T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ AYAKLI ROBOTLARDA JİROSKOPİK DENGELEME SİSTEMİ TASARIMI VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

ERAY YILMAZLAR

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hilmi KUŞÇU

EDİRNE-2022

ERAY YILMAZLAR'ın hazırladığı "**İKİ AYAKLI ROBOTLARDA JİROSKOPİK DENGELEME SİSTEMİ TASARIMI VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad):	İmza
Prof. Dr. Hilmi KUŞÇU	……
Prof. Dr. M. Tahir ALTINBALIK	……
Dr. Öğr. Üyesi Rembiye KANDEMİR	……
Dr. Öğr. Üyesi Evren ÇAĞLARER	……
Dr. Öğr. Üyesi Hayrettin TOYLAN	……

Tez Savunma Tarihi: 28/06/2022

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Hilmi KUŞÇU
Tez Danışmanı ……

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

……
Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

28 / 06 / 2022
Eray YILMAZLAR

Doktora Tezi

İki Ayaklı Robotlarda Jiroskopik Dengeleme Sistemi Tasarımı ve Deneysel Araştırılması

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada 12 serbestlik derecesine sahip iki ayaklı robot tasarımı ve 3 serbestlik derecesine sahip jiroskopik tork üreten kontrol moment jiroskop mekanizması tasarımı gerçekleştirilmiştir. Donanımsal tasarımların oluşturulması ile iki ayaklı robotun ve jiroskop mekanizmasının kontrol algoritması belirlenmiştir. Robotun hareket yörüngesi oluşturulmuştur. Jiroskopik etkinin iki ayaklı robotun hareketi üzerindeki etkisini tespit etmek için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerden ilk olarak jiroskopik tork büyüklüğüne göre iki ayaklı robotun yörüngesindeki salınım değişimi ölçülmüş ve robot tasarımı için ideal jiroskopik tork değeri belirlenmiştir. İkinci deneyde jiroskopik torkun 12 adet robot eklem motorları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Jiroskopik tork büyüklüğünün farklı oranlarda uygulanması ile eklem motorlarının tork analizi yürüme fazlarına göre karşılaştırılmıştır. Diğer bir deneyde jiroskopik torkun robot dengesi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla iki ayaklı robota serbest düşme deneyleri ile bozucu darbeler uygulanmış ve robotun jiroskopik tork etkisi ile dengelenme davranışları ölçülmüştür. Bu deneylerin sonucunda, jiroskop mekanizmasının üretmiş olduğu tork ile iki ayaklı robotun hareket performansı karşılaştırmaları gerçekleştirilmiş ve iki ayaklı robot üzerinde jiroskopik tork mekanizmasının kullanımının avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir.

Yıl : 2022

Sayfa Sayısı : 113

Anahtar Kelimeler : İki ayaklı robot, Jiroskop mekanizması, Sıfır moment noktası.

Phd. Thesis
Design and Experimental Research of Gyroscopic Balancing System in Bipedal Robots
Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this study, the design of a two-legged robot with 12 degrees of freedom and a control moment gyroscope mechanism that produces gyroscopic torque with 3 degrees of freedom are carried out. With the creation of hardware designs, the control algorithm of the bipedal robot and the gyroscope mechanism has been determined. The motion trajectory of the robot has been created. Experiments were carried out to determine the effect of the gyroscopic effect on the movement of the bipedal robot. First of these experiments, the oscillation change in the trajectory of the bipedal robot according to the gyroscopic torque size was measured and the ideal gyroscopic torque value for the robot design was determined. In the second experiment, the effect of gyroscopic torque on 12 robot joint motors was investigated. With the application of gyroscopic torque magnitude at different rates, the torque analysis of the joint motors was compared according to the walking phases. In another experiment, in order to determine the effect of the gyroscopic effect on the robot balance, free fall experiments and disruptive impacts were applied to the bipedal robot and the balancing behaviour of the robot with the gyroscopic torque effect was measured. As a result of these experiments, the torque produced by the gyroscope mechanism and the motion and performance of the bipedal robot were compared and the advantages and disadvantages of using the gyroscopic torque mechanism on the bipedal robot were determined.

Year : 2022

Number of Pages : 113

Keywords : Bipedal robot, Gyroscope mechanism, Zero moment point.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim ve doktora tez çalışmam süresi boyunca değerli bilgi birikimleri ve tecrübeleriyle bana destek olan, yardımını esirgemeyen, bana yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Hilmi KUŞÇU'ya,

Doktora tez çalışmalarımda bilgi birikimleri ve değerli görüşleri ile beni yönlendiren Prof. Dr. Tahir ALTINBALIK ve Dr. Öğr. Üyesi Rembiye KANDEMİR'e,

Çalışmalarım sırasında yardımlarını ve dostluklarını esirgemeyen, Öğr. Gör. Dr. Ercan Coşgun, Öğr. Gör. Volkan ERDEMİR ve mesai arkadaşlarıma,

Doktora eğitimim sürecinde her zaman yanımda olan, maddi manevi beni daima destekleyen aileme,

Teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

SİMGELER DİZİNİ x

KISALTMALAR DİZİNİ xiii

ŞEKİLLER DİZİNİ xiv

ÇİZELGELER DİZİNİ xvi

BÖLÜM 1 1

GİRİŞ 1

1.1. Konu 1

1.2. Amaç 2

1.3. Kapsam 2

BÖLÜM 2 4

LİTERATÜR TARAMASI 4

BÖLÜM 3 12

İKİ AYAKLI ROBOTUN VE JİROSKOP MEKANİZMASININ TASARIMI İLE PROTOTİP İMALATI 12

3.1. İki Ayaklı Robot Yapısı ve Özellikleri 13

3.2. Jiroskop Mekanizma Tasarımı ve Özellikleri 15

3.3. İki Ayaklı Robot Kinematik Hesapları 17

3.3.1. İleri Kinematik Hesaplamaları 17
3.3.2. Ters Kinematik Hesaplamaları 20
3.4. İki Ayaklı Robotun Yürüme Kontrolü 23
3.4.1. Doğrusal Ters Sarkaç Modeli 23
3.4.2. ZMP Takip Kontrolü 26
3.5. Sıfır Moment Noktasının FSR ile Ölçümü 27
3.6. İki Ayaklı Robotun Eklem Motorları 31
3.7. ROBOTIS OpenCM9.04-C Denetleyici ve OpenCM 485 Genişletme Kartı 32
3.8. Robotis OpenCM IDE 34
3.9. İki Ayaklı Robotun ve Jiroskop Mekanizmasının Kontrolü 34
BÖLÜM 4 40
DENEYSEL ÇALIŞMALAR 40
4.1. Jiroskopik Etkinin Robot Yörüngesi ve Yürüme Hızı Üzerindeki Etkisi 40
4.2. Jiroskopik Etkinin Düz Yürüme Hareketinde Robot Eklem Motorları Üzerindeki Etkisi 44
4.2.1. Sağ ve Sol Bileklerin Dikey Dönme Hareketinde Tork Analizi 44
4.2.2. Sağ ve Sol Bileklerin Yatay Dönme Hareketinde Tork Analizi 46
4.2.3. Sağ ve Sol Diz Dikey Dönme Hareketinde Tork Analizi 47
4.2.4. Sağ ve Sol Kalça Dikey Dönme Hareketinde Tork Analizi 48
4.2.5. Sağ ve Sol Kalça Yatay Dönme Hareketinde Tork Analizi 49
4.2.6. Sağ ve Sol Kalça Çevresel Dönme Hareketinde Tork Analizi 50
4.3. Jiroskopik Etkinin Dönme Hareketinde Robot Eklem Motorları Üzerindeki Etkisi 53
4.4. Bozucu Darbelere Karşı Jiroskopik Etkinin İki Ayaklı Robotun Dengesine Etkisi 60
4.5. Jiroskopik Etkinin İki Ayaklı Robotun Akım Tüketimi Üzerindeki Etkisi 61

BÖLÜM 5 63
SONUÇLAR 63
KAYNAKLAR 66
EKLER 73
Ek 1 İleri Kinematik Denklem Sonucu 73
Ek 2 Düz Yürüme Yazılımı 76
Ek 3 Sağa Dönme Yazılımı 81
Ek 4 Sola Dönme Yazılımı 87
Ek 5 Jiroskop Kontrol Yazılımı 93
ÖZGEÇMİŞ 96
TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FALİYETLER 97

SİMGELER DİZİNİ

a_i	İki eksen arasındaki uzuv uzunluğu
d_i	Üst üste çıkan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı
G_1	Jiroskop diski mafsal arası eklem uzunluğu
G_2	Jiroskop mafsal kalça arası eklem uzunluğu
I	Jiroskop diski atalet momenti
L	Jiroskop açısal momentum
L_1	Robot kalça diz arası eklem uzunluğu
L_2	Robot diz bilek arası eklem uzunluğu
L_3	Robot bileği ile ayak tabanı arası eklem uzunluğu
M	Jiroskop disk kütlesi
m	Ağırlık merkezindeki toplam kütle
p	Sıfır moment noktasının düzlemdeki konumu
p_x	Sıfır moment noktasının x eksenindeki konumu
p_y	Sıfır moment noktasının y eksenindeki konumu
R	Jiroskop disk yarıçapı
R_1	Robot bacak uzunluğu

R_2	Robot eklemleri arası bileşke bacak uzunluğu
R_3	Robot eklemleri arası bileşke bacak uzunluğu
ZMP_X	FSR'ye göre ayak tabanındaki x ekseni konumu
ZMP_Y	FSR'ye göre ayak tabanındaki y ekseni konumu
T_x	Sıfır moment noktasına göre x eksenindeki tork
T_y	Sıfır moment noktasına göre y eksenindeki tork
T_z	Sıfır moment noktasına göre z eksenindeki tork
T_{zmp}	Sıfır moment noktasındaki 3 eksendeki bileşke torku
u_x	Robot kütle ağırlık merkezinin ivmesi
x	Kütle ağırlık merkezinin x eksenindeki konumu
x_1	Dönme hareketi sonucu ayak taban yatay konumu
y	Kütle ağırlık merkezinin y eksenindeki konumu
y_1	Dönme hareketi sonucu ayak taban dikey konumu
z_c	Kütle ağırlık merkezinin z eksenindeki konumu
α	Robot kalça açısı
α_i	İki komşu eksen arasındaki bağ açısı
β	Eksen robot kalça açısı farkı
γ	Robot diz açısı
θ_i	İki komşu uzuv arasındaki eklem açısı
φ	Robot dönme hareketi bacak açısı

ω_W	Jiroskop rotor açısal hızı
ω_p	Jiroskop mafsal açısal hızı

KISALTMALAR DİZİNİ

ABS	Akrilonitril bütadien stiren
COM	Kütle ağırlık merkezi
CMG	Kontrol moment jiroskopu
DOF	Serbestlik derecesi
FSR	Kuvvete duyarlı direnç
Jiroskop	Düzdöner
LIPM	Lineer ters sarkaç model
LQR	Lineer kuadratik regülatör
PID	Oransal-integral-türevsel
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
RMS	Karekök ortalama
TTL	Transistör-transistör mantığı
ZMP	Sıfır moment noktası

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. İki ayaklı robot tasarım örnekleri. 12

Şekil 3.2. İnsan bacağı eklem yapısı ile tasarlanan iki ayaklı robotun eklem yapısı. 13

Şekil 3.3. Jiroskop mekanizmalı iki ayaklı robot tasarımı ve boyutları. 14

Şekil 3.4. Jiroskop mekanizması ve değişkenleri. 16

Şekil 3.5. İki ayaklı robot 3 boyutlu modeli ve serbestlik dereceleri. 19

Şekil 3.6. Bacak yan görünüşü eklem uzunlukları ve açıları. 21

Şekil 3.7. Robot bacağının bilek kalça eklem uzunlukları ve açıları. 22

Şekil 3.8. Bacak üst görünüşü eklem uzunlukları ve açıları. 22

Şekil 3.9. Sıfır moment noktası ve kütle ağırlık merkezi transfer gösterimi. 24

Şekil 3.10. ZMP ve COM kontrol bloğu. 27

Şekil 3.11. Robot ayak tabanında FSR bağlantıları. 28

Şekil 3.12. FSR Arduino nano devre şeması. 28

Şekil 3.13. Robot ayak tabanı FSR konumları ve ölçüleri. 29

Şekil 3.14. ZMP takibi arayüz ekranı. 29

Şekil 3.15. İnsan yürüme fazları. 30

Şekil 3.16. İki ayaklı robotun yürüme fazlarında FSR'ye göre ZMP değişimi simülasyonu. 30

Şekil 3.17. Dynamixel MX-64 servo motor. 31

Şekil 3.18. OpenCM9.04-C ve OpenCM 485 kart görünüşleri. 32

Şekil 3.19. Dynamixel Wizard ile TTL-USB haberleşmesi. 33

Şekil 3.20. Dynamixel Wizard ID tanımlama arayüzü. 33

Şekil 3.21. Robotis OpenCM IDE arayüzü. 34

Şekil 3.22. İki ayaklı robotun jiroskop mekanizması ile kontrollü blok diyagramı. 35

Şekil 3.23. Bir adıma ait düz yürüme eklem açı değişimleri. 36

Şekil 3.24. İki ayaklı robotun eklem motor tanımları. 37

Şekil 3.25. Kontrol edilebilir momentli jiroskop mekanizması devre şeması. 38

Şekil 3.26. İki ayaklı robotun ağır çekim adım hareketi. 39

Şekil 3.27. İki ayaklı robotun eğimli yürüyüşü. 39

Şekil 4.1. Jiroskopik tork etkisi ile COM salınımları değişimi. 41

Şekil 4.2. Jiroskop etkisinin yürüme hareketi salınımı üzerindeki etkisi. 42

Şekil 4.3. Sağa ve sola dönme hareketinde COM salınımları..... 43

Şekil 4.4. Sağ ve sol bileklerin dikey dönme hareketine ait tork radar diyagramı. 45

Şekil 4.5. Sağ ve sol bileklerin yatay dönme hareketine ait tork radar diyagramı. 46

Şekil 4.6. Sağ ve sol diz dikey dönme hareketine ait tork radar diyagramı..... 47

Şekil 4.7. Sağ ve sol kalça dikey dönme hareketine ait tork radar diyagramı. 48

Şekil 4.8. Sağ ve sol kalça dikey hareketine ait tork radar diyagramı. 49

Şekil 4.9. Sağ ve sol kalça çevresel dönme hareketine ait tork radar diyagramı. 50

Şekil 4.10. Sağa dönme hareketinde yürüme fazlarına göre motor tork değişimleri..... 53

Şekil 4.11. Sağa dönme hareketinde yürüme fazlarına göre motor tork değişimleri..... 54

Şekil 4.12. Sola dönme hareketinde yürüme fazlarına göre motor tork değişimleri. 56

Şekil 4.13. Sola dönme hareketinde yürüme fazlarına göre motor tork değişimleri. 57

Şekil 4.14. İki ayaklı robotun serbest düşme ile bozucu yük uygulanması. 60

Şekil 4.15. Jiroskoplu iki ayaklı robotun serbest düşme ile bozucu yük uygulanması... 61

Şekil 4.16. Pololu ACS711EX akım sensör ve bağlantı blok şeması..... 62

Şekil 4.17. İki ayaklı robotun akım değişimleri..... 62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. İki ayaklı robotun donanım özellikleri. 15

Çizelge 3.2. Jiroskop değişkenleri ve değerleri 16

Çizelge 3.3. Robot bacağı DH parametreleri. 18

Çizelge 3.4. Sıfır moment noktası kütle ağırlık merkezi tanımları. 25

Çizelge 3.5. Dynamixel MX-64 servo motor özellikleri. 32

Çizelge 4.1. Yürüme fazlarına göre jiroskopik etkinin güç tüketimine katkısı. 51

Çizelge 4.2. Servo motorlarda ortalama tork değerleri ve değişim oranları. 52

Çizelge 4.3. Sağa dönme hareketinde eklem motorlarının tork değerleri ve değişimi. .. 55

Çizelge 4.4. Sola dönme hareketinde eklem motorlarının tork değerleri ve değişimi.... 58

Çizelge 4.5. Sağa-sola dönme hareketinde eklem motorlarının tork değişim oranları karşılaştırması 59

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Konu

Robotlar ile ilgili çalışmalar 50 seneden günümüze kadar devam etmektedir. Gelecek yıllarda da robotların hayatımızın birçok alanına dahil olması beklenmektedir. İki ayaklı, insanımsı, dört ayaklı ya da daha fazla donanımlı, uçabilen robotlar performanslarını arttırarak gelişmeye devam etmektedirler. İki ayaklı robotların çevremizdeki uygulamaları incelendiğinde yönlendirme, nakliye, askeri, eğitim gibi birçok alanda kullanımı karşımıza çıkmaktadır.

Robot çalışmalarında gerçekleştirilen tasarımın insan ya da hayvan davranışlarını taklit eden hatta daha yüksek yetenek ve performansta davranması istenilmektedir. Bundan dolayı robotların tasarım ve kontrolü üzerindeki çalışmalar önemle devam etmektedir. İki ayaklı robotların tasarımları, denge kontrolleri, hareket süreçleri diğer robotlara göre daha kapsamlı olarak karşımıza çıkmaktadır. İki ayaklı robot tasarımında robotun boyutları, ağırlığı, eklem hareketlerini gerçekleştiren eyleyicilerin gücü, hızı gibi faktörler robotun hareket yeteneklerini belirlemektedir. Ayrıca iki ayaklı robotlarda hareket sürecinin tek ayak ve iki ayak üzerinde dengeli bir şekilde gerçekleşmesi de kontrol sürecinin önemini ve donanım yeterliliğini öne çıkarmaktadır.

Günümüzde denge kontrol birimleri incelendiğinde ters sarkaç kontrolü, atalet tekeri kontrolü ve jiroskopik tork ile kontrol yöntemleri örnek sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu örneklerden özellikle jiroskop (düzdöner) mekanizması geçmişten günümüze gemi, uçak, uydu, motosiklet gibi hareket halindeki birimlerin dengelenmesinde yardımcı eleman olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında iki ayaklı bir robotun jiroskop mekanizması ile kullanımı ve bunun etkileri araştırılmıştır.

1.2. Amaç

İki ayaklı robotlar alanında yapılan çalışmalar incelendiğinde robotun hareket ve denge yeteneklerini geliştirmeye yönelik birçok araştırma, yöntem ve materyal karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmalar, robot hareketinin yazılım ve kontrol süreçleri ile geliştirilmesi, daha yüksek performanslı hareket ekipmanlarının kullanılması ve iki ayaklı robotun dengesini destekleyici ek birimler ile gerçekleşmesine yönelik yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında ise iki ayaklı robotun jiroskop (düzdöner) mekanizması birimi ile hareketinin gerçekleştirilmesine yönelik yapılmıştır. İki ayaklı robotlarda jiroskopik dengeleme sistemi tasarımı ve deneysel araştırılması isimli bu tez çalışmasının gerçekleşmesi için ilk olarak iki ayaklı robot ve jiroskop mekanizması tasarımı ve düzeneğinin oluşturulması ve kontrol edilmesi amaçlanmıştır. İkinci aşama olarak hareket sürecine dahil edilen jiroskop mekanizmasının üretmiş olduğu torkun etkileri araştırılmıştır. Bu etkiler, iki ayaklı robotların hareket davranışlarına yöneliktir. İki ayaklı robotların davranışları incelendiğinde ise yürüme hareketinde yörünge takibi, salınımı, hareket hızı, denge korunumu davranışları ve güç tüketim faktörü ortaya çıkmaktadır. Jiroskopik torkun robot davranışları üzerindeki etkisinin deneysel olarak ölçülmesi ve karşılaştırılması ile iki ayaklı robotlar üzerinde jiroskop mekanizmasının kullanımının avantaj sağlayıp sağlamadığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.3. Kapsam

Gerçekleştirilen tez çalışmasında bölüm 1'de belirtilen çalışma amacını yerine getirmek için bölüm 2'de iki ayaklı robot tasarımları, kontrol yöntemleri, hareket destekleyici birimlerde yapılan çalışmalar ve jiroskopik tork üreten tasarımlar, kullanılan yöntemler araştırılmıştır.

Bölüm 3'te iki ayaklı robot tasarımı ve jiroskop mekanizması tasarlanmıştır. Tasarlanan birimlerin özellikleri, kullanılan materyaller, kontrol yöntemleri, robot ve jiroskop ekipman tanımları ve kullanımları bu bölümde açıklanmıştır.

Bölüm 4'te hareket ve kontrol süreçleri tamamlanan iki ayaklı robotun jiroskopik tork etkisi ile değişen davranışlarını, jiroskopik etkinin iki ayaklı robot hareketine katkısını incelemek için deneyler yapılmıştır.

Bölüm 5'te tasarım ve deneyler sonucunda elde edilen verilerin yorumlanması ve öneriler açıklanmıştır. Devamında ekler ve akademik çalışmalar belirtilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

İki ayaklı robotlarda jiroskopik dengeleme sistemi tasarımı ve deneysel araştırılması isimli bu çalışmaya göre iki ayaklı robotlar, jiroskop mekanizma sistemleri ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu tez konusu ile ilişkili çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

Dünyada ilk insanımsı robot olarak adlandırılan WABOT-1'in çalışmalarına 1970 yılında Waseda Üniversitesi Fen ve Mühendislik Yüksekokulu'ndaki laboratuvarında WABOT projesi ile başlamıştır. Wabot-1 mekanik uzuv yapısı ile görüş sistemi ve konuşma sistemlerini de bünyesinde barındırmaktadır. Yürüyebilme, nesneleri tutma ve taşıma yeteneğine sahiptir (Kato vd., 1987).

1986 yılında Honda firması tarafından üretilen Asimo isimli insanımsı robotun ilk çalışmaları başlamıştır. E0 isimli robotun hareket yapısı insan yürüyüşünü benzeyen iki ayaklı robot tasarımı ile gerçekleşmiştir (Honda Global, 1986).

iki ayaklı robotlar da pasif dinamik yürüyüş kavramı ilk kez McGeer (1990), ile ortaya çıkmıştır. Devam ettirdiği çalışmalarında diz bölümlerinde yaptığı eklemeler ile eğimli zeminde yürüme teorileri geliştirmiştir (McGeer, 1990).

Wong ve Hung (1996), iki ayaklı robot mekanizmasına jiroskop ekleme fikrini ilk kez denemiştir. Yaptıkları çalışmada iki ayaklı robot hareketleri ve jiroskop açılarına ait grafikleri yayınlamışlardır (Wong & Hung, 1996).

Brooks, Breazeal, Marjanovic, Scassellati, ve Williamson (1999), COG isimli 21 serbestlik derecesine (DOF) sahip insanımsı robot tasarlamışlardır. Robot işitme dokunma ve görsel tepkilere karşılık vermektedir (Brooks vd., 1999).

Pratt, Chew, Torres, Dilworth (2001), flamingo robot tasarımını yaptıkları çalışmalarında iki ayaklı robotun ayak ve yürüyüş şekli flamingo kuşuna

benzetilmektedir. Bu çalışmada iki ayaklı robotun dinamik modeli simülasyon şeklinde oluşturularak kontrol etmişlerdir (Pratt vd., 2001).

Zhang Huang, Liu, Li ve Lu (2002), BHR-1 isimli iki ayaklı yürüyebilen koordinatları tamamlayabilen, insan ile etkileşim kurabilen insanımsı robot çalışmasını gerçekleştirmiştir (Zhang vd., 2005).

Park, Kim, Lee ve Oh (2005), Kore Bilim ve Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği bölümü tarafından redüksiyon dişlisi kullanılarak HUBO isimli iki ayaklı insanımsı robot geliştirilmiştir (Park vd., 2005).

Metta, Natale, Nori ve arkadaşları (2010), iCub isimli insan ile etkileşim kurabilen nesnelerin rengini algılayıp kavrayabilen iki ayaklı insanımsı robot tasarımı yapmışlardır (Metta vd., 2010).

Erbatur, Seven, Taşkıran ve arkadaşları (2011), Sabancı Üniversitesi Mekatronik mühendisliği bölümü tarafından SURALP adı verdikleri sıfır moment noktası ile yörünge oluşturan iki ayaklı robot çalışmasını gerçekleştirmişlerdir (Erbatur vd., 2011).

Liu, Iwata, Sheng ve arkadaşları (2013), geliştirdikleri insanımsı robot tasarımında eğimli yolda yürüme üzerine çalışmışlardır. Kuvvet duyarlı direnç algılayıcı (FSR) sensörü kullanarak ayak tabanındaki yükü ölçerek gerçek zamanlı ve çevrimiçi kontrol işlemini gerçekleştirmişlerdir (Liu vd., 2013).

Boddiford, Manion, Kim ve arkadaşları (2013), tasarladıkları jiroskop mekanizması ile tork kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları tasarım ile insanı döndürebilecek tork kuvveti üretmişlerdir (Boddiford vd., 2013).

Wee, Astolfi ve Ming (2013), TPinokio isimli insanımsı robotu tasarlamışlardır. Yaptıkları çalışmada sıfır moment noktası referans alınmıştır. Tasarladıkları ayak tabanı sensörü konum ve denge üzerine geri bildirim almışlar ayrıca robotun eklem kontrollerinde model öngörülü kontrol yöntemini kullanmışlardır (Wee vd., 2013).

Rushdi, Koop ve Wu (2014), tasarladıkları pasif dinamik harekete sahip iki çift ayaklı mekanik sistem ile ağırlık merkezi etkisi ile yürüyüş gerçekleştirmişlerdir (Rushdi vd., 2014).

Uğurlu, Saglia, Tsagarakis ve arkadaşları (2014), tasarladıkları 48cm, 18kg ağırlığındaki iki ayaklı robotu, geliştirdikleri enkoderli tork sensörü ile kontrol etmişler ve robotun zıplama-denge hareketine yönelik çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir (Ugurlu vd., 2014).

Choi ve Baek (2014), iki ayaklı robot tasarımında manyetik ayak tabanı geliştirmişlerdir. Yapmış oldukları tasarımda iki ayaklı robotun zemine manyetik olarak tutunması ile yürüyüş ve denge kontrolünü gerçekleştirmişlerdir (Choi & Baek, 2014).

Mashadi ve Gowdini (2015), tasarladıkları aktif jiroskop cihazı ile 4 tekerli bir aracın denge analizini yapmışlardır. Jiroskop tork ve denge ilişkisinde LQR kontrol yöntemini kullanmışlardır. Yapmış oldukları bilgisayar simülasyonu sonucunda jiroskop etkisinin hedef ve denge ilişkisinde performans artışı sağladığını tespit etmişlerdir (Mashadi & Gowdini, 2015).

Kim, Tran, Dang ve Kang (2016), iki ayaklı robot ayak tabanına FSR kuvvet algılayıcı sensör monte ederek yürüme ve hareket pozisyonlarını ölçmüşler ve geliştirdikleri refleks kontrol yöntemi ile ZMP kontrol yöntemini birleştirerek servo motorların hareket kontrolünü gerçekleştirmişlerdir (Kim vd., 2016).

Faraji ve Ijspeert (2017), yapmış oldukları insansı robot tasarımında denge ve ağırlık merkezini, robotun bel bölgesindeki kontrol motoru ve kol hareketleri ile gerçekleştirmişlerdir (Faraji & Ijspeert, 2017).

Mazumdar, Spencer, Hobart ve arkadaşları (2017), tasarladıkları iki ayaklı robot yapısında geliştirdikleri kasnak mekanizması ile eklem hareketlerine yönelik enerji tasarrufu sağlamışlardır (Mazumdar vd., 2017).

Olcay ve Özkurt (2017), Dokuz Eylül Üniversitesinde tasarladıkları RUBI adlı iki ayaklı robotu lineer ters sarkaç kontrol modeli (LIMP) ve sıfır moment noktasına göre kontrol etmişlerdir. 12 serbestlik derecesine sahip olan robotun performansının sensör bilgisi ve ağırlık merkezi kontrolü ile arttığını belirtmişlerdir (Olcay & Özkurt, 2017).

Lee ve Park (2018), tasarladıkları iki ayaklı robotun kontrolünü kütle ağırlık merkezi üzerinden yapmışlardır. Motorların tork kontrollünü ise ayak pozisyon bilgisine göre gerçekleştirerek herhangi bir kontrol sıralaması kullanmamışlardır (Lee & Park, 2018).

Mayub ve Fahmizal (2018), iki ayaklı robot yürümesinde ayak tabanında FSR kullanarak robotun yürüme hareketini bulanık mantık kontrol yöntemi ile gerçekleştirerek analiz etmişlerdir (Mayub & Fahmizal, 2018).

Ko, Yamamoto, Murotoni ve Nakamura (2018), 74kg ağırlığında iki ayaklı robot tasarlamışlardır. Robot tasarımında elektro hidrolik silindir ile robot eklemlerine ve motor tork kuvvetine destek olmuşlardır. Robotun kontrolü kütle ağırlık merkezi ile sıfır

moment noktasına göre yapılmış ve bu işlemleri FPGA kartı üzerinden gerçekleştirmişlerdir (Ko vd., 2019).

Gim, Kim ve Yamane (2018), normal iki ayaklı robot tasarımına hibrid bacak tasarımını eklemişlerdir. 6 serbestlik derecesine sahip robotun bacak hareketi seri paralel mekanizma ile gerçekleştirmiştir. Hibrid tasarım ile robotun dinamik performansı ve dayanıklılığı arttırılmıştır (Gim vd., 2018).

Liu, Huang, Wei ve arkadaşları (2018), tasarlamış oldukları iki ayaklı robotun kontrolünü sıfır moment noktası ve kütle ağırlık merkezi gerçekleştirmiş ve 56cm boyutundaki robotun uzun mesafeleri geçmesini sağlamışlardır (Liu vd., 2018).

