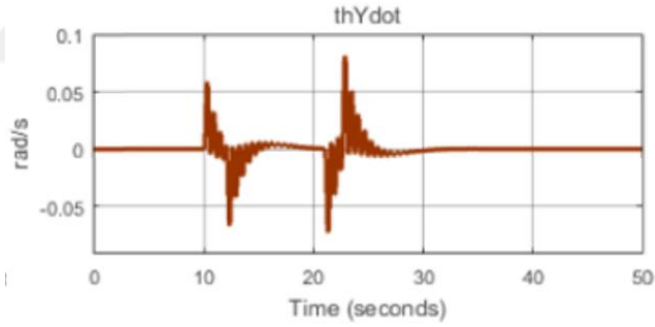
Şekil 3.29 : Gövdenin Y eksenindeki konumunun Şekil 3.10'da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



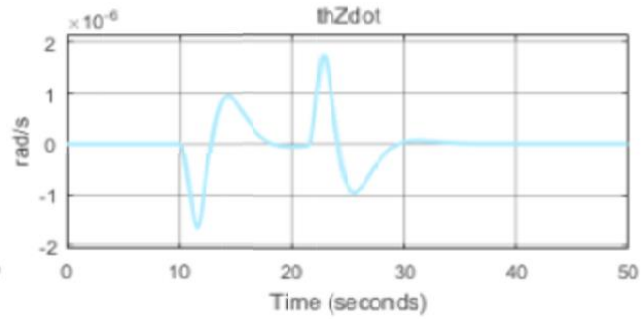
Şekil 3.30 : Gövdenin Z eksenindeki konumunun Şekil 3.12’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



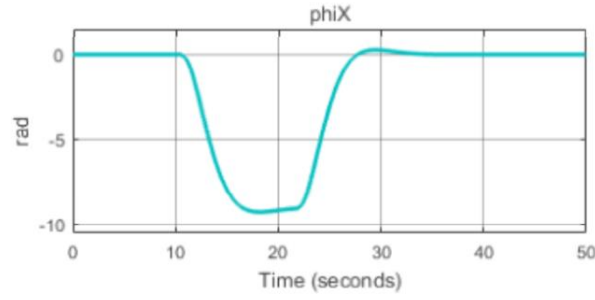
Şekil 3.31 : Gövdenin X eksenindeki hızının Şekil 3.9’da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



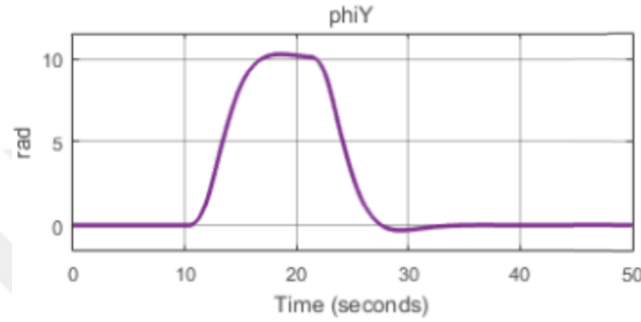
Şekil 3.32 : Gövdenin Y eksenindeki hızının Şekil 3.11’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



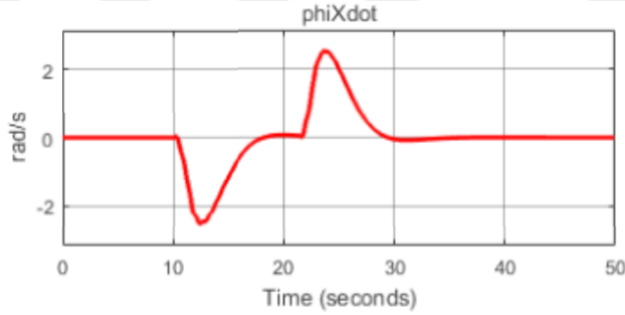
Şekil 3.33 : Gövdenin Z eksenindeki hızının Şekil 3.13’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



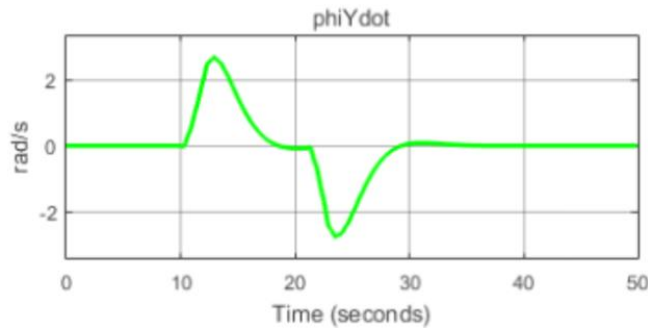
Şekil 3.34 : Topun X eksenindeki konumunun Şekil 3.14’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



Şekil 3.35 : Topun Y eksenindeki konumunun Şekil 3.16’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.



Şekil 3.36 : Topun X eksenindeki hızının Şekil 3.15’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.

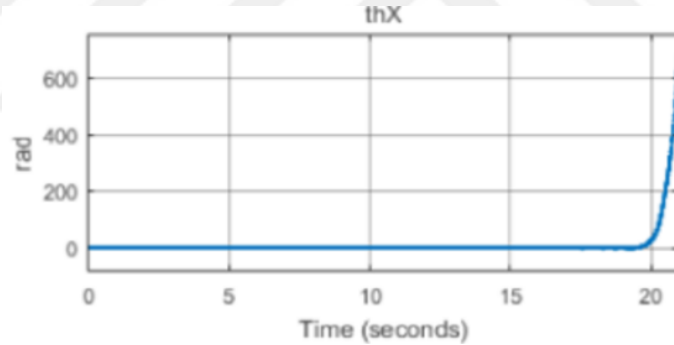


Şekil 3.37 : Topun Y eksenindeki hızının Şekil 3.17’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulanmadığı durumdaki yanıtı.

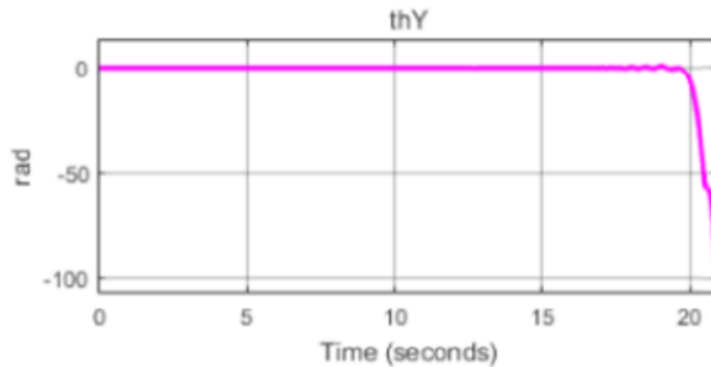
Gürültü ve bozucu etkiler altında LQR yapısının kullanıldığı durumda benzetim sonuçları denklem (3.4)'de yer alan tüm sistem çıkışları olacak şekilde aşağıda gösterilmiştir. LQR kontrolcünün ve sistemin çıkışlarına olmak üzere iki farklı noktadan 0.01 radyan genlikli yüksek frekanslı bozucu işaretler uygulanmıştır.

Şekil 3.44 ve Şekil 3.45'de görüleceği üzere top x ve y eksenlerinde referans işareti takip edememiş ve benzetimin 20. saniyesi itibariyle sonsuza yakınsamıştır. Buna bağlı olarak topun x ve y eksenindeki hızları da Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de görüleceği üzere aynı zaman diliminde sonsuza yakınsamıştır. Şekil 3.38, Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'da görüleceği üzere gövdenin x,y ve z eksenlerindeki konumları topun hareketinden doğan eylemsizliğe göre değişmiştir. Şekil 3.41, Şekil 3.42 ve Şekil 3.43'de görülen gövdenin x, y ve z eksenlerindeki hızlarında belirli bir süreden sonra sonsuza yakınsamıştır.

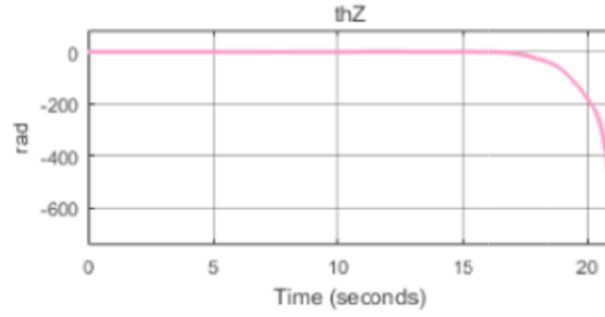
LQR kontrolcü yapısına eklenen bozucular neticesinde, bozucular bastırılmamış ve sistem kararsız bölgeye geçmiştir. Bu durumun fiziksel karşılığı olarak robot bu bozucular etki ederken dengede duramamıştır.



