



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**Farklı Yüzeyle Uyum Sağlayabilen Denge
Robotu İçin Zeki ve Adaptif Kontrol
Algoritmalarının Geliştirilmesi**

Ali ÜNLÜTÜRK

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2017
KONYA
Her Hakkı Saklıdır
TEZ KABUL VE ONAYI

TEZ KABUL VE ONAYI

Ali ÜNLÜTÜRK tarafından hazırlanan “FARKLI YÜZEYLERE UYUM SAĞLAYABİLEN DENGİ ROBOTU İÇİN ZEKİ VE ADAPTİF KONTROL ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması 06/10/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Hüseyin CANBOLAT

Danışman

Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

Üye

Doç. Dr. Muciz ÖZCAN

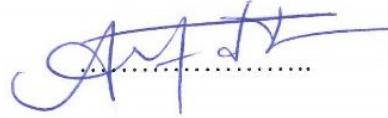
Üye

Yrd. Doç. Dr. Hulusi KARACA

Üye

Yrd. Doç. Dr. Akif DURDU

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.



Prof. Dr. Mustafa YILMAZ
FBE Müdürü

Bu doktora tez çalışması TÜBİTAK-BİDEP 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı tarafından desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza



Ali ÜNLÜTÜRK

Tarih: 06/10/2017

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI YÜZEYLERE UYUM SAĞLAYABİLEN DENGE ROBOTU İÇİN ZEKİ VE ADAPTİF KONTROL ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ

Ali ÜNLÜTÜRK

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

2017, 102

Jüri

Danışman: Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

Prof. Dr. Hüseyin CANBOLAT

Doç. Dr. Muciz ÖZCAN

Yrd. Doç. Dr. Hulusi KARACA

Yrd. Doç. Dr. Akif DURDU

Robotik alanında yapılan çalışmalar, birçok özelliği üzerinde barındıran yüksek kapasiteli işlemcilerle sahip tekrar programlanabilen gömülü sistem kartlarının geliştirilmesi ile büyük bir ivme kazanmıştır. Ayrıca, mekanik malzeme işleme tekniklerinin Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) ve 3D yazıcılar benzeri cihazlar yardımıyla kolaylaşması, yazılım teknolojisinin ilerlemesi ve değişik amaçlar için kullanılabilir şekilde tasarlanan mekanik malzeme ve elektronik donanım kartlarının ucuzlaması sayesinde de hızlı bir şekilde gelişmeye devam edecektir. Bu gelişmeye paralel olarak robotik uygulamalar toplumsal alanlarda artarak hizmet vermeye başlamışlardır. Yakın bir gelecekte ise sayısız birçok alanda robotlar hayatımızın vazgeçilmezleri arasına girecektir. Özellikle insanlara yardımcı olan robotlar evlerde, hastanelerde, ofislerde, fabrikalarda ve birçok farklı alanda hizmet vereceklerdir. Örneğin, son zamanların popüler araçlarından olan Segway'ler özel güvenlik birimlerince alışveriş merkezlerinde, hava alanlarında, fabrikalarda, hastanelerde ve birçok alanda kısa mesafe ulaşım aracı olarak kullanılmaktadır.

Mobil Denge Robotları (MDR) lineer olmayan yapısından dolayı robotik ve kontrol alanında çalışan birçok araştırmacı için üzerinde yazılım geliştireceği bir platform olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Son yıllarda Mikro Elektro Mekanik Sensör (MEMS) teknolojisinin gelişmesine paralel olarak farklı mekanik tasarımlara sahip MDR'ler araştırmacılar tarafından gerçek zamanlı uygulamalar olarak inşa edilmiştir. İnşa edilen bu robotların çoğu pürüzsüz ve düz zeminlerde dengesini sürdürmektedir. Denge robotlarının otonom olarak pürüzlü, eğimli veya gevşek zeminlerde dengesini sürdürebilmesi ve hareket edebilmesi oldukça zordur. Yüzeyin pürüzlü, eğimli veya gevşek olduğu zeminlerde robotun bulunduğu yüzeyi algılama yeteneğine sahip olması gerekmektedir. Algılanan bu yüzey koşullarına göre MDR'nin sahip olduğu denetleyici algoritmasının adaptif olarak güncellenmesi gerekmektedir.

Tasarlanan MDR'nin yüzeye göre denetleyici parametresini güncellemesi gerektiği yapılan deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Bunun için farklı sürtünme katsayısına sahip yüzeyler İngiliz Ters Sarkaç (İTS) sistemi ile belirlenmiş ve robotun denge performansı farklı denetleyici parametreleri dikkate alınarak izlenmiştir.

Bu tezde, farklı zeminlerde kendi kendini dengeleyebilen iki tekerlekli denge robotunun gerçek zamanlı denetiminde kullanılmak üzere yeni bir Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı Anahtarlamalı Adaptif Kontrol (AAK) algoritması geliştirilmiş ve pratik olarak uygulanmıştır. Önerilen bu YSA tabanlı AAK yapısının etkinliğinin incelenebilmesi için yazılım ve donanım yapısı bakımından özgün bir tasarıma sahip MDR tasarlanmıştır. Aynı zamanda gevşek zeminlerdeki denge problemi için üç farklı yüzeyden oluşan (toprak, çakıl ve kum) bir denge test platformu da oluşturulmuştur. Farklı zeminlere uyum için geliştirilen

adaptif denetleyici algoritmasında YSA tabanlı bir yüzey tahmin birimi tasarlanmış ve yüzey tahmini için üç farklı yüzeye ait Mutlak Referans Açık Sapma Hatası Ortalaması (MRASHO), Mutlak Referans Yerdeğiştirme Sapma Hatası Ortalaması (MRYSHO) ve Mutlak Kontrolör Çıkışı Ortalaması (MKÇO) verileri kullanılmıştır. Robottan elde edilen bu yeni özellikli veriler YSA'nın giriş verisi olarak kullanılmıştır. Böylece gerçek zamanlı olarak robotun bulunduğu yüzey tahmin edilmiş ve robotun daha kararlı bir şekilde farklı yüzeylerde dengesini sürdürebilmesi için adaptif bir denetleyici tasarlanmıştır. Geliştirilen MDR sisteminde, robot eğim açısı değişimi Kalman filtresi aracılığıyla tahmin edilmiştir. Ayrıca bu tezde, robota ait denetleyici parametrelerinin istenilen şekilde değiştirilebileceği, robot denge açısının, lineer yer değiştirmenin ve kontrolör çıkışının anlık olarak izlenebileceği C++ yazılım geliştirme ortamında görsel bir Robot Kontrol Arayüzü (RC-GUI)'de geliştirilmiştir. Denge robotuna uygulanan bu yeni AAK yapısı ile diğer klasik denetleyici algoritmaları karşılaştırılmış ve geliştirilen bu yeni adaptif denetleyicinin klasik denetleyicilere göre daha etkili sonuçlar verdiği, gerçek zamanlı olarak elde edilen deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Ayrıca bu doktora tez çalışmasında MEMS tabanlı çoklu sensörler (jiroskop sensörü, ivme sensörü, manyetometre sensörü ve barometrik basınç sensörü) uygun şekilde kalman filtresi ile birleştirilerek Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU) tasarlanmıştır. MDR sistemi için kullanılan sensörlerden elde edilen yönelim açıları, tasarlanan denge testi platformunda kalibrasyonu yapılarak doğru bir şekilde elde edilmiştir.

Bunlara ilave olarak tasarlanan MDR'ye ait yeni bir PI-V denetleyici algoritması ve hareket kontrol algoritmaları da geliştirilmiştir. Ayrıca robotun üzerinde bulunan İnternet Protokolü (IP) kamera sayesinde robotun hareket denetimi esnasında bulunduğu ortamdan bilgisayar üzerinde çalışan RC-GUI'ye görüntü aktarması sağlanmıştır. Bu sayede robotun bir operatör tarafından kolayca kontrol edilebilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anahtarlamalı Adaptif Kontrol, Yapay Sinir Ağları, Atalet Moment Ölçüm Birimi, Sensör Birleştirme, Kalman Filtresi, Mobil Denge Robotu.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT AND ADAPTIVE CONTROL ALGORITHMS FOR BALANCE ROBOT CAPABLE OF ADAPTING DIFFERENT SURFACES

Ali ÜNLÜTÜRK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Omer AYDOĞDU

2017, 102

Jury

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Omer AYDOĞDU

Prof. Dr. Hüseyin CANBOLAT

Assoc. Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

Asst. Prof. Hulusi KARACA

Asst. Prof. Akif DURDU

Studies in robotics have gained tremendous momentum with the development of embedded system cards which can be reprogrammed, with high processor capacity, with many features. In addition, this development will continue to evolve rapidly thanks to the facilitation of mechanical material processing techniques with the help of Computerized Numeric Control (CNC) and similar devices, the advancement of software technology and the reduction of mechanical materials and electronic hardware cards designed for various purposes. Parallel to this development, robotic applications have begun to serve gradually in social spheres. In the near future, robots will be among the indispensable parts of our lives in many countless areas. In particular, robots which help people will serve in homes, hospitals, offices, factories and many other areas. For example, Segways, which are popular vehicles of recent times, are used by private security units as short distance transportation in shopping malls, airports, factories, hospitals and lots of areas.

The Mobile Balance Robots (MDRs) are often used as a software development platform for many researchers working in the field of robotics and control due to its nonlinear structure. In recent years, parallel to the development of Micro Mechanic Elektronik Sensor (MEMS) technology, robots with different mechanical designs have been built in real time by researchers. Most of these robots can keep balance on smooth and flat grounds. It's difficult for mobile balance robots to keep balance autonomously and move on different surfaces. In particular, if the surface is rough, sloping and loose, the robot must have the ability to detect the surface it is on. Based on these perceived surface conditions, the controller algorithm of the mobile balance robot needs to be adaptively updated.

Experimental studies have shown that the designed MDR must update its controller parameter according to the surface. Thus, Surfaces which have Different friction Coefficient have been chosen by British Inverted Pendulum and balance performance of the robot has been observed considering Different controller parameters.

In this thesis, a novel Artificial Neural Network (YSA) based Switching Adaptive Controller (AAK) algorithm has been developed and practically implemented to be used for real time control of two wheeled balance robot which can keep balance on different surfaces. In order to examine the effectiveness

of this proposed AAK structure, a mobile balance robot with a unique design in software and hardware structure has been designed. At the same time, a test platform consisting of three different surfaces (soil, pebble and sand) has been created for the balance problem on rough and loose grounds. In the adaptive controller algorithm developed for adaptation to different floor types, an YSA based surface estimation unit has been designed and Absolute Reference Angle Deviation Error Mean (MRASHO), Absolute Reference Displacement Deviation Error Mean (MRYSHO) and Absolute Controller Output Mean (MKÇO) data of three different surfaces have been used for surface estimation. The new data obtained from the robot has been used as YSA input data. Thus, the surface of the robot has been estimated. As a result, an adaptive controller has been designed to enable that the robot can keep balance on different surfaces in a more stable way. Robot tilt angle change has been estimated by extended Kalman filter in the designed mobile balance robot system. In addition, in this thesis, a visual Robot Control Interface (RC-GUI) has been developed in the C ++ software development environment in which the robot controller parameters can be changed as desired, robot equilibrium angle, linear displacement and controller output can be monitored online. This new AAK structure applied to the balance robot has been compared with other classical controller algorithms and it is seen that this new AAK performs better than conventional controllers according to the experimental results obtained in real time.

In the thesis, Inertial Measurement Unit (IMU) has been designed by fusing MEMS based multi sensors (Gyroscope sensor, acceleration sensor, magnetometer sensor and barometric pressure sensor) with Kalman filter properly. After They are calibrated on the balance test platform, orientation angles obtained from the sensors used for MDR system have been acquired correctly.

In addition, a new PI-V controller algorithm and motion control algorithms have been developed for the designed MDR. Moreover, image transfer has been realized from the environment during motion control of the robot into the operator panel thanks to the Internet Protocol (IP) camera on the robot. So, the robot could be controlled easily by an operator.

Keywords: Switching Adaptive Control, Artificial Neural Network, Inertial Measurement Unit, Sensor Fusion, Kalman Filter, Mobile Balance Robot.

ÖNSÖZ

Son yıllarda robot teknolojisinde meydana gelen gelişmeye paralel olarak birçok robot; endüstride, sağlık sektöründe, savunma sanayisinde, hizmet sektöründe ve daha birçok sayısız alanda hizmet vermektedir. Özellikle hizmet sektöründe Segway olarak bilinen iki tekerlekli robotlar oldukça popülerdir. Bu iki tekerlekli robotlar aktif olarak hava alanlarında, alışveriş merkezlerinde ve buna benzer birçok alanda bina içi kısa mesafe ulaşım aracı olarak kullanılmaktadır. Buna rağmen denge robotlarının özellikle kum, çakıl gibi gevşek yüzeylerde hareket kabiliyetinin sınırlı olması ve durağan durum denge performanslarının çok iyi olmaması gibi birtakım dezavantajlara sahiptir. Bu olumsuz durumlar, denge robotlarının kullanım alanlarını oldukça sınırlandırmaktadır.

İki tekerlekli denge robotlarının otonom olarak farklı yüzeylerde en iyi şekilde denge durumunu sürdürebilmesi ve hareket edebilmesi için bulunduğu yüzeyi algılaması gerekmektedir. Robotun bulunduğu yüzeyi algılayabilmesi ve algıladığı yüzeye göre de denetleyici parametresini güncelleyebilmesi için robotik görme alanından faydalanılması gerekmektedir. Fakat günümüzde robotik görme ve algılamada çok pahalı kamera veya lazer sensörler kullanılmaktadır. Bu durum robotik sistemlerinin maliyetini önemli miktarda artırmaktadır. Bu tez çalışmasında tasarlanan denge robotunun kamera veya lazer sensörler olmadan maliyetsiz bir şekilde bulunduğu yüzeyi kolayca algılayabilmesi için yeni bir Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı Anahtarlamalı Adaptif Kontrolör (AAK) tasarımı yapılarak pratik uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yüzey tahmini için robotun eğim açısı değişimi, lineer yerdeğiştirme ve kontrolör çıkışı gibi kolaylıkla elde edilebilen sistem verilerinden yeni özellikler çıkarılmıştır. Çıkarılan bu yeni özellikli robot verileri YSA'nın girişlerinde kullanılmıştır. Böylece denge robotunun bulunduğu yüzeyi algılayabilmesi ve bulunduğu yüzeye göre denetleyici parametresini güncelleyebilmesi sağlanmıştır.

Yapılan doktora tez çalışmasında çoklu sensör gruplarından da faydalanılmıştır. Bu çoklu sensörler jiroskop sensörü, ivme sensörü, manyetometre sensörü ve barometrik basınç sensörlerini içermektedir. Ele alınan bu sensörler uygun şekilde kalman filtresi ile birleştirilerek Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU) tasarlanmıştır. Böylece üç boyutlu uzayda hareket edebilen bir sistemle ilgili yönelim açıları (eğim açısı, sapma açısı ve dönme açısı), tasarlanan denge testi platformunda kalibrasyonu yapılarak doğru bir şekilde elde edilmiştir. Ayrıca, tasarlanan bu IMU sistemi son zamanların popüler araçlarından olan

İnsansız Hava Araçlarının (İHA) kontrolünde de aktif olarak kullanılabilir esneklikte dir.

Yapılan tez çalışması bütün olarak ele alındığında, pratik olarak birçok konu ele alındığı için konu ile ilgili teorik veya pratik çalışma yapan birçok araştırmacıya veya ilgili firmalara oldukça katkı sağlayacaktır.

Yukarıda bahsedilen hususlar doğrultusunda Doktora çalışmalarım süresince beni yönlendiren ve destek olan danışmanım Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU'ya, tez izleme komitesi üyeleri Yrd. Doç. Dr. Hulusi KARACA'ya ve Yrd. Doç. Dr. Akif DURDU'ya teşekkür ederim. Aynı zamanda doktora tez çalışmamda bana destek olan öncelikli olarak Araş. Gör. Ufuk GÜNER'e, Araş. Gör. Mücahit BARSTUGANA, Araş. Gör. Dr. Abdussamet SUBAŞI'na ve Şahin ÇEVİK'e de teşekkürü bir borç bilirim. Bunlara ilaveten BİDEP 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında doktora çalışmama sağladığı desteklerden dolayı TÜBİTAK'a da teşekkür ederim.

Son olarak yoğun çalışmalarım süresince bana sabırla destek veren değerli eşime, anneme, babama ve kardeşlerime de ayrıca teşekkür ederim.

Ali ÜNLÜTÜRK
KONYA, Ekim-2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT	vii
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Konunun Tanıtımı	2
1.2. Çalışmanın amacı ve Önemi	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1. Adaptif Denetleyiciler	17
3.1.1. Kazanç Listeleme	18
3.1.2. Model Referans Adaptif Kontrol	19
3.1.3. Kendi Kendine Ayarlanan Regülatör	20
3.1.4. Anahtarlamalı Çoklu Model Adaptif Kontrol	21
3.2. Yapay Zekâ Teknikleri ile Tahmin Algoritmaları	23
4. GELİŞTİRİLEN DENGE ROBOTU VE MATEMATİKSEL MODELİ	29
4.1. Mobil Denge Robotunun Donanım Yapısı	30
4.2. PC Kontrol Arayüzü	31
4.3. MEMS Tabanlı Sensör Modelleri	32
4.3.1. İvme Sensörü	34
4.3.2. Jiroskop Sensörü	36
4.3.3. Manyetometre	37
4.4. Sensör Birleştirmesi İçin Kalman Filtresi Tahmini	38
4.5. Matematiksel Model	40
5. MOBİL DENGE ROBOTUNUN GERÇEK ZAMANLI KLASİK VE ADAPTİF KONTROLÜ	49
5.1. Klasik P, PI, PD ve PID Kontrol	54
5.1.1. Klasik Denge Kontrolü Uygulama Sonuçları	55
5.2. PI-V Kontrol	65
5.2.1. PI-V Denge Kontrolü Uygulama Sonuçları	66
5.3. Mobil Denge Robotu İleri-Geri Hareket Kontrolü	67
5.3.1. Hareket Kontrolü Uygulama Sonuçları	69
5.4. Farklı Zeminlere Uyum Sağlayabilen Anahtarlamalı Adaptif Kontrol	72
5.4.1. YSA Tabanlı Adaptasyon Mekanizması	74

5.4.2.	Adaptasyon Mekanizması İçin Geliştirilen Yapay Sinir Ağı Modeli.....	83
5.4.3.	YSA tabanlı Anahtarlama Adaptif Kontrol Uygulama Sonuçları.....	86
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
6.1.	Sonuçlar.....	91
6.2.	Öneriler.....	93
KAYNAKLAR		94
ÖZGEÇMİŞ.....		101



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_x, A_y, A_z	Yapısal hatalara sahip ivme sensörü çıkışı (A_h matrisi)
a_x, a_y, a_z	Kalibrasyonlu gerçek ivme ölçümü (a_a matrisi)
$a_{x_kayma}, a_{y_kayma}, a_{z_kayma}$	İvme sensörü kayma hatası (A_k matrisi)
$a_{ij}, (i = j = 1, 2, 3)$	Ölçüm eksenlerindeki sapma etkisi (C_a ve C_w matrisleri)
B_s	Basıklık
ζ_k	Çarpıklık
D	Gövde derinliği
f_m	Gövde ve DC motor arasındaki sürtünme katsayısı
f_w	Teker ve zemin arasındaki sürtünme katsayısı
F_θ	Tekere etkiyen kuvvet
F_ψ	Gövde eğim açısı kuvveti
F_ϕ	Gövde sapma açısı kuvveti
g	Yerçekimi ivmesi
H	Gövde yüksekliği
H_e	Entropi
i_a	Armatür boyunca akan akım
i_l	Sol DC motor armatür akımı
i_r	Sağ DC motor armatür akımı
J_w	Teker atalet momenti (her bir teker)
J_ψ	Gövde eğim açısı atalet momenti
J_ϕ	Gövde sapma açısı atalet momenti
J_m	DC motor atalet momenti
K_A	İvme sensörü kalibrasyon matrisi
K_e	DC motor Zıt Elektro-Motor Kuvvet (EMK) sabiti
K_t	DC motor tork sabiti
K_w	Jiroskop sensörü kalibrasyon matrisi
L_m	DC motor endüktansı
L	Ağırlık merkezinin tekerlek eksenlerinden uzaklığı
M_x, M_y, M_z	Yapısal hatalara sahip manyetometre sensörü çıkışı
m_x, m_y, m_z	Kalibrasyonlu manyetometre sensörü çıkışı
$m_{x_gürültü}, m_{y_gürültü}, m_{z_gürültü}$	Manyetometredeki manyetik gürültüler
M	Ters sarkacın gövde ağırlığı
m	Tekerlek ağırlığı (her bir teker)
$n (N_1/N_2)$	Dişli oranı
N	Örnekleme sayısı
R	Teker yarıçapı
R_m	DC motor direnci
S_{ax}, S_{ay}, S_{az}	İvme sensörü ölçek faktörü hatası (S_a matrisi)
S_{mx}, S_{my}, S_{mz}	Manyetometre ölçek faktörü hatası
S_{wx}, S_{wy}, S_{wz}	Jiroskop sensörü ölçek faktörü hatası (S_w matrisi)
T_a	Uygulanan tork
T_m	Motor torku
T_1	Öteleme kinetik enerji
T_2	Dönme kinetik enerji

U	Potansiyel enerji
w	Gövde genişliği
V_m	Motor terminal voltajı
V_e	Zıt EMK voltajı
W_x, W_y, W_z	Yapısal hatalara sahip jiroskop sensörü çıkışı (w_h matrisi)
w_x, w_y, w_z	Kalibrasyonlu gerçek jiroskop sensör çıkışı (w_j matrisi)
$W_{x,kayma}, W_{y,kayma}, W_{z,kayma}$	Jiroskop sensörü kayma hatası (w_k matrisi)
x	Lineer yerdeğiştirme
\dot{x}	Lineer hız
\ddot{x}	Lineer ivme
x_b	Robotun gövde ağırlık merkezinin x eksenindeki değeri
x_l	Sol tekerin x eksenindeki değeri
x_m	Tekerlerin şaft merkezinin x eksenindeki değeri
x_r	Sağ tekerin x eksenindeki değeri
X_r	Robotun referans yerdeğiştirmesi
$X_{Yerdeğiştirme}$	Robotun yerdeğiştirmesi
x_1, x_2	Durum değişkenleri
y_b	Robotun gövde ağırlık merkezinin y eksenindeki değeri
y_l	Sol tekerin y eksenindeki değeri
y_m	Tekerlerin şaft merkezinin y eksenindeki değeri
y_r	Sağ tekerin y eksenindeki değeri
z_b	Robotun gövde ağırlık merkezinin z eksenindeki değeri
z_l	Sol tekerin z eksenindeki değeri
z_m	Tekerlerin şaft merkezinin z eksenindeki değeri
z_r	Sağ tekerin z eksenindeki değeri
θ	Sağ ve sol tekerin ortalama açısı
θ_l	Sol teker açısı
θ_m	Motor şaftının dönme açısı
$\dot{\theta}_m$	Motor şaftının açısal dönme hızı
θ_r	Sağ teker açısı
θ_{xz}	IMU yuvarlanma açısı
θ_{yz}	IMU eğim açısı
θ_{xy}	IMU sapma açısı
$\Psi_{Eğim}$	Robotun gerçek eğim açısı
Ψ_r	Robotun referans eğim açısı
\emptyset	Robotun sapma açısı
σ	Anahtarlama fonksiyonu
σ_s^2	Varyans
μ	Ortalama
μ_f	Sürtünme katsayısı

Kısaltmalar

AAK	: Anahtarlamalı Adaptif Kontrol
ADC	: Analog Dijital Dönüştürücü
AKNS	: Ara Katman Nöron Sayısı
BFS	: Sığ Öncelikli Arama
CLF	: Kontrol Lyapunov Fonksiyonu
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
CoF	: Sürtünme Katsayısı
COG	: Ağırlık Merkezi Pozisyonu
ÇKP	: Çok Katmanlı Perceptron
DC	: Doğru Akım
DFS	: Derin Öncelikli Arama
FBFN	: Bulanık Tabanlı Fonksiyon Ağı
FOSMC	: Tam Dereceli Kayan Kipli Kontrol
FPGA	: Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri
GKB	: Gömülü Kontrol Birimi
IMU	: Atalet Ölçüm Birimi
IAE	: Hatanın Mutlak Değerinin İntegrali
IP	: İnternet Protokolü
ISMC	: İntegral Kayan Kipli Kontrol
I2C	: Ara Tümeleşik Devre
İHA	: İnsansız Hava Aracı
İTS	: İngiliz Ters Sarkacı
İTSD	: İngiliz Ters Sarkaç Değeri
Li-Poly	: Lityum Polimer
LMI	: Lineer Matris Eşitsizliği
LQR	: Lineer Quadratik Regülatör
LR	: Öğrenme Oranı
LTİ	: Lineer Zamanla Değişmeyen
Mc	: Momentum Katsayısı
MDR	: Mobil Denge Robotu
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
MKÇO	: Mutlak Kontrolör Çıkışı Ortalaması
MRAC	: Model Referans Adaptif Kontrol
MRASHO	: Mutlak Referans Açık Sapma Hatası Ortalaması
MRYSHO	: Mutlak Referans Yerdeğiştirme Sapma Hatası Ortalaması
ÖS	: Özellik Sayısı
P	: Oransal
PC	: Kişisel Bilgisayar
PI	: Oransal-Integral
PD	: Oransal-Türev
PID	: Oransal-Integral-Türev
PI-V	: Proportional-Integral-Hız
PM	: Kalıcı Mıknatıslı
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
RBF	: Radyal Tabanlı Fonksiyon
RC-GUI	: Robot Kontrol Arayüzü
RISC	: İndirgenmiş Komut Kümesi Hesaplama
SISO	: Tek Girişli Tek Çıkışlı

TCP-IP : Aktarma Kontrol Protokolü/Internet Protokolü
VDI : Vestibuler Dinamik Eğim Ölçer
YSA : Yapay Sinir Ağları
ZMP : Sıfır Moment Noktası



1. GİRİŞ

Son yıllarda robotik alanındaki gelişmeler gömülü sistem kartlarının yaygınlaşması, farklı mekanik tasarımlarının CNC işleme teknikleri veya üç boyutlu yazıcılar yardımıyla kolayca gerçekleştirilebilmesi, robotik sistemlerde kullanılan donanım ve yazılım sistemlerinin ucuzlaması ve erişilebilirliği sayesinde hızlı bir şekilde ilerlemektedir.

Robotik alanında yapılan çalışmalar oldukça kapsamlı ve çeşitlidir. Disiplinler arası çalışmalar yürütüldükçe çok farklı yapılara sahip robotlar tasarlanmakta ve pratik olarak gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen bu robotlar endüstride, savunma sanayinde, sağlık sektöründe, sosyal alanlarda, eğlence sektöründe ve daha birçok sayısız alanda kullanılmaktadır (Lee ve Jung, 2010). Günümüzde aktif olarak kullanılan birçok robotun kabiliyetleri oldukça gelişmiştir. Robotların kabiliyetleri arttıkça enerjiye duyduğu ihtiyaç da artmaktadır. Bundan dolayı, son on yıl içerisinde birçok araştırmacı dört tekerlekli robotların yerine daha az enerjiye ihtiyaç duyan ve manevra yeteneği oldukça yüksek olan iki tekerlekli mobil denge robotları üzerine araştırmalarını yoğunlaştırmışlardır.

Çok iyi bilinen ticari bir ürün olan iki tekerlekli Segway en popüler kişisel taşıyıcıdır (Xu ve ark., 2013). Bu robotlar genellikle büyük alışveriş merkezlerinde, hastanelerde, fabrikalarda ve daha birçok sayısız alanda bina içi ve çevresinin güvenliğinin sağlanmasında veya bir personelin bir yerden bir yere ulaşımını sağlayan kısa mesafe taşıma aracı olarak kullanılmaktadır. İki tekerlekli mobil taşıyıcıların kompakt yapısı, pratik işleyişi, dar alanlardaki yüksek manevra yeteneği ve düşük güç tüketimi gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak kullanımı da gittikçe artmaktadır (Yue ve ark., 2016). Ayrıca, bu gibi sistemlerin doğasındaki kararsız dinamik yapı robotun denge kontrolü ve hareket planlamasını oldukça zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı hem akademide hem de endüstride birçok robotik araştırmacı için ilgi odağı olmaya devam etmektedir (Grasser ve ark., 2002; Salerno ve Angeles, 2007; Takei ve ark., 2009; Goher ve Tokhi, 2010; Ye ve ark., 2016; Unluturk ve Aydogdu, 2017). İki tekerlekli denge robotunun kontrol amacı kararsız denge noktası olan sarkacı dik pozisyon civarında sabitlerken tekerlerin pozisyonunu ve hız kontrolünü gerçekleştirmektir (Xu ve ark., 2013). Bu gibi sistemlerde kontrol girişi sayısı kontrol edilen serbestlik derecesinden daha az olduğu için eksik tahrikli (underactuated) sistemler olarak adlandırılır (Reyhanoğlu ve

ark., 1999; Isidori ve ark., 2003). Bundan dolayı da iki tekerlekli denge robotlarının gerçek zamanlı kontrolünün kararlılığı ve gürbüzlüğü oldukça zor ve karmaşıktır.

Bu doktora tez çalışmasında, MDR'nin kararsız dinamik yapısına ilaveten robotun denge durumunu önemli derecede etkileyen tekerlek temas yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Robotun tekerlek temas yüzeyi olarak, düz ve pürüzsüz zeminlerden ziyade pürüzlü ve gevşek zeminler seçilmiştir. Seçilen pürüzlü ve gevşek zeminlerde dahi kendi kendini dengeleyebilen MDR'nin gerçek zamanlı denetiminde kullanılmak üzere yeni bir adaptif dinamik denetleyici algoritması geliştirilmiş ve pratik olarak uygulanmıştır.

1.1. Konunun Tanıtımı

Dünya genelinde birçok araştırmacı farklı yapılarda eğitim ve araştırma amaçlı kendi kendine dengede kalabilen, ileri-geri hareket edebilen ve sağa-sola dönebilen MDR'u üzerinde araştırmalar yapmışlardır (Kim ve ark., 2005; Jung ve Kim, 2008; Chiu ve ark., 2011b; Lee ve Jung, 2012; Khooban ve ark., 2013; Park ve Jung, 2013; Xu ve ark., 2013; Ahn ve Jung, 2014; Guo ve ark., 2014; Sukvichai ve Parnichkun, 2014; Xu ve ark., 2014a; Yang ve ark., 2014; Kim ve Jung, 2016). Yapılan bu araştırmaların sonucunda yayınlanan çalışmaların birçoğu benzetim sonuçlarına ve teorik analizlere dayanmaktadır (Xu ve ark., 2013). Çünkü lineer olmayan yapısından dolayı bu tip sistemlerin dinamikleri oldukça karmaşık ve hareket planlaması da oldukça zordur (Ratajczak ve Tchoń, 2011). Buna rağmen az sayıdaki araştırmacı gerçek zamanlı MDR sistemleri tasarlamışlar ve bu robot sistemi üzerinde kendilerine ait kontrol algoritmalarını uygulamışlardır. Örneğin, Grasser ve arkadaşları, İsveç Federal Teknoloji Enstitüsündeki Endüstriyel Elektronik Laboratuvarında robot JOE'yi geliştirmişlerdir (Grasser ve ark., 2002). Perceptual Robotik Laboratuvarlarına bağlı olarak çalışan Scott ve arkadaşları insansı yetenekleri olan bir uBot-5 robot uygulamasını ele almışlardır (Kuindersma ve ark., 2009). David P. Anderson ise, kendine özgü bir nBot tasarlamıştır (Anderson, 2003). İki tekerlekli bir başka robot olan NASA's Robonaut ise NASA'nın sağlamış olduğu işbirliği ile DARPA tarafından inşa edilmiştir (Ambrose ve ark., 2004). MIT tarafından geliştirilen Cardea, iki tekerlekli mobil denge robotunun bir başka örneğidir (Brooks ve ark., 2004). B2 olarak adlandırılan iki tekerlekli araç ise alternatif bir ticari taşıma sistemi olarak tasarlanmıştır (Tirmant ve ark., 2002). Segway olarak adlandırılan hareketli mobil denge platformu ise iki tekerlekli denge robotları içerisinde en çok bilinen robotik taşıma aracıdır (Anonim, 2015).

Yukarıda bahsedilen tüm bu robotların ortak özelliği bir şafta bağlı birbirinden bağımsız iki teker üzerinde dengede kalabilen mobil robotik platformlar olmasıdır. MDR sistemlerinin kendi kendine iki teker üzerinde dengede kalabilmesi için ve bu robotların gerçekleştirebileceği fonksiyonlara göre çok çeşitli denetleyici yapıları ortaya konulmuştur. Denge robotunun kontrolünde klasik kontrol (Unluturk ve ark., 2013), bulanık mantık yapısına dayalı kontrol (Li ve Xu, 2009; Huang ve ark., 2011; Wu ve ark., 2012; Khooban ve ark., 2013; Xu ve ark., 2013), yapay sinir ağları tabanlı kontrol (Jung ve Kim, 2008; Tsai ve ark., 2010a; Li ve Yang, 2012; Yang ve ark., 2014), kayan kipli kontrol (Huang ve ark., 2010; Guo ve ark., 2014; Xu ve ark., 2014a), adaptif kontrol (Li ve Zhang, 2010; Li ve Yang, 2012), backstepping kontrol (Chiu ve ark., 2011a) gibi değişik denetleyici yapıları kullanılmıştır.

Denge robotu üzerinde uygulanan kontrol algoritmalarının çoğu eğimsiz ve düz zeminlerde robotun denge durumunun iyileştirilmesi ile ilgilidir. Farklı özelliklere sahip zeminlerde (gevşek ve eğimli zeminlerde) robotun denge durumunun sağlanabilmesi için gelişmiş kontrol algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında, farklı zeminlerde dahi kendi kendini dengeleyebilen MDR'nin gerçek zamanlı denetiminde kullanılmak üzere yeni bir geri beslemeli Yapay Sinir Ağları (YSA) tabanlı Anahtarlamalı Adaptif Kontrolör (AAK) algoritması geliştirilmiş ve pratik olarak uygulanmıştır. Önerilen bu denetleyici yapısının performansının incelenebilmesi için otonom bir MDR tasarlanmıştır. Ayrıca, farklı zeminlerdeki denge probleminin araştırılabilmesi için bir denge test platformu da oluşturulmuştur. Farklı yüzeylerden oluşan deneysel platform sayesinde gerçek zamanlı olarak klasik denetleyici ve önerilen adaptif denetleyici algoritmalarının performansı incelenmiştir. Sonuçta, geliştirilen bu yeni adaptif denetleyicinin farklı yüzeylerdeki denge probleminde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Tezin içeriği incelenirse; konunun tanıtımı, çalışmanın amacı ve önemi bölüm 1'de verilmiştir. Bölüm 2'de kaynak araştırması ele alınmıştır. Bölüm 3'te konu ile ilgili materyal ve yöntem anlatılmıştır. Geliştirilen MDR'nin donanım yapısı, robot kontrol arayüzü, MEMS tabanlı sensör modelleri, kalman filtresi ve robotun matematiksel modeli Bölüm 4'te ele alınmıştır. Mobil denge robotunda uygulanan gerçek zamanlı klasik, adaptif ve hareket kontrol algoritmaları Bölüm 5'de anlatılmıştır. Son olarak Bölüm 6'da ise, çalışma ile ilgili sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

1.2. Çalışmanın amacı ve Önemi

Bu çalışmada farklı yüzeyleri algılayarak denetleyici parametresini adaptif olarak güncelleyebilen MDR'nin tasarımı ve pratik olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun sağlanabilmesi için öncelikli olarak iki teker üzerinde kendi kendine dengede kalabilen ve bir operatör bilgisayarı aracılığıyla hareket edebilen MDR tasarlanmıştır. Daha sonra robotun farklı yüzeylerde en iyi şekilde denge durumunu sağlayabilmesi için farklı sürtünme katsayısına sahip zeminlerde ve gevşek zeminlerde denge testleri gerçekleştirilmiştir. Denge testleri için iki farklı test platformu kullanılmıştır. İlk test platformu farklı yüzey sürtünme katsayısına sahip zeminlerden oluşmaktadır. Ele alınan bu düz zeminlerin sürtünme katsayısı ise, İngiliz Ters Sarkacı (İTS) vasıtasıyla belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı belirlenen zeminler üzerinde, tasarlanan MDR'nin denge testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci test platformu ise 3 farklı yüzeyden (toprak, çakıl ve kum) oluşan gevşek zeminlerdir. Gevşek zeminlerin seçilmesinin ana nedeni MDR'nin denge durumuna etki eden yüzey bozucu etkisinin daha da artırılarak robot için daha etkili olabilecek adaptif denge kontrol algoritmalarının geliştirilmesidir. Gevşek zeminlerde de MDR'nin denge testleri gerçekleştirilmiştir.

MDR'nin zor olan gevşek zeminlerdeki durağan denge durumu ve hareket kabiliyetinin iyileştirilmesi için robotun bulunduğu yüzeyi algılaması ve bulunduğu yüzeye göre en uygun denetleyici parametresini ayarlaması gerekmektedir. Tezin önemli bir özelliği de, robotun bulunduğu yüzeyi tanınması için yüksek çözünürlüklü pahalı kamera veya lazer gibi sensörlerinin kullanılmamasıdır. Bunun yerine, robot farklı yüzeylerde dengesini sürdürmeye çalışırken kolayca elde edilebilen veriler (eğim açısı, lineer yerdeğiştirme ve kontrolör çıkışı) kullanılmaktadır. Robotun bulunduğu yüzeyi tahmin edebilmesi için bu ham verilerden yeni özellikler türetilmiştir. Robot sistemine ait çıkarılan bu özellikler YSA'nın eğitim ve testinde kullanılmıştır. Sonuç olarak robotun bulunduğu yüzeyi algılaması ve tahmini gerçekleştirilerek en uygun YSA yapısı oluşturulmuştur. Bu sayede robotun bulunduğu yüzeyi tanınması sağlanmıştır. Robotun bulunduğu yüzeyi tanınması YSA ile sağlandıktan sonra robotun denetleyici parametresi YSA tabanlı AAK vasıtasıyla güncellenmiştir. Böylece, robotun farklı özellikte olan yüzeyleri öğrenmesi sağlanarak en iyi denge ve hareket kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Böylece, robotun farklı zeminlere göre denetleyici parametrelerini güncelleyebilmesi sayesinde robot farklı yüzey koşullarında da kullanılabilir.

Yapılan tez çalışması bütün olarak değerlendirildiğinde; MDR'nin durağan denge ve hareket performansını iyileştiren bu yeni YSA tabanlı AAK yapısı klasik denetleyicilerden daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca, geliştirilen bu YSA tabanlı AAK yapısı son zamanların popüler araçlarından olan İnsansız Hava Araçlarının (İHA) otonom olarak uçuşunu etkileyen hava koşullarının tahmin edilmesi ve bu tahmine göre İHA'nın kontrolünde önemli bir yere sahip olan motorların adaptif olarak denetiminde de kullanılabilir. Görüldüğü gibi geliştirilen bu yeni adaptif denetleyici yapısı, doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde gerçek zamanlı kullanılacak bir yapıdadır. Ayrıca, gerçekleştirilen bu denge robotu platformu, lisans ve lisansüstü çalışma yapacak araştırmacıların gerçek zamanlı farklı yapılarıdaki kontrol algoritmalarını robotun üzerinde uygulayabileceği ve geliştirebileceği şekilde esnek tasarlanmıştır. Çalışma bu yönleriyle değerlendirildiğinde birçok araştırmacıya farklı alanlarda ilham sağlamasının yanında, akademik olarak da bilime katkı sağlayacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Grasser ve ark. (2002), kaynak makalede, İsviçre'deki Lausanne'de bulunan İsveç Federal Teknoloji Enstitüsündeki Endüstriyel Elektronik Laboratuvarında devrim niteliğinde olan iki tekerlekli aracın prototipi inşa edilmiştir. Geliştirilen bu robotun her bir tekerine bağlı bir Doğru Akım (DC) motor çifti bulunmaktadır. Eş eksenli bu yapısından dolayı da robot durağan halde, olduğu yerde U dönüşü yapabilmektedir. Robota ait DC motorlar, iki tane ayrılmış durum uzay kontrolöründen oluşan bir kontrol sistemiyle denetlenmiştir (Grasser ve ark., 2002).

Nawawi ve ark. (2006), kaynak bildiride, iki tekerlekli ters sarkaç ve bu ters sarkacın Tam Dereceli Kayan Kipli Kontrol (FOSMC) modellenmesi ele alınmıştır. Ayrıca doğrusal olmayan iki tekerlekli sarkaç sisteminin matematiksel modeli de çıkartılmıştır. Daha sonra, en son elde edilen matematiksel modeli durum uzayı şeklinde sunulmuş ve sistemin birbirleriyle uyumsuzluk gösterdiğini elde edilmiştir. Bundan dolayı da kayan kipli kontrol temelli sağlam bir kontrolörü, sistemin bozucularını reddetmesi ve sağlam bir kararlılık göstermesi için tasarlanmıştır. Son olarak önerilen bu denetim kuralının performansını değerlendirmek için bilgisayar üzerinde çalışan benzetim çalışmaları yapılmıştır (Nawawi ve ark., 2006).

Chee ve Abidin (2006), kaynak bildiride, iki tekerlekli otonom denge robotunun kontrolünü gerçekleştirilmiştir. Sistem, robotun eğimini belirleyecek uzaklık ölçüm sensörüne dayanmaktadır. Sistemde kullanılan motorların kontrolü için Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrolör kullanılmıştır. Robotun seyrüseferi ise, Uzaktan Kumanda (RC) ile bir operatör tarafından kontrol edilmiştir. Robot, hareket ederken ve düz bir zemin üzerinde dönerken kendini dengeleme özelliğine sahiptir (Chee ve Abidin, 2006).

Kalra ve ark. (2007), kaynak makalede, iki tekerlekli platformu, denge pozisyonundan küçük açısal sapmalarla dengeleyecek bir tepki teker eyleyici uygulaması önerilmiştir. Ayrıca platform tekeri yerine denge torkunu aktarmaya yönelik tepki tekeri kullanımının sistemin enerji tüketimini azaltacağı da vurgulanmıştır. Bu hipotez, tepki tekerinden tork aktarırken daha az enerji kaybı yaşadığı fikirden kaynaklanmaktadır. Platformun tasarımı ve yapımından sonra, tepki tekeri ile hareketlendirilen hibrit sistem ve geleneksel sistem arasındaki enerji tüketimi kıyaslamaları yapmak için standart testler uygulanmıştır. Bu deney sonuçları, hibrit sistemin geleneksel sistemden yaklaşık olarak yüzde 21 daha az enerji harcadığını göstermiştir. Böylece sisteme bir tepki teker eyleyici eklemenin uygulanabilirliği gösterilmiştir (Kalra ve ark., 2007).

Tsai ve ark. (2008), kaynak bildiride, otonom hizmet robotları için kendi kendini dengeleyen iki tekerlekli platformların planlı seyrüsefer kontrol yapısı ele alınmıştır. Tekerler ve hareket yüzeyi arasındaki sürtünmeleri de içeren sisteme ait lineerleştirilmiş matematiksel modelden yola çıkılarak kinematik bir yörünge izleyici ve iki uyarlanabilir kontrolör, yörünge hızı ve sapma açısı için tasarlanmıştır. İnsanla robot arasında istenen yörüngeleri sağlamak için insan bilincini oluşturan bir yörünge izleme üretici kullanılmıştır. Önerilen planlanmış seyrüsefer kontrol mimarisıyla, uygun kontrol hareketi sağlandığında robotun engelden kaçınması ve etkin yörünge izleme başarısını gerçekleştirdiği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir (Tsai ve ark., 2008).

Choi ve Oh (2008), kaynak bildiride, insan tarafından bozucu etki uygulandığında tekerlekli ters sarkacın kontrol edilmesine yönelik olarak yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. İnsan ve tekerlekli ters sarkaç arasında bir itme ve çekme kuvveti bulunmaktadır. Bu tarz bir hareket ters sarkaç için ciddi bir bozucu etki yaratmaktadır. Çünkü tekerlekli ters sarkaç istenen giriş olmadığı zaman başlangıç pozisyonunu sürdürme eğilimindedir. Bu yüzden, insan etkileşiminin bir sonucu olarak, robotun kararlılığını etkileyebilecek birçok ihtimal bulunmaktadır. Bu problemi çözmek için, robotun kontrol algoritması dışarıdan uygulanan kuvvetle koordineli bir şekilde hareket etme yönündedir. Bu kontrol algoritmasına insan dostu hareket kontrolü denmektedir. Algoritma, tam durum geribesleme ve düşük dereceli bozucu gözlemci kullanan en uygun kontrolörü içermektedir. İnsandan gelen bozucu etki torku hesaplanmış, tahmini bozucu tork insan dostu harekete yönelik bir pozisyon referansı üretmek için kullanılmıştır. Bu kontrol algoritmasının robota çok ciddi bir bozucu etki uygulandığında bile etkili olduğu gösterilmiştir (Choi ve Oh, 2008).