Vaz ve Oh (2018), insanımsı minyatür robot tasarımının diz kısmına ekledikleri teker mekanizması ile robota dizleri üstünde gidebilme yeteneği kazandırmışlardır. Yapmış oldukları kontrol tasarımında robotun devrilmeden gidebileceği eğilme açısını hesaplamışlar ve robotun bozuk zeminlerde daha hızlı ve dengeli bir şekilde hareket edebildiğini belirtmişlerdir (Vaz & Oh, 2018).

Hubicki, Abate, Clary ve arkadaşları (2018), ATRIAS ismini verdikleri iki ayaklı robot tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tasarımda karbon fiber malzemesini eklem ve bacak tasarımında kullanmışlardır. Robot gövdesinde motor kontrolü ve analiz işlemleri için mikro bilgisayar kullanmışlardır. Kütle ağırlık merkezine göre yapmış oldukları kontrol yapısında robot dışarıdan gelen denge bozucu etkilere karşı dayanıklılık göstermiştir (Hubicki vd., 2018).

Kobayashi, Sekiyama, Hasegawa ve arkadaşları (2018), modelledikleri insanımsı robotun yürüme ve koşma durumlarındaki eklem hareketlerini ve bu hareketlere göre gerçekleşecek enerji tüketiminin analizini yapmışlardır (Kobayashi vd., 2018).

Gosyne, Hubicki, Xiong ve arkadaşları (2019), yapmış oldukları iki ayaklı robot tasarımı uygulaması ile robotun kütle ağırlık merkezini ve eklemlerdeki periyodik açı değişimini incelemişlerdir. Yapılan inceleme 10° eğimli bir yürüyüş parkurunda ve düzgün olmayan zemin şartlarında gerçekleşmiştir (Gosyne vd., 2019).

Guadarrama-Olvera, Bergner, Dean ve Cheng (2019), iki ayaklı robotların bilinmeyen zemin şartlarını tespit etmek amacıyla robotun ayak tabanın altına yerleştirdikleri algılayıcı hücre tasarımı ile zemindeki çukur, tümsek tespiti, zemin taban mesafesi, zeminin sıcaklığı ve zeminle taban arasındaki kuvveti ölçmüşlerdir (Guadarrama-Olvera vd., 2019).

Arcos-Legarda, Cortes-Romero ve Tovar (2019), iki ayaklı robotlarda yürüme hızını ve adımlar arasındaki mesafeyi, zemin ve dış denge bozucularına göre kontrol etmiştir ayrıca destek ayağı ile robotun dengede kalmasına katkıda bulunmuşlardır (Arcos-Legarda vd., 2019).

Hofslot, Griffin, Bertrand ve Pratt (2019), yılında iki ayaklı insanımsı robotlarda denge kontrollünde dikey kütle merkezi yöntemini kontrol sürecine eklemişler ve dikey pendulum ağırlığının oluşturduğu momente göre robotun denge analizlerini yapmışlardır (Hofslot vd., 2019).

Liu Lee, Xiao ve arkadaşları (2019), minyatür insanımsı robot üzerine bağlamış oldukları kamera ile nesne yakalama fonksiyonunu robota uygulamışlardır. Nesne tespit ve yakalamada Q-Learning algoritmalarını kullanmışlardır (Liu vd., 2019).

Zhang, Ramirez-Alpizar, Esclasse ve arkadaşları (2019), insanımsı robotlarda kütle ağırlık merkezini referans alarak yapmış oldukları kontrol yönteminde, model öngörülü kontrol yöntemini Haar fonksiyonu ve Laguerre fonksiyonu ile birleştirip, iki fonksiyonun karşılaştırılmasını yapmıştır (Zhang vd., 2019).

Kormushev, Uğurlu, Caldwell ve Tsagarakis (2019), COMAN isimli iki ayaklı robotun sıfır moment noktası ve değişken kütle ağırlık merkezini referans alarak yapmış oldukları çalışmada yapay zekanın pekiştirici öğrenme yöntemini uygulayarak robotun kendi kendine öğrenmesini sağlamış ve enerji verimliliği elde etmişlerdir (Kormushev vd., 2019).

Nowak, Milecki ve Bialek (2019), 3 boyutlu yazıcı ve servo motor ile tasarladıkları iki ayaklı robotun yürüme hareketini gerçekleştirmişlerdir. Yürüme kontrol işlevini akıllı telefon uygulaması ile gerçekleştirmişlerdir (Nowak vd., 2019).

Shahrokhshahi, Yousefi-Koma, Khadiv ve arkadaşları (2019), yılında sıfır moment noktası referans alınarak kontrol edilen Surena isimli insanımsı robotun merdiven çıkma davranışını incelemişlerdir. Dağınık kütle merkezli dinamik model ile yapılan çalışmada eklemlerdeki motorların tork zaman grafikleri MATLAB kullanılarak göstermiştir (Shahrokhshahi vd., 2019).

Tacué, Rengifo ve Bravo (2020), iki ayaklı insansı robotun araba masa (cart-table) kontrol yöntemi ve optimizasyon yaklaşımı yöntemlerini kullanmıştır. Bu iki yöntem arasındaki güç tüketimini ölçmüş ve cart-table yönteminin yüksek yürüme hızlarında

düşük enerji tüketimini geliştirdiği, optimizasyonun ise düşük yürüme hızlarında daha az enerji tükettiğini belirtmiştir (Tacué vd., 2020).

Aranovskiy, Ryadchikov, Nikulchev ve arkadaşları (2020), geliştirdikleri kontrol moment jiroskop tasarımını 4 serbestlik dereceli iki ayaklı robot üzerinde kullanmışlardır. Gerçekleştirdikleri yürüme analizlerinde jiroskop mekanizmasının dengeleme sürecine katkı sağladığını belirtmişlerdir (Aranovskiy vd., 2020).

Romtrairat, Virulsri, Wattanasiri ve Tangpornprasert (2020), tasarladıkları giyilebilir kontrol moment jiroskop mekanizması ile jiroskopun insan bedenindeki oluşturduğu döndürme torkunu incelemişlerdir. 15kg ağırlığındaki jiroskopun çeşitli dönme hızlarında ve dönme açılarına göre oluşan torkları ayak tabanındaki yük platformu ile ölçmüşlerdir (Romtrairat vd., 2020).

Moreno–Valenzuela, Montoya, Chairez ve Santibanez (2020), gerçekleştirdikleri kontrol moment jiroskop tasarımları ile jiroskopun üretmiş olduğu torkun network bazlı geri besleme ile ölçülüp Oransal-integral-türevsel (PID) kontrol yöntemi istenilen değerde tork üretmesini sağlamışlardır (Moreno–Valenzuela vd., 2020).

Lee, Kwon, Lee ve arkadaşları (2020), ZMP ve LIMP yöntemleri ile iki ayaklı bir robotun yürüme düzlemini kamera kullanarak haritalandırmışlar ve yörüngesindeki engelleri tespit ederek konum değiştirmesini ve engellerin üzerinden geçebilmesini sağlamıştır (Lee vd., 2020).

Thien, Kien ve Anh (2020), 10 serbestlik dereceli iki ayaklı robot HUBOT-4 tasımını gerçekleştirerek yürüme kontrolünde geliştirdikleri JAYA algoritmasını kullanmışlardır. Geliştirdikleri algoritma ile robotun yürüme simülasyonu üzerinden eklem hareketleri ZMP konum hesaplamalarını daha önce üzerinde çalıştıkları MO-NSGA-2 ve MO-PSO algoritmalarından daha iyi sonuçları elde ettiklerini bildirmişlerdir (Thien vd., 2020).

Wong, Xiao ve Aoyama (2020), insanımsı robot üzerinde 3 kütleli ters sarkaç modeli yöntemini kullanarak robotun ZMP ve kütle ağırlık merkezi (COM) takibi analizini yapmışlardır. Robotun yürüme kontrolü, iki ayağın ağırlığına ilave olarak üst robot gövdesinin ağırlığının sürece dahil edilmesi sonucu ZMP takibinde sapma hatasının azaltıldığı tespit edilmiştir (Wong vd., 2020).

Li, Meng, Yu ve arkadaşları (2021), tasarladıkları insanımsı robotun gövdesine ters sarkaç diski yerleştirmiş ve robotun yürüme kontrolünde ters sarkaç diski etkisini

araştırmışlardır. Ters sarkaç diskinin yürüme ve denge sürecine katkı sağladığını belirtmişlerdir (Li vd., 2021).

Cho, Kim, Kim ve arkadaşları (2021), hidrolik pompa, güç ünitesi ve eklem hareketlerini gerçekleştiren hidrolik silindirler ile iki ayaklı robot tasarlamışlardır. Yağ akış hızı, sistem basıncı, pompa gücüne göre yürüyüş analizi gerçekleştirmişlerdir (Cho vd., 2021).

Mikhalkov, Prutskiy, Sechenev ve arkadaşları (2021), 4 serbestlik dereceli ve 4 jiroskop mekanizması ile iki ayaklı robot tasarlamışlardır. 35kg ağırlığındaki tasarımları ile jiroskopun yürüme ve dengede kalma sürecine katkı sağladıklarını belirtmişlerdir (Mikhalkov vd., 2021).

Mohamed, Maged ve Awad (2021), iki ayaklı bir robotun yürüme ve kontrolünü model öngörülü kontrol yöntemi ve araba cart table yöntemini birleştirerek gerçekleştirmişleridir. Yaptıkları çalışma ile yürüme fazları arasında yumuşak geçişi ve daha düşük güç tüketimi gerçekleştirmişlerdir (Mohamed vd., 2021).

Huang, Yu, Chen ve arkadaşları (2021), insanımsı robotlarda parmak ucu ve topuk eklemlerinin pozisyon kontrollerini ve kütle ağırlık merkezinin model öngörülü kontrolünü birleştirerek robotun daha doğrusal hareket ettiğini ve kinematik optimizasyonlar ile aradaki farkın azalttığını simülasyonlar ve deneyler ile belirtmiştir (Huang vd., 2021).

Park, Kim ve Yamamoto (2022), iki ayaklı robotun LIMP yöntemi kullanarak ZMP ve COM arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Geliştirdikleri sensör geri beslemeli kontrol yöntemi ile ZMP takibinin simülasyonunu yapmışlardır (Park vd., 2022).

Huang, Dong, Yu ve arkadaşları (2022), tasarladıkları iki ayaklı robotun itilme ve sarsılmalara karşı göstermiş olduğu davranışı insanın itilme ve sarsılma davranışı ile karşılaştırmışlardır. Kıyaslamayı ZMP ve COM takibi ile ölçmüşlerdir (Huang vd., 2022).

Villa, Frenbach, Mansard ve Stasse (2022), iki ayaklı robotun hareketlerini gerçekleştiren kinematik optimizasyonları model öngörülü kontrol yöntemi ile elde etmişlerdir. Bu yöntem ile kalça hareketinin esnekliğinin artmasını sağlamış ve bozucuların etkisini azaltmışlardır (Villa vd., 2022).

Zheng, Zhu, Chen ve arkadaşları (2022), kontrol moment jiroskopu (CMG) mekanizması ile motosikletin dinamik modelini hesaplamış ve denge kontrolünün simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir (Zheng vd., 2022).

Literatür çalışmaları incelendiğinde iki ayaklı robotlar ile ilgili farklı mekanik tasarımların, yürüme hareketini destekleyici ilave modüllerin kullanıldığı gözlemlenmektedir. Kontrol yöntemleri incelendiğinde kinematik optimizasyonları destekleyici ek kontrol birimleri ile ZMP takibinin doğruluğunu arttırmaya yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. CMG mekanizmasının birçok birimde denge kontrolünde yardımcı eleman olarak kullanıldığı farklı boyut tasarımlarında ve kontrol yöntemlerinde kullanıldığı anlaşılmaktadır.

Literatür çalışmaları sonucunda daha önceden yapılan çalışmaları ile tez konusundaki çalışmalar karşılaştırılmış ve dikkat edilmesi gereken hususlar belirlenmiş. Bu Hususlar;

İki ayaklı robotun gerçekleştireceği hareketleri sağlayan eklem motorların yeterli güçte ve özellikte olması gerekmektedir. Güçlü motorların eklem hareketlerinde avantaj sağladığı anlaşılmaktadır.

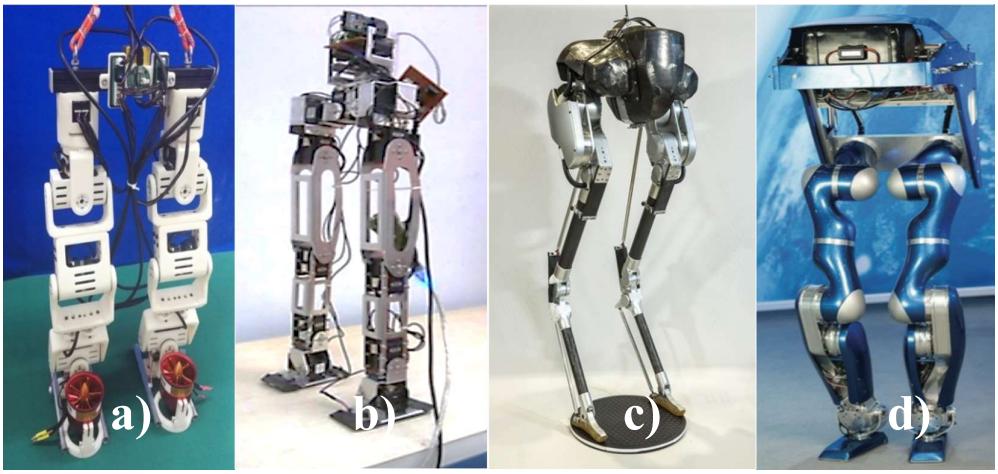
ZMP ve COM arasındaki ilişki robot tasarımına ve kontrolüne bağlı olarak değişmektedir. COM salınımının adım genişlikleri arasında kalması gerekmektedir.

Jiroskop mekanizmasının yapılan dengeleme uygulamalarında dengeyi destekleyici, yardımcı yapıda kullanıldığı gözlemlenmiştir. Kasnak çapının genişliği ve dönme hızı jiroskop mekanizmasının üreteceği tork etkisini artırmaktadır.

BÖLÜM 3

İKİ AYAKLI ROBOTUN VE JİROSKOP MEKANİZMASININ TASARIMI İLE PROTOTİP İMALATI

İki ayaklı robot insan gibi yürüyebilen, adım atıp dengede kalabilen, dönebilen, insanımsı robotların bel ve bacak uzuv kısımlarından oluşan robot türüdür. İki ayaklı yürüyen robotların tasarımında insan yürüme yapısı örnek alınmış ve çalışmaların çoğunda insanın kusursuz hareket ve denge yapısını gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Bu amaçla Şekil 3.1'de gözüken örnek iki ayaklı robotlarda olduğu gibi tasarımların mekanik şekli insan bacağının fiziksel yapısı referans alınarak oluşturulmuştur.

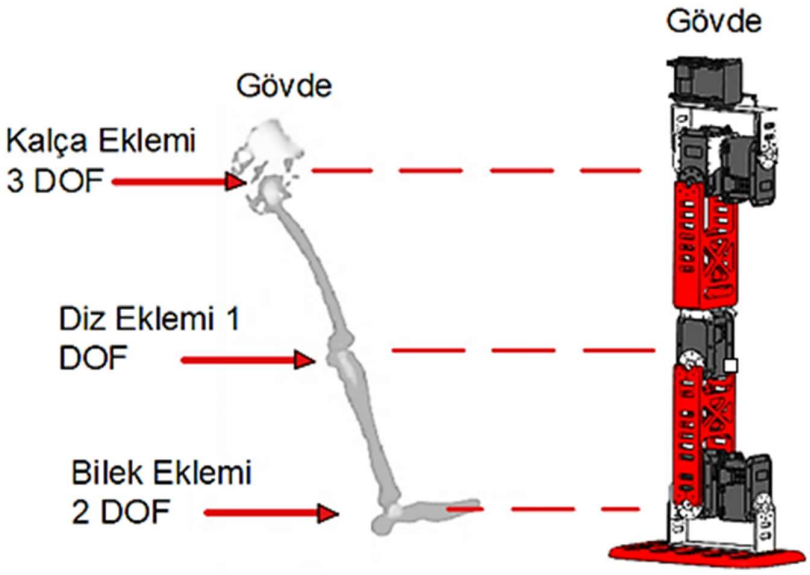


Şekil 3.1. İki ayaklı robot tasarım örnekleri. a) (Liu vd., 2018), b) (Olcay & Özkurt, 2017), c) (Reher vd., 2019), d) (Ott vd., 2011)

İnsanın yürüme denge sistemi incelendiğinde vücut ağırlığının sabit durumda iki ayak üzerinde paylaşılması, yürüme hareketinde ise ağırlığın bacaklar üzerinde dengeli bir şekilde hareket salınımına göre paylaşılması ile gerçekleşir. İnsan bacağındaki her eklemin hareket kabiliyeti ile adım atma işlemi gerçekleşir ve bedeni devrilmeden hareket

etmesi sağlanır, ayrıca insan eklemlerin sahip oldukları hareket kabiliyetleri dışarıdan gelen itilme, kayma, zemin bozukluğu gibi denge bozucu etkenleri kas yapısından aldıkları güç ile beraber giderip gövdenin dengeli bir şekilde hareketini sağlamaktadır. Robotlarda ise bu hareket çeşitleri çoğunlukla eklemlerdeki motorlar ile yerine getirilmekte ve robot tasarımına göre ek dengeleme unsurları gövdeye ilave edilerek sağlanmaktadır. Şekil 3.2'de insan bacağının eklem yapısı ve tasarlanan robotun bacak eklem yapısı gözükmektedir. Tasarlanan robot bacağının insan bacak yapısından farkı ayak tabanın düz olarak tasarlanması, parmak eklemlerinin tasarıma dahil edilmemesidir.

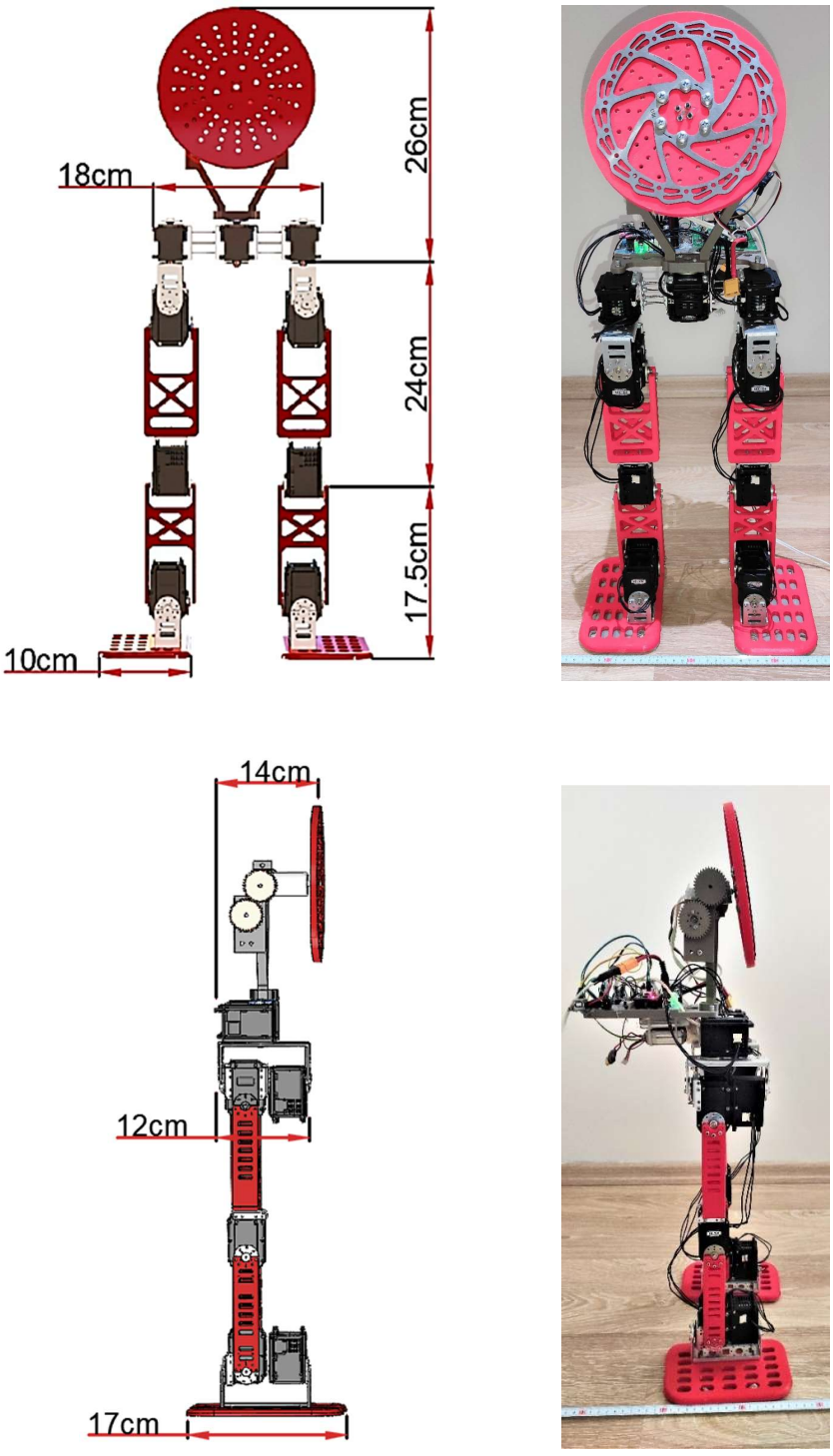
3.1. İki Ayaklı Robot Yapısı ve Özellikleri



Şekil 3.2. İnsan bacağı eklem yapısı ile tasarlanan iki ayaklı robotun eklem yapısı.

İki ayaklı robot tasarımı birden fazla ekipman ve malzemenin birlikte kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Bacak uzuv kısımları 3 boyutlu olarak tasarlanmış ve 3B yazıcıdan Akrilonitril bütadien stiren (ABS) polimer malzemesi kullanılarak elde edilmiştir. Yürüme hareketinde ağırlığın fazla olduğu kısımda alüminyum bağlantı elemanları kullanılmıştır. İki ayaklı robottun eklem hareketlerini gerçekleştiren 12 adet Dynamixel MX64 servo motor kullanılmıştır. Şekil 3.3'te tasarlanan robotun görüntüsü ve boyutları

görünmektedir. Çizelge 3.1'de tüm robot tasarımının özelikleri ve kullanılan ekipmanların bilgileri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Jiroskop mekanizmalı iki ayaklı robot tasarımı ve boyutları.

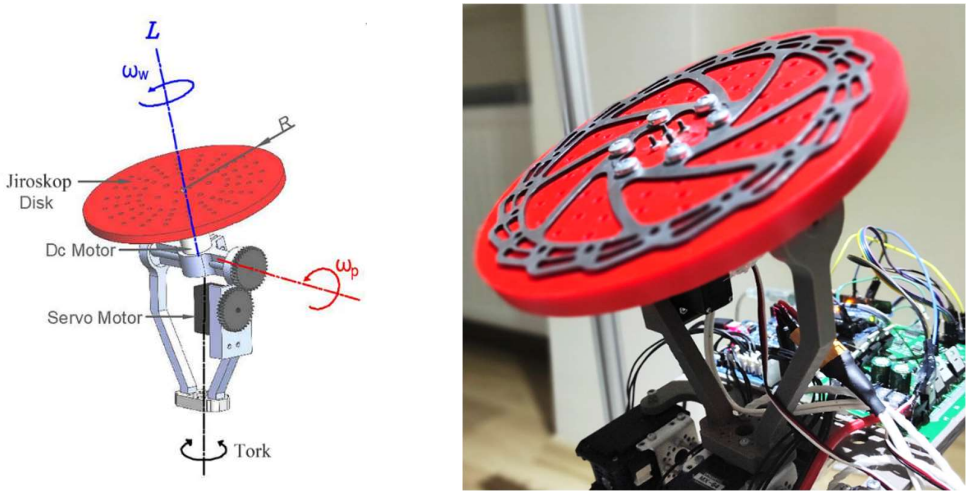
Çizelge 3.1. İki ayaklı robotun donanım özellikleri.

Kategori	**Açıklama**	**Özellikler**
Fiziksel ölçüler	Yükseklik Ağırlık	67,5cm 3,64kg- tüm donanım dahil
1 Bacaktaki eklemlerin serbestlik dereceleri	Bilek Diz Kalça CMG mekanizması	2 DOF 1 DOF 3 DOF 3 DOF
İki ayaklı robot kontrol kartı OpenCM9.04	İşlemci Besleme gerilimi Genel giriş çıkış pinleri Analog giriş	STM32F103CB (ARM Cortex-M3) 5-16V (14,8V) 26 adet ve 4 adet zamanlayıcı 10 adet
Jiroskop kontrol kartı Arduino Uno	Mikrokontrolör Besleme gerilimi Dijital giriş/çıkış Analog giriş	ATmega328P 8-bit AVR 6-20V (9V) 14 adet (6 adet PWM) 6 adet
Eklem motoru Dynamixel MX64	PID kontrollü Tork Hız Çözünürlük Pozisyon sensor	ARM Cortex-M3 (72 [MHz], 32Bit) 730Ncm at 14,8V- 5,2 A 78 dev/dk 14,8V 0,088° Mutlak enkoder 12bit, 360°
Jiroskop mekanizması	DC motor Zebra servo motor Motor sürücü Gyro sensor	1000 dev/dk 12V- tork 6,86Ncm 4,8V: 0,19s/60°- tork 2,80kgcm H-köprü DC mosfet IRF3205 MPU 6050 6 eksen-ivme ölçer
ZMP ölçümü	Kuvvet sensorü	8 adet 1,27cm – Spark Fun FSR

3.2. Jiroskop Mekanizma Tasarımı ve Özellikleri

Jiroskoplar rotor olarak tabir edilen bir disk yada tekerin eksen üzerinde dönmesi ve bu ekseni taşıyan dengeleme halkasına mafsallanması ile oluşan ayrıca ek dengeleme çerçeveleri ile kendi dengesini korumasını sağlayan, tork üreten mekanik bir sistemdir (Passaro vd., 2017). Mekanik jiroskoplar günümüzde oluşturduğu tork sayesinde birçok cihazda dengeleme elemanı olarak kullanılmaktadır. Örneğin gemilerde dalga sarsıntılarını gidermede, motosikletlerde devrilmeyi önlemede, uydularda hareketi yönlendirmede kullanılmaktadır.

İki eksenli kontrol edilebilir torklu jiroskop mekanizması tasarımı Şekil 3.4 gözükmektedir. Tasarımda jiroskop diskini döndüren DC motor taşıyıcı eksene monte edilmiştir. Bu eksen de ikinci eksene rulmanlar ile mafsallanmış ve servo motor ile ikinci dönme hareketi gerçekleştirilmiştir. Jiroskop mekanizmasının yapmış olduğu bu iki hareket sonucunda kontrol edilebilir bir tork üretilmiştir. Jiroskopun üretmiş olduğu tork değeri disk ataleti (I), kütlesi (M), yarıçapı (R), rotor eksenindeki açısal hızı (ω_W), dengeleme halkasındaki açısal hızı (ω_p) , açısal momentum (L) ve rotor ile denge halkası arasındaki dönme açısına (ϕ) bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 3.2 de tasarlanan jiroskop mekanizmasının fiziksel özellikleri ve değerleri gözükmektedir (Yilmazlar vd., 2021).



Şekil 3.4. Jiroskop mekanizması ve değişkenleri.

Çizelge 3.2. Jiroskop değişkenleri ve değerleri

Değişken Tanımları	**Değerleri**
Disk kütlesi (M)	0,63kg
Disk yarıçapı (R)	0,085m
Rotor açısal hızı (ω_W)	104,71rad/s
Mafsal açısal hızı (ω_p)	6,98rad/s

Çizelge 3.2'teki değerlere göre jiroskop mekanizmasının ürettiği tork değerinin hesaplanması için diskin ağırlığı ve yarı çapına göre atalet momenti değişmektedir. Bu değer jiroskop dinamiğine göre aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır (Angélico vd., 2017; Geshnizjani vd., 2016). Denklem 3.1'e göre diskin atalet momenti (I)

hesaplanmıştır. Açısal momentum (L), diskin açısal hızı(ω_W) ve atalet momenti ile hesaplanmaktadır. Bu değişken denklem 3.2'ye göre hesaplanmıştır. Jiroskop mekanizmasının üreteceği tork değeri dikey eksendeki diskin açısal momentumu (L) ile bu eksenin döndüren servo motorun açısal hızının (ω_p) çarpımı sonucu elde edilmektedir. Elde edilen tork değeri taşıyıcı uzuv mekanizması ile iki ayaklı robota iletilecektir.

$$\mathrm{I} = MR^2/2 \quad I = 0.63x\ 0{,}085^2/2 = 0.00227\ kgm^2 \tag{3.1}$$

$$L = I\omega_W = 0.00227x104.71 = 0.237\ kgm^2/s\ \ T = L.\omega_p = 0.237\mathrm{x}6.98 = 1.65Nm \tag{3.2}$$

3.3.İki Ayaklı Robot Kinematik Hesapları

İki ayaklı robotların, insanımsı robotların kontrollü, hesaplamaları alanda yapılan çalışmalar Honda tarafından geliştirilen ASIMO insanımsı robotun temellerinden günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından farklı serbestlik derecelerinde ve tasarımlarında yapılmıştır (Hernández-Santos vd., 2012; Fahmizal & Mayub, 2018; O 'flaherty vd., 2013; Bayraktaroğlu vd., 2018). İki ayaklı ve insansı robotların hareket kontrolü için kinematik çözümler gereklilik oluşturmaktadır. Kinematik hesaplar ileri kinematik ve ters kinematik hesaplama yöntemleri ile D-H parametreleri kullanılarak çözülebilmektedir. Kinematik hesaplamalar ile eklem açıları, hedef pozisyonları, tekillik ve çalışma alanı sınırları belirlenebilmektedir (Hartenburg vd., 1965).