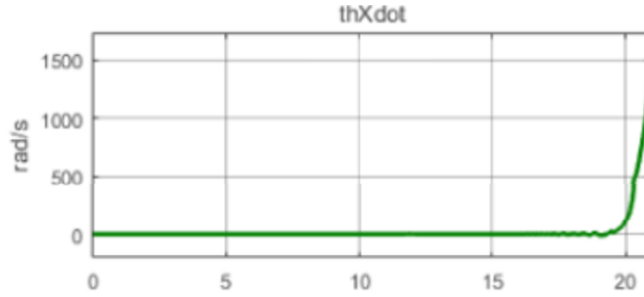
Şekil 3.38 : Gövdenin X eksenindeki konumunun Şekil 3.8'de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



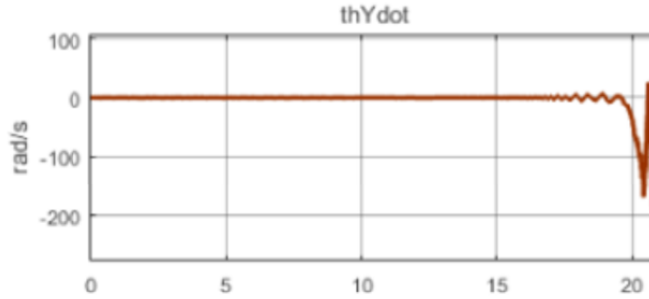
Şekil 3.39 : Gövdenin Y eksenindeki konumunun Şekil 3.10'da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



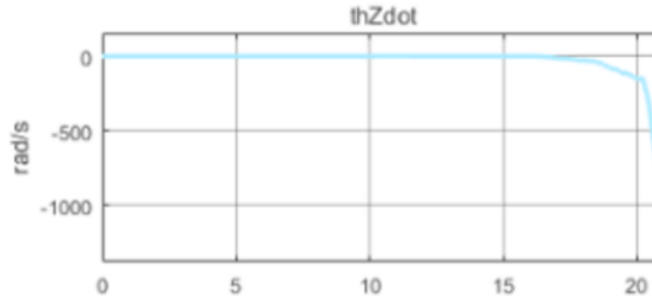
Şekil 3.40 : Gövdenin Z eksenindeki konumunun Şekil 3.12’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



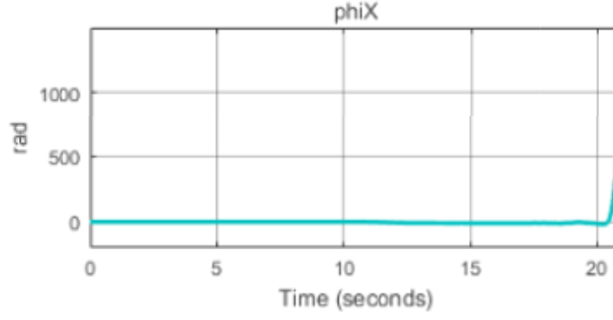
Şekil 3.41 : Gövdenin X eksenindeki hızının Şekil 3.9’da verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



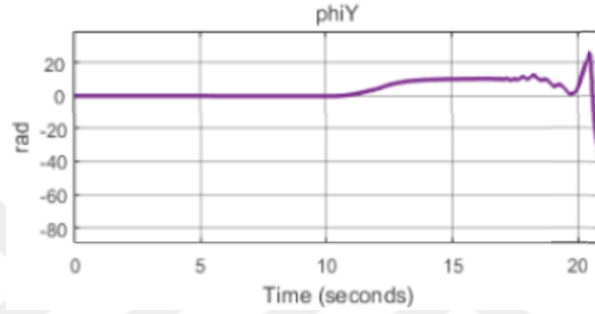
Şekil 3.42 : Gövdenin Y eksenindeki hızının Şekil 3.11’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



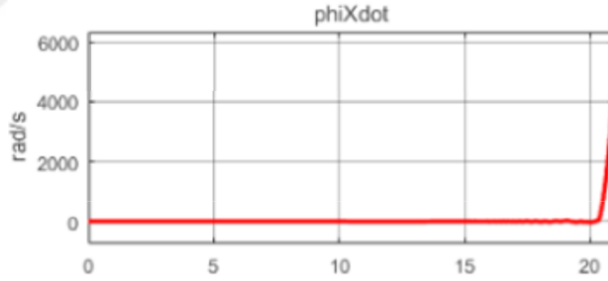
Şekil 3.43 : Gövdenin Z eksenindeki hızının Şekil 3.13’de verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



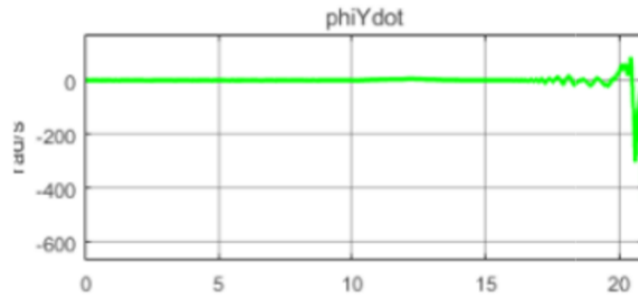
Şekil 3.44 : Topun X eksenindeki konumunun Şekil 3.14’de verilen referans işarete, LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



Şekil 3.45 : Topun Y eksenindeki konumunun Şekil 3.16’da verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



Şekil 3.46 : Topun X eksenindeki hızının Şekil 3.15’de verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.

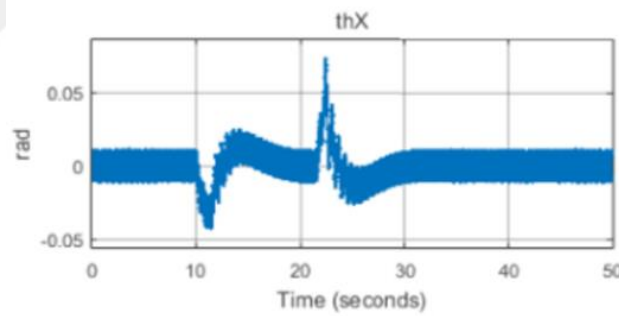


Şekil 3.47 : Topun Y eksenindeki hızının Şekil 3.17’de verilen referans işarete LQR kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.

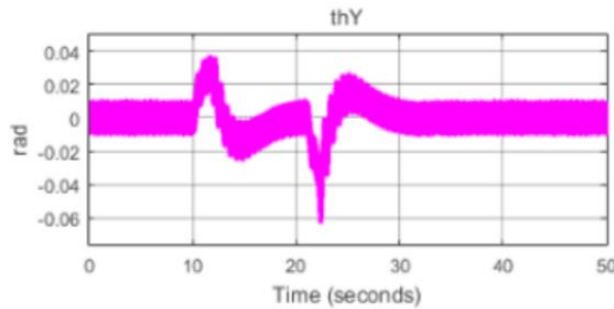
Gürültü ve bozucu etkiler altında LQG yapısının kullanıldığı durumda benzetim sonuçları denklem (3.4)'de yer alan tüm sistem çıkışları olacak şekilde aşağıda gösterilmiştir. Şekil 3.54 ve Şekil 3.55'de görüleceği üzere topun x ve y eksenlerinde verilen konum referansı işaretlerini takip ettiği ve verilen referansı takip ederken gürültülerden bir miktar etkilendiği görülmektedir.

Şekil 3.56 ve Şekil 3.57'de ise topun x ve y eksenlerindeki konumuna bağlı olarak hızlarının değiştiği gözlenmektedir. Şekil 3.48, Şekil 3.49 ve Şekil 3.50'de gövdenin x, y ve z eksenlerindeki konumunun topun hareketine bağlı olarak değiştiği ve sisteme uygulanan gürültülerin konumlar üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.51, Şekil 3.52 ve Şekil 3.53'de ise gövdenin x, y ve z eksenlerindeki hızlarının, konumlara bağlı olarak değiştiği ve gürültüden etkilendikleri görülmektedir.

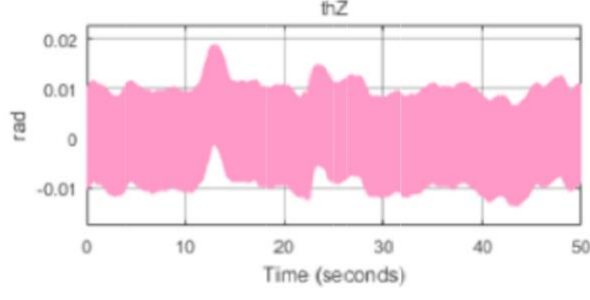
LQG kontrolör, yapısında var olan Kalman Filtresi'nin her kontrol döngüsünde çıkışları tahmin etmesi sayesinde bozucu etkileri LQR yapısına göre daha iyi bastırmış ve robota uygulanan referans işaretlerin takip edilmesini sağlamıştır. Sonuç olarak LQC yapısının gürültüleri bastırabildiği ve titreşimlerle de olsa robotu küre üzerinde dengede tutabildiği görülmektedir.



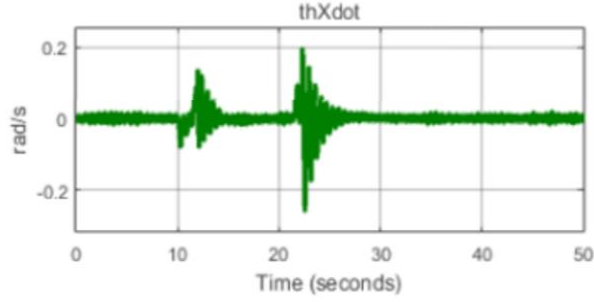
Şekil 3.48 : Gövdenin X eksenindeki konumunun Şekil 3.8'de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



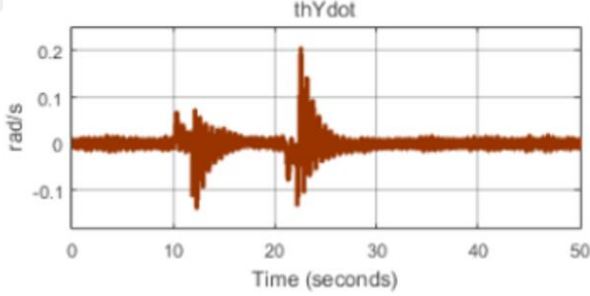
Şekil 3.49 : Gövdenin Y eksenindeki konumunun Şekil 3.10'da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