Yong ve ark. (2009), kaynak makalede, araştırma amaçlı olarak iki tekerlekli kendini dengeleyen bir robot ele alınmıştır. Çalışmada, robotun kuvvet analizleri ayrıntılı olarak gerçekleştirilmiş ve robotun doğrusal olmayan dinamik modeli çıkarılmıştır. Ayrıca, bilinmeyen parametreler ile holonomik olmayan (Nonholonomic: Kontrol edilen serbestlik derecesi sistemin toplam serbestlik derecesinden daha düşük olan sistemler) mobil robotun kinematik modeli için adaptif bir takip kontrolörü de önerilmiştir. Lyapunov Fonksiyon Kontrolü (CLF) kullanılarak kontrolörün global asimptotik kararlılığı ispatlanmıştır. Adaptif konum izleme kontrolörü takip işleyişindeki bozucuları azaltmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre tekerlekli mobil denge robotu etkili bir şekilde kontrol edilmiştir (Yong ve ark., 2009).

Abeygunawardhana ve Murakami (2009), kaynak bildiride, denge robotu sisteminin Ağırlık Merkezi Pozisyonu (COG) kontrol edilerek robotun dengesini sürdürebilmesi sağlanmıştır. Çünkü manipülatör kolunun titreşimi ters sarkacın ağırlık merkezini etkilemektedir. Bu nedenle robotun dengesi bozulmaktadır. Bu yüzden, bu makalede manipülatör kolunun titreşim kontrolü önerilmiştir. Titreşimi bastırmak için geribesleme sinyali, manipülatörün çalışma uzayına tanıtılmıştır. Önerilen metodun geçerliliğini incelemek için benzetim ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar önerilen metodun etkinliğini göstermiştir (Abeygunawardhana ve Murakami, 2009).

Li ve Xu (2009), Bu makalede parametrik ve fonksiyonel belirsizlikler içeren tekerlekli ters sarkaçların dinamik denge ve hareketi için adaptif bulanık mantık kontrolü incelenmiştir. Önerilen adaptif bulanık mantık kontrolü tekerlekli ters sarkaçların fiziksel özelliklerine dayanmaktadır. Bu adaptif bulanık mantık kontrolü, bilinmeyen robot dinamikleri tahmin etmek için, bulanık mantık motorunu ve sistematik çevrimiçi uyarılma mekanizmasını kullanmaktadır. Lyapunov sentezine dayanan bulanık kontrol, sistem çıkışlarının verilen sınırlanmış referans sinyallerini küçük bir sıfır çevresinde izlemesini ve tüm kapalı döngüsel sinyallere ait yarı küresel üniform sınırlamanın garanti edilmesini sağlamaktadır. Önerilen kontrolün etkinliği geniş simülasyonlar vasıtasıyla gösterilmiştir. (Li ve Xu, 2009).

Park ve ark. (2009), kaynak makalede, iki ayaklı robotlar için yeni bir kontrol yöntemi sunulmuştur. İki ayaklı robotların duruş pozisyonunu ölçmek için dinamik sensörler kullanmak yerine yalnızca çalışma alanındaki belli bir referans objenin görsel bilgisi kullanılmaktadır. İki ayaklı robotun Sıfır Moment Noktası (ZMP), robotun kafasına yerleştirilen bir CCD kameradan elde edilen referans nesne görüntüsü ile ölçülen duruş pozisyonundan hesaplanmaktadır. İki ayaklı robotun denge kontrolü için, kontrolör Kalman filtresi ile tahmin edilebilen referans ZMP ve mevcut ZMP arasındaki hatayı kullanmaktadır. Önerilen algoritmanın verimliliği hem düz hem de bilinmeyen engellerin olduğu pürüzlü zeminlerde yapılan deneylerle gösterilmiştir (Park ve ark., 2009).

Solis ve ark. (2009), kaynak bildiride, Japonya'da kişisel robot platformlarının ve uygulamalarının hızlı artışıyla beraber, akıllı otomatik mekanizmaların geliştirilmesi için gerekli temel bilginin lisans öğrencilerine verilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu amaçla, çalışmalarında robotik sistemlerin temellerini, modern mekanik mühendisliği bölümü öğrencilerine tanıtma yaklaşımından bahsedilmektedir. Mühendislik alanındaki lisans öğrencilerinin 1. sınıf yaratıcılığını teşvik etmek için, mekatronik sistemleri

geliştirebilme prensiplerini farklı eğitim seviyelerinde tanıtacak bir eğitim aracı geliştirmeye odaklanılmıştır. (Solis ve ark., 2009).

Vikas ve ark. (2010), kaynak bildiride, yerçekimi yönüne ilişkin cismin eğimini elde etmek için doğrusal ivme, açısal hız elde etmek için eksen başına iki doğrusal ivmeölçer kullanımı tartışılmıştır. Denge taşları, basit sönümlü doğrusal ivmeölçer olarak modellenmiş ve bu ivmeölçerlerden alınan değerlerin ortalaması alınarak statik bir eğim değeri elde edilmiştir. Sağ ve sol sensörler arasındaki fark ele alındığında ise bir açısal hız büyüklüğü ve açısal hızlanma değeri elde edilmiştir. Bu makalede, yarım daire kanalları açısal ivmenin akışkan integratörü şeklinde modellenmiştir ve açısal hız kupuler sapması olarak açısal hız oluşmuştur. Kinematik analiz, bu vestibuler birleştirilmesinin yerçekimine veya sensör dizilimi konumuna bakılmaksızın, genel olarak kararlılık yönünü sürekli olarak algıladığı ve sapma veya birleştirme hatalarına tabi olmayan tamamen etkili bir dinamik eğimölçeri sağladığını göstermektedir. Ayrıca kinematik analiz etkin yerçekiminin algılanan bir vestibuler değer olarak okunabildiğini ve restoratif torkun bu algılanan değere oranla uygulanabileceğini ve böylece robotun değiştirilen veya hızla değişen anlık yerçekimi koşullarında daha sağlam olabileceğini göstermiştir. Tasarım, yerçekimi veya sensör dizilimi konumuna bakılmaksızın önemli bir hesaplama yükü gerektirmeden dinamik eğim çıkışı ürettiği için güçlüdür. Bundan dolayı sapma veya birleştirme hatalarına tabi değildir. Burada sunulan Vestibuler Dinamik Eğim Ölçer (VDI), yerçekimine göre değişen veya hızla değişen yerçekimine dayanıklıdır. Tüm bu nedenlerden dolayı VDI'nın üretim maliyeti IMU'lara göre oldukça düşüktür. Makalede tartışılan hesaplamalar düzlemsel durum içindir ve diğer eksenlere genişletilebilir (Vikas ve ark., 2010).

Teeyapan ve ark. (2010), kaynak bildiride, düşük tavanlı ve limbo dansındaki duruma benzer dikey engellerden kaçınan, dinamik olarak kararlı robotlar için başarılı kontrol stratejileri üzerinde çalışmışlardır. Hedef ve engel boyutları da dâhil olmak üzere görev parametrelerine bakıldığında bu metotta giriş-çıkış doğrusal kontrolörlerin sıralı oluşumu kullanılmaktadır. Farklı denetleyiciler arasında geçiş yapma zamanlarının yanı sıra otomatik olarak en iyi kontrolör kazançlarını ve referanslarını hesaplamak için stokastik optimizasyon uygulanmıştır. Bu sistemin yeni iki tekerlekli platform üzerinde olduğu kadar fizik tabanlı benzetim ortamında da geçerli olduğu nümerik benzeşim ile gösterilmiştir. Sonuçlar, üretilen kontrol stratejilerinin, bu zorlu problem alanı ile ilgili görev planlama konusunda başarılı olduğunu ve elle ayarlanabilir diğer alternatiflerine göre önemli avantajlar sağladığını göstermiştir (Teeyapan ve ark., 2010).

Nasir ve ark. (2010), kaynak makalede, iki tekerlekli denge robotu için PID kontrolör ve Lineer Quadratik Regülâtör (LQR) karşılaştırılarak performansları karşılaştırılmıştır. Yüksek dereceli lineer olmayan değişkenlere sahip iki tekerlekli denge robotunun matematiksel modeli elde edilmiştir. Son olarak sistemin modeli durum uzayı formunda temsil edilmiştir. Sistemde kullanılan LQR ve PID kontrolörün performansı, referans girişi izleme ve gürültü bastırma kapasitesi açısından incelenmiştir. Doğrusal olmayan iki tekerlekli denge robotunun tepkisinin benzetim sonuçları zaman domeninde sunulmuştur (Nasir ve ark., 2010).

Tsai ve ark. (2010), kaynak bildiride, parametre değişimi ile kendini dengeleyen iki tekerlekli robotun yörünge izlemesi için Bulanık Tabanlı Fonksiyon Ağı (FBFN) kullanılarak adaptif geri adımlamalı kayan kipli hareket kontrolörü ele alınmıştır. Robotun dinamik modelini ayrıştırmak için dekuplaj metodu önerilmiştir. Böylece izleme kontrolöründe kinematik ve dinamik seviyede geri adımlamalı ve kayan kipli kontrolörün her ikisi kullanılarak sentezlenmiştir. FBFN izleme kontrolörün belirsiz kısımları çevrimiçi öğrenmesine göre çalıştırılmıştır. Böylece adaptif yetenek kazandırılmıştır. Önerilen adaptif izleme kontrolörünün göstermiş olduğu benzetim sonuçları etkin yörünge izleme performansı göstermektedir (Tsai ve ark., 2010b).

Goher ve Tokhi (2010), kaynak makalede, iki tekerlekli araç sistemleri düşünüldüğünde, doğrusal eyleyicinin iki tekerlekli aracın orta gövdesine dâhil edilmesinin daha önce literatürde sunulmamış bir sistem olduğu anlatılmıştır. Bu makalede, ek hareket özelliklerine sahip olan, sistem denge durumunu tam olarak sağlarken dikey olarak da hareket edebilen bir yükü taşıyan, iki tekerlekli yeni tasarım bir aracın kontrolü, modellenmesi ve gelişimi araştırılmıştır. Bu çalışmada belli özelliklere sahip iyi tasarlanmış iki tekerlekli aracın yapılması ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. İyi tasarlanmış mekanik bir prototip yapabilmek için belli mekanik konular tartışılmıştır. Bu prototip iki tekerlek üzerinde denge sağlarken, dikey yönde yük de taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır. Dinamik davranışları karakterize edecek bir sistem modelleme yaklaşımı sunulmuştur. Sistem üzerinde, araca belli bir yörünge üzerinde rota vermek için bir kontrol stratejisi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Geliştirilen kontrol metodu sayesinde tüm mekanizmanın denge durumu sağlanmış ve kontrol probleminin üstesinden gelmek için farklı yörünge profilleri kullanılmıştır (Goher ve Tokhi, 2010).

Noh ve ark. (2010), kaynak makalede, Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağı (RBF) kullanılarak mobil ters sarkaç robotun konum kontrolü uygulaması sunulmuştur. Çalışmanın amacı robotun istenilen konumu dengesini koruyacak şekilde takip etmesidir.

Mobil ters sarkaçta, referans kompanzasyon tekniği için sinir ağı kontrol metodu olarak kullanılmıştır. Radyal tabanlı fonksiyonun geriye yayımlı öğrenme algoritması robotun kontrolü için geliştirilmiştir. Geliştirilen bu kontrol algoritması DSP 2812 elektronik kart üzerinde çalıştırılarak sistemin gerçek zamanlı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Mobil ters sarkaç robotun dengeli bir şekilde yörünge takibi performansı deneysel sonuçlarla gösterilmiştir (Noh ve ark., 2010).

Thao ve ark. (2010), kaynak bildiride, iki tekerlekli kendi kendine dengede durabilen robotun kontrolü ve tasarım metodu sunulmuştur. Bu çalışmada sinyal işleme, ayrık Kalman filtresi algoritması, sistem modelleme, robot donanımı ve PID geri adımlamalı denetleyici tasarımına odaklanılmıştır. Önerilen kontrolörün amacı referans sinyali izlemek ve robotu dengede tutmaktır. Önerilen PID geri adımlamalı kontrolör üç adet kontrol çevrimine sahiptir. İlk çevrimde, robotun dengesinin sürdürülebilmesi için geri adımlamalı denetleyici kullanılmıştır. İkinci çevrimde, robotun pozisyonun kontrolü için PD kontrolör tasarlanmıştır. Son çevrimde ise, hareket yönü kontrolü için PI kontrolör kullanılmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlarla önerilen kontrol sisteminin hızlı cevap, denge ve kararlılık açısından performansı gösterilmiştir (Thao ve ark., 2010).

Adhikari ve ark. (2011), kaynak makalede, doğası gereği kararsız yapıya sahip olan ters sarkaç kontrolünün dinamik bir problem olduğu vurgulanmıştır. Ters sarkaç mobil robotunun seyrüsefer sisteminde, sensör füzyon algoritmaları ve kontrol uygulaması için Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA) kullanılmıştır. Bunlara ilave olarak PID kontrol performansı ve kalman filtresi algoritmaları da FPGA kartı üzerinde test edilmiştir. Kalman filtresinin ayarlandığı test platformu, standart bir optik kodlayıcı referans olarak kullanılarak tasarlanmıştır. Atalet sensöründen alınan değerler ve optik kodlayıcı çıkışı FPGA'nın içindeki 32 bit yazılım çekirdeğine sahip İndirgenmiş Komut Takımıyla Hesaplama (RISC)'ya sahip microBlaze işlemcide işlenmiştir. İki tekerlekli robotu dengelemek için düşük maliyetli atalet sensörleri kullanılmıştır. Ayrıca tasarlanan bu sistemin çok daha karmaşık kontrole ve sensör füzyon tekniklerine sahip modifikasyonları, iyileştirmeleri, güncellemeleri yerine getirmek için elverişli olduğu belirtilmiştir (Adhikari ve ark., 2011).

Ratajczak ve Tchou (2011), kaynak bildiride, denge robotu için öncelikli olarak hareket planlama algoritması sunulmuştur. Bu hareket planlaması dahili konfigürasyon uzayı yaklaşımından türetilmiştir. Bu hareket planlama problemi üç alt görevden oluşmaktadır. Bunların ilki, görev uzayında (uygun hareket planlaması) arzu edilen noktaya ulaşmaktır. İkinci olarak, hareket esnasında bir durum kısıtına riayet etmektir.

Üçüncü olarak, bu hareket kontrol enerjisini muhafaza etmektir. Algoritmanın performansı simülasyonlarla gösterilmiştir (Ratajczak ve Tchoń, 2011).

Ghani ve ark. (2011), kaynak bildiride, iki tekerlekli denge robotu için çizgi izleme algoritmasının geliştirilmesine odaklanılmıştır. Bu projede denge sistemiyle ilgili verilerin alınabilmesi için ATMEGA32 mikroişlemci birimi kullanılmıştır. Eğim açısı problemini çözmek için iki adet infra-red uzaklık sensörü kullanılmıştır. PID kontrol algoritması ile infra-red ışık sensörü uygulaması robotun düzgün bir hattı takip edebilmesini kolaylaştırmaktadır. Robotun kendini dengeleme algoritması ve çizgi takibi programının birleştirilmesinin sonucunda, çizgi takibi fonksiyonu ile dinamik kararlı bir denge robotu geliştirilmiştir (Ghani ve ark., 2011).

Wu ve ark. (2012), kaynak bildiride, yüksek dereceli, çok değişkenli, doğrusal olmayan ve kararsız bir sistem olan iki tekerlekli denge robotu için Fuzzy PD kontrolörü tasarlanmış ve analizi yapılmıştır. Robot sistemin modelini oluşturan kinematik denklemler Newton mekaniği ve dinamiği kullanılarak oluşturulmuştur. Birkaç simülasyon çalışmasından sonra en iyi Q, R durum geribesleme matrisleri elde edilmiştir. Robotun hızı ve pozisyonunun giriş olarak tanımlanmıştır. Robotun açısı ve açıl hızı ise bulanık bir PD kontrolör ile denetlenmiştir. Elde edilen sonuçlarla, bulanık PD kontrolörün iki tekerlekli denge robotun kontrolünde başarıyla uygulandığı gösterilmiştir (Wu ve ark., 2012).

Tomasic ve ark. (2012), kaynak makalede, uzaktan kontrollü kendi kendini dengeleyen mobil bir robot tasarlanmış ve kontrol edilmiştir. Çalışmada mekanik tasarım, elektronik, yazılım tasarımı, sistem karakterizasyonu ve kontrol teorisi alanlarında yapılan çalışmaların özeti verilmiştir. Aynı zamanda çalışmada, robotik sistemlerin modellenmesine ve sistem kararlılığı için gerekli kontrol metotlarının benzetim sonuçlarına özel bir vurgu yapılmıştır (Tomašić ve ark., 2012).

Kumar ve ark. (2012), kaynak makalede, sarkacın kararlılığı için Euler-Langrange enerji eşitliği kullanılarak ters sarkaç modeli oluşturulmuştur. Sistemin kontrolör kazancı durum geribesleme ve Lineer Quadratik Regülatör (LQR) teknikleri ile değerlendirilmiştir ve ayrıca her iki kontrolör için elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Quadratik kontrol metodunun kutup-yerleştirme tekniklerine göre avantajı, durum geribesleme kontrol kazanç matrisini sistematik bir yolla hesaplayabilmesi olarak belirtilmiştir. Önerilen sisteme iki hareketli kütle de dâhil edilmesiyle klasik ters sarkaç modeli daha da genişletilmiştir. Sonuç olarak, yatay tabaka da kayan iki kütle

hareketi de kontrol edilmiştir. Tasarlanan kontrolörlerin performansı bilgisayar benzeşim sonuçlarıyla gösterilmiştir (Kumar ve ark., 2012).

Enginoğlu (2012), bu yüksek lisans tezinde, iki tekerlekli bir robotu açı geribeslemesi kullanarak dengede tutma problemi ele alınmıştır. Sarkaç açısının hesaplanması için ivmeölçer ve jiroskop sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörlerden gelen verilerdeki paraziti yok etmek için kalman filtresi kullanılmıştır. Böylece, temiz ve parazitsiz bir sinyal elde edilmiştir. PID denetleyicisi, robotu dengede tutmak için filtre edilmiş açı geri beslemesiyle birlikte kullanılmıştır. Robot'un hesaplamaları ve kontrolü, motorları sürmek için sensör sinyallerini işleyen ve lojik sinyalleri üreten bir mikro denetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Prototip olarak kullanılan tasarım Solidworks'de hazırlanmıştır. Robot sisteminde kullanılacak olan PID denetleyici parametrelerini tespit edebilmek için, bütün kapalı-çevrim sistemin blok diyagramının hazırlanmasında Simulink/Matlab programı kullanılmıştır. Bu amaçla sistemin matematiksel modeli çıkartılmış ve bu model Simulink'de denge robotu sistem bloğu olarak uygulanmıştır. Ayrıca bu simülasyona gerçek sisteme mümkün olduğunca yakın bir platform oluşturmak için PID denetleyicisi, Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) oluşturucusu ve kalman filtresi blokları da eklenmiştir. Simülasyon modeli hazırlandıktan sonra, Simulink tasarım optimizasyon aracı kullanılarak denge robotunun kontrolü için uygun çözümü veren PID parametreleri bulunmuştur (Enginoğlu, 2012).

Lee ve Jung (2013), kaynak makalede, eğlence/ulaşım araçlarına yönelik olarak insan taşıma tabanlı iki tekerlekli mobil bir robotun kontrolü ve gelişimi ele alınmıştır. Bu robotun zemin üzerindeki çizgileri takip ederken dengesini sürdürebilmesi için çizgi izleyen mobil robot ve ters sarkaç sistemi gibi iki sistem yapısı robot üzerinde birleştirilmiştir. Bu mobil robot insansı kollar veya operatör taşıma maksatlı tasarlanmıştır. Bu robot görme geribeslemesi kullanarak zemin üzerindeki çizgileri takip edebilme yeteneğine sahip olmasının yanında iki teker üzerinde de kendi dengesini sürdürmektedir. Görme tabanlı kontrol tekniği planlanan yörünge için kamera tarafından yakalanan zemindeki çizgileri robotun takip etmesine olanak sağlamaktadır. Robotun sahip olduğu kontrolörler, sensör birleştirme tekniği ve iyi bir çizgi izleme özelliği göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Çizgi izleyen robot üzerinde yapılan deneysel çalışmalar bu robotun bir eğlence aracı olarak da kullanılabileceğini göstermiştir (Lee ve Jung, 2013).

Li ve ark. (2013), kaynak kitapta, iki tekerlekli ters sarkaç sistemi ele alınmıştır. Kitabın ilk bölümünde iki tekerlekli ters sarkaç robotların tarihçesine değinilmiştir.

Kitabın daha sonraki bölümlerinde tekerlekli ters sarkaç sisteminin matematiksel modelleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Kitabın ilerleyen bölümlerinde ise ters sarkaç robotun modern kontrol yöntemleri üzerinde ayrıntılı bir şekilde durulmuş ve bu kontrol metotları ile ilgili simülasyon sonuçlarına yer verilmiştir (Li ve ark., 2013).

Sun ve ark. (2014), kaynak bildiride, iki tekerlek üzerinde kendi kendini dengeleyebilen bir robotta kullanılan LQR kontrol metodu ve kalman filtresi algoritmasına değinilmiştir. Bu robot sisteminde, ivme ve jiroskop sensöründen elde edilen açı sinyalleri kalman filtresi ile birleştirilmiştir. LQR ise robotun denetiminde kullanılmıştır. Robotun dinamik olarak matematiksel modeli oluşturulmuştur. Bu matematiksel model dikkate alınarak da robotun duruş ve pozisyon kontrolü gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar deneysel olarak gösterilmiştir (Sun ve ark., 2014).

Xu ve ark. (2014), kaynak makalede, iki tekerlekli mobil bir için geliştirilen İntegral Kayan Kipli Kontrolör (ISMC) ele alınmıştır. Çalışmada, iki tekerlekli denge robotları üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanan bu kontrol yönteminin ilk olduğu belirtilmiş ve birkaç kritik konuya odaklanılmıştır. İlk olarak bu sistemin kontrol girişi sayısının tek olmasından dolayı eksik tahrikli bir sistem olduğu belirtilmiştir. Geliştirilen bu ISMC kontrol yönteminin eksik tahrikli denge robotunun kontrolü için uygun olduğu söylenmiştir. Bunun nedeni olarak, kayma kipi başarıldığı zaman ISMC'nin ekstra bir serbestlik derecesine daha sahip olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada, bu ekstra serbestlik derecesinden yararlanılarak robotun denetimi sağlanmıştır. Aynı zamanda, geliştirilen bu algoritmanın robotun doğası gereği var olan bazı belirsizliklere karşı da etkili olduğu söylenmiştir. Bu belirsizliklerin giderilmesinde integral kayma yüzeyi ve anahtarlama teriminin oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır. ISMC'nin etkinliği, yoğun simülasyon ve deneysel sonuçlarla gösterilmiştir (Xu ve ark., 2014b).

Raffo ve ark. (2015), kaynak makalede, eksik tahrikli iki tekerlekli kendi kendini dengeleyen araçlar için H_{∞} kontrolü tasarlanmış ve uygulanmıştır. Burada temel amaç, harici bozucuların varlığında ters sarkacı üst dikey konumda dengeye getirmek için eğim açısının kontrol edilmesidir. Tekerlekli ters sarkacın kontrolünün sağlayabilmesi için tekerlerin açısız hızlarının istenilen referans değerinde olması arzulanmıştır. Önerilen bu kontrolörün, sistemin tüm dinamiklerini yapısında barındırdığı ve genel sistemin kapalı döngü kararlılığını sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, mekanik sistemler için doğrusal olmayan H_{∞} ayarlama yöntemi de geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, harici bozucular, modellenememiş dinamikler ve zorlu başlangıç koşullarında gerçekleştirilmiştir (Raffo ve ark., 2015).

Dai ve ark. (2015), kaynak makalede, sürtünme kompanzasyonuna sahip iki tekerlekli ters sarkacın tasarımı ve uygulaması üzerinde durulmuştur. Tahrik mekanizmasındaki sürtünmelerin denge performansını etkileyen kritik bir faktör olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, tahrik mekanizmasının dinamik modeli sürtünme parametreleri temel alınarak tanımlanmıştır. Tüm robot sisteminin dinamikleri robot tahrik mekanizmasının sürtünmeleri de hesaba katılarak Lagrangian fonksiyon yöntemiyle elde edilmiştir. Bu robot sisteminin denge ve sapma açısı kontrolü için bağımsız olarak kayan kipli kontrolör tasarlanmıştır. Eğim açısı ve eğim açısı hızını tahmin etmek için düşük hassasiyetli ivme ve jiroskop sensörlerinden yararlanılmıştır. İvme ve jiroskop sensörlerinden elde edilen sensör verileri kalman filtresi yardımı ile birleştirilmiştir. Böylece robotun gövde eğim açısı tam olarak elde edilmiştir. Yapılan çeşitli deneylerle önerilen yöntemin etkili olduğu gösterilmiştir (Dai ve ark., 2015).

Delgado ve ark. (2015), kaynak bildiride, holonomik olmayan (Nonholomic sistem: Kontrol edilen serbestlik derecesi sistemin toplam serbestlik derecesinden daha düşük olan sistemler) kısıtlara bağlı olan, eksik tahrikli bir mekanik sistem olan tekerlekli ters sarkacın hareket denklemleri geliştirilmiştir. Hareket denklemleri Lagrange-d'Alembert prensibi kullanılarak türetilmiştir. Denklemler ilk olarak durum uzayında türetilmiştir. Daha sonra en uygun koordinat dönüşümüyle hareket denklemleri elde edilmiştir (Delgado ve ark., 2015).

Kim ve ark. (2016), Bu makalede, mobil bir ters sarkaç sistemi olarak bilinen ve TransBOT olarak adlandırılan kişisel bir taşıma robotu tasarlanmış ve kontrol edilmiştir. TransBOT'un zemindeki kararlı temasın korunduğu düzenli araç modu ve zeminde sabit duruş sağlayan denge modu olmak üzere iki sürüş modu bulunmaktadır. Tasarlanan bu araçların sahip olduğu iki tekerlekli denge mekanizması sayesinde dar ve kalabalık kentsel alanlarda ulaşım aracı olarak tercih edildiği vurgulanmıştır. Bu robotta sabit bir denge kontrol performansı elde etmek için farklı boyutlarda sürücülere göre istenilen denge açıları belirlenmiştir. Bu denge açı değerleri deneysel çalışmalar yoluyla bulunmuştur. Ayrıca, TransBOT'un fizibilitesini sağlamak için farklı ağırlıklardaki sürücülerin yanı sıra iç ve dış mekân sürüş görevleri ile ilgili deneysel çalışmalar da yürütülmüştür (Kim ve Jung, 2016).

Ye ve ark. (2016), Bu makalede, tekerlekli bir ters sarkaç robotunun hareketli bir insanın izini sürebilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda robotun üzerinde bulunan OptiTrack ve Kinect kamera gibi sensörlerden elde edilen veriler birleştirilerek adaptif bir kontrol algoritması tasarlanmıştır. Böylece, hedef algılama ve izleme

performansı daha verimli hale getirilmiştir. Ters sarkaç robotunun iki tekerlek üzerinde dengesini koruması ve görsel geribildirim kullanarak hedefini takip etmesi için gürbüz bir adaptif kontrol algoritması geliştirilmiştir. Lider takipçi kontrolü, dinamik denge kontrolü ve görsel izleme özellikleri, arzulanan izleme ve dengeleme performansını elde etmek için uygun bir şekilde birleştirilmiştir. Önerilen kontrol stratejilerinin etkinliğini test etmek için kapsamlı deneysel çalışmalar yapılmıştır (Ye ve ark., 2016).

Yue ve ark. (2016), Bu çalışmada, tekerlekli ters sarkaçlı araç sistemlerini için, hata verisine dayalı yörünge planlayıcısı ve dolaylı adaptif bulanık kontrol araştırılmıştır. Hata dinamiğine dayalı olarak kapalı döngü yörünge planlayıcı istenen hız değerlerini üretebilmektedir. Lyapunov teorisini ve LaSalle değişmezlik teoremini kullanılarak izleme hata sinyallerinin sistem kararlılığı ve yakınsaması gösterilmiştir. Önerilen kontrol stratejilerinin etkinliği ve algoritmanın uygulanabilirliği sayısal simülasyon sonuçları ile göstermiştir (Yue ve ark., 2016).

Zheng ve ark. (2017), kaynak bildiride, iki tekerlekli denge robotlarının meyilli yamaç, kasis, engebeli arazi veya kaldırım gibi kötü sürüş koşullarında kullanımında klasik denetleyici algoritmalarının robotun denetiminde yetersiz olduğu vurgulanmıştır. Bundan dolayı çalışmada, robot sisteminin modellenmesinde engebeli arazi koşulları dikkate alınmıştır. Robot sisteminin denetiminde ise, hiyerarşik hızlı terminal kayan kipli kontrolör kullanılmıştır. Bu kayan kipli kontrol sisteminin, Lyapunov kararlılık kriteri açısından asimptotik olarak kararlı olduğu gösterilmiştir. Önerilen bu kontrol yaklaşımının robotu arzu edilen hız ve dengede tutmak için etkili olduğu yoğun simülasyon ve analiz çalışmalarıyla gösterilmiştir. Aynı zamanda tasarlanan kontrol sistemi dış ortamdan kaynaklanan bozuculara karşı dayanıklıdır ve engebeli alanlardaki robotta meydana gelen titremeleri de azaltmaktadır (Zheng ve ark., 2017).

Yu ve ark. (2017), kaynak bildiride, iki teker üzerinde kendi kendini dengeleyen robotta kullanılan bulanık kontrol temelli Lineer Matrix Eşitsizliği (LMI) ele alınmıştır. Ele alınan bu LMI yapısında Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. Ayrıca, denge robotunun hareket denklemi için Takagi-Sugeno tipi bir bulanık dinamik model oluşturulmuştur. Önerilen bu yeni LMI tabanlı PSO algoritması robota ait en uygun denetleyici parametrelerini belirleyerek robotun denge performansını artırdığı görülmüştür. Önerilen bu denetleyicinin performansı bilgisayar üzerinde yapılan simülasyonlarla gösterilmiştir (Yu ve ark., 2017).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Adaptif Denetleyiciler

Bir kontrol sisteminde sistemin doğası gereği birçok istenmeyen bozucu etkiler bulunmaktadır. Tasarlanan sistemdeki motor dişli boşlukları, ölü bölge, sistem bileşenlerindeki aksamalar, sürtünme, histerezis, doyma ve zaman gecikmeleri gibi yumuşak olmayan lineersizlikler endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olan doğal bozucu etkilerdir (Tao ve Lewis, 2013). Bu gibi bozucu etkiler özellikle eksik tahrikli sistemlerin kontrolünde durum değişkenlerini etkiler. Yani denetlenen sistemin parametreleri zamanla değişkenlik gösterir. Böylece denetlenen sisteme ait sürekli değişen dinamik bir transfer fonksiyonu ortaya çıkar. Bu da sistemde, klasik kontrol metotlarının kullanılmasını zorlaştırır. Parametreleri zamana göre değişen sistemlerin kontrol edilebilmesi için sistemin parametre değişimlerine duyarlı farklı adaptif kontrol yaklaşımlarından yararlanır.

Adaptif kontrol ile ilgili araştırmalar uzun ve hareketli bir tarihe sahiptir (Sastry ve Bodson, 1989). 1950'lerde başlayan adaptif kontrol çalışmaları yüksek performanslı hava taşıtları için oto pilotların tasarımı ile bağlantılıdır (Slotine ve Li, 1991). Bu çalışmalarda, oto pilot sistemlerine değişken koşullara adaptasyon yeteneğinin kazandırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk olarak tek sabit kazançlı bir kontrolör oto pilot sistemi üzerinde uygulanmıştır. Ancak tek sabit kazançlı kontrolör ile gürbüz bir oto pilot tasarımının yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmaların sonrasında yardımcı ölçümlere dayanan kazanç listeleme kontrolör yapısı hava taşıtlarının oto pilot sisteminde uygulanmıştır. Fakat bu çalışmalardan da arzu edilen adaptasyon sağlanamamıştır (Sastry ve Bodson, 1989). Yapılan bu çalışmalardan istenilen düzeyde başarı elde edilememesinden dolayı çalışmalar model tabanlı kontrolör tasarımlarına yönelmiştir. Bu amaçla farklı adaptif kontrol yapıları geliştirilmiştir. Bu adaptif kontrol yapılarındaki amaç; önceden tanımlanan referans modelle eşleşen bir kapalı çevrim transfer fonksiyonu veren, kendi kendini ayarlayan kontrolör tasarlamaktır. Model tabanlı adaptif kontrolör tasarımında adaptasyon kuralları önemli bir yere sahiptir. Araştırmacılar tarafından geliştirilen en temel adaptasyon mekanizması duyarlılık kuralı veya diğer adıyla M.I.T kuralıdır. Bu adaptasyon kuralının belirli şartlar altında iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Sastry ve Bodson, 1989). Daha sonra süpersonik araçlara duyulan ilgi artıkça farklı adaptif kontrolör yapıları araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Önerilen

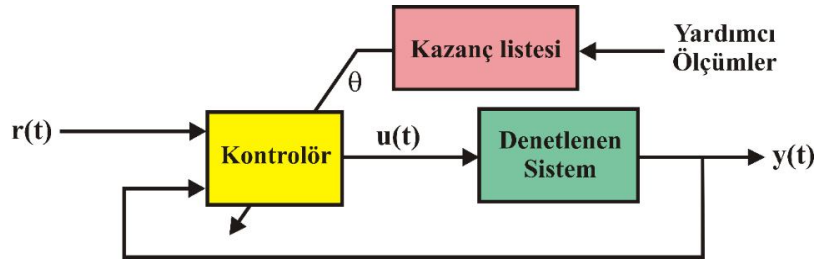
bu adaptif kontrolörlerinden bir tanesi de Model Referans Adaptif Kontrol (MRAC)'dür. Bu adaptif yapıyı geliştirenlerin başında Whitaker ve arkadaşları gelmektedir (Whitaker ve ark., 1958). İlerleyen yıllarda araştırmacı Parks ise Lyapunov tabanlı adaptasyon mekanizmasını MRAC algoritması ile birleştirmiştir (Parks, 1966). Bu çalışmalara ilaveten Astrom ve Egardt tarafından 1970'lerde Adaptive Kutup Yerleştirme yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntem Kendi Kendine Ayarlanan Regülatör (STR) olarak da adlandırılmaktadır ve birçok uygulamada aktif olarak kullanılmıştır (Astrom ve ark., 1977). 1970'erin sonlarında ise Popov'un giriş-çıkış kararlılık kriteri Egart (Egardt, 1979) ve Landau'nun (Landau, 1979) çalışmalarında yer almıştır (Sastry ve Bodson, 1989). 1980'lerin sonunda ve 1990'ların başında yapılan araştırmalar, adaptif kontrolörlerin gürbüzlüğü ile ilgili yeni bakış açıları oluşturmuştur. Özellikle, doğrusal olmayan sistemlerle ilgili araştırmalar da önemli ölçüde adaptif kontrolü anlamayı kolaylaştırmıştır (Åström ve Wittenmark, 2013). Görüldüğü gibi, adaptif kontrol teorisi, kontrol teorilerinin olgunlaşmış bir dalıdır ve farklı performans kriterlerine dayanan kesin yöntemler kullanılarak çeşitli adaptif kontrol sistemlerinin tasarımı ve analizi hakkında geniş bir literatür bulunmaktadır (Tao, 2003).

Dünyadaki birçok laboratuvarlarda ve endüstride adaptif kontrolle ilgili birçok uygulama gerçek zamanlı olarak yapılmaktadır. Bilgisayarların işlem kapasitesinin gelişmesi, yüksek hızlı mikroişlemcilerin ortaya çıkması ve sensör teknolojisindeki büyük gelişmeler adaptif kontrolle ilgili teorilerin uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Günümüzde, teknolojideki büyük gelişmelere paralel olarak çok çeşitli yapay zekâ tekniklerinin ortaya çıkmasıyla beraber farklı yapılar da adaptif kontrol uygulamalarını görmekteyiz. Burada, doktora tez çalışmasına temel oluşturan bazı adaptif denetleyici yapılarına değinilecektir.

3.1.1. Kazanç Listeleme

Kazanç listeleme (Gain Scheduling) en basit adaptif kontrolörlerden biridir. Bu adaptif kontrol yapısı kontrolör, denetlenen sistem ve kazanç listesinden oluşmaktadır. Bu adaptif yapıda en önemli parametre yardımcı ölçüm değerleridir. Uçuş kontrol sisteminde bu adaptif yapının kullanıldığını düşünürsek uçaktaki yolcu sayısı, uçağın hızı, hava basıncı ve uçağın bulunduğu yükseklik gibi verilerin değerlendirilerek oluşturulduğu kazanç tabloları hazırlanır. Ele alınan bu yardımcı ölçüm verilerine göre olması gereken kontrolör kazanç tabloları oluşturulur. Daha sonra sürekli olarak izlenen

değişken yardımcı ölçüm parametrelerine göre de kontrolör parametresi kazanç tablosundan seçilir. Şekil 3.1’de kazanç listeleme adaptif kontrol yapısı görülmektedir.

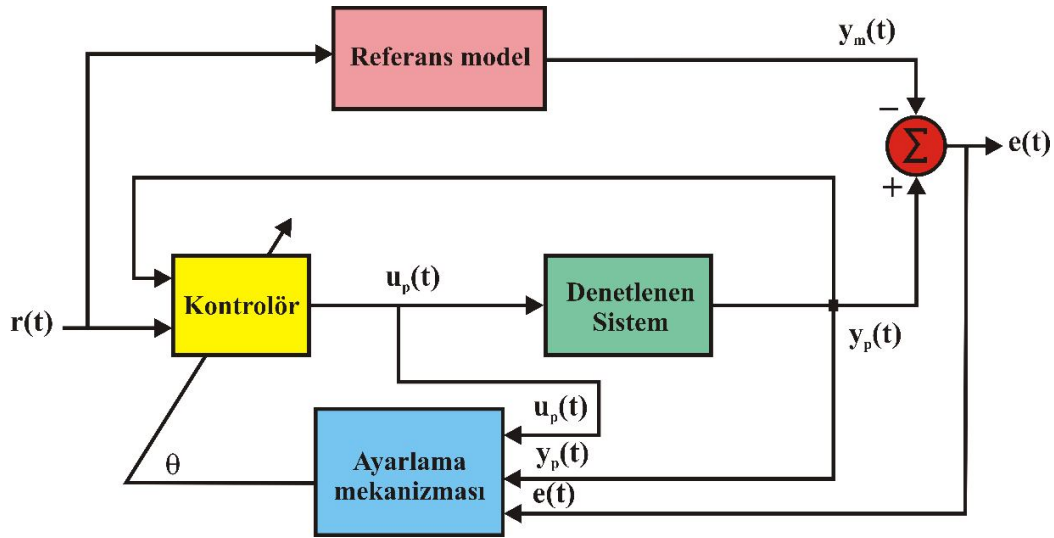


Şekil 3.1. Kazanç listeleme kontrolörü (Sastry ve Bodson, 1989)

Şekil 3.1’de belirtilen θ yardımcı ölçümlere göre değişiklik gösteren kontrolör parametresini, $r(t)$ referans giriş sinyalini, $u(t)$ kontrol sinyalini ve $y(t)$ çıkış sinyalini ifade etmektedir.

3.1.2. Model Referans Adaptif Kontrol

Model Referans Adaptif Kontrol (Model Reference Adaptive Control-MRAC) sistemi referans model, adaptif kontrolör, denetlenen sistem ve ayarlama mekanizması olmak üzere dört temel bloktan oluşur. Bu adaptif kontrol sisteminde en önemli yapı parametreleri bilinen bir referans modelin kullanılmasıdır. Buradaki amaç aynı referans giriş işaretinin hem gerçek denetlenen sistemin girişine hem de referans modele aynı anda uygulanarak bir hata sinyali üretilmesidir. Üretilen bu hata sinyali, ayarlama mekanizmasında kullanılarak kontrolör parametrelerinin güncellenmesinde kullanılır. MRAC yapısı Lineer Zamanla Değişmeyen (LTI), Tek Girişli ve Tek Çıkışlı (SISO) denetlenen sistem için genel olarak Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.2’deki $r(t)$ referans giriş sinyalini, $y_m(t)$ referans modelin çıkışını, $y_p(t)$ denetlenen sistemin çıkışını temsil etmektedir. Aynı şekildeki $u_p(t)$ adaptif kontrolör çıkışını, $e_1(t)$ denetlenen sistem çıkışı ve referans model çıkışı arasındaki izleme hatasını ($e_1(t) \triangleq y_p(t) - y_m(t)$), θ kontrolör parametre tahminini göstermektedir.

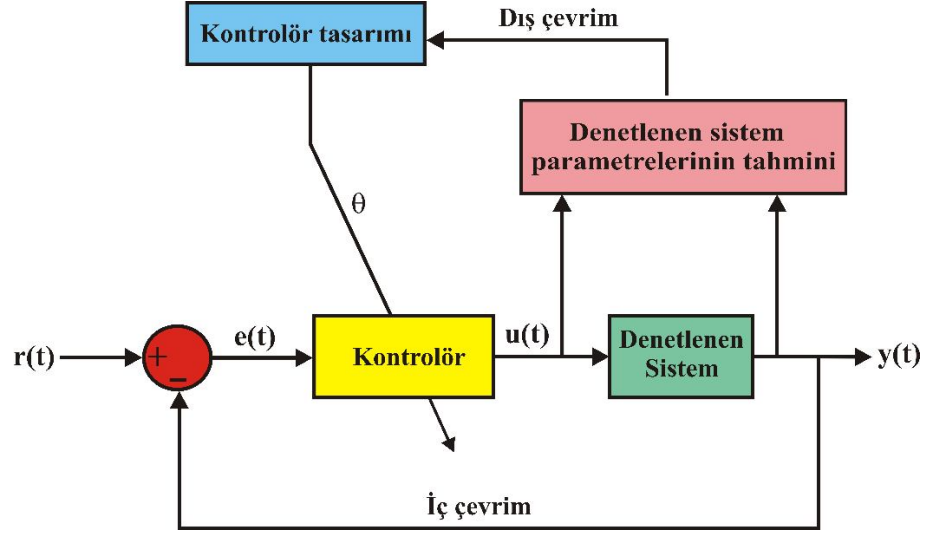


Şekil 3.2. MRAK'ın genel yapısı (Ioannou ve Sun, 2012)

3.1.3. Kendi Kendine Ayarlanan Regülatör

Kendi Kendine Ayarlanan Regülatör (Self Tuning Regulator-STR) yapısı ilk olarak 1958'de Kalman'ın "Design of a self optimizing control system" adlı makalesinde bahsedilmiştir (Kalman, 1958). Bu çalışmada Kalman, özel amaçlı bir bilgisayar aracılığıyla STR algoritmasını gerçekleştirmeye çalışmıştır. İleri teknolojiye dayalı bilgisayarların elde bulunmaması ve geliştirilen teorinin yetersizliğinden dolayı gerçekleştirmiş olduğu bu çalışma pek ilgi görmemiştir (Chalam, 1987). Daha sonra Peterka'nın "Predictor-based self-tuning control" adlı makale çalışması (Peterka, 1984), Aström ve ark.'nın "On self-tuning regulators" ve "Theory and applications of self-tuning regulators" adlı makale çalışmaları (Aström ve Wittenmark, 1973; Astrom ve ark., 1977) ile STR tekrar ilgi görmüştür. Günümüzde ise yüksek kapasiteli bilgisayarların gelişmesi ve yüksek hızlı mikroişlemcilerin ortaya çıkmasıyla beraber çok farklı yapılarda gerçek zamanlı STR algoritmaları araştırmacılar tarafından uygulanmıştır (Maiti ve ark., 2008; Kanthalakshmi ve Manikandan, 2010).