3.3.1. İleri Kinematik Hesaplamaları

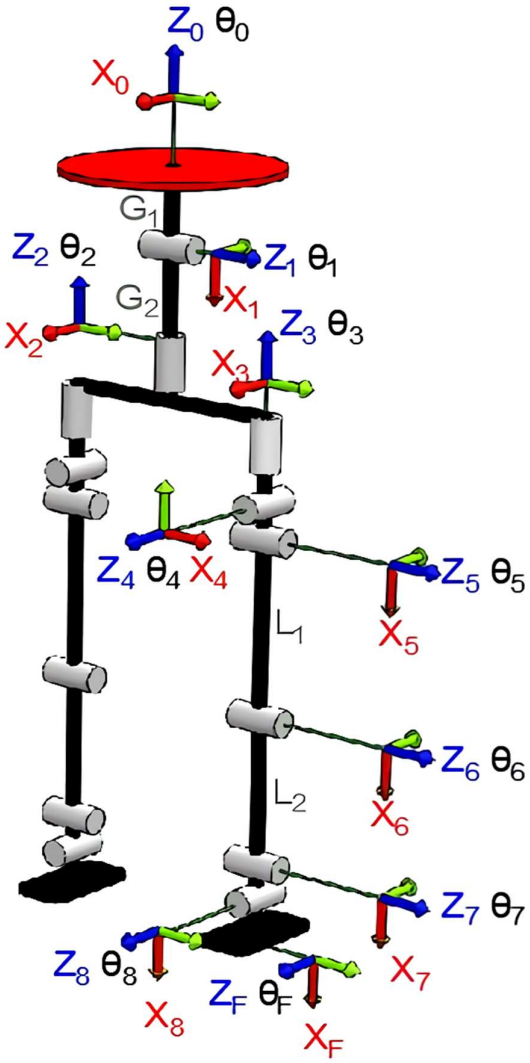
İleri kinematik, robot eklemlerinin dönüşüm matrislerinin, ana çerçeve ekleminden son çerçeve eklemine kadar sıralanması ve aralarında ilişki bağlantısının oluşturulması ile elde edilen denklem matrisidir (Kucuk & Bingul, 2006). İleri kinematik dönüşüm matrislerinin hesaplanması ile konum açı hareket ilişkisi belirlenebilmektedir.

Gerçekleştirilen tasarım, 12 eksen iki ayaklı robotun ve 3 eksen jiroskop mekanizmasının olmak üzere toplam 15 eksenli serbestlik derecesine sahiptir. Şekil 3.5'te eksen koordinatları ve yerleri gözükmektedir. İleri kinematik hesaplaması için DH parametreleri Çizelge 3.3'te ve eklem dönüşüm matrisleri denklem 3.3-3.8'de gözükmektedir. Çizelge 3.3'te gözüken eklem parametreleri iki eksen arasındaki uzuv uzunluğu (a_i), iki komşu eksen arasındaki bağ açısı (α_i), üst üste çıkan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı (d_i), iki komşu uzuv arasındaki eklem açısı (θ_i) şeklinde tanımlanmaktadır (Hartenburg vd., 1965).

Çizelge 3.3. Robot bacağı DH parametreleri.

Eklem aralığı	**2 komşu eksen arasındaki eksen açısı α_i**	**2 eksen arasındaki uzuv uzunluğu a_i**	**2 bağ arasındaki eklem kaçıklığı d_i**	**2 komşu uzuv arasındaki eklem açısı θ_i**
0-1	-90°	G_1	0	θ_0
1-2	90°	G_2	0	θ_1
2-3	0°	0	D_1	θ_2
3-4	90°	0	0	θ_3
4-5	-90°	0	0	θ_4
5-6	0°	L_1	0	θ_5
6-7	0°	L_2	0	θ_6
7-8	90°	0	0	θ_7
8-F	0°	0	0	θ_8

Çizelge 3.3'te 9 serbestlik derecesine sahip sol bacağın DH parametreleri verilmiştir. Bu parametrelere göre eklem dönüşüm matrisleri denklem 3.3-3.8 arasında verilmiştir. Ana uçtan uç işleve göre tasarımın ileri kinematik hesaplaması ise denklem 3.9 ile elde edilmiştir.



Şekil 3.5. İki ayaklı robot 3 boyutlu modeli ve serbestlik dereceleri.

$$[{}^{0}_{1}T] = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

$$[{}^{0}_{1}T] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\,\theta_0 & -\mathrm{s}\,\theta_0 & 0 & G_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\mathrm{s}\,\theta_0 & -\mathrm{c}\,\theta_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [{}^{1}_{2}T] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\,\theta_1 & -\mathrm{s}\,\theta_1 & 0 & G_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \mathrm{s}\,\theta_1 & \mathrm{c}\,\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$[{}^{2}_{3}T] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\,\theta_2 & -\mathrm{s}\,\theta_2 & 0 & 0 \\ \mathrm{s}\,\theta_2 & \mathrm{c}\,\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & D_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [{}^{3}_{4}T] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\,\theta_3 & -\mathrm{s}\,\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \mathrm{s}\,\theta_3 & \mathrm{c}\,\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$[{}^{4}_{5}T] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\,\theta_4 & -\mathrm{s}\,\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\mathrm{s}\,\theta_4 & -\mathrm{c}\,\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [{}^{5}_{6}T] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\,\theta_5 & -\mathrm{s}\,\theta_5 & 0 & L_1 \\ \mathrm{s}\,\theta_5 & \mathrm{c}\,\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[{}^{6}_{7}T] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\,\theta_6 & -\mathrm{s}\,\theta_6 & 0 & L_2 \\ \mathrm{s}\,\theta_6 & \mathrm{c}\,\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [{}^{7}_{8}T] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\,\theta_7 & -\mathrm{s}\,\theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathrm{s}\,\theta_7 & \mathrm{c}\,\theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[{}^{8}_{F}T] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\,\theta_8 & -\mathrm{s}\,\theta_8 & 0 & 0 \\ \mathrm{s}\,\theta_8 & \mathrm{c}\,\theta_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$[{}^{0}_{F}T] = [{}^{0}_{1}T][{}^{1}_{2}T][{}^{2}_{3}T][{}^{3}_{4}T][{}^{4}_{5}T][{}^{5}_{6}T][{}^{6}_{7}T][{}^{7}_{8}T][{}^{8}_{F}T] \quad (3.9)$$

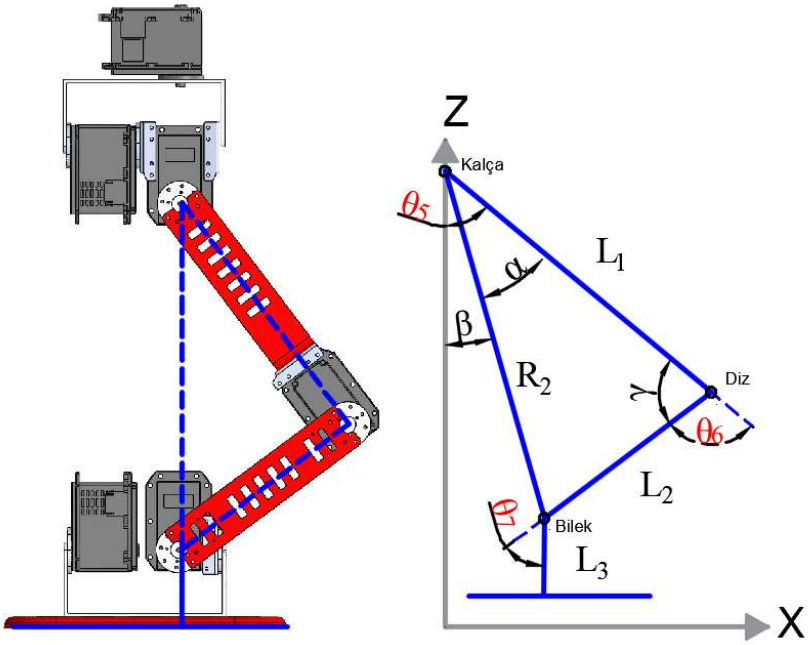
Denklem 3.8'nin çarpım sonucu Ek 1'de sunulmuştur.

3.3.2.Ters Kinematik Hesaplamaları

Ters kinematik robotların eklem dönüşüm matrislerinin son çerçeveden ana çerçeveye doğru yönelmesi ile yapılan hesaplama türüdür (Kucuk & Bingul, 2006). Ters kinematik hesapları eklem dönüşüm matrisleri ile kullanılan yönteme alternatif olan trigonometrik yöntem ile açı ve konum bilgileri dahil edilerek hesaplanmıştır.

Şekil 3.6'da iki ayaklı robotun yürüme salınımı boyunca değişen eklem açıları ve bacak konum bilgileri hesaplandığında denklem 3.10-3.15 elde edilir (Fahmizal &

Mayub, 2018; Yılmazlar & Kuşçu, 2021). Bu denklemlerde robot bacağının yan görünüşe göre değişen eklem açıları ve konumları hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. Bacak yan görünüşü eklem uzunlukları ve açıları.

$$\gamma = arcsin\left(\frac{L_2 sin\alpha}{R_2}\right) \tag{3.10}$$

$$\beta = arcsin\left(\frac{x'}{R_2}\right) \tag{3.11}$$

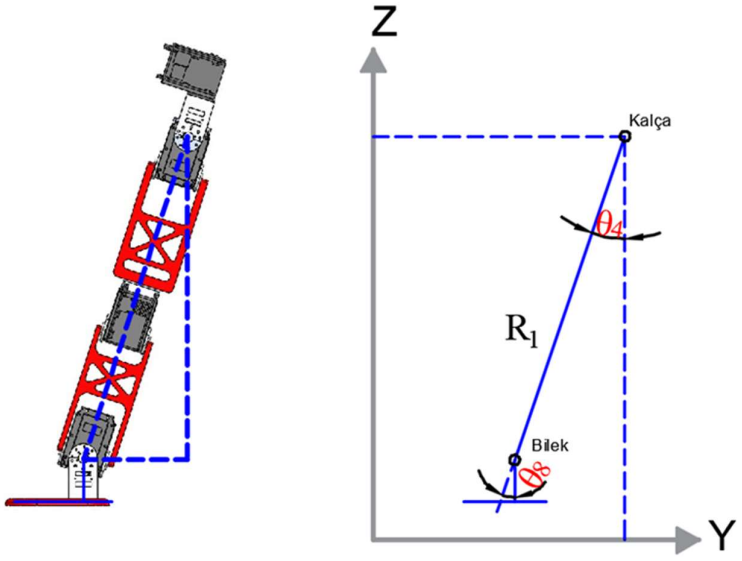
$$\alpha = arccos\left(\frac{{L_1}^2 + {L_2}^2 - {R_2}^2}{2{L_1}^2{L_2}^2}\right) \tag{3.12}$$

$$\theta_5 = \alpha + \beta \tag{3.13}$$

$$\theta_6 = \pi - \gamma \tag{3.14}$$

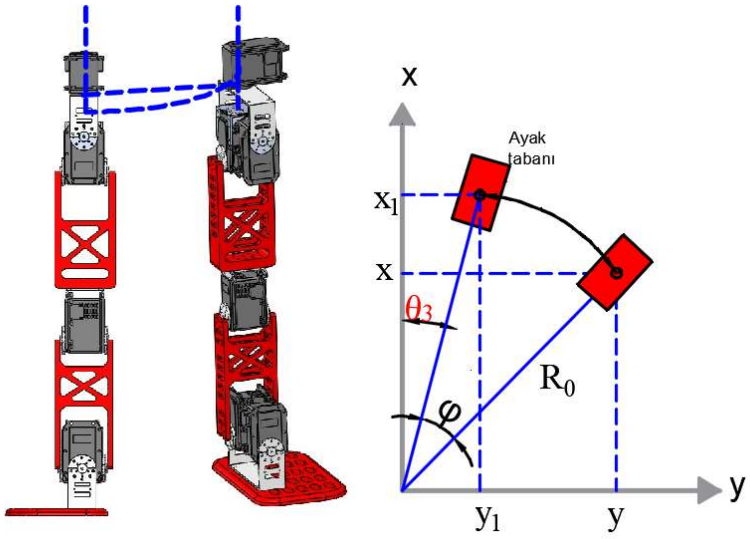
$$\theta_7 = \theta_5 - \theta_6 \tag{3.15}$$

Şekil 3.7'de robot bacağının ön görünüşünde bilek ve kalça eklemleri arasındaki açının değişkeni ve bacağın toplam uzunluğu gözükmektedir. Denklem 3.16 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Robot bacağının bilek kalça eklem uzunlukları ve açıları.

Şekil 3.8'de robot bacağının üst görünüşü ve kalçadan ayak tabanına dönme hareketi açıları ilk konumları ve son konumları gözükmektedir. Bu hesaplamalar denklem 3.17-3.21'da belirtilmiştir (Fahmizal & Mayub, 2018; Yılmazlar & Kuşçu, 2021).



Şekil 3.8. Bacak üst görünüşü eklem uzunlukları ve açıları.

$$\theta_4 = \theta_8 \tag{3.16}$$

$$\theta_3 = \text{Ayak dönme açısı} \tag{3.17}$$

$$R_0 = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3.18}$$

$$\varphi = arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \theta_3 \tag{3.19}$$

$$x_1 = R_0 sin\varphi \tag{3.20}$$

$$y_1 = R_0 sin\varphi \tag{3.21}$$

Bu denklemler sonucunda ters kinematiğin trigonometrik yöntemle hesaplanması ile eklemlerdeki açı konum değişimleri tespit edilmiştir.

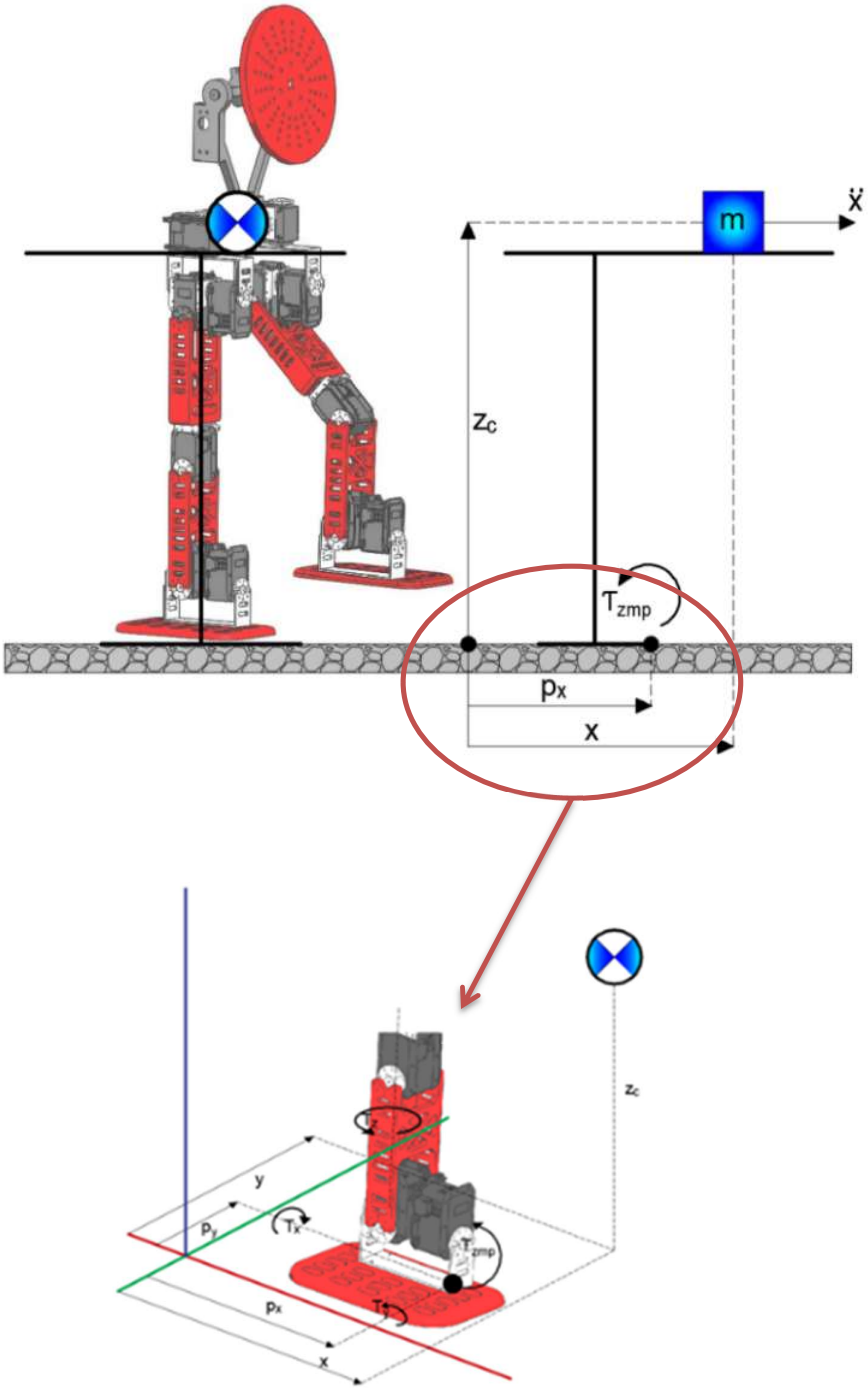
3.4. İki Ayaklı Robotun Yürüme Kontrolü

İki ayaklı robotların eklem hareketlerinin kontrolünde kinematik opsiyonlar tek başına yeterli olmamaktadır. Robotun adım hareketlerinde çeşitli yürüme fazlarından oluşmaktadır. Temel de robotun tek ayağının üzerinde ve iki ayağının üzerinde olduğu durumlara göre farklı kontrol yöntemleri sürece dahil olmaktadır. Bu çalışmada doğrusal ters sarkaç modeli ve sıfır moment noktası kullanılarak yürüyüş periyodu belirlenmiştir.

3.4.1. Doğrusal Ters Sarkaç Modeli

Sarkaç modeli fizikte ve kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir modeldir. İki ayaklı robotların denge ve kontrol süreçlerinde robotun tek ayağı üzerindeyken devrilmemesi, dengede kalması ters sarkaç modeline girmektedir (Kajita vd., 2003; Liu vd., 2017). Şekil 3.9'da cart-table olarak adlandırılan ve robotun tek ayağı üzerindeki konumunu gösterilen 3 boyutlu ters sarkaç modeli ve ayak tabanındaki moment ilişkisi gözükmektedir (Kajita vd., 2014). Şekil 3.9'deki değişkenlerin tanımları Çizelge 3.4'te açıklanmıştır. İki ayaklı robotlarda robotun devrilmeden durabilmesi için robotun kütlesinin ayak tabanında oluşturacağı döndürme momentinin sıfır olması gerekmektedir. Ayak tabanındaki bu moment noktasına sıfır moment noktası

denilmektedir (Vukobratović, 2006). Sıfır moment noktası, ters sarkaç modeli denge ilişkisi denklem 3.17-3.25 ile hesaplanır.



Şekil 3.9. Sıfır moment noktası ve kütle ağırlık merkezi transfer gösterimi.

Çizelge 3.4. Sıfır moment noktası kütle ağırlık merkezi tanımları.

Değişken sembolü	**Değişken açıklaması**
x	Kütle ağırlık merkezinin x eksenindeki konumu
y	Kütle ağırlık merkezinin y eksenindeki konumu
z_c	Kütle ağırlık merkezinin z eksenindeki konumu
m	Ağırlık merkezindeki toplam kütle
p_x	Sıfır moment noktasının x eksenindeki konumu
p_y	Sıfır moment noktasının y eksenindeki konumu
T_x	Sıfır moment noktasına göre x eksenindeki tork
T_y	Sıfır moment noktasına göre y eksenindeki tork
T_z	Sıfır moment noktasına göre z eksenindeki tork
T_{zmp}	Sıfır moment noktasındaki bileşke tork

Ayak tabanına etkileyen x ve y eksenindeki tork ilişkisi denklem 3.22 ve 3.23'te gözükmektedir.

$$\tau_x = mgp_y \tag{3.22}$$

$$\tau_y = mgp_x \tag{3.23}$$

Kütle ağılık merkezi ekseni sabit kabul edildiğinde ağırlık merkezi eksendeki ağırlık ve ivmenin ayak tabanı üzerindeki etkisi denklem 3.24 ve 3.25'teki gibi açıklanmıştır.

$$\ddot{y} = \frac{g}{z_c} y - \frac{1}{mz_c} \tau_x \tag{3.24}$$

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_c} x - \frac{1}{mz_c} \tau_y \tag{3.25}$$

Kütle ağılık merkezinin konumu ve ayak tabanındaki tepki noktaları arasındaki ilişki denklem 3.26 ve 3.27'deki gibi açıklanmıştır (Kajita vd., 2003).

$$\ddot{y} = \frac{g}{z_c}(y - p_y) \tag{3.26}$$

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_c}(x - p_x) \tag{3.27}$$

Şekil 3.9'de gözüken cart-table modelinde robotun ağırlık merkezi konumu ve ayak tabanı arasındaki ilişkiyi sıfır moment noktasına göre alındığında denklem 3.28 elde edilmiştir (Kajita vd., 2003).

$$\tau_{zmp} = mg(x - p_x) - m\ddot{x}z_c = 0 \tag{3.28}$$

Bu denklem ilişkisi ile yürüme salınımındaki hareket ivmesi ile kütle ağırlık merkezi konumu arasındaki ilişkiyi denklem 3.29 ve 3.30 ile tespit edilmiştir (Kajita vd., 2003).

$$p_x = x - \frac{\ddot{x}z_c}{g} \tag{3.29}$$

$$p_y = y - \frac{\ddot{y}z_c}{g} \tag{3.30}$$

3.4.2. ZMP Takip Kontrolü

Sıfır moment noktası ve kütle ağırlık merkezi arasındaki ilişki blok şeması olarak Şekil 3.10'da gözükmektedir. COM merkezinin yatay eksendeki ivmesi u_x olarak tanımlandığında denklem 3.31 ile ifade edilir (Kajita vd., 2003).

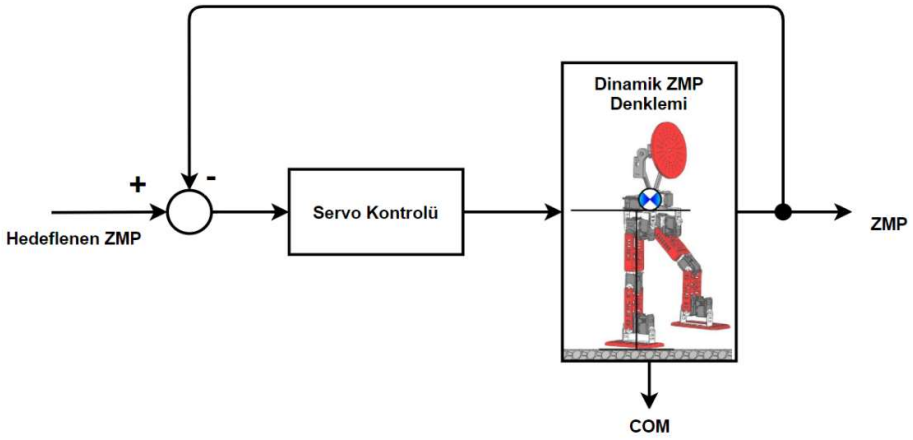
$$u_x = \frac{d}{dt}\ddot{x} \tag{3.31}$$

u_x değişkeni denklem 3.29'da yerine konulup, ZMP eşitliğinin durum uzay matrisi denklem 3.32 ve 3.33 ile gösterilir (Kajita vd., 2003).

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x \tag{3.32}$$

$$\mathrm{p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{z_c}{g} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

Denklem 3.32 ve 3.33 kullanılarak yürüme döngüsündeki ZMP takibi ve kontrollü gerçekleşmektedir.



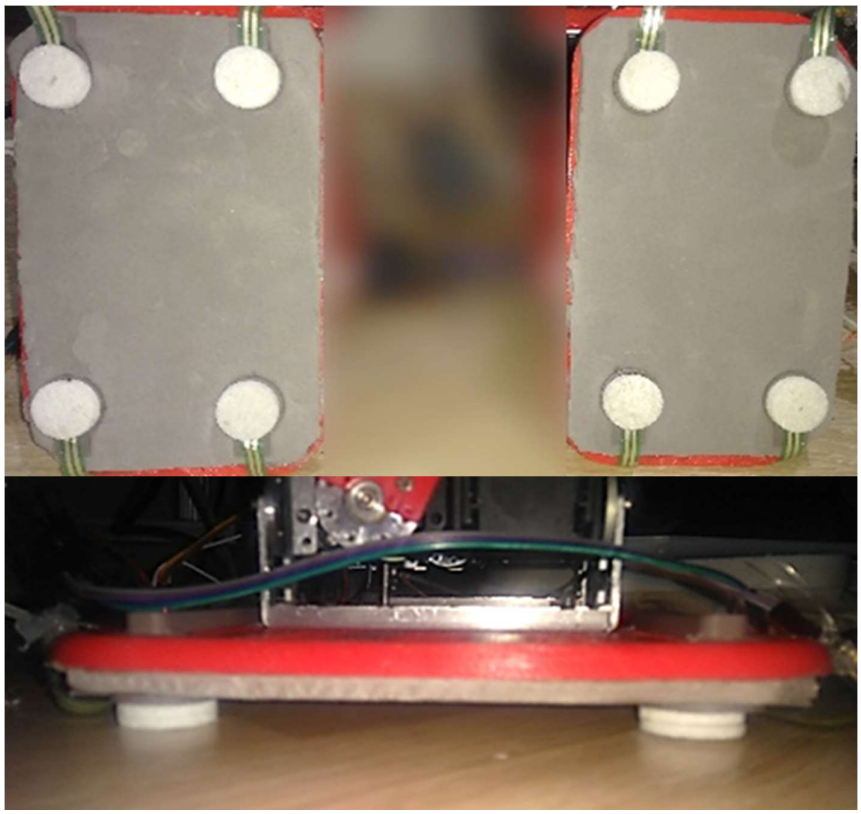
Şekil 3.10. ZMP ve COM kontrol bloğu.

3.5. Sıfır Moment Noktasının FSR ile Ölçümü

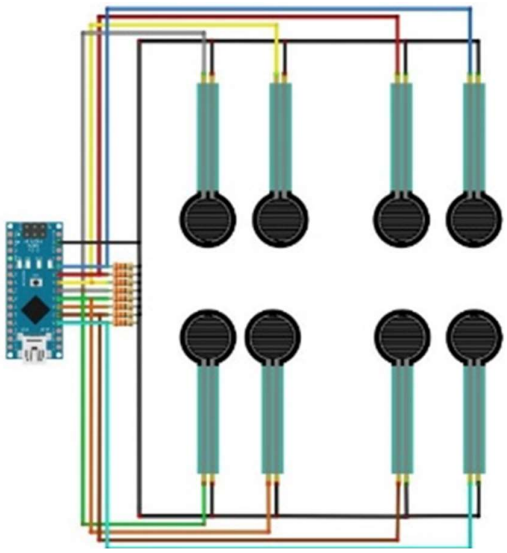
İki ayaklı robotun yürüme salınımlarına göre ZMP konumu değişmektedir ve teorik olarak denklem 3.29 ve 3.30 ile hesaplanabilmektedir. ZMP'nin konumunu gerçek zamanlı olarak takibi yapılmak istenildiğinde ayak tabanına uygulanan ağırlığın ölçümü ile hesaplanabilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada bu ölçüm FSR kullanılarak yapılmıştır. FSR kuvvet ölçümünde yaygın olarak kullanılan ince, hafif bir algılayıcıdır (Konno vd., 2000). FSR bu çalışmada Şekil 3.11'de gözüktüğü gibi robot ayak tabanında 2x4 farklı noktaya monte edilerek kullanılmıştır.

FSR'lerin kullanımı için Arduino nano kullanılarak Şekil 3.12'deki devre şemasına göre FSR bağlantısı oluşturulmuştur. Yürüme sürecinde her bir FSR üzerindeki ağırlık miktarları gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür. Ayak tabanındaki ağırlık merkezinin konumu, FSR'lerden gelen veriler ile denklem 3.34 ve 3.35'e göre hesaplanmıştır. Şekil 3.13'teki bağlantı boyutlarına göre denklem 3.34'te yürüme salınımına göre tek ayak

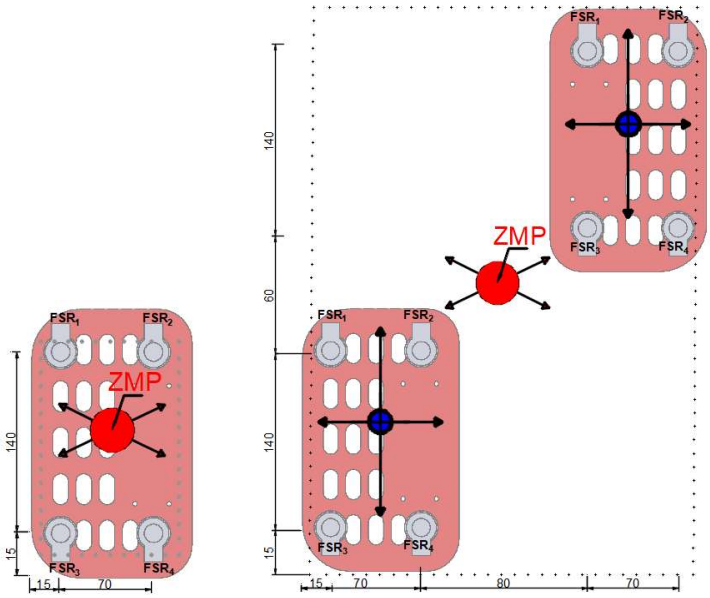
üzerindeyken ZMP noktasının koordinatlarını, denklem 3.35'de ise en uzun adım mesafesine göre iki ayak üzerindeki pozisyonuna göre ZMP koordinatları hesaplanmıştır.