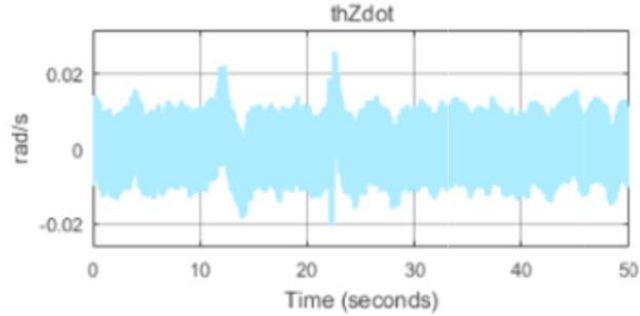
Şekil 3.50 : Gövdenin Z eksenindeki konumunun Şekil 3.12’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



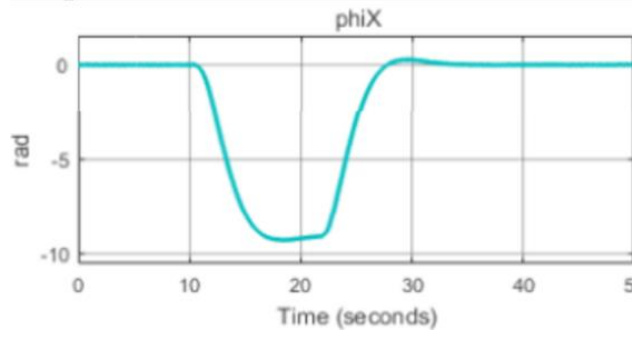
Şekil 3.51 : Gövdenin X eksenindeki hızının Şekil 3.9’da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



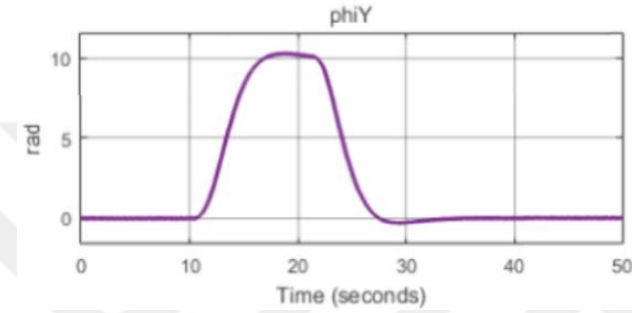
Şekil 3.52 : Gövdenin Y eksenindeki hızının Şekil 3.11’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



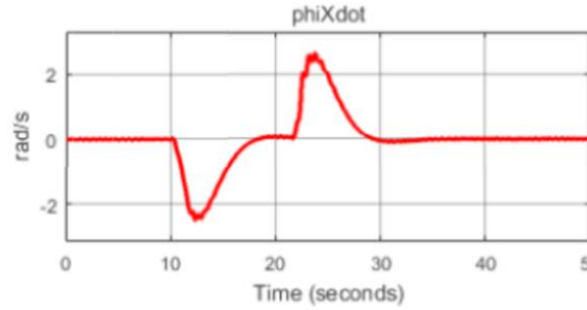
Şekil 3.53 : Gövdenin Z eksenindeki hızının Şekil 3.13’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



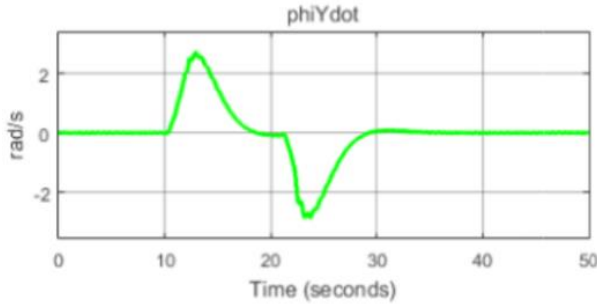
Şekil 3.54 : Topun X eksenindeki konumunun Şekil 3.14’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



Şekil 3.55 : Topun Y eksenindeki konumunun Şekil 3.16’da verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



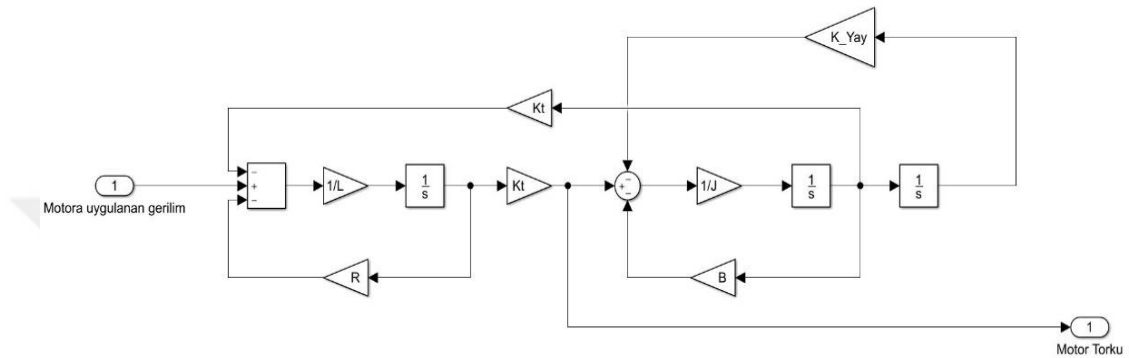
Şekil 3.56 : Topun X eksenindeki hızının Şekil 3.15’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.



Şekil 3.57 : Topun Y eksenindeki hızının Şekil 3.17’de verilen referans işarete, LQG kontrolcü kullanıldığı ve sisteme gürültü uygulandığı durumdaki yanıtı.

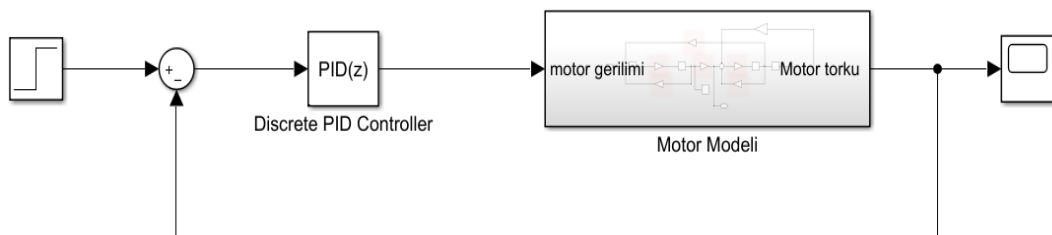
2.3 Motor Tork Kontrolcüsünün Geliştirilmesi

Motor sürücü kart içerisinde koşacak olan tork kontrolörü Matlab Simulink ortamında geliştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle Şekil 3.13'te gösterilen motor modeli oluşturulmuştur. Bu motor modelinde yay pozisyonla etkisi artan bir yük olarak modellenmiştir. Geliştirilen modelde Çizelge 2.1'de yer alan motor parametreleri kullanılmıştır.



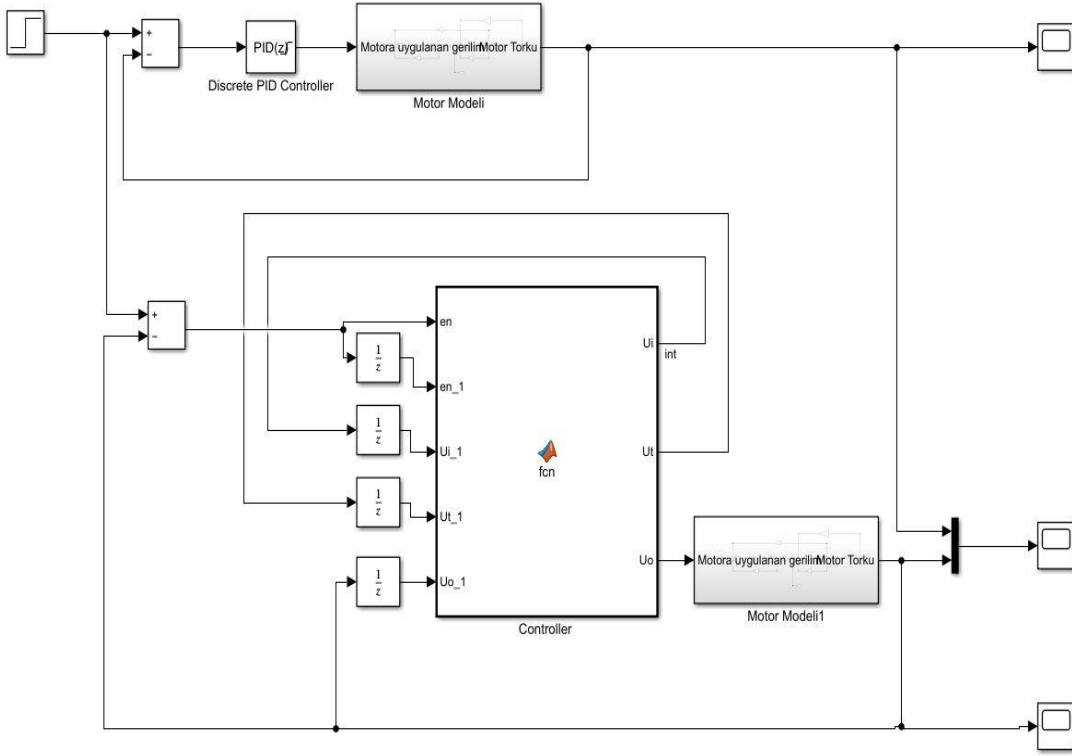
Şekil 3.58 : Fırçalı doğru akım motorunun benzetim ortamındaki modeli.

Motor modelinin geliştirilmesinin ardından Simulink kütüphanesinde yer alan discrete PID bloğu ile sistem Şekil 3.14'teki gibi kapalı çevrime alınmıştır ve blok içerisinde yer alan tune fonksiyonu sayesinde PI katsayıları bulunmuştur. Yine kullanılan PID bloğunun bir özelliği olarak integral sarmasını engellemek adına clamping[29] metodu seçilmiştir.



