



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ TEKERLEKLİ BİR ROBOTUN LAGRANGE
ANALİZİ VE PID İLE KONTROLÜ**

GÜÇHAN TAŞLIALAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

KAHRAMANMARAŞ 2019

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ TEKERLEKLİ BİR ROBOTUN LAGRANGE
ANALİZİ VE PID İLE KONTROLÜ

GÜÇHAN TAŞLIALAN

Bu tez,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2019

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Güçhan Taşlıalan tarafından hazırlanan “İKİ TEKERLEKLİ BİR ROBOTUN LAGRANGE ANALİZİ VE PID İLE KONTROLÜ” adlı bu tez, jürimiz tarafından 25/06/2019 tarihinde oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Orhan Erdal AKAY (DANIŞMAN)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özdeş ÇERMİK (ÜYE)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Selçuk UĞURLUAY (ÜYE)

Tarım Makine Sistemleri Anabilim Dalı
Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YAZICI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Güçhan TAŞLIALAN

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İKİ TEKERLEKLİ BİR ROBOTUN LAGRANGE ANALİZİ VE PID İLE KONTROLÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

GÜÇHAN TAŞLIALAN

ÖZET

Literatürde ‘Segway’ ismi ile bilinen ‘İki Tekerlekli Robot’; yüksek hareket kabiliyeti sayesinde dar alanlarda rahat ve kararlı hareket edebilmektedir. Denge robotu temelinde geliştirilebilen robotlar, yüksek hareket kabiliyetine ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılabilir özelliklere sahiptirler. Çalışmada, iki serbestlik derecesine sahip olan iki tekerlekli robotun lagrange analizi gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan dinamik denklemleri elde edilmiştir. Analiz, klasik bir dinamik problemi olan ‘Ters Sarkaç Modellemesi’ temelinde gerçekleştirilmiştir. Dinamik denklemler Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve robotun sadece açı dengesini kontrol eden bir PID kontrolörün kontrol sistemi tasarlanarak robotun dengesi test edilmiştir. Test sonucunda modelin robot dengesini sağlamada yeterli olduğu görülmüştür. Sonrasında dinamik denklemler yine Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve açı kontrolü ile hız kontrolü sağlayan iki ayrı PID kontrolörün bulunduğu bir kontrol sistemi tasarlanarak robot tekrar test edilmiştir. Tasarlanan modelin hem robot dengesini sağladığı hem de robotun hız kontrolünü gerçekleştirdiği görülmüştür. Robotun açı ve hız kontrolü için oluşturulan dinamik modele alternatif olması amacıyla dinamik denklemlerin olmadığı yeni bir model tasarlanmıştır. Yeni modelde, robotun açı ve hız kontrolü doğrudan kontrolörler ile gerçekleştirilmiştir. İlk önce, robotun sadece açı kontrolü için bir P-PD kontrolör tasarlanmış ve Working Model2D (WM2D) ara yüzünde test edilmiştir. Test sonucunda kontrolörün robot dengesini sağlamada yeterli olduğu görülmüştür. Sonrasında robotun açı ile hız kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için bir P-PID kontrolör tasarlanmış ve WM2D ara yüzünde test edilmiştir. Modelin hem robot dengesini sağladığı hem de robotun hız kontrolünü gerçekleştirdiği görülmüştür. Test sonuçları karşılaştırıldığında, dinamik denklemler kullanılmadan tasarlanan kontrol sistemlerinin robotun dengesini sağlamada, dinamik denklemler kullanılarak tasarlanan kontrol sistemlerine alternatif olabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Lagrange, Matlab, Segway, Ters sarkaç, WM2D

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Haziran/2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Orhan Erdal AKAY,

Sayfa sayısı: 76



LAGRANGE ANALYSIS AND PID CONTROL OF A TWO-WHEELED ROBOT

(M.Sc. THESIS)

GÜÇHAN TAŞLIALAN

ABSTRACT

‘Two Wheeled Robot’, known as ‘Segway’ in the literature, is able to move smoothly and steadily in narrow spaces thanks to its high mobility. Robots, which can be developed on the basis of balance robot, have features that can be used in areas where high mobility is needed. In this study, lagrange analysis of two wheeled robot with two degrees of freedom was performed and nonlinear dynamic equations were obtained. The analysis was carried out on the basis of a classical dynamic problem ‘Inverse Pendulum Modeling’. Dynamic equations are transferred to Matlab-Simulink interface and robot stability tested by designing the control system of a PID controller that only controls the angle balance of the robot. As a result of the test, the model was found to be sufficient to maintain robot stability. Then, dynamic equations were again transferred to Matlab-Simulink interface and the robot was retested by designing a control system with two separate PID controllers providing angle control and speed control. It was seen that the designed model provides both robot stability and speed control of the robot. A new model without dynamic equations is designed to be an alternative to the dynamic model created for angle and speed control of the robot. In the new model, the robot's angle and speed control is carried out directly with the controllers. First, a P-PD controller was designed for only angle control of the robot and tested on the Working Model2D (WM2D) interface. As a result of the test, the controller was found to be sufficient to maintain robot stability. A P-PID controller was then designed and tested on the WM2D interface to enable the robot to perform angle and speed control. It was seen that the model provides both robot stability and speed control of the robot. When the test results were compared, it was seen that the control systems designed without using dynamic equations could be an alternative to the control systems designed using dynamic equations in maintaining the stability of the robot.