Şekil 3.11. Robot ayak tabanında FSR bağlantıları.



Şekil 3.12. FSR Arduino nano devre şeması.



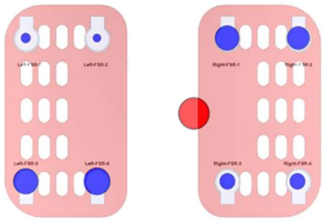
Şekil 3.13. Robot ayak tabanı FSR konumları ve ölçüleri.

$$ZMP_X = \frac{FSR_1 + FSR_3 + (FSR_2 + FSR_4)60}{FSR_1 + FSR_2 + FSR_3 + FSR_4} \quad ZMP_Y = \frac{(FSR_1 + FSR_2)120 + FSR_3 + FSR_4}{FSR_1 + FSR_2 + FSR_3 + FSR_4} \tag{3.34}$$

$$ZMP_X = \frac{(FSR_{L1} + FSR_{L3})15 + (FSR_{L2} + FSRL_4)85 + (FSR_{R1} + FSR_{R3})165 + (FSR_{R2} + FSR_{R4})235}{FSR_{L1} + FSR_{L2} + FSR_{L3} + FSR_{L4} + FSR_{R1} + FSR_{R2} + FSR_{R3} + FSR_{R4}}$$

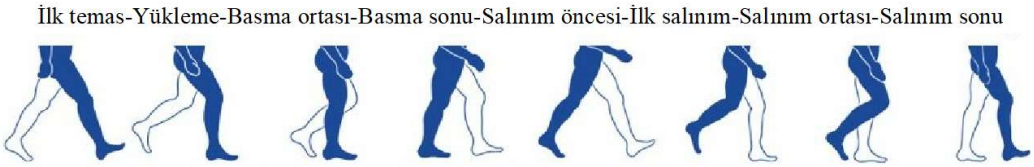
$$ZMP_Y = \frac{(FSR_{L3} + FSR_{L4})15 + (FSR_{L1} + FSRL_2)155 + (FSR_{R3} + FSR_{R4})215 + (FSR_{R1} + FSR_{R2})355}{FSR_{L1} + FSR_{L2} + FSR_{L3} + FSR_{L4} + FSR_{R1} + FSR_{R2} + FSR_{R3} + FSR_{R4}} \tag{3.35}$$

Ayak tabanı ölçülerine göre oluşturulan denklem 3.34 ve 3.35'ten elde edilen konum bilgileri Şekil 3.14'te arayüz tasarımında gözükmektedir. Şekilde kırmızı renkte gözüken çember ZMP ve mavi renkte gözüken çemberler ise FSR direnç değerlerini göstermektedir. Bir adım mesafesine göre ZMP ve ağırlık değişimlerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Arayüz ekranı MATLAB programında tasarlanarak oluşturulmuştur.

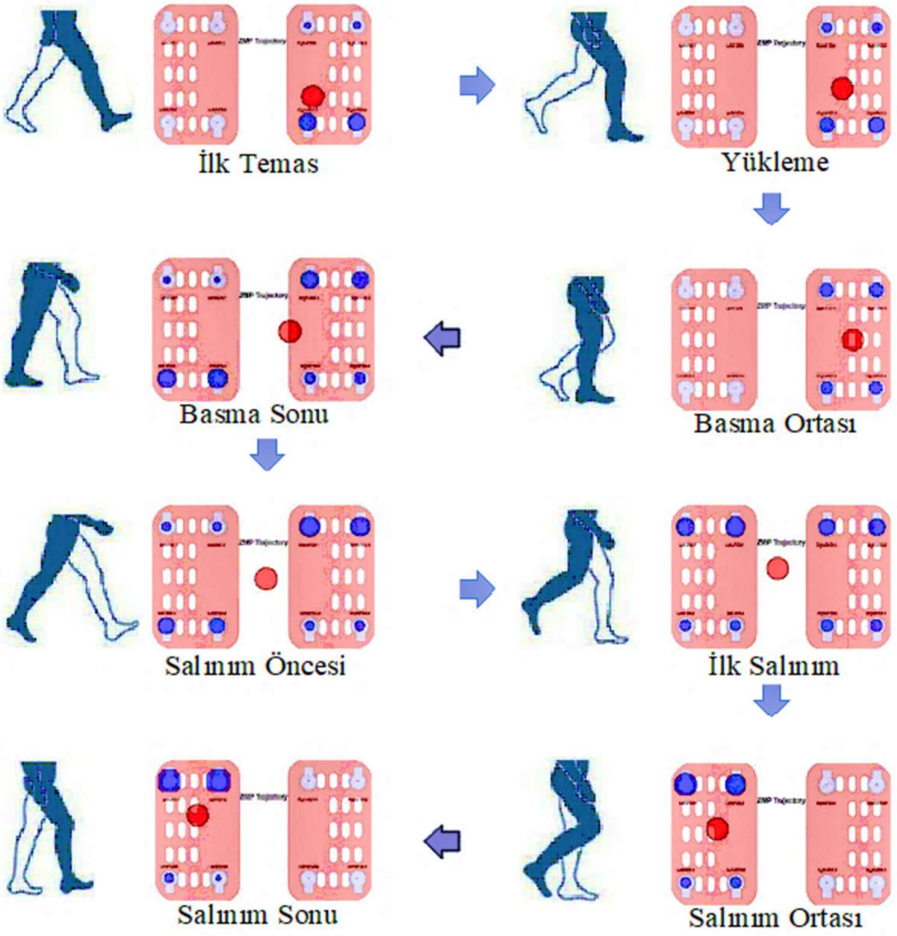


Şekil 3.14. ZMP takibi arayüz ekranı.

İki ayaklı robotun yürüme salınımı insan yürüme salınımı örnek alınarak oluşturulmuştur. İnsan yürüme salınımı Şekil 3.15'te gözüktüğü gibi 8 farklı aşamadan oluşmaktadır (Pirker & Katzenschlager, 2017). Düz yürüme hareketine göre ZMP değişimi Şekil 3.16'da analiz edilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16'da FSR'lerden alınan verilerin ZMP konumunun arayüze ve yürüme fazlarına göre değişimi



Şekil 3.15. İnsan yürüme fazları.



Şekil 3.16. İki ayaklı robotun yürüme fazlarında FSR'ye göre ZMP değişimi simülasyonu.

gözükmektedir. ZMP konumunu birçok unsur etkilemektedir. Bu unsurlar robotun boyutları, eklemlerin hareket türü, robot ağırlığı, salınımı şeklindedir. Referans olarak belirlenen robot ZMP yörüngesi bu unsurlardan dolayı farklılaşabilmektedir. ZMP yörüngesi referans yörüngeye benzedikçe robotun yörünge takibinin doğruluğu artmaktadır.

3.6. İki Ayaklı Robotun Eklem Motorları

İki ayaklı robotun yürüme hareketleri Robotis firması tarafından geliştirilen Dynamixel MX64T serisi motorlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17'de gözüken Dynamixel MX64T motorları bünyesinde ARM Cortex M3, 72 MHz, 32 bit işlemcisi olan akıllı servo motorlardan biridir. Bünyesindeki 12 bitlik mutlak enkoder ile pozisyon bilgisini ayrıca tork ve akım bilgilerini de vermektedir. Dynamixel MX-64T motorunun hareket kontrolünde kendi bünyesindeki PID kontrol birimi ile istenilen hareketi kendi geri beslemesi üzerinden kontrol ederek yerine getirmektedir. Dynamixel MX-64T motorlarının çözünürlüğü 12 bit yani 0.088° derecelik hassasiyette gerçekleşmektedir. Çok devirli, tek devirli ve ortak hareket modalarında kontrol edilebilmektedir. Motorun teknik özelliklerine ait veriler aşağıdaki Çizelge 5'te gözükmektedir (Robotis, 2021a).



Şekil 3.17. Dynamixel MX-64 servo motor.

Çizelge 3.5. Dynamixel MX-64 servo motor özellikleri.

Motor birimleri	**Özellikleri**
Ağırlık	0,165kg
Boyutlar	40.2 x 61.1 x 41mm
Dişli oranı	200:1
Kalkış torku	550Ncm (11.1 V, 3.9 A) 600Ncm (12 V, 4.1 A) 730Ncm (14.8 V, 5.2 A)
Yüksüz hızı	58dev/dk (11.1 V) 63dev/dk (12 V) 78dev/dk (14.8 V)
Radyal yük	40N (10mm dişli üzerinde)
Eksenel yük	20N
Çalışma sıcaklığı	-5, +80°C
Giriş gerilimi	10.0-14.8V (İdeal:12.0 V)
Fiziksel bağlantı	RS485 / TTL Çok aktarmalı Bus, TTL Yarım Duplex
Adres	254 adresleme (0-253)
Geri besleme	Pozisyon, Sıcaklık, Tork, Giriş voltajı
Gövde Materyali	Mühendislik plastiği (ön, orta, siyah), Metal (ön)
Dişli Materyali	Metal dişli
Bekleme akımı	100mA

3.7. ROBOTIS OpenCM9.04-C Denetleyici ve OpenCM 485 Genişletme Kartı

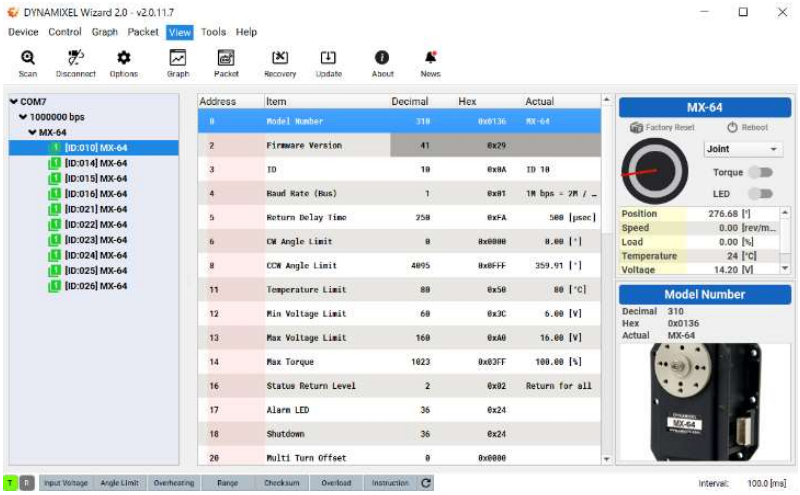
Şekil 3.18'de OpenCM9.04-C denetleyici kartı Robotis firması tarafından geliştirilen ve Dynamixel serisi motorların kontrolü için kullanılan üzerinde ARM Cortex-M3 32bit CPU'su olan kontrol ve programlama kartıdır (Robotis, 2021b).



Şekil 3.18. OpenCM9.04-C ve OpenCM 485 kart görünüşleri.

OpenCM 485 kartı, OpenCM9.04-C kartının üzerine takılarak kullanılan motor bağlantı girişlerinin arttırıldığı, besleme gerilimlerinin uygulanabileceği adaptör girişi, güç kontrol anahtarı, sıfırlama butonunu bünyesinde barındıran genişletme modülüdür (Robotis, 2021b).

Dynamixel MX64T motorları kullanılması için kimlik tanımlamalarının yapılması ve çalışma özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu işlemler gerçekleştirmek için Dynamixel Wizard programı kullanılmaktadır. Program Robotis firmasının sitesinden indirilebilmektedir. Programın arayüzü Şekil 3.19'da gözükmektedir. Wizard programı ile servo motorların haberleşmesi Şekil 3.20'de TTL (Transistor, Transistor Lojik) haberleşme mantığı ile USB üzerinden bilgisayar bağlantısı ile gerçekleştirilmektedir.



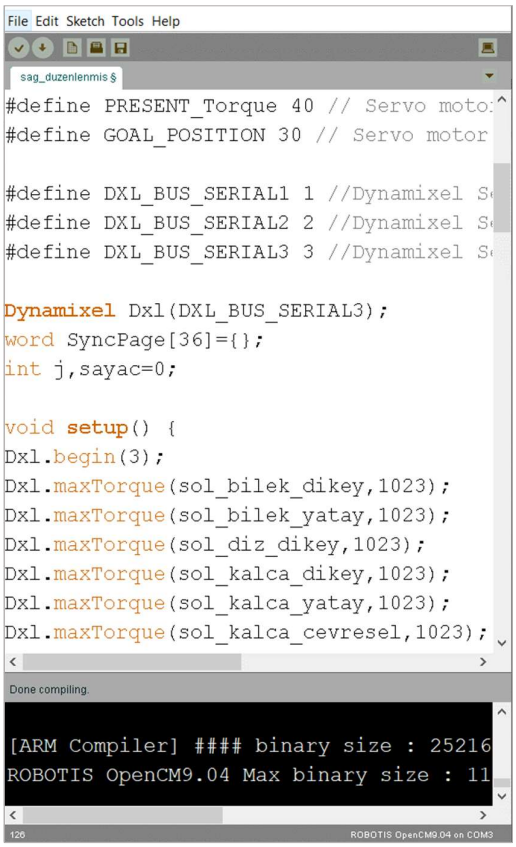
Şekil 3.19. Dynamixel Wizard ID tanımlama arayüzü.



Şekil 3.20. Dynamixel Wizard ile TTL-USB haberleşmesi.

3.8. Robotis OpenCM IDE

Kimlik tanımlaması yapılan motorların istenilen komutları yerine getirmesi için yazılım ile kontrol edilmesi gerekmektedir. Yazılım ve kodlama işlemi Robotis OpenCM IDE derleyicisi üzerinden C programlama dili ile gerçekleştirilmektedir. Açık kaynak kodlu olarak paylaşılan program Robotis firmasının internet sitesinden indirilebilmektedir. Şekil 3.21'de Robotis OpenCM IDE derleyicisinin arayüzü gözükmektedir.

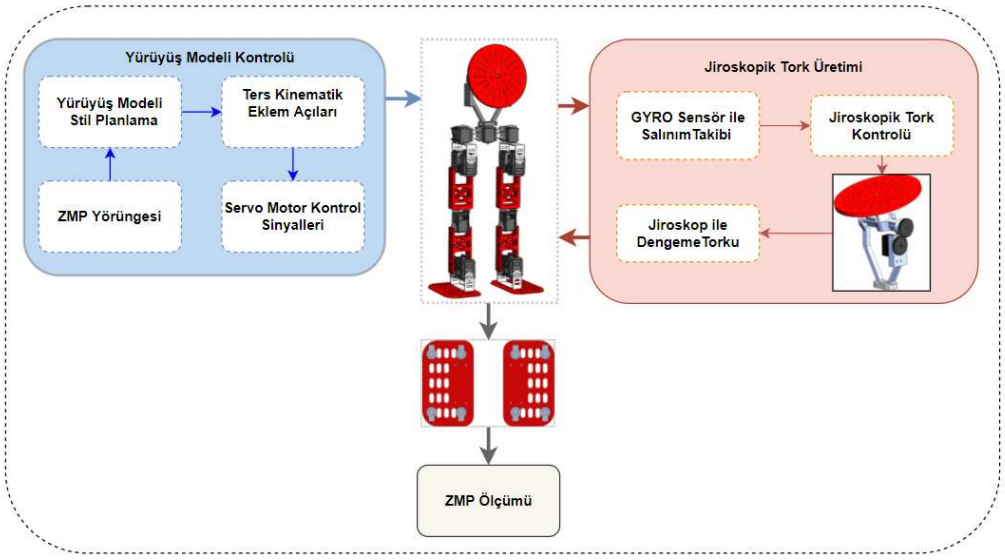


Şekil 3.21. Robotis OpenCM IDE arayüzü.

3.9. İki Ayaklı Robotun ve Jiroskop Mekanizmasının Kontrolü

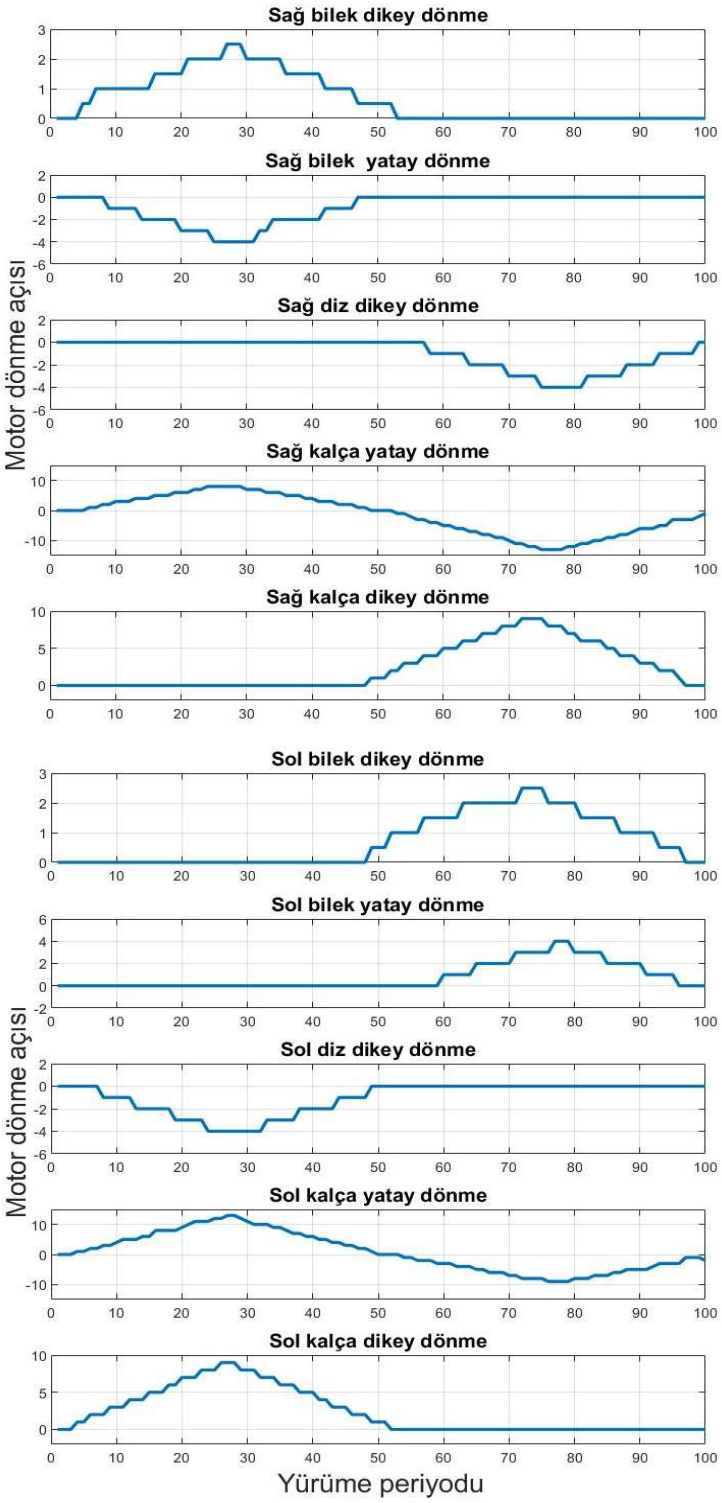
İki ayaklı robotun yürüme ve dönme hareketlerinin ve jiroskop mekanizmasının tork kontrolü bütünleşik bir kontrol yapısı ile gerçekleşmektedir. İki ayaklı robottaki eklem hareketleri kontrolü için kullanılan 12 adet servo motorun hareket kontrolü, jiroskop mekanizmasının DC motor ile disk hız kontrolü ve servo motor ile disk eğim

kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin kontrol blok diyagramı Şekil 3.22'de gözükmektedir.

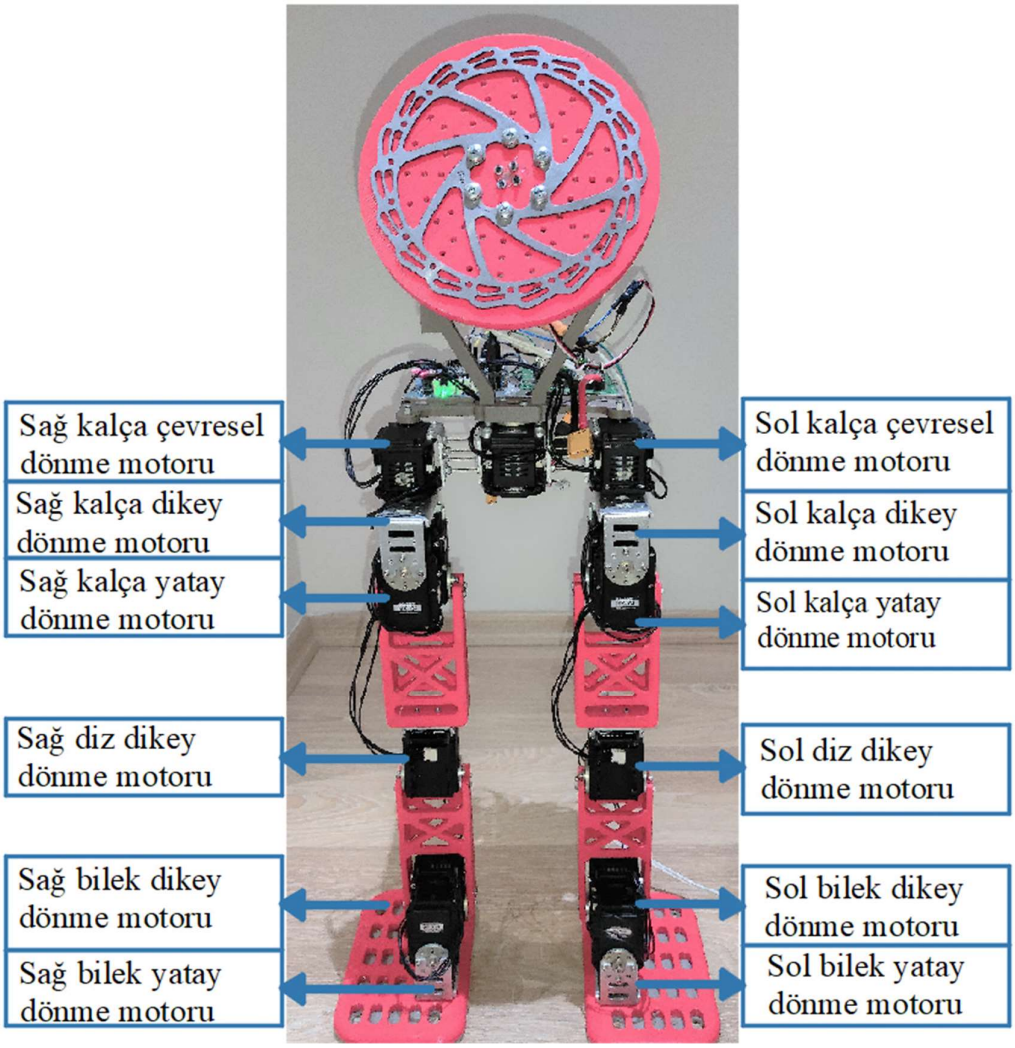


Şekil 3.22. İki ayaklı robotun jiroskop mekanizması ile kontrollü blok diyagramı.

Blok diyagramına göre kontrol organları incelendiğinde ilk olarak robotun hareket yörüngesi oluşturulur ve robotun hareket stilinin, hızının, adım sayısının belirlenerek yürüme modeli belirlenir. Yürüme modeline göre robotun hareket sürecindeki eklem açıları değişimi tespit edilir. Robotun hareket etmesini sağlayan 12 adet servo motorun kontrolü eklem açılarına göre gerçekleştirilerek yürüme hareketi meydana gelir. Bu kontrol işlemi Ek 2, Ek 3 ve Ek 4'te verilen yazılım kodlarına göre gerçekleştirilmiştir. Düz yürüme hareketinin gerçekleştiği bir adımlık harekete ait 10 adet eklem servo motorların açıları Şekil 3.23'te gözükmektedir. Eklem isimlendirmeleri Şekil 3.24'teki tanımlamalara göre yapılmıştır.



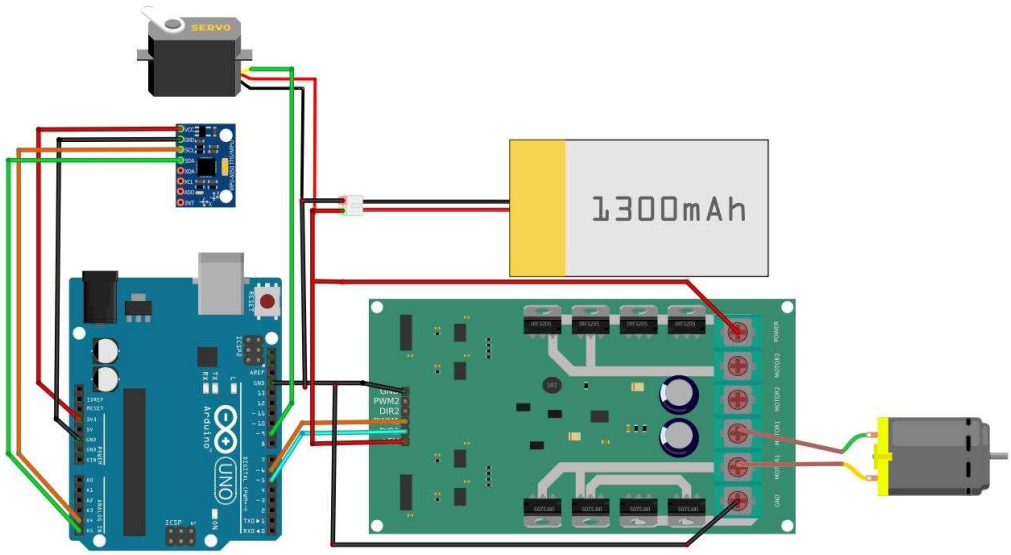
Şekil 3.23. Bir adıma ait düz yürüme eklem açı değişimleri.



Şekil 3.24. İki ayaklı robotun eklem motor tanımları.

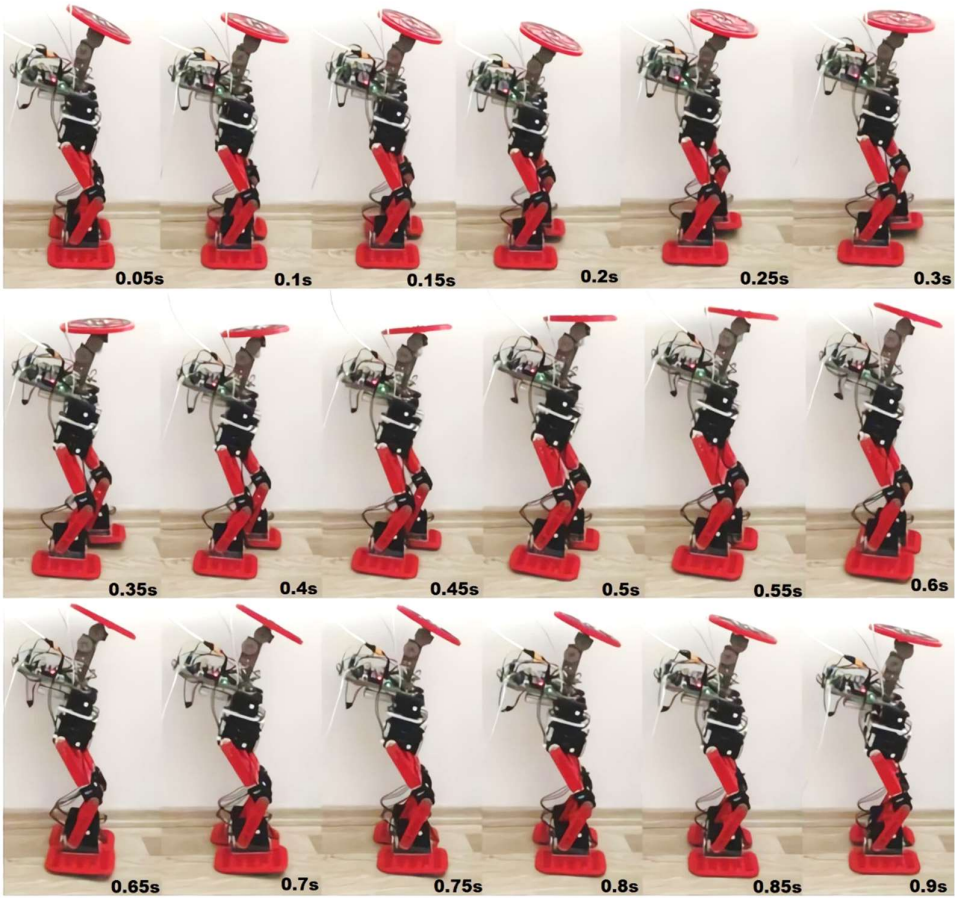
Düz yürüme hareketinin gerçekleştirilmesi ile robotun hareket salınımı başlamaktadır. Hareket salınımı sonucu jiroskop mekanizması kontrolü devreye girmektedir. Tasarlanan jiroskop mekanizmasında diskin dönme hızı, servo motorun dönme hızı ve yön kontrolü Şekil 3.25'te gözüken elektronik devre şemasına göre yapılmıştır. Kontrol edilebilir torklu jiroskop mekanizmasının üreteceği tork miktarı iki ayaklı robotun yürüme ve dönme hareketlerindeki salınımına göre değişmesi istenmektedir. Bu hareketlerin algılanması amacıyla MPU6050 sensörü kullanılmıştır. MPU6050 sensörünün ölçmüş olduğu eğilme, sarsılma, itilme gibi denge durumunun değiştiği bilgiler Arduino Uno kontrol kartı aracılığı ile kontrol edilmiştir. Ölçülen veriye göre jiroskop mekanizmasındaki servo motorun yönü, disk hızı kontrol programına göre

belirlenmiş ve tork üretimi gerçekleştirilmiştir ayrıca Arduino Uno ile OpenCM9.04-C kartı ile UART seri veri yolu (RX-TX) ile haberleştirilerek kontrol edilmiştir. Jiroskop mekanizmasının kontrol yazılımı Ek 5'te verilmiştir. Jiroskop mekanizmasının kontrolü ile jiroskopik tork üretilmiştir. Üretilen bu tork değerinin etkileri bölüm 4 yapılan deneyler ile incelenmiştir (Yilmazlar vd., 2021).