Şekil 3.59 : Motor modelinin Simulink kütüphanesinde bulunan discrete PID bloğu ile kapalı çevrimine ilişkin model.

PI kontrolcüye ilişkin katsayıların bulunmasının ardından Simulink ortamında satır satır kodlanarak kullanılmaya imkan tanıyan Matlab fonksiyonu bloğu kullanılarak, motor sürücüde koşacak PI kontrolcüye ilişkin C kodu geliştirilmiştir ve Simulink kütüphanesinde bulunan ayrık zamanlı PI kontrolcü bloğu ile aynı referans işaret ve model ile birlikte benzetimi yapılmıştır. Bu sayede geliştirilen kodun işlevselliği doğrulanmıştır. Geliştirilen model Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.60 : Simulink PID bloğu ile tez kapsamında C kodu ile geliştirilen kontrolcülerin birarada çalıştığı model.

Matlab function bloğu içerisinde geliştirilen C kodu Şekil 3.16’da gösterilmiştir. Her 1ms de çalışan bu kontrolcü kodu başlangıçta referans tork değeri ile motorun uyguladığı tork değerinin farkını alarak hata sinyalini oluşturur. Bu hata sinyali oransal katsayı ile çarpılarak kontrolcünün oransal kısmının kontrol işareti oluşturulmuş olur. Anlık hesaplanan hata işareti ve bir önceki döngü hata işaretinin integrali alınır ve integrator katsayısı ile çarpılır böylece kontrolcünün integrator kısmına ilişkin kontrol işaretide üretilmiş olur. İntegral terimi kullnıldığı için kontrolcüde integral sarması durumu söz konusudur. Bunu engellemek için clamping metodu kullanılır. Bu metodda integrator kısmının oluşturduğu kontrol işareti ve bir önceki döngü değerleri ile anlık toplam kontrol işareti göz önünde bulundurularak kontrolcünün integral sarması durumuna girmesi engellenir. Oransal ve integrator kısımlarında oluşturulan sinyallerin toplanmasıyla PI kontrolcünün kontrol sinyali elde edilir. Bu işaretin fiziksel karşılığı motorun terminallerine uygulanacak gerilimdir. Dolayısıyla bu sinyalin taşıdığı gerilim değeri test setinde kullanılan güç kaynağının verebileceği maksimum gerilim ile limitlidir. Bu sebepten ötürü kontrol algoritmasının içinde bu işaret güç kaynağının limitasyonlarına uygun olarak limitlenir. Motor Sürücü besleme voltajını pozitif yada negatif uygulayabildiği için minimum limit, maksimum limitin toplamaya göre tersine eşittir.

Kontrolcü bloğunun dış kısmında ise bir sonraki döngüde kullanılacak olan değişkenlerin ataması yapılır. Bu terimler kontrolcünün integrator kısmında ve integral sarmasına engel olan kısmında kullanılmaktadır.

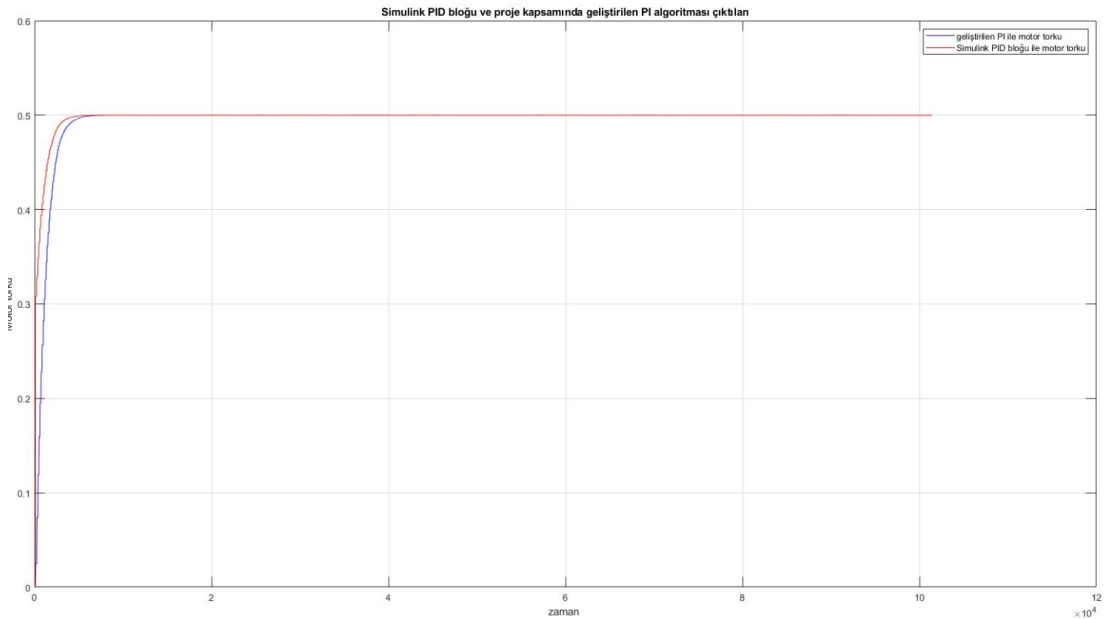
```

1 function [Ui, Ut, Uo]= fcn(en, en_1, Ui_1, Ut_1, Uo_1, Kp, Ki, MAX_LIMIT, MIN_LIMIT, Ts)
2     %#codegen
3
4     %%P Controller
5     Up = en * Kp;
6
7
8     %%I Controller
9     Ui = (Ki*Ts/2)*(en + en_1) + Ui_1;
10
11
12     %%Anti windup
13     if Uo_1 ~= Ut_1
14         if ((en >= 0) && (Ut_1 >= 0)) || ((en < 0) && (Ut_1 < 0))
15             en = 0;
16             Ui = Ui_1;
17         end
18     end
19
20     %Sum of Proportional and integrator controller signals
21     Ut = Up + Ui;
22
23     Uo = Ut;
24
25     if Ut > MAX_LIMIT
26         Uo = MAX_LIMIT;
27     end
28     if Ut < MIN_LIMIT
29         Uo = MIN_LIMIT;
30     end
31
32
33 end

```

Şekil 3.61 : Motor sürücünde koşacak, C kodu ile geliştirilen PI kontrolcü.

Matlab function bloğu ve Simulink kütüphanesinin PI kontrolcüsü kullanılarak yapılan tork kontrol uygulamasına ilişkin sonuçlar Şekil 3.17’da gösterilmiştir.



Şekil 3.62 : C kodu ile geliştirilen ve Simulink kütüphanesinde bulunan PI kontrolcülerin etkidiği aynı sisteme ait çıkışları.

Şekil 3.17’de görülebileceği üzere geliştirilen PI kontrolcü ile kontrol edilen motor torku ile Simulink kütüphanesinin PI bloğu kullanılarak kontrol edilen motor torku arasında ihmal edilebilir bir fark bulunmaktadır. Dolayısı ile C kodu ile geliştirilmiş PI kontrolör algoritması motor sürücü karta doğrudan entegre edilebilirdir.

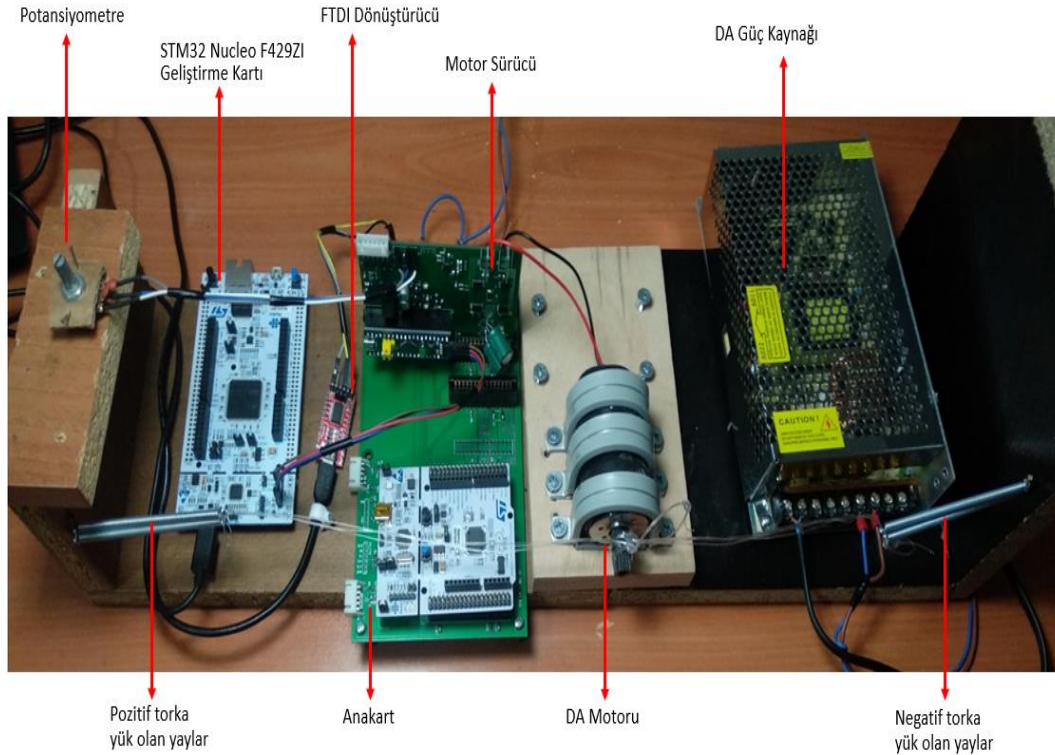


4. DOĞRULAMA ÇALIŞMASI

4.1 Test Düzeneği

Tez çalışması kapsamında yapılan dizayn faaliyetlerinin gerçekleştirilebilir olduğunu gösterebilmek amacıyla bir doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada; motor sürücü karta bir potansiyometreden okunan değer, tork referansı olacak şekilde verilmiştir. Bu şekilde H köprü Mosfetlerin sürülebildiğini ve neticesinde motorun tork referans işaretini izleyebildiği gösterilmiştir.