STR yaklaşımı sistemin karakteristikleri ve bozucuların yinelenmeli tahminine dayanır ve bu yaklaşımda olası değişimler izlenerek tahminler güncellenir (Bobál ve ark., 2006). Şekil 3.3'te STR'nin genel kontrol diyagramı görülmektedir (Sastry ve Bodson, 1989).



Şekil 3.3. STR genel blok diyagramı (Sastry ve Bodson, 1989)

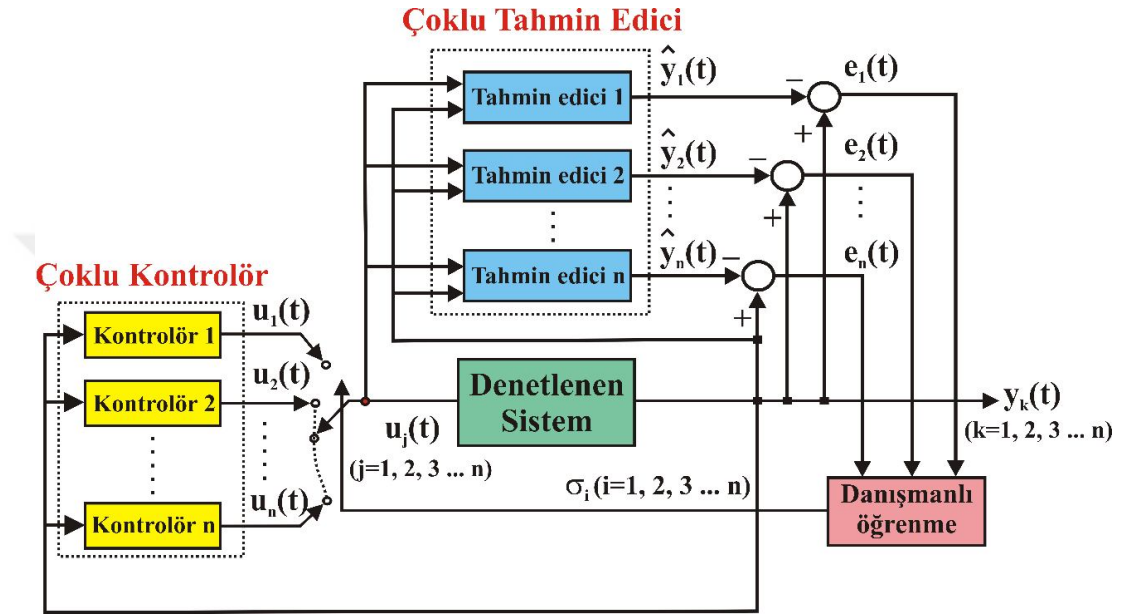
Şekil 3.3'deki STR yapısı kontrolör, denetlenen sistem, tahmin ve kontrolör tasarımı bloklarından oluşmaktadır. Tahmin bloğu denetlenen sistemin girişi $u(t)$ ve denetlenen sistem çıkışı $y(t)$ arasındaki ilişkiye bağlı olarak denetlenen sistemin parametrelerini belirlemektedir. Daha sonra tahmin edilen sistemin transfer fonksiyonu analiz edilerek sistemin olması gereken kontrolör parametresi θ 'nin hesaplamaları yapılmaktadır. Şekil 3.3'deki $r(t)$ referans giriş işaretini, $e(t)$ referans giriş ve denetlenen sistem çıkışı arasındaki hata ($e(t) = r(t) - y(t)$)'yi temsil etmektedir.

STR blok şeması tasarım ve tahmin metodunun temel seçimine göre oldukça esnektir ve birçok farklı STR metotları keşfedilmiştir (Åström ve Wittenmark, 2013). Kontrolör parametresinin ayarlanması, dolaylı veya doğrudan tanılamaya bağlı olarak değişmektedir (Bobál ve ark., 2006).

3.1.4. Anahtarlamalı Çoklu Model Adaptif Kontrol

Bir kontrol sistemi ani ve geniş parametre değişkenlerine maruz kaldığında sistemi kontrol etmek genellikle zordur. Çünkü klasik bir adaptif denetleyicisi, parametre değişkenlerini ve istenmeyen geçici durumları izlemek için yavaş kalmaktadır. Denetlenen sistemin, ani ve çok geniş aralıklı parametre değişkenlerine maruz kaldığı yerlerde Anahtarlamalı Çoklu Model Adaptif Kontrol (AÇMAK) yapısı tercih edilmektedir (Landau ve ark., 2011). AÇMAK yapısı ilk defa Athans ve Chang tarafından yayınlanan bir raporda "Çoklu Model Tahmin Algoritması" olarak adlandırılmıştır (Athans ve Chang, 1976).

AÇMAK blok diyagramı, çoklu kontrolör, çoklu tahmin edici ve danışmanlı öğrenme yapılarından oluşmaktadır. Denetlenen sistemin girişi ve çıkışı çoklu tahmin ediciden geçirilerek oluşan yeni çıkışlar, denetlenen sistem çıktısı ile karşılaştırılarak bir hata vektörü oluşturulmaktadır. Bu hata vektörü danışmanlı öğrenme yapısından geçirilerek uygun kontrolörü önermesi sağlanmaktadır. Şekil 3.4'te AÇMAK yapısı görülmektedir.



Şekil 3.4. Anahtarlamalı adaptif kontrolün blok diyagramı (Landau ve ark., 2011)

Buradaki amaç çoklu tahmin ediciler vasıtasıyla sistemin gerçek çıkışına en yakın sonucu veren kontrolör parametresinin hızlı bir şekilde bulunması ve anahtarlama fonksiyonu aracılığıyla çoklu denetleyici arasından sisteme ait en uygun denetleyicinin seçilerek sistemin kontrol edilmesidir. Yukarıda verilen Şekil 3.4'deki $u_1(t), u_2(t) \dots u_n(t)$ çoklu kontrolör çıkışlarını, $\hat{y}_1(t), \hat{y}_2(t) \dots \hat{y}_n(t)$ ise çoklu tahmin edici çıkışlarını, $e_1(t), e_2(t) \dots e_n(t)$ ise denetlenen sistemin çıkışı ve tahmin edicilerin üretmiş oldukları çıkışlar arasındaki hatayı, $y_k(t)$ ($k = 1, 2, 3 \dots n$) ise sistemin gerçek çıkışını ve σ_i ($i = 1, 2, 3 \dots n$) denetlenen sisteme ait en uygun denetleyici parametresini sağlayan anahtarlama fonksiyonunu ifade etmektedir.

3.2. Yapay Zekâ Teknikleri ile Tahmin Algoritmaları

İnsanođlu var olduđundan bu yana bulunduđu dűnyayı sűrekli sorgulamış ve karřılařtıđı problemleri ařmak için özűm yolları geliřtirmiřtir. Gűnűműzde kullandıđımız birçok icat ve yenilik dođada var olan canlıların taklit edilmesiyle bařarılmıřtır. Örneđin, uçakların veya son zamanlarda oldukça popűler olan İnsansız Hava Araçları (İHA)'nın uçabilmesi için kuřların kanatlarından esinlenilmiřtir. Tıp alanında ise, iřlevini yitirmiř veya yitirmek üzere olan birçok organ'ın (kalp, bűbrek, deri, damar, kulak vb.) alıřmasını taklit eden yapay organlar geliřtirilmektedir. Bu geliřmelere ilaveten insanlara benzeyen ve onları taklit edebilen robotlar da mekanik olarak tasarlanmıř ve geliřtirilmiřtir. Son yıllarda ise arařtırmacılar insanlar gibi dűřűnebiyen ve karar verebiyen yapay zekâya sahip sistemler üzerinde çalıřmalarını yođunlařtırmıřlardır. Burada amaç insanların zekâsını taklit edebilen robotların, İHA'ların veya kontrol edilen sistemlerin (rneđin, yapay kalbe sahip bir insanın heyecan dűzeyine bađlı olarak, yapay kalp ve diđer organlar arasındaki koordinasyonun normal kalbe sahip insanlarınkine benzer řekilde tepki verebilmesi) uyumlu bir řekilde akıllı denetimini sađlayabilmektir.

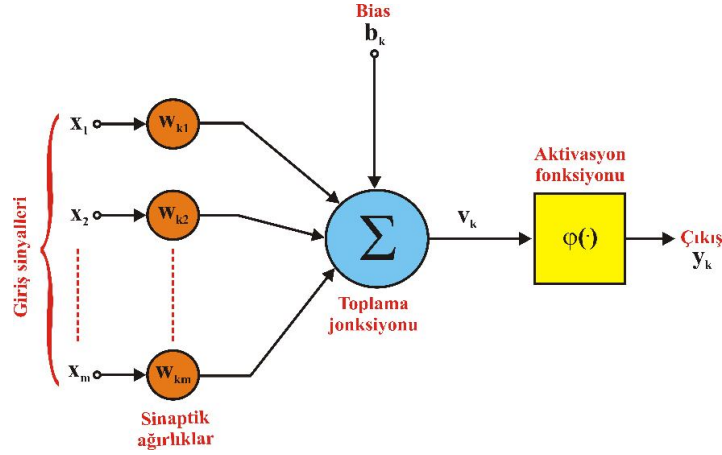
1955'te yapay zekânın öncűlerinden biri olan John McCarthy "yapay zekâ" terimini ilk olarak řoye tanımlamıřtır: Yapay Zekânın amaı akıllıymıř gibi davranan makineler geliřtirmektir (Ertel, 2011). Nabiyev'e gűre ise, Yapay Zekâ, bir bilgisayarın ya da bilgisayar denetimli bir makinenin, genellikle insana özđű nitelikler olduđu varsayılan akıl yűrűtme, anlam çıkartma, genelleme ve gemiř deneyimlerden öđrenme gibi yűksek zihinsel sűrelere iliřkin gűrevleri yerine getirme yeteneđi olarak tanımlanmaktadır (Nabiyev, 2010). Rich ve ark. gűre ise, Yapay Zeka, řu an insanların daha iyi yaptıkları řeylerin bilgisayarlar tarafından nasıl yapılacađının arařtırılmasıdır (Rich, 1983). Tarihsel geliřimine bakıldıđında Yapay Zekâ kavramı birçok bilim adamı tarafından farklı metotlarla dűrt ana yaklařım altında izelge 3.1'deki gibi ele alınabilir (Russell ve Norving, 1995).

Çizelge 3.1. Yapay zekânın bazı tanımlamaları (Russell ve Norving, 1995)

<p>İnsan Gibi Düşünmek</p> <ul style="list-style-type: none"> • “Bilgisayarları düşündürmek, tam bir sözel algı oluşturmak, akıllı bilgisayarlar yaratma için heyecanlı ve yeni bir çaba” (Haugeland, 1985) • “Karar verme, problem çözme, öğrenme gibi insan düşünce ve aktiviteleriyle ilişkilendirdiğimiz davranışların otomatikleştirilmesi” (Bellman, 1978) 	<p>Mantıklı Düşünme</p> <ul style="list-style-type: none"> • “Sayısal modellerin kullanımıyla zihinsel yetenek çalışması” (Charniak ve McDermott, 1985) • “Algılama, mantık ve davranışı mümkün kılan hesap çalışmaları” (Winston, 1992)
<p>İnsan Gibi Davranmak</p> <ul style="list-style-type: none"> • “İnsanlar tarafından yapıldığında zekâ gerektiren fonksiyonları gerçekleştirebilecek makineler üretme sanatı” (Kurzweil, 1990) • “Şu anda insanların daha iyi yapabildikleri şeyleri, bilgisayarların nasıl yapabileceği üzerine çalışma” (Rich ve Knight, 1991) 	<p>Mantıklı Davranma</p> <ul style="list-style-type: none"> • “Sayısal Zekâ, akıllı araçların tasarım çalışmasıdır” (Poole ve ark., 1998) • “Yapay Zekâ, yapay maddelerdeki zeki davranışlarla ilişkilidir” (Nilsson, 1998)

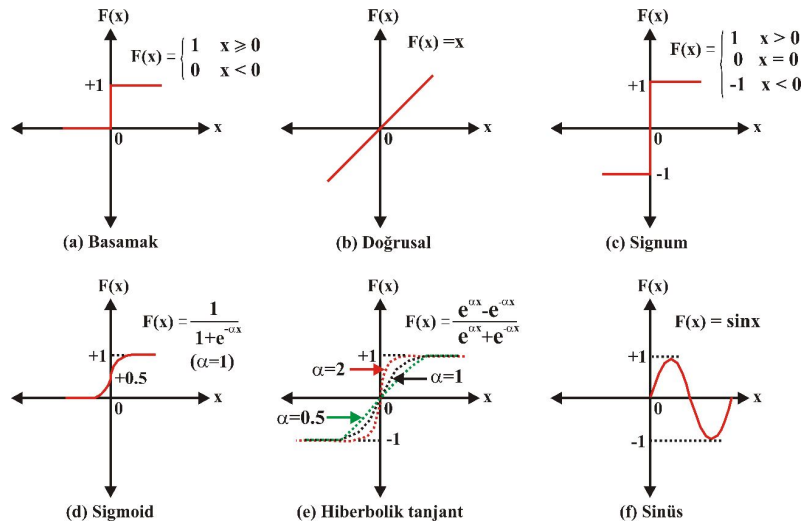
Bu noktada akla gelen en önemli soru şu olmaktadır: Acaba bir bilgisayar yardımı ile yapay bir zekâ üretmek mümkün olabilir mi? Bilgisayarlar çok karmaşık sayısal işlemleri anında çözümleyebilmelerine rağmen, idrak etme ve deneyimlerle kazanılmış bilgileri kullanabilme noktasında yetersizdir (Elmas, 2007). Bundan dolayı da günümüzde yapılan yapay zekâ çalışmaları sezgisel yaklaşımlar olan Yapay Sinir Ağları (YSA), Bulanık Mantık veya olasılık yaklaşımları (Bazı makine öğrenmesi algoritmaları, Sığ Öncelikli Arama (BFS), Derin Öncelikli Arama (DFS)) olarak karşımıza çıkmaktadır (Güllü, 2017).

YSA, insan beynine dayalı bir mantık modeli olarak tanımlanabilir (Negnevitsky, 2005). İnsan beynine dayalı bu mantık modeli, biyolojik sinir sisteminin davranışsal ve uyarlanabilir özelliklerini yakalamaya çalışan yazılım ve özel yapım donanım aygıtlarına uygulanan hesaplama modelleridir (Floreano ve Mattiussi, 2008). Temel bir YSA’na ait lineer olmayan nöron modeli Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5. Nöronun doğrusal olmayan modeli (Haykin, 2009)

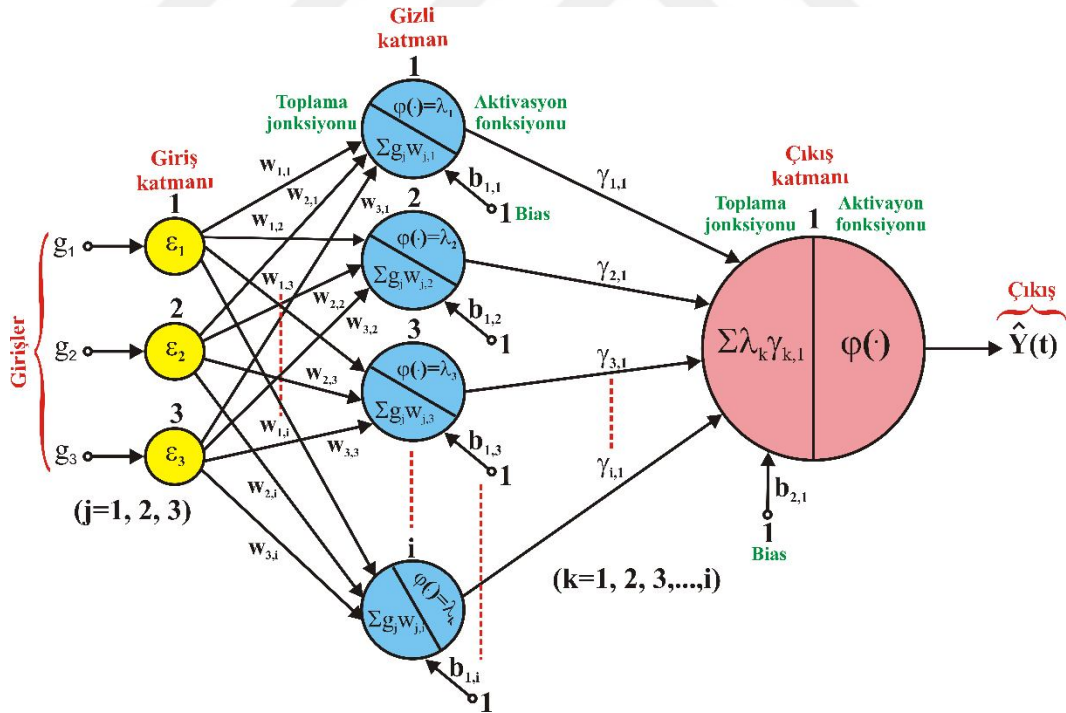
Şekil 3.5’de görüldüğü gibi nöron modeli basit olarak girişler (x_1, x_2, \dots, x_m), sinaptik ağırlıklar ($w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$) ve bağlantılı yollar, toplayıcı, aktivasyon fonksiyonu ($\phi(\cdot)$) ve çıkış’tan (y_k) oluşan bir yapıya sahiptir. Basit bir nöronunun matematiksel modelinin ifade edildiği Şekil 3.5’de, her bir giriş sinyalinin değeri belirli sinaptik ağırlıklarla çarpılmaktadır. Her bir girişe ait çarpım değerleri ise bir toplama birimi sayesinde toplanmaktadır. Burada aynı zamanda ilave olarak sabit katsayılı bir biyas değeri de toplama işlemine ilave edilmektedir. Daha sonra elde edilen tüm toplam değer nöronun çıkışının genliğini sınırlandırmak için bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek çıkış değeri üretilmektedir (Haykin, 2009). Genellikle YSA yapısında kullanılan aktivasyon fonksiyonları Şekil 3.6’da görülmektedir (Negnevitsky, 2005; Kulaksız, 2007; Flasiński, 2016).



Şekil 3.6. YSA’da sık kullanılan aktivasyon fonksiyonları

Şekil 3.6 (a)'da, çıkışın 0 ve 1 değeri arasında değiştiği birim basamak aktivasyon fonksiyonu görülmektedir. Şekil 3.6 (b)'de ise çıkışın, giriş ile orantılı olarak değiştiği doğrusal aktivasyon fonksiyonu görülmektedir. Şekil 3.6 (c)'de sıfır biasa sahip signum aktivasyon fonksiyonunda eğer $x > 0$ ise $+1$, $x = 0$ ise 0 ve $x < 0$ ise -1 değeri olmaktadır. Yukarıdaki Şekil 3.6 (d),(e),(f)'de ise sırasıyla sigmoid, hiperbolik tanjant ve sinüs aktivasyon fonksiyonları verilmiştir. Buradaki α değeri fonksiyonun eğimine göre değişen bir katsayıdır. Görüldüğü gibi YSA yapısının aktivasyon fonksiyonları doğrusal olmayan bir yapıda da seçilebilmektedir.

Bir YSA, birbirine bağlı işlem ünitelerinden oluşmaktadır (Yegnanarayana, 2009). Her bir işlem ünitesi ise birbirlerine bağlıdır ve bağlantı yolları üzerinden sinyal alır ve verirler (Kayaönü, 2000). Bugüne kadar birçok araştırmacı tarafından çok farklı yapılarda YSA modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sezgisel yaklaşım modellerinden en çok kullanılanlarından bir tanesi olan YSA, Çok Katmanlı Perceptron (ÇKP)'dur. Aşağıda Şekil 3.7'de, ÇKP'lere sahip revize edilmiş bir YSA yapısı görülmektedir (Flasiński, 2016).



Şekil 3.7. ÇKP'ye sahip bir YSA yapısı (Flasiński, 2016)

Şekil 3.7'deki ÇKP'ye sahip YSA yapısındaki gizli katman sayısı artırılarak daha fazla katmandan oluşan bir ağ yapısı oluşturulabilir. Buradaki g_1, g_2, g_3 ağın giriş sayısını

göstermektedir. Çok katmanlı bir sinir ağında r . katmandaki nöronlar $(r + 1)$. katmana ait nöronlara sinyal gönderirler. Yani aynı tabakadaki nöronlar iletişim kuramazlar. İlk katmana giriş katmanı, son katmana çıkış katmanı ve ara katmana ise gizli katman denir. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi ÇKP’lere sahip YSA modeli detaylı olarak incelendiğinde sırasıyla aşağıdaki unsurları yapısında barındırmaktadır.

1. Giriş verileri: Sisteme ait olan normalize edilmiş gerçek veriler veya özellik çıkarma ve özellik indirgeme metotları ile sisteme ait gerçek verilerden elde edilen daha efektif olan yeni özelliklerdir.
2. Giriş katmanı: Giriş verilerinin sayısı kadar yapay sinir nöronuna sahiptir ve giriş verilerini doğrudan gizli katmana aktarırlar.
3. Gizli katman: Esnek bir yapıya sahiptir. Bir veya birden daha fazla katmanlı olabilmektedir. Bu katmandaki nöron sayısı da değişkenlik göstermektedir. Burada, giriş katmanından gelen veriler işlenerek çıkış katmanına aktarılır. Aynı zamanda bu katmandaki her bir yapay sinir nöronu ile ilişkili bir bias değeri de bulunmaktadır.
4. Çıkış katmanı: Elde edilmesi istenen çıkış sayısı kadar yapay sinir nöronuna sahiptir. Gizli katmandan gelen bilginin işlendiği yerdir. Buna ilave olarak bu katmandaki her bir yapay sinir nöronu ile ilişkili bir bias değeri de bulunmaktadır.
5. Çıkış: Giriş verilerinin ÇKP’ye sahip YSA modelinden geçtikten sonra sistemin arzu edilen çıkış değerini ifade etmektedir.

Sinir ağları tahmin, sınıflandırma ve kümeleme problemlerinde başarılı bir şekilde uygulanan çok güçlü genel amaçlı bir modeli temsil etmektedir. Konuşma ve karakter tanıma, hileli işlemlerin tespiti, kalp krizinin tıbbi teşhisi, proses kontrolü ve robotik, döviz kurlarının tahmin edilmesinden radar hedeflerini belirleme ve tanılama konularına kadar çeşitli alanlarda yaygın kullanılmaktadır (Negnevitsky, 2005). Sinir ağlarının mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasının temel nedeni gürbüz olması, esnek yapısı, genelleme özelliği ve içerik tabanlı erişim gibi özelliklere sahip olmasıdır (Floreano ve Mattiussi, 2008).

Gerçek hayatta kontrol edilen sistemlerin birçoğu doğrusal değildir. Bu ise sistemlerin denetimini güçleştirmektedir. Aynı zamanda doğrusal olmayan sistemlerin girişi ve çıkışı arasındaki temel matematiksel ilişki çoğu zaman kurulamamaktadır. Bu gibi doğrusal olmayan ve modellenemeyen yapılarda YSA’lardan faydalanılmaktadır. Ayrıca sinir

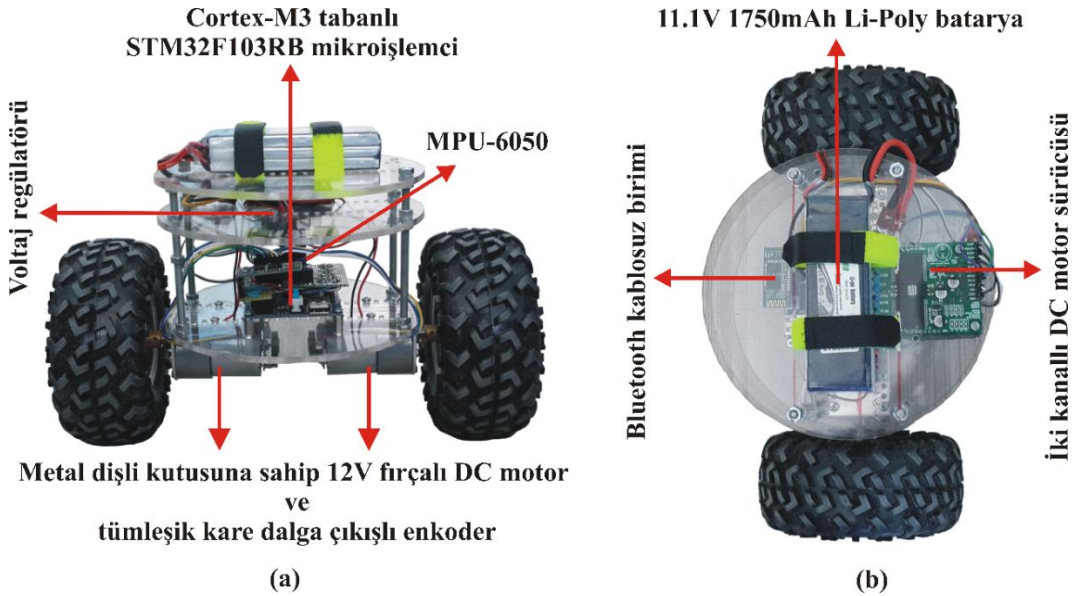
ağları, giriş gürültüsü veya donanım uygulamalarında bağlantı ve birimlerin işleyişinin hatalı çalışması gibi sinyal bozulmalarına karşı da dayanıklıdır. Buna ek olarak sinir ağları, sinyal gürültüsünü veya sinyal bileşenlerinin zarar görmesini telafi etmek için kademeli olarak da eğitilebilmektedir (Floreano ve Mattiussi, 2008).

Paralel işlem yapabilme yeteneği de YSA'nın en güçlü yanlarından biridir. Sinir ağının paralel işlem yapabilme yeteneği sayesinde hızlı bir şekilde veriler değerlendirilebilmekte ve kısa bir süre içerisinde çıkış değeri elde edilebilmektedir. YSA'nın doğrusal olmayan yapılarda esnek olması, farklı veri gruplarını girdi olarak kullanarak paralel işlem yapma yeteneği, genelleme yapabilmesi, öğrenme yeteneği, esnek uyarlanabilir yapısı ve hata toleransı gibi avantajlarından dolayı çok yönlü olarak kullanımı da gittikçe artmaktadır.

Yukarıda ele alınan materyal ve yöntemlere ilaveten, MDR'nin tasarımında donanım için Cortex M3 tabanlı STM32F103RB kontrol kartı ve MEMS tabanlı çoklu sensör yapılarını üzerinde barındıran IMU elektronik kartı kullanılmıştır. Sensör birleştirme işlemi için ise Kalman filtresi algoritmalarından yararlanılmıştır. Ayrıca, sistemin bütün görsel ve denge kontrol yazılımları C++ yazılım geliştirme ortamında gerçekleştirilmiştir. İlerleyen bölümlerde, tasarım aşamasında MDR'nin donanım ve yazılımları ile ilgili yapılan çalışmalar ve kullanılan materyaller ayrıntılı olarak verilmiştir.

4. GELİŞTİRİLEN DENGE ROBOTU VE MATEMATİKSEL MODELİ

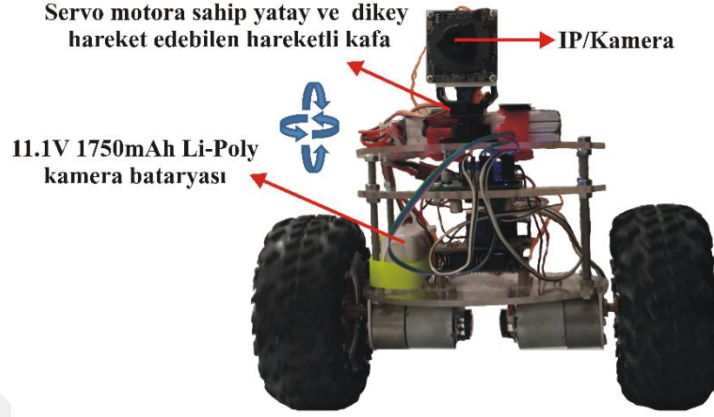
MDR eksik tahrikli ve doğrusal olmayan bir sistemdir. Bundan dolayı denge robotunun etkili bir şekilde kontrol edilebilmesi için uygun bir referans denge noktasının oluşturulması gerekmektedir. Uygun bir referans denge noktası oluşturmak için Şekil 4.1’de gösterilen düzgün bir donanıma sahip MDR yapısı tasarlanmıştır. Geliştirilen denge robotunun hafif olması ve tasarlanan sisteminin düzgün bir ağırlık merkezinin oluşturulabilmesi için robot 3 katman halinde inşa edilmiştir. Robotumuz en alt katmanında sağ ve sol tarafına montajlı halde bulunan enkoder ve dişli kutusuna sahip eş Kalıcı Mıknatıslı (PM) 12V DC motor bulunmaktadır. Aynı zamanda alt tabakada MEMS tabanlı 3 eksenli jiroskop sensörü, 3 eksenli ivme sensörü, 3 eksenli manyetik alan sensörü ve 1 eksenli barometre sensörlerini birlikte yapısında barındıran düşük maliyetli bir IMU elektronik kartı da mevcuttur. Bununla birlikte robot sisteminin bütün birimlerini denetleyen, bunlar arasındaki veri iletişimini sağlayan Cortex M3 tabanlı STM32F103RB geliştirme kartı ve kablosuz haberleşme birimi de bulunmaktadır. Robotun orta katmanında ise bağımsız olarak hareket eden iki adet DC motoru kontrol edebilen DC motor sürücü devresi bulunmaktadır. Robotun en üst tabakasında ise sistemin enerji ihtiyacını sağlayan 11.1V, 1750mAh Lityum Polimer (Li-Poly) batarya bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Denge kontrolünde kullanılan MDR'nin a) önden görünüşü b) üstten görünüşü

Daha sonraki çalışmalarda kullanılmak üzere yukarıdaki robot sistemine servo motorlarla hareket edebilen, yatay/dikey hareketli ve bulunduğu çevreden her açıda görüntü alabilen

IP tabanlı bir kamera eklenmiştir. Böylece robotun uzaktan kontrolü bilgisayarda bulunan bir operatör kontrol arayüzü vasıtasıyla gerçek zamanlı olarak sağlanmıştır. Aşağıdaki Şekil 4.2’de hareket kontrol algoritmasına sahip MDR’nin genel görünümü verilmiştir.



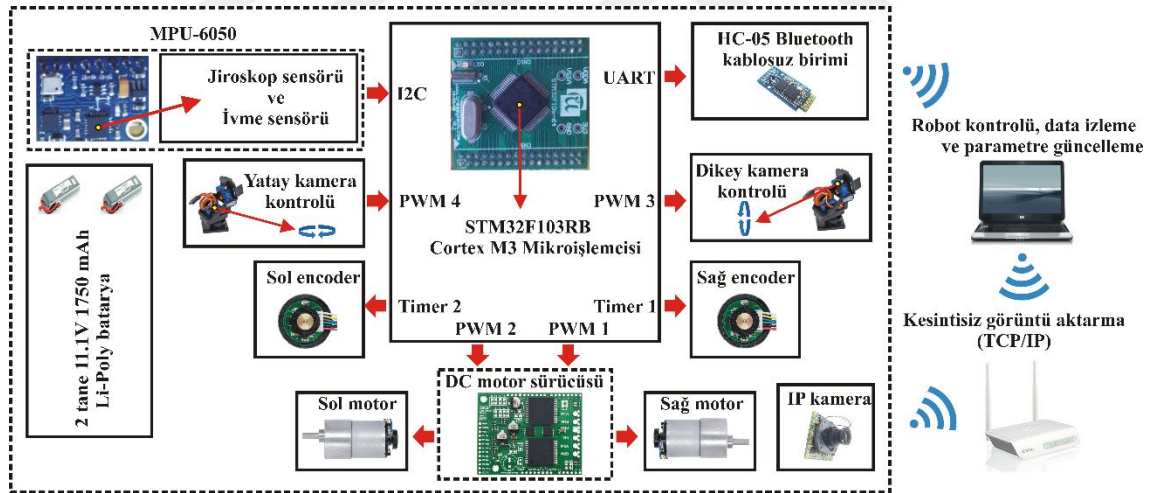
Şekil 4.2. Hareket kontrollünde kullanılan MDR

Yukarıdaki Şekil 4.2’de görüldüğü gibi kameraların besleme kaynağı olarak ekstra bir 11.1V, 1750mAh Li-Poly batarya kullanılmıştır.

4.1. Mobil Denge Robotunun Donanım Yapısı

Geliştirilen MDR’nin kontrol blok diyagramı Şekil 4.3’de ayrıntılı olarak görülmektedir. Blok diyagramda görüldüğü gibi geliştirilen robot sisteminde 32 bitlik Cortex M3 tabanlı STM32F103RB geliştirme kartı bulunmaktadır. Ayrıca robotun yapısında denge durumundan ayrılma açısını (eğim açısı) ölçmek için $\pm 4g$ hassasiyete ayarlanmış 3 serbestlik derecesine sahip ivme sensörü ve $\pm 250^\circ/s$ ölçüme ayarlanmış olan 3 serbestlik derecesine sahip jiroskop sensörünü birlikte içeren MPU-6050 sensör kartı kullanılmıştır. Bu sensörler Ara Tümeleşik Devre (I2C) aracılığıyla Cortex M3 tabanlı Gömülü Kontrol Birimi’ne (GKB) bağlanmıştır. Bu sensör grubundan alınan veriler uygun bir şekilde Kalman filtresi ile GKB üzerinde birleştirilmiştir. Böylece robotun eğim açısı doğru bir şekilde elde edilebilmiştir. Robotta kullanılan eyleyiciler dişli kutusuna ve Hall etkili enkodere sahip fırçalı DC motorlardır. DC motorlar, iki kanallı motor sürücü kartının yardımıyla, sensör ve GKB üzerinde geliştirilen diğer gerçek zamanlı denetleyici algoritmaları ile kontrol edilmiştir. Robot sisteminin besleme kaynağı olarak iki adet 11.1V 1750mAh Li-Poly batarya kullanılmıştır. Bunlara ilaveten robotun kontrolünün sağlandığı ve robota ait denetleyici parametrelerinin kolayca

değiştirilebileceği C++ tabanlı bir Robot Kontrol Arayüzü (RC-GUI) de geliştirilmiştir. Geliştirilen RC-GUI programı ve robot üzerinde bulunan kablosuz bluetooth birimi (HC-05) sayesinde robota ait veriler anlık olarak seri port aracılığıyla alınabilmektedir. Bunlar, robotun denetleyici parametreleri, enkoder bilgisi, eğim açısı değişimi ve kontrolör çıkışı gibi robot kontrol verileridir. Elde edilen bu robot verileri ile önerilen adaptif kontrol algoritmasının matematiksel temelleri oluşturulmuştur. Robot için geliştirilen bütün kontrol algoritmaları Cortex M3 mikroişlemci içerisine yazılan kodlarla gerçek zamanlı olarak yürütülmüştür. Robotun hareket denetimi esnasında bulunduğu ortamdan görüntü aktarabilmesi için ise robotun üzerine yatay ve dikey yönde hareket edebilen bir kamera mekanizması yerleştirilmiştir. Bu kamera mekanizmasındaki yatay ve dikey yöndeki hareketler servo motorlar sayesinde gerçekleşmektedir. Bilgisayar üzerinde çalışan robot kontrol arayüzüne aktarılan görüntü ise mini bir IP kamera sayesinde Aktarma Kontrol Protokolü/Internet Protokolü (TCP/IP)'nü destekleyen bir erişim noktası cihazı ile gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda tasarlanan bu denge robotu bilgisayar vasıtasıyla kişisel bir operatör tarafından da kontrol edilebilmektedir.

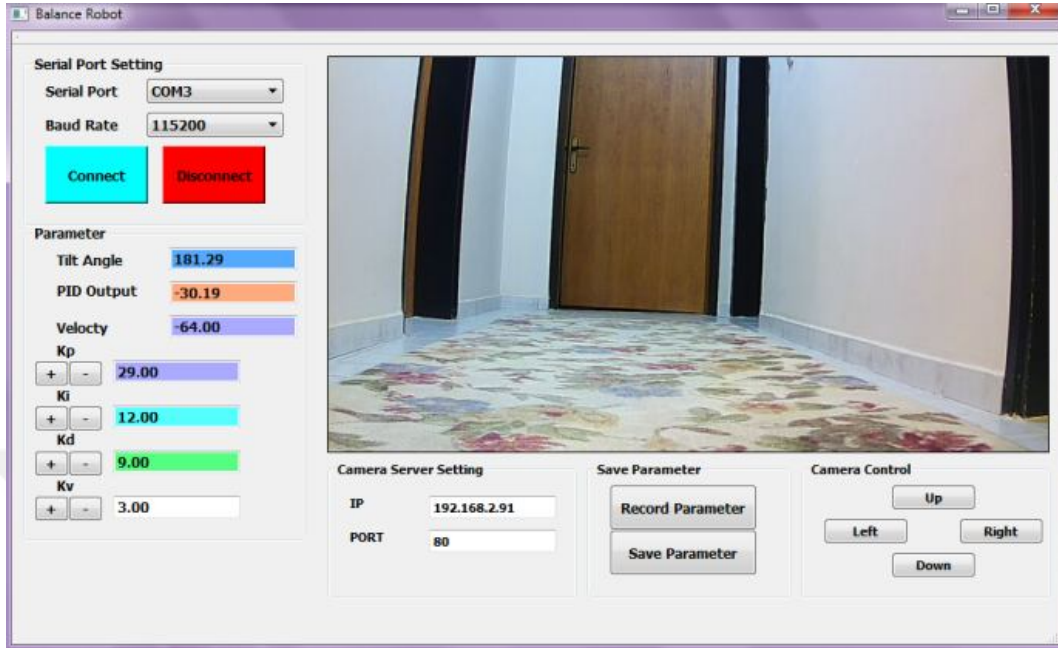


Şekil 4.3. MDR'nin donanım yapısı

4.2. PC Kontrol Arayüzü

Tasarlanan MDR'nin uzaktan kontrol edilebilmesi, bulunduğu ortamdan görüntü alarak aktarabilmesi, gerçek zamanlı olarak robotun kontrolör parametrelerinin değiştirilebilmesi ve robota ait parametrelerin (eğim açısı, kontrolör çıkışı ve hız gibi parametreler) gözlemlenebilmesi için Kişisel Bilgisayar (PC) üzerinde çalışan C++

tabanlı robot kontrol arayüzü tasarlanmıştır. Tasarlanan bu kontrol arayüzü Şekil 4.4’de görülmektedir.

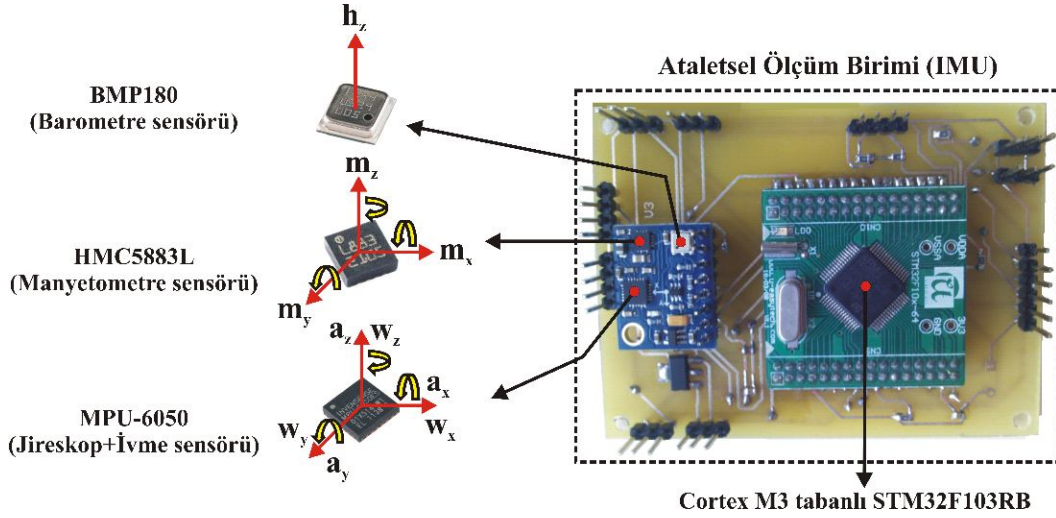


Şekil 4.4. Robot kontrol arayüzü

Tasarlanan bu arayüz vasıtasıyla hareketli ve kararlı denge durumunda robota ait eğim açısı değişimi, kontrolör çıkışı, sağ ve sol tekere ait hız değişim eğrileri kolaylıkla çizdirilmektedir. Sonuç olarak gerçek zamanlı bu arayüz vasıtasıyla geliştirilen yapay sinir ağları tabanlı anahtarlamalı adaptif kontrol ve diğer klasik kontrol algoritmalarının denge performans eğrileri çizdirilerek karşılaştırılmıştır.

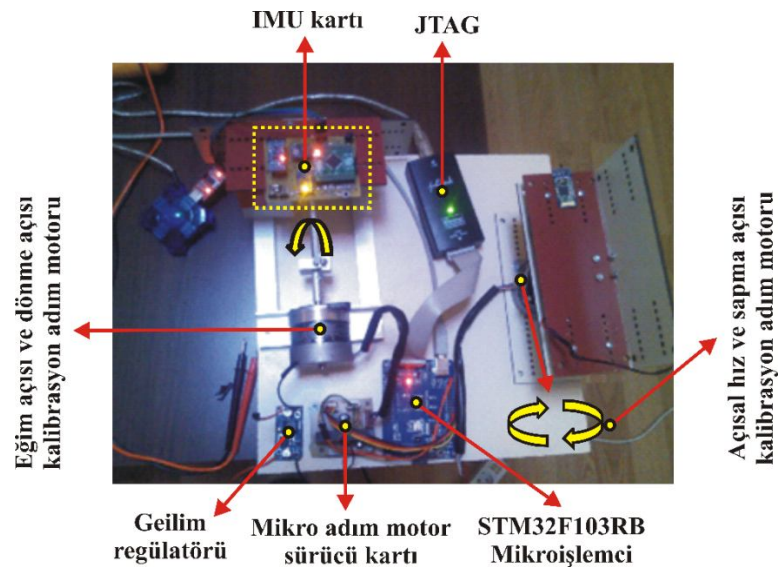
4.3. MEMS Tabanlı Sensör Modelleri

Tasarlanan MDR kontrol sisteminde 3 eksenli jiroskop sensörü ve 3 eksenli ivme sensörlerini birlikte yapısında barındıran MPU-6050, 3 eksenli manyetik alan sensörünü içeren HMC5883L ve tek eksenli barometrik basınç sensörüne sahip BMP180 gibi 4 farklı yapıdaki MEMS tabanlı sensörü üzerinde bulundurmaktadır. Kullanılan bu sensörler buldukları düzleme göre 3 eksenle ölçüm yapabilmektedirler. Şekil 4.5’de MDR’de kullanılan Ataletsel Moment Ölçüm Birimi (IMU) elektronik kartı ve IMU elektronik kartında mevcut olan sensörlerin eksenlere göre ölçümleri kartezyen koordinat sisteminde gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Sensörlerin kartezyen koordinatları ve tasarlanan IMU kartı

İvme sensörünün x, y ve z eksenlerindeki ölçümleri a_x , a_y ve a_z ile tanımlanmıştır. Jiroskop sensörünün eksenlere göre açısal hız değişimleri w_x , w_y ve w_z ile gösterilmiştir. Manyetik alan sensörü ölçümleri ise m_x , m_y ve m_z ile gösterilmiştir. Bunlara ek olarak barometrik basınç sensörü elde edilen h_z yükseklik bilgisini test etmektedir. Kullanılan sensör grubundan, elde edilen açı değişimlerinin doğru bir şekilde elde edilebilmesi için bir sensör (HMC5883L ve MPU-6050) test platformu tasarlanmıştır. Geliştirilen bu sensör test platformu Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. Sensör kalibrasyon test mekanizması

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi sensör test platformunda iki adet adım motoru bulunmaktadır. Adım motorlarından bir tanesi sabit bir dönüşle 3 ekseninde olacak şekilde jiroskop sensörünün kalibrasyonu için kullanılırken diğer adım motoru ise sabit bir açı ile iki ekseninde ivme sensörünün kalibrasyonu için kullanılmıştır. Adım motorları hassas bir şekilde mikro adım motor sürücü kullanılarak kontrol edilmiştir. Tasarlanan sensör test platformunun hassasiyeti ise 0.225 derece/adım olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan IMU’da aynı zamanda piezoelektrik basınç sensörü ve sıcaklık sensörünü yapısında barındıran barometrik basınç sensörü de bulunmaktadır. Bu çalışmada basınç sensörü için herhangi bir kalibrasyon işlemi uygulanmamıştır. Kalibrasyon işlemi sadece ivme ve jiroskop sensörleri için yapılmıştır. Manyetometre sensörünün kalibrasyon işlemi ise sensörün kendine ait iç test kalibrasyonu uygulanmıştır (Honeywell, 2013). Sonuç olarak MDR’de kullanılan IMU biriminden elde edilen yönelim açı bilgileri (eğim, sapma ve dönme açısı) hassas bir şekilde elde edilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde kullanılan sensörler ve bu sensörler üzerinde yapılan kalibrasyon işlemleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

4.3.1. İvme Sensörü

MEMS tabanlı ivme sensörleri, eksenlerine uygulanan ivmeyi ölçerek dijital veriler üretebilmektedirler. Fakat birçok alanda aktif olarak kullanılan bu ivme sensörlerinin konumunda herhangi bir değişiklik yok iken ölçülen çıkış sinyalinin sıfır olması beklenmektedir. Ancak MEMS tipi sensörlerin yapısında kullanılan mikro mekanik kütlelerin bağlantılarından kaynaklanan titreşimlerden dolayı sensör durağan durumda sürekli olarak bir gürültü şeklinde çıktı üretmektedir. Bu da sisteme hata olarak eklenmektedir. Bununla beraber üretim aşamasında iken sensörlerde kullanılan mekanik kütlelerin doğru bir şekilde konumlandırılmamasından kaynaklanan eksen kaymaları ve ölçüm hataları da çıkış sinyaline gürültü olarak eklenmektedir. Ölçüm faktörü hatası ise sensörlerde bulunan Analog Dijital Dönüştürücü (ADC) birimleri tarafından üretilmektedir. Çünkü sensörlerden bilgiler anlamlı bilgiye dönüştürülürken bazı bilgiler yok olmaktadır. Sensörlerde var olan bu yapısal gürültülerin üstesinden gelmek için kalibrasyon işleminden geçirilmesi gerekmektedir (Guner, 2016).