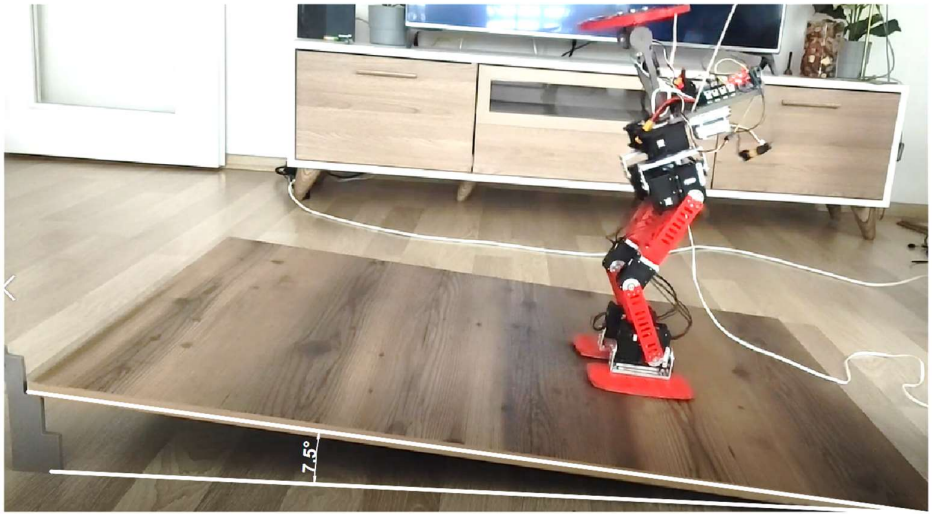


Şekil 3.25. Kontrol edilebilir momentli jiroskop mekanizması devre şeması.

Şekil 3.26'da iki ayaklı robotun bir adım hareketine ait ağır çekim görüntüleri yer almaktadır. İki ayaklı robotun bir adım hareketi yaklaşık 0,9sn zaman diliminde gerçekleşmektedir. Jiroskop mekanizmasının mafsal hareketi de bu zaman aralığında değişmektedir. Şekil 3.27'de ise 5° ve 7,5° eğime ayarlanabilen platformda eğimli yürüme hareketine ait resim gözükmektedir. Daha yüksek eğim derecelerinde ise iki ayaklı robotun dengesi bozulmakta ve devrilebilmektedir. Bu durum eklem motorlarının gücü ve robot ağırlık merkezinin konum değişiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.26. İki ayaklı robotun ağır çekim adım hareketi.



Şekil 3.27. İki ayaklı robotun eğimli yürüyüşü.

BÖLÜM 4

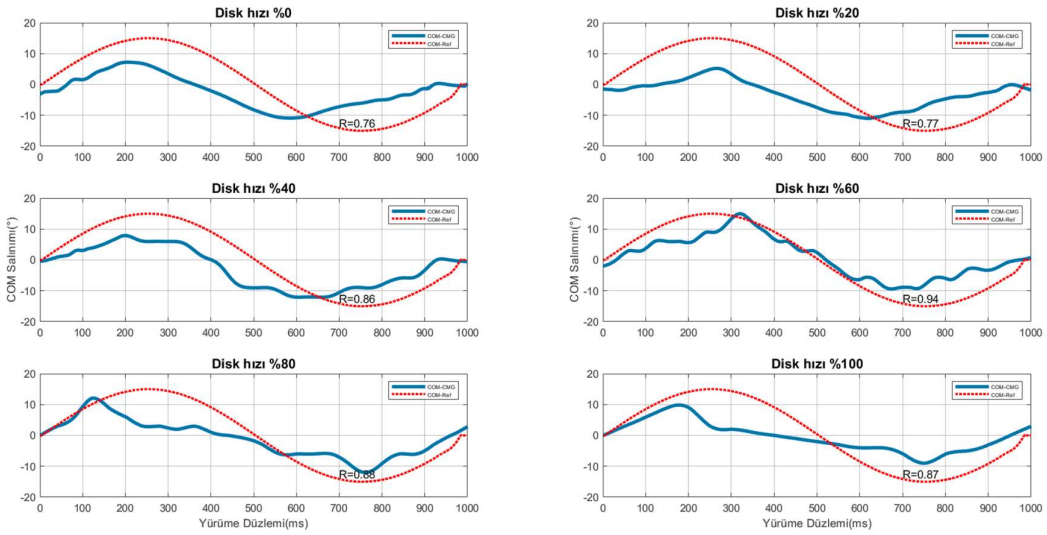
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

İki ayaklı bir robotun ve jiroskopik dengeleme sisteminin tasarımından sonra jiroskopik etkinin robotun performansında yapmış olduğu değişiklikleri belirlemek için çeşitli deneyler ve ölçümler yapılmıştır. Bu deneyler ve ölçümler jiroskopik etkinin robot yörüngesi üzerindeki etkisini, robotun hareket salınımına etkisi, yürüme hızına etkisi, robot eklem torkları değişimine etkisi ve robotun bozucu darbelere karşı gösterdiği tepkiyi ölçmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler alt başlıklarda açıklanmıştır.

4.1. Jiroskopik Etkinin Robot Yörüngesi ve Yürüme Hızı Üzerindeki Etkisi

Kontrol moment jiroskop mekanizmasının üretmiş olduğu torkun robot yörüngesi üzerindeki etkisini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde jiroskop disk hızı 0dev/dk'dan 1000dev/dk kadar kademeli olarak değiştirilmiştir. 6 farklı oranda değiştirilen disk hızında oluşan jiroskopik torkun robot yörüngesine olan etkisi incelenmiştir. Şekil 4.1'de bir adım hareketine ait COM salınımı (mavi) ve referans olarak belirlenen COM yörüngesine (kırmızı) ait grafikler gözükmektedir. Robotun COM salınımı robot üzerindeki MPU6500 gyro sensörü üzerinden gerçek zamanlı olarak elde edilen veriler ile hesaplanmıştır. İdealde COM salınımı ve COM yörüngesinin aynı yörüngede olması istense de sürtünme etkileri, salınım tepkileri, titreşim gibi faktörlerden dolayı aralarında farklılıklar oluşmaktadır. Bu iki sinyal arasındaki benzerlik oranlarını belirlemek için ölçülen COM sinyali ile referans COM sinyalinin korelasyonu MATLAB programında hesaplanmıştır. Korelasyon değerleri Şekil 4.1'de grafiğin üzerinde belirtilmiştir.

Yapılan bu deneyle disk hızının %0 olduğu yani jiroskopik torkun üretilmediği durumda COM salınımının yörünge referansı ile arasındaki korelasyon R=0,76 hesaplanmıştır. Disk hızının %20, %40 ve %60 olduğu durumda bu değer R=0,77, R=0,85 ve R=0,93 olarak hesaplanmıştır. Bu hız değerlerine kadar yapılan deneylerde jiroskop mekanizmasının disk hızı arttıkça referans COM yörüngesine uyumluluğu artmakta olduğunu, jiroskopik etkinin yürüme sürecine katkı sağladığını göstermiştir. Disk hızı %80 ve %100 oranlarına çıkartıldığında korelasyonların R=0,87 ve R=0,86 değerinde düştüğü hesaplanmıştır. Üretilen yüksek torkun yörüngeye uyumluluğu azalttığı anlaşılmıştır. Bu deneyler sonucunda tasarlanan CMG mekanizmasının üretmiş olduğu torkun belirli bir orana kadar yürüme sürecine katkı sağladığı, daha yüksek değerlerde iki ayaklı robotun yürüme sürecini negatif yönde etkilediği belirlenmiştir. Deneylerdeki en yüksek korelasyonun %60 disk hızında elde edildiği için bu değerde üretilen tork değeri tasarlanan sistem için ideal değer olarak belirlenmiştir.

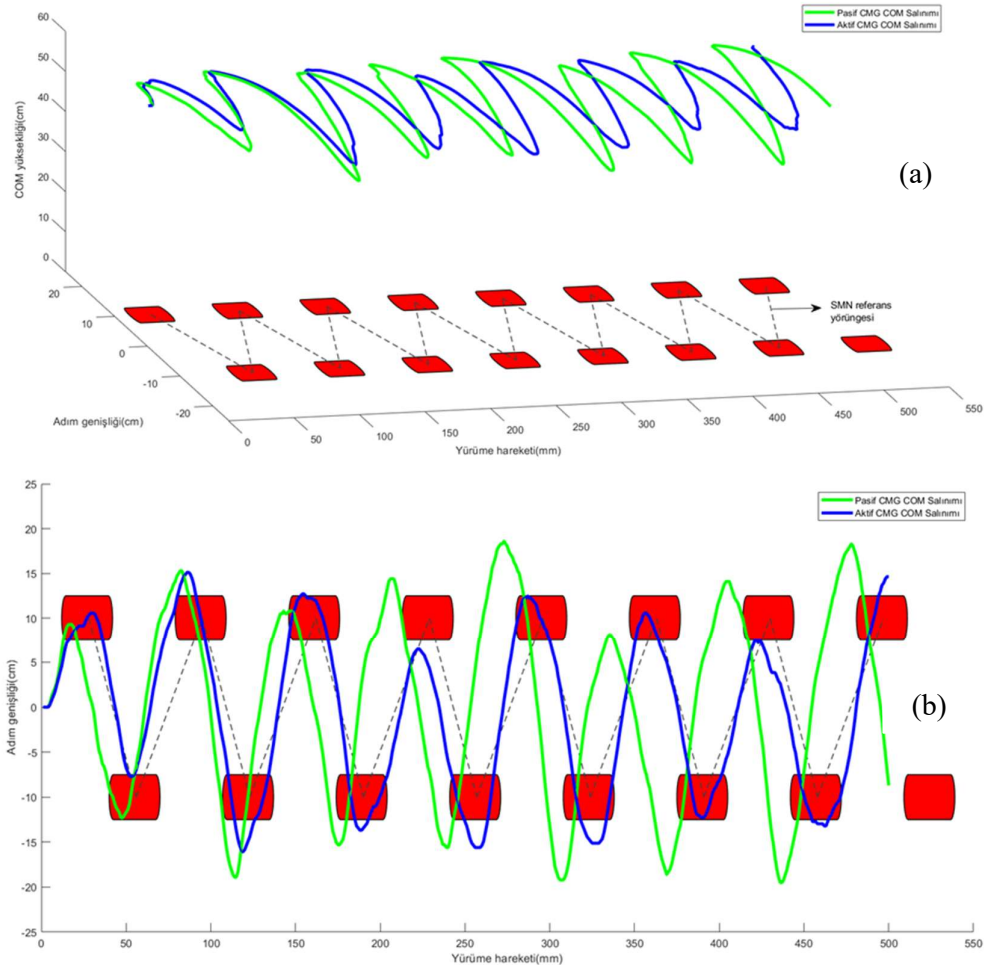


Şekil 4.1. Jiroskopik tork etkisi ile COM salınımları değişimi.

Düz yürüme hareketine ait COM salınımı Şekil 4.2a'da gözükmektedir. Şekil 4.2'de kırmızı ile gösterilen alanlar robot adımları temsil etmekte ve sıfır moment referans yörüngesi ile planlanmaktadır. Yeşil eğri ile gösterilen CMG'nin pasif olduğu duruma ait COM salınımı, mavi ile gösterilen eğri ise CMG'nin aktif olduğu yani jiroskopik torkun sürece dahil edildiği COM salınımını göstermektedir. 3 boyutlu ve üst görünüşleri verilen yürüme hareketi COM salınım grafiğine göre yapılan incelemelerde CMG'nin aktif

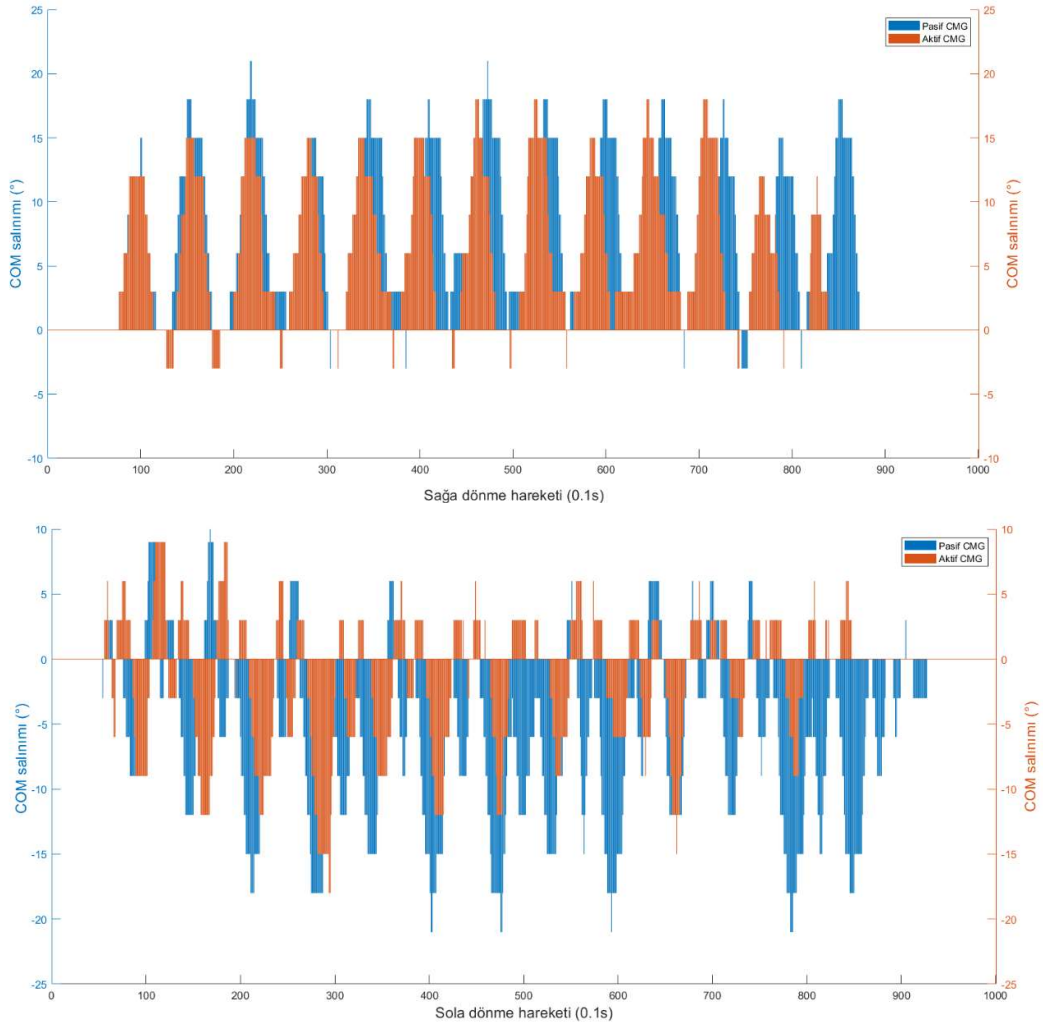
olduğunda COM salınımının daha azaldığı ve yürüme hareketinin daha hızlı bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmektedir.

ZMP yörüngesi, aktif CMG hareket ve pasif CMG'li hareketlerinin karekök ortalamaları (RMS) sırasıyla 5,79, 8,95 ve 10,52 şeklinde hesaplanmıştır. Robot hareket planında 5,79 RMS değeri jiroskopik tork üretilmediğinde 10,52 değerinde hesaplanmıştır. Bu değer jiroskopik tork etkisi ile 8,95 değerine düşmüş ve robotun hareket salınımının referans değerine yaklaşmasını sağlamıştır. Bu hesaplama ve karşılaştırmalar ile de jiroskopik etkinin harekete olan katkısı gözükmektedir. Jiroskopik etkinin adım hızı üzerine etkisi incelendiğinde Şekil 4.2b'de salınımlar arasında faz farkı gözükmektedir. Bu fark değerinden de anlaşılacağı gibi jiroskopik etkinin aktif olduğu durumda yürümenin az bir oranda olsa da daha hızlı gerçekleştiği gözükmektedir.



Şekil 4.2. Jiroskop etkisinin yürüme hareketi salınımı üzerindeki etkisi.

İki ayaklı robotun sağa ve sola 90° dönme hareketinde jiroskopik tork etkisi incelendiğinde CMG mekanizmasının pasif ve aktif olduğu durumlarda COM salınımları ölçülmüştür. Şekil 4.3'teki grafikte sağa dönme hareketini göstermektedir. Turuncu bar grafiğinde %60 disk hızında aktif CMG durumundaki COM salınımı, mavi bar grafiğinde ise %0 disk hızında pasif CMG durumundaki COM salınımı gözükmektedir. İki salınım sinyalinin RMS değerleri alınmıştır. Pasif CMG RMS değeri 8,39 olup aktif CMG RMS değeri ise 7,90 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan da anlaşılacağı üzere jiroskopik etkinin COM salınımını azaltarak daha kararlı dönme hareketi sağladı tespit edilmiştir. Ayrıca dönme hareketini tamamlama süresi incelendiğinde aktif CMG durumunda dönme hareketini yaklaşık %10 değerinde daha hızlı tamamladığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.3. Sağa ve sola dönme hareketinde COM salınımları.

Sola dönme hareketinde COM salınımları grafikleri Şekil 4.3'te gözükmektedir. Jiroskopik etki aktif CMG ve pasif CMG durumlarında incelenmiştir. COM salınımlarının RMS değerleri hesaplandığında sola dönme hareketinde pasif CMG durumundaki RMS değeri 8,40 aktif CMG durumundaki RMS değeri 4,92 olarak hesaplanmıştır. Ortalama kök değerinden de anlaşılacağı gibi jiroskopik etkinin sola dönme hareketinde de COM salınımını azalttığı daha kararlı dönme hareketine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Dönme hareketinin tamamlanma süresinde ise yaklaşık %15 değerinde hız kazandırdığı gözlemlenmiştir.

4.2. Jiroskopik Etkinin Düz Yürüme Hareketinde Robot Eklem Motorları Üzerindeki Etkisi

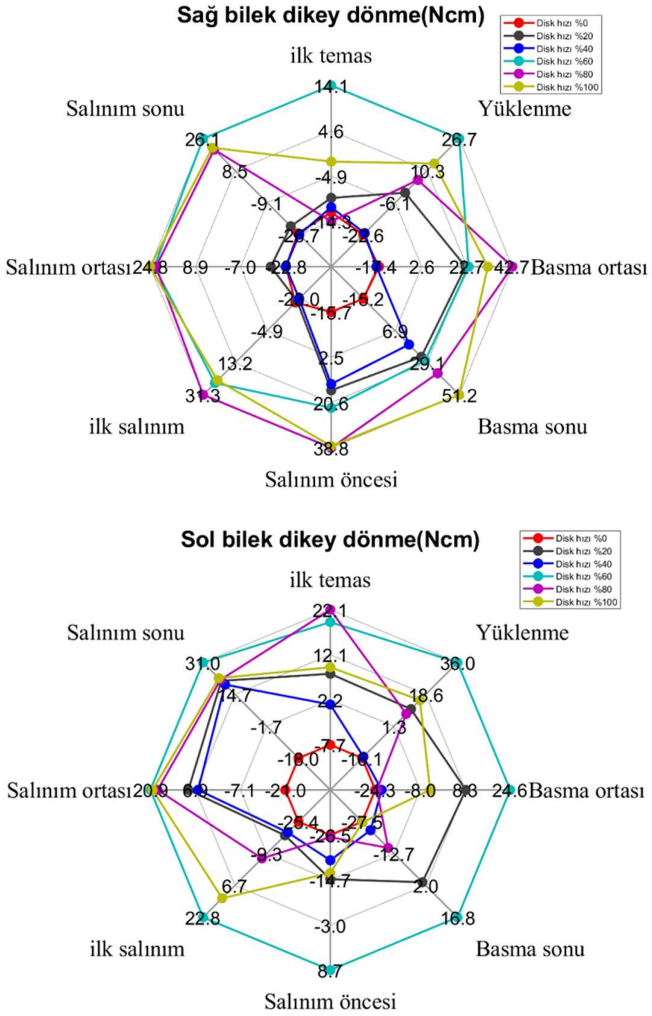
İki ayaklı robotun hareket etmesini sağlayan Dynamixel MX64 servo motorlarının yürüme stiline göre üretmiş oldukları tork değerleri değişmektedir. Bu tork değerlerinin ölçümü ise Dynamixel MX64 motorunun tork geri beslemesi ile yapılabilmektedir. Bu işlem Robotis_OpenCM derleyicisi üzerinden seri port okuma ile gerçekleştirilmiştir. Düz yürüme, sağa ve sola dönme hareketlerinde 12 adet servo motorum tork bilgileri gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür. Bu veriler yürüme faz diyagramlarına göre oranlanmış ve MATLAB programı ile radar diyagramlarında gösterilmiştir.

Veri analizinde jiroskopik etkinin motor torkları üzerinde yapmış olduğu değişimi daha iyi kanıtlayabilmek için yörünge analizinde olduğu gibi 6 farklı oranda jiroskop disk hızına ait 12 adet servo motorun tork değerleri incelenmiştir. Bu incelemeler bölüm 3 Şekil 3.24'teki eklem tanımlamalarına göre alt başlıklarda sırasıyla açıklanmıştır.

4.2.1. Sağ ve Sol Bileklerin Dikey Dönme Hareketinde Tork Analizi

Şekil 4.4'teki radar diyagramına göre sağ ve sol bileklerdeki dikey dönme hareketini gerçekleştiren Dynamixel servo motorlarının üretmiş olduğu tork değerleri yürüme fazlarına göre gösterilmiştir. Robot üzerindeki kontrol edilebilir jiroskop mekanizmasının diski 6 farklı hız oranında döndürülmüş ve jiroskopik tork oluşturulmuştur. Jiroskopun üretmiş olduğu bu torkun servo motorlar üzerindeki etkisi yürüme fazlarına göre karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada jiroskopik etkinin oluşmadığı disk hızının %0 olduğu tork değerleri kırmızı eğri ile gözükmekledir. Disk hızının kademeli değişimine sırasıyla siyah, mavi, turkuaz, pembe ve sarı eğrilerde ise

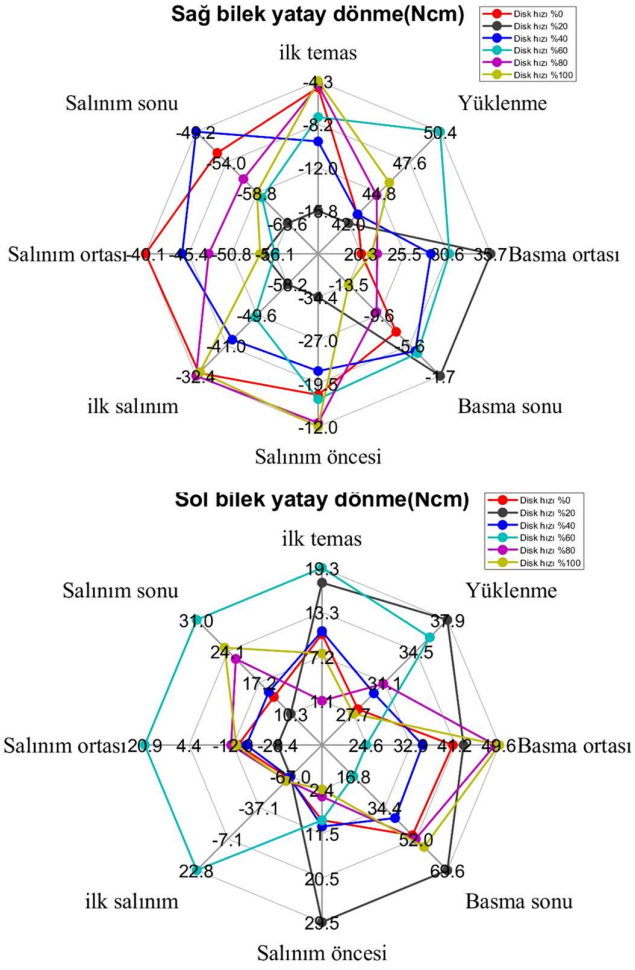
jiroskopik torkun üretildiği aktif CMG değerleri gözükmektedir. Şekil 4.4'teki radar diyagramı incelendiğinde jiroskopik etki aktif olduğunda her iki motorda da tork değerlerini değiştirecek şekilde etki ettiği gözükmektedir. Her yürüme fazında ise bu etki farklı şekilde oluşmaktadır. Etki oranı incelendiğinde ise %60 disk hızında oluşan tork değişimi daha ön plana çıktığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.4. Sağ ve sol bileklerin dikey dönme hareketine ait tork radar diyagramı.

4.2.2. Sağ ve Sol Bileklerin Yatay Dönme Hareketinde Tork Analizi

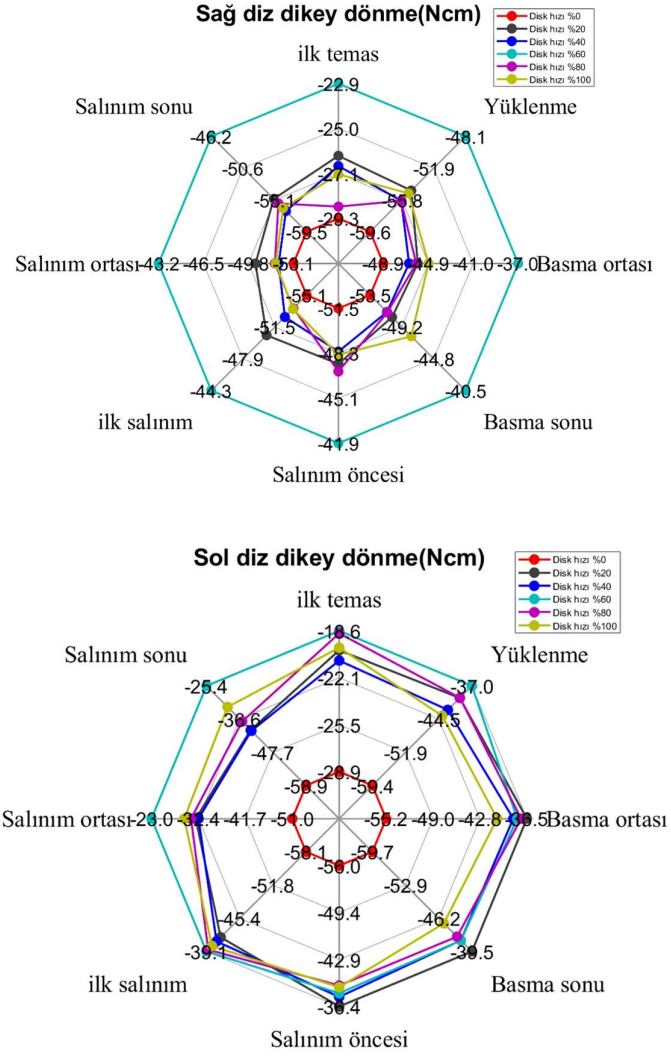
Şekil 4.5'te sağ ve sol bileklerdeki yatay dönme hareketini gerçekleştiren Dynamixel servo motorlarının yürüme fazlarına göre tork değişimleri gözükmektedir. Disk hızının %0 olduğu yani jiroskopik torkun üretilmediği değeri ile diğer disk hızlardaki tork değerleri karşılaştırıldığında; sağ bilek motorunda basma sonu, salınım öncesi ve ilk salınım fazlarında tork üretimine kısmı olarak katkı sağlamış diğer fazlarda ise jiroskopik tork değeri etkisiz kalmıştır. Sol bilek motorunda basma ortası, basma sonu, ilk salınım ve salınım ortası yürüme fazlarında jiroskop etkisinin servo motorun tork üretimini azaltarak katkı sağladığı diğer fazlarda ise tork üretimini artırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. Sağ ve sol bileklerin yatay dönme hareketine ait tork radar diyagramı.