Motor sürücü kart ile tork kontrolü yapılmasının ardından ise Matlab Simulink ortamında geliştirilen robotun dengede durmasını sağlayacak kontrolcünün çıkışı olan motor tork referans değeri kaydedilmiş ve anakart üzerinde koşan koda gömülmüştür. Bu sayede robotun dengede durmasını sağlayacak tork işaretleri birebir olarak sürücüye gönderilmiş hem anakart ile sürücü arasındaki haberleşme hem de robot gövdesinin kontrolüne yönelik motor tork kontrol uygulamaları test edilmiştir. Oluşturulan test düzeneği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Oluşturulan test düzeneği.

Motora uygulanacak tork referanslarının takip edildiğini gösterebilmek maksadıyla rotora bağlanan iki ip, pozitif ve negatif torklara yük olabilecek şekilde konumlandırılan yaylara bağlanmış ve yayların diğer uçları ise sabitlenmiştir. Çalışma kapsamında hedeflenen sonuç anakarttan gönderilen tork işaretlerinin motor tarafından uygulandığını gözlemlemektir. Motorun uyguladığı tork değeri sürücü kart üzerinde bulunan hassas direnç üzerinden akım okunması ve okunan akımın motor tork sabiti ile çarpılması sonucu elde edilmiştir.

Yapılan doğrulama çalışmalarında; mekanik tasarımın motorlar dışında hareketli parça bulundurmaması, gövde parçalarının çok yüksek üretim hassasiyetleri gerektirmemesi ve tasarım ortamında mekanik montajının yapılarak parçaların uyumlu olduğunun görülmesi sebebiyle gövde parçalarının üretimine gerek görülmemiştir.

Anakart ve IMU arasındaki haberleşmenin seçilen mikrodenetleyicinin ve IMU'nun halihazırda desteklediği bir arayüz olması ve iki ürününde ticari ürün olması sebebiyle anakart ve IMU arasındaki haberleşmeyi gerçeklemek öncelikli görülmemiştir.

Anakartın, motor sürücüyü her örnekleme zamanında haberleşme ile gönderdiği, motorların uygulaması gereken torku, uygulayıp uygulayamadığını gözlemleme ihtiyacı hissedilmiştir. Çünkü anakart ve motor sürücü üzerinde yer alan elektronik ve güç devreleri donanımlarının çalıştığını, anakart ve motor sürücüdeki zamanlayıcı birimlerinin uygun şekilde kullanıldığını ve motor sürücüde koştan ve benzetim ortamında yer almayan kontrolcünün mikrodenetleyici ile çalıştığını göstermek hem anakart firmware geliştirme kısmının hemde motor sürücüden beklenen tüm çalışmaların mümkün olduğunu gösterecektir.

Tez çalışması kapsamında tasarlanan motor sürücü karttan ve anakarttan birer adet üretilmiş ve doğrulama çalışmasında kullanılmıştır. Test düzeneğinde kullanılan anakart, motor sürücü ve motor bileşenleri robot üzerindeki konfigürasyonda kullanılmıştır. Bunlara ek olarak kullanılan bileşenler ise test düzeneğindeki yardımcı elemanlar olarak yer almaktadır.

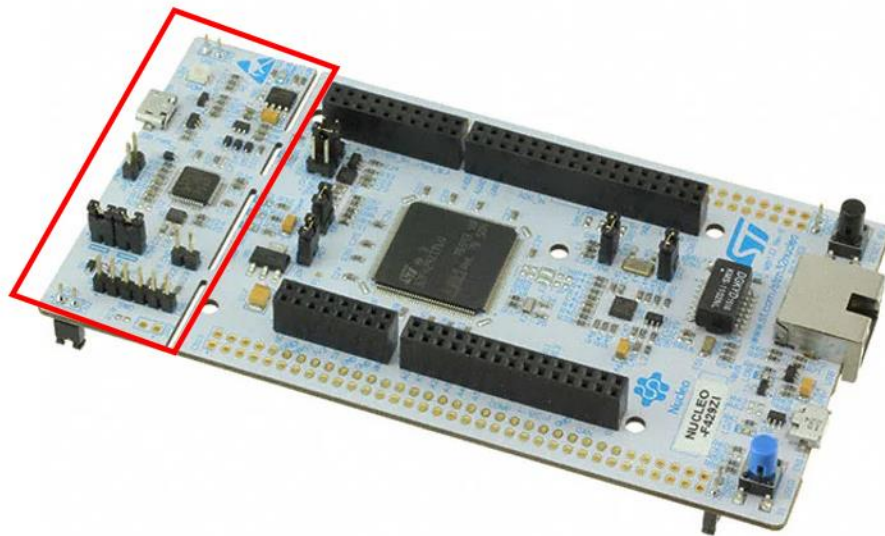
Motor sürücü şönt direnç üzerinden okunan akım değerini yazılımda motorun tork katsayısı ile çarparak, motorun uyguladığı tork değerini hesaplamakta ardından UART haberleşmesi ile FTDI dönüştürüye göndermektedir. Hesaplanan motor tork değeri UART arayüzünden dönüşüm yapan Şekil 4.2'de gösterilen FTDI[27] dönüştürücü modülü ile bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Bilgisayar ortamına gelen veriler

bilgisayarlar için kullanılan bir terminal programı olan Tera Term vasıtasıyla okunmakta ve kayıt edilmektedir.



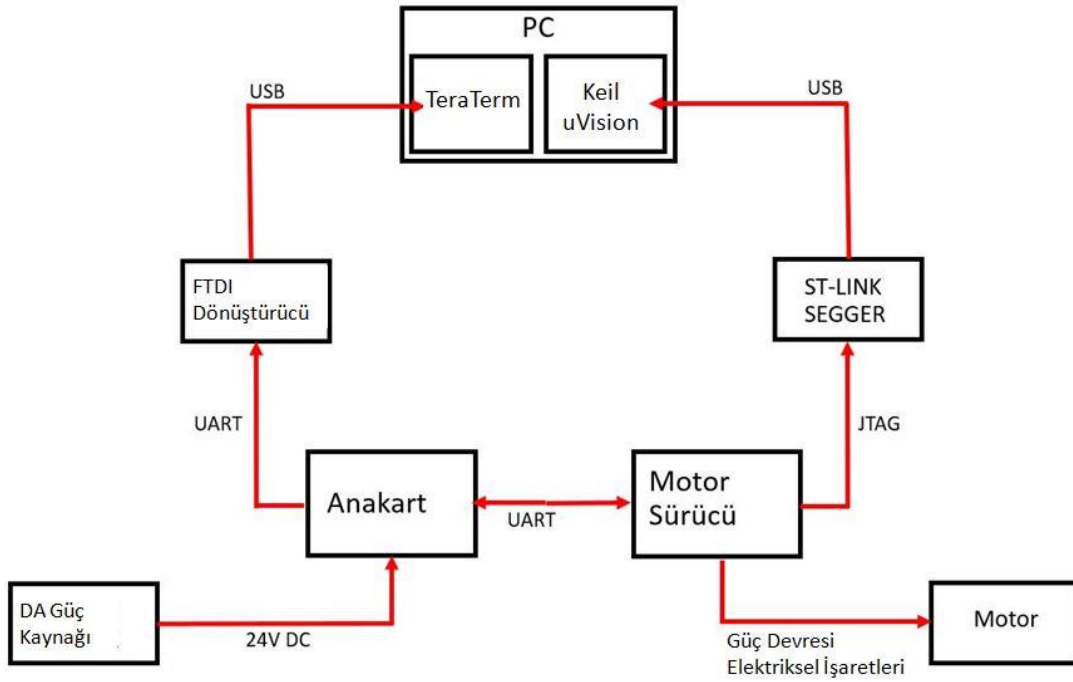
Şekil 4.2 : UART arayüzünden USB arayüzüne dönüşüm sağlayan FTDI dönüştürücü.

Motor sürücü kartta kullanılan STM32F103 mikrodeneleyici barındıran Nucleo 32 geliştirme kartında mikrodeneleyiciyi programlamak yada debug modda çalıştırmak için bir donanım bulunmamaktadır. ST firmasına ait geliştirme kartlarının bazılarında bulunan ST-LINK[28] donanımı, firmanın geliştirdiği başka bir mikrodeneleyici JTAG[30] pinleri üzerinden programlayabilmektedir. Motor sürücü üzerinde yer alan STM32F103 Nucleo 32 kartında JTAG pinleri bağlantıya hazır şekilde mevcuttur. Bu sebeple tez çalışmasına başlamadan önce mevcut olan Şekil 4.3’de gösterilen STM32F429 Nucleo 144 geliştirme kartının üzerindeki ST-LINK donanımı bilgisayarın USB portu ile motor sürücü üzerindeki STM32F103 Nucleo 32 geliştirme kartının JTAG pinleri arasında çift yönlü dönüştürücü maksadıyla kullanılmıştır.



Şekil 4.3 : STM32F429 Nucleo 144 geliştirme kartının ve üzerindeki ST-LINK donanımı.

Bu donanım sayesinde geliştirilen kodlar mikrodenetleyiciye yüklenmiş ve çalışma esnasında gerçek zamanlı olarak mikrodenetleyicinin yazmaçları Keil uVision [31] programındaki debug sekmesinden takip edilmiştir. Bu donanım dışında STM32F429 Nucleo 144 geliştirme kartı üzerindeki herhangi bir kısım kullanılmamıştır. Test düzeneğinin çalışmasına ilişkin şema Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Burada test düzeneğinde yer alan elemanlar ve arayüzleri belirtilmiştir.