İvme sensörü ile x, y ve z eksenlerinde ölçüm değeri alınabilmektedir. Sensör durağan durumda iken z ekseninde yerçekimi kuvveti ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$) etkisinden dolayı

bir çıkış değeri üretmektedir. İvme sensörü için çıkış sinyali Denklem 4.1'de tanımlanmıştır (Wei ve ark., 2013).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}}_{A_h} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & S_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & S_{az} \end{bmatrix}}_{S_a} \underbrace{\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}}_{C_a} \underbrace{\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}}_{a_a} + \underbrace{\begin{bmatrix} a_{x_kayma} \\ a_{y_kayma} \\ a_{z_kayma} \end{bmatrix}}_{A_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}}_G \quad (4.1)$$

Bu ifade de A_x , A_y , A_z yapısal hatalara sahip ivme sensörünün çıkışını ifade etmektedir. S_{ax} , S_{ay} ve S_{az} ölçek faktörü hatasıdır. a_{11} , a_{12} , a_{13} , a_{21} , a_{22} , a_{23} , a_{31} , a_{32} , a_{33} elemanlarından oluşan C_a matrisi ise gövdenin ortogonal eksenleri ve atalet sensörünün duyarlı eksenleri arasındaki eksen sapma hatası matrisidir. a_x , a_y , a_z kalibrasyon işleminden sonra elde edilen gerçek ivmelenme ölçümlerini göstermektedir. a_{x_kayma} , a_{y_kayma} , a_{z_kayma} ise ivme sensörünün durağan durum kayma hatasını ifade etmektedir. G matrisi ise sensördeki mevcut olan sabit bir değeri göstermektedir. Yukarıdaki matris ifadesi dikkate alındığında kalibre edilmiş ivmelenme verisi şöyle vurgulanabilir.

$$a_a = [S_a C_a]^{-1} [A_h - A_k - G] \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'deki A_k ve $[S_a C_a]^{-1}$ matrisleri deneysel olarak belirlenebilir. Kayma hatası (A_k), her bir eksen için N tane örneğin ortalaması alınarak bulunmuştur. İvme sensöründe, denge robotu için tasarlanan ataletsel ölçüm içerisinde yerçekimi kuvvetini referans alarak xz ve yz düzlemlerinde, açı değişimleri dikkate alınarak θ_{xz} , yuvarlanma açısı ve θ_{yz} , eğim açısı değerlerini hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$\begin{pmatrix} \theta_{xz} \\ \theta_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{a_z} \right) \\ \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{a_z} \right) \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Bu tez çalışması için ivme sensörünün durağan durumda iken kayma hatası $N = 1000$ tane örnekleme ölçüm değeri alınarak belirlenmiştir. Daha sonra ise ivme sensörü adım motoru $18^\circ/\text{adım}$ hassasiyette hareket ettirilerek testleri yapılmış ve sonuç olarak Denklem 4.4'te verilen ivme sensörü kalibrasyon matrisi elde edilmiştir.

$$[S_a C_a]^{-1} = \begin{bmatrix} S_{wx} \cdot a_{11} & S_{wx} \cdot a_{12} & S_{wx} \cdot a_{13} \\ S_{wy} \cdot a_{21} & S_{wy} \cdot a_{22} & S_{wy} \cdot a_{23} \\ S_{wz} \cdot a_{31} & S_{wz} \cdot a_{32} & S_{wz} \cdot a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0657 & -0.04206 & 0.03751 \\ 0.00844 & 1.0734 & 0.01478 \\ -0.03256 & 0.00874 & 1.1636 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

4.3.2. Jiroskop Sensörü

Jiroskop sensörü cismin bulunduğu düzleme göre açısız hız değişimini ölçmektedir. Sensörden 3 eksen de dijital olarak eksenlerindeki açısız hız değişiminin ölçüm değerleri alınabilmektedir. İvme sensörüne benzer olarak MEMS tipi jiroskop sensöründen alınan ölçümlere durağan durum hatası, ölçek faktörü hatası ve üretimden kaynaklı eksen kayması hatası gürültü olarak eklenmektedir. Sensörün elde edilen kalibrasyondan geğmiş gerçek açısız hız değişimi ölçümleri w_x , w_y , w_z olarak tanımlanmıştır. Jiroskop sensörü için ölçüm parametreleri Denklem 4.5’de tanımlanmıştır (Wei ve ark., 2013).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix}}_{W_h} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_{wx} & 0 & 0 \\ 0 & S_{wy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{wz} \end{bmatrix}}_{S_w} \underbrace{\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}}_{C_w} \underbrace{\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix}}_{w_j} + \underbrace{\begin{bmatrix} W_{x_kayma} \\ W_{y_kayma} \\ W_{z_kayma} \end{bmatrix}}_{W_k} \quad (4.5)$$

Bu ifade de W_x , W_y , W_z yapısal hatalara sahip jiroskop sensörünün çıkışını ifade etmektedir. S_{wx} , S_{wy} ve S_{wz} ölçek faktörü hatasını ifade etmektedir. Aynı denklemde bulunan a_{11} , a_{12} , a_{13} , a_{21} , a_{22} , a_{23} , a_{31} , a_{32} , a_{33} elemanlarından oluşan C_w matrisi ise, gövdenin ortogonal eksen ve atalet sensörünün duyarlı eksen arasındaki eksenlerdeki sapma hatası matrisidir. w_x , w_y , w_z değerleri kalibrasyon işleminden sonra elde edilen gerçek ivmelenme ölçümlerini göstermektedir. Son olarak ise w_{x_kayma} , w_{y_kayma} , w_{z_kayma} ise jiroskop sensörü durağan durum kayma hatasını temsil etmektedir. yukarıdaki denklem 4.5 dikkate alınarak aşığıdaki Denklem 4.6’da jiroskop sensörünün kalibrasyon matrisi verilmiştir.

$$w_j = [S_w C_w]^{-1} [W_h - W_k] \quad (4.6)$$

Denklem 4.6’daki W_k ve $[S_w C_w]^{-1}$ matrisleri deneysel olarak belirlenebilir. Kayma hatası (w_k) için her bir eksen için N tane örneğin ortalaması alınarak bulunmuştur. Bu çalışmada, jiroskop sensörünün durağan durumda iken kayma hatası $N = 1000$ tane

örnekleme ölçüm değeri alınarak belirlenmiştir. Daha sonra ise jiroskop sensörü adım motoru $52.25^\circ/\text{sn}$ hassasiyette dönecek şekilde hareket ettirilerek testleri yapılmış ve sonuç olarak Denklem 4.7’de verilen ivme sensörü kalibrasyon matrisi elde edilmiştir.

$$[S_w C_w]^{-1} = \begin{bmatrix} S_{ax} \cdot a_{11} & S_{ax} \cdot a_{12} & S_{ax} \cdot a_{13} \\ S_{ay} \cdot a_{21} & S_{ay} \cdot a_{22} & S_{ay} \cdot a_{23} \\ S_{az} \cdot a_{31} & S_{az} \cdot a_{32} & S_{az} \cdot a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0978 & 0.001245 & -0.001245 \\ 0.001155 & 1.0965 & -0.002078 \\ 0.001965 & 0.001064 & 1.1943 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

4.3.3. Manyetometre

Manyetometre yeryüzündeki manyetik alan şiddetini ve yönünü ölçmek için tasarlanmış MEMS tipi bir sensördür. Dünyanın manyetik alan çizgileri Güney Kutup bölümünden çıkarak, Kuzey Kutup bölümünde sonlanmaktadır. Manyetik alan çizgileri yerküre üzerinde şiddet ve yön olarak farklılık göstermektedir. Bu manyetik alan göreceli olarak zamana göre sabit olmasına karşın, iyonosferdeki elektrik akımları yüzey manyetik alanını değiştirmektedir. MEMS tipi manyetik alan sensörleri için bu değişimler zamana göre sabit kabul edilmektedir. Bu etkilerin dışında MEMS tipi manyetometre çevresindeki elektronik ve mekanik malzemelerden kaynaklı gürültülerden etkilenmektedir. Bunlar yumuşak metal ve sert metal gürültüsü olarak adlandırılmaktadır (Konvalin, 2009). Manyetometre için ölçüm parametreleri Denklem 4.8’de tanımlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{mx} & 0 & 0 \\ 0 & S_{my} & 0 \\ 0 & 0 & S_{mz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{x_gürültü} \\ m_{y_gürültü} \\ m_{z_gürültü} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Bu ifade de M_x , M_y , M_z yapısal hatalara sahip manyetometre sensörünün çıkışını ifade etmektedir. S_{mx} , S_{my} ve S_{mz} manyetometre ölçek faktörü hatasını, m_x , m_y , m_z değerleri kalibrasyon işleminden sonra elde edilen gerçek manyetometre ölçümlerini göstermektedir. Son olarak ise $m_{x_gürültü}$, $m_{y_gürültü}$, $m_{z_gürültü}$ çevresel kaynakların oluşturduğu manyetik gürültü değerini belirtmektedir. Tasarlanan IMU içerisinde manyetometre x ve y eksenlerinde oluşan manyetik alan vektörlerinin bileşkesi kullanılarak sapma açısının belirlenmesi amacı ile kullanılmaktadır. Aşağıdaki Denklem

4.9 kullanılarak manyetometreden alınan ölçümler yunuslama açısına dönüştürülmektedir.

$$(\theta_{xy}) = \left(\tan^{-1} \left(\frac{m_y}{m_x} \right) \right) \quad (4.9)$$

4.4. Sensör Birleştirmesi İçin Kalman Filtresi Tahmini

Kalman filtresi bir sistemin modelinden hareket ederek sistemin giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin sonraki durumlarını tahmin ederek sistem durumunu güncelleyen yinelemeli bir filtredir. Gerçek zamanlı sistemlerde, sistemin durumunu belirlemek için tek bir ölçüm yapmak yerine farklı sensörlerden birçok ölçüm yapılır. Bu ölçümler daha sonra o zaman anında sistemin durumunu belirlemek için matematiksel olarak birleştirilir. Ayrık zamanlı doğrusal ölçüm sisteminin durum modeli Denklem 4.10 ve 4.11 ile gösterilmiştir.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (4.10)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4.11)$$

Denklem 4.10 ve 4.11'deki A, B ve H değişkenleri sistem durum uzayı matrislerini, w_{k-1} ve w_k sırasıyla proses gürültüsü ve ölçüm gürültüsünü temsil etmektedir. x_k durum değerini, u_k kontrol sinyalini ve z_k ölçüm değerini temsil etmektedir. Ölçüm sistemi için kontrol sinyali yoktur. Bundan dolayı Bu_k değeri ihmal edilebilir. Bu çalışmada jiroskop ve ivme sensöründen elde edilen sinyaller göz önünde bulundurularak Kalman durum uzayı modeli aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\hat{x}_k^- = \begin{bmatrix} \Psi \\ \psi \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \Psi \\ \psi \end{bmatrix}_{k-1} \quad (4.12)$$

$$\hat{z}_k = [1 \ 0]_k \hat{x}_k^- \quad (4.13)$$

Sistem için oluşturulan kovaryans matrisleri ise Denklem 4.14 ve 4.15'de tanımlanmıştır.

$$E[w_k w_k^T] = Q_k \quad (4.14)$$

$$E[v_k v_k^T] = R_k \quad (4.15)$$

Bu tezde $R = \begin{bmatrix} 0.04 & 0 \\ 0 & 0.04 \end{bmatrix}$ ve $Q = \begin{bmatrix} 0.003 & 0 \\ 0 & 0.005 \end{bmatrix}$ olarak seçilmiştir.

Sistemin durum tahmini, denklem 4.16'da verilmiştir.

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4.16)$$

Denklem 4.16'daki K_k kalman kazancını temsil etmekte ve Denklem 4.17'e göre hesaplanmaktadır.

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} \quad (4.17)$$

Aşağıdaki Denklem 4.18 ve 4.19 ise önceki ve sonraki hata kovaryanslarını temsil etmektedir.

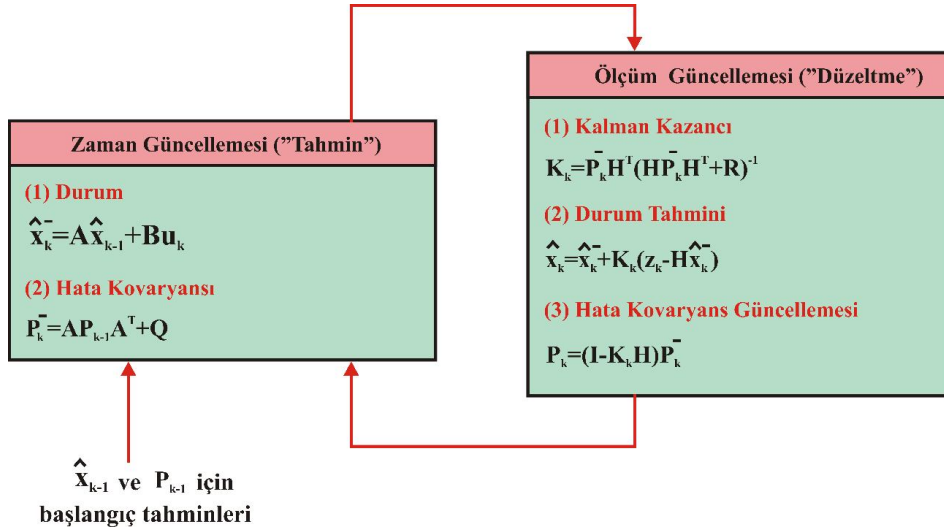
$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q \quad (4.18)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (4.19)$$

Yukarıdaki hata kovaryansları hesaplanırken ilk başlangıç koşulları aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$\hat{x}_0^- = 0, \quad P_0^- = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

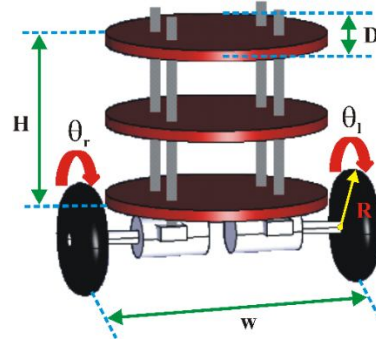
Kalman filtresi, kendi içinde çağrılan yinelemeli zaman ve ölçüm güncellemesi denklemlerinden oluşur. Zaman güncellemesi durum tahmini, ölçüm güncellemesi durum düzeltmesi için kullanılır. Şekil 4.7'de kalman filtresinin zaman ve ölçüm güncelleme işlemi ayrıntılı olarak görülmektedir. Robot sisteminin tasarımında kullanılan Kalman filtresi denklemleri için Welch ve Bishop'un çalışmalarından faydalanılmıştır (Welch ve Bishop, 2001).



Şekil 4.7. Kalman filtresi (Welch ve Bishop, 2001)

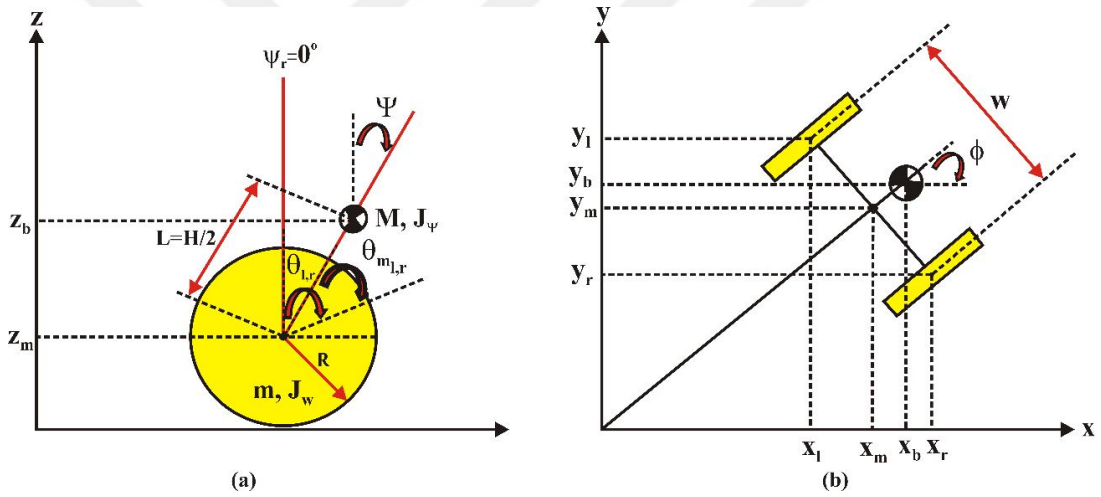
4.5. Matematiksel Model

MDR'nin matematiksel olarak doğrusal ve doğrusal olmayan matematiksel modelinin çıkarılması robotun kararlılık analizi, tasarlanan MDR denge simülasyonu ve denetleyici tasarımı açısından oldukça önemlidir. Çünkü robotun denge durumunu sürdürebilmesi ve istenilen görevleri yerine getirebilmesi için robota ait durum değişkenleri parametrelerinin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen robot durum değişkeni parametrelerine göre robot kontrol algoritmalarının oluşturulması da büyük önem taşımaktadır. Genel olarak MDR'ler üzerinde çalışan birçok araştırmacı robotun doğrusal ve doğrusal olmayan matematiksel modelini Lagrange-Euler ve Newton-Euler gibi denklemleri kullanılarak elde etmişlerdir (Ooi, 2003; Yamamoto, 2008; Sundin ve Thorstenson, 2012). Bu doktora tez çalışmasında, bu alanda çalışan araştırmacıların önermiş oldukları matematiksel modeller dikkatli bir şekilde incelenerek Yorihiisa Yamamoto (Yamamoto, 2008) tarafından önerilen Lagrange-Euler matematiksel modeli dikkate alınmıştır. Matematiksel model amacıyla kullanılan MDR sistemi Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Matematiksel modelde kullanılan denge robotu

Şekil 4.9'da ise MDR'nin yandan ve üstten görünüşünün koordinat sistemine indirgenmiş hali görülmektedir. MDR'nin hareket denklemleri Şekil 4.9'daki koordinat sistemi göz önünde bulundurularak çıkarılmıştır.



Şekil 4.9. MDR'nin (a) yandan (b) üstten görünümünün koordinat sistemi

MDR'nin hareket denkleminin doğru bir şekilde elde edilebilmesi için robota ait fiziksel parametrelerin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Çizelge 4.1'de iki tekerlekli MDR'nin matematiksel modelinde kullanılan parametreler ve değerleri ayrıntılı olarak görülmektedir.

Çizelge 4.1. MDR'nin fiziksel parametreleri

Fiziksel Parametreler	Birimler	Tanımlar
$g = 9.81$	[m/s ²]	Yerçekimi ivmesi
$m = 0.146$	[kg]	Tekerlek ağırlığı (her bir teker)
$R = 0.0625$	[m]	Teker yarıçapı
$J_w = mR^2/2$	[kgm ²]	Teker atalet momenti (her bir teker)
$M = 1.372$	[kg]	Gövde ağırlığı
$w = 0.28$	[m]	Gövde genişliği
$D = 0.16$	[m]	Gövde derinliği
$H = 0.09$	[m]	Gövde yüksekliği
$L = H/2$	[m]	Kütle merkezinin tekerlek eksenlerinden uzaklığı
$J_\psi = ML^2/3$	[kgm ²]	Gövde eğim açısı atalet momenti
$J_\phi = M(w^2 + D^2)/12$	[kgm ²]	Gövde sapma açısı atalet momenti
$J_m = 1 \times 10^{-5}$	[kgm ²]	DC motor rotor atalet momenti
$R_m = 2.4$	[Ω]	DC motor direnci
$k_e = 0.308$	[V s/rad]	DC motor zıt EMK sabiti
$k_t = 0.155$	[Nm/A]	DC motor tork sabiti
$L_m = 0$	[H]	DC motor endüktansı
$n = 30:1 (N_2:N_1)$		Dişli oranı
V_m	[V]	Motor terminal voltajı
V_e	[V]	Zıt EMK voltajı
i_a	[A]	Armatür üzerinden akan akım
$f_m = 0.0022$		Gövde ile DC motor arasındaki sürtünme katsayısı
$f_w = 0$		Tekerlek ve zemin arasındaki sürtünme katsayısı

Çizelge 4.1'deki robot sistemine ait ölçülebilen fiziksel parametreler 1g hassasiyetine sahip elektronik bir terazi ile ölçülmüştür. Şekil 4.10'da kullanılan hassas elektronik terazi görülmektedir.



Şekil 4.10. MDR'ye ait ölçülebilen fiziksel parametreler için kullanılan hassas terazi

Şekil 4.9'da verilen koordinat sistemi ve Çizelge 4.1'deki denge robotu fiziksel parametreleri dikkate alınarak MDR'nin hareket denklemleri, Lagrange metodu kullanılarak türetilmiştir. $t = 0$ 'da MDR'nun yönü x ekseninin pozitif yönü alırsa her bir koordinat için denge denklemleri aşağıdaki gibi olacaktır. Buna göre denge robotunda sağ ve sol tekerin ortalama açısı (θ) ve sapma açısı (ϕ),

$$(\theta, \phi) = \left(\frac{1}{2}(\theta_l + \theta_r), \frac{R}{w}(\theta_r - \theta_l) \right) \quad (4.21)$$

olacaktır. Burada verilen θ_l sol teker açısını, θ_r ise sağ teker açısını ifade etmektedir. Şekil 4.9'da verilen xy koordinat sistemine göre tekerlerin bağlı olduğu şaft merkezi (x_m, y_m, z_m) , sağ ve sol tekerlerin koordinat sistemindeki yerleri $(x_r, y_r, z_r, x_l, y_l, z_l)$ ile gösterilmiştir. Robot sisteminin gövde ağırlık merkezleri ise (x_b, y_b, z_b) ile gösterilmiştir. Bütün bu koordinatlar sırasıyla Denklem 4.22-4.25 ile ifade edilmiştir.

$$(x_m, y_m, z_m) = (R\theta \cos \phi, R\theta \sin \phi, R) \quad (4.22)$$

$$(x_l, y_l, z_l) = \left(x_m - \frac{w}{2} \sin \phi, y_m + \frac{w}{2} \cos \phi, z_m \right) \quad (4.23)$$

$$(x_r, y_r, z_r) = \left(x_m + \frac{w}{2} \sin \phi, y_m - \frac{w}{2} \cos \phi, z_m \right) \quad (4.24)$$

$$(x_b, y_b, z_b) = (x_m + L \sin \Psi \cos \phi, y_m + L \sin \Psi \sin \phi, z_m + L \cos \Psi) \quad (4.25)$$

Denklem 4.16 ifadesinde verilen Ψ sembolü gövde eğim açısını ifade etmektedir. Öteleme kinetik enerjisi T_1 , dönme kinetik enerjisi T_2 ve potansiyel enerji U olmak üzere, robot sisteminin enerji denklemleri;

$$T_1 = \frac{1}{2}m(\dot{x}_l^2 + \dot{y}_l^2 + \dot{z}_l^2) + \frac{1}{2}m(\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2 + \dot{z}_r^2) + \frac{1}{2}M(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2 + \dot{z}_b^2) \quad (4.26)$$

$$T_2 = \frac{1}{2}J_w \dot{\theta}_l^2 + \frac{1}{2}J_w \dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2}J_\Psi \dot{\Psi}^2 + \frac{1}{2}J_\phi \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}n^2 J_m (\dot{\theta}_l - \dot{\Psi})^2 + \frac{1}{2}n^2 J_m (\dot{\theta}_r - \dot{\Psi})^2 \quad (4.27)$$

$$U = mgz_l + mgz_r + Mgz_b \quad (4.28)$$

olarak elde edilir. Genelleştirilmiş koordinat sisteminde T_2 dönme kinetik enerjisi ifadesindeki son iki terim sırasıyla sol ve sağdaki DC motorun dönme kinetik enerjisidir. Kinetik enerjiler kullanılarak Lagrangian (L) ifadesi Denklem 4.29'daki gibi yazılabilir.

$$L = \sum \text{Kinetik Enerji} - \sum \text{Potansiyel Enerji} = T_1 + T_2 - U \quad (4.29)$$

Denge robotunun Lagrangian hareket denklemleri kullanılarak F_θ (tekere etkiyen kuvvet), F_Ψ (gövde eğim açısı kuvveti), F_ϕ (gövde sapma açısı kuvveti) kuvvetleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$F_\theta = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (4.30)$$

$$F_\Psi = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\Psi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \Psi} \quad (4.31)$$

$$F_\phi = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} \quad (4.32)$$

Buradan yukarıda verilen Lagrange kısmi diferansiyel denklemleri kullanarak Denklem 4.29'dan aşağıdaki denklemleri türetebilir.

$$F_\theta = [(2m + M)R^2 + 2J_w + 2n^2J_m]\ddot{\theta} + (MLR \cos \Psi - 2n^2J_m)\ddot{\Psi} - MLR\dot{\Psi}^2 \sin \Psi - [(2m + M)R^2\theta + MLR \sin \Psi]\dot{\phi}^2 \quad (4.33)$$

$$F_\Psi = (MLR \cos \Psi - 2n^2J_m)\ddot{\theta} + (ML^2 + J_\Psi + 2n^2J_m)\ddot{\Psi} - MgL \sin \Psi - (MLR\theta + ML^2 \sin \Psi)\dot{\phi}^2 \cos \Psi \quad (4.34)$$

$$F_\phi = \left[\frac{1}{2}mw^2 + J_\phi + \frac{w^2}{2R^2} (J_w + n^2J_m) + (2m + M)R^2\theta^2 + 2MLR\theta \sin \Psi \right] \ddot{\phi} + 2[(2m + M)R^2\theta\dot{\theta} + ML^2\dot{\Psi} \sin \Psi \cos \Psi + MLR(\dot{\theta} \sin \Psi + \theta\dot{\Psi} \cos \Psi)]\dot{\phi} \quad (4.35)$$

MDR'nin denge noktasında lineerleştirilmiş hareket denklemleri ile modern kontrol teorisine dayalı lineer durum denklemlerini türetebiliriz. MDR'nin lineerleştirme işlemi için $\Psi \cong 0$ 'a çok yakın bir değer aldığında $\sin \Psi \cong \Psi$ ve $\cos \Psi \cong 1$ olur. Robot sistemine ait $\dot{\Psi}^2$ gibi ikinci dereceden terimleri ihmal edilebilir. Bu durumda (4.33) – (4.35)'deki hareket denklemleri yaklaşık olarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F_\theta = [(2m + M)R^2 + 2J_w + 2n^2J_m]\ddot{\theta} + (MLR - 2n^2J_m)\ddot{\Psi} \quad (4.36)$$

$$F_\Psi = (MLR - 2n^2J_m)\ddot{\theta} + (ML^2 + J_\Psi + 2n^2J_m)\ddot{\Psi} - MgL\Psi \quad (4.37)$$

$$F_\phi = \left[\frac{1}{2}mw^2 + J_\phi + \frac{w^2}{2R^2} (J_w + n^2J_m) \right] \ddot{\phi} \quad (4.38)$$

DC motor torku ve viskoz sürtünme göz önünde bulundurulduğunda, genelleştirilmiş kuvvetler sırasıyla aşağıdaki Denklem 4.39-4.42'deki gibi verilebilir. $i_{l,r}$ (i_a) DC motor akımı ve $v_{l,r}$ (V_m) DC motor voltajı olmak üzere,

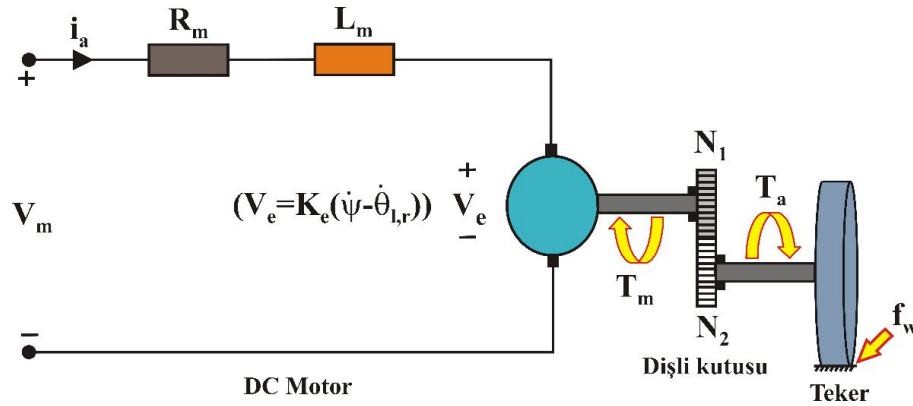
$$(F_\theta, F_\psi, F_\phi) = \left(\frac{1}{2}(F_l + F_r), F_\psi, \frac{R}{w}(F_r - F_l) \right) \quad (4.39)$$

$$F_l = nK_t i_l + f_m(\dot{\Psi} - \dot{\theta}_l) - f_w \dot{\theta}_l \quad (4.40)$$

$$F_r = nK_t i_r + f_m(\dot{\Psi} - \dot{\theta}_r) - f_w \dot{\theta}_r \quad (4.41)$$

$$F_\psi = -nK_t i_l - nK_t i_r - f_m(\dot{\Psi} - \dot{\theta}_l) - f_m(\dot{\Psi} - \dot{\theta}_r) \quad (4.42)$$

Denge robotunun kontrolünü sağlamak için doğrudan DC motor akımını kullanılmayabilir. Çünkü robotun kontrolü PWM kontrolüne dayanır. Bu yüzden DC motor denklemini i_a akımı ve V_m voltajı arasındaki ilişkiyi kullanarak değerlendirilmektedir. Motor içerisindeki sürtünmeleri ihmal edersek, motor denklemini genel olarak aşağıdaki gibi olur. Şekil 4.11'de DC motorun eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 4.11. Dişli kutusuna sahip fırçalı DC motor eşdeğer devresi

Yukarıdaki DC motor eşdeğer devresinde,

$$L_m \dot{i}_a = V_m - K_e(\dot{\theta}_{l,r} - \dot{\Psi}) - R_m i_a \quad (4.43)$$

DC motorun endüktansını (L_m) önemsemeysek ve yaklaşık olarak sıfır alırsak, DC motorun akımı aşağıdaki gibi olur.

$$i_a = \frac{V_m - K_e(\dot{\theta}_{l,r} - \dot{\Psi})}{R_m} \quad (4.44)$$

DC motorun akım denkleminde motorun voltajı kullanılarak genelleştirilmiş kuvvetler aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F_\theta = \frac{\alpha}{2}(v_l + v_r) - (\beta + f_w)\dot{\theta} + \beta\dot{\Psi} \quad (4.45)$$

$$F_\Psi = -\alpha(v_l + v_r) + 2\beta\dot{\theta} - 2\beta\dot{\Psi} \quad (4.46)$$

$$F_\phi = \frac{R}{w}\alpha(v_r - v_l) - (\beta + \frac{w}{R}f_w)\dot{\phi} \quad (4.47)$$

Burada $\alpha = \frac{nK_t}{R_m}$, $\beta = \frac{nK_tK_e}{R_m} + f_m$ olmaktadır. Ayrıca v_r -sağ motor gerilimi, v_l -sol motor gerilimi, f_w -teker ve zemin arasındaki sürtünme kuvveti, w -robot gövde genişliği, R -teker yarıçapı ve f_m -DC motor ve robot gövdesi arasındaki sürtünme katsayısıdır. Durum uzayı formu için $x_1 = [\theta, \Psi, \dot{\theta}, \dot{\Psi}]^T$, $x_2 = [\phi, \dot{\phi}]^T$ durum değişkenlerini ve $u = [v_l, v_r]^T$ girişi göstermek üzere matris formunda MDR'nun durum denklemlerini aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\dot{x}_1 = A_1x_1 + B_1u, y_1 = C_1x_1 + D_1x_1 \quad (4.48)$$

$$\dot{x}_2 = A_2x_2 + B_2u, y_2 = C_2x_2 + D_2x_2 \quad (4.49)$$

Burada y_1 ve y_2 sırasıyla x_1 ve x_2 durum değişkenlerine bağlı olan çıkışları ifade etmektedir. Gerçekleştirilen MDR sistemi ele alındığında, Çizelge 4.1'deki denge robotu model parametreleri, robota ait 4.36-4.38'de verilen lineer denklem takımlarında yerlerine konulursa sistemin durum denklemi katsayıları aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 32.1287 & -2.0883 & 2.0883 \\ 0 & 33.6544 & 3.0176 & -3.0176 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -5.0315 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 3.3776 & 3.3776 \\ -4.8808 & -4.8808 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -3.6330 & -3.6330 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Sistemin çıkış denklemi katsayıları ise, sistemin tüm durum değişkenleri göz önüne alınarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

Yukarıda elde edilen durum uzayı formundan yararlanılarak robot sisteminin açık çevrim özdeğerleri sırasıyla A_1 ve A_2 matrislerinin özdeğerleridir. Robot kontrol sistemine ait özdeğerler Denklem 4.52 ve 4.53'de verilmiştir.

$$\text{eig}(A_1) = [0 \quad 5.7646 \quad -6.1647 \quad -4.7059] \quad (4.52)$$

$$\text{eig}(A_2) = [0 \quad -5.0315] \quad (4.53)$$

Görüldüğü gibi kontrol sistemine ait bazı özdeğerler sıfır veya pozitif olmaktadır. Bundan dolayı sistem kararsızdır. Bu sistemi kararlı hale getirebilmek için kapalı çevrim sistemin özdeğerlerini negatif yapabilecek bir kontrolöre ihtiyaç vardır.

Tasarlanan robot sisteminin kontrol edilebilirliğini ve gözlemlenebilirliğini anlayabilmek için sistemin lineerleştirilmiş matematiksel modelinden Denklem 4.54'te verilen kontrol edilebilirlik matrisi ve Denklem 4.55'de verilen gözlemlenebilirlik matrisleri bulunmuştur.

$$T_c = [B, AB, A^2B, A^3B]$$

$$T_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3.4 & 3.4 & -17.2 & -17.2 & -68.8 & -68.8 \\ 0 & 0 & -4.9 & -4.9 & 24.9 & 24.9 & -291.5 & -291.5 \\ 3.4 & 3.4 & -17.2 & -17.2 & -68.8 & -68.8 & 335.5 & 335.5 \\ -4.9 & -4.9 & 24.9 & 24.9 & -291.5 & -291.5 & 1510.8 & 1510.8 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

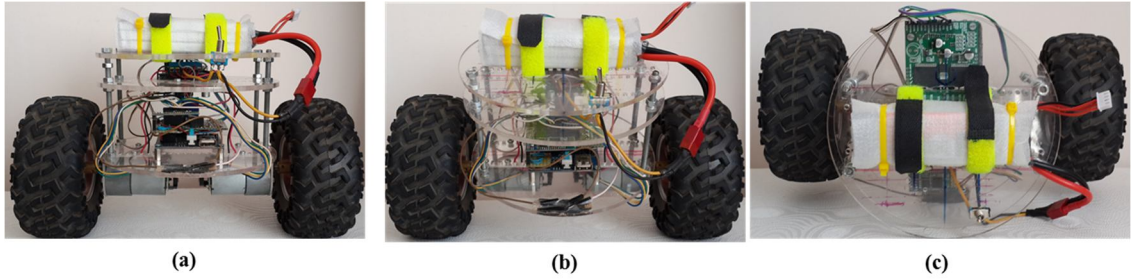
$$T_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 32.1 & -2.1 & 2.1 \\ 0 & 33.7 & 3 & -3 \\ 0 & 32.1 & -2.1 & 2.1 \\ 0 & 33.7 & 3 & -3 \\ 0 & 3.2 & 10.7 & 21.5 \\ 0 & -4.6 & -15.4 & 49.1 \\ 0 & 3.2 & 10.7 & 21.5 \\ 0 & -4.6 & -15.4 & 49.1 \\ 0 & 1065 & 42.5 & -39.3 \\ 0 & 1156.1 & 180.2 & -184.8 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Yukarıda elde edilen kontrol edilebilir matrisin ve gözlemlenebilir matrisin rankı 4 bulunmuştur. Yani rankları kontrol sisteminin derecesine eşittir. Bundan dolayı robot sistemi tamamen kontrol edilebilir ve gözlemlenebilirdir. Robot sisteminin matematiksel modelinden yararlanılarak sistem için denetleyici parametreleri yapılan simülasyon çalışmalarıyla Ziegler-Nichols yaklaşımları da göz önüne alınarak kabaca bulunmuştur. Daha sonra ise gerçek zamanlı robot kontrol arayüzü ve tasarlanan MDR üzerinde denetleyici parametreleri için ince ayar yapılarak en uygun değerler belirlenmiştir. Robot sisteminde kullanılan denklemlerin ayrıntılı olarak çıkarılması ile ilgili Yorihiya Yamamoto'nun "NXTway-GS Model-Based Design-Control of Self-balancing two-wheeled robot built with LEGO Mindstorms NXT-" adlı çalışması ayrıntılı olarak incelenebilir (Yamamoto, 2008).

5. MOBİL DENGE ROBOTUNUN GERÇEK ZAMANLI KLASİK VE ADAPTİF KONTROLÜ

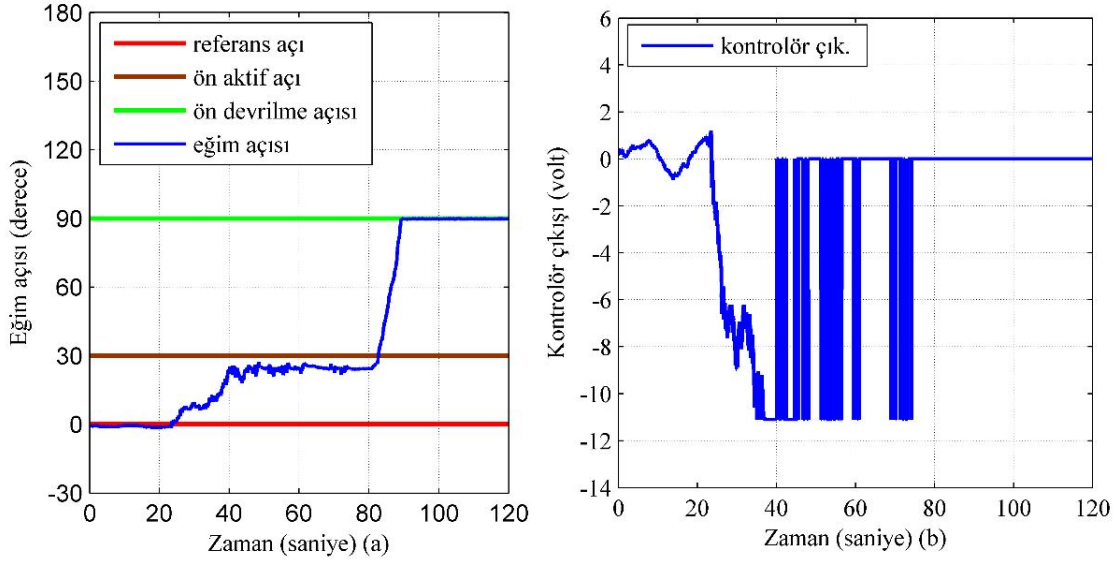
Bu bölümde denge robotu üzerinde uygulanan gerçek zamanlı klasik P, PI, PD, PID kontrol, PI-V kontrol ve önerilen YSA tabanlı Anahtarlamalı Adaptif Kontrol (AAK) yapısı ile robotun hareket denetimi incelenmiştir.

Tasarlanan MDR'nin dik pozisyon civarında dengede kalabilmesi için referans denge noktası olarak, $\Psi_r = 0^\circ$ seçilmiştir. Robotun denge ve hareket kontrol algoritmaları eğim açısının $\mp 30^\circ$ arasında etkili olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu değerlerin dışındaki eğim açısı değerlerinde MDR tekrar referans denge noktasına gelememektedir. MDR'nun ön tarafa veya geriye doğru tam olarak düştüğünde ise elde edilen eğim açısı sırasıyla $+90^\circ$ ve -90° olmaktadır. MDR ilk olarak aşağıdaki Şekil 5.1'de görüldüğü gibi ön tarafa kademeli olarak yavaş yavaş kontrollü bir şekilde eğilmiştir. Şekil 5.1 (a)'da iken robot dik denge pozisyonundadır. Bu durumda iken MDR'nin eğim açısı (Ψ_r) 0° dir. Şekil 5.1 (b)'de ise MDR ön tarafa doğru biraz eğilmiştir ve bu durumda iken, robotun eğim açısı ($\Psi_{\text{ön aktif açılı}}$) yaklaşık 30° 'dir. Şekil 5.1 (c)'de ise MDR ön tarafa doğru tamamen devrilmiştir. Bu durumda iken MDR'nin eğim açısı ($\Psi_{\text{ön devrilme açısı}}$) $+90^\circ$ maksimum değerini almaktadır.



Şekil 5.1. MDR'nin a) referans açısı b) ön aktif açısı c) ön devrilme açısı

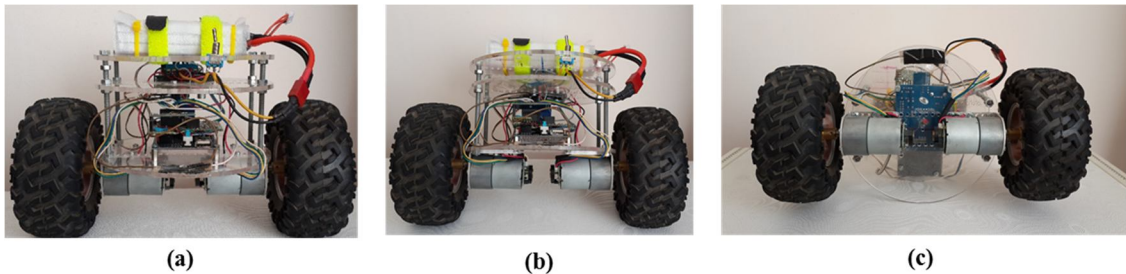
Şekil 5.1'deki gibi MDR ön tarafa doğru kademeli olarak eğilirken elde edilen eğim açısı ve kontrolör çıkışı grafikleri aşağıdaki Şekil 5.2'deki gibi olmaktadır.