4.2.3. Sağ ve Sol Diz Dikey Dönme Hareketinde Tork Analizi

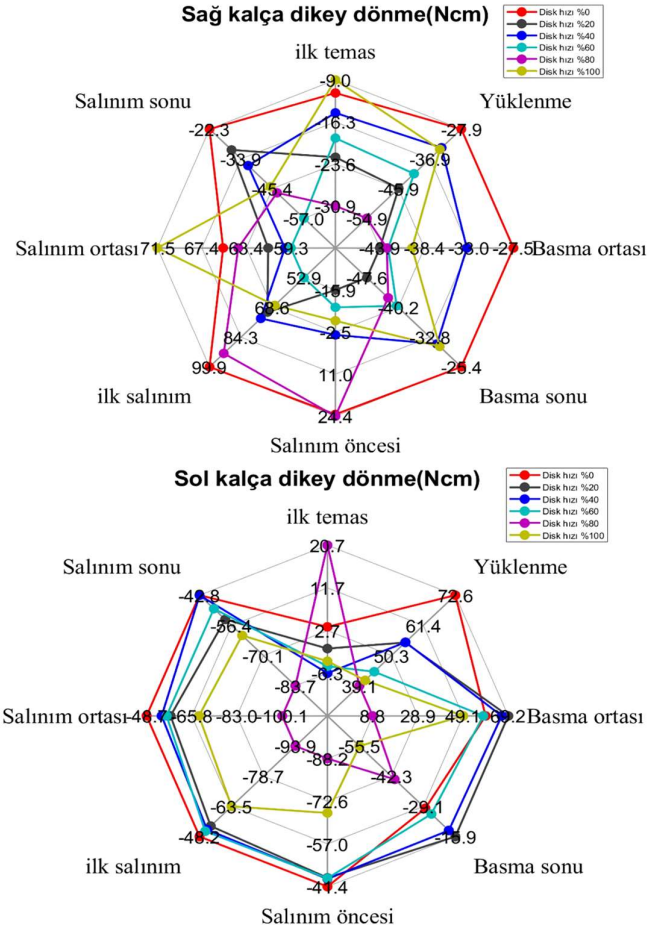
Şekil 4.6'da sağ ve sol diz eklemlerindeki dönme hareketini gerçekleştiren Dynamixel servo motorlarının yürüme fazlarına göre tork değerleri gözükmektedir. Disk hızının %0 olduğu yani jiroskopik torkun üretilmediği tork değeri ile kademeli olarak değiştirilen disk hızlarına göre değişen motor tork değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlar elde edilmiştir. Her iki motorda da jiroskopik torkun güç tüketimini azaltarak yürüme sürecine katkı sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. Sağ ve sol diz dikey dönme hareketine ait tork radar diyagramı.

4.2.4. Sağ ve Sol Kalça Dikey Dönme Hareketinde Tork Analizi

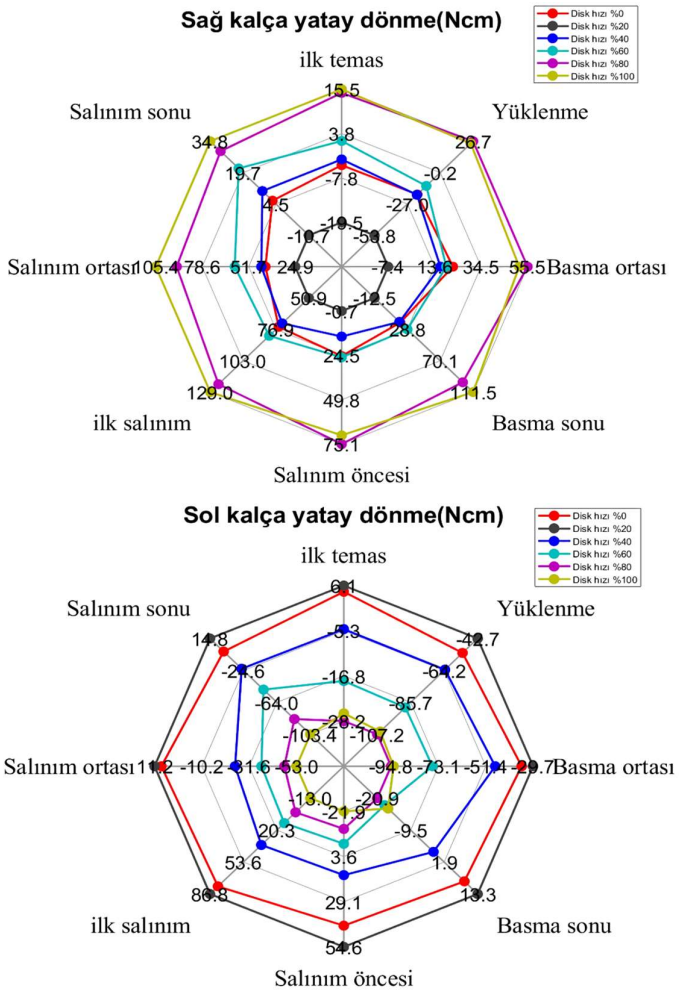
Şekil 4.7'de sağ ve sol kalça dikey dönme eklemlerindeki hareketini gerçekleştiren Dynamixel servo motorlarının yürüme fazlarına göre değişen tork değerleri gözükmektedir. Disk hızının %0 olduğu, jiroskopik torkun üretilmediği durumdaki servo motor tork değeri ile kademeli olarak değiştirilen disk hızlarına göre tork değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlar tespit edilmiştir. Sağ kalça motoru incelendiğinde salınım öncesi, ilk salınım ve salınım ortası yürüme fazlarında tork üretimine katkı sağladığı diğer fazlarda ise katkı sağlamadığı gözlemlenmiştir. Jiroskopik torkun sol kalça motorundaki etkisi ise tork üretimine ilk temas ve yüklenme fazlarında katkı sağladığı, basma ortası ve basma sonunda kısmı katkı sağladığı diğer fazlarda ise düşük ve negatif etki ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Sağ ve sol kalça dikey dönme hareketine ait tork radar diyagramı.

4.2.5. Sağ ve Sol Kalça Yatay Dönme Hareketinde Tork Analizi

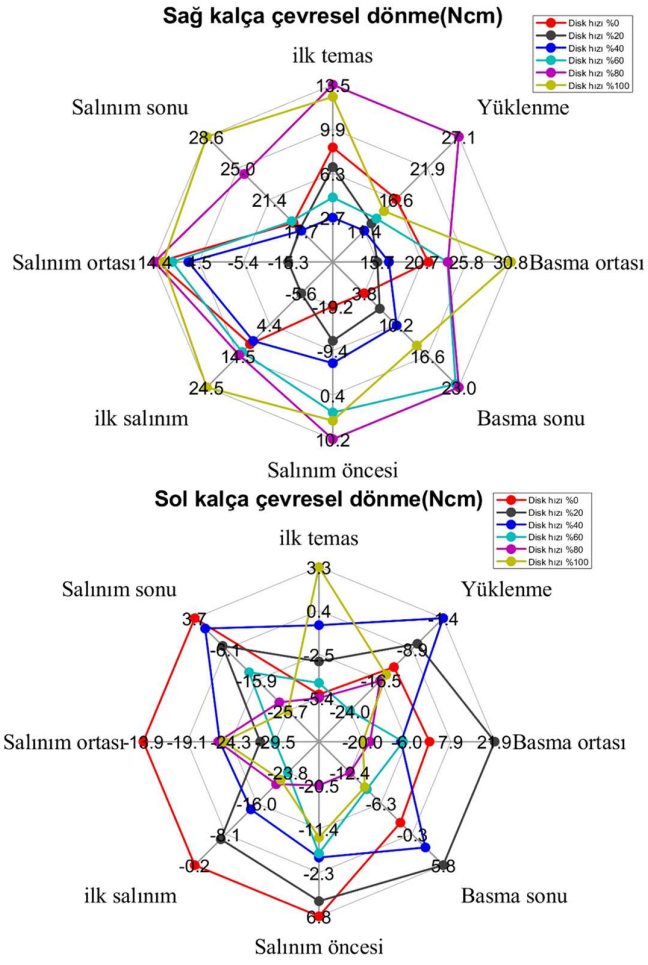
Şekil 4.8'de sağ ve sol kalça yatay dönme hareketini gerçekleştiren Dynamixel servo motorlarının yürüme fazlarına göre güç tüketimi gözükmektedir. Disk hızının %0 olduğu, jiroskopik torkun üretilmediği eklem tork değeri ile kademeli olarak değiştirilen disk hızlarına göre eklem tork değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlar gözlemlenmiştir. Sağ motorda ise ilk temas, yüklenme, basma ortası fazlarında tork üretimine katkı sağlamış, salınım öncesi ve ilk salınımda kısmı katkı sağlamış diğer fazlarda katkı sağlamamıştır. Sol motorda ilk temas, basma sonu, salınım öncesi, ilk salınım ve salınım ortası fazlarında tork üretimine katkı sağlamış diğer fazlarda ise katkı sağlamamıştır.



Şekil 4.8. Sağ ve sol kalça dikey hareketine ait tork radar diyagramı.

4.2.6. Sağ ve Sol Kalça Çevresel Dönme Hareketinde Tork Analizi

Şekil 4.9'da sağ ve sol kalça çevresel dönme eklemlerindeki hareketini gerçekleştiren Dynamixel servo motorlarının yürüme fazlarına göre güç tüketimi gözükmektedir. Disk hızının %0 olduğu yani jiroskopik torkun üretilmediği eklem tork değeri ile kademeli olarak değiştirilen disk hızlarına göre değişen eklem tork değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlar gözlemlenmiştir. Sağ motorda ilk temas, yüklenme, basma ortası, salınım öncesi ve salınım ortası yürüme fazlarında katkı sağladığı diğer fazlarda ise katkı sağlamadığı gözlemlenmiştir. Sol motordaki tork üretiminde ise ilk temas, basma ortası, salınım öncesi ve salınım sonu yürüme fazlarında jiroskopik torkun katkı sağladığı diğer fazlarda ise katkı sağlamadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Sağ ve sol kalça çevresel dönme hareketine ait tork radar diyagramı.

Çizelge 4.1'de jiroskopik etkinin iki ayaklı robotun düz yürüme hareketinde eklem motorlarının tork değişimine olan etkisi gösterilmiştir. Katkı sağlanan fazlar + işaret, sağlanmayan fazlarda ise – işareti kullanılmıştır. Tüm yürüme sürecinde ise katkı oranı her bir eklem için hesaplanmıştır. Çizelge 4.1'deki karşılaştırmaya göre jiroskopik etkinin düz yürüme hareketinde her bir eklemde en az %50 değerinde katkı sağladığı ölçülmüştür.

Çizelge 4.1. Yürüme fazlarına göre jiroskopik etkinin güç tüketimine katkısı.

Eklemler	**İlk temas**	**Yüklenme**	**Basma ortası**	**Basma sonu**	**Salınım öncesi**	**İlk salınım**	**Salınım ortası**	**Salınım sonu**	**Katkı oranı (%)**
Sağ Bilek Dikey	+	-	-	-	-	+	+	+	50
Sol Bilek Dikey	+	+	+	+	+	+	-	-	75
Sağ Bilek Yatay	+	+	-	+	+	+	-	-	62.5
Sol Bilek Yatay	-	+	+	+	+	-	-	-	50
Sağ Diz Dikey	+	+	+	+	+	+	+	+	100
Sol Diz Dikey	+	+	+	+	+	+	+	+	100
Sağ Kalça Dikey	-	-	-	-	+	+	+	+	50
Sol Kalça Dikey	-	+	+	+	+	+	+	-	75
Sağ Kalça Yatay	+	+	+	+	+	-	-	-	62.5
Sol Kalça Yatay	-	-	+	+	+	+	-	-	62.5
Sağ Kalça Çevresel	+	+	-	+	+	-	+	-	62.5
Sol Kalça Çevresel	+	+	-	+	+	-	-	-	50

Tork değişim oranlarının değerleri ise Çizelge 4.2'de açıklanmıştır. Jiroskopik torkun üretilmediği pasif CMG durumunu ile disk hızının %60 oranında kullanıldığı aktif CMG torkun üretildiği iki durum incelenmiştir. Bu iki durumdaki her bir eklem motorunda oluşan tork değerleri gerçek zamanlı olarak ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır. Bu ortalamalara göre jiroskopik etki ile değişme miktarları oranlanmıştır. 12 adet servo motorun tork değişimlerinin de ortalaması alındığında jiroskopik etkinin toplam tork değerlerini %80,52 değerinde değiştirdiği hesaplanmıştır. Bu hesaplamada referans değeri olarak her eklemin kendi pasif CMG tork değeri alınmıştır ayrıca tork yönü değişimi olduğunda tork değerini azaltarak değiştirdiği için pozitif katkı olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de gösterilen tork değerlerinin +,- işaretleri tork yönünü ifade etmektedir.

Çizelge 4.2. Servo motorlarda ortalama tork değerleri ve değişim oranları.

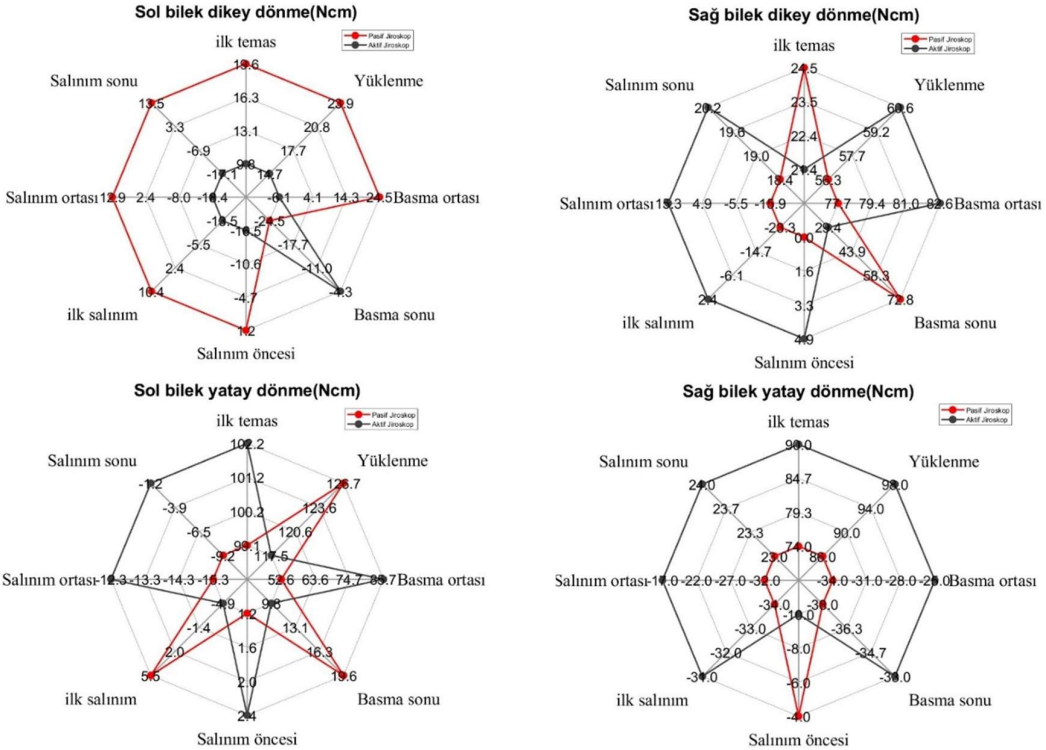
Eklem Motorları	**Pasif CMG Tork Değeri (Ncm)**	**Aktif CMG Tork Değeri (Ncm)**	**Değişim oranı (%)**
Sağ Bilek Dikey	-21	22	204,76
Sol Bilek Dikey	-21	23	209,52
Sağ Bilek Yatay	-16	-14	12,50
Sol Bilek Yatay	18	22	-22,22
Sağ Diz Dikey	-51	-41	19,60
Sol Diz Dikey	-53	-33	37.73
Sağ Kalça Dikey	7	-10	242,85
Sol Kalça Dikey	-13	-16	-23,07
Sağ Kalça Yatay	22	26	-18,18
Sol Kalça Yatay	8	-30	-475
Sağ Kalça Çevresel	9	14	-55,55
Sol Kalça Çevresel	-3	22	833,33
Tork değişim oranı: 80,52			

4.3. Jiroskopik Etkinin Dönme Hareketinde Robot Eklem Motorları Üzerindeki Etkisi

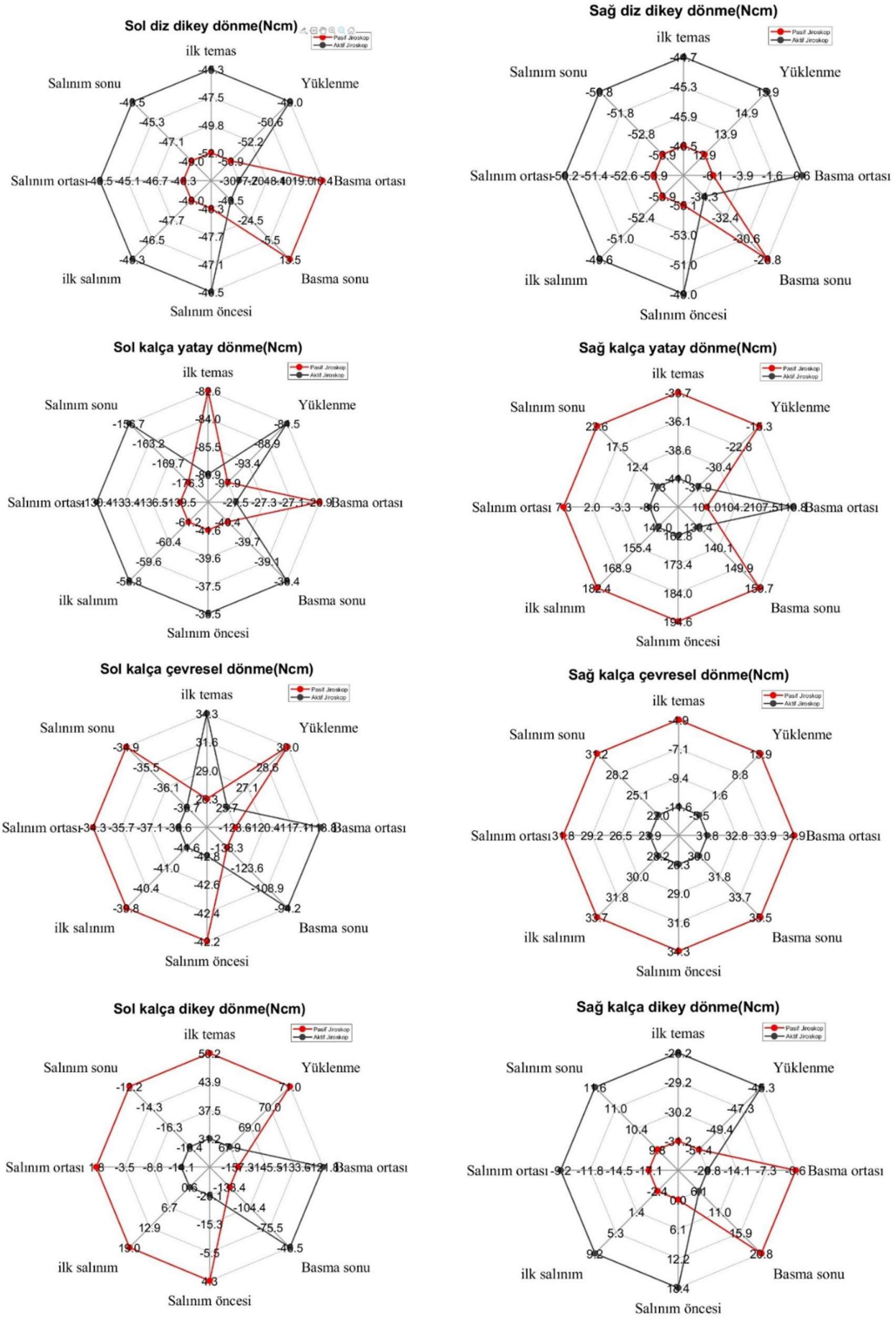
Jiroskopik etkinin düz yürüme hareketinde olduğu gibi dönme hareketinin gerçekleştiği süreçte eklem motorlarının tork değişimine de etki etmektedir. Bu etkinin oranını belirlemek için disk hızının %60 değerindeki jiroskopik tork değeri ile disk hızının %0 olduğu eklem motorlarındaki tork değişimi incelenmiştir. Bu incelemeler sağa ve sola 90° dönme hareketine göre yapılmıştır. Her dönme yönüne göre bu etki alt başlıklarda açıklanmıştır.

4.3.1. Jiroskopik Torkun Sağa Dönme Hareketinde Robot Eklem Motorlarına Etkisi

Sağa dönme hareketinde jiroskopik etkinin iki ayaklı robot motorları üzerindeki etkisini belirlemek için jiroskop diskinin hızının %0 olduğu, CMG'nin pasif kabul edildiği ve disk hızının %60 olduğu CMG'nin aktif kabul edildiği eklem motorlarının tork değerleri gerçek zamanlı olarak motor geri beslemeleri üzerinden toplanmıştır. Yürüme fazlarına göre radar diyagramlarında Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Sağa dönme hareketinde yürüme fazlarına göre motor tork değişimleri.



Şekil 4.11. Sağa dönme hareketinde yürüme fazlarına göre motor tork değişimleri.

Radar diyagramları incelendiğinde sağ bilek dikey, sol ve sağ bilek yatay, sol diz dikey eklemlerinde motor torkları negatif oranda değişmiştir. Diğer eklemlerde ise CMG

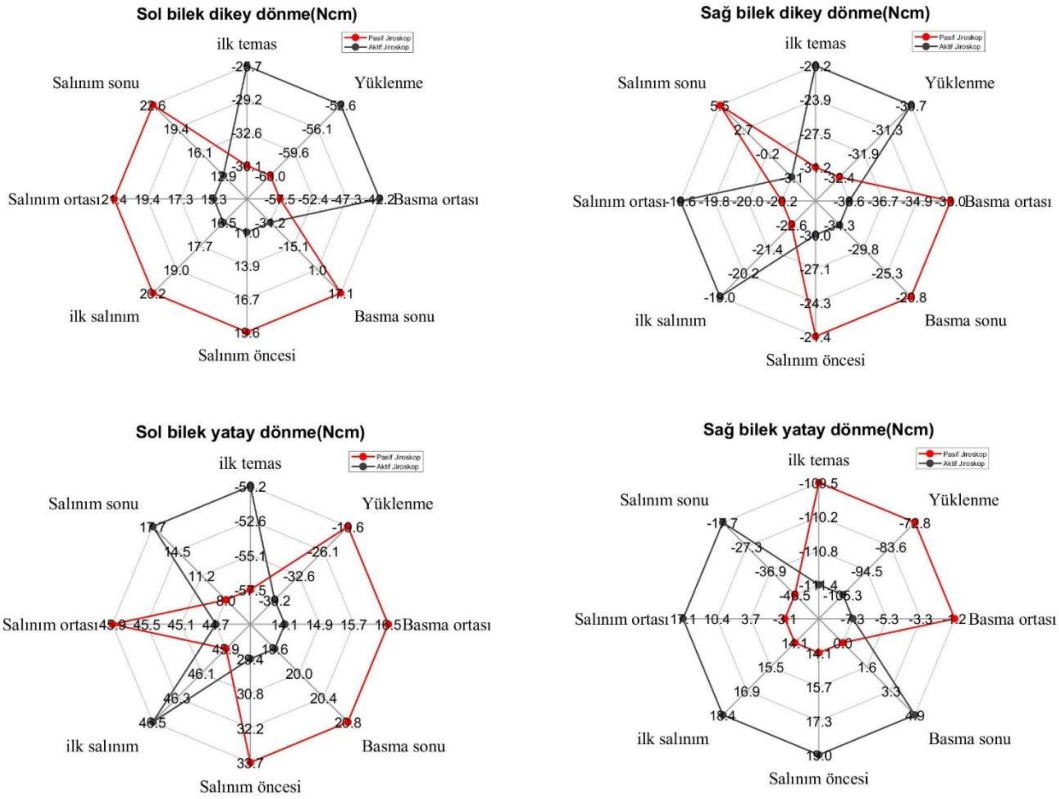
eklem motorlarına pozitif katkı yapmıştır. CMG'nin etkisini belirlemek için her bir motorun dönme hareketi boyunca değişen torkların ortalaması alınmıştır. Bu tork değerleri pasif CMG ve aktif CMG başlıkları altında Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Jiroskopik etkinin daha iyi anlaşılması için her eklemdeki tork değişim miktarları değişim oranları hesaplanmıştır. Sonuç olarak değişim oranlarının ortalaması alındığında %6,67 değerinde pozitif yönde tork değişimi hesaplanmıştır. Bu analiz ve karşılaştırmalar sonucunda jiroskop mekanizmasının servo motorların tork üretim değerlerini düşürerek güç tüketimini azalttığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Sağa dönme hareketinde eklem motorlarının tork değerleri ve değişimi.

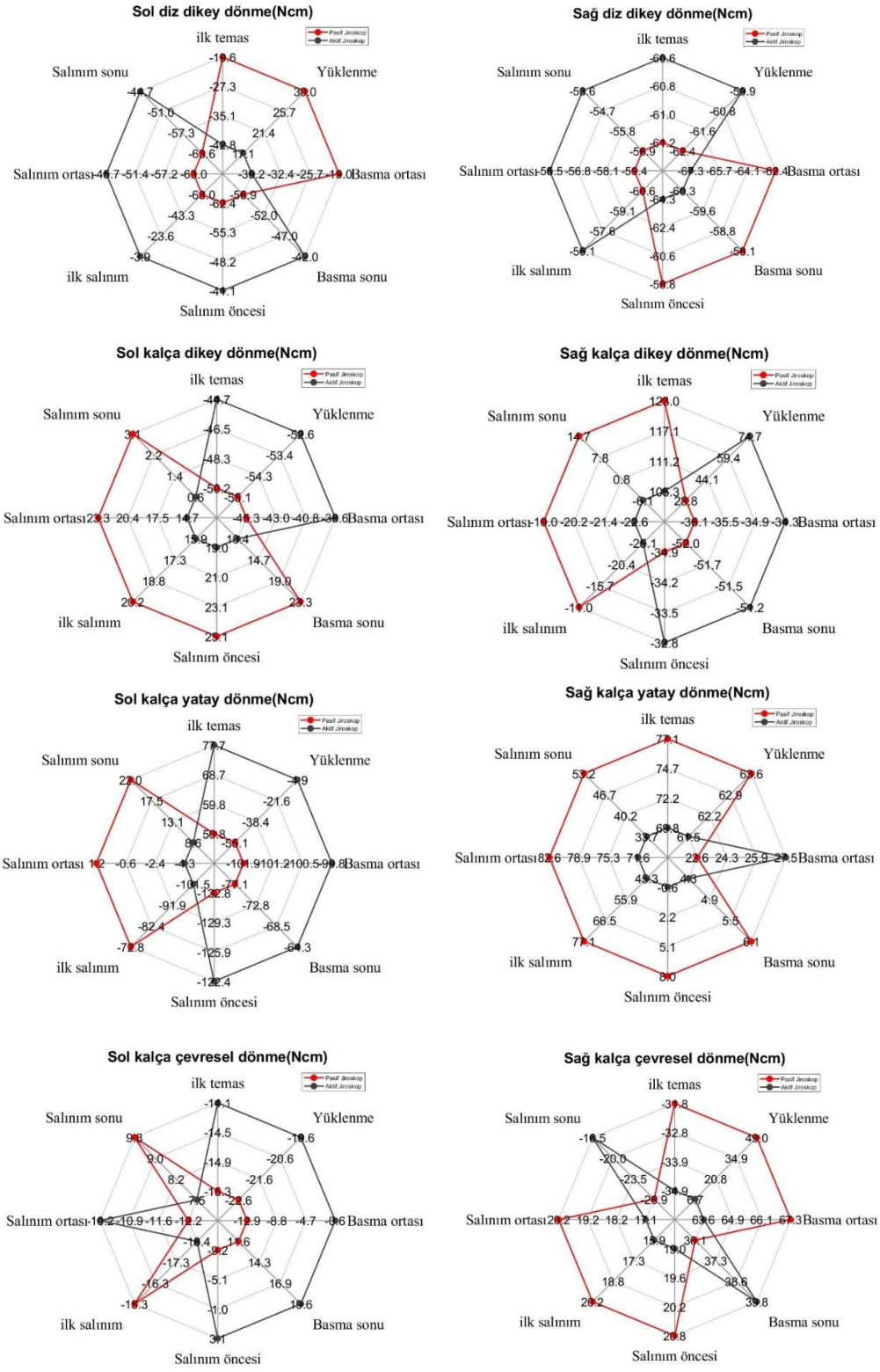
Eklem Motorları	**Pasif CMG Tork Değeri (Ncm)**	**Aktif CMG Tork Değeri (Ncm)**	**Değişim oranı (%)**
Sol Bilek Dikey	10	6	40
Sağ Bilek Dikey	26	29	-11,53
Sol Bilek Yatay	35	37	-5,71
Sağ Bilek Yatay	5	8	-60
Sol Diz Dikey	-34	-39	-14,70
Sağ Diz Dikey	-35	-32	8,57
Sol Kalça Dikey	-20	-15	25
Sağ Kalça Dikey	-9	-7	22,22
Sol Kalça Yatay	-83	-77	7,22
Sağ Kalça Yatay	77	58	24,67
Sol Kalça Çevresel	-44	-38	13,63
Sağ Kalça Çevresel	26	18	30,76
Tork değişim ortalaması: 6,67			

4.3.2.Jiroskopik Torkun Sola Dönme Hareketinde Robot Eklem Motorlarına Etkisi

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te sola 90° dönme hareketi gerçekleştirilirken yürüme fazlarına göre elde edilen radar diyagramı gözükmektedir. Diyagramlar incelendiğinde her bir eklemde yürüme fazlarına göre tork değişimleri pasif jiroskop ve aktif jiroskop başlığında Ncm birim cinsinden gösterilmiştir. Radar diyagramları incelendiğinde motorlarda farklı oranlarda tork değerlerinde azalmalar ve yön değiştirmeler olmuştur. Kullanılan jiroskop mekanizmasının katkısını sayısal olarak daha iyi gösterebilmek için her eklemin pasif ve aktif jiroskop durumuna göre ortalama tork değerleri alınmış ve Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. İki farklı durumdaki tork değerlerinin değişim oranı incelendiğinde genel oranda sol, sağ bilek dikey ve sol kalça dikey dönme hareketini sağlayan motorlarda jiroskopun tork değerini negatif oranda etkilediği diğer motorlarda ise pozitif katkı sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12. Sola dönme hareketinde yürüme fazlarına göre motor tork değişimleri.