Şekil 4.4 : Test düzeneğinin çalışmasına ilişkin, ekipman arayüzlerini de içeren şema.

Anakartta koşacak olan kod Keil uVision programı kullanılarak geliştirilmiştir. Bu amaçla bir adet zamanlayıcı ve bir adet UART birimi gerekli şekilde ayarlanarak kurulmuştur. Zamanlayıcı kesme rutini oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Bu kesme rutini içerisinde benzetim ortamında üretilen ve anakart yazılımı içine gömülen motor tork referans işaretinin ilgili değeri motor sürücü karta gönderilmiştir. UART birimi motor sürücü kart ile haberleşmede kullanılmıştır.

Motor sürücü kartta koşacak olan kod da anakartta olduğu gibi Keil uVision programı kullanılarak geliştirilmiştir. Bu amaçla iki adet zamanlayıcı, bir adet DMA[13], iki adet UART, iki adet ADC[13] birimi gerekli şekilde ayarlanarak kurulmuştur. Zamanlayıcılardan birincisi haberleşme ile gelen verileri anlamlandırmak, kontrolcü kodunu koşturmak, şönt direnç üzerindeki gerilim düşümünü okuyan birinci ADC modülünü ve potansiyometre üzerindeki gerilim düşümünü okuyan ikinci ADC modülünü tetiklemek için kullanılmıştır. İkinci zamanlayıcı ise mosfetleri sürmek için

kullanılacak PWM sinyali oluşturmak için kullanılmıştır. DMA birimi UART haberleşmesi ile anakarttan gelen verileri bir bellek alanına doğrudan kaydetmek üzere kullanılmıştır. Birinci UART birimi anakart ile haberleşme maksadıyla, ikinci UART birimi ise FTDI dönüştürücü üzerinden bilgisayar ortamına veri göndermek amacıyla kullanılmıştır. Birinci ADC birimi motorun çektiği akımı hesaplayabilmek adına şönt direnç üzerinde oluşan gerilimi okumak, ikinci ADC birimi ise tork referansı oluşturmak üzere kullanılan potansiyometre üzerindeki gerilim düşümünü okumak maksadıyla kullanılmıştır.

Anakarttan motor sürücü karta gelen mesaj DMA dış birimi kullanılarak bir bellek alanına yazılmış, ardından formata uygunluğu kontrol edilmiştir. Formata uygun olmayan mesaj paketleri yok sayılmıştır. Formata uygun olan mesaj paketleri ise bir zamanlayıcı kesmesi rutininde anlamlı parçalara ayrılmıştır. Bu işlem sonrasında motor dönüş yönü bilgisi ve tork referans işaret değeri elde edilmiştir. Yine aynı zamanlayıcı kesmesi rutinin içerisinde tork kontrolü için gerekli hesaplamalar yapılarak PWM sinyallerini kontrol eden başka bir zamanlayıcının ilgili yazmaçları güncellenmiştir. Bu sayede motor sürücü üzerinde bulunan H köprü Mosfetleri kontrol eden entegre devreye referans işaret gönderilmiş ve onun aracılığı ile mosfetler sürülerek motorun istenilen davranışı yapması sağlanmıştır.

Potansiyometre üzerindeki gerilim düşümü 12 bitlik bir ADC ile algılanmaktadır. ADC 12 bit olduğu için potansiyometreden okunan sinyal 0 ile 4095 değerleri arasında değişmektedir. Potansiyometreden okunan bu aralıktaki değer, 0 Nm ile 0,05 Nm değerleri arasında tork referansı oluşturacak şekilde doğrusal olarak ilişkilendirilmiştir. Her bir döngüde potansiyometreden 13 adet okuma yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak, analog sinyal filtrelenmiştir.

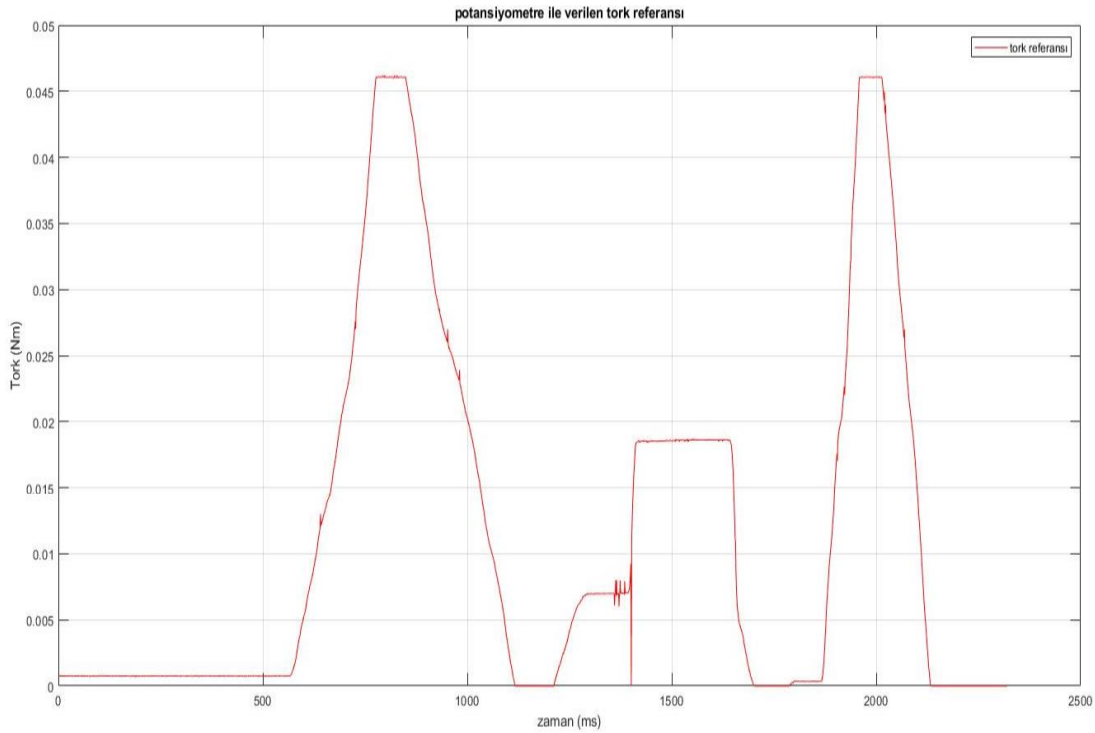
Motorun uyguladığı tork değerini sisteme geribeslemek için şönt direnç üzerindeki gerilim düşümü ölçülmektedir. Bu sayede motorun çektiği akım ölçülmüş olur. Bu işlem şu şekilde yapılmaktadır, şönt direnç üzerinde oluşan gerilim, mosfetlerin sürülmesini sağlayan entegre devre tarafından kuvvetlendirilir. Kuvvetlendirilmiş analog sinyal motor sürücü kart üzerinde yer alan STM32F103 mikrokontrolörünün ADC kısmında okunur ve motorun çektiği akım birimi mA olacak şekilde anlamlandırılır. Akım değeri hesaplandıktan sonra motorun tork katsayısı olan 29,3mNm/A ile çarpılarak motorun uyguladığı tork hesaplanır ve birimi Nm olacak şekilde dönüşüm yapılır. Hesaplanan bu değer kontrolcünün her bir döngüsünde

geribesleme işareti olarak kullanılır ve tork referansı ile birlikte bilgisayar ortamına aktarılır.

Bu çalışma esnasında sürücü kart üzerinde yer alan STM32F103 mikrodnetleyicinin ilgili pinleri üzerinden alınan bilgi STM firmasının entegre çözümü olan ve mikrodnetleyici ile kart üzerindeki haberleşmeyi sağlayan ST-LINK üzerinden bilgisayarın USB portuna ulaştırılır ve Keil uVision programında bulunan debug seçeneği ile gerçek zamanlı olarak takip edilir.