Şekil 5.2. MDR'nin ön tarafa doğru devrilme testine ait robot verileri

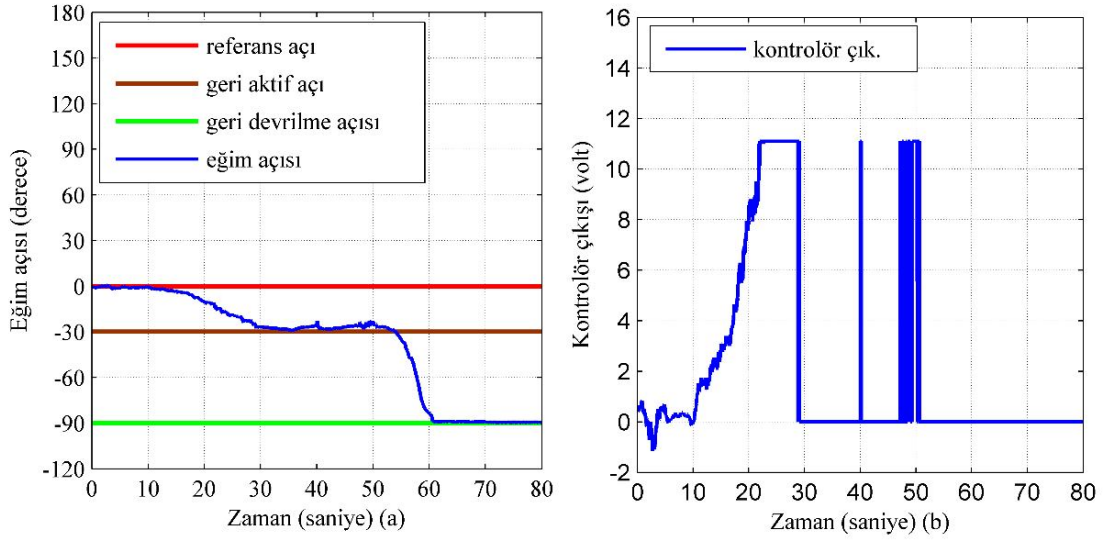
Şekil 5.2'den de görüldüğü gibi MDR'nin yaklaşık 80. saniyeden sonra kontrolör çıkışı yoktur. Yani bu noktadan sonra MDR'nin eğim açısı ön devrilme açısının sınır değerini aşmıştır.

Daha sonra MDR aşağıdaki Şekil 5.3'de görüldüğü gibi geriye doğru kademeli olarak yavaş yavaş kontrollü bir şekilde eğilmiştir. Şekil 5.3 (a)'da iken robot dik denge pozisyonundadır ve bu durumda iken MDR'nin eğim açısı (Ψ_r) 0° 'dir. Şekil 5.3 (b)'de ise MDR'u geriye doğru biraz eğilmiştir ve bu durumda iken, MDR'nin eğim açısı ($\Psi_{\text{geri aktif açı}}$) yaklaşık -30° 'dir. Şekil 5.3 (c)'de ise MDR geriye doğru tamamen devrilmiştir. Bu durumda ise MDR'nin eğim açısı ($\Psi_{\text{geri devrilme açısı}}$) -90° minimum değerini almaktadır.



Şekil 5.3. MDR'nin a) referans açısı b) geri aktif açısı c) geri devrilme açısı

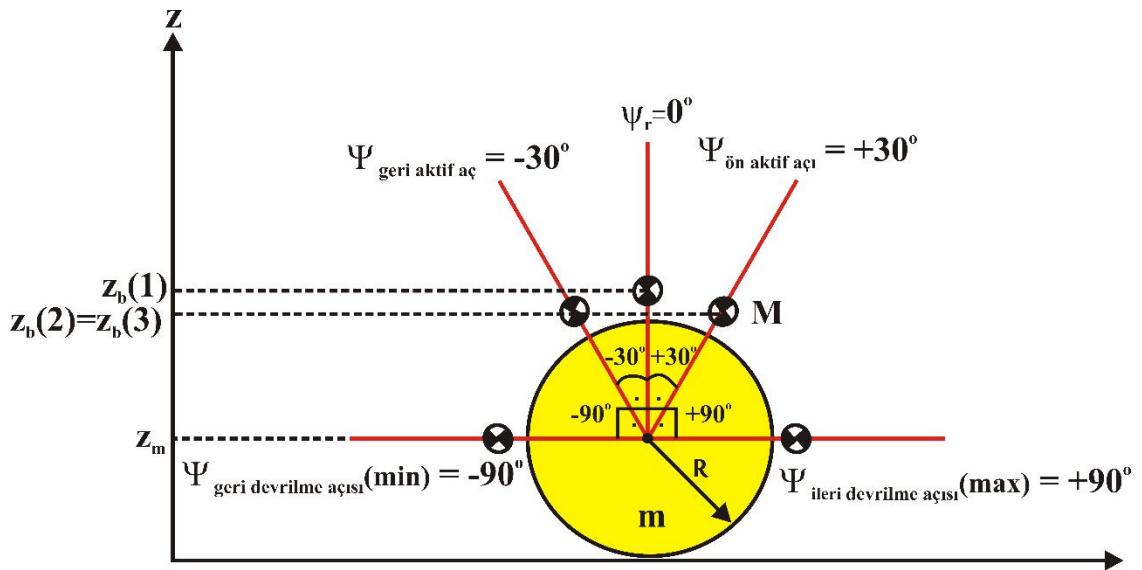
Şekil 5.3'deki gibi MDR geriye doğru kademeli olarak eğilirken elde edilen eğim açısı ve kontrolör çıkışı grafikleri aşağıdaki Şekil 5.4'deki gibi olmaktadır.



Şekil 5.4. MDR'nun geriye doğru devrilme testine ait robot verileri

Şekil 5.4'den de görüldüğü gibi MDR'nin yaklaşık 50. saniyeden sonra kontrolör çıkışı yoktur. Yani bu noktadan sonra MDR'nin eğim açısı, geri aktif açının değerinden daha küçüktür.

Yukarıda bahsedildiği gibi MDR'nin denge kontrol algoritmalarında oldukça önemli olan referans denge noktası, ön aktif açı, geri aktif açı, ön devrilme açısı ve geri devrilme açısı aşağıda Şekil 5.5'de robotun denge kontrolüne ilişkin koordinat sisteminde ayrıntılı olarak verilmiştir.



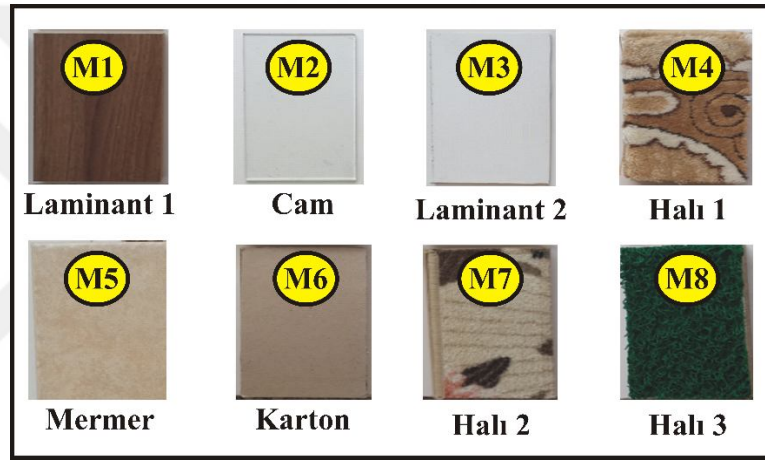
Şekil 5.5. Robotun denge kontrolü koordinat sisteminin yandan görünüşü

Şekil 5.5'deki $z_b(1)$, $z_b(2)$, $z_b(3)$ robotun denge denetimine ilişkin dinamik olan ağırlık merkezinin z koordinatındaki sayısal değerini ifade etmektedir. z_m ise robotun tekerinin ağırlık merkezinin z koordinatındaki sayısal değeridir.

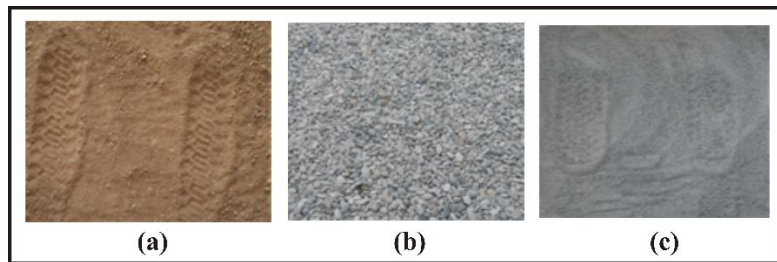
Yukarıda bahsedildiği gibi robotun üzerinde uygulanan gerçek zamanlı kontrol algoritmaları 2 farklı zemin özellikleri dikkate alınarak uygulanmıştır.

1. Farklı sürtünme katsayısına sahip zeminler (Laminant tahtalar (M1-M3), mermer (M5), karton (M6), cam (M2) ve halılar (M4-M7-M8))
2. Gevşek zeminler (toprak, çakıl ve kum zeminler)

Aşağıdaki Şekil 5.6 ve 5.7'de MDR'nin denge kontrol algoritmalarının uygulandığı bütün yüzeyler sırasıyla verilmiştir.



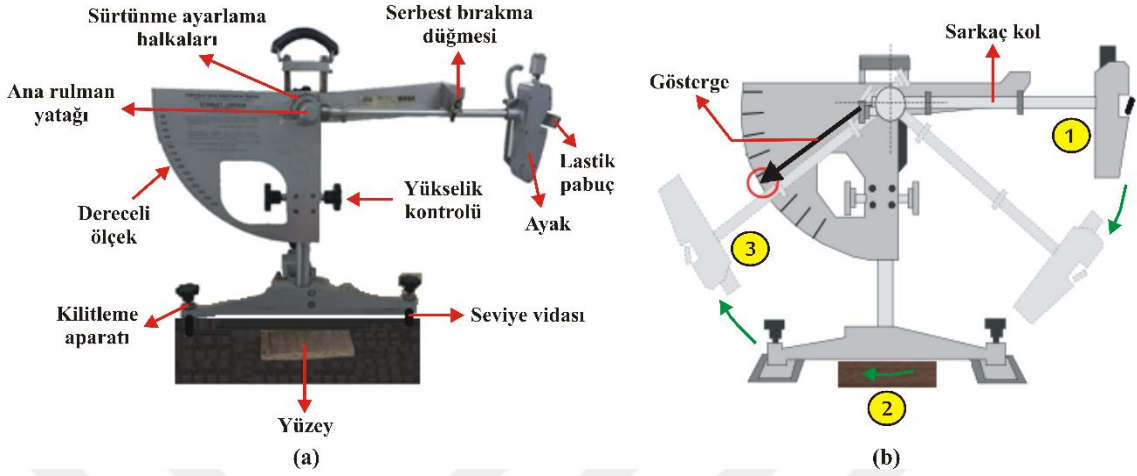
Şekil 5.6. Farklı sürtünme katsayısına sahip zeminler



Şekil 5.7. Gevşek zeminler

Yukarıda Şekil 5.6'da görülen farklı sürtünme katsayısına sahip düz zeminlerin sürtünme katsayıları İngiliz Ters Sarkaç (İTS) sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 5.8'de yüzey sürtünme katsayılarının belirlenmesinde kullanılan İTS sistemi görülmektedir. Şekil 5.8 (b)'deki şekil elde edilirken "<http://www.floorslip.co.uk/floor->

test-with-pendulum-tester.html” internet sitesinden faydalanılmış ve bu şekil tekrar düzenlenmiştir (Anonim, 2017).



Şekil 5.8. İngiliz Ters Sarkaç sistemi

Yukarıdaki Şekil 5.8’de görülen İTS sisteminde, yüzey sürtünmesi katsayısı belirlenecek zemin yukarıda da görüldüğü gibi yerleştirilir. Ters sarkaç sisteminin uç kısmında bulunan lastik pabuç belirli bir yükseklikte bulunmaktadır. Bundan dolayı da belirli bir potansiyel enerjiye sahiptir (Şekil 5.8 (b)’de 1 numara). Bu potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşebilmesi için pabuç’un bulunduğu hareketli sarkaç kol serbest bırakma düğmesi aracılığıyla serbest bırakılır. Sonuç olarak pabuç yüzeye belirli bir hızla değer ve salınır (Şekil 5.8 (b)’de 2 numara). İkinci kez yüzeye temas etmeden pabuç’un bulunduğu hareketli kol tutulur ve yüzeye tekrar değmesi engellenir. Bu arada pabuçla aynı yatay doğrultuda bulunan başka bir hareketli ibre de bulunmaktadır. Bu ibre yüzey sürtünme değerine bağlı olarak 0 – 150 arasında değişen bir değer göstermektedir (Şekil 5.8 (b)’de 3 numara). Böylece yüzey sürtünmesiyle ilişkili olarak sayısal İngiliz Ters Sarkaç Değeri (İTSD) elde edilmiş olur. Elde edilen İTSD’ye göre yüzeylerin kayma potansiyeli aşağıdaki Çizelge 5.1 dikkate alınarak belirlenmiştir (Strandberg, 1983).

Çizelge 5.1. yüzeylerin kayma direncinin kayma potansiyeline göre değişimi

Sınıfı	İTSD	Sürtünme Katsayısı (μ_f)	Kayma Potansiyeli (k_g)
Z	≤ 24	≤ 0.24	Çok yüksek
Y	25-34	0.25-0.34	Yüksek
X	35-44	0.36-0.46	Orta
W	45-54	0.47-0.59	Düşük
V	≥ 55	≥ 0.60	Çok düşük

Şekil 5.6'daki yüzeyler için elde edilen İTSD'ler aşağıda verilen Denklem 5.1'de verilen formülde yerine konularak her bir yüzeye ait Sürtünme Katsayısı (CoF) hesaplanmıştır. Bu CoF değeri BSI 96/104915 [B/208] İngiliz standardında belirtilmiştir.

$$\text{CoF} = \frac{3 \times \text{İTSD}}{330 - \text{İTSD}} \quad (5.1)$$

Yukarıda Şekil 5.6'da gösterilen farklı sürtünme katsayısına sahip zeminlerin her birinde İngiliz ters sarkaç deneyi 6'şar kez tekrarlanmıştır. Daha sonra elde edilen 6 adet İTSD'nin ortalaması alınmış ve yüzeylere ait en doğru İTSD elde edilmeye çalışılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 5.2'de MDR'nin denge testinde kullanılan yüzeylerle ilgili sürtünme katsayıları ve sürtünme potansiyelleri arasındaki ilişki ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.2. MDR'nin İTS yüzey test değeri ve sürtünme katsayıları

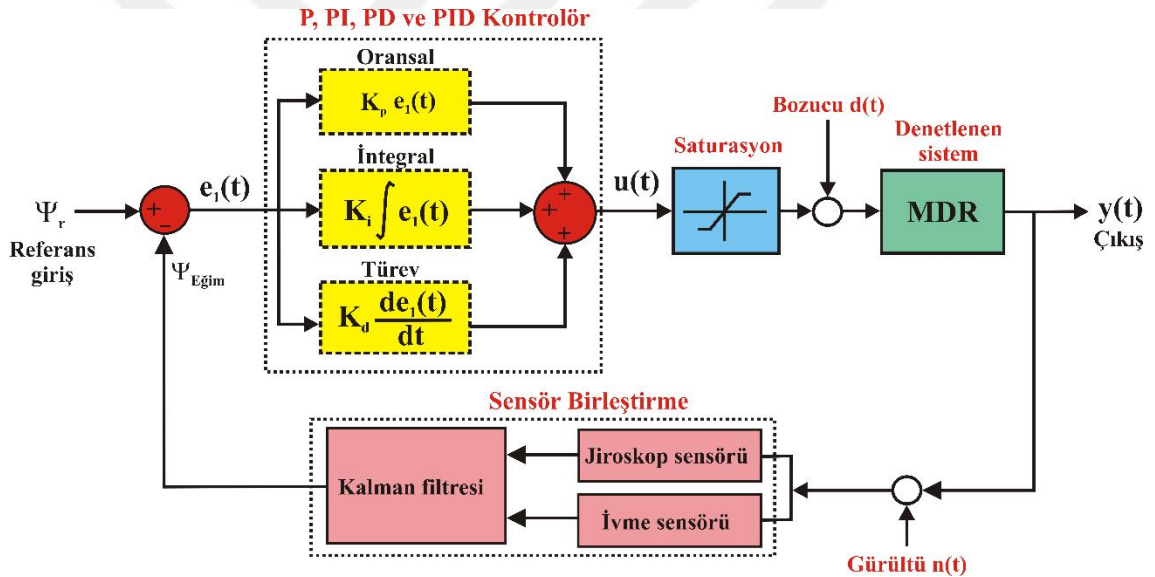
Zeminler	Yüzeylere ait testlerin İTSD'leri						Ort. İTSD	Sürtünme Katsayısı (μ_f)	Kayma Potansiyeli (k_s)
	1. Test	2. Test	3. Test	4. Test	5. Test	6. Test			
M1-laminant 1	24	22	22	22	22	22	22	0.217	Çok yüksek
M2-cam	35	35	34	35	34	35	35	0.351	Orta
M3-laminant 2	40	42	42	40	40	41	41	0.423	Orta
M4-halı 1	44	46	47	49	49	50	48	0.47-0.59	Düşük
M5-mermer	62	58	58	57	59	60	59	≥ 0.60	Çok düşük
M6-karton	63	64	64	65	64	66	64	≥ 0.60	Çok düşük
M7-halı 2	75	76	76	75	75	76	76	≥ 0.60	Çok düşük
M8-halı 3	97	100	96	95	96	95	97	≥ 0.60	Çok düşük

Burada, farklı sürtünme katsayısı değerlerine sahip zeminlerde bulunan MDR'nin yüzeye göre tepkisinin değişip değişmediği gözlemlenmiştir. Bu zeminlere ilaveten yukarıdaki Şekil 5.7'de verilen pürüzlü ve gevşek zeminlerdeki robotun tepkisi de gerçek zamanlı olarak incelenmiştir. MDR üzerinde uygulanan denge ve hareket kontrol algoritmaları aşağıda verilen bölümlerde ayrıntılı bir şekilde deneysel sonuçlarıyla verilmiştir.

5.1. Klasik P, PI, PD ve PID Kontrol

İlk olarak MDR sisteminde yukarıdaki Şekil 5.6'da verilen farklı sürtünme katsayısına sahip M1, M3 ve M8 zeminleri dikkate alınarak mevcut klasik denetleyici algoritmalarının robot üzerinde tepkisi gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Daha sonra

ise MDR sisteminde Şekil 5.7’de verilen gevşek zeminler olan toprak, çakıl ve kum zeminleri dikkate alınarak mevcut klasik denetleyici algoritmalarının robot üzerinde tepkisi gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Bu yüzeylerde yapılan test işleminin amacı robotun üzerinde uygulanan denge algoritmalarının yüzey sürtünme katsayısına, yüzey pürüzlülüğüne veya yüzey gevşekliğine göre değişimini incelemektir. Bu tez kapsamında yüzeylere göre denge algoritmalarının incelenmesinin sonucu olarak robotun bütün yüzeylerde daha kararlı bir şekilde dengesinin sağlanması için gerekli olan en uygun kontrol yapısının ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Sonuç olarak sınırlı alanlarda kullanılan denge robotunun otonom olarak farklı çevresel koşullarda görevlerini başarılı bir şekilde yerine getirmesi sağlanmış olacaktır. Robot üzerinde uygulanan klasik P, PI, PD ve PID denetleyici yapıları ilgili kontrol blok diyagramı aşağıdaki Şekil 5.9’deki gibi verilmiştir.



Şekil 5.9. P, PI, PD ve PID denetleyici blok diyagramları

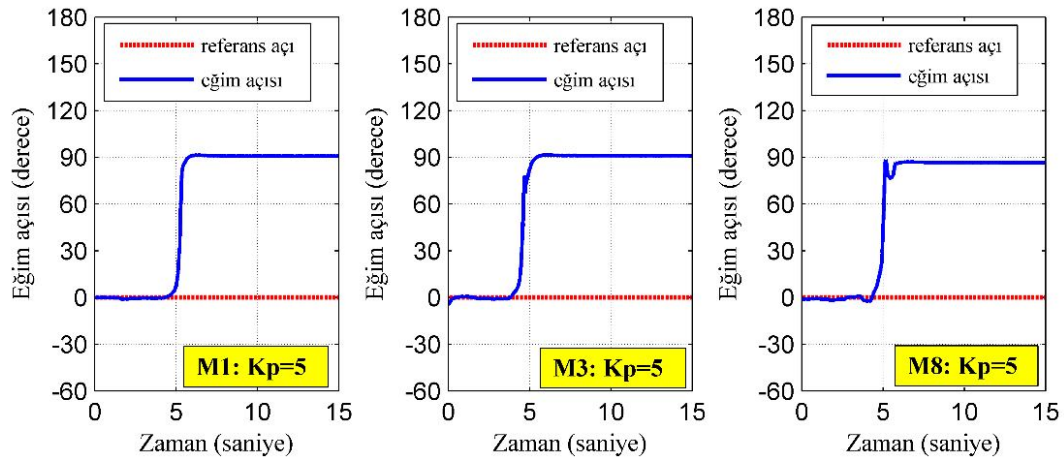
Şekil 5.9’da verilen kontrolör blok diyagramında referans giriş Ψ_r , hata $e_1(t)$, kontrolör çıkışı $u(t)$, sistemin çıkışı $y(t)$, bozucu etki $d(t)$ ve gürültü $n(t)$ ile sembolize edilmiştir.

5.1.1. Klasik Denge Kontrolü Uygulama Sonuçları

Tasarlanan MDR sistemi üzerinde uygulanan kontrol algoritmalarını yüzeye göre değişkenlik gösterdiğini anlayabilmek için farklı yüzey özelliklerine sahip zeminlerde testlerin yapılması gerekmektedir. Robot üzerinde gerçek zamanlı test yüzeyi olarak

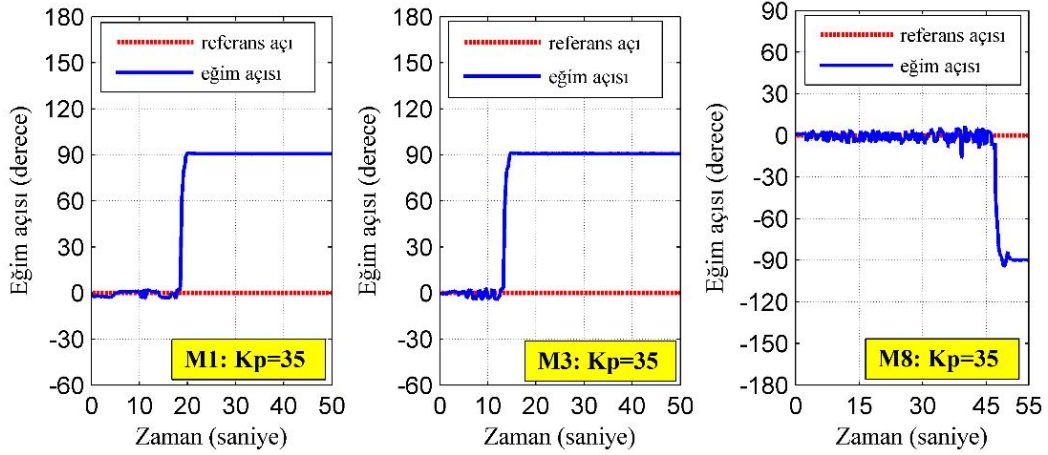
yukarıdaki Şekil 5.6’da verilen farklı sürtünme katsayısına sahip zemin olan M1, M3 ve M8 yüzeyleri dikkate alınmıştır. Bu zeminlerin seçilmesinin amacı kayma potansiyelinin çok yüksek, orta ve çok düşük zeminler olarak örneklendirilebilmesidir.

Tasarlanan MDR üzerinde ilk olarak, Şekil 5.9’da verilen blok diyagramlardan sadece oransal kazanç blok’u kullanılarak Oransal (P) denetleyici algoritması uygulanmıştır. Uygulanan oransal denetleyici, farklı oransal kazanç değerleri ($K_p = 5$, $K_p = 35$ ve $K_p = 65$) dikkate alınarak M1, M3 ve M8 zeminleri (Çizelge 5.2) üzerinde denenmiştir. Bu yüzeylerdeki deneme esnasında ise robotun eğim açısının zamana göre değişiminin tepkisi gerçek zamanlı olarak incelenmiştir. İlk olarak $K_p = 5$ değeri alınarak robotun 3 farklı yüzeydeki eğim açısının zamana göre değişimi incelenmiştir. Şekil 5.10’da 3 farklı yüzeydeki MDR’nin eğim açısının zamana göre değişimi görülmektedir.



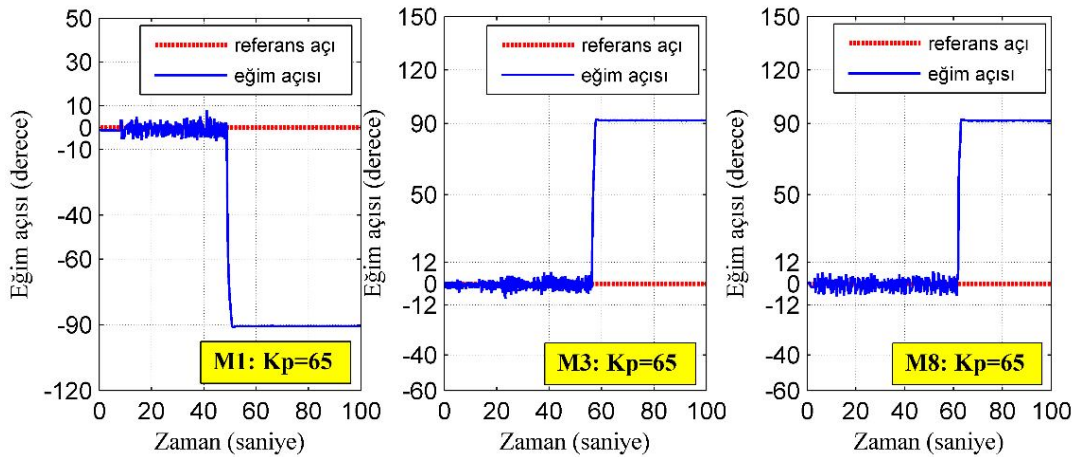
Şekil 5.10. MDR’nin M1, M3 ve M8 zeminler üzerindeki P tipi kontrolü ($K_p = 5$)

Şekil 5.10’daki grafik elde edilirken robot denge noktasında ($\Psi_r = 0$) tutulmuş ve daha sonra serbest bırakılmıştır. Yukarıdaki Şekil 5.10’da görüldüğü gibi MDR mevcut oransal denetleyici kazancı ile 3 farklı zemin üzerinde de dengede duramamaktadır. Daha sonra oransal denetleyici kazancı artırılarak $K_p = 35$ değeri alınmış ve robotun tepkisi incelenmiştir. Şekil 5.11’de elde edilen denetleyici tepkisi görülmektedir.



Şekil 5.11. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminler üzerindeki P tipi kontrolü ($K_p = 35$)

Şekil 5.11'deki grafik elde edilirken robot denge noktasında tutulmuş ve serbest bırakılmıştır. Aynı zamanda robota el ile bozucu etkilerde uygulanmıştır. Görüldüğü gibi sürtünme katsayısı en yüksek olan M8 zeminde robot dengesini çok uzun bir süre korumuştur. Fakat robotun P denetleyici ile denetimi gürbüz değildir. Sonuç itibarıyla bozucu etkilere dayanaksızdır ve her üç zeminde de bozucu etki sonucu MDR denge durumunu uzun süre sürdürememiştir. Son olarak da oransal denetleyici kazancı artırılarak $K_p = 65$ değeri alınmış ve robotun tepkisi incelenmiştir. Şekil 5.12'de elde edilen denetleyici tepkisi görülmektedir.

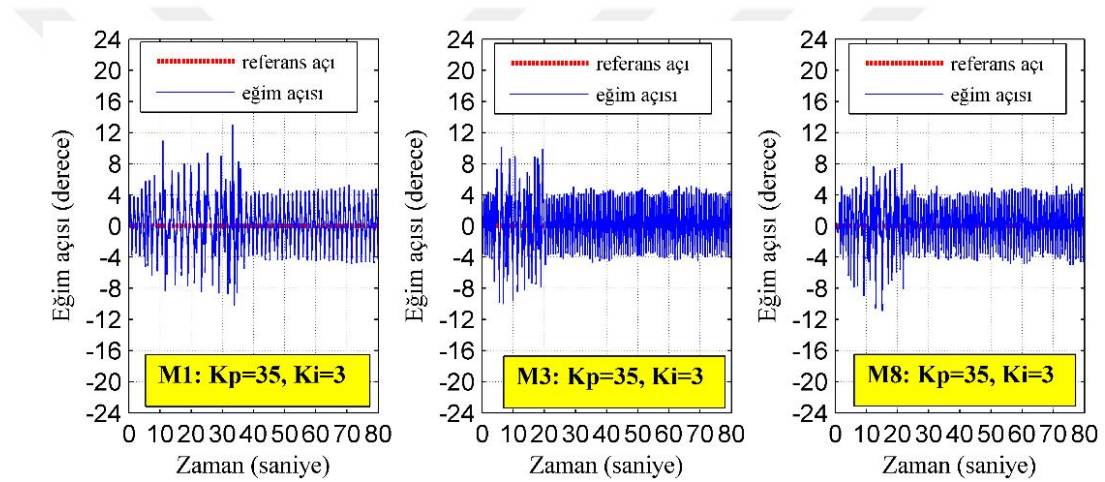


Şekil 5.12. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminler üzerindeki P tipi kontrolü ($K_p = 65$)

Yukarıdaki Şekil 5.12'de MDR'nin $K_p = 65$ için tepkisi görülmektedir. Bu grafik elde edilirken robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-55 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-50 saniye arasında ve

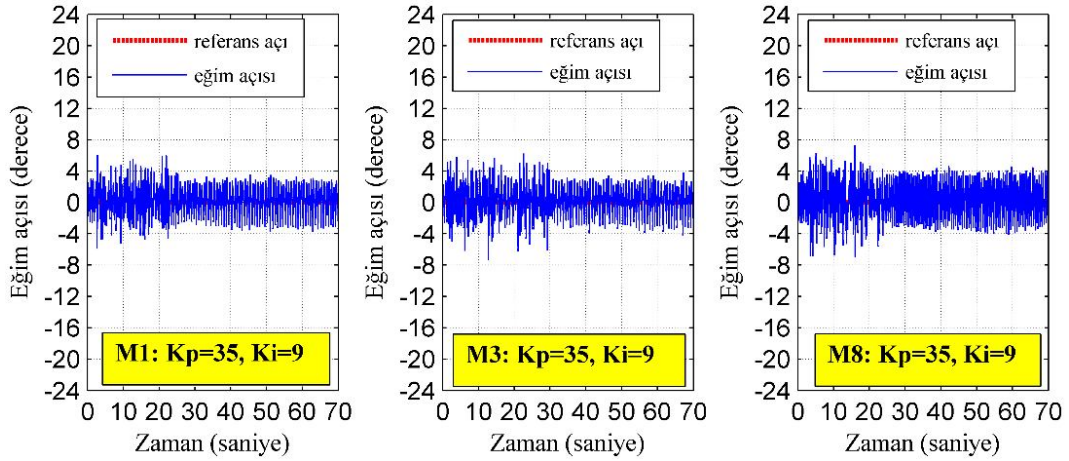
M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-60 saniye arasında sık sık bozucu etkiler uygulanmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi MDR mevcut oransal denetleyici kazancı ile bozucu etkilere karşı dayanıksızdır ve her üç yüzeyde de uzun süre dengede duramamıştır.

Aşırı bozucu etkilere karşı robotun daha hassas denge durumunu sağlamak için Şekil 5.9’da verilen blok diyagramlardan oransal ve integral kazanç blokları birlikte kullanılarak Oransal-İntegral (PI) denetleyici algoritması uygulanmıştır. Uygulanan bu PI denetleyici algoritması farklı oransal ve integral kazanç değerleri ($K_p = 35, K_i = 3$; $K_p = 35, K_i = 9$ ve $K_p = 35, K_i = 15$) dikkate alınarak her üç yüzeyde de ele alınmış ve robotun tepkisi incelenmiştir. İlk olarak $K_p = 35, K_i = 3$ denetleyici parametreleri alınarak robotun tepkisi incelenmiştir ve Şekil 5.13’deki grafik elde edilmiştir.



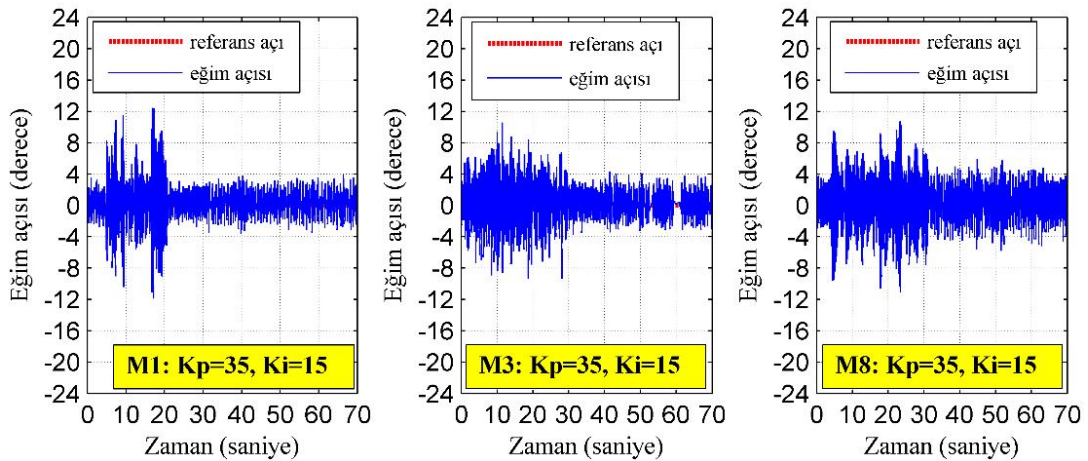
Şekil 5.13. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminlerdeki PI tipi kontrolü ($K_p = 35, K_i = 3$)

Yukarıdaki Şekil 5.13’de elde edilen grafikte robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-35 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-20 saniye arasında ve M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-20 saniye arasında sık sık bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.13’de de görüldüğü gibi MDR mevcut oransal denetleyici kazancı ile her üç yüzeyde de dengede durmaktadır. Oysa yukarıdaki Şekil 5.11’de aynı oransal denetleyici kazancı ile dengede duramamıştır. Çok az bir integral kazancı eklenince robot her üç yüzeyde de dengede kalabilmiştir. Fakat robotun eğim açısı değişim hızına bakıldığında sürtülmeli zeminlerde artmaktadır. Fakat bozucu etkilere karşı ise sürtülmeli zeminlerde robotun bozucu etkilere karşı direnci ise bir miktar artmaktadır. Daha sonra oransal denetleyici $K_p = 35$ değeri sabit tutulmuş ve $K_i = 9$ alınmıştır. Şekil 5.14’de elde edilen denetleyici tepkisi görülmektedir.



Şekil 5.14. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminlerdeki PI tipi kontrolü ($K_p = 35$, $K_i = 9$)

Yukarıdaki Şekil 5.14'de elde edilen grafikte robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-25 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-30 saniye arasında ve M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-25 saniye arasında sık sık bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.14'de de görüldüğü gibi MDR mevcut PI denetleyici kazançları her üç yüzeyde de dengede durmaktadır. Bir önceki PI denetleyicisine göre integral kazancının artması az da olsa eğim açısı değişiminde bir azalma meydana gelmiştir. Son olarak ise oransal denetleyici $K_p = 35$ değeri yine sabit tutulmuş ve $K_i = 15$ alınmıştır. Şekil 5.15'de elde edilen denetleyici tepkisi görülmektedir.

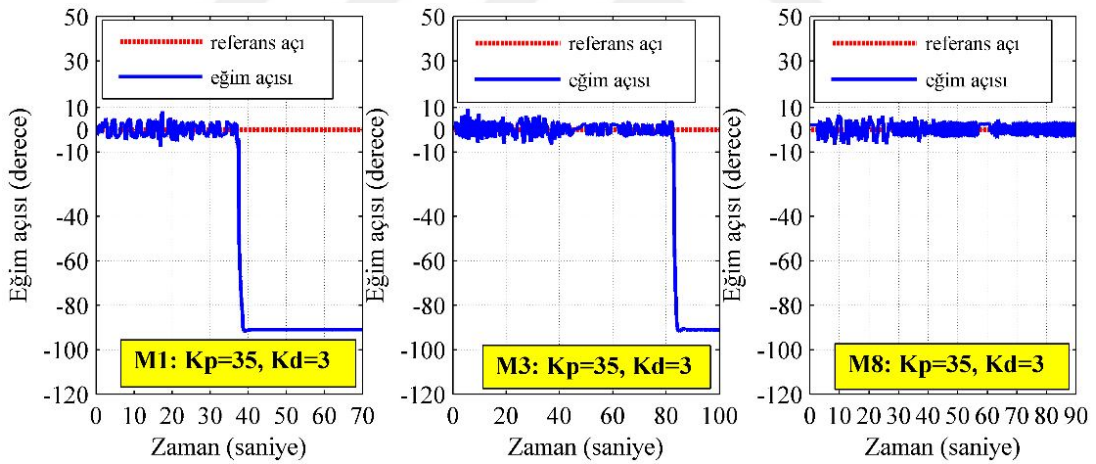


Şekil 5.15. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminlerdeki PI tipi kontrolü ($K_p = 35$, $K_i = 15$)

Yukarıdaki Şekil 5.15'de elde edilen grafikte robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-20 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken

yaklaşık olarak 0-30 saniye arasında ve M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-30 saniye arasında sık sık bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.15’de de görüldüğü gibi MDR mevcut PI denetleyici kazançları her üç yüzeyde de dengede durmaktadır. Bir önceki PI denetleyicisine göre M1 ve M3 yüzeylerinde integral kazancının artması ile az da olsa eğim açısı değişiminde bir azalma meydana gelmiştir. Fakat M8 yüzeyinde bir miktar eğim açısında artma meydana getirmiştir.

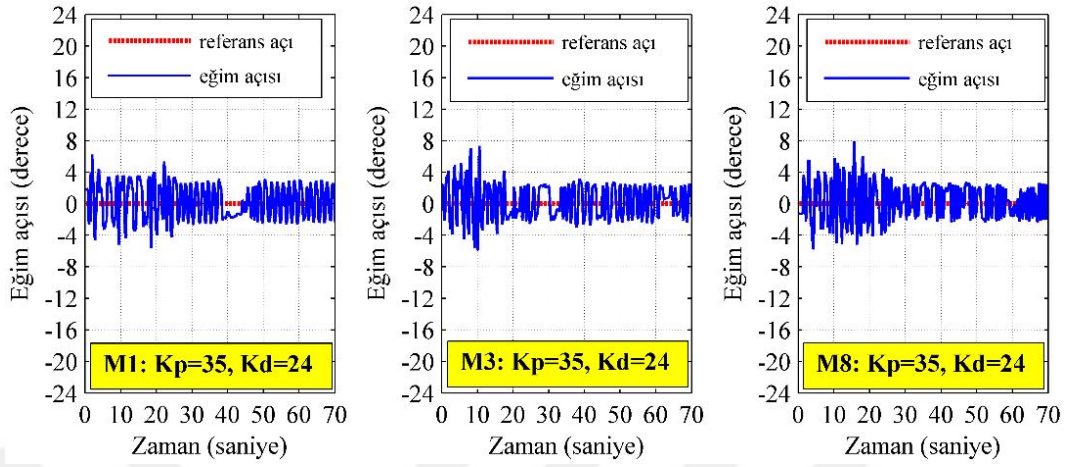
Yukarıdaki P ve PI denetleyicilere ilave olarak robotun daha hassas denge durumunu sağlamak için Şekil 5.16’da verilen blok diyagramlardan oransal ve türev kazanç blokları birlikte kullanılarak Oransal-Türev (PD) denetleyici algoritması uygulanmıştır. Ele alınan bu Oransal-Türev (PD) denetleyici algoritması farklı oransal ve türev kazanç değerleri ($K_p = 35, K_d = 3$; $K_p = 35, K_d = 6$ ve $K_p = 35, K_d = 9$) dikkate alınarak her üç yüzeyde de ele alınmış ve robotun tepkisi incelenmiştir. İlk olarak $K_p = 35, K_d = 3$ denetleyici parametreleri alınarak robotun tepkisi incelenmiştir ve Şekil 5.16’daki grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.16. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminlerdeki PD tipi kontrolü ($K_p = 35, K_d = 3$)

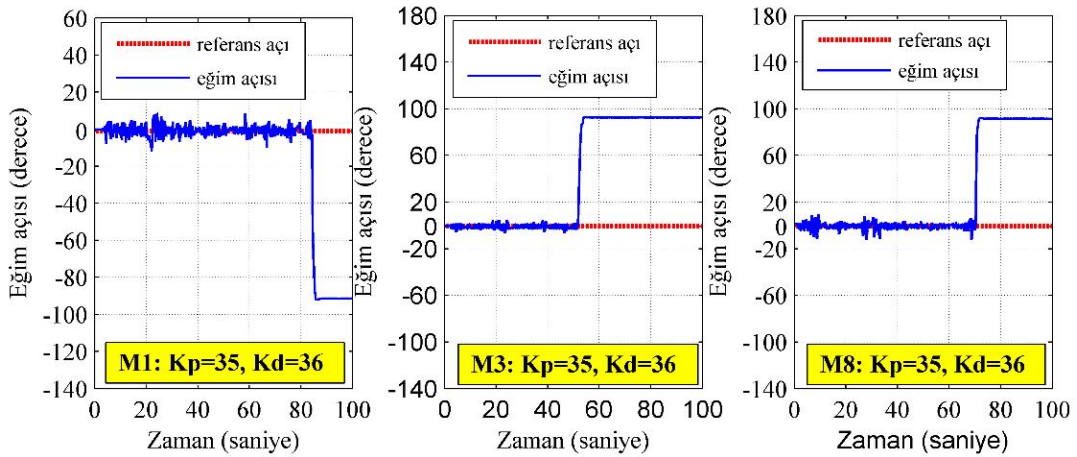
Yukarıdaki Şekil 5.16’da elde edilen grafikte robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-20 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-30 saniye arasında ve M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-30 saniye arasında sık sık bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.16’da da görüldüğü gibi MDR mevcut PD denetleyici kazancı ile M1 ve M3 yüzeyinde dengede duramamaktadır fakat M8 yüzeyinde denge durumunu sürdürmektedir fakat robot gürbüz bir şekilde dengede duramamaktadır. Daha sonra $K_p = 35, K_d = 24$ denetleyici

parametreleri alınarak robotun tepkisi incelenmiştir ve Şekil 5.17'deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.17. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminlerdeki PD tipi kontrolü ($K_p = 35$, $K_d = 24$)

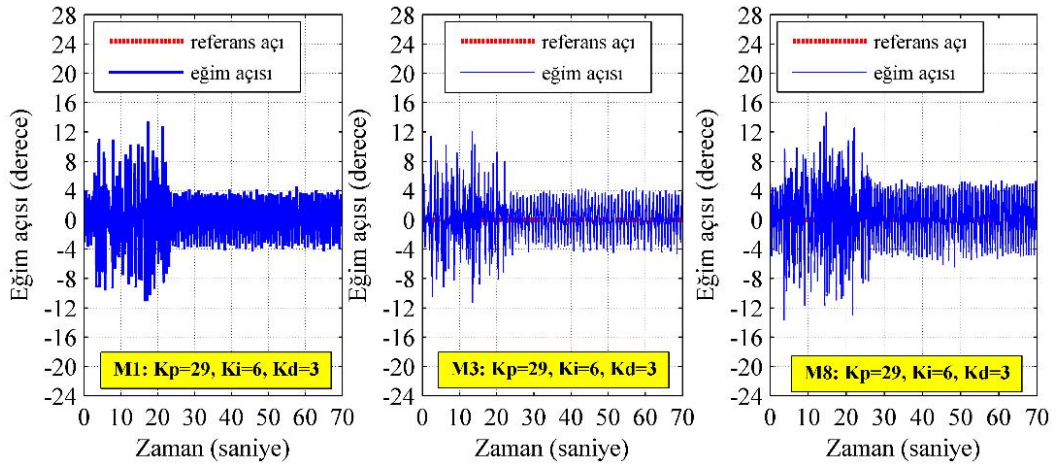
Yukarıdaki Şekil 5.17'de elde edilen grafikte robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-25 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-10 saniye arasında ve M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-20 saniye arasında sık sık bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.17'de de görüldüğü gibi MDR mevcut PD denetleyici kazançları her üç yüzeyde de dengede durmaktadır. Bir önceki PD denetleyicisine göre türev kazancının artması az da olsa eğim açısı değişiminde bir azalma meydana gelmiştir. Son olarak ise oransal denetleyici kazancı $K_p = 35$ değeri yine sabit tutularak $K_d = 24$ parametresi alınarak robotun tepkisi incelenmiştir ve Şekil 5.18'deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.18. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminlerdeki PD tipi kontrolü ($K_p = 35$, $K_d = 36$)

Yukarıdaki Şekil 5.18’de elde edilen grafikte robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-30 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-25 saniye arasında ve M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-30 saniye arasında sık sık bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.18’de de görüldüğü gibi MDR mevcut PD denetleyici kazançları her üç yüzeyde de dengede duramamaktadır.

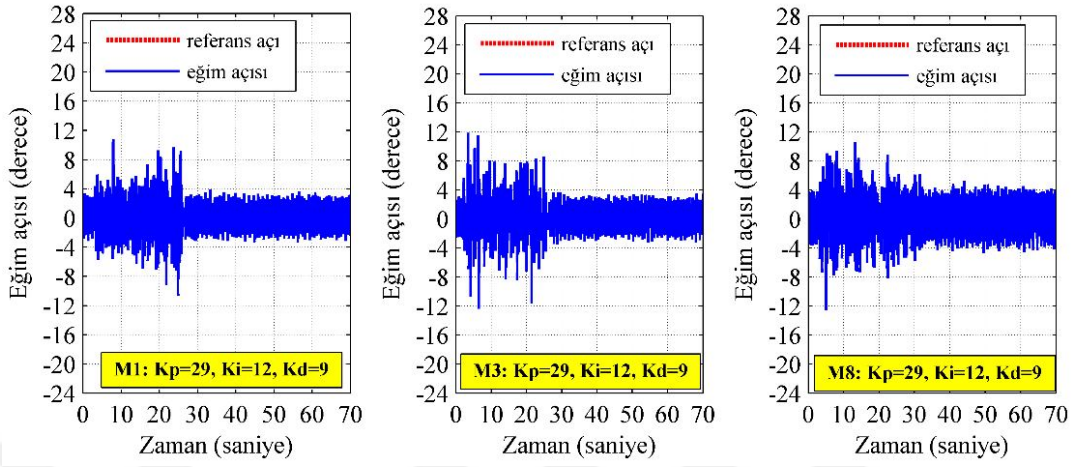
Son olarak ise robotun üzerinde Şekil 5.9’da verilen blok diyagramlardan oransal-integral-türev kazanç blokları birlikte kullanılarak Oransal-İntegral-Türev (PID) denetleyici algoritması uygulanmıştır. PID denetleyici algoritması farklı oransal, integral ve türev kazanç değerleri ($K_p = 29, K_i = 6, K_d = 3$; $K_p = 29, K_i = 12, K_d = 9$ ve $K_p = 29, K_i = 18$ ve $K_d = 15$) dikkate alınmıştır. Bu denetleyici parametreleri her üç yüzeyde de ele alınmış ve robotun tepkisi incelenmiştir. İlk olarak $K_p = 29, K_i = 6$ ve $K_d = 3$ denetleyici parametreleri alınarak robotun tepkisi incelenmiştir ve Şekil 5.19’daki grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.19. MDR’nin M1, M3 ve M8 zeminlerde PID kontrolü ($K_p = 29, K_i = 6$ ve $K_d = 3$)

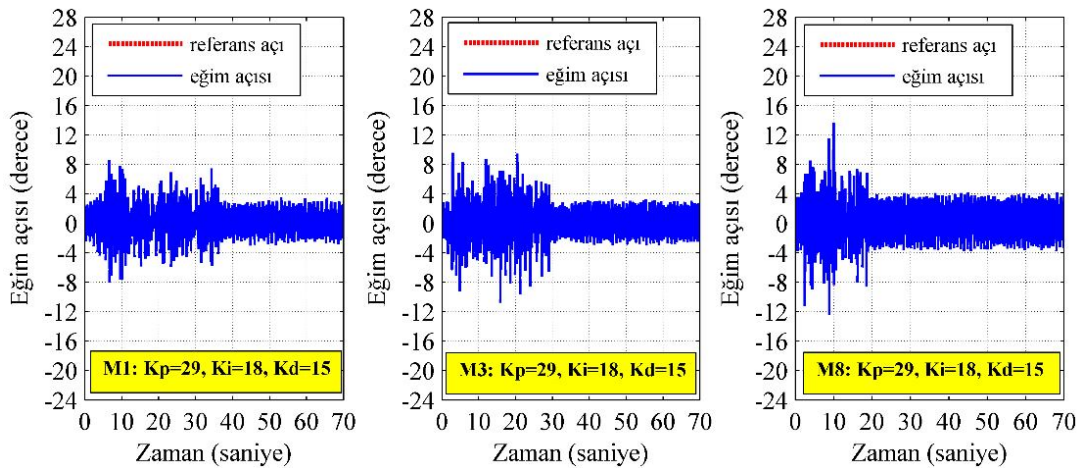
Yukarıdaki Şekil 5.19’da elde edilen grafikte robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-25 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-20 saniye arasında ve M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-25 saniye arasında sık sık bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.19’da da görüldüğü gibi MDR mevcut PID denetleyici kazançları her üç yüzeyde de dengede durmaktadır fakat sürtünme katsayısı yüksek olan M8 zemininde robotun denge performansı iyi değildir. Daha sonra $K_p = 29, K_i = 12$ ve $K_d = 9$ denetleyici

parametreleri alınarak robotun tepkisi incelenmiştir ve Şekil 5.20'deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.20. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminlerde PID kontrolü ($K_p = 29$, $K_i = 12$ ve $K_d = 9$)

Yukarıdaki Şekil 5.20'de elde edilen grafikte robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-25 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-25 saniye arasında ve M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-30 saniye arasında sık sık bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.20'den de görüldüğü gibi MDR mevcut PID denetleyici kazançları her üç yüzeyde de dengede durmaktadır fakat sürtünme katsayısı yüksek olan M8 zemininde robotun denge performansı iyi değildir. Son olarak ise, $K_p = 29$, $K_i = 12$ ve $K_d = 9$ denetleyici parametreleri alınarak robotun tepkisi incelenmiştir ve Şekil 5.21'deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.21. MDR'nin M1, M3 ve M8 zeminlerde PID kontrolü ($K_p = 29$, $K_i = 18$ ve $K_d = 15$)

Yukarıdaki Şekil 5.21’de elde edilen grafikte robota belirli bozucu etkiler uygulanmıştır. Robot M1 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-35 saniye arasında, M3 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-30 saniye arasında ve M8 yüzeyinde iken yaklaşık olarak 0-20 saniye arasında sık sık bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.21’den de görüldüğü gibi MDR mevcut PID denetleyici kazançları her üç yüzeyde de dengede durmaktadır fakat sürtünme katsayısı yüksek olan M8 zemininde robotun denge performansı yine iyi değildir.

Yukarıdaki 3 yüzey için ele alınan P, PI, PD ve PID tipi denetleyiciler dikkate alındığında robotun bulunduğu yüzey değişkeninin denge performansını etkilediği açıkça görülmektedir. MDR sisteminin dengesi, mutlak eğim açısı hatasının toplamı (Integral Absolute Error-IAE) kontrol performansı kriteri açısından değerlendirildiğinde bu durum daha da net anlaşılabilir. Yukarıda ele alınan denetleyici parametrelerinde dengede kalabilen (bozucu etki olmaksızın 50-60 saniye arasındaki kararlı durumlar için) MDR için IAE kontrol performansları karşılaştırılmıştır. IAE kontrol performansı Denklem 5.2 ile hesaplanmıştır.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (5.2)$$

Bu denklemdeki $e(t)$, referans eğim açısı ve sensörden elde edilen eğim açısı arasındaki farktır. Denge robotu sisteminde 50-60 saniye arasında $N = 1000$ örnekleme verisi alındığı için Denklem 5.2’deki genel formda verilen ifade sonlu bir değere tekabül etmektedir. Çizelge 5.3’de MDR’nin kararlı denge durumu için elde edilen IAE değerleri yaklaşık olarak verilmiştir.

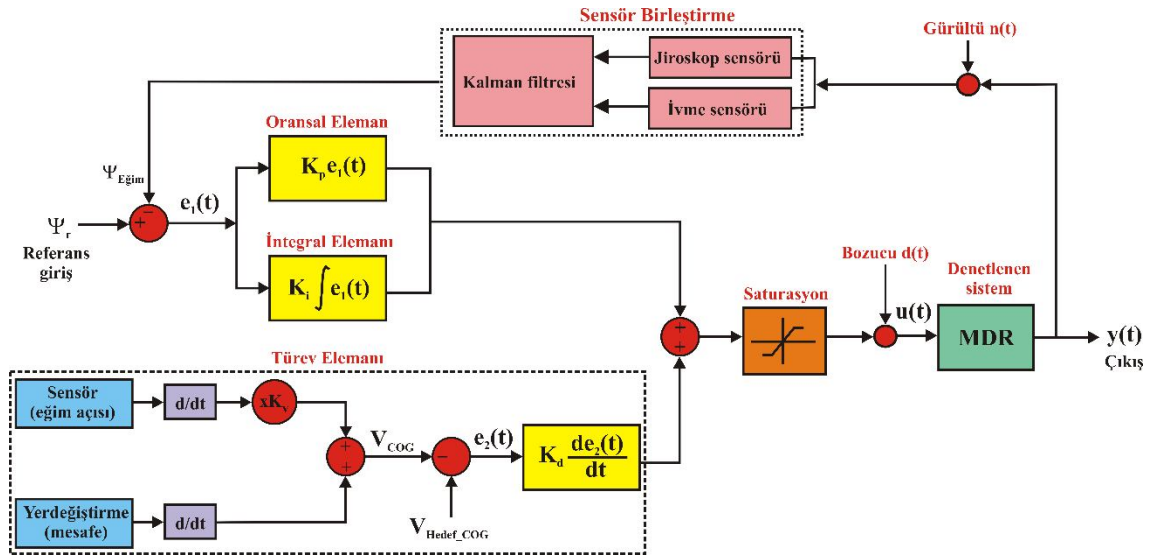
Çizelge 5.3. MDR’nun denetleyici parametrelerine bağlı IAE kontrol performansları

Denetleyici Parametreleri	Yüzeyler ve IAE Kontrol Performansları		
	M1: IAE	M3: IAE	M8: IAE
$K_p=5$	MDR kararsız	MDR kararsız	MDR kararsız
$K_p=35$	MDR kararsız	MDR kararsız	MDR kararsız
$K_p=65$	MDR kararsız	MDR kararsız	MDR kararsız
$K_p=35, K_i=3$	1658	1865	1897
$K_p=35, K_i=9$	1255	1241	1765
$K_p=35, K_i=15$	1266	1182	1899
$K_p=35, K_d=3$	MDR kararsız	MDR kararsız	2247
$K_p=35, K_d=24$	1902	1677	1392
$K_p=35, K_d=36$	MDR kararsız	MDR kararsız	MDR kararsız
$K_p=29, K_i=6, K_d=3$	1687	1597	2358
$K_p=29, K_i=12, K_d=9$	1548	1563	2194
$K_p=29, K_i=18, K_d=15$	1345	1489	1881

Çizelge 5.3'te görüldüğü gibi 3 farklı yüzeyde robotun IAE kriterine göre denge performansı değerlendirildiğinde farklı denetleyici katsayılarında en iyi denge performansları elde edilmiştir. Burada, sadece belli katsayılara sahip denetleyici parametreler alınarak MDR'nin denge performans testleri yapılmıştır. Sonuç olarak robotun bulunduğu yüzeye göre en uygun denetleyici parametresinin ayarlanması gerekmektedir. Bu tezde, bu önemli temel nokta dikkate alınarak yüzeylere göre denetleyici parametresini değiştirebilen MDR için YSA tabanlı AAK tasarlanmıştır. Denge robotunun bulunduğu yüzeyler ise daha da zorlaştırılarak toprak, çakıl ve kum gibi gevşek zeminlerde MDR'nin denge performans testleri gerçekleştirilmiştir. İlerleyen bölümlerde geliştirilen bu YSA tabanlı AAK yapısı ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

5.2. PI-V Kontrol

Klasik PID denetleyici algoritmasında bulunan türev bozucu etkilerden çabuk etkilendiği için robot sisteminin kontrolündeki etkinliği oldukça sınırlıdır. Bundan dolayı türevin etkisini artırmak ve en iyi denge durumunu elde etmek için yeni bir PI-V denetleyici yapısı geliştirilmiştir. Robot için geliştirilen PI-V denetleyici yapısı Şekil 5.22'de görülmektedir.



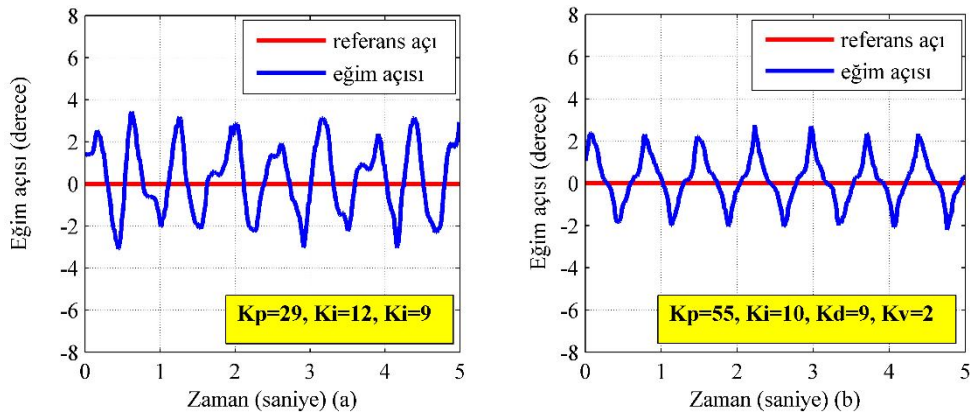
Şekil 5.22. PI-V denetleyici yapısı

Şekil 5.22'de görüldüğü gibi denetleyicide bulunan türev parametresini etkin bir şekilde kullanabilmek için sensörden ve enkoderden gelen bilgiler değerlendirilmiştir. Denge

sensörden gelen bilgiye göre robotun ağırlık merkezinden ayrılma açısal hızı ile enkoder bilgisinden gelen bilgiye göre robotun yerdeğiştirme hızı karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yapılırken sensörden gelen bilgi K_v gibi bir kazanç ile çarpılarak enkoder bilgisinden gelen yerdeğiştirme hız bilgisi arasında bir ilişki elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler ışığında robotun mevcut ağırlık merkezi durumu ile olması gereken hedef ağırlık merkezi arasındaki fark alınarak bir hata değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu hata değeri ile türevin sönümlenme etkisi daha etkin bir şekilde kullanılmıştır.

5.2.1. PI-V Denge Kontrolü Uygulama Sonuçları

Robot sistemi üzerinde PID ve PI-V denetleyici yapılarının her ikisi de gerçek zamanlı olarak M3 zemini üzerinde uygulanmıştır. Böylece tasarlanan PI-V kontrol algoritması ile klasik kontrol algoritması arasındaki performans değerlendirmesi rahatlıkla yapılabilmektedir. İlk olarak M3 zemini üzerindeki MDR için en uygun PID denetleyici parametreleri deneysel olarak $K_p = 29$, $K_i = 12$, $K_d = 9$ olacak şekilde elde edilmiştir. Daha sonra aynı M3 zemini üzerinde en uygun PI-V denetleyici parametreleri $K_p = 55$, $K_i = 10$, $K_d = 9$, $K_v = 2$ olacak şekilde elde edilmiştir. Şekil 5.23 (a)'da ve 5.23 (b)'de sırasıyla robotun en uygun denetleyici parametrelerinde robotun eğim açısı değişiminin zamana değişimi görülmektedir.



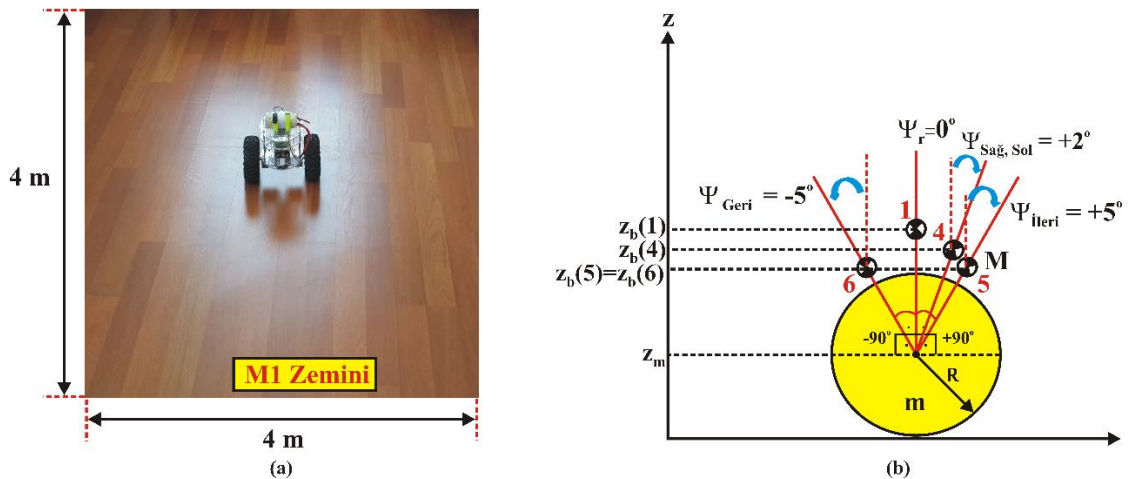
Şekil 5.23 a-) PID denetleyici tepkisi b-) PI-V denetleyici tepkisi

Şekil 5.23 (b) incelendiğinde robotun PI-V denetleyicideki eğim açısı yaklaşık olarak -2° ile $+2^\circ$ arasında değişmektedir. Şekil 5.23 (a)'da ise, PID denetleyicideki eğim açısı -4° ile $+4^\circ$ arasında değişmektedir. Bu veriler ışığında robotun PI-V denetleyicideki eğim

açısı değişiminin PID denetleyicideki eğim açısı değişiminden daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Fakat buradaki en önemli problem PID denetleyicideki 3 adet bilinmeyen denetleyici parametresi olmasına rağmen PI-V denetleyicideki bilinmeyen denetleyici parametresinin 4 adet olmasıdır. Bundan dolayı da MDR sistemine ait en uygun PI-V denetleyici parametrelerinin bulunması zorlaşmaktadır. Aynı zamanda PI-V denetleyicinin olumsuz yanından biri de, denetlenen sistem için en uygun denetleyici parametresinin bulunması için herhangi bir yöntemin olmamasıdır. Oysa PID denetleyici parametrelerinin bulunmasında Ziegler Nichols gibi bilim adamlarının geliştirdiği yöntemlerden yararlanılarak kısa bir süre içerisinde sisteme ait denetleyici parametreleri bulunabilmektedir.

5.3. Mobil Denge Robotu İleri-Geri Hareket Kontrolü

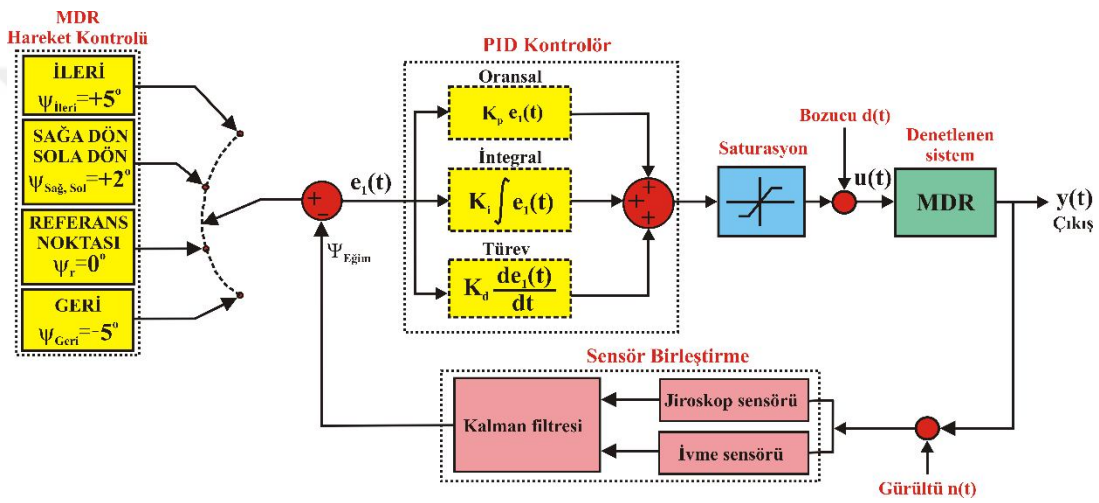
Bu bölümde denge robotu sistemi üzerinde yapmış olduğumuz pratik çalışmalar sonucunda robotun ileri-geri gitmesi, sağa-sola dönebilmesi için gerekli olan robot kontrol algoritmaları çıkarılmıştır. Daha sonra geliştirilen hareket denetim algoritmaları robot üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Robotun hareket denetimi M3 zemininden oluşan $4 \times 4 \text{ m}^2$ 'lik kare bir alanda gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.24 (a)'da robotun hareket denetiminin gerçekleştirildiği bu alan görülmektedir. Şekil 24 (b)'de ise, MDR'nin hareket koordinat sisteminin yandan görünüşü verilmiştir.



Şekil 5.24. MDR'nin hareket a-) denetimi alanı b-) koordinat sisteminin yandan görünüşü

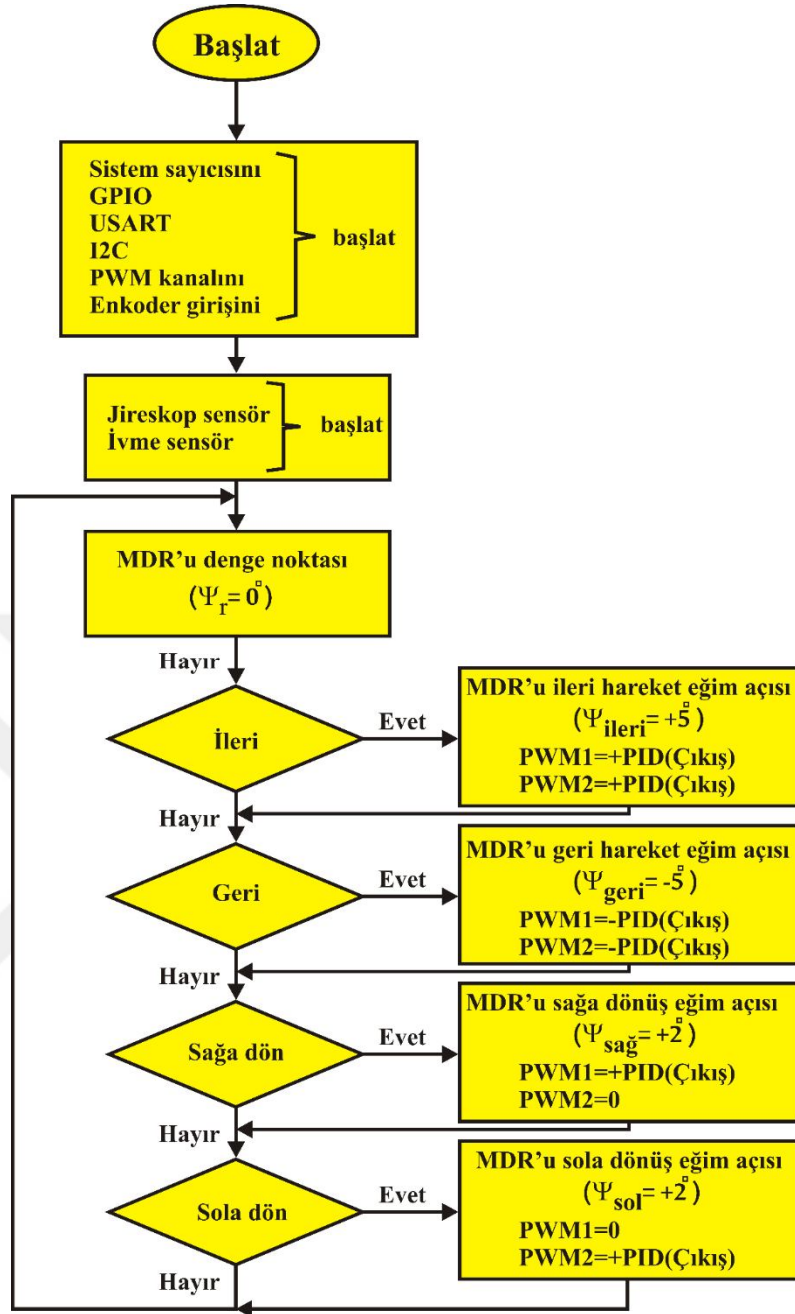
$z_b(1)$, $z_b(4)$, $z_b(5)$ ve $z_b(6)$ robotun hareket denetimine ilişkin dinamik olan ağırlık merkezinin z koordinatındaki sayısal değerini ifade etmektedir. z_m ise robotun tekerinin

ağırlık merkezinin z koordinatındaki sayısal değeridir. Şekil 5.24 (b)'de görüldüğü gibi, robotun M1 zemini üzerinde optimum bir hızla ileri gidebilmesi için denge noktasından +5 derece öne doğru eğilmesi ve her iki tekerinde ileri yönde dönmesi gerekmektedir. Robotun optimum bir hızda geriye doğru gidebilmesi için ise; denge noktasından -5 derece geriye doğru eğilmesi ve her iki tekerin de geri yönde dönmesi gerekmektedir. Robotun sağa ve sola uygun bir şekilde çok fazla sarsılmadan dönebilmesi için ise, robotun öne doğru +2 derece eğilmesi gerekmekte ve dönmesi istenen yöne göre bir teker ileri hareket etmekte diğer tekerin ise hareketsiz kalması gerekmektedir. Şekil 5.25'de MDR'nin hareket denetimine ilişkin hareket kontrolü blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.25. Robotun hareket kontrol blok diyagramı

Şekil 5.25'de de görüldüğü gibi robotun ileriye veya geriye doğru hareket edebilmesi, sağa veya sola dönebilmesi için referans açı değerinin dinamik olması gerekmektedir. Burada, $\Psi_{Eğim}$ sensör birleştirme algoritması vasıtasıyla elde edilen ölçülen gerçek eğim açısı değerini, $r(t)$ robotun hareketini sağlamak için gerekli olan dinamik referans değerini, $u(t)$ kontrol sinyalini ve $e(t)$ dinamik referans giriş ve gerçek eğim açısı arasındaki hatayı ($r(t) - \Psi_{Eğim}$) temsil etmektedir. Robotun hareketi, bilgisayarda çalışan robot kontrol arayüzü ve yön tuşları ile uzaktan kontrol edilmiştir. Robotun seyrüseferi, durağan denge durumu ve hareketli durumlar dikkate alınarak elde edilmiştir. Robotun hareket kontrolü ile ilgili kontrol akış diyagramı Şekil 5.26'da verilmiştir.

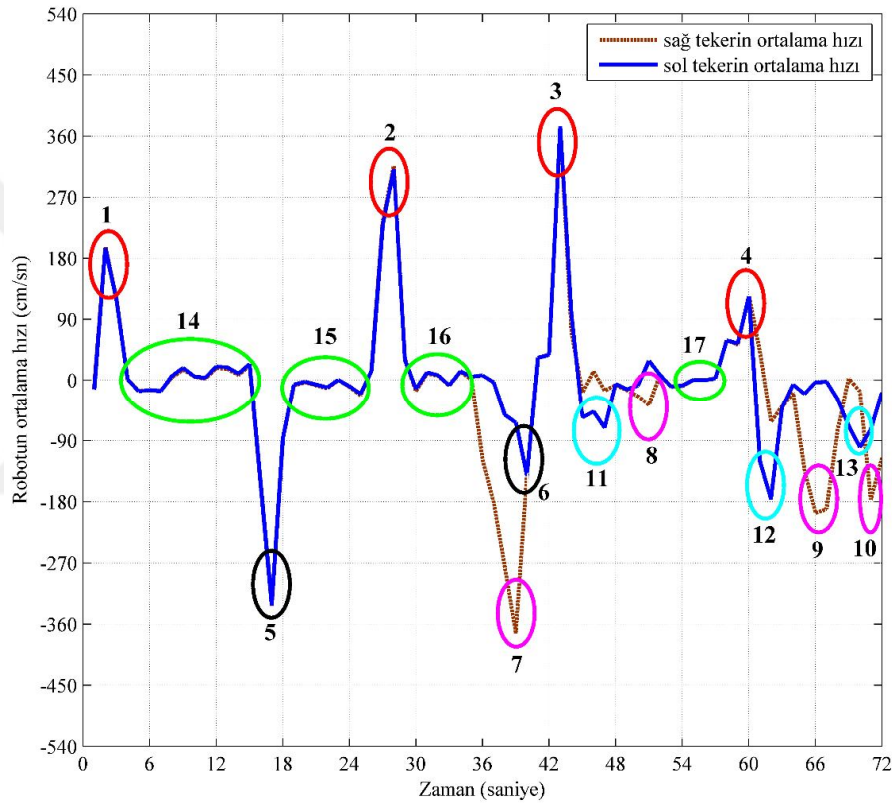


Şekil 5.26. Robotun hareket kontrol algoritmasının akış diyagramı

5.3.1. Hareket Kontrolü Uygulama Sonuçları

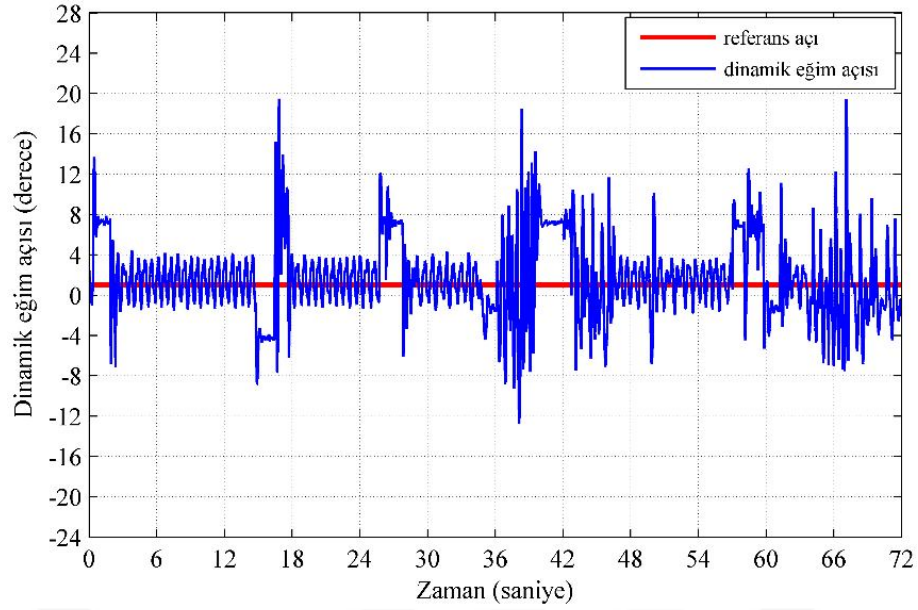
Robotun denge ve hareket denetiminde $K_p = 29$, $K_i = 12$ ve $K_d = 9$ olan sabit PID kontrolör parametreleri kullanılmıştır. MDR'nin hareket denetimi esnasında elde edilen hız değişimi, dinamik eğim açısı değişimi ve kontrolör çıkışı değişimi ile ilgili grafikler gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir. Robotun durağan denge durumunda ve hareketli iken elde edilen sağ ve sol tekerlere ait hız değişimlerinin grafiği Şekil 5.27'de

görülmektedir. Aşağıda verilen bu grafikte robotun sağ ve sol tekeri ait hızlarının zamanla değişimi, robotun hareket kontrol akış diyagramını da göz önünde bulundurularak ayrıntılı olarak incelendiği zaman robotun ne tür bir hareket yaptığı kolaylıkla anlaşılabilir. Robotun ne tür bir hareket yaptığının daha iyi anlaşılabilmesi için grafikte bazı yerler daire içerisine alınarak numaralandırılmıştır. Robot, (1, 2, 3, 4) nolu yerlerde ileriye doğru, (5, 6) nolu yerlerde geriye doğru hareket etmiştir. Robot, (7, 8, 9, 10) nolu yerlerde ise sağ tarafa, (11, 12, 13) nolu yerlerde sol tarafa doğru dönmüştür. Robot, (14, 15, 16) nolu yerlerde ise durağan durumda dengesini sürdürmektedir.



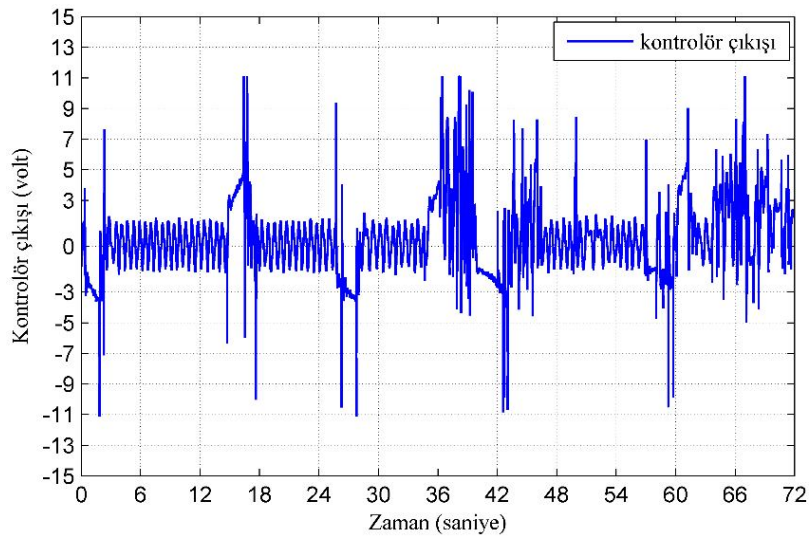
Şekil 5.27. MDR'nin hareket kontrolü

Robotun hareketli durumda iken, dinamik olarak değişen eğim açısının zamana göre değişimi Şekil 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.28. MDR'nin dinamik eğim açısı

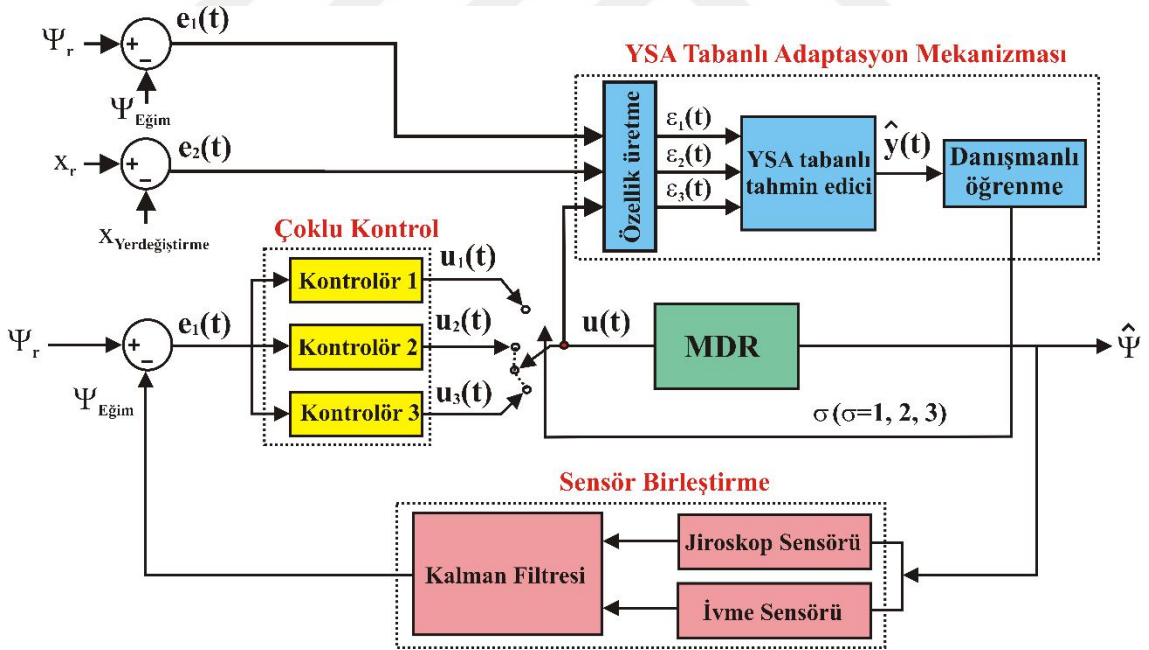
Şekil 28'e göre, robotun hareketli durumda iken dinamik olan eğim açısı yaklaşık olarak -14° ile $+20^\circ$ arasında değişmektedir. Robotun durağan durumundaki eğim açısı ise yaklaşık olarak -4° ile $+4^\circ$ arasında değişmektedir. Şekil 5.28'den de görüldüğü gibi robotun arzu edilen hareketleri yapabilmesi için dinamik referans giriş eğim açısının etkisiyle sensörden elde edilen gerçek eğim açısı oldukça değişkenlik göstermektedir. Eğim açısı değişimindeki bu büyük artış ve azalışın bir sonucu olarak da robotun kontrol çıkış sinyali de zaman göre değişkenlik göstermektedir. Şekil 5.29'da robotun hareket denetimi esnasındaki elde edilen kontrolör çıkış sinyali görülmektedir.



Şekil 5.29. MDR'nun kontrolör çıkışı

5.4. Farklı Zeminlere Uyum Sağlayabilen Anahtarlama Adaptif Kontrol

Denge robotu sisteminin iki teker üzerinde bütün zeminlerde daha gürbüz bir şekilde denge durumunu sürdürebilmesi ve istenilen davranışı sergilemesi oldukça zordur. Denge robotunun farklı zeminlere uyum sorununun aşılabilmesi ve sistemin bütün zeminlerdeki davranışının daha kararlı olabilmesi için dinamik bir adaptif denetleyici tasarımının yapılması gerekmektedir. Çünkü denge robotu sisteminin farklı zeminlerdeki kararlı denge durumu için elde edilen pratik denetleyici parametreleri oldukça farklılık göstermektedir. Bu çalışmada robotun tüm zeminlere otomatik olarak uyum sağlayabilmesi için YSA tabanlı Anahtarlama Adaptif Kontrol (AAK) yapısı önerilmiştir. Çünkü denetlenen model parametresinin büyük ve hızlı değişimlerinde klasik adaptif kontrol yapıları adaptasyon geçişlerine genelde iyi sonuç vermemektedir. Adaptasyon geçişlerinin performansını artırmak için “Anahtarlama Adaptif Kontrolü” nün kullanımı oldukça cazip sonuçlar sunmaktadır (Landau ve ark., 2011). Şekil 5.30’da önerilen YSA tabanlı AAK yapısı ayrıntılı olarak görülmektedir.



Şekil 5.30. MDR'nin YSA tabanlı AAK blok diyagramı

Tasarlanan denetleyici yapısındaki integralin aşırı doyuma neden olması, robot sisteminde kullanılan DC motorlardaki diş boşlukları ve sürtünmelerden kaynaklı ölü bant gereksinimi gibi sistemin kendine ait iç bozucularına karşı dayanıklı bir denetleyici

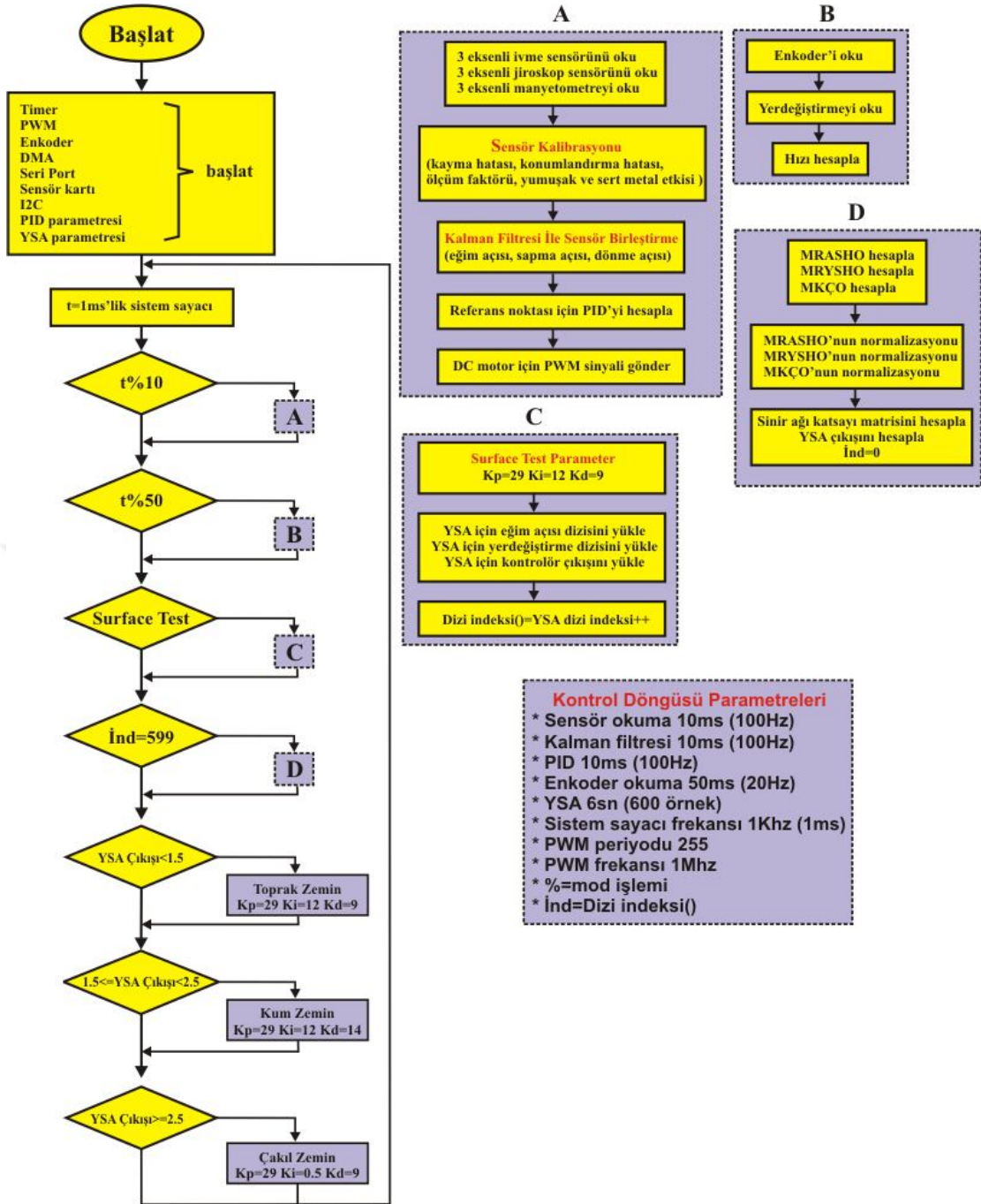
algoritması tasarlanmış ve uygulanmıştır. Robot kontrolünde kullanılan adaptif PID denetleyici yapısına ait kontrol işaret sinyali denklem 5.3’de görülmektedir.

$$u_{\sigma}(t) = K_{p_{\sigma}}e(t) + K_{i_{\sigma}} \int e(\tau)d\tau + K_{d_{\sigma}} \frac{de(t)}{dt}, \quad (\sigma = 1, 2, 3) \quad (5.3)$$

Yukarıdaki denklem 5.3’deki $u_{\sigma}(t)$, farklı yüzeyler için elde edilen kontrol sinyalini temsil etmektedir. Bu denklemde yer alan σ , MDR’nun bulunduğu farklı yüzeylere göre uygun denetleyici parametrelerini anahtarlama yarayan bir fonksiyondur. Bu anahtarlama fonksiyonu YSA tabanlı bir tahmin edicinin çıkışına göre anahtarlama işlevini yerine getirmektedir. Denklemdaki $e(t)$ ise kontrol hatasını ($\Psi_r - \Psi_{Egim}$) ifade etmektedir. MDR sisteminde referans giriş $\Psi_r = 0^{\circ}$ ’dir. Kontrol işaret sinyali ifadesinde yer alan denetleyici parametreleri kazançları olan, oransal kazanç K_p , integral kazancı K_i ve türev kazancı K_d ’dir. İlk olarak tasarlanan robot sisteminin matematiksel olarak elde edilen durum uzayı formundan yararlanılarak simülasyonu yapılmıştır. Yapılan simülasyon testlerinde değişik girişlere karşı sistemin tepkisi incelenmiştir. Gerçekleştirdiğimiz denge robotu sisteminde zeminlere göre en iyi denetleyici parametresi belirlenirken Ziegler-Nichols’un önermiş olduğu metot kısmen uygulanmıştır. Tasarlanan robot sistemin matematiksel model dinamiklerinden faydalanılarak denetleyici parametrelerini değiştirebildiğimiz gerçek zamanlı arayüz vasıtasıyla oransal denetleyici parametresi sistem osilasyon yapıncaya kadar artırılmıştır. Sistemin osilasyona gittiği oransal kazanç değerinin yarısı alınarak sisteme ait oransal kazanç değeri belirlenmiştir. Daha sonra sistemin integral ve türev kazanç değerleri bulunmuştur. Gerçekleştirilen robot kontrol arayüzü vasıtasıyla da farklı zeminler için en uygun denetleyici parametrelerinin ince ayarı deneysel olarak bulunmuştur. Bu doğrultuda toprak, çakıl ve kum zeminlere ait en uygun PID denetleyici kazanç parametreleri tespit edilmiştir. Çizelge 5.4’de anahtarlama fonksiyonu yardımı ile her bir yüzey için bulunan en uygun denetleyici kazanç parametreleri verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.31’de önerilen YSA tabanlı AAK algoritmasının akış şeması görülmektedir.

Çizelge 5.4. Anahtarlama fonksiyonuna bağlı kontrolör parametreleri

Yüzey Tahmini	Kontrolör ve Parametreleri
$\sigma = 1$ (toprak)	Kontrolör 1 ($K_{p_1} = 29, K_{i_1} = 12, K_{d_1} = 9$)
$\sigma = 2$ (çakıl)	Kontrolör 2 (çakıl) ($K_{p_2} = 29, K_{i_2} = 0.5, K_{d_2} = 9$)
$\sigma = 3$ (kum)	Kontrolör 3 (kum) ($K_{p_3} = 29, K_{i_3} = 12, K_{d_3} = 14$)

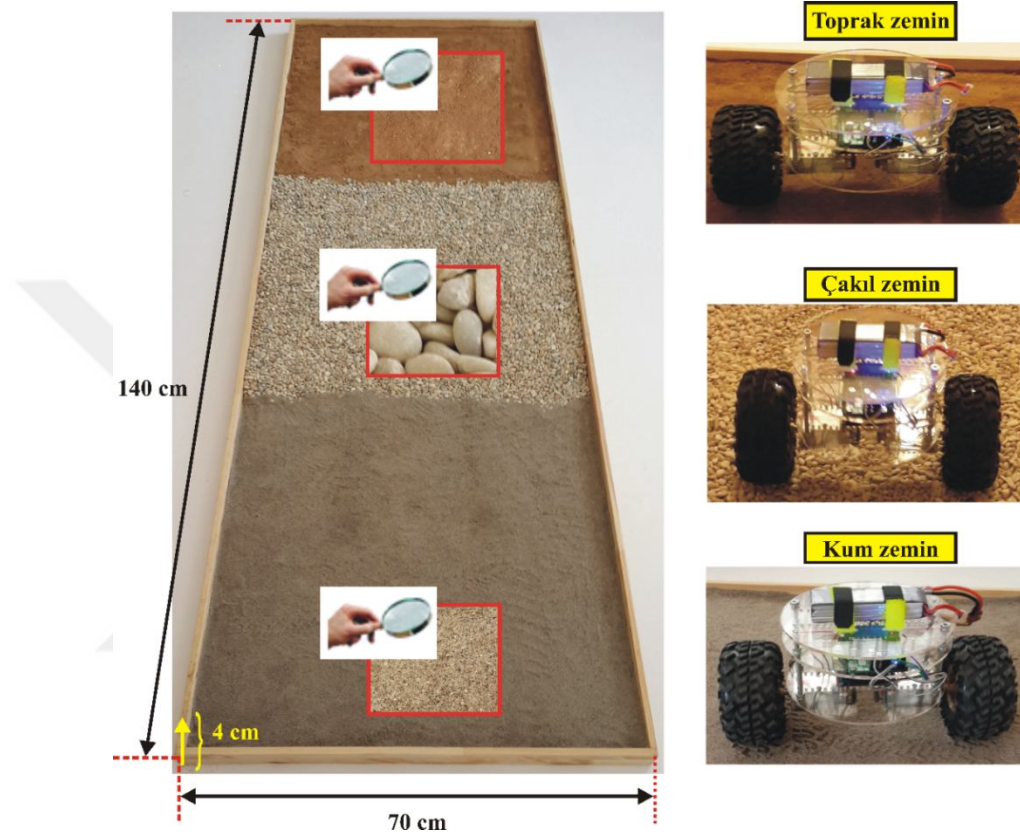


Şekil 5.31. YSA tabanlı AAK algoritması akış şeması

5.4.1. YSA Tabanlı Adaptasyon Mekanizması

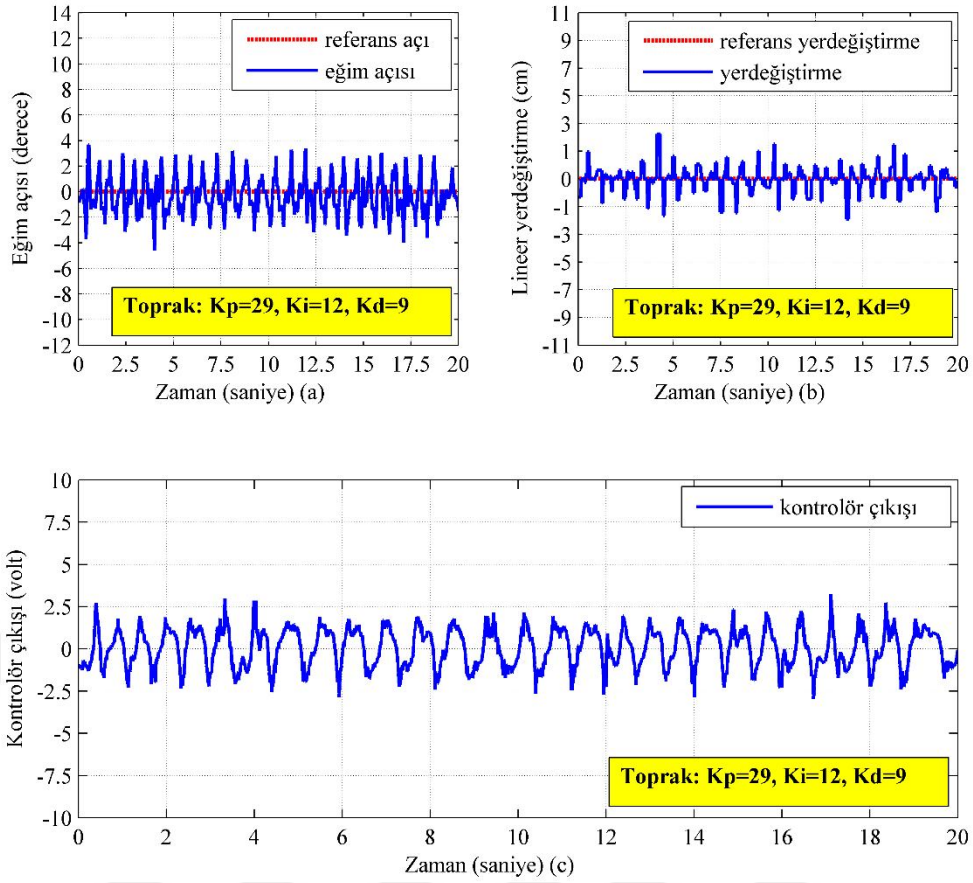
Bu tez çalışmasında toprak, çakıl ve kum olmak üzere birbirinden oldukça farklı yüzey özelliklerine sahip 3 farklı zeminde robotun gerçek zamanlı denge testleri yapılmıştır. Bu testlerde denge durumundan ayrılma açısının değişimi ($\Psi_{Eğim}(t)$), bu esnadaki robotun lineer yer değiştirmesi ($x(t)$) ve denetlenen MDR sisteminin girişi

($u(t)$) gibi veriler ele alınmıştır. Böylece MDR sisteminin denge kontrolü performansı analiz edilmiştir. Tasarlanan MDR denge testi platformu 70x210x4 cm boyutlarındadır. Bu denge testi platformu 3 eşit bölüme ayrılmıştır. Her bir bölüme ise toprak, çakıl ve kum doldurulmuştur. Şekil 5.32’de, 3 farklı zeminden oluşan denge testi platformu görülmektedir.



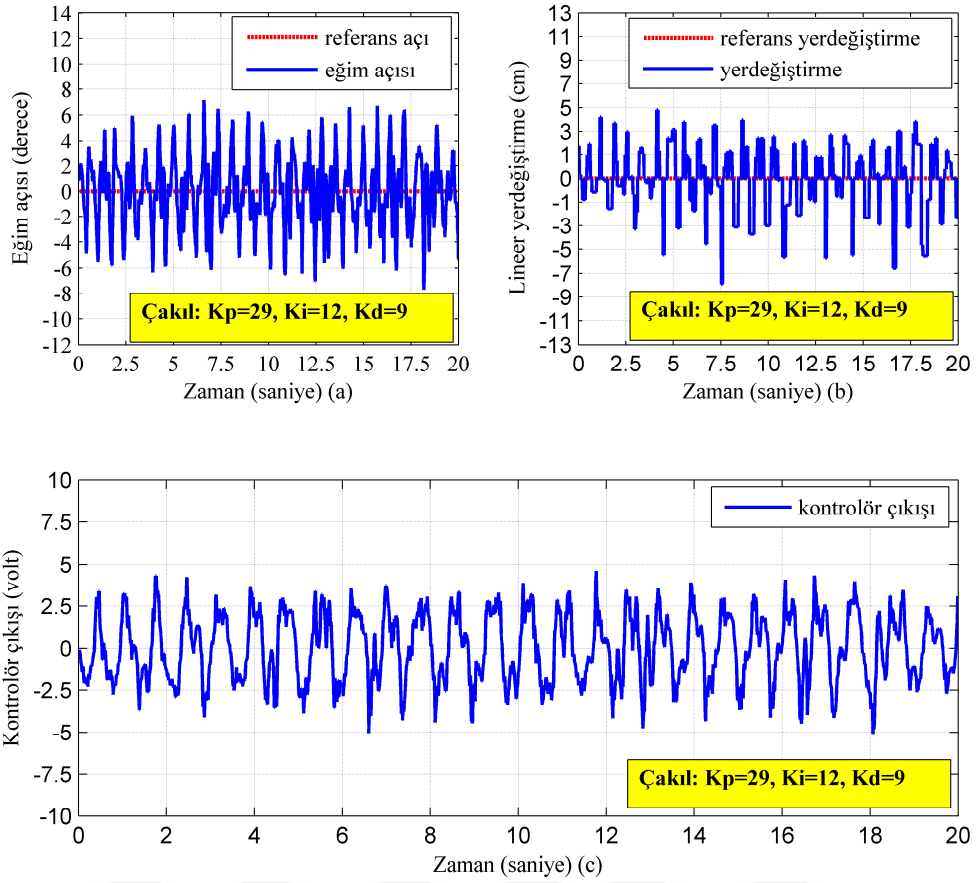
Şekil 5.32. Farklı zeminlere sahip denge testi platformu

Robotun farklı zeminlerdeki denge testleri yukarıdaki Şekil 5.32’deki test platformu kullanılarak yapılmıştır. Her bir zemindeki (toprak, çakıl ve kum) robotun davranışı toprak için elde edilen en uygun PID denetleyici test parametresinde ($K_p = 29, K_i = 12, K_d = 9$) teker teker analiz edilmiştir. MDR ile ilgili eğim açısı, lineer yerdeğiştirme ve kontrolör çıkışı verileri kablosuz bluetooth birimi sayesinde bilgisayara aktarılmıştır. İlk olarak aşağıdaki Şekil 5.33’de görüldüğü gibi sisteme dışarıdan herhangi bir bozucu etki olmaksızın toprak zemin üzerindeki robotun tepkisi izlenmiştir. Burada, robotun 20 saniye boyunca denge durumundan ayrılma açısı, robotun almış olduğu mesafe ve kontrolör çıkışının zamana göre değişimi ele alınmıştır.



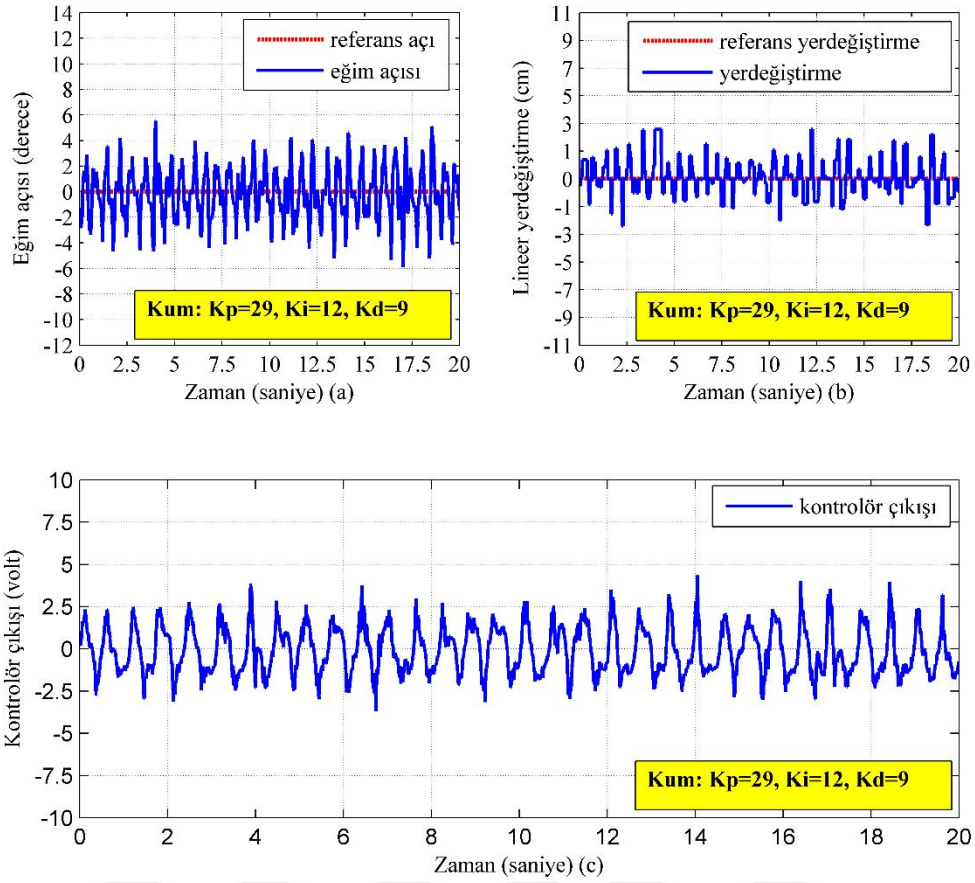
Şekil 5.33. Toprak zemindeki açı değişimi-lineer yerdeğiştirme ve kontrol çıkışı

Yukarıdaki Şekil 5.33’de görüldüğü gibi robotun denge durumundan ayrılma açısı yaklaşık olarak -4° ve $+4^\circ$ arasında değişmektedir. Robotun otonom olarak dengesini sağlamaya çalışırken ileri-geri yönde aldığı mesafe yaklaşık olarak -3 cm ve $+3$ cm arasında değişmektedir. Robotun kontrolör çıkışı ise yaklaşık olarak -2.5 Volt ve $+2.5$ Volt arasında değişmektedir. Daha sonra çakıl zemin üzerinde robotun denge performansını gözlemleyebilmek için denetleyici test parametresi ($K_p = 29, K_i = 12, K_d = 9$) kullanılarak robotun tepkisi incelenmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.34’de çakıl zemin üzerinde harici bir bozucu etki olmaksızın robotun tepkisi görülmektedir. Burada robotun 20 saniye boyunca denge durumundan ayrılma açısı, robotun almış olduğu mesafe ve kontrolör çıkışının zamana göre değişimi ele alınmıştır.



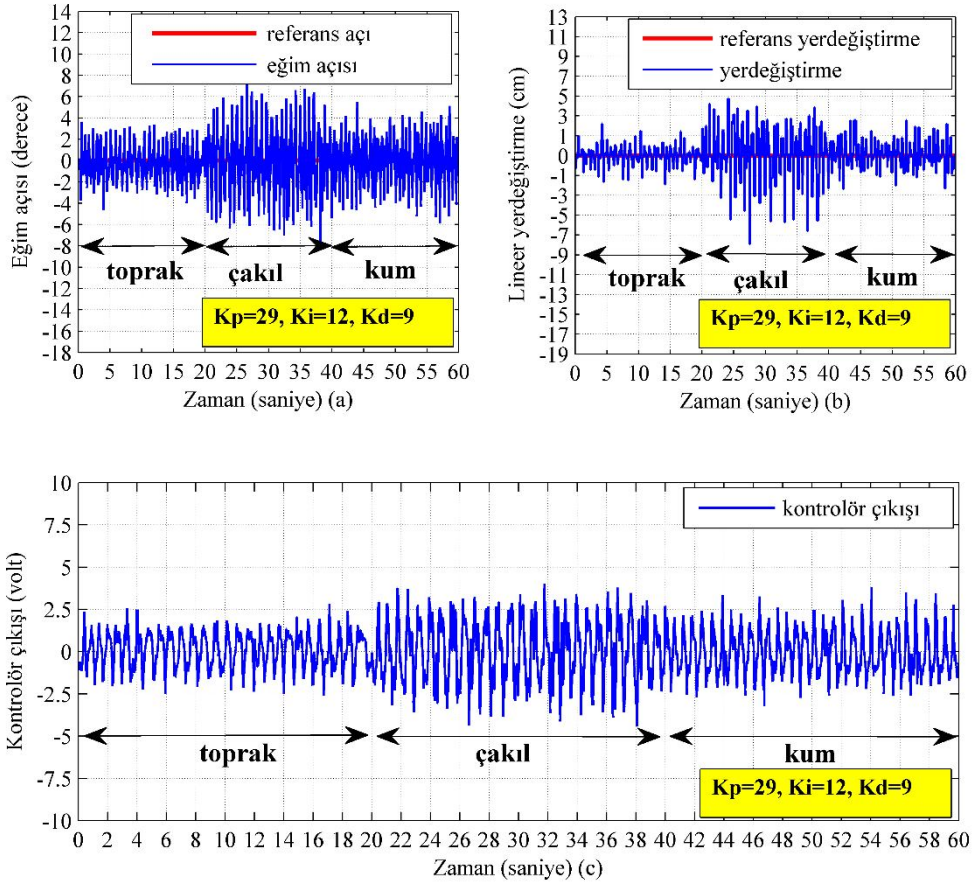
Şekil 5.34. Çakıl zemindeki açı değişimi-lineer yerdeğiştirme ve kontrol çıkışı

Yukarıdaki Şekil 5.34'de görüldüğü gibi robotun denge durumundan ayrılma açısı yaklaşık olarak -8° ve $+7^\circ$ arasında değişmektedir. Robotun otonom olarak dengesini sağlamaya çalışırken ileri-geri yönde aldığı mesafe yaklaşık olarak -8 cm ve $+5$ cm arasında değişmektedir. Robotun kontrolör çıkışı ise yaklaşık olarak -5 Volt ve $+5$ Volt arasında değişmektedir. Son olarak da robotun kum zemindeki davranışı denetleyici test parametresi ($K_p = 29, K_i = 12, K_d = 9$) kullanılarak incelenmiş ve analiz edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.35'de kum zemin üzerinde harici bir bozucu etki olmaksızın robotun tepkisi görülmektedir. Burada robotun 20 saniye boyunca denge durumundan ayrılma açısı, robotun almış olduğu mesafe ve kontrolör çıkışının zamana göre değişimi ele alınmıştır.



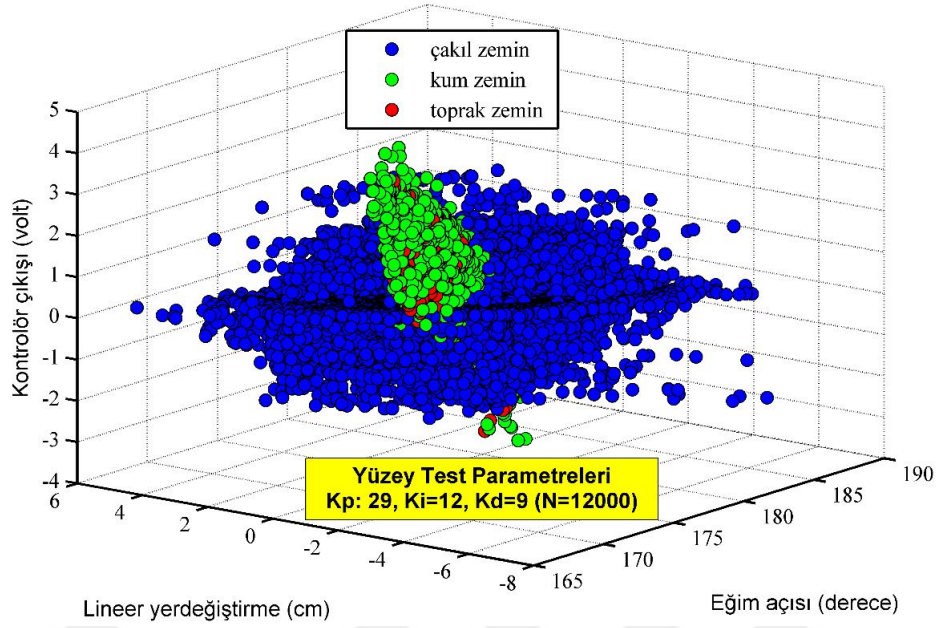
Şekil 5.35. Kum zemindeki açı değişimi-lineer yerdeğiştirme ve kontrol çıkışı

Yukarıdaki Şekil 5.35’de görüldüğü gibi robotun denge durumundan ayrılma açısı yaklaşık olarak -6° ve $+6^\circ$ arasında değişmektedir. Robotun otonom olarak dengesini sağlamaya çalışırken ileri-geri yönde aldığı mesafe yaklaşık olarak -3 cm ve $+3$ cm arasında değişmektedir. Robotun kontrolör çıkışı ise yaklaşık olarak -3 Volt ve $+4$ Volt arasında değişmektedir. Şekil 5.36’da üç farklı zemin için, eğim açısı, robotun almış olduğu mesafe ve denetlenen sistem girişinin zamana göre değişimi tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.36. Toprak, çakıl ve kum zemin üzerindeki MDR'nin zamana göre grafikleri

Şekil 5.36'de görüldüğü gibi aynı denetleyici parametresinde robotun bulunduğu yüzeye göre eğim açısı, lineer yerdeğiştirme ve kontrolör çıkışı oldukça değişiklik göstermektedir. Bu doktora tez kapsamında bu temel sorunun aşılabilmesi için yeni bir YSA tabanlı AAK yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu YSA tabanlı AAK için robotun her bir zemindeki denge durumu aynı denetleyici parametresi ($K_p = 29, K_i = 12, K_d = 9$) dikkate alınarak 2 dakika boyunca ($N = 12000$ örnek) hiçbir dış bozucu etki olmaksızın robot kontrol arayüzü aracılığıyla izlenmiştir. Daha sonra denge robotu üzerinde bulunan kablosuz haberleşme birimi sayesinde eğim açısı, lineer yer değıştirme ve kontrolör çıkışı gibi veriler üç farklı zemin üzerinde analiz edilmiştir. Aşağıda Şekil 5.37'de MDR'den alınan bu robot verilerinin yüzeylere göre dağılımı 3 boyutlu olarak verilmiştir.



Şekil 5.37. Toprak, çakıl ve kum zemin üzerindeki MDR'nin yüzey testleri

Şekil 5.37'de görüldüğü gibi çakıl zemin üzerinde iken robottan elde edilen veriler çok geniş bir alanda kümelenmiştir. Aynı zamanda şekil 5.37'deki grafik analiz edildiğinde MDR sisteminin davranışının zamanla değişen ve doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğu görülür. Bundan dolayı, robotun bulunduğu yüzeyi otonom olarak algılayabilmesi için elde edilen robot verileri sistematik örnekleme yöntemi ile tekrar değerlendirilmiştir. Bundan dolayı robottan alınan verilerin $N = 600$ örnekte (6 saniyelik veri) bir Mutlak Referans Açısı Sapma Hatası Ortalaması (MRASHO), Mutlak Referans Yerdeğiştirme Sapma Hatası Ortalaması (MRYSHO) ve Mutlak Kontrolör Çıkışı Ortalaması (MKÇO) alınmıştır. Ele alınan bu MDR'ye ait sistem verileri ile ilgili denklemler aşağıdaki Denklem 5.4-5.6'da sırasıyla verilmiştir.

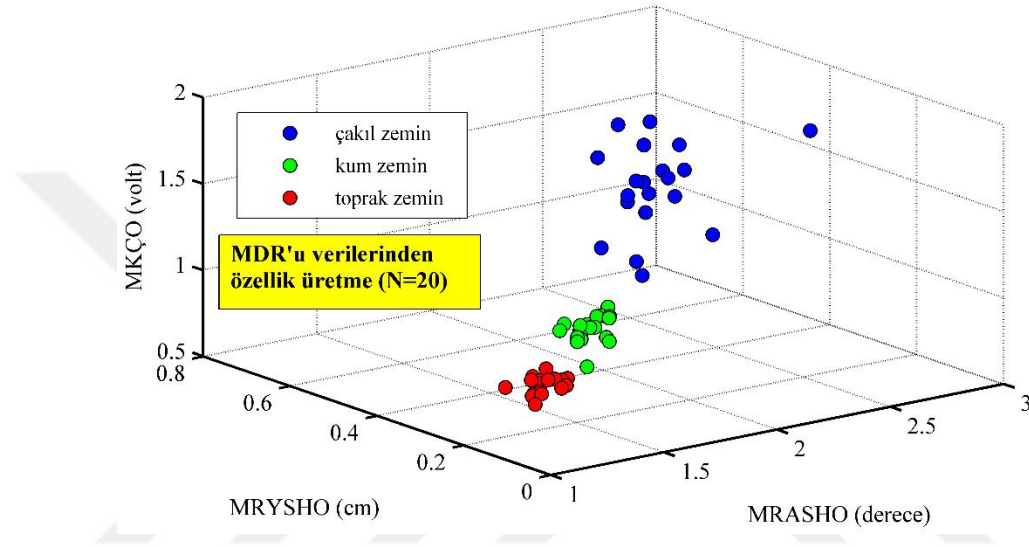
$$MRASHO = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N |\Psi_r(t)_N - \Psi_{Eğim_N}| \quad (5.4)$$

$$MRYSHO = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N |X_r(t)_N - X_{Yerdeğiştirme_N}| \quad (5.5)$$

$$MKÇO = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N |u(t)_N| \quad (5.6)$$

Böylece her bir zemin (toprak, çakıl ve kum) için denetleyici test parametresinde ($K_p = 29$ $K_i = 12$ $K_d = 9$) belirli örnekleme için anlamlı özellikler çıkarılmıştır. Zeminlerle

ilgili çıkarılan bu anlamlı özellikler MDR'nin bulunduğu zemini algılayabilmesi için önerilen AAK yapısında bulunan adaptasyon mekanizmasının temelini oluşturan YSA tahmininde kullanılmıştır. Gerçekleştirilen bu yüzey tahmininden sonra Parametre Adaptasyon Mekanizması (PAM)'nin temelleri oluşturularak robotun bulunduğu zeminin tahmini yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 5.38'de zemin tahmin edici YSA yapısında kullanılan, robot verilerinden çıkarılan yeni özellikler tek bir grafik üzerinde 3 boyutlu olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.38. MDR'den elde edilen verilerden üretilen özellikler

Şekil 5.38'de görüldüğü gibi robottan verilerinden elde edilen bu yeni özellikli veriler birbirinden oldukça farklı alanlarda kümelenmiştir. Yüzeyle ait verilerin farklı alanlarda kümelenmesi sayesinde, YSA tabanlı bir tahmin edici vasıtasıyla robotun bulunduğu yüzeyi algılaması kolaylaşmıştır.

Denklem 5.4-5.6'da verilen özgün robot özelliklerinin yanında, sıklıkla araştırmacılar tarafından kullanılan temel istatistik özellikler de robotun YSA tahmini için çıkarılmıştır. Çıkarılan bu robot verisi, N = 100 örnekte (1 ms'lik veriler) bir ortalama, varyans, basıklık, çarpıklık, entropi ve enerjidir. Ele alınan bu özellikler Denklem 5.7-5.12'de sırasıyla verilmiştir.

$$\text{Ortalama} = \mu = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N} \quad (5.7)$$

$$\text{Varyans} = \sigma_s^2 = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N} \quad (5.8)$$

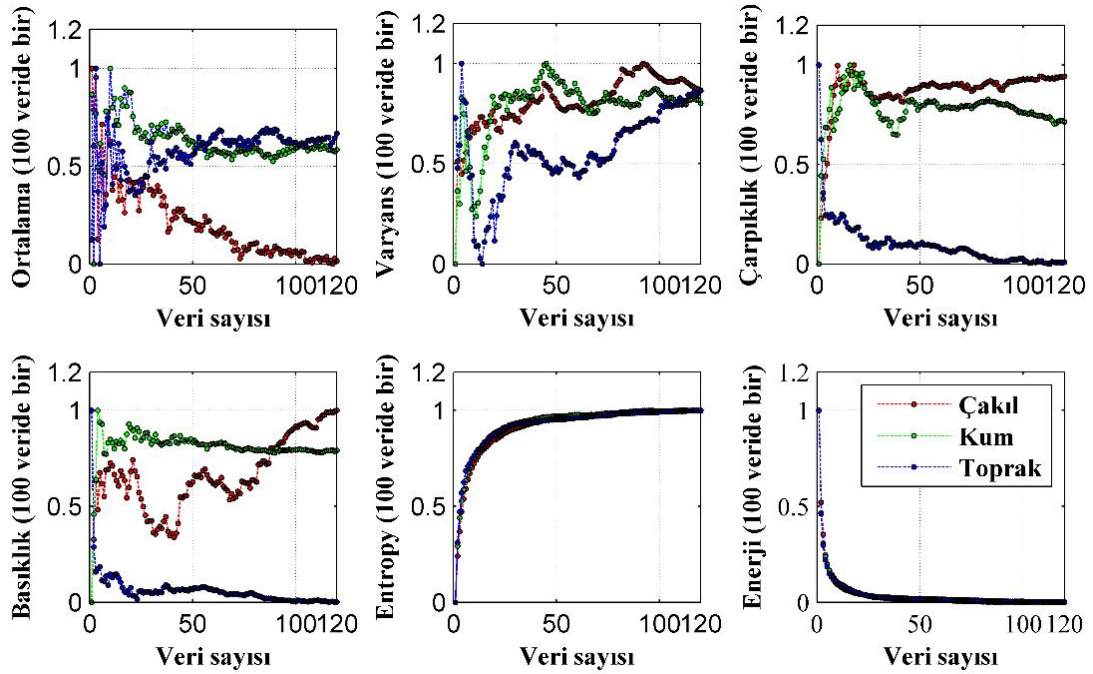
$$\text{Basıklık} = B_s = \frac{E(X-\mu)^3}{\sigma_s^3} \quad (5.9)$$

$$\text{Çarpıklık} = \zeta_k = \frac{E(X-\mu)^4}{\sigma_s^4} \quad (5.10)$$

$$\text{Entropi} = H_e = -\sum_i p_i \ln p_i \quad (5.11)$$

$$\text{Enerji} = \int_{-\infty}^{\infty} |X(t)|^2 dt \quad (5.12)$$

Aşağıdaki Şekil 5.39'da, denge robotunun YSA tahmininde kullanılan normalizasyon işleminden geçirilmiş (0 ve 1 arasında değer alan) temel istatistik özellikleri verilmiştir.

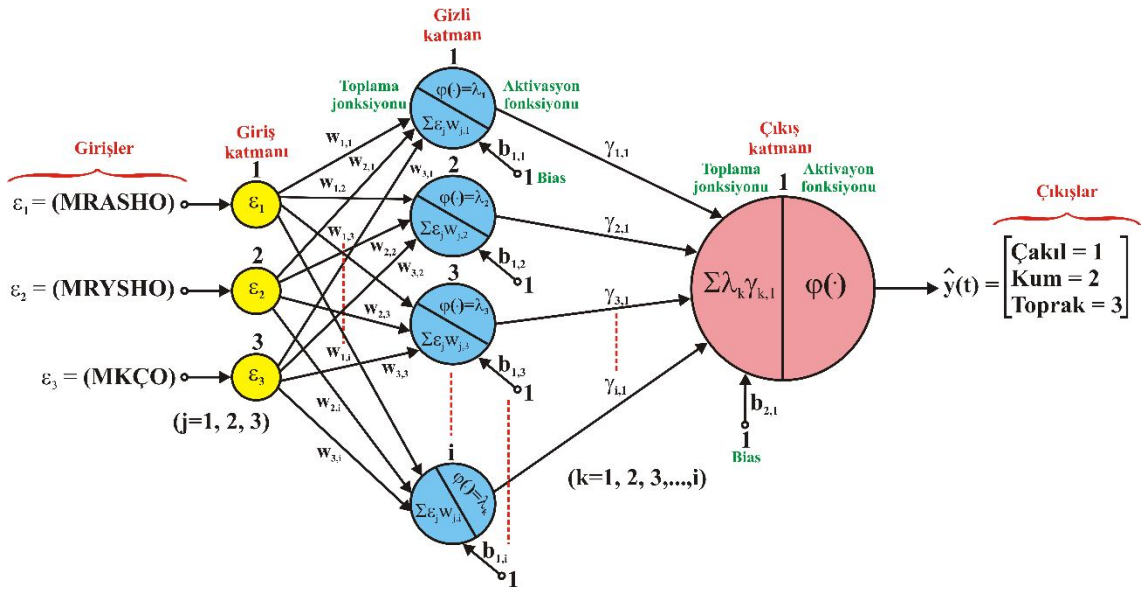


Şekil 5.39. MDR'nin YSA tahmini için kullanılan istatistik özellikleri

Bu temel istatistik özellikler, robotun bulunduğu yüzeyi daha hızlı algılayabilmesi için çıkarılmıştır fakat bu özellikler YSA'nın yüzey tahmininde kullanıldığında tahmin başarısı istenilen düzeye çıkamamıştır. Aynı zamanda bu verilerin birlikte kullanımı YSA'nın giriş sayısını da artırmaktadır. Bundan dolayı robotun YSA tahmininde daha yüksek doğruluk oranına sahip MRASHO, MRYSHO, MKÇO robot verileri kullanılmıştır.

5.4.2. Adaptasyon Mekanizması İçin Geliştirilen Yapay Sinir Ağı Modeli

Robot sisteminin denetleyici yapısında YSA tabanlı bir tahmin edici ağ yapısı kullanılmıştır. Kullanılan bu sinir ağı modeli robota ait giriş verilerini değerlendirmekte ve böylece robotun hangi zeminde olduğunu sınıflandırabilmektedir. Yapay sinir ağının giriş verileri olarak MRASHO, MRYSHO ve MKÇO robot verileri kullanılmıştır. Kullanılan bu sinir ağının modeli Şekil 5.40'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.40. MDR'nin YSA modeli

Uygulamada kullanılan sinir ağındaki Ara Katman Nöron Sayısı (AKNS), Öğrenme Oranı (LR) ve aktivasyon fonksiyonu sistemin değişken parametreleridir. Bu değişkenlere ilaveten sinir ağının Momentum Sabiti (Mc)'nin seçimi de oldukça önemlidir. Literatürdeki YSA'nın kullanıldığı çalışmalara bakıldığında genellikle Mc, 0.8 ya da 0.9 alındığında en iyi doğruluk sonucuna ulaşıldığı için, sinir ağı modelinde Mc=0.9 olarak sabit tutulmuştur (Tezel, 2007) Son olarak da iterasyon sayısı 1000 şeklinde alınmış ve tüm işlemler bu parametrelere göre yapılmıştır. Kullanılan YSA yapısı, geri yayılım algoritmasıyla eğitilen ileri beslemeli ve çok katmanlı bir ağ yapısına sahiptir. Kullanılan sinir ağı modeli giriş katmanı, ara katman ve çıkış katmanı olmak üzere 3 katmandan meydana gelmiştir. Sistemin girişi 3 tane özelliğten oluştuğu için giriş katmanında sabit 3 tane düğüm mevcuttur. Çıkış katmanındaki nöron sayısı ise 1 olarak alınmıştır. Böylece çıkış değeri kullanılan aktivasyon fonksiyonuna göre 3 farklı çıkışa

dönüştürülmüştür. Ara katman nöron sayısı için ise sinir ağının hassasiyetini daha fazla artırabilmek için 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 değerleri, öğrenme oranları için ise 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 değerleri denenmiş ve tüm foldlar için optimum sonucun elde edildiği değerler esas alınarak işlemler gerçekleştirilmiştir. Ara katmanlardaki nöronlarda ve çıkış katmanındaki nöronda farklı aktivasyon fonksiyonları (logaritmik sigmoid, purelin ve tansig) kullanılmıştır. Böylece en uygun tahmin edici ağ yapısı ortaya çıkarılmıştır. Hedef durdurma kriteri için ise 0.001 değeri kullanılarak tüm foldlar için optimum sonucu veren değerler esas alınmış ve eğitim-test işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak denge robotuna ait çıkarılan 3 özelle robotun bulunduğu zemini tahmin edebilmesi için tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu için yapılan bu denemelerle ilgili veriler aşağıdaki Çizelge 5.5’de ayrıntılı olarak görülmektedir. Deneme yapılan tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu için LR’ları ve AKNS sınıflama sonuçlarının performansları ifade edilmiştir.

Çizelge 5.5. Robot verisine ait 3 adet özellik için elde edilen % tahmin sonuçları (tansig aktivasyon fonksiyonu ve Mc=0.9)

AKNS	Performans	ÖS	LR=0.2	LR=0.4	LR=0.6	LR=0.8	LR=1	LR=1.2
			Test	Test	Test	Test	Test	Test
4	% Doğruluk	3	94.47	94.07	94.60	94.67	94.13	94.40
	Test Süresi (s)		0.0060	0.0061	0.0055	0.0063	0.0062	0.0059
	İterasyon		297	330	207	198	212	180
5	% Doğruluk	3	94.47	95.00	94.80	94.27	94.80	94.33
	Test Süresi (s)		0.0058	0.0056	0.0052	0.0055	0.0082	0.0066
	İterasyon		153	322	206	156	118	535
6	% Doğruluk	3	94.80	94.33	94.13	94.67	94.33	94.47
	Test Süresi (s)		0.0076	0.0056	0.0053	0.0055	0.0059	0.0059
	İterasyon		189	552	174	536	1000	572
7	% Doğruluk	3	95.13	94.80	94.27	95.40	93.53	94.93
	Test Süresi (s)		0.0057	0.0055	0.0059	0.0061	0.0059	0.0057
	İterasyon		188	447	210	423	179	772
8	% Doğruluk	3	94.87	95.40	95.13	94.67	94.40	94.20
	Test Süresi (s)		0.0053	0.0055	0.0056	0.0072	0.0052	0.0105
	İterasyon		109	175	350	148	118	240
9	% Doğruluk	3	95.40	95.33	95.00	95.60	95.40	94.80
	Test Süresi (s)		0.0059	0.0057	0.0061	0.0061	0.0057	0.0055
	İterasyon		1000	892	216	542	227	188
10	% Doğruluk	3	95.20	94.73	95.07	94.87	95.00	95.27
	Test Süresi (s)		0.0059	0.0062	0.0056	0.0058	0.0059	0.0070
	İterasyon		153	205	159	316	198	321

Yukarıdaki Çizelge 5.5’de görüldüğü gibi robotun farklı zeminleri tahmin edebilmesi için kullanılan sinir ağı modelinde en yüksek performans LR=0.8 ve AKNS=9 iken elde edilmiştir. Daha sonra robotun zemini tahmin edebilmesi için logaritmik sigmoid

aktivasyon fonksiyonu için denemeler yapılmış ve yapılan bu denemelerle ilgili veriler aşağıdaki Çizelge 5.6'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Robot verisine ait 3 adet özellik için elde edilen % tahmin sonuçları (logsig aktivasyon fonksiyonu ve Mc=0.9)

AKNS	Performans	ÖS	LR=0.2	LR=0.4	LR=0.6	LR=0.8	LR=1	LR=1.2
			Test	Test	Test	Test	Test	Test
4	Yüzde Doğruluk	3	94.40	94.93	93.80	95.27	94.87	95.00
	Test Süresi (s)		0.0082	0.0053	0.0057	0.0053	0.0057	0.0057
	İterasyon		556	209	241	324	1000	191
5	Yüzde Doğruluk	3	95.27	95.40	95.47	95.53	95.53	95.47
	Test Süresi (s)		0.0108	0.0054	0.0057	0.0054	0.0054	0.0059
	İterasyon		358	1000	1000	1000	188	972
6	Yüzde Doğruluk	3	95.13	95.40	95.87	95.27	95.53	95.80
	Test Süresi (s)		0.0066	0.0065	0.0054	0.0053	0.0058	0.0056
	İterasyon		315	319	199	428	315	975
7	Yüzde Doğruluk	3	95.47	95.27	95.80	96.00	95.73	95.07
	Test Süresi (s)		0.0072	0.0056	0.0054	0.0074	0.0056	0.0054
	İterasyon		440	344	185	759	1000	323
8	Yüzde Doğruluk	3	95.93	95.80	96.07	95.73	95.80	95.73
	Test Süresi (s)		0.0056	0.0062	0.0055	0.0059	0.0065	0.0059
	İterasyon		208	193	190	987	271	180
9	Yüzde Doğruluk	3	95.27	95.87	95.00	95.80	95.40	96.00
	Test Süresi (s)		0.0059	0.0063	0.0076	0.0058	0.0061	0.0055
	İterasyon		242	189	173	310	1000	1000
10	Yüzde Doğruluk	3	95.53	94.67	95.67	96.13	95.73	95.40
	Test Süresi (s)		0.0055	0.0057	0.0069	0.0057	0.0055	0.0052
	İterasyon		189	428	1000	198	213	1000

Yukarıdaki Çizelge 5.6'da görüldüğü gibi robotun farklı zeminleri tahmin edebilmesi için kullanılan sinir ağı modelinde en yüksek performans LR=0.8 ve AKNS=10 iken elde edilmiştir. Son olarak zemin tahmini için purelin aktivasyon fonksiyonu için denemeler yapılmış ve yapılan bu denemelerle ilgili veriler aşağıdaki Çizelge 5.7'de ayrıntılı olarak görülmektedir.

Çizelge 5.7. Robot verisine ait 3 adet özellik için elde edilen % tahmin sonuçları (purelin aktivasyon fonksiyonu ve $Mc=0.9$)

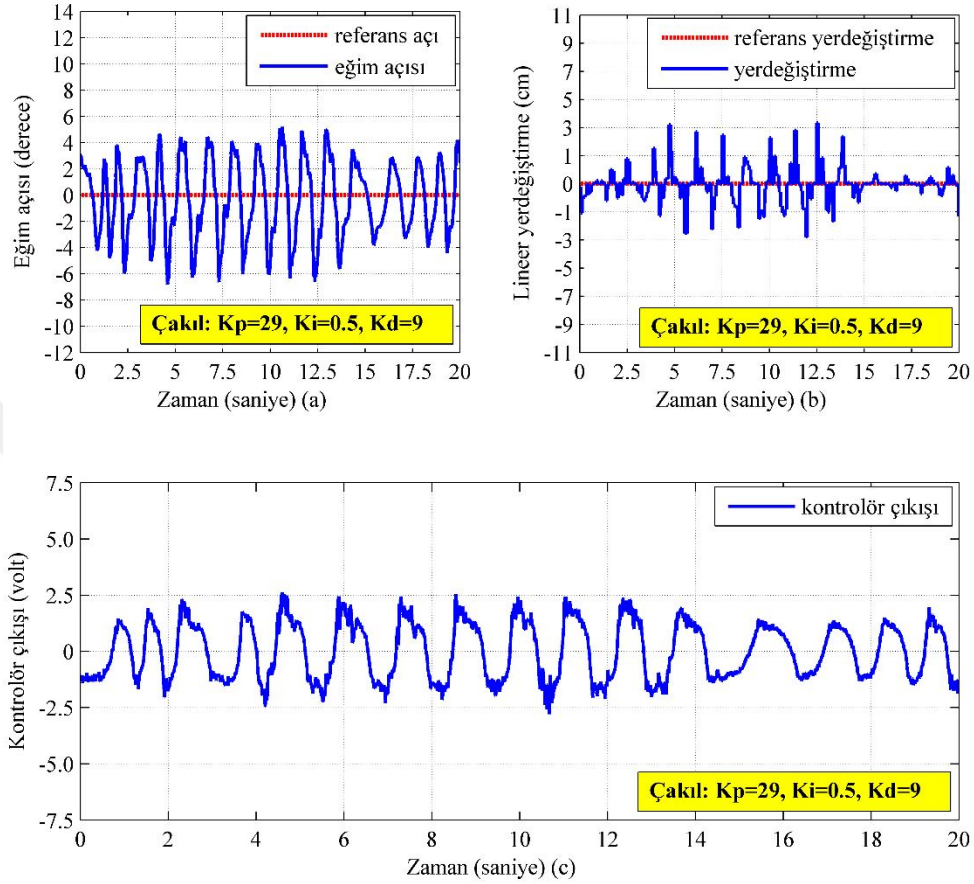
AKNS	Performans	ÖS	LR=0.2	LR=0.4	LR=0.6	LR=0.8	LR=1	LR=1.2
			Test	Test	Test	Test	Test	Test
4	Doğruluk	3	98.80	98.67	98.20	99.07	97.53	97.93
	Test Süresi (s)		0.0061	0.0054	0.0058	0.0055	0.0054	0.0053
	İterasyon		106	124	120	123	123	113
5	Doğruluk	3	98.00	97.80	97.20	99.13	98.20	97.60
	Test Süresi (s)		0.0054	0.0056	0.0059	0.0057	0.0059	0.0057
	İterasyon		232	112	219	115	164	221
6	Doğruluk	3	98.13	97.53	98.67	98.67	98.20	98.40
	Test Süresi (s)		0.0053	0.0062	0.0058	0.0059	0.0056	0.0058
	İterasyon		181	132	215	217	235	246
7	Doğruluk	3	98.47	98.40	97.87	98.33	98.80	98.33
	Test Süresi (s)		0.0078	0.0055	0.0056	0.0053	0.0070	0.0055
	İterasyon		111	213	108	219	168	172
8	Doğruluk	3	99.27	98.67	98.00	97.87	97.67	98.73
	Test Süresi (s)		0.0055	0.0144	0.0062	0.0055	0.0058	0.0054
	İterasyon		106	228	180	331	233	175
9	Doğruluk	3	98.20	98.07	98.53	98.13	98.53	98.53
	Test Süresi (s)		0.0051	0.0055	0.0064	0.0069	0.0074	0.0056
	İterasyon		109	222	128	136	122	143
10	Doğruluk	3	98.53	98.93	98.47	97.33	96.93	98.53
	Test Süresi (s)		0.0055	0.0055	0.0065	0.0057	0.0058	0.0065
	İterasyon		242	166	222	182	121	712

Yukarıdaki Çizelge 5.7’de görüldüğü gibi robotun farklı zeminleri tahmin edebilmesi için kullanılan sinir ağı modelinde en yüksek performans LR=0.2 ve AKNS=8 iken elde edilmiştir. Elde edilen bu performans değeri diğer aktivasyon fonksiyonlarındaki performans değerlerinden oldukça iyidir. Bundan dolayı yapay sinir ağının modeli yapısı LR=0.2, AKNS=8 ve purelin aktivasyon fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu ağ yapısına ait ağırlık, biyas ve aktivasyon fonksiyonu göz önünde bulundurularak gerçek zamanlı bir YSA tahmin algoritması oluşturulmuş ve gerçek zamanlı olarak robot üzerinde uygulanmıştır. Böylece, robotun bulunduğu zemin tahmin edilmiş ve zeminlere göre daha önce belirlenen en uygun denetleyici parametreleri YSA tabanlı AAK yapısında bulunan anahtarlama fonksiyonu yardımıyla seçilmiştir. Sonuç olarak MDR sisteminin daha kararlı bir şekilde denge durumunu sürdürebilmesi sağlanmıştır.

5.4.3. YSA tabanlı Anahtarlama Adaptif Kontrol Uygulama Sonuçları

Toprak ve düz zeminler için en uygun denetleyici parametresi ($K_p = 29, K_i = 12, K_d = 9$) robot üzerinde yapılan gerçek zamanlı testler sonucunda elde edilmiştir. Aynı şekilde diğer zeminler içinde birçok testler yapılmıştır. Yapılan bu testler sonucunda

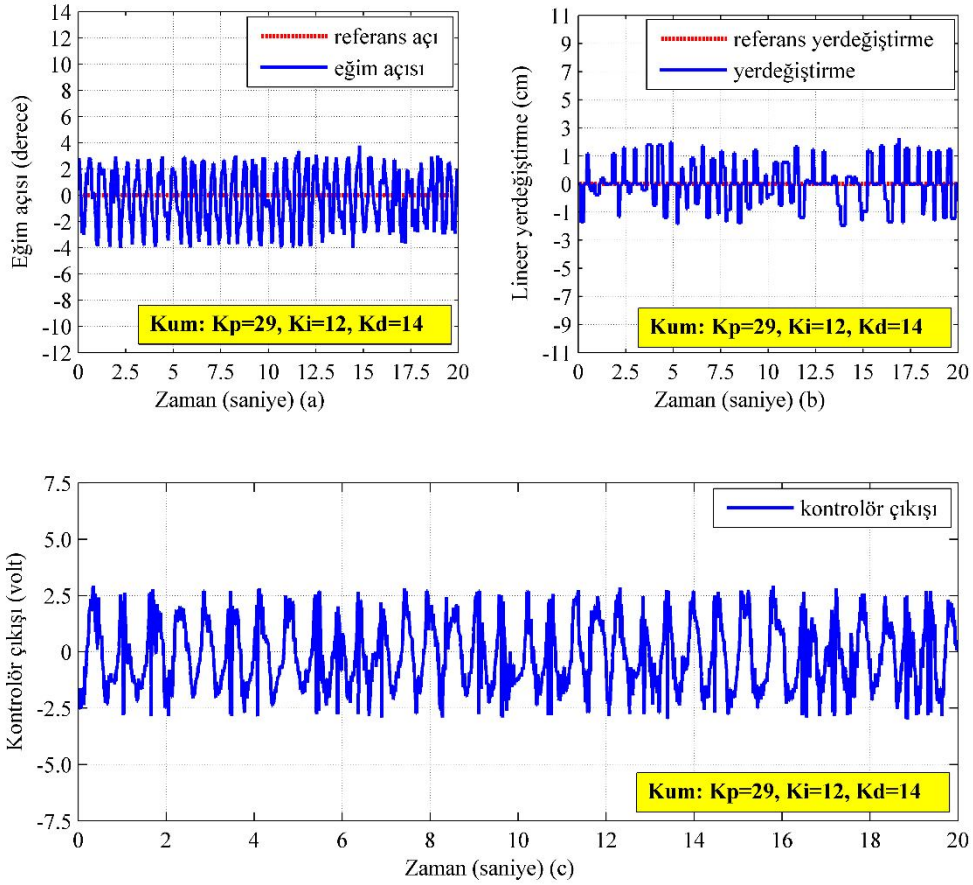
denge robotunun çakıllı zeminlerdeki en uygun denetleyici parametresi ($K_p = 29, K_i = 0.5, K_d = 9$) belirlenmiştir. Şekil 5.41’de çakıl zemindeki denge robotunun tepkisinin grafikleri görülmektedir.



Şekil 5.41. Çakıl zemindeki açı değişimi, lineer yerdeğiştirme ve kontrol çıkışı

Yukarıdaki Şekil 5.41’de görüldüğü gibi robotun denge durumundan ayrılma açısı yaklaşık olarak -7° ve $+5^\circ$ arasında değişmektedir. Robotun otonom olarak dengesini sağlamaya çalışırken ileri-geri yönde aldığı mesafe yaklaşık olarak -3 cm ve $+3$ cm arasında değişmektedir. Robotun kontrolör çıkışı ise yaklaşık olarak -2.5 Volt ve $+2.5$ Volt arasında değişmektedir.

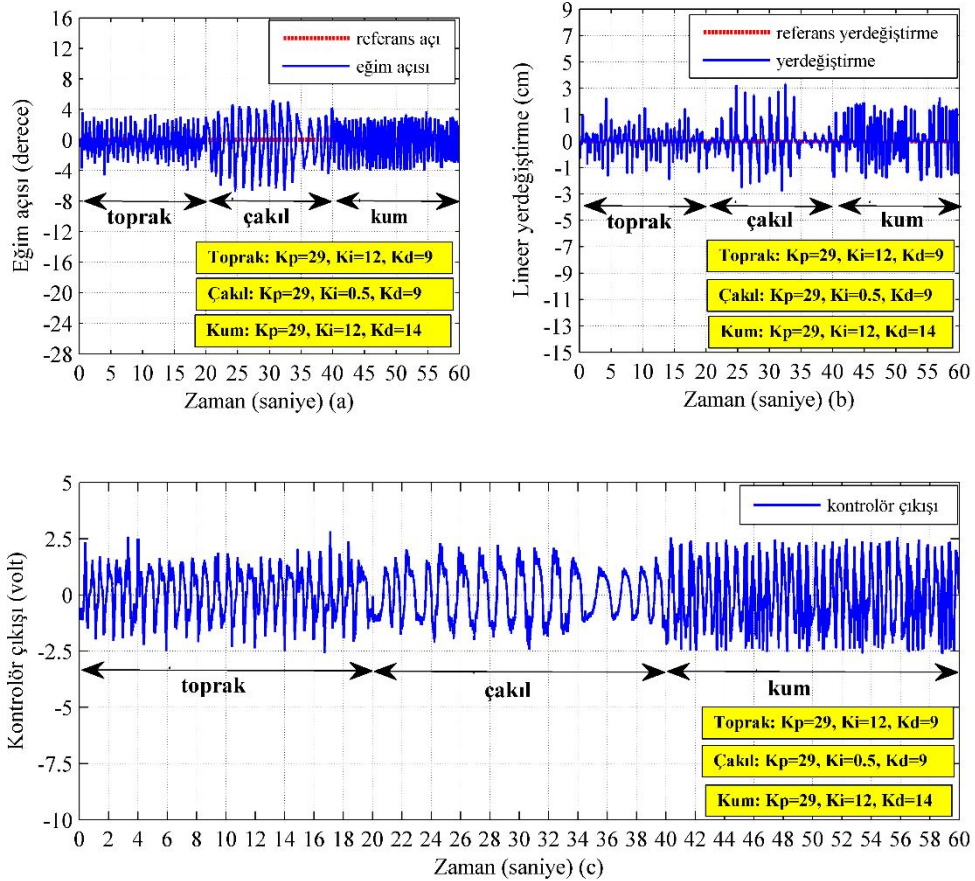
Daha sonra, kum zemindeki denge robotunun denge testleri yapılmıştır. Sonuç olarak kum zeminde denge robotunun en uygun denetleyici parametresi ($K_p = 25, K_i = 14, K_d = 10$) belirlenmiştir. Şekil 5.42’de kum zemindeki denge robotunun tepkisinin grafikleri görülmektedir.



Şekil 5.42. Kum zemindeki açı değişimi, lineer yerdeğiştirme ve kontrol çıkışı

Yukarıdaki Şekil 5.42’de görüldüğü gibi robotun denge durumundan ayrılma açısı yaklaşık olarak -4° ve $+4^\circ$ arasında değişmektedir. Robotun otonom olarak dengesini sağlamaya çalışırken ileri-geri yönde aldığı mesafe yaklaşık olarak -1 cm ve $+2$ cm arasında değişmektedir. Robotun kontrolör çıkışı ise yaklaşık olarak -2.5 Volt ve $+2.5$ Volt arasında değişmektedir.

Yukarıdaki Şekil 5.33, 5.41 ve 5.42’de elde edilen grafiklerde görüldüğü robotun farklı zeminlerdeki (toprak, çakıl ve kum) tepkisi için en uygun denetleyici parametreleri belirlenmiştir. Farklı zeminler için belirlenen bu uygun denetleyici parametreleri kullanılan anahtarlamalı adaptif kontrol yapısı robotun denetiminde aktif olarak kullanılmıştır. Şekil 5.43’de anahtarlamalı adaptif kontrolündeki davranışı tek bir şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.43. Toprak, çakıl ve kum zemin üzerindeki MDR'nun zamana göre grafikleri

İki tekerlekli denge robotları birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır fakat araştırmaların hemen hemen hepsi tek zemin üzerinde bu robotların denge problemlerinin çözümü üzerine yoğunlaşmışlardır. Yapılan çalışmada ise bu robotların denge probleminin farklı zeminlerdeki davranışı analiz edilerek yeni bir denetleyici yapısı ortaya çıkarılmıştır. İlk olarak robotun farklı zeminlerde dengesini sürdürmeye çalışırken yapmış olduğu açı salınımları, ileri ve geriye doğru almış olduğu mesafe ve kontrolör çıkışı değişimleri YSA ile sınıflandırılmış ve yüzey tahmini yapılmıştır. Yapay sinir ağları tabanlı sınıflandırma işleminin sonucunda gerekli adaptasyon mekanizması kullanılarak robota ait kontrolör parametresi robotun üzerinde hareket ettiği zemine göre değiştirilmiştir. YSA yönteminde, yüzey belirlemede geri yayımlı yapay sinir ağları kullanılmıştır. Robot sisteminde kullanılan YSA sisteminde öğrenme oranı, aktivasyon fonksiyonu ve ara katman nöron sayıları değişken olarak ele alınmıştır. Öğrenme oranı 0.2, ara katman nöron sayısı 8 ve purelin aktivasyon fonksiyonu seçildiğinde YSA algoritmasının yüzey sınıflandırma işleminde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Önerilen bu anahtarlamalı adaptif kontrol yapısı farklı zeminler için MDR üzerinde

gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Yapılan gerçek zamanlı deneysel sonuçlar, önerilen bu kontrolör yapısının robotun farklı zeminlerdeki denge performansını iyileştirdiği görülmüştür. Yani, robotun denge durumunu sürdürebilmesi için yapmış olduğu açılımları, ileriye ve geriye doğru almış olduğu mesafe azaltılmıştır. Aynı zamanda kontrolör çıkışındaki değişimin sınırlandırılarak enerji verimliliğini artırdığı görülmüştür. Sonuç olarak klasik denetleyici yapısından daha kararlı bir denetleyici yapısı tasarlanmış ve robot üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, bulunduğu yüzeyleri YSA tabanlı tahmin edici vasıtasıyla algılayabilen ve algıladığı yüzeye göre de kontrolör parametrelerini adaptif olarak değiştirebilen MDR üzerinde durulmuştur. Çalışmada yüzey tahmini için bir YSA algoritması ve adaptif kontrol için yeni bir Anahtarlamalı Adaptif Kontrol (AAK) yapısı kullanılarak, denge robotunun bulunduğu farklı yüzeylerde dengesini sürdürebilmesi ve hareket kabiliyetlerinin artırılması amaçlanmıştır.

Denge robotunda, ilk olarak klasik denetleyici algoritmaları farklı sürtünmeli ve gevşek zeminlerde uygulanarak denge performansları izlenmiştir. Düz ve gevşek zeminler üzerinde yapılan denge testleri sonucu MDR'nin iki teker üzerinde denge durumunu sürdürebilmesi için denetleyici parametrelerinin robotun bulunduğu yüzeye göre adaptif olarak değişmesi gerektiği belirlenmiştir. Robota ait denetleyici parametresinin değişmesi gerektiği M1, M3 ve M8 yüzeyleri için ele alınan P, PI, PD ve PID tipi denetleyicilerin IAE kontrol performansı dikkate alınarak önceki bölümlerde ayrıntılı olarak gösterilmiştir. MDR sisteminin IAE kontrol performans değerlendirmesi Çizelge 5.3'te verilmiştir. Bu çizelge ayrıntılı olarak incelenirse robotun denetleyici parametrelerinin yüzeye göre değişmesi gerektiği net bir şekilde görülebilir. Burada ki en önemli problem robotun bulunduğu yüzeyi nasıl öğrenebileceğidir. Robotların buldukları çevreyi algılaması ve otonom olarak buna tepki vermesi için birçok sensör grubundan faydalanılmaktadır. Örneğin yüksek çözünürlüklü pahalı kameralar veya pahalı lazer sensörler robotik görme ve algılamada sıklıkla kullanılan sensörlerdir. Bu tezde geliştirilen YSA tabanlı AAK sayesinde maliyetli sensörleri kullanmak yerine robotun yapısında mevcut olan düşük maliyetli MEMS tabanlı MPU-6050 sensör grubundan elde edilen eğim açısı, robota ait motorlardaki enkoderlerden elde edilen yerdeğiştirme bilgisi ve kontrolör çıkışı gibi veriler kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan bu verilerin elde edilmesi ve bir mikroişlemci üzerinde gerçek zamanlı olarak işlenmesi lazer veya kamera gibi sensörlere nazaran oldukça basittir.

Geliştirilen YSA tabanlı AAK algoritmasının klasik yapıdaki kontrolör algoritmasına göre üstünlükleri elde edilen gerçek zamanlı sonuçlarla gösterilmiştir. Aşağıdaki Çizelge 6.1'de MDR sisteminde uygulanan klasik denetleyici ve geliştirilen

YSA tabanlı AAK algoritmalarının farklı yüzeylerdeki kontrol performansının değerlendirilmesi verilmiştir.

Çizelge 6.1. MDR'nin klasik kontrolör ve YSA tabanlı AAK performans değerlendirilmesi

		Çakıl	Kum
Eğim Açısı Değişimi	Klasik Kontrolör	$-8^{\circ} \leq \Psi \leq 7^{\circ}$	$-6^{\circ} \leq \Psi \leq 6^{\circ}$
	ANN tabanlı AAK	$-7^{\circ} \leq \Psi \leq 5^{\circ}$	$-4^{\circ} \leq \Psi \leq 4^{\circ}$
Yerdeğiştirme Değişimi	Klasik Kontrolör	$-8 \text{ cm} \leq X \leq 5 \text{ cm}$	$-3 \text{ cm} \leq X \leq 3 \text{ cm}$
	ANN tabanlı AAK	$-3 \text{ cm} \leq X \leq 3 \text{ cm}$	$-1 \text{ cm} \leq X \leq 2 \text{ cm}$
Kontrolör Çıkışı Değişimi	Klasik Kontrolör	$-5V \leq V \leq 5V$	$-3V \leq V \leq 4V$
	ANN tabanlı AAK	$-2.5V \leq V \leq 2.5V$	$-2.5V \leq V \leq 2.5V$

Çizelge 6.1'de de görüldüğü gibi önerilen YSA tabanlı AAK yapısı klasik kontrol yapısından daha iyi sonuç vermektedir. Aynı zamanda MDR sisteminin kontrolör çıkışındaki değişimi önemli ölçüde azaltılarak sistemin enerji verimliliği de önemli ölçüde artırılmıştır. Böylece MDR sisteminin daha uzun süreli çalışabilmesi sağlanmıştır.

MDR sisteminin sahip olduğu arayüz yazılımı sayesinde gerçek zamanlı olarak denetleyici parametreleri değiştirilebilmekte ve izlenebilmektedir. Bu yönüyle de değerlendirildiğinde araştırmacılar için gerçek zamanlı birçok kontrol algoritmasının uygulanabileceği esnekliğe de sahiptir.

Ayrıca, MDR sistemi için hareket kontrol algoritması ve yeni bir PI-V denetleyici algoritması da geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmalarının hepsi robotun üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanmış ve detayları da tez çalışmasının ilgili bölümlerinde verilmiştir.

MDR sistemi üzerinde geliştirilen tüm denetleyici algoritmaları gerçek zamanlı olarak Cortex M3 tabanlı STM32F103RB bir GKB aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Kullanılan GKB üzerinde MDR sisteminin kontrolü için gerekli olan bütün sistem donanımları mevcut olduğu için esnek bir şekilde programlanabilmekte ve robot sistemine ilave özellikler hızlı bir şekilde kazandırılabilir.

Sonuç olarak gerçek zamanlı olarak birçok yeni kontrol algoritmasının üzerinde yürütülebileceği, ilave özelliklerin eklenebileceği bir MDR sistemi oluşturulmuştur. Böylece araştırmacıların üzerinde aktif olarak çalışabileceği, servis hizmetlerinde veya

farklı amaçlar için de kullanılabilen araştırma ve geliştirmeye açık bir MDR sistemi literatüre kazandırılmıştır.

6.2. Öneriler

MDR'na ait geliştirilen AAK algoritmasında farklı yüzeyler için farklı denetleyici parametrelerine sahip klasik PID denetleyici yapısının yerine bulanık mantık denetleyicinin kullanılması, sistemin daha etkin bir şekilde kontrolü için önerilebilir. Bu amacın gerçekleştirilebilmesi için MDR sistemimizin elektronik donanımı yeterli kapasiteye sahiptir.

MDR sisteminde yüzey tahmini için kullanılan YSA tahmin edicisi yerine Destek Vektör Makinaları, Adaboost, Karar Ağaçları veya hibrit yapıda olan farklı tahmin edici yapıları kullanılarak sistemin daha güçlü olması sağlanabilir.

MDR sistemi için geliştirilen IMU tasarımı esnek olarak kullanılabilmesi için İHA'nın oto pilot algoritmalarının geliştirilmesine de imkân sağlamaktadır. Bu yönüyle ele alındığında tasarlanan IMU ilgili araştırmacılar için İHA tasarımında da kullanılabilir.

Geliştirilen YSA tabanlı tahmin edici AAK yapısı farklı robotik uygulamalar için tahmin etme yeteneği açısından oldukça caziptir. Çünkü burada kullanılan YSA tahmin edicisi robotik alanında kullanılan yüksek maliyetli sensörlerin yerini alabilecek şekilde tasarlanmıştır. Böylece çok az maliyetle farklı görevlerin icrasında aktif olarak kullanılacaktır. Bu yönüyle araştırmacılar için oldukça cazip olabilecek bir esnekliğe de sahiptir.

Bunlara ilave olarak MDR sistemi üzerine ilave donanımlar eklenirse farklı amaçlar için kullanılabilen robotik yapılar da oluşturulabilir. Örneğin, bu robota ilave kollar eklenirse belirli görevleri icra edebilen taşıma aracı olarak kullanılabilir. Aynı zamanda bu robotun esnek hareket yeteneği sayesinde bir yerin eş zamanlı haritasında da aktif olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Abeygunawardhana, P. K. W. ve Murakami, T., 2009, Workspace control of two wheel mobile manipulator by resonance ratio control, *In Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on*, 1270-1275.
- Adhikari, B., Gurung, D., Kunwar, G. S. ve Gyawali, P., 2011, FPGA control of a mobile inverted pendulum robot, *Journal of the Institute of Engineering*, 8 (1-2), 188-196.
- Ahn, J. K. ve Jung, S., 2014, Development of a two-wheel mobile manipulator: balancing and interaction control, *Cambridge Journals, Robotica*, 32 (7), 1135-1152.
- Ambrose, R. O., Savely, R. T., Goza, S. M., Strawser, P., Diftler, M. A., Spain, I. ve Radford, N., 2004, Mobile manipulation using NASA's robonaut, *Robotics and Automation, IEEE International Conference on, ICRA*, 2104-2109.
- Anderson, D. P., 2003, nBot balancing robot, <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>: [10.06.2015].
- Anonim, 2015, Segway, <https://www.segway.com.tr/>: [10.06.2015].
- Anonim, 2017, Floor testing and FAQ'S, <http://www.floorslip.co.uk/floor-test-with-pendulum-tester.html>: [01.08.2017].
- Astrom, K., Borisson, U., Ljung, L. ve Wittenmark, B., 1977, Theory and applications of self-tuning regulators, *Automatica*, 13, 457-476.
- Aström, K. J. ve Wittenmark, B., 1973, On self-tuning regulators, *Automatica*, 9, 185-199.
- Åström, K. J. ve Wittenmark, B., 2013, Adaptive control, Courier Corporation, p. 1-590.
- Athans, M. ve Chang, C. B., 1976, Adaptive estimation and parameter identification using multiple model estimation algorithm (No. TN-1976-28), *Massachusetts Institute of Technology Lexington Lincoln Lab.* , 1-90.
- Bellman, R. E., 1978, An introduction to artificial intelligence: can computers think?, *San Francisco: Boyd & Fraser Publishing Company*.
- Bobál, V., Böhm, J., Fessler, J. ve Macháček, J., 2006, Digital self-tuning controllers: algorithms, implementation and applications, Springer Science & Business Media, p. 1-328.
- Brooks, R., Aryananda, L., Edsinger, A., Fitzpatrick, P., Kemp, C. C., O'Reilly, U. M., Jara, E. T., Varshavskaya, P. ve Weber, J., 2004, Sensing and manipulating built-for-human environments, *International Journal of Humanoid Robotics*, 01 (01), 1-28.
- Chalam, V. V., 1987, Adaptive control systems: techniques and applications, Marcel Dekker, Inc., p. 1-544.
- Charniak, E. ve McDermott, D., 1985, Introduction to artificial intelligence, *Addison-Wesley*.
- Chee, O. Y. ve Abidin, M. S. b. Z., 2006, Design and development of two wheeled autonomous balancing robot, *In Research and Development, 2006. SCOReD 2006. 4th Student Conference on*, Shah Alam, Selangor, Malaysia, 169-172.
- Chiu, C.-H., Peng, Y.-F. ve Lin, Y.-W., 2011a, Robust intelligent backstepping tracking control for wheeled inverted pendulum, *Soft Computing*, 15 (10), 2029-2040.
- Chiu, C. H., Lin, Y. W. ve Lin, C. H., 2011b, Real-time control of a wheeled inverted pendulum based on an intelligent model free controller, *Elsevier, Mechatronics*, 21 (3), 523-533.

- Choi, D. ve Oh, J. H., 2008, Human-friendly motion control of a wheeled inverted pendulum by reduced-order disturbance observer, *In Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, Pasadena, CA, USA.
- Dai, F., Gao, X., Jiang, S., Guo, W. ve Liu, Y., 2015, A two-wheeled inverted pendulum robot with friction compensation, *Mechatronics*, 30, 116-125.
- Delgado, S., Gajbhiye, S. ve Banavar, R. N., 2015, Reduced equations of motion for a wheeled inverted pendulum, *IFAC-PapersOnLine*, 328-333.
- Egardt, B., 1979, Stability of adaptive controllers, *Springer Verlag, New York*.
- Elmas, Ç., 2007, Yapay zeka uygulamaları, *Seçkin Yayıncılık, Ankara*.
- Enginoğlu, O., 2012, Design and Control of Balancing Robot, *Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University*, 1-82.
- Ertel, W., 2011, Introduction to artificial intelligence, *Springer Science & Business Media*.
- Flasiński, M., 2016, Introduction to artificial intelligence, *Springer international publishing switzerland 2016*, Springer.
- Floreano, D. ve Mattiussi, C., 2008, Bio-inspired artificial intelligence theories, methods and technologies *MIT Press*.
- Ghani, N. M. A., Naim, F. ve Yon, T. P., 2011, Two wheels balancing robot with line following capability, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 634-638.
- Goher, K. M. ve Tokhi, M. O., 2010, Development, modeling and control of a novel design of two-wheeled machines, *Cyber Journals Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Robotics and Control (JSRC)*, 6-16.
- Grasser, F., D'arrigo, A., Colombi, S. ve Ruffer, A., 2002, JOE: a mobile, inverted pendulum, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49 (1), 107-114.
- Guner, U., 2016, Design and implementation of flexible model based adaptive control algorithm for real time systems, *Yıldırım Beyazıt Üniversitesi*.
- Guo, Z.-Q., Xu, J.-X. ve Lee, T. H., 2014, Design and implementation of a new sliding mode controller on an underactuated wheeled inverted pendulum, *Journal of the Franklin Institute*, 351 (4), 2261-2282.
- Güllü, A., 2017, Labirentlerde yapay zeka tabanlı yön bulma algoritmaları kullanan bir gezgin robot geliştirilmesi, *Trakya Üniversitesi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Haugeland, J., 1985, Artificial intelligence: The very idea, *MIT Press*.
- Haykin, S., 2009, Neural networks and learning machines, *Upper Saddle River, NJ, USA, Pearson Education, Inc*.
- Honeywell, 2013, 3 -axis digital compass IC HMC5883L (Technical datasheet of HMC5883L) Inc., H. I.
- Huang, C.-H., Wang, W.-J. ve Chiu, C.-H., 2011, Design and implementation of fuzzy control on a two-wheel inverted pendulum, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (7), 2988-3001.
- Huang, J., Guan, Z.-H., Matsuno, T., Fukuda, T. ve Sekiyama, K., 2010, Sliding-mode velocity control of mobile-wheeled inverted-pendulum systems, *Robotics, IEEE Transactions on*, 26 (4), 750-758.
- Ioannou, P. A. ve Sun, J., 2012, Robust adaptive control, Courier Corporation.
- Isidori, A., Morconi, L. ve Serrani, A., 2003, Robust autonomous guidance an internal model approach, Springer-Verlag London Ltd.

- Jung, S. ve Kim, S. S., 2008, Control experiment of a wheel-driven mobile inverted pendulum using neural network, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16 (2), 297-303.
- Kalman, R. E., 1958, Design of a self optimizing control system, *Trans. ASME*, 80, 481-492.
- Kalra, S., Patel, D. ve Stol, K., 2007, Design and hybrid control of a two wheeled robotic platform, *In Proceedings 2007 Australasian Conference on Robotics and Automation*, Brisbane, Australia.
- Kanthalakshmi, S. ve Manikandan, V., 2010, Genetic algorithm based self tuning regulator, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2 (12), 7719-7728.
- Kayaönü, E., 2000, Yapay zekanın teorik temelleri, *İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Khooban, M. H., Alfi, A. ve Abadi, D. N. M., 2013, Teaching-learning-based optimal interval type-2 fuzzy PID controller design: a nonholonomic wheeled mobile robots, *Cambridge Journals, Robotica*, 31 (7), 1059-1071.
- Kim, H. W. ve Jung, S., 2016, Control of a two-wheel robotic vehicle for personal transportation, *Cambridge Journals, Robotica*, 34 (5), 1186-1208.
- Kim, Y., Kim, S. H. ve Kwak, Y. K., 2005, Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 44 (1), 25-46.
- Konvalin, C., 2009, Compensating for tilt, hard iron and soft iron effects, http://www.ckdevices.com/datasheets/MTD-0802_1.2_Magnetometer_Calibration.pdf.
- Kuindersma, S. R., Hannigan, E., Ruiken, D. ve Grupen, R. A., 2009, Dexterous mobility with the uBot-5 mobile manipulator, *Advanced Robotics, 2009. ICAR 2009. International Conference on*, 1-7.
- Kulaksız, A. A., 2007, Maksimum güç noktası izleyicili ve UVM inverterli fotovoltaik sistemin yapay sinir ağları tabanlı kontrolü, *Selçuk Üniversitesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 201.
- Kumar, P., Mehrotra, O. N. ve Mahto, J., 2012, Controller design of inverted pendulum using pole placement and LQR, *International Journal Of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 1 (4), 532-538.
- Kurzweil, R., 1990, The age of intelligent machines, *MIT Press*.
- Landau, I. D., Lozano, R., M'Saad, M. ve Karimi, A., 2011, Adaptive control: algorithms, analysis and applications, *Springer Science & Business Media*.
- Landau, Y. D., 1979, Adaptive control-the model reference approach, *Marcel Dekker, New York*.
- Lee, G. H. ve Jung, S., 2013, Line tracking control of a two-wheeled mobile robot using visual feedback, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10 (3), 1-8.
- Lee, H. ve Jung, S., 2012, Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors, *Elsevier, Mechatronics*, 22 (1), 95-105.
- Lee, H. J. ve Jung, S., 2010, Guidance control of a wheeled mobile robot with human interaction based on force control, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 8 (2), 361-368.
- Li, Z. ve Xu, C., 2009, Adaptive fuzzy logic control of dynamic balance and motion for wheeled inverted pendulums, *Elsevier, Fuzzy Sets and Systems*, 160 (12), 1787-1803.
- Li, Z. ve Zhang, Y., 2010, Robust adaptive motion/force control for wheeled inverted pendulums, *Automatica*, 46 (8), 1346-1353.

- Li, Z. ve Yang, C., 2012, Neural-adaptive output feedback control of a class of transportation vehicles based on wheeled inverted pendulum models, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20 (6), 1583-1591.
- Li, Z., Yang, C. ve Fan, L., 2013, Advanced control of wheeled inverted pendulum systems, Springer Science & Business Media.
- Maiti, D., Chakraborty, M., Acharya, A. ve Konar, A., 2008, Design of a fractional-order self-tuning regulator using optimization algorithms, *In Computer and Information Technology, 2008. ICCIT 2008. 11th International Conference on*, , Khulna, Bangladesh, 470-475.
- Nabiyev, V. V., 2010, Yapay zeka, *Seçkin Yayıncılık, Ankara*.
- Nasir, A. N. K., Ahmad, M. A. ve Ismail, R. R., 2010, The control of a highly nonlinear two-wheels balancing robot: A comparative assessment between LQR and PID-PID control schemes, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 227-232.
- Nawawi, S. W., Ahmad, M. N. ve Osman, J. H. S., 2006, Control of two-wheels inverted pendulum mobile robot using full order sliding mode control, *Proceedings of International Conference on Man-Machine Systems 2006*, Langkawi, Malaysia, 1-6.
- Negnevitsky, M., 2005, Artificial intelligence: a guide to intelligent systems, *Pearson Education*, p. 1-435.
- Nilsson, N. J., 1998, Artificial intelligence: A new synthesis, *Morgan Kaufmann*, p.
- Noh, J. S., Lee, G. H. ve Jung, S., 2010, Position control of a mobile inverted pendulum system using radial basis function network, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 8 (1), 157-162.
- Ooi, R. C., 2003, Balancing a two-wheeled autonomous robot, Final Year Thesis, *University of Western Australia*.
- Park, J. H. ve Jung, S., 2013, Development and control of a single-wheel robot: practical mechatronics approach, *Mechatronics*, 23 (6), 594-606.
- Park, S., Han, Y. ve Hahn, H., 2009, Balance control of a biped robot using camera image of reference object, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 7 (1), 75-84.
- Parks, P., 1966, Liapunov redesign of model reference adaptive control systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11 (3), 362-367.
- Peterka, V., 1984, Predictor-based self-tuning control, *Automatica*, 20 (1), 39-50.
- Poole, D., Mackworth, A. K. ve Goebel, R., 1998, Computational intelligence: a logical approach, *Oxford University Press*.
- Raffo, G. V., Ortega, M. G., Madero, V. ve Rubio, F. R., 2015, Two-wheeled self-balanced pendulum workspace improvement via underactuated robust nonlinear control, *Control Engineering Practice*, 44, 231-242.
- Ratajczak, A. ve Tchoń, K., 2011, Motion planning of a balancing robot with threefold sub-tasks: an endogenous configuration space approach, *In Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, Shanghai, China, 6096-6101.
- Reyhanoğlu, M., schaft, A., H., M. N. ve Kolmanovsky, I., 1999, Dynamics and control of a class of underactuated mechanical systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* 44 (9), 1663-1671.
- Rich, E., 1983, Artificial intelligence, *McGraw-Hill, New York*.
- Rich, E. ve Knight, K., 1991, Artificial intelligence, *McGraw-Hill*.
- Russell, S. J. ve Norving, P., 1995, Artificial intelligence: a modern approach, *Prentice hall Englewood Cliffs*.

- Salerno, A. ve Angeles, J., 2007, A new family of two-wheeled mobile robots: modeling and controllability, *IEEE Transactions on Robotics*, 23 (1), 169-173.
- Sastry, S. ve Bodson, M., 1989, Adaptive control : stability, convergence, and robustness, Prentice Hall PTR.
- Slotine, J. J. E. ve Li, W., 1991, Applied nonlinear control, Englewood Cliffs, NJ: prentice-Hall.
- Solis, J., Nakadate, R., Yoshimura, Y., Hama, Y. ve Takanishi, A., 2009, Development of the two-wheeled inverted pendulum type mobile robot WV-2R for educational purposes, *In Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on* St. Louis, USA, 2347-2352.
- Strandberg, L., 1983, Ergonomics applied to slipping accidents, *Ergonomic of workstation design*, 201-208.
- Sukvichai, K. ve Parnichkun, M., 2014, Double-level ball-riding robot balancing: From system design, modeling, controller synthesis, to performance evaluation, *Mechatronics*, 24 (5), 519-532.
- Sun, F., Yu, Z. ve Yang, H., 2014, A design for two-wheeled self-balancing robot based on kalman filter and LQR, *In Mechatronics and Control (ICMC), 2014 International Conference on*, Jinzhou, China, 612-616.
- Sundin, C. ve Thorstenson, F., 2012, Autonomous balancing robot: design and construction of a balancing robot, Master of Science Thesis *Chalmers University of Technology*.
- Takei, T., Imamura, R. ve Yuta, S., 2009, Baggage transportation and navigation by a wheeled inverted pendulum mobile robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56 (10), 3985-3994.
- Tao, G., 2003, Adaptive control design and analysis *John Wiley & Sons*.
- Tao, G. ve Lewis, F. L. E., 2013, Adaptive control of nonsmooth dynamic systems, Springer Science & Business Media.
- Teeyapan, K., Wang, J., Kunz, T. ve Stilman, M., 2010, Robot limbo: optimized planning and control for dynamically stable robots under vertical obstacles, *In Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, Anchorage, AK, USA, 4519-4524.
- Tezel, G., 2007, Biyomedikal işaretlerin yeni bir adaptif aktivasyon fonksiyonlu yapay sinir ağı ile sınıflandırılması, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Thao, N. G. M., Nghia, D. H. ve Phuc, N. H., 2010, A PID backstepping controller for two-wheeled self-balancing robot, *In Strategic Technology (IFOST), 2010 International Forum on*, Ulsan, Korea (South), Korea (South), 76-81.
- Tirmant, H., Baloh, M., Vermeiren, L., Guerra, T. M. ve Parent, M., 2002, B2, an alternative two wheeled vehicle for an automated urban transportation system, *Intelligent Vehicle Symposium, IEEE*, 594-603.
- Tomašić, T., Demetlika, A. ve Crneković, M., 2012, Self-balancing mobile robot tilter, *Transactions of FAMENA*, 36 (3), 23-32.
- Tsai, C. C., Chan, C. K. ve Fan, Y. H., 2008, Planned navigation of a self-balancing autonomous service robot, *In Advanced robotics and Its Social Impacts, 2008. ARSO 2008. IEEE Workshop on*, Taipei, Taiwan, 1-6.
- Tsai, C. C., Huang, H. C. ve Lin, S. C., 2010a, Adaptive neural network control of a self-balancing two-wheeled scooter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (4), 1420-1428.
- Tsai, C. C., Ju, S. Y. ve Hsieh, S. M., 2010b, Trajectory tracking of a self-balancing two-wheeled robot using backstepping sliding-mode control and fuzzy basis function

- networks, *In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, Taipei, Taiwan, 3943-3948.
- Unluturk, A., Aydogdu, O. ve Guner, U., 2013, Design and PID control of two wheeled autonomous balance robot, *2013 International Conference on Electronics, Computer and Computation (Icecco)*, 260-264.
- Unluturk, A. ve Aydogdu, O., 2017, Adaptive control of two-wheeled mobile balance robot capable to adapt different surfaces using a novel artificial neural network-based real-time switching dynamic controller, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14 (2), 172988141770089.
- Vikas, V., Godowski, J. ve Crane, C., 2010, Balancing robots using vestibular dynamic inclinometer, *Florida Conference on Recent Advances in Robotics, FCRAR 2010*, Jacksonville, Florida, 1-6.
- Wei, R., Tao, Z., Hai-yun, Z., Lei-gang, W., Yong-jie, Z., Meng-kai, L., Hui-feng, L. ve Jing-wei, S., 2013, A research on calibration of low precision MEMS inertial sensors, *In control and decision conference (CCDC), 2013 25th Chinese*, Guiyang, Chinese.
- Welch, G. ve Bishop, G., 2001, An introduction to the Kalman Filter. Science, U. o. N. C. a. C. H. D. o. C.
- Whitaker, H. P., Yamron, J. ve Kezer, A., 1958, Design of model-reference adaptive control systems for aircraft, *Massachusetts Institute of Technology, Instrumentation Laboratory*.
- Winston, P. H., 1992, Artificial intelligence, *Addison-Wesley*.
- Wu, J., Zhang, W. ve Wang, S., 2012, A two-wheeled self-balancing robot with the fuzzy PD control method, *Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 1-13.
- Xu, J.-X., Guo, Z.-Q. ve Lee, T. H., 2013, Design and implementation of a takagi-sugeno-type fuzzy logic controller on a two-wheeled mobile robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (12), 5717-5728.
- Xu, J.-X., Guo, Z.-Q. ve Lee, T. H., 2014a, Design and implementation of integral sliding-mode control on an underactuated two-wheeled mobile robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61 (7), 3671-3681.
- Xu, J.-X., Guo, Z.-Q. ve Lee, T. H., 2014b, Design and implementation of integral sliding-mode control on an underactuated two-wheeled mobile robot, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 61 (7), 3671-3681.
- Yamamoto, Y., 2008, NXTway-gs (self-balancing two-wheeled robot) Controller Design. Cybernet Systems Co.
- Yang, C., Li, Z., Cui, R. ve Xu, B., 2014, Neural network-based motion control of an underactuated wheeled inverted pendulum model, *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 25 (11), 2004-2016.
- Ye, W., Li, Z., Yang, C., Sun, J., Su, C. Y. ve Lu, R., 2016, Vision-based human tracking control of a wheeled inverted pendulum robot, *IEEE Trans Cybern*, 46 (11), 2423-2434.
- Yegnanarayana, B., 2009, Artificial neural networks, PHI Learning Pvt. Ltd.
- Yong, Q., Xizhe, Z., Xiaoyu, W., Tian, L. ve Jie, Z., 2009, Adaptive trajectory tracking control of two-wheeled self-balance robot, *High Technology Letters*, 15 (1), 38-43.
- Yu, G. R., Leu, Y. K. ve Huang, H. T., 2017, PSO-based fuzzy control of a self-balancing two-wheeled robot. In Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (IFSA-SCIS), 2017 Joint 17th World Congress of International Otsu, Japan, Japan, IEEE: 1-5.

- Yue, M., An, C., Du, Y. ve Sun, J., 2016, Indirect adaptive fuzzy control for a nonholonomic/underactuated wheeled inverted pendulum vehicle based on a data-driven trajectory planner, *Fuzzy Sets and Systems*, 290, 158-177.
- Zheng, N., Zhang, Y., Guo, Y. ve Zhang, X., 2017, Hierarchical fast terminal sliding mode control for a self-balancing two-wheeled robot on uneven terrains, *Control Conference (CCC), 2017 36th Chinese*, Dalian, China, China.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyad : Ali ÜNLÜTÜRK
Uyruğu : TC
Doğum Yeri ve Tarihi : Seydişehir/1983
Telefon : +90 332 223 21 74
Faks : +90 332 241 06 35
e-Mail : unluturkali@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Mahmut Esat Anadolu Lisesi, Seydişehir, Konya	2002
Üniversite	: Atatürk Üniversitesi, Erzurum	2008
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Konya	2012
Doktora	: Selçuk Üniversitesi	2017

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2008-2009	Türk Telekom	Mühendis
2009-2012	İçişleri Bakanlığı	Mühendis
2012-2012	Erzurum Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012-2017	Selçuk Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2017-...	Erzurum Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Gerçek Zamanlı Robotik Uygulamalar, Akıllı Sistemler, Denge Sistemleri, Atalet Moment Ölçüm Birimi (IMU) Tasarımı ve Uygulaması

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

SCI-expanded Kapsamındaki Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Unluturk, A., & Aydogdu, O., 2017, Adaptive control of two-wheeled mobile balance robot capable to adapt different surfaces using a novel artificial neural network-based real-time switching dynamic controller, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 14, Issue 2. pp. 1-9. (Doktora tezinden yapılmıştır)
2. Unluturk, A., & Aydogdu, O., 2016, Novel mobile balance robot for estimating surfaces, Electronics World, 122(1966), pp. 44-47. (Doktora tezinden yapılmıştır)

Uluslararası Bildiriler

1. Unluturk, A., Guner, U., & Aydogdu, O., 2016, The real time remote motion control of two wheeled mobile balance robot by using video streaming, MATEC Web of Conferences, Vol. 42, EDP Sciences. (Doktora tezinden yapılmıştır)
2. Guner, U., Canbolat, H., & Unluturk, A., 2015, Design and implementation of adaptive vibration filter for MEMS based low cost IMU, In Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2015 9th International Conference on, pp. 130-134, IEEE.
3. Unluturk, A., Aydogdu, O., & Guner, U., 2013, Design and PID control of two wheeled autonomous balance robot, In Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2013 International Conference on, pp. 260-264, IEEE. (Doktora tezinden yapılmıştır)
4. Unluturk, A., Aydogdu, O., 2012, Design and implementation of a mobile robot used in bomb research and setup disposal, Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2103 International Conference on, pp. 1-5, IEEE. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

Ulusal Bildiriler

1. Unluturk, A., Guner, U., & Aydogdu, O., 2014, Yeni bir PI-V tipi denetleyici Tasarımı ve denge robotu üzerinde uygulanması, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, TOK 2014, Kocaeli, Türkiye. (Doktora tezinden yapılmıştır)
2. Guner, U., Canbolat, H., Unluturk, A., & Aydogdu, O., 2015, MEMS tipi sensörler kullanılarak genel amaçlı atalet ölçüm birimi Tasarımı ve kalibrasyonu, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, TOK 2015, Denizli, Türkiye.