Şekil 4.13. Sola dönme hareketinde yürüme fazlarına göre motor tork değişimleri.

Çizelge 4.4. Sola dönme hareketinde eklem motorlarının tork değerleri ve değişimi.

Eklem Motorları	**Pasif CMG Tork Değeri (Ncm)**	**Aktif CMG Tork Değeri (Ncm)**	**Değişim oranı (%)**
Sol Bilek Dikey	-7	-12	-71,44
Sağ Bilek Dikey	-22	-24	-9,09
Sol Bilek Yatay	12	10	16,66
Sağ Bilek Yatay	-26	-23	11,53
Sol Diz Dikey	-40	-30	25
Sağ Diz Dikey	-60	-60	0
Sol Kalça Dikey	-7	-10	-42,85
Sağ Kalça Dikey	2	1	50
Sol Kalça Yatay	-46	-39	15,21
Sağ Kalça Yatay	49	40	18,36
Sol Kalça Çevresel	-8	-4	50
Sağ Kalça Çevresel	19	14	26,31
Tork değişim ortalaması:7,47			

Tüm motorların tork değişiminin ortalaması alındığında %7,47 değeri bulunmuştur. Bu oran ile sola dönme hareketinde Dynamixel servo motor torklarının CMG'nin aktif olarak kullanıldığında daha düşük oranda tork ürettikleri tespit edilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Analizin sonunda jiroskop mekanizmasının sola dönme hareketinde tork üretimini düşürerek güç tüketimini de azalttığı anlaşılmakladır.

Çizelge 4.5'te sağa ve sola dönme hareketinde jiroskopik etkinin her bir eklem motorunun değişim oranları kıyaslaması yapılmıştır. Değişim oranlarında jiroskopik etkinin dönme sürecinde tork değerini düşürdüğü (+) tork değerini artırdığı (-) işaretleri ile gösterilmiştir. İki yön arasında 12 adet motordan 5 tanesinde jiroskopik etkinin oluşturduğu katkı farkı gözlemlenmektedir. Fark değerlerinin sol bacakta daha yüksek

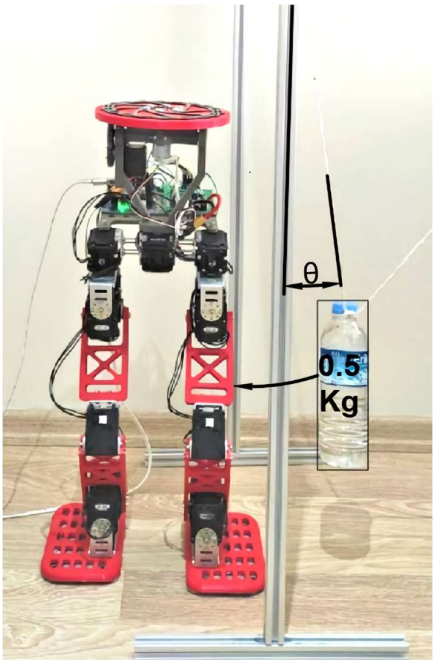
çıkmasının sebebi sola ve sağa dönüşlerde motorların hareket yönlerinin birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı varsayılmaktadır.

Çizelge 4.5. Sağa-sola dönme hareketinde eklem motorlarının tork değişim oranları karşılaştırması

Eklem motorları	**Sağa Dönme Değişim oranı (%)**	**Sola Dönme Değişim oranı (%)**
Sol Bilek Dikey	-71,44	40
Sağ Bilek Dikey	-9,09	-11,53
Sol Bilek Yatay	16,66	-5,71
Sağ Bilek Yatay	11,53	-60
Sol Diz Dikey	25	-14,70
Sağ Diz Dikey	0	8,57
Sol Kalça Dikey	-42	25
Sağ Kalça Dikey	50	22,22
Sol Kalça Yatay	15,21	7,22
Sağ Kalça Yatay	18,36	24,67
Sol Kalça Çevresel	50	13,63
Sağ Kalça Çevresel	26,31	30,76
Tork değişim ortalaması (%)	6,67	7,47

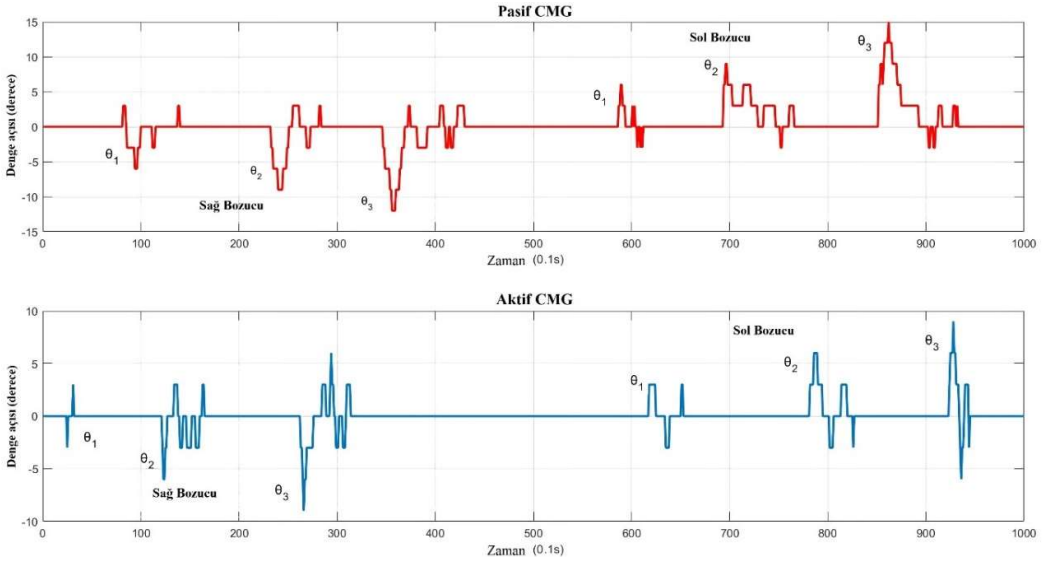
4.4. Bozucu Darbelere Karşı Jiroskopik Etkinin İki Ayaklı Robotun Dengesine Etkisi

Bu deneyde jiroskopik tork etkisinin robotun dengesi üzerindeki etkisini araştırmak için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'te iki ayaklı sabit duran robota 0.5kg ağırlığında bir yük, 3 farklı θ açısı ile serbest düşme hareketiyle sağ ve sol yönlerden darbeler şeklinde uygulanmıştır. Bu darbelerin robotun dengesini ne kadar bozduğu ve robotun eski denge konumuna ne kadar sürede geldiği araştırılmıştır. Bu araştırma CMG'nin pasif olduğu, disk hızının %0 olduğu ve disk hızının %60 değerinde, CMG'nin aktif olduğu durumlara göre gerçekleştirilmiştir. Robotun denge değişimi MPU6050 gyro sensörü üzerinden gerçek zamanlı olarak takip edilmiştir.



Şekil 4.14. İki ayaklı robotun serbest düşme ile bozucu yük uygulanması.

Şekil 4.15'teki düzenek ile sağ ve sol yönlerde θ_1, θ_2, θ_3 açılarında uygulanan bozucu yüklerin pasif CMG ve aktif CMG durumlarındaki denge değişimini gösteren grafik gözükmektedir. Gerçekleştirilen deney sonucunda denge değişimi incelendiğinde pasif CMG durumunda hem sağ hem de sol yönde uygulanan darbeler sonucu denge değişimi derece cinsinden daha yüksek oranda değiştiği gözlemlenmektedir. Aktif CMG durumunda ise denge açısının pasif CMG'ye göre daha düşük oranda değiştiği gözlemlenmektedir. İki ayaklı robotun eski dengesine ulaşma süresi incelendiğinde pasif

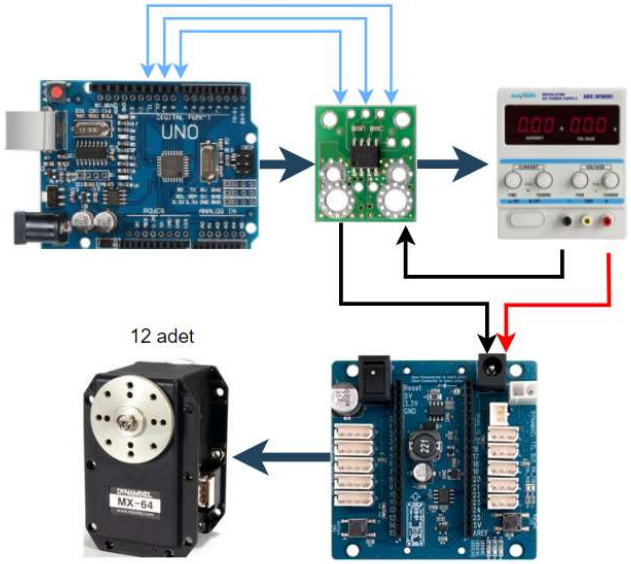


Şekil 4.15. Jiroskoplu iki ayaklı robotun serbest düşme ile bozucu yük uygulanması.

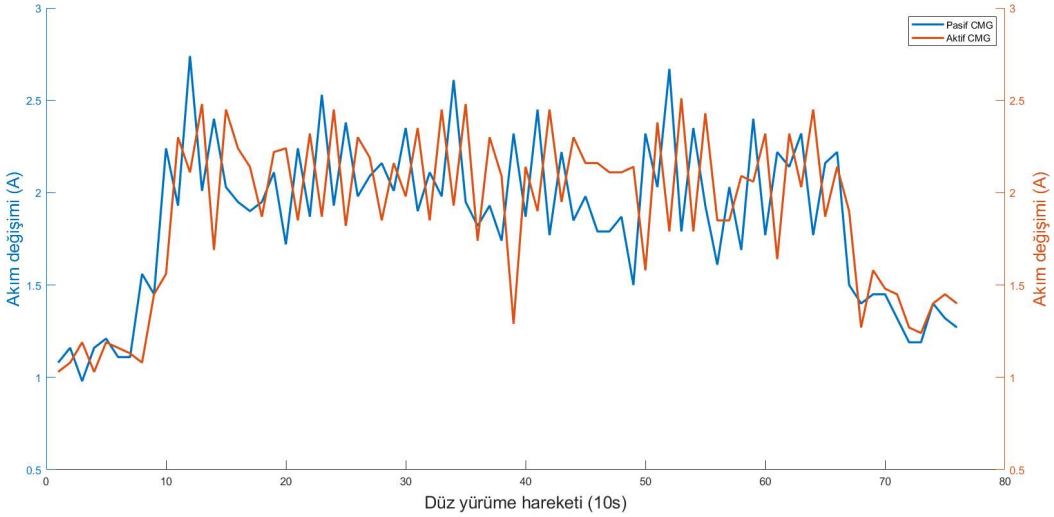
CMG durumunda bu zamanlamanın daha uzun sürede gerçekleştiği, aktif CMG durumunda ise bu sürenin daha kısa sürede tamamlandığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu değerlendirme ile jiroskopik torkun iki ayaklı robotun dışardan gelen bozucu etkileri azalttığı, robotun dengelenme sürecine katkı sağladığı gözlemlenmiştir.

4.5. Jiroskopik Etkinin İki Ayaklı Robotun Akım Tüketimi Üzerindeki Etkisi

Jiroskopik etkinin iki ayaklı robotun tüketmiş olduğu akım değeri üzerindeki etkisini tespit etmek için Şekil 4.16'da gözüken devre şamasına göre pololu ACS711EX serisi akım sensörü kullanılmıştır. Akım ölçüm işlemi 12 adet servo motoru kontrol eden OpenCM 485 kartının güç ünitesi üzerinden ölçülerek gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemi robotun 15 adım hareketine göre aktif CMG ve pasif CMG durumlarına göre yapılmıştır. Şekil 4.17'de akım sensörü üzerinden ölçülen verilerin zamana göre değişimi gözükmektedir. Sayısal olarak iki sinyalin RMS değerleri hesaplandığında pasif CMG durumunda 1,94, aktif CMG durumunda RMS değeri 1,91 değerinde bulunmaktadır. Ortalama akım değerleri ise pasif CMG için 1,89A, aktif CMG için 1,87A değerinde hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen bu deney ile jiroskopik etkinin ortalama akım tüketimini olumlu yada olumsuz olarak etkilemediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.17. Pololu ACS711EX akım sensör ve bağlantı blok şeması



Şekil 4.16. İki ayaklı robotun akım değişimleri

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

İki ayaklı robotlarda jiroskopik dengeleme sistemi tasarımı ve deneysel araştırılması için gerçekleştirilen bu çalışmada önceki bölümlerde belirtilen robotun jiroskop mekanizmasının tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu tasarımlar üzerinden deneyler yapılmıştır. Çalışmanın amacı, jiroskopik torkun iki ayaklı robotlar üzerindeki etkilerinin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu etkiler ise iki ayaklı robotun yürümesi sırasında gösterdiği davranış özelliklerinden oluşmaktadır. Bu özellikler robotun hareket salınımında yürüme rotasına bağlılığı, hareket esnasında salınım değişimi, hareket esnasında eklem motorlarının tork üretim değişimleri ve robotun denge bozucu etkilere karşı gösterdiği tepkilerden oluşmaktadır. Jiroskopik etkinin bu özellikler üzerindeki sonuçları aşağıdaki paragraflarda detaylı olarak açıklanmıştır.

İki ayaklı robotların yürüme hareketinde takip ettikleri referans yörüngesi bulunmaktadır. Robotun hareket davranışlarında bu yörüngeyi takip etmesi istense de yörünge ile robot hareketi arasında fark meydana gelmektedir. Bölüm 4'te yapılan deneysel çalışmalarda jiroskopik etki ile bu farkın nasıl değiştiği araştırılmıştır. Şekil 4.1'de araştırma sonucunda jiroskopun üretmiş olduğu tork değerinin belirli bir orana kadar yörünge takibine bağlılığı arttırdığı, katkı sağladığı tespit edilmiştir. Referans yörünge konumu ile ölçülen konum bilgilerinin korelasyonları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Fakat tasarladığımız jiroskop mekanizmasının üretmiş olduğu tork değeri belirli bir orandan sonra yörüngeye bağlılığı azaltmaya geçmiştir. Bunun nedeni ise jiroskop mekanizmasının %60 disk hızı oranından sonra üretmiş olduğu torkun tasarlanan iki ayaklı robota fazla oranda jiroskopik tork üreterek etki etmesinden kaynaklıdır. Bu durum DC motorun hız kontrollü ile %60 disk hızına sabitlenerek çözülmüştür.

İki ayaklı robotlar yürüme hareketlerini gerçekleştirirken sağa ve sola belirli açılarda salınım yapmaktadır. Bu salınımın miktarının fazla olması robotun hareket hızının düşmesine, dengeli yürüyüşte bozulmalara, daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. Jiroskopik etkinin düz yürüme hareket salınımı üzerindeki etkisi ise Şekil 4.2'de gözükmektedir. Jiroskopik etkiyi belirlemek için iki sinyal karşılaştırıldığında salınımın aktif jiroskopta azaldığı, adım hareketini daha hızlı tamamladığını ve sıfır moment yörüngesine daha benzer oranda hareket ettiği gözükmektedir ve ölçülen salınım sinyallerinin RMS değerleri hesaplanarak da doğrulanmıştır. Sağa ve sola dönme hareketlerinde yapılan deneylerin sonucunda Şekil 4.3'te gözüktüğü gibi jiroskopik etkinin salınımı azalttığı ve dönme hareketlerini daha kararlı ve hızlı tamamlanmasına katkı sağladığı belirlenmiştir. Bu tespit aktif ve pasif CMG durumlardaki salınım eğrilerinin RMS değerleri karşılaştırılarak da doğrulanmıştır.

İki ayaklı robotun yürüme ve dönme hareketleri Dynamixel servo motorların üretmiş oldukları tork kuvveti ile gerçekleşmektedir. Jiroskopik etkinin eklemlerde üretilen torklara hangi oranlarda etki ettiği gerçek zamanlı olarak motor tork verileri toplanarak bölüm 4'te analiz edilmiştir. Bu analizin sonucunda her eklemde farklı oranlarda değişim gözlemlenmiştir. Düz yürüme hareketinde 12 adet servo motorun tork değişim ortalaması %80,52 değerinde hesaplanmıştır. Bu değer jiroskopik etkinin servo motorların tork üretim ortalamasını %80,52 değerinde değiştirerek katkı sağladığını göstermektedir. Sağa ve sola dönme hareketinde ise bu değerler %6,67 ve %7,47 değerinde hesaplanmıştır. Yapılan deneylerin ve hesaplamaların sonucunda jiroskopik etkinin servo motorların tork değerlerini pozitif yönde değişimine katkı sağladığı gözlemlenmiştir.

Jiroskop mekanizmasının ağırlığının, kontrol birimlerinin tüketmiş olduğu enerjiyi arttıracağı, iki ayaklı robotun yürüme hareketini yavaşlatacağı, motorların tork üretimini artıracağı ve daha fazla enerji tüketimine neden olabileceği de düşünülebilir. Bu nedenle robotun 15 adım hareketinde tüketmiş olduğu akım miktarı ölçülmüştür. Ölçüm aktif ve pasif CMG durumlarında gerçekleştirilerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki durumda da tüketilen akım miktarlarının ortalaması 1,87A ve 1,89A değerinde birbirine yakın değerde çıkmıştır. Bu hesaplama ile jiroskopik torkun iki ayaklı robotun hareketinde ekstra güç tüketimine neden olmadığı anlaşılmaktadır. Akım değerinin sabit olup servo motorlarının tork değerinin değişmesi ise OpenCM sürücü kartının akım

değerlerini sınırlayıp tork kontrolü yaptığı düşünülmektedir. Ayrıca jiroskop mekanizmasının ağırlığı 0,63kg'dır. Bu ağırlığın servo motorlar üzerinde ek yük oluşturduğu doğrudur fakat kontrol edilebilir momentli jiroskop mekanizmasının aktif ve pasif olduğu durumlardaki etkisi karşılaştırılarak değerlendirildiğinde, sağladığı katkı ek yükün etkisini hafifletmektedir. Gelecek çalışmalarda daha hafif ekipmanlar ile tasarlanan jiroskop mekanizması ile de ek yükün etkisi daha da azaltılabilir.

Jiroskopik etkinin ölçüldüğü diğer bir deneyde bozucu darbelere karşı iki ayaklı robotun gösterdiği denge korunumudur. Bölüm 4'te yapılan deneylere göre jiroskop mekanizmasının aktif olduğu ve pasif olduğu durumlara göre darbelere verdiği tepki ölçülmüştür. Bu çalışmaların sonucunda jiroskopik etkinin aktif olduğu durumda bozucu darbe etkilerinin robot dengesini daha az bozduğu ve tekrar dengelenme sürecinin daha hızlı gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Yapılan bu çalışmanın sonucunda tasarlanan jiroskop mekanizmasının, iki ayaklı robotun hareket performansını arttırdığı ve denge korunumuna katkı sağladığı belirlenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda jiroskop boyutları küçültülerek adetleri arttırılabilir veya reaksiyon çarkı ile benzer etki oluşturulabilir. Ayrıca DC motor yerine daha hafif fırçasız motorlar tercih edilebilir. Jiroskop mekanizmasının uygun tasarımlar ile iki ayaklı robotlar haricinde insansı robotlarda, 4 ve daha fazla ayaklı robotlarda, tek veya çift tekerli bisiklet gibi dengesiz araçlarda da dengeyi koruma ve destekleme bileşeni olarak kullanılabilir. Diğer bir öneride iki ayaklı robotun programlanmasında kullanılan işlemcinin yeteneklerinin artırılması daha güçlü işlemcilerin kullanılması yada sunucu üzerinden programlanması, çalıştırılması robot üzerinden okunan geri besleme verilerinin işlenmesine ve kontrol sürecine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Angélico, B. A., Barbosa, F. S., & Toriumi, F. Y. (2017). State Feedback Decoupling Control of a Control Moment Gyroscope. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, *28*(1), 26–35. https://doi.org/10.1007/s40313-016-0277-8

Aranovskiy, S., Ryadchikov, I., Nikulchev, E., Wang, J., & Sokolov, D. (2020). Experimental comparison of velocity observers: A scissored pair control moment gyroscope case study. *IEEE Access*, *8*, 21694–21702. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968221

Arcos-Legarda, J., Cortes-Romero, J., & Tovar, A. (2019). Robust compound control of dynamic bipedal robots. *Mechatronics*, *59*(November 2018), 154–167. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.04.002

Bayraktaroğlu, Z. Y., Acar, M., Gerçek, A., & Tan, N. M. (2018). Design and development of the I.T.U. biped robot. *Gazi University Journal of Science*, *31*(1), 251–271.

Boddiford, A., Manion, C., Kim, K. S., Radhakrishnan, P., & Sentis, L. (2013). Experiments to validate the use of a control moment gyroscope (CMG) to turn robots. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, *6 B*, 1–8. https://doi.org/10.1115/DETC2013-12285

Brooks, R. A., Breazeal, C., Marjanović, M., Scassellati, B., & Williamson, M. M. (1999). *The Cog Project: Building a Humanoid Robot*. 52–87. https://doi.org/10.1007/3-540-48834-0_5

Cho, B., Kim, M. S., Kim, S. W., Shin, S., Jeong, Y., Oh, J. H., & Park, H. W. (2021). Design of a Compact Embedded Hydraulic Power Unit for Bipedal Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *6*(2), 3631–3638. https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3061390

Choi, J. S., & Baek, Y. S. (2014). A precise magnetic walking mechanism. *IEEE Transactions on Robotics*, *30*(6), 1412–1426. https://doi.org/10.1109/TRO.2014.2360492

Erbatur, K., Seven, U., Taşkiran, E., Koca, Ö., Yilmaz, M., Ünel, M., Şendur, G. K., Şabanoviç, A., & Onat, A. (2011). Design and control of the humanoid robot SURALP. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, *19*(5), 725–731. https://doi.org/10.3906/elk-1007-595

Faraji, S., & Ijspeert, A. J. (2017). Singularity-Tolerant Inverse Kinematics for Bipedal Robots: An Efficient Use of Computational Power to Reduce Energy Consumption. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *2*(2), 1132–1139.

https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2661810

Geshnizjani, R., Kornienko, A., & Fichter, W. (2016). Angular Momentum Based Steering Approach for Control Moment Gyroscopes. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(17), 141–145. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.09.025

Gim, K. G., Kim, J., & Yamane, K. (2018). Design and Fabrication of a Bipedal Robot Using Serial-Parallel Hybrid Leg Mechanism. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 5095–5100. https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594182

Gosyne, J. R., Hubicki, C. M., Xiong, X., Ames, A. D., & Goldman, D. I. (2019). Bipedial Locomotion Up Sandy Slopes: Systematic Experiments Using Zero Moment Point Methods. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, *2018-Novem*, 994–1001. https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2018.8624959

Hartenburg, R. S., Denavit, J., & Freudenstein, F. (1965). Kinematic Synthesis of Linkages. *Journal of Applied Mechanics*, *32*(2), 477. https://doi.org/10.1115/1.3625860

Hernández-Santos, C., Rodriguez-Leal, E., Soto, R., & Gordillo, J. L. (2012). Kinematics and dynamics of a new 16 DOF humanoid biped robot with active toe joint. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *9*. https://doi.org/10.5772/52452

Honda Global. (1986). https://global.honda/innovation/robotics/robot-development-history.html

Huang, Q., Dong, C., Yu, Z., Chen, X., Li, Q., Chen, H., & Liu, H. (2022). Resistant Compliance Control for Biped Robot Inspired by Humanlike Behavior. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1–11. https://doi.org/10.1109/tmech.2021.3139332

Huang, Z., Yu, Z., Chen, X., Li, Q., Meng, L., Dong, C., Meng, X., Liao, W., & Huang, Q. (2021). Knee-stretched walking with toe-off and heel-strike for a position-controlled humanoid robot based on model predictive control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *18*(4), 172988142110362. https://doi.org/10.1177/17298814211036282

Hubicki, C., Abate, A., Clary, P., Rezazadeh, S., Jones, M., Peekema, A., Van Why, J., Domres, R., Wu, A., Martin, W., Geyer, H., & Hurst, J. (2018). Walking and Running with Passive Compliance: Lessons from Engineering: A Live Demonstration of the ATRIAS Biped. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, *25*(3), 23–39. https://doi.org/10.1109/MRA.2017.2783922

Kajita, S., Hirukawa, H., Harada, K., & Yokoi, K. (2014). *Springer Tracts in Advanced Robotics 101 Introduction to Humanoid Robotics*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54536-8

Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2003). Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, *2*, 1620–1626. https://doi.org/10.1109/robot.2003.1241826

Kato, I., Ohteru, S., Shirai, K., Matsushima, T., Narita, S., Sugano, S., Kobayashi, T., & Fujisawa, E. (1987). The robot musician “wabot-2” (waseda robot-2). *Robotics*, *3*(2),

143–155. https://doi.org/10.1016/0167-8493(87)90002-7

Kim, J. W., Tran, T. T., Van Dang, C., & Kang, B. (2016). Motion and walking stabilization of humanoids using sensory reflex control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *13*(2). https://doi.org/10.5772/63116

Ko, T., Yamamoto, K., Murotani, K., & Nakamura, Y. (2019). Compliant Biped Locomotion of Hydra, an Electro-Hydrostatically Driven Humanoid. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, *2018-Novem*, 587–592. https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2018.8624973

Kobayashi, T., Sekiyama, K., Hasegawa, Y., Aoyama, T., & Fukuda, T. (2018). Unified bipedal gait for autonomous transition between walking and running in pursuit of energy minimization. *Robotics and Autonomous Systems*, *103*, 27–41. https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.02.005

Konno, A., Kato, N., Shirata, S., Furuta, T., & Uchiyama, M. (2000). Development of a light-weight biped humanoid robot. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, *3*, 1565–1570. https://doi.org/10.1109/iros.2000.895196

Kormushev, P., Ugurlu, B., Caldwell, D. G., & Tsagarakis, N. G. (2019). Learning to exploit passive compliance for energy-efficient gait generation on a compliant humanoid. *Autonomous Robots*, *43*(1), 79–95. https://doi.org/10.1007/s10514-018-9697-6

Kucuk, S., & Bingul, Z. (2006). *Robot kinematics: Forward and inverse kinematics*. INTECH Open Access Publisher.

Lee, M., Kwon, Y., Lee, S., Choe, J., Park, J., Jeong, H., Heo, Y., Kim, M., Sungho, J., Yoon, S.-E., & Oh, J.-H. (2020). *Dynamic Humanoid Locomotion over Uneven Terrain With Streamlined Perception-Control Pipeline*. http://arxiv.org/abs/2011.15020

Lee, Y., & Park, J. (2018). Reactive Bipedal Walking Method for Torque Controlled Robot. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, *June*, 395–402. https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460668

Li, Q., Meng, F., Yu, Z., Chen, X., & Huang, Q. (2021). Dynamic Torso Compliance Control for Standing and Walking Balance of Position-Controlled Humanoid Robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *26*(2), 679–688. https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3061825

Liu, B., Huang, Z., Wei, J., Shi, C., Ota, J., & Zhang, Y. (2018). Jet-HR1: Stepping Posture Optimization for Bipedal Robot over Large Ditch Based on a Ducted-fan Propulsion System∗. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 6010–6015. https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594055

Liu, C. C., Lee, T. T., Xiao, S. R., Lin, Y. C., Chou, Z. X., & Wong, C. C. (2019). Bipedal walking with push recovery balance control involves posture correction. *Microsystem Technologies*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s00542-019-04532-x

Liu, L., Iwata, H., Sheng, bi, Huaqing, M., Min, D., & Zhongjie, Z. (2013). Modelling and control for a bipedal robot on slopes. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, *35*(7), 910–921.

https://doi.org/10.1177/0142331212457582

Liu, Y., Zang, X., Heng, S., Lin, Z., & Zhao, J. (2017). Human-like walking with heel off and toe support for biped robot. *Applied Sciences (Switzerland)*, *7*(5). https://doi.org/10.3390/app7050499

Mashadi, B., & Gowdini, M. (2015). Vehicle Dynamics Control by Using an Active Gyroscopic Device. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, *137*(12). https://doi.org/10.1115/1.4031532

Mayub, A., & Fahmizal. (2018). Center of pressure feedback for controlling the walking stability bipedal robots using fuzzy logic controller. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, *8*(5), 3678–3696. https://doi.org/10.11591/ijece.v8i5.pp3678-3696

Mayub, F. and A. (2018). VoBiRo - Vocational Bipedal Robot Platform, Kinematic and Locomotion Control. *VoBiRo - Vocational Bipedal Robot Platform, Kinematic and Locomotion Control*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ICITEED.2018.8534767

Mazumdar, A., Spencer, S. J., Hobart, C., Salton, J., Quigley, M., Wu, T., Bertrand, S., Pratt, J., & Buerger, S. P. (2017). Parallel Elastic Elements Improve Energy Efficiency on the STEPPR Bipedal Walking Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *22*(2), 898–908. https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2631170

McGeer, T. (1990). McGeer90IJRR.pdf. Içinde *The International Journal of Robotics Research* (C. 9, Sayı 2, ss. 62–82).