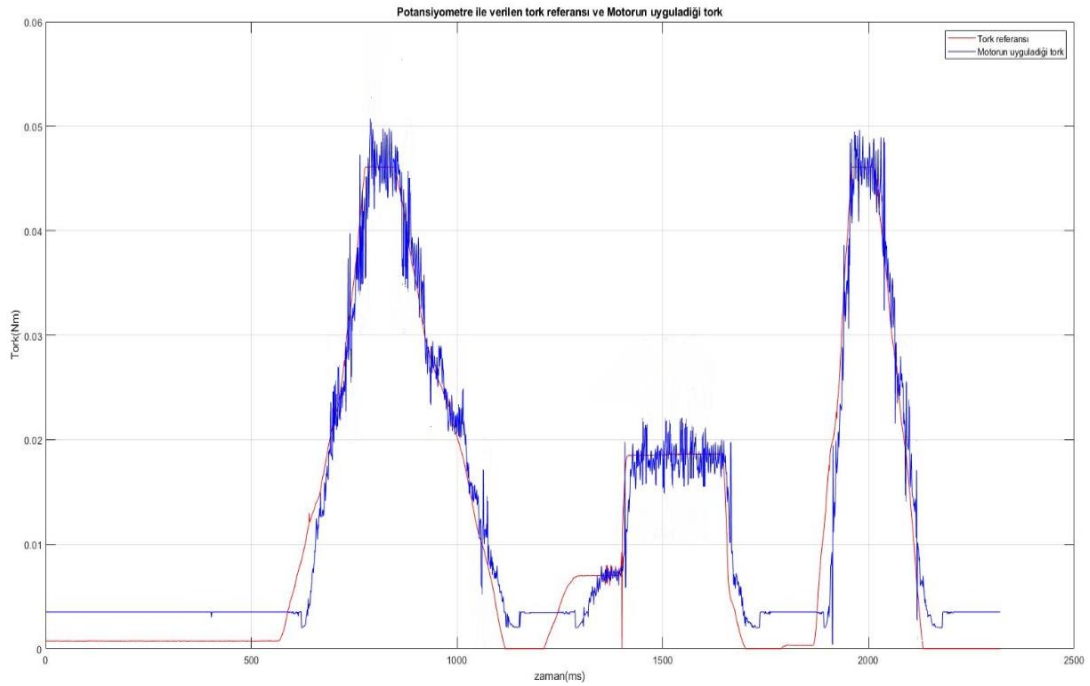
4.2 Doğrulama Testleri ve Sonuçları

Doğrulama çalışmaları sırasında potansiyometre tork referansı vermek üzere insan makina arayüzü olarak kullanılmıştır. Potansiyometre doğrudan motor sürücü kart üzerinde yer alan terminale bağlanmış ve motor sürücü kart üzerinde yer alan STM32F103 mikrodnetleyicisinin ADC birimi sayesinde üzerindeki gerilim düşümü ölçülmüştür. ADC ile edinilen bilgi, potansiyometredeki değişken direnç üzerindeki gerilim %0 iken 0 Nm ile potansiyometredeki değişken direnç üzerindeki gerilim %100 iken 0.05 Nm olacak şekilde haritalanmış ve her döngüde kontrolcüye tork referansı olarak verilmiştir. Yapılan test sırasında sisteme potansiyometre ile verilen tork referansı Şekil 4.5'te yer almaktadır.



Şekil 4.5 : Test düzeneğinde yer alan potansiyometre ile üretilen tork referansı.

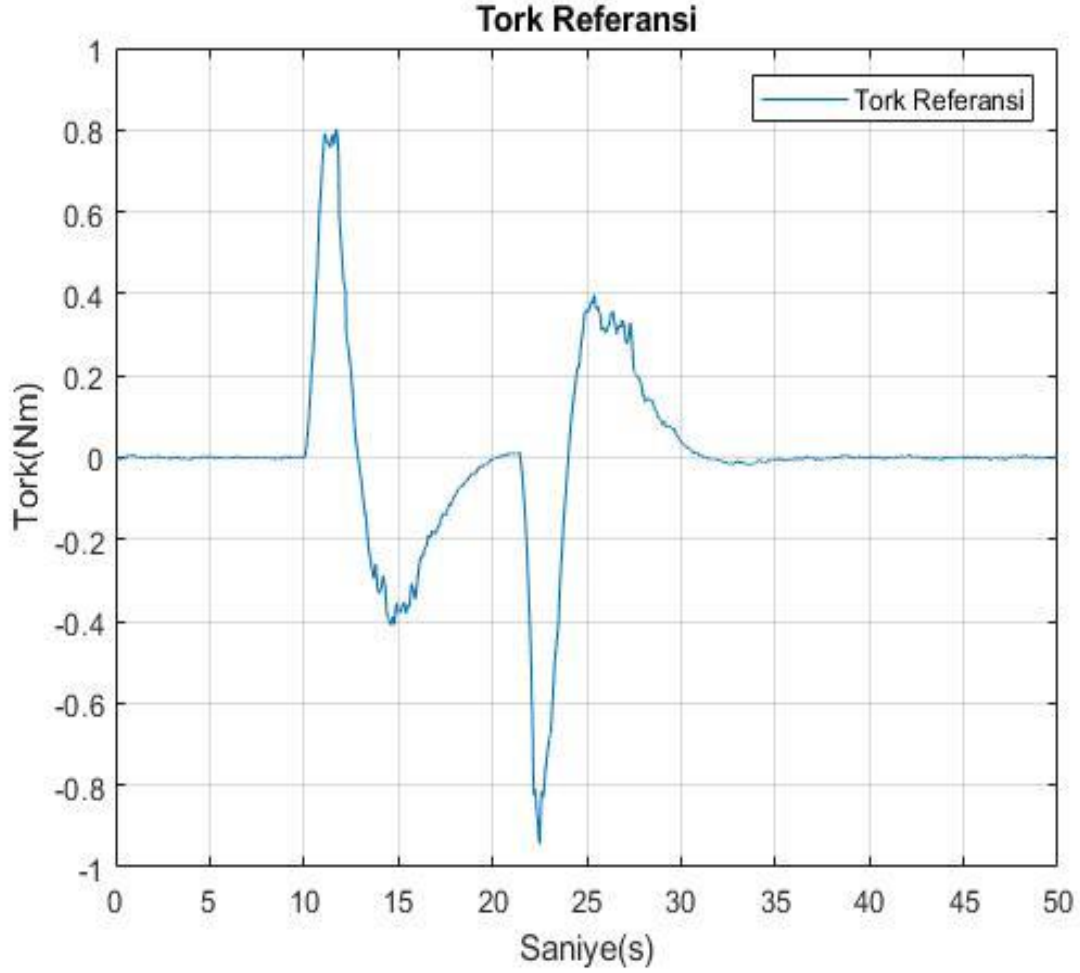
Verilen referans etkisi altında motor akımı üzerinden hesaplanan motor torku ile referans sinyali Şekil 4.6’da görülmektedir. Şekil 4.6’ya bakıldığında motor torkunun verilen referansı takip ettiği görülmektedir. Basamak ve rampa şeklindeki sistem girişlerine olan tepkisi oldukça hızlı gerçekleşmiştir. Kullanılan yayların ve motorun montaj toleransları sistem yanıtında görülen lokal salınımlarda etkili olmuştur. Bu bozucu etkiler olsa bile motor torkunun istenen profili başarılı bir şekilde takip ettiği görülmüştür.



Şekil 4.6 : Potansiyometre ile üretilen tork referansı ve motorun uyguladığı tork.

Robotun dengede durmasını sağlamak üzere tasarlanan kontrolcüye benzetim ortamında Şekil 3.8,9,10,11,12,13,14,15,16,17’deki referans işaretler uygulanmış ve benzetim yapılmıştır. Bu esnada kontrolcünün çıkışları olan 3 adet motor tork referansı işaretinden x eksenı yönünde tahrik uygulayan motora ilişkin kontrolcü çıkışı benzetim boyunca kayıt edilmiş ve Şekil 4.7’de gösterilen bu işarete ilişkin kayıtlar benzetim ortamının dışına aktarılmıştır.

Zamana bağlı olarak kayıt edilen motor tork referansı işareti, bir dizi oluşturacak şekilde anakart firmware yazılımına gömülmüş ve her bir döngüde ilgili tork referans işaretinin kullanılması sağlanmıştır. Böylece test düzeneğinde yer almayan IMU ve robot gövdesi gibi bileşenlerin etkileri benzetim ortamından test düzeneğine aktarılmıştır.

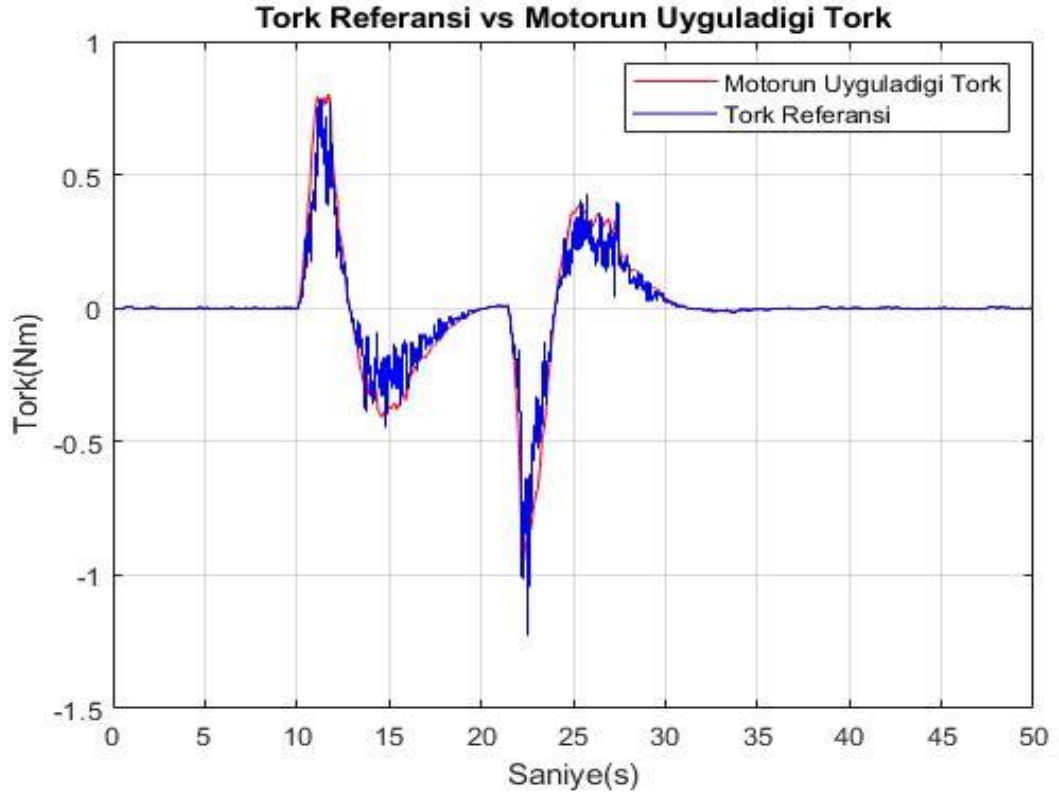


Şekil 4.7 : Benzetim ortamında üretilen robotun x ekseninde bir noktaya gitmesi, beklemesi ve geri dönmesine ilişkin tork referansı.

Şekil 3.8,9,10,11,12,13,14,15,16,17’de uygulanan bu işaretlerin anlamı robotun X ekseninde ileri yönde doğrusal hareket etmesi, gittiği konumda bir süre bekleyip sonra tekrar başlangıç konumuna gelmesi ve başlangıç konumunda beklemeye devam etmesidir. Referans sinyale bakıldığında önce robotun istenilen konuma gitmesi için motorun pozitif yönlü bir tork, akabinde istenilen konuma ulaştığında robotu durdurmak ve denge pozisyonuna getirmek için nispeten daha küçük genlikli negatif yönlü bir tork uygulaması gerektiği görülmektedir.

Robotun bekleme süresinin tamamlanmasının ardından başlangıç noktasında dönmek üzere uygulanması gereken tork değeri karakteristiği ise beklendiği gibi başlangıçtaki kısmın ters işaretlisi olacak şekildedir. Bu tork referansı ve motorun uyguladığı tork Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere tork kontrolü uygulanan motorun verilen referans işareti takip ettiği görülmektedir.



Şekil 4.8 : Benzetim ortamında üretilen tork referansı ve motor torku.

Böylece doğrulama çalışması kapsamında geliştirilen test düzeneğinin; kartların enerjilendirilmesi, mekanik arayüzü ile motora yük torku uygulayabilmesi ve kontrolcü verilerinin kaydedilebilmesi amaçlarının tamamını sağlamıştır. Test altyapısı ile beraber geliştirilen donanım ve yazılımların motor tork kontrolü gerçekleştirebildiği kanıtlanmıştır.



5. SONUÇ

Yapılan çalışmalar neticesinde robotun dengede durması için gerekli kontrolcülerini çalıştırabilecek, IMU ve motor sürücü kartlar ile haberleşebilecek ve bataryadan gelen enerjiyi motor sürücülere aktarabilecek bir anakartın satın alınabilir ürünler kullanılarak tasarlanabileceği gösterilmiştir. Aynı şekilde anakart ile haberleşerek motor kontrol algoritmalarının koşabileceği ve bu algoritmaların ürettiği çıkışları güç devresi üzerinden motora uygulayabilecek sürücü kartların satın alınabilir ürünler kullanılarak tasarlanabileceği gösterilmiştir.

Elektronik kartların, motor tutucuların, bataryanın ve IMU'nun üzerinde yer alabileceği bir gövdenin tasarımı yapılmıştır. Gövde ile beraber motorların bağlanacağı motor tutucu parçaların tasarımı yapılmıştır. Tasarım, gövde parçalarının üretiminin alüminyum malzeme kullanılarak; lazer kesim ve büküm yöntemleri ile yapılabileceği şekilde yapılmıştır.

Kontrolcüler için yapılan benzetim sonuçları incelendiğinde gürültü ve bozucuların eklenmediği durumda iki yapının da referans işaretleri takip ettiği görülmektedir. Ancak LQR yapısı LQG yapısına göre referans işaretleri daha hızlı takip etmektedir. Bununla beraber sisteme gürültü ve bozucu eklendiği durumda ise LQR yapısının sistemi kontrol edemediği ve sistemin kararsızlık rejimine geçtiği sistem çıkışları incelendiğinde görülmektedir. LQG yapısı gereği gürültü ve bozuculara karşı daha gürbüz bir kontrolcü yapısıdır ve sonuçlar incelendiğinde LQG kontrolör yapısı ile birlikte sistemin verilen referans işaretleri takip ettiği görülmektedir.

Yapılan benzetim çalışmaları neticesinde robot üzerinde LQG kontrolcü yapısının kullanılmasına karar verilmiştir. Çünkü LQG yapısı üretim, montaj, modelleme hatalarına ve çevresel bozuculara karşı LQR yapısına karşı çok daha gürbüz bir performans vermektedir.

Tasarlanan motor sürücü kartın üretilebilir olduğu, komponentlerin bir arada çalışabildiği, anakarttan gelecek bilgileri haberleşme ile alabileceği ve güç devresi üzerinden motorları sürebileceği gözlenmiştir. Gerek potansiyometre üzerinde düşen gerilimin değiştirilmesi gerekse de Simulink benzetim ortamında oluşturulan tork

referansları ile motor sürücü kart test edilmiş her iki senaryoda da referans işareti takip edebildiği gözlemlenmiştir.

Son olarak ileride yapılacak çalışmalarda robota bir insan makina arayüzü entegrasyonu yapılarak, bir arabirim üzerinden verilecek referans işaretlere göre hareket etmesi sağlanabilir. Robot üzerine eklenecek kamera, ultrasonik sensor gibi algılayıcı birimler ile çevreyi algılama kabiliyeti kazandırılarak otonom hareket veya eşzamanlı lokalizasyon ve haritalama kabiliyetleri kazandırılarak asistan robot yada otonom kişisel araç konseptine bir adım daha yaklaşılabılır.



KAYNAKLAR

- [1] **Mitchell, W. C., Staniforth, A., & Scott, I.** (2006). Analysis of ackermann steering geometry (No. 2006-01-3638). SAE Technical Paper.
- [2] **Url-1** <<https://www.gov.uk/government/statistics/national-travel-survey-2015>>, erişim tarihi 22.12.2018.
- [3] **Hollis, R.** (2006). Ballbots. Scientific American, 295(4), 72-77.
- [4] **Kumagai, M., & Ochiai, T.** (2008, October). Development of a robot balancing on a ball. In 2008 International Conference on Control, Automation and Systems (pp. 433-438). IEEE.
- [5] **Fankhauser, P., & Gwerder, C.** (2010). Modeling and Control of a ballbot (Bachelor's thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich).
- [6] **Url-2** <<http://www.ensatek.com.tr/maxon-f%C4%B1r%C3%A7al%C4%B1-motor-dcx>>, erişim tarihi 10.09.2019.
- [7] **Url-3** <<http://www.ensatek.com.tr/maxon-motor-planetred%C3%BCkt%C3%B6rl%C3%BCrler-gpx>>, erişim tarihi 10.09.2019.
- [8] **Url-4** <<http://www.ensatek.com.tr/maxon-motor-geri-besleme-%C3%BCnitelerienk-oderler>>, erişim tarihi 10.09.2019.
- [9] **Bodur, H.** (2010). Güç Elektroniği Temel Analiz ve Sayısal Uygulamalar. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [10] **Url-5** <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST_BNO055_DS000_12>, erişim tarihi 18.06.2018.
- [11] **Leens, F** (2009). An introduction to I²C and SPI protocols. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 12(1), 8-13.
- [12] **Dean, A. G., & Conrad, J. M** (2012). Creating Fast, Responsive and Energy-Efficient Embedded Systems using the Renesas RL78 Microcontroller. Micrium Press.
- [13] **Url-6** <<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f411.html>> erişim tarihi 23.08.2019.
- [14] **Url-7** <https://www.st.com/resource/user_manual>, erişim tarihi 11.10.2018.
- [15] **Url-8** <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/st3485eb.pdf>>, erişim tarihi 26.09.2018.
- [16] **Url-9** <<https://datasheet4u.com/datasheet-pdf/Littelfuse/SLD8S26A/pdf.php?id=1260514>> erişim tarihi 13.10.2018.

- [17] **Url-10** <<https://www.cui.com/product/resource/vx78-1000.p>>, erişim tarihi 26.09.2018.
- [18] **Url-11** <<http://datasheet.octopart.com/NCV33375ST3.3T3G-ON-Semiconductor-datasheet-8804729.pdf>>, erişim tarihi 23.09.2018.
- [19] **Url-12** <<https://www.altium.com/solution/altium-designer-18-new-features>>, erişim tarihi 10.09.2019.
- [20] **Url-13** <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>>, erişim tarihi 23.08.2019.
- [21] **Url-14** <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfs4410.>>, erişim tarihi 23.08.2019.
- [22] **Url-15** <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8701.pdf>>, erişim tarihi 23.08.2019.
- [23] **Welch, G., & Bishop, G.** (1995). An introduction to the Kalman filter.
- [24] **Levine, W. S. (Ed.).** (2018). The Control Systems Handbook: Control System Advanced Methods. CRC press.
- [25] **John Wiley & Sons. Yan, X. T., Jiang, C., & Eynard, B. (Eds.).** (2008). Advanced design and manufacture to gain a competitive edge. London: Springer.
- [26] **Hespanha, J. P.** (2005). Lecture notes on lqr/lqg controller design, knowledge creation diffusion utilization.
- [27] **Url-16** <[ftdichip.com/Support/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf](ftdichip.com/Support/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)>, erişim tarihi 12.09.2019.
- [28] **Url-17** <<https://www.st.com/en/development-tools/st-link-v2.html>>, erişim tarihi 12.09.2019.
- [29] **Tariq, M., Bhattacharya, T. K., Varshney, N., & Rajapan, D.** (2016). Fast response Antiwindup PI speed controller of Brushless DC motor drive: Modeling, simulation and implementation on DSP. Journal of electrical systems and information technology, 3(1), 1-13.
- [30] **Url-18** <<https://microchipdeveloper.com/jlink:jtag>>, erişim tarihi 13.09.2019.
- [31] **Url-18** <<http://www2.keil.com/mdk5/uvision/>>, erişim tarihi 11.09.2019.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Avni Hilmi PAZARBAŞI
Doğum Tarihi ve Yeri : 16.07.1991 FATSA / ORDU
E-posta : avnipazarbasi@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM :

- 2018 den günümüze TUSAŞ’da sistem mühendisi olarak çalışmakta.
- 2015-2018 yılları arasında AVL Araştırma ve Mühendislik’te sistem mühendisi olarak çalıştı.