Keywords: Lagrange, Matlab, Segway, Inverted pendulum, WM2D

University of Kahramanmaras Sutcu Imam

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, June/2019

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Orhan Erdal AKAY,

Page Numbers: 76



TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Orhan Erdal AKAY'a, her fırsatta birikimlerinden istifade ettiğim tüm bölüm hocalarıma teşekkür ederim. Bu günlere gelmemde her türlü maddi ve manevi desteklerini gördüğüm aileme ve çalıőmalarımın olumlu neticelenmesini sabırla bekleyen değerli eőim Aslıhan hanıma sonsuz teőekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. GENEL BİLGİLER.....	15
3.1. Ters Sarkaç Modellemesi.....	15
3.2. Lagrange Yöntemi	15
3.3. Kontrol Sistemi	16
4. İKİ TEKERLEKLİ ROBOTUN LAGRANGE ANALİZİ.....	17
4.1. Kinematik Model	17
4.2. Dinamik Model	21
5. İKİ TEKERLEKLİ ROBOTUN FARKLI KONTROL SİSTEMLERİ VE SİMÜLASYONLARI.....	22
5.1. Dinamik Denklemler Kullanılan Açılı Geri Beslemeli Kontrol Sistemi ve Simülasyon.....	22
5.2. Dinamik Denklemler Kullanılan Açılı ve Hız Geri Beslemeli Kontrol Sistemi ve Simülasyon.....	26
5.3. Dinamik Denklemler İçermeyen Açılı Geri Beslemeli Kontrol Sistemi ve Simülasyon.....	29
5.4. Dinamik Denklemler İçermeyen Açılı ve Hız Geri Beslemeli Kontrol Sistemi ve Simülasyon.....	32
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	36
6.1. Dinamik Denklemler Kullanılan Açılı İle Açılı ve Hız Geri Beslemeli Kontrol Sistemleri	36
6.2. Dinamik Denklemler İçermeyen Açılı İle Açılı ve Hız Geri Beslemeli Kontrol Sistemleri	39

Sayfa No

7. SONUÇLAR.....	48
KAYNAKLAR.....	50
EKLER	53
EK A.....	53
EK B	56
EK C	58
ÖZGEÇMİŞ.....	59



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	(a) Grey Walter'in geliştirdiği kaplumbağa, (b) "Shakey" adındaki bilgisayar kontrollü robot	1
Şekil 1.2.	Segway isimli robotun kullanım alanları; (a) kişisel segway robotu [3], (b) asistan segway robotu [4]	3
Şekil 1.3.	(a) Ters sarkaç modeli [5], (b) İki tekerlekli robot modeli [6]	4
Şekil 2.1.	Ters sarkaç modelleri; (a) İki eksenli ters sarkaç sistemi, (b) Ters sarkaç test düzeneği	6
Şekil 2.2.	İki tekerlekli robot modelleri; (a) Kişisel segway robotu, (b) "Joe" isimli robot	7
Şekil 2.3.	Su ve arkadaşlarının tasarladığı iki tekerlekli robot modeli	7
Şekil 2.4.	(a) "B2" isimli robot, (b) Çizgi izlemesi	8
Şekil 2.5.	(a) "MIPS" isimli robot, (b) Tomasic ve arkadaşlarının tasarladığı iki tekerlekli robot modeli	9
Şekil 2.6.	(a) Almeshal ve arkadaşlarının tasarladığı robot, (b) Adeel ve arkadaşlarının tasarladığı robot	10
Şekil 2.7.	(a) eScooter, (b) Çelik'in tasarladığı iki tekerlekli robot modeli	11
Şekil 2.8.	(a) "TWIP" isimli robot, (b) Velazquez ve arkadaşlarının tasarladığı robotun modeli	12
Şekil 2.9.	(a) Yavuz ve arkadaşlarının tasarladıkları robotun Solid Works (SW) ara yüzünde oluşturulan katı modeli, (b) Kontrol momenti jiroskopu.	13
Şekil 3.1.	Ters sarkaç sistemi [37]	15
Şekil 3.2.	Genel kontrol sistemi	16
Şekil 4.1.	İTR modeli	17
Şekil 5.1.	Dinamik denklemler ile oluşturulan açı geri beslemeli BD	23
Şekil 5.2.	Açı geri beslemeli PID kontrolör kazanç katsayıları	24
Şekil 5.3.	Açı geri beslemeli kontrol sistemine ait, dinamik denklemler alt BD	25
Şekil 5.4.	Açı geri beslemeli diyagrama ait nonlineer denklem 1	25

Şekil 5.5.	Açı geri beslemeli diyagrama ait nonlinear denklem 2	25
Şekil 5.6.	Dinamik denklemler ile oluşturulan açı ve hız geri beslemeli BD	27
Şekil 5.7.	Hız geri beslemeli PID kontrolör kazanç katsayıları	28
Şekil 5.8.	Açı ve hız geri beslemeli kontrol sistemine ait, dinamik denklemler alt BD ...	28
Şekil 5.9.	Açı geri beslemeli PID kontrolör kazanç katsayıları	29
Şekil 5.10.	Dinamik denklemler kullanılmadan oluşturulan açı geri beslemeli BD	30
Şekil 5.11.	(a) Açı geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan P-PD denklemi, (b) Açı geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan alt PD denklemi	31
Şekil 5.12.	(a) Açı geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PD kontrolörünün alt oransal ifadesi, (b) Açı geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PD kontrolörünün alt türevsel ifadesi	32
Şekil 5.13.	Dinamik denklemler kullanılmadan oluşturulan açı ve hız geri beslemeli BD	33
Şekil 5.14.	(a) Açı ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan P-PID denklemi, (b) Açı ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan alt PID denklemi	35
Şekil 5.15.	(a) Açı ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PID kontrolörünün alt oransal (P) ifadesi, (b) Açı ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PID kontrolörünün alt integral (I) ifadesi, (c) Açı ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PID kontrolörünün alt türevsel (D) ifadesi	35
Şekil 6.1.	Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)	36
Şekil 6.2.	Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal hız değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)	37
Şekil 6.3.	Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)	37
Şekil 6.4.	İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)	38
Şekil 6.5.	İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)	38
Şekil 6.6.	İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)	39

Şekil 6.7.	Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik (WM2D)	40
Şekil 6.8.	Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal hız değişimini gösteren grafik (WM2D).....	40
Şekil 6.9.	Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik (WM2D)	41
Şekil 6.10.	İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik (WM2D)	42
Şekil 6.11.	İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik (WM2D).....	42
Şekil 6.12.	İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik (WM2D)	42
Şekil 6.13.	“Joe” isimli robotun çalışma durumundaki denge grafiği	43
Şekil 6.14.	(a) Bulanık sinir ağı kontrolörü test sonuçları, (b) Geleneksel PD kontrolörü test sonuçları	44
Şekil 6.15.	“MIPS” isimli robotun çalışma durumundaki denge grafiği	45
Şekil 6.16.	“eScooter” isimli robotun çalışma durumundaki denge grafiği	46
Şekil 6.17.	“KUWAY” isimli robotun çalışma durumundaki denge grafiği	47
Şekil A.1.	Açı ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun açısal değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (Matlab/Simulink).....	53
Şekil A.2.	Açı ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (Matlab/Simulink).....	53
Şekil A.3.	Açı ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (Matlab/Simulink).....	54
Şekil A.4.	Açı ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun açısal değişimini gösteren grafik, referans hız 0,30 m/s (Matlab/Simulink)	54
Şekil A.5.	Açı ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik, referans hız 0,30 m/s (Matlab/Simulink).....	54
Şekil A.6.	Açı ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik, referans hız 0,30 m/s (Matlab/Simulink).....	55
Şekil B.1.	Açı ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (WM2D).....	56

Sayfa No

Şekil B.2. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (WM2D).....	56
Şekil B.3. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (WM2D).....	56
Şekil B.4. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik, referans hız 0,10 m/s (WM2D).....	57
Şekil B.5. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik, referans hız 0,10 m/s (WM2D).....	57
Şekil B.6. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik, referans hız 0,10 m/s (WM2D).....	57
Şekil C.1. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, WM2D arayüzü	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 4.1. İTR parametreleri.....	18
Çizelge 5.1. PID parametreleri.....	23
Çizelge 5.2. Nonlineer denklem parametreleri	26
Çizelge 5.3. P-PD parametreleri.....	30
Çizelge 5.4. P-PD kontrolörü için tanımlanan WM2D parametreleri.....	31
Çizelge 5.5. P-PID parametreleri	34
Çizelge 5.6. P-PID kontrolörü için tanımlanan WM2D parametreleri	34

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

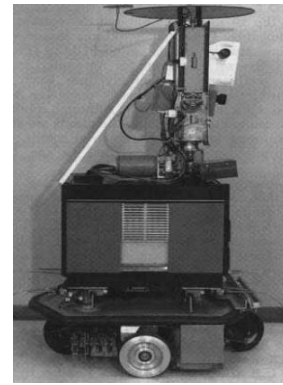
PID	: Proportional, Integral, Derivative
P-PD	: Proportional - Proportional, Derivative
P-PID	: Proportional - Proportional, Integral, Derivative
WM2D	: Working Model2D
SCD	: Serbest Cisim Diyagramı
BD	: Blok Diyagramı
İTR	: İki Tekerlekli Robot
LQR	: Linear Quadratic Regulator
YBM	: Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık
RUR	: Rossum's Universal Robots

1. GİRİŞ

“Robot” kelimesi ilk kez Karel Capek isimli Çekoslovak bir yazarın 1921 yılında yazdığı RUR (Rossum’s Universal Robots) isimli tiyatro oyununda kullanılmıştır. Çekoslovakça’ da “robota” kelimesi “zorla çalıştırılan işçi” manasına gelmektedir. Robot fikri binlerce yıl öncesine kadar uzanır. İlk otomasyon kavramını ise Aristo’nun ortaya attığı kabul edilmektedir. Aristo, M.Ö. 4. yüzyılda şöyle yazmış; “Eğer her araç kendi işini görebilseydi, insan eline ihtiyaç duymadan mekik kendi dokuyabilse ve kendi çalabilseydi, yöneticilerin elemanlara ihtiyacı kalmazdı. Önceki tarihlerde robot kavramının bilinçlerde yer etmesi ile ilerleyen zamanlarda uygulamaya dönük çalışmalara başlanmıştır. 17. ve 18. yüzyıla kadar Avrupa’ da çeşitli özelliklere sahip birçok otomat yapılmıştır. 1953 yılında Grey Walter robot bir kaplumbağa geliştirmiştir. Oval şekilli bu kaplumbağanın hareket etmesi ve yön değiştirmesi iki motorla sağlanıyordu. Kaplumbağa, ufak noktasal ışık kaynaklarının yerleştirildiği karanlık bir odada ışık dedektörleri ile ışığı algılayıp, ışık şiddetine bağlı olarak ışık kaynağına doğru yöneliyor veya ışık kaynağından uzaklaşıyordu. 1954’te George Devol, ilk bilgisayar kontrollü endüstriyel robotun patentini aldı ve Joseph Engleberger ile birlikte Unimation şirketini kurarak General Motors’a üretim hattı için güçlü robot kollar üretmeye başladılar. Böylece endüstriyel robot devrimi başlamış oldu. 1960’ların sonlarında araştırmacılar “Shakey” adında bilgisayar kontrollü bir robot geliştirdiler. Shakey etraftaki eşyalara çarpmadan odalar arasında dolaşabildiği gibi, sesli komutlara göre tahta kutuları üst üste dizabiliyordu [1].



(a)



(b)

Şekil 1.1. (a) Grey Walter’in geliştirdiği kaplumbağa, (b) “Shakey” adındaki bilgisayar kontrollü robot

Robotik alanındaki gelişmeler, malzeme alanındaki gelişmeler paralelinde çok daha kapsamlı ve ivmeli bir hal almıştır. Özellikle 19. yüzyıldan itibaren endüstriyel alanlarda insan gücünün alternatifi olarak çok daha yüksek verimli otomat makineler üretim hatlarında yerini almıştır. İlerleyen zamanlarda robotlar insan hayatının da verimini artırmak adına endüstrinin dışında doğrudan insan yaşamına dâhil olmuşlardır. Artık günümüz dünyasında az enerji harcayan, az yer kaplayan ve kullanımı kolay olan yeni taşıtlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu sayede 21. Yüzyıl başlangıcından itibaren iki tekerlekli denge robotu literatürdeki yerini almıştır. Segway ismi verilen bu robot tüm dünyanın ilgisini çekmiştir. Segway, günümüzde ticari bir boyut kazanmıştır [2]. Bu nedenle büyük alışveriş merkezleri, otoparklar ve hastaneler gibi dar alanlarda yüksek hareket kabiliyeti gerektiren birçok yerde kullanılmaktadır. Şekil 1.2 (a)'da görülen güvenlik görevlisi, normal araç trafiğinin mümkün olmadığı bir alışveriş merkezinde segway robotu sayesinde yapının herhangi bir noktasına her an süratle hareket edebilmekte ve görevini zaman kaybetmeden yerine getirebilmektedir. Yapı içerisindeki bir noktadan diğer bir noktaya hareketi sırasında görevli çok daha az efor harcadığından daha az yorulmakta ve buna bağlı olarak daha verimli çalışabilmektedir. Bu durum hem görevli hem de çevre açısından çok daha olumlu sonuçlar vermektedir. Diğer yandan robotun çalışma esnasında herhangi bir sera etkisine sebep olabilecek bir atık bırakmaması da insanlar ve doğa için bir avantajdır. Segway robotu ayrıca bir asistan olarak da kullanılabilir. Sizinle birlikte mesafesini koruyarak hareket edebilir, alt yapısına bağlı olarak görüntü alabilir, bir şeyler taşıyabilir ve sesleri kayıt altına alabilir. Şekil 1.2 (b)'de görülen segway robotu asistan olarak tasarlanmıştır. Kullanıcısını bir yerden bir yere hızlı bir şekilde taşıyabilmekte, iki eksenle 360° döner başı sayesinde her noktadan görüntü alabilmekte ve ses kaydı yapabilmektedir. Görüldüğü gibi segway robotunun üzerine çeşitli eklentiler yapılarak farklı amaçlar için de kullanılabilir. Uygulama alanları ihtiyaca veya normal yaşantıya göre çeşitlik gösterebilmektedir.



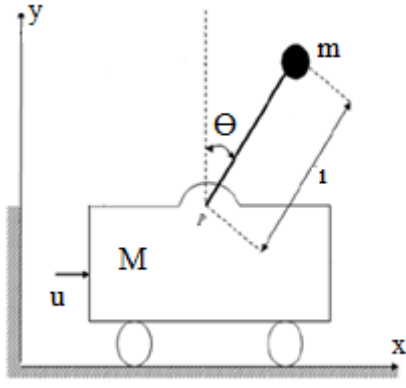
(a)



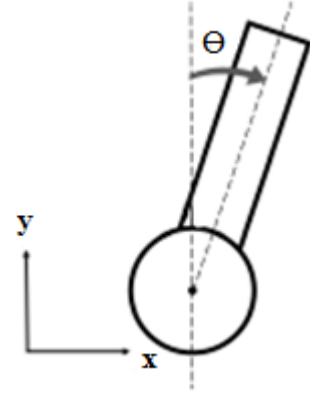
(b)

Şekil 1.2. Segway isimli robotun kullanım alanları; (a) kişisel segway robotu [3], (b) asistan segway robotu [4]

Çalışmada, iki serbestlik derecesine sahip olan, iki tekerlekli robotun kinematik analizi gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan dinamik denklemleri elde edilmiştir. Kinematik analiz, klasik bir dinamik problemi olan ‘Ters Sarkaç Modellemesi’ temelinde lagrange metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.3 (a)’da ters sarkaç modeli verilmiştir. Bu yaklaşıma bağlı olarak, iki tekerlekli robot bir ters sarkaç sistemi olarak ele alınmıştır. Ters sarkaç modeli iki tekerlekli robotu modeli Şekil 1.3 (b)’de verilmiştir. Modeller karşılaştırıldığında modellerin dinamik yapısının benzer olduğu görülür. Lagrange metodu ile elde edilen dinamik denklemler Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve robotun sadece açı dengesini kontrol eden bir PID (Proportional, Integral, Derivative) kontrolör tasarlanarak robotun dengesi test edilmiştir. Sonrasında dinamik denklemler yine Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve açı kontrolü ile hız kontrolü sağlayan iki ayrı PID kontrolör tasarlanarak robot tekrar test edilmiştir. Çalışmanın devamında, robotun açı ve hız kontrolü için oluşturulan dinamik denklem modeline alternatif olması amacıyla dinamik denklemlerin kullanılmadığı yeni bir model tasarlanmıştır. Yeni modelde robotun açı ve hız kontrolü, doğrudan kontrolörler ile gerçekleştirilmiştir. İlk önce, robotun açı kontrolü için bir P-PD kontrolör tasarlanmış ve Working Model2D (WM2D) ara yüzünde test edilmiştir. Sonrasında robotun açı ile hız kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için bir P-PID kontrolör tasarlanmış ve WM2D ara yüzünde test edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1.3. (a) Ters sarkaç modeli [5], (b) İki tekerlekli robot modeli [6]



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

İki tekerlekli kendini dengeleyen robot, yakın zamanda birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Böylelikle birçok çalışmanın konusu olmuştur. Bu kadar ilgi görmesinin en temel nedeni bir denge probleminin olmasıdır. Bu denge problemi ters sarkaç modeli temelinde çözümlenmiştir. Bu sebeple, robotun matematiksel modelini kavrayabilmek için ters sarkaç modelinin detaylı bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Sarkaç salınımları üzerine ilk çalışma 10. yüzyılda İbn-i Yunus tarafından yapılmıştır. Yapılan bu çalışma birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Sonrasında Galileo zamanı ölçmek için bir sarkaç kullanmıştır. 17. yüzyıl fizikçilerinden Huygens, Newton, Hooke; Galileo'nun elde ettiği bilgiler doğrultusunda sarkaç salınım hareketi konusunda çeşitli çalışmalar yapmışlardır [7].

Batıda bilimin gelişmesinde çok önemli rol oynayan sarkaç sistemi; çarpışma konuları, kütlelerin kanunları, yerçekimine göre hızlanma, ekvator ve kutup bölgelerindeki yerçekiminin değişmesinin keşfiyle orantılı dünyanın şeklinin belirlenmesi gibi konularda adeta bir temel kaynak olarak görülmüştür [8].

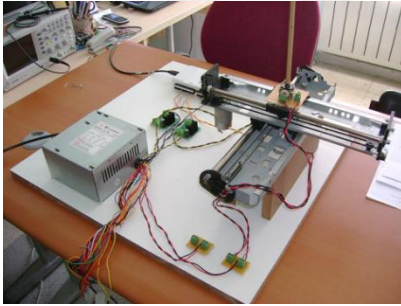
Ters sarkaç problemi konulu ilk çalışmalar 1980'li yılların sonunda başlamaktadır. Ters sarkaç problemi uzun zamandır araştırmacılar tarafından incelenen karmaşık bir problemdir. Hareket denklemleri doğrusal değildir. Bu denklemlerin elde edilmesinde newton hareket kanunu, lagrange enerji metodu veya benzer dinamik yaklaşımlardan faydalanılmıştır.

Bugeja (2003) çalışmasında, sarkacın referans konuma gelebilmesi için sistem enerjisinin de dikkate alındığı geri beslemeli doğrusallaştırma tekniğini ve sarkacın dengelenmesi için ise durum geri besleme yöntemlerini inceleyerek melez bir yaklaşım kullanmıştır. Nundrakwang ve ark. (2005) çalışmalarında, sarkacın referans konuma gelebilmesi için PD (Proportional-Derivative) konum kontrolcüsünü ve dengelenmesi için ise durum geri besleme yöntemlerini kullanmışlardır [9].

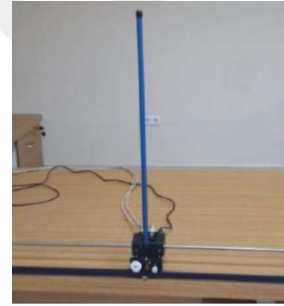
Arda (2012) çalışmasında, iki eksenli ters sarkaç sisteminin Matlab/Simulink'de modellenmesinin yapılmasını ve daha sonra fiziki ters sarkaç sistemi oluşturularak modelin test edilmesini amaçlamıştır. Şekil 2.1 (a)'da iki eksenli ters sarkaç sistemi modeli görülmektedir. İki eksenli ters sarkaç sistemi modellenirken iki ayrı alt sisteme ayrılmış, böylece problemin basitleştirilmesi hedeflenmiştir. Kontrol sistemi olarak PID (Proportional-Integral-Derivative) denetleyici kullanılmıştır.

Çalışmada sadece sarkaç açısının kontrolü yapılarak sarkacın dik konumda kalması amaçlanmıştır. Sarkaç konumu kontrol edilmemektedir. Simülasyon sonuçları grafikler halinde gösterilerek hazırlanan modelin düzgün bir şekilde çalıştığı belirlenmiştir [10].

Bilgiç ve arkadaşları (2014) çalışmalarında; ters sarkacın denge problemine farklı bir yaklaşımı olarak, sarkacın denge kontrolünü iyileştirmeye yönelik yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık (YBM) kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir ve klasik kontrol yöntemlerinden olan linear quadratic regulator (LQR) kontrolcüye göre performansı deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Sistemin matematiksel modeli ve kontrol teorisi detaylı olarak incelenmiş, sistemin kontrolü için tasarlanan mevcut LQR kontrolcü verilmiştir. LQR kontrol uygulama verileri MATLAB/Simulink ANFIS Editor ortamında yapay sinir ağı tabanlı eğitilerek elde edilen YBM ve LQR kontrolcü performansları karşılaştırılmıştır. Kontrol sistemleri MATLAB/Simulink ortamında tasarlanarak Quanser doğrusal ters sarkaç deney cihazında uygulanmıştır. Kontrolcülere göre sistem cevapları değerlendirildiğinde YBM kontrolcünün sistemin kontrolünde iyileşme sağladığı anlaşılmıştır. Şekil 2.1 (b)'de kullandıkları, sarkaç test düzeneği görülmektedir [11].



(a)



(b)

Şekil 2.1. Ters sarkaç modelleri; (a) İki eksenli ters sarkaç sistemi, (b) Ters sarkaç test düzeneği

Ters sarkaç problemi çözümündeki elde edilen kazanımlar, araştırmacıların yeni çalışmalara yönelmesini sağlamıştır. 21. yüzyılın başlangıcında “Segway” ismi ile literatüre giren iki tekerlekli denge robotunun çalışma prensibi, ters sarkaç problemi ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle ters sarkaç problemi[12, 13], iki tekerlekli denge robotu için bir alt model kabul edilmiştir. 2001 yılında, Dean Kamen tarafından “segway” isimli iki tekerlekli bir robot geliştirilmiştir. Geliştirilen bu robot ticari olarak kullanıma sunulmuştur ve kullanıcılarını bir noktadan diğer bir noktaya taşıma amaçlı kullanılmıştır. Şekil 2.2 (a)'da geliştirilen kişisel segway robotu görülmektedir [14].

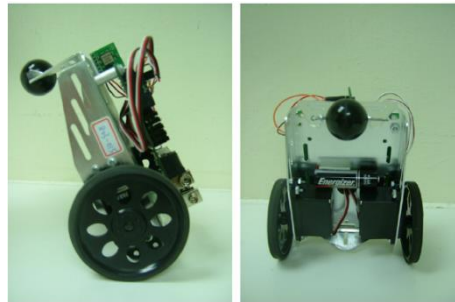
2002 yılında, Lozan'daki İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü'nün (EPFL) Endüstriyel Elektronik Laboratuvarı'nda, iki tekerlekli bir aracın prototipi oluşturulmuştur. Felix ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bu çalışmada, prototipi oluşturulan robota "joe" ismi verilmiştir. Ters sarkaç temelinde oluşturulan "joe" isimli robot, DC motorların tahrik ettiği iki adet tekerlek ile dengelemeye çalıştığı bir gövdeden oluşmaktadır. Şekil 2.2 (b)'de "joe" isimli robot görülmektedir [15].



Şekil 2.2. İki tekerlekli robot modelleri; (a) Kişisel segway robotu, (b) "Joe" isimli robot

2003 senesinde Ooi tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki tekerlekli robotun dengesini sağlayabilmesi için bir durum uzayı modeli olan lineer kuadratik regülatör (LQR) kontrolü tekniğini ve pole-placement kontrolü tekniğini karşılaştırmıştır [16].

2010 senesinde Su ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, iki tekerlekli bir robot için akıllı yazılım mimarisi geliştirilmiştir. Buna göre; parametrik değişkenlik, doğrusal olmayan sürtünme, dış yükte bozulma gibi öngörülemeyen belirsizlikler için bulanık sinir ağına sahip bir denetleyici tasarlanmıştır. Ayrıca, geleneksel PD kontrolöre sahip bir denetleyici de tasarlanmıştır. Denetleyicilerin simülasyonları çalıştırılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 2.3'de Su ve arkadaşlarının tasarladığı iki tekerlekli robot modeli görülmektedir [17].



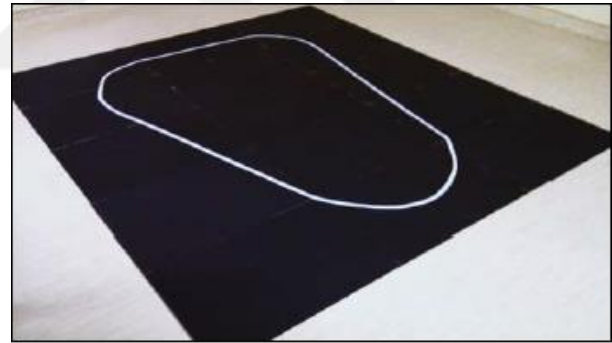
Şekil 2.3. Su ve arkadaşlarının tasarladığı iki tekerlekli robot modeli

2011 senesinde Vermeiren tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki tekerlekli bir prototipin modellenmesi ve kontrolüne ilişkin sonuçları sunulmaktadır. Segway gibi B2 isimli araç da, esasen tekerlekleri ortak bir eksenini paylaşan kendi kendini dengeleyen bir makinedir. Bununla birlikte, kontrol amaçları farklıdır; çünkü iki aracın kullanım amacı farklıdır. Segway ters sarkaç gibi davranır (örneğin: bir sürücü öne doğru eğildiğinde, Segway yolunun düşmesini önlemek için öne doğru hızlanır), oysa B2'nin görevi yolun ve yolcuların etkisini gözetmeden yolcuları taşımak olacaktır. Ayrıca, B2 alternatif bir karayolu taşıtı olarak tasarlanmıştır ve kaldırımlarda kullanımını uygun değildir. Amacı, şehir merkezindeki araçların neden olduğu sorunları (kirlilik, gürültü, alan kullanımı) azaltmaktır. Şekil 2.4 (a)'da B2 isimli robot görülmektedir [18].

2011 senesinde Ghani tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki tekerlekli robot için bir çizgi izleyici algoritmasının geliştirilmesine odaklanılmıştır. Çalışmada; eğim açısı problemini çözmek için ortamdaki değişiklikleri iki kızıl ötesi mesafe sensörü aracılığıyla, ortam değişikliklerini izlemek üzere denge kartındaki işlemci yongasından alınan verilere tepki vermesi amacıyla beyin kartı denetleyicisi "ATMEGA32" seçilmiştir. Şekil 2.4 (b)'de çizgi izlemesi görülmektedir [19].



(a)



(b)

Şekil 2.4. (a) "B2" isimli robot, (b) Çizgi izlemesi

2012 senesinde Jung ve Lee tarafından gerçekleştirilen çalışmada, MIPS denilen dengeleme robotunun dengeleme ve navigasyon kontrolünü incelemiştir. MIPS, iki tekerlekli mobil bir robottur ve ters sarkaç sistemi temelinde incelenmiştir. Dinamik denklemlerin kullanıldığı kontrol sisteminde; bir adet PD ve iki adet PID kontrolör kullanılmıştır. Şekil 2.5 (a)'da MIPS isimli robot görülmektedir [20].

Tomašić ve arkadaşları (2012) çalışmalarında; uzaktan kumandalı iki tekerlekli kendini dengeleyen bir robot tasarlanmıştır. Tasarlanan robotun imalatı gerçekleştirilmiştir.

Sonrasında PID ve LQR kontrolörleri ile denge kontrolleri sağlanmıştır. Şekil 2.5 (b)'de tasarladıkları iki tekerlekli robot görülmektedir [21].



(a)



(b)

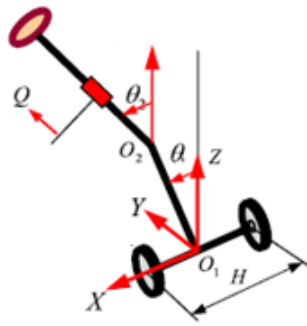
Şekil 2.5. (a) “MIPS” isimli robot, (b) Tomašić ve arkadaşlarının tasarladığı iki tekerlekli robot modeli

Enginoğlu çalışmasında (2012), iki tekerlekli robotu dengede tutabilmek için açığı geri beslemesine sahip bir PID (Proportional, Integral, Derivative) kontrolcü tasarlamıştır. Robotun açısını belirleyebilmek için sensörler kullanmıştır. Sensörlerin okuduğu verileri geri besleme sinyaline dönüştürmeden bir Kalman filtresinden geçirerek, PID kontrolcüyeye temiz ve parazitsiz sinyallerin girmesini sağlamıştır [22].

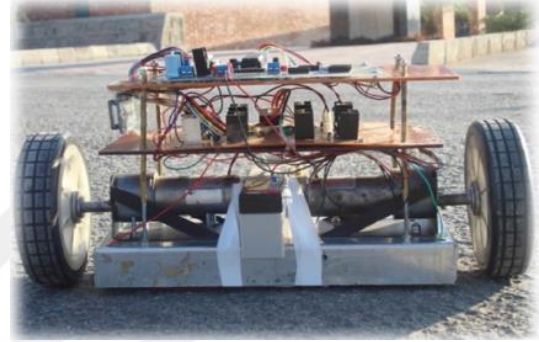
2013 senesinde Almeshal ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, iki tekerlekli taşıtların yeni bir tasarımı ve buna bağlı bir stabilizasyon yaklaşımı sunulmaktadır. Önerilen tasarım, aracın çalışma alanını genişletmesini sağlayan daha fazla serbestlik derecesi bakımından araca daha fazla esneklik sağlamaktadır. Doğrusal aktüatör tarafından sunulan ek çeviri serbestlik derecesi (DOF), gerektiğinde farklı yükseklik seviyelerine ulaşmak için ekli bir yüke yardımcı olur. Sistemin modeli, hareket halindeki bir tabandaki çift ters sarkaç sarfiyatı senaryosunu, eklenen DOF ile taklit eder. Sistemin dinamik denklemlerini elde etmek için lagrange yöntemi kullanılmıştır. Coulomb sürtünme modeline dayanan mafsallar, sistemin doğrusal olmayan özelliklerini koruyacak şekilde göz önünde bulundurulur. Sistemin dengelenmesi için bir PD-PID sağlam kontrol yaklaşımı türetilmiştir. Eklemlere bağlı sönümlenme sisteminin kararlılığı üzerindeki etkisinin araştırılması yapılmıştır. Modeli ve kontrol yaklaşımını doğrulayan simülasyon sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır. Şekil 2.6 (a)'da tasarlanan model görülmektedir [23].

2013 senesinde Adeel ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, önceden belirlenmiş pozisyon etrafında pozisyonunu dengeleme yeteneğine sahip özerk bir çift tekerlekli kendini dengeleme robotu geliştirilmiştir.

Başlangıçta sistem doğrusal değildir ve kararsızdır. Sistemin fiziksel yapısını PID kontrolörü kullanarak yeniden tasarladıktan ve matematiksel modellemeyi kullanarak dinamik davranışını analiz ettikten sonra sistemin kararlı hale geldiği görülmüştür. Kendi kendini dengeleyen robotun konumu PID denetleyicisi tarafından kontrol edilmektedir. PROTEOUS, MATLAB ve VM programları kullanılarak robotun simülasyonları çalıştırılmıştır ve sonuçları incelenmiştir. Şekil 2.6 (b)'de tasarlanan model görülmektedir [24].



(a)



(b)

Şekil 2.6. (a) Almeshal ve arkadaşlarının tasarladığı robot, (b) Adeel ve arkadaşlarının tasarladığı robot

2014 senesinde Son ve Anh yaptıkları çalışmada, doğrusal olmayan belirsiz bir model ile iki tekerlekli elektrikli scooter için uyarlanabilir bir geri tepme kontrol yasasını incelemişlerdir. Adaptif geri tepme kontrolü, Lyapunov istikrarını sağlayan geri bildirim kontrolü ile entegre edilmiştir. Kontrol edilen fonksiyonu bulmak ve belirsiz parametreleri tahmin etmek için özyinelemeli yapıyı kullanarak; uyarlamalı bir geri adım atma yöntemi, eScooter'ın kendi kendini dengeleyen kontrol ünitesini verimli bir şekilde kontrol eden bir geri besleme kontrol yasası oluşturmuşlardır. Ek olarak, eScooter'ın modülleri arasında iletişim kurmak için yüksek güvenilirliğe sahip bir kontrolör alanı ağı (CAN bus) uygulamışlardır. Şekil 2.7 (a)'da eScooter görülmektedir [25].

Çelik (2014) yaptığı çalışmada, modelin belirlenmesi hususunda lagrange enerji metodundan yararlanmışır. Elde ettiği nonlinear model Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller için Matlab/Simulink ortamında PID ve model öngörülü kontrol (MPC) kontrolcileri tasarlanmıştır. Şekil 2.3 (b)'de Çelik' in tasarladığı iki tekerlekli robot modeli görülmektedir [26].



(a)



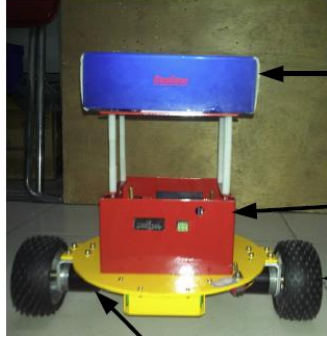
(b)

Şekil 2.7. (a) eScooter, (b) Çelik'in tasarladığı iki tekerlekli robot modeli

2014 senesinde Kara tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki tekerlekli robot üzerine tek bir kol yerleştirilmiştir. Kol sayesinde robota gerçek zamanda harici ve dâhili bozucu etken uygulanırken, Katsayı Diyagram Metodu (KDM) denetimcisi ile sistemin açısal dengesi ve doğrusal yer değiştirme kontrolü sağlanmıştır [27].

2015 senesinde Dai ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, sürtünme telafisine sahip iki tekerlekli bir ters sarkaç (TWIP) robotunun tasarım ve uygulama yöntemini tanıtmaktadır. Tahrik mekanizmasındaki sürtünme, robot kendi kendini dengelemenin kritik bir faktördür ve performansını etkiler. Sürtünme parametreleri, tahrik mekanizmasının dinamik modeline göre tanımlanır. Tüm robot sisteminin dinamikleri lagrange metodu ile elde edilir ve robot tahrik mekanizması sürtünmesini hesaba katar. TWIP robotu doğrusal olmayan bir sistem olarak bağlanmış olmasına rağmen, kendini dengeleme ve yalpalama hareketi için kayan mod kontrol cihazları bağımsız olarak tasarlanmıştır. Şekil 2.8 (a)'da TWIP isimli robot modeli görülmektedir [28].

2015 senesinde Velazquez ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kendi kendini dengeleyen bir aracın dengeleme, hız ve hareket kontrolünü incelemiştir. Hem dengeleme kontrolü hem de açısal hız kontrolü için kademeli bir kontrol cihazı uygulamışlardır. Bu kontrolör, sistemin önerilen matematiksel modelini kullanarak simülasyonlarda test edilmiştir. Kontrol donanımı, önerilen kontrol cihazlarını uygulamak için tasarlanmış ve entegre edilmiştir. Şekil 2.8 (b)'de robotun modeli görülmektedir [29].



(a)



(b)

Şekil 2.8. (a) “TWIP” isimli robot, (b) Velazquez ve arkadaşlarının tasarladığı robot modeli