Metta, G., Natale, L., Nori, F., Sandini, G., Vernon, D., Fadiga, L., von Hofsten, C., Rosander, K., Lopes, M., Santos-Victor, J., Bernardino, A., & Montesano, L. (2010). The iCub humanoid robot: An open-systems platform for research in cognitive development. *Neural Networks*, *23*(8–9), 1125–1134. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2010.08.010

Mikhalkov, N., Prutskiy, A., Sechenev, S., Kazakov, D., Simulin, A., Sokolov, D., & Ryadchikov, I. (2021). Gyrubot: nonanthropomorphic stabilization for a biped. *ICRA 2021-International Conference on Robotics and Automation*.

Mohamed, S. A., Maged, S. A., & Awad, M. I. (2021). A performance comparison between closed form and numerical optimization solutions for humanoid robot walking pattern generation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *18*(4), 1–20. https://doi.org/10.1177/17298814211029774

Moreno–Valenzuela, J., Montoya–Cháirez, J., & Santibáñez, V. (2020). Robust trajectory tracking control of an underactuated control moment gyroscope via neural network–based feedback linearization. *Neurocomputing*, *403*, 314–324. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.04.019

Nowak, P., Milecki, A., & Białek, M. (2019). Construction and Control of the Bipedal Walking Robot. *MATEC Web of Conferences*, *252*, 02009. https://doi.org/10.1051/matecconf/201925202009

O 'flaherty, R., Vieira, P., Grey, M., Oh, P., Bobick, A., Egerstedt, M., & Stilman, M. (2013). Kinematics and Inverse Kinematics for the Humanoid Robot HUBO2+. *Georgia Institute of Technology*, 2013–1. http://www.golems.org/papers/OFlaherty13-hubo-kinematics-techreport.pdf

Olcay, T., & Özkurt, A. (2017). Design and walking pattern generation of a biped robot. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, *25*(2), 761–769. https://doi.org/10.3906/elk-1409-19

Ott, C., Roa, M. A., & Hirzinger, G. (2011). Posture and balance control for biped robots based on contact force optimization. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 26–33. https://doi.org/10.1109/Humanoids.2011.6100882

Park, H. Y., Kim, J. H., & Yamamoto, K. (2022). A New Stability Framework for Trajectory Tracking Control of Biped Walking Robots. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. https://doi.org/10.1109/TII.2021.3139909

Park, I. W., Kim, J. Y., Lee, J., & Oh, J. H. (2005). Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST humanoid robot - 3: HUBO). *Proceedings of 2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, *2005*, 321–326. https://doi.org/10.1109/ICHR.2005.1573587

Passaro, V. M. N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., & Campanella, C. E. (2017). Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective. *Sensors (Switzerland)*, *17*(10). https://doi.org/10.3390/s17102284

Pirker, W., & Katzenschlager, R. (2017). Gait disorders in adults and the elderly. *Wiener Klinische Wochenschrift*, *129*(3), 81–95.

Pratt, J. (2001). Pratt, J. (2001). Virtual Model Control: An Intuitive Approach for Bipedal Locomotion. The International Journal of Robotics Research, 20(2), 129–143. http://doi.org/10.1177/02783640122067309Virtual Model Control: An Intuitive Approach for Bipedal Locomot. *The International Journal of Robotics Research*, *20*(2), 129–143. https://doi.org/10.1177/02783640122067309

Reher, J., Ma, W. L., & Ames, A. D. (2019). Dynamic walking with compliance on a cassie bipedal robot. *2019 18th European Control Conference, ECC 2019*, 2589–2595. https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8796090

Robotis. (2021a, Aralık 16). *Robotis e-manual MX64*. https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-64/. https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-64/

Robotis. (2021b, Aralık 16). *The OpenCM 9.04 e-Manual* . https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/controller/opencm904/

Rogelio Guadarrama-Olvera, J., Bergner, F., Dean, E., & Cheng, G. (2019). Enhancing Biped Locomotion on Unknown Terrain Using Tactile Feedback. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, *2018-Novem*, 47–52. https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2018.8625024

Romtrairat, P., Virulsri, C., Wattanasiri, P., & Tangpornprasert, P. (2020). A performance study of a wearable balance assistance device consisting of scissored-pair control moment gyroscopes and a two-axis inclination sensor. *Journal of Biomechanics*, *109*, 109957. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109957

Rushdi, K., Koop, D., & Wu, C. Q. (2014). Experimental studies on passive dynamic bipedal walking. *Robotics and Autonomous Systems*, *62*(4), 446–455. https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.12.002

Shahrokhshahi, A., Yousefi-Koma, A., Khadiv, M., Mansouri, S., & Mohtasebi, S. S.

(2019). Optimal Stair Climbing Pattern Generation for Humanoids Using Virtual Slope and Distributed Mass Model. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, *94*(1), 43–59. https://doi.org/10.1007/s10846-018-0959-5

Tacué, J., Rengifo, C., & Bravo, D. (2020). An experimental energy consumption comparison between trajectories generated by using the cart-table model and an optimization approach for the Bioloid robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *17*(2), 1–14. https://doi.org/10.1177/1729881420917808

Tran Thien, H., Van Kien, C., & Anh, H. P. H. (2020). Optimized stable gait planning of biped robot using multi-objective evolutionary JAYA algorithm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *17*(6), 1–13. https://doi.org/10.1177/1729881420976344

Ugurlu, B., Saglia, J. A., Tsagarakis, N. G., Morfey, S., & Caldwell, D. G. (2014). Bipedal hopping pattern generation for passively compliant humanoids: Exploiting the resonance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *61*(10), 5431–5443. https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2300060

Van Hofslot, B. J., Griffin, R., Bertrand, S., & Pratt, J. (2019). Balancing Using Vertical Center-of-Mass Motion: A 2-D Analysis From Model to Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *4*(4), 3247–3254. https://doi.org/10.1109/lra.2019.2925303

Vaz, J. C., & Oh, P. Y. (2018). Transformer-DARwIn: A Hybrid Locomotion Humanoid Designed to Walk or Roll. *2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots, UR 2018*, 528–533. https://doi.org/10.1109/URAI.2018.8441840

Villa, N., Fernbach, P., Mansard, N., & Stasse, O. (2022). *Addressing Flexibility in Biped Locomotion with Robust Control and Closed-loop Model-Predictive Control*. IEEE. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03452196

Vukobratović, M. (2006). Humanoid robotics - Past, present state, future -. *SISY 2006 - 4th Serbian-Hungarian Joint Symposium on Intelligent Systems*, 13–31.

Wee, T. C., Astolfi, A., & Ming, X. (2013). The design and control of a bipedal robot with sensory feedback. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *10*. https://doi.org/10.5772/56572

Wong, C. C., Xiao, S. R., & Aoyama, H. (2020). Natural Walking Trajectory Generator for Humanoid Robot Based on Three-Mass LIPFM. *IEEE Access*, *8*, 228151–228162. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046106

Wong, T. C. F., & Hung, Y. S. (1996). Stabilization of biped dynamic walking using gyroscopic couple. *IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems*, 102–108. https://doi.org/10.1109/ijsis.1996.565057

Yilmazlar, E., Kuşçu, H., & Güllü, A. (2021). COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTROL MOMENT GYROSCOPE AND REACTION WHEEL TORQUE EFFECTS IN BALANCING SYSTEMS. *International Scientific Conference "UNITECH"*, 225–228.

Yılmazlar, E., & Kuşçu, H. (2021). Walking pattern generation and control for a bipedal robot. *INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL MACHINES. TECHNOLOGIES. MATERIALS.*, *15*(3), 99–102.

Zhang, A., Ramirez-Alpizar, I. G., Esclasse, K. G., Stasse, O., & Harada, K. (2019).

Humanoid walking pattern generation based on model predictive control approximated with basis functions. *Advanced Robotics*, *33*(9), 454–468. https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1594366

Zhang, L., Huang, Q., Liu, Q., Liu, T., Li, D., & Lu, Y. (2005). A teleoperation system for a humanoid robot with multiple information feedback and operational modes. *2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO*, *2005*, 290–294. https://doi.org/10.1109/robio.2005.246279

Zheng, X., Zhu, X., Chen, Z., Sun, Y., Liang, B., & Wang, T. (2022). Dynamic modeling of an unmanned motorcycle and combined balance control with both steering and double CMGs. *Mechanism and Machine Theory*, *169*. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104643

EKLER

Ek 1 İleri Kinematik Denklem Sonucu

T8F =

[c(q7)*c(q8)*(c(q6)*(c(q5)*(c(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) - s(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))) - s(q5)*(s(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) + c(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1)))) - s(q6)*(c(q5)*(s(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) + c(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))) + s(q5)*(c(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) - s(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))))) - s(q7)*s(q8)*(c(q6)*(c(q5)*(c(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) - s(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))) - s(q5)*(s(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) + c(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1)))) - s(q6)*(c(q5)*(s(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) + c(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))) + s(q5)*(c(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) - s(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))))), - c(q7)*s(q8)*(c(q6)*(c(q5)*(c(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) - s(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))) - s(q5)*(s(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) + c(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1)))) - s(q6)*(c(q5)*(s(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) + c(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))) + s(q5)*(c(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) - s(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))))) - c(q8)*s(q7)*(c(q6)*(c(q5)*(c(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) - s(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))) - s(q5)*(s(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) +

c(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1)))) - s(q6)*(c(q5)*(s(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) + c(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))) + s(q5)*(c(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) - s(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1))))), 0, G1 + G2*c(q0) + D1*s(q0) + L1*(c(q4)*(s(q0)*s(q3) + c(q3)*(c(q0)*c(q1)*c(q2) - c(q0)*s(q1)*s(q2))) - s(q4)*(c(q0)*c(q1)*s(q2) + c(q0)*c(q2)*s(q1)))]

[
c(q7)*c(q8)*(c(q6)*(s(q5)*(c(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) - c(q3)*s(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))) + c(q5)*(s(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) + c(q3)*c(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1)))) - s(q6)*(s(q5)*(s(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) + c(q3)*c(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))) - c(q5)*(c(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) - c(q3)*s(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))))) - s(q7)*s(q8)*(c(q6)*(s(q5)*(c(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) - c(q3)*s(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))) + c(q5)*(s(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) + c(q3)*c(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1)))) - s(q6)*(s(q5)*(s(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) + c(q3)*c(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))) - c(q5)*(c(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) - c(q3)*s(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))))),
- c(q7)*s(q8)*(c(q6)*(s(q5)*(c(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) - c(q3)*s(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))) + c(q5)*(s(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) + c(q3)*c(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1)))) - s(q6)*(s(q5)*(s(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) + c(q3)*c(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))) - c(q5)*(c(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) - c(q3)*s(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))))) - c(q8)*s(q7)*(c(q6)*(s(q5)*(c(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) - c(q3)*s(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))) + c(q5)*(s(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) + c(q3)*c(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1)))) - s(q6)*(s(q5)*(s(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) + c(q3)*c(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))) - c(q5)*(c(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) - c(q3)*s(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1))))), 0, L1*(s(q4)*(c(q1)*c(q2) - s(q1)*s(q2)) + c(q3)*c(q4)*(c(q1)*s(q2) + c(q2)*s(q1)))]

[c(q7)*c(q8)*(c(q6)*(c(q5)*(c(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) + s(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))) - s(q5)*(s(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) - c(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1)))) - s(q6)*(c(q5)*(s(q4)*(c(q0)*s(q3) +

c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) - c(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))) + s(q5)*(c(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) + s(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))))) - s(q7)*s(q8)*(c(q6)*(c(q5)*(c(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) + s(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))) - s(q5)*(s(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) - c(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1)))) - s(q6)*(c(q5)*(s(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) - c(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))) + s(q5)*(c(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) + s(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))))), - c(q7)*s(q8)*(c(q6)*(c(q5)*(c(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) + s(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))) - s(q5)*(s(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) - c(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1)))) - s(q6)*(c(q5)*(s(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) - c(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))) + s(q5)*(c(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) + s(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))))) - c(q8)*s(q7)*(c(q6)*(c(q5)*(c(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) + s(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))) - s(q5)*(s(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) - c(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1)))) - s(q6)*(c(q5)*(s(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) - c(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))) + s(q5)*(c(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) + s(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1))))), 0, D1*c(q0) - G2*s(q0) + L1*(c(q4)*(c(q0)*s(q3) + c(q3)*(s(q0)*s(q1)*s(q2) - c(q1)*c(q2)*s(q0))) + s(q4)*(c(q1)*s(q0)*s(q2) + c(q2)*s(q0)*s(q1)))]

[0,0,0,1]

Ek 2 Düz Yürüme Yazılımı

```
#define orta_govde 10 // Motor ID tanımlamaları

#define sol_bilek_dikey11

#define sol_bilek_yatay12

#define sol_diz_dikey 13

#define sol_kalca_dikey 14

#define sol_kalca_yatay 15

#define sol_kalca_cevresel 16

#define sag_bilek_dikey 21

#define sag_bilek_yatay 22

#define sag_diz_dikey 23

#define sag_kalca_dikey 24

#define sag_kalca_yatay 25

#define sag_kalca_cevresel 26

#define P_GOAL_POSITION 36 // Servo motor pozisyon geri besleme seri numarası

#define GOAL_SPEED 32 // Servo motor hız seri numarası

#define PRESENT_Torque 40 // Servo motor tork geri besleme seri numarası

#define GOAL_POSITION 30 // Servo motor pozisyon hareketi seri numarası

#define DXL_BUS_SERIAL1 1 //Dynamixel Serial1 -OpenCM9.04 ile haberleşme

#define DXL_BUS_SERIAL2 2 //Dynamixel Serial2 -LN101, BT210 ile haberleşme

#define DXL_BUS_SERIAL3 3 //Dynamixel Serial3 -OpenCM 485EXP ile haberleşme

Dynamixel Dxl(DXL_BUS_SERIAL3);

word SyncPage[36]={}; // Motor kontrol haberleşme
```

```
int j,sayac=0 // Adım sayısı sayacı
int hiz=100; // Motor hızı %10
int tork=1023; // max tork değeri
void setup() {
Dxl.begin(3);
Dxl.maxTorque(sol_bilek_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sol_bilek_yatay,tork);
Dxl.maxTorque(sol_diz_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sol_kalca_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sol_kalca_yatay,tork);
Dxl.maxTorque(sol_kalca_cevresel,tork);
Dxl.maxTorque(sag_bilek_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sag_bilek_yatay,tork);
Dxl.maxTorque(sag_diz_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sag_kalca_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sag_kalca_yatay,tork);
Dxl.maxTorque(sag_kalca_cevresel,tork);
}
void loop() {
// Motor hız tanımları
Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_SPEED, hiz);
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_SPEED, hiz);
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_SPEED, hiz*2);
```

```
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_SPEED, hiz*1.5);

Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_SPEED, hiz*2);

Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_SPEED, hiz*2);

Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_SPEED, hiz*1.5);

Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_SPEED, hiz);

// Başlangıç pozisyonu

Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048); //2048 motor orta konumu

Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048); // her 1 değer karşılığı 0,087derecedir

Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 1748);

Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 2348);

Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1608);

Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1608);

Dxl.writeWord(orta_govde, GOAL_POSITION, 2048);

Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1478);

Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1478);

Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);

Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);

Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
```

```
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
delay(4000);
// Hareket döngüsü
while(sayac<=10){  // Adım sayısı
for(j=0; j<=101; j++){  // Adım döngüleri
delay(0.75);
if(j>=0&&j<=24){
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048+(map(j,0,24,0,100))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048+(map(j,0,24,0,90))));
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (2048-(map(j,0,24,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, (1588-(map(j,0,24,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, (1748+(map(j,0,24,0,50))));
}
if(j>=25&&j<=49){
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2148-(map(j,25,49,0,100))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2138-(map(j,25,49,0,90))));
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (1948+(map(j,25,49,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, (1488+(map(j,25,49,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, (2028+(map(j,25,49,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_POSITION, (2028+(map(j,25,49,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, (1798-(map(j,0,24,0,50))));
}
if(j>=50&&j<=74){
```

```
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (aci-(map(j,50,74,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (aci-(map(j,50,74,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (aci-(map(j,50,74,0,50))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, (1588-(map(j,50,74,0,100))));
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, (2078-(map(j,50,74,0,100))));
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, (2348-(map(j,0,24,0,50))));
}
if(j>=75&&j<=99){
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (1948+(map(j,75,99,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (1948+(map(j,75,99,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (1998+(map(j,75,99,0,50))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, (1488+(map(j,75,99,0,50))));
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, (2028+(map(j,75,99,0,50))));
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, (2298-(map(j,0,24,0,50))));
}
if(j>=100&&j<=101){
sayac = sayac+1;
}}}
```

Ek 3 Sağa Dönme Yazılımı

```
#define orta_govde 10 // Motor ID tanımlamaları

#define sol_bilek_dikey 11

#define sol_bilek_yatay 12

#define sol_diz_dikey 13

#define sol_kalca_dikey 14

#define sol_kalca_yatay 15

#define sol_kalca_cevresel 16

#define sag_bilek_dikey 21

#define sag_bilek_yatay 22

#define sag_diz_dikey 23

#define sag_kalca_dikey 24

#define sag_kalca_yatay 25

#define sag_kalca_cevresel 26

#define P_GOAL_POSITION 36 // Servo motor pozisyon geri besleme seri numarası

#define GOAL_SPEED 32 // Servo motor hız seri numarası

#define PRESENT_Torque 40 // Servo motor tork geri besleme seri numarası

#define GOAL_POSITION 30 // Servo motor pozisyon hareketi seri numarası

#define DXL_BUS_SERIAL1 1 //Dynamixel Serial1 -OpenCM9.04 ile haberleşme

#define DXL_BUS_SERIAL2 2 //Dynamixel Serial2 -LN101, BT210 ile haberleşme

#define DXL_BUS_SERIAL3 3 //Dynamixel Serial3 -OpenCM 485EXP ile haberleşme

Dynamixel Dxl(DXL_BUS_SERIAL3);

word SyncPage[36]={}; // Motor kontrol haberleşme
```

```
int j,sayac=0; // Adım sayısı sayacı

int hiz=100; // Motor hızı %10

int tork=1023; // max tork değeri

void setup() {

Dxl.begin(3);

Dxl.maxTorque(sol_bilek_dikey,tork);

Dxl.maxTorque(sol_bilek_yatay,tork);

Dxl.maxTorque(sol_diz_dikey,tork);

Dxl.maxTorque(sol_kalca_dikey,tork);

Dxl.maxTorque(sol_kalca_yatay,tork);

Dxl.maxTorque(sol_kalca_cevresel,tork);

Dxl.maxTorque(sag_bilek_dikey,tork);

Dxl.maxTorque(sag_bilek_yatay,tork);

Dxl.maxTorque(sag_diz_dikey,tork);

Dxl.maxTorque(sag_kalca_dikey,tork);

Dxl.maxTorque(sag_kalca_yatay,tork);

Dxl.maxTorque(sag_kalca_cevresel,tork);

}

void loop() {

// Motor hız tanımları

Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_SPEED, hiz*2);
```

```
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_SPEED, hiz*1.5);

Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_SPEED, hiz);

Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_SPEED, hiz*2);

Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_SPEED, hiz*2);

Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_SPEED, hiz*1.5);

Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_SPEED, hiz);

// Başlangıç pozisyonu

Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048); //2048 motor orta konumu

Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048); // her 1 değer karşılığı 0,087derecedir

Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 1748);

Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 2348);

Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1608);

Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1608);

Dxl.writeWord(orta_govde, GOAL_POSITION, 2048);

Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1478);

Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1478);

Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);

Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);

Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
```

```
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
delay(4000);
void loop()
{
// Sağa 90derece dönme hareketi
tekrar:
Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 1748);
Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 2348);
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1448);
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1448);
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1598);
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1648);
Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
for(j=0; j<=101; j++){
delay(0.5);
if(j>=0&&j<=24){
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048+(map(j,0,24,0,150))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048+(map(j,0,24,0,100))));
```

```
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (2048-(map(j,0,24,0,200))));
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (2048-(map(j,0,24,0,100)));
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, (1648-(map(j,0,24,0,250))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, (2048-(map(j,0,24,0,150))));
}
if(j>=25&&j<=49){
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2198-(map(j,25,49,0,150))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2148-(map(j,25,49,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (1848+(map(j,25,49,0,200))));
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (1948+(map(j,25,49,0,100))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, (1398+(map(j,25,49,0,250))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, (1898+(map(j,0,24,0,150))));
}
if(j>=50&&j<=74){
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048-(map(j,50,74,0,150))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048-(map(j,50,74,0,100))));
}
if(j>=75&&j<=99){
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (1898+(map(j,75,99,0,150))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (1948+(map(j,75,99,0,100))));
}
if(j>=100&&j<=101){
sayac = sayac+1;
```

```
goto tekrar;
}
if(sayac == 10){
Dxl.writeWord(ID_NUM_10, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 1748);
Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 2348);
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1448);
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1448);
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1648);
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1648);
Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
delay(5000);
}}}
```

Ek 4 Sola Dönme Yazılımı

```
#define orta_govde 10 // Motor ID tanımlamaları

#define sol_bilek_dikey 11

#define sol_bilek_yatay 12

#define sol_diz_dikey 13

#define sol_kalca_dikey 14

#define sol_kalca_yatay 15

#define sol_kalca_cevresel 16

#define sag_bilek_dikey 21

#define sag_bilek_yatay 22

#define sag_diz_dikey 23

#define sag_kalca_dikey 24

#define sag_kalca_yatay 25

#define sag_kalca_cevresel 26

#define P_GOAL_POSITION 36 // Servo motor pozisyon geri besleme seri numarası

#define GOAL_SPEED 32 // Servo motor hız seri numarası

#define PRESENT_Torque 40 // Servo motor tork geri besleme seri numarası

#define GOAL_POSITION 30 // Servo motor pozisyon hareketi seri numarası

#define DXL_BUS_SERIAL1 1 //Dynamixel Serial1 -OpenCM9.04 ile haberleşme

#define DXL_BUS_SERIAL2 2 //Dynamixel Serial2 -LN101,BT210 ile haberleşme

#define DXL_BUS_SERIAL3 3 //Dynamixel Serial3 -OpenCM 485EXP ile haberleşme

Dynamixel Dxl(DXL_BUS_SERIAL3);

word SyncPage[36]={}; // Motor kontrol haberleşme
```

```
int j,sayac=0; // Adım sayısı sayacı
int hiz=100; // Motor hızı %10
int tork=1023; // max tork değeri
void setup() {
Dxl.begin(3);
Dxl.maxTorque(sol_bilek_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sol_bilek_yatay,tork);
Dxl.maxTorque(sol_diz_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sol_kalca_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sol_kalca_yatay,tork);
Dxl.maxTorque(sol_kalca_cevresel,tork);
Dxl.maxTorque(sag_bilek_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sag_bilek_yatay,tork);
Dxl.maxTorque(sag_diz_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sag_kalca_dikey,tork);
Dxl.maxTorque(sag_kalca_yatay,tork);
Dxl.maxTorque(sag_kalca_cevresel,tork);
}
void loop() {
// Motor hız tanımları
Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_SPEED, hiz);
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_SPEED, hiz);
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_SPEED, hiz*2);
```

```
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_SPEED, hiz);
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_SPEED, hiz*1.5);
Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_SPEED, hiz);
Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_SPEED, hiz);
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_SPEED, hiz);
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_SPEED, hiz*2);
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_SPEED, hiz*2);
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_SPEED, hiz*1.5);
Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_SPEED, hiz);
// Başlangıç pozisyonu
Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 1748);
Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 2348);
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1608);
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1608);
Dxl.writeWord(orta_govde, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1478);
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1478);
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
```

```
delay(4000);
tekrar:
Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 1748);
Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 2348);
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1448);
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1448);
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1598);
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1648);
Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
for(j=0; j<=101; j++){
delay(0.3);
if(j>=0&&j<=24){
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048-(map(j,0,24,0,150))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048-(map(j,0,24,0,100))));
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (2048+(map(j,0,24,0,200))));
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (2048+(map(j,0,24,0,100))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, (1648-(map(j,0,24,0,250))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, (2048+(map(j,0,24,0,150))));
```

```
}
if(j>=25&&j<=49){
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (1898+(map(j,25,49,0,150))));
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (1948+(map(j,25,49,0,100))));
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (2248-(map(j,25,49,0,200))));
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, (2148-(map(j,25,49,0,100))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, (1398+(map(j,25,49,0,250))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, (2198-(map(j,0,24,0,150))));
}
if(j>=50&&j<=74){
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048+(map(j,50,74,0,150))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2048+(map(j,50,74,0,100))));
}
if(j>=75&&j<=99){
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2198-(map(j,75,99,0,150))));
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, (2148-(map(j,75,99,0,100))));
}
if(j>=100&&j<=101){
sayac = sayac+1;
goto tekrar;
}
if(sayac == 13){
Dxl.writeWord(ID_NUM_10, GOAL_POSITION, 2048);
```

```
Dxl.writeWord(sol_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 1748);
Dxl.writeWord(sag_bilek_dikey, GOAL_POSITION, 2348);
Dxl.writeWord(sol_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_bilek_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_kalca_yatay, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sag_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1448);
Dxl.writeWord(sol_diz_dikey, GOAL_POSITION, 1448);
Dxl.writeWord(sol_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1648);
Dxl.writeWord(sag_kalca_dikey, GOAL_POSITION, 1648);
Dxl.writeWord(sag_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
Dxl.writeWord(sol_kalca_cevresel, GOAL_POSITION, 2048);
delay(5000);
}}}
```

Ek 5 Jiroskop Kontrol Yazılımı

```
#include <Wire.h>  // Seri iletişim kütüphanesi

#include <Servo.h>  // Servo motor kütüphanesi

#define in1 5  // Arduino pin tanımları

#define in2 6  // Arduino pin tanımları

Servo gyroservo;  //Servo motor tanımı

double gecen_zaman, time, onzaman;  // Filtreleme tanımları

int i;

int rad_to_deg = 180 / 3.1415926;

int aci = 95;

int16_t ivme_X, ivme_Y, ivme_Z, aci_X, aci_Y, aci_Z;

float Hizlanma[2];

float Gyro_aci[2];

float Toplam_aci[2];

void setup() {  // Devre eleman adresleri, görev tanımları

Wire.begin();

Wire.beginTransmission(0x68);

Wire.write(0x6B);

Wire.write(0);

Wire.endTransmission(true);

Serial.begin(115200);

gyroservo.attach(10);

pinMode(5, OUTPUT);
```

```
pinMode(6, OUTPUT);
time = millis(); // milisaniye zaman tanımlanması
onzaman = time;  // gerçek zamandan önceki zaman
time = millis();  // gerçek zaman
gecen_zaman = (time - onzaman) / 1000;
}
void loop()
{
if (Serial.available() > 0) {  //OpenCM ile seri haberleşme
}
onzaman = time;
time = millis();
gecen_zaman = (time - onzaman) / 1000;
Wire.beginTransmission(0x68); //MPU6050 adress tanımı
Wire.write(0x3B);
Wire.endTransmission(false);
Wire.requestFrom(0x68, 6, true);
ivme_X = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //Seri haberleşme ile ivme verisi alma
ivme_Y = Wire.read() << 8 | Wire.read();
ivme_Z = Wire.read() << 8 | Wire.read();
Hizlanma[0] = atan((ivme_Y / 17000.0) / sqrt(pow((ivme_X / 17000.0), 2) +
pow((ivme_Z / 17000.0), 2))) * rad_to_deg; //filrelenmiş ivme değeri
Hizlanma[1] = atan(1 * (ivme_X / 17000.0) / sqrt(pow((ivme_Y / 17000.0), 2) +
pow((ivme_Z / 17000.0), 2))) * rad_to_deg;
```

```
Wire.beginTransmission(0x68);

Wire.write(0x43); //MPU6050 adress tanımı

Wire.endTransmission(false);

Wire.requestFrom(0x68, 4, true);

aci_X = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //Seri haberleşme ile açı verisi alma

aci_Y = Wire.read() << 8 | Wire.read();

Gyro_aci[0] = aci_X / 360.0;

Gyro_aci[1] = aci_Y / 360.0;

Toplam_aci[0] = 0.98 * (Toplam_aci[0] + Gyro_aci[0] * gecen_zaman) + 0.02 *
Hizlanma[0]; // filtrelenmiş açı değeri

Toplam_aci[1] = 0.98 * (Toplam_aci[1] + Gyro_aci[1] * gecen_zaman) + 0.02 *
Hizlanma[1];

aci = Toplam_aci[0] + 5.11 + 180;

int poz =(aci - 96);

Serial.println(poz);

Serial.println(gelenveri_RXTX, DEC);

analogWrite(in1, 150);

analogWrite(in2, 0);

Serial.println(poz);

İnt ser=map(poz,0,180,60,120);

yroservo.write(ser);

delay(5);

}
```

ÖZGEÇMİŞ

Eray YILMAZLAR 1988 yılında İstanbul'da doğdu. 2009 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Mekatronik Eğitimi bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Programında yüksek lisans eğitimine başladı. Eğitimiyle beraber MEB'da öğretmenlik mesleğinde eğitim verdi. 2012 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı ve aynı yıl Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Mekatronik programında öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2016 yılında başladığı Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği bölümünde doktora eğitimine devam etmektedir.

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FALİYETLER

Kuşcu, H., Yılmazlar, E., & Tez, T. (2018). Examination on Bipedal Robots Structures and Motion Control Methods. *J. Tech. Univ. Gabrovo*, 57(1), 69-72.

Yılmazlar, E., & Kuşçu, H. (2021). Walking Pattern Generation and Control for a Bipedal Robot. *Machines. Technologies. Materials*., 15(3), 99-102.

Yilmazlar, E., Kuşçu, H., & Güllü, A. (2021). *Comparative Analysis of Control Moment Gyroscope and Reaction Wheel Torque Effects in Balancing Systems*. *International Scientific Conference "UNITECH".,* 225-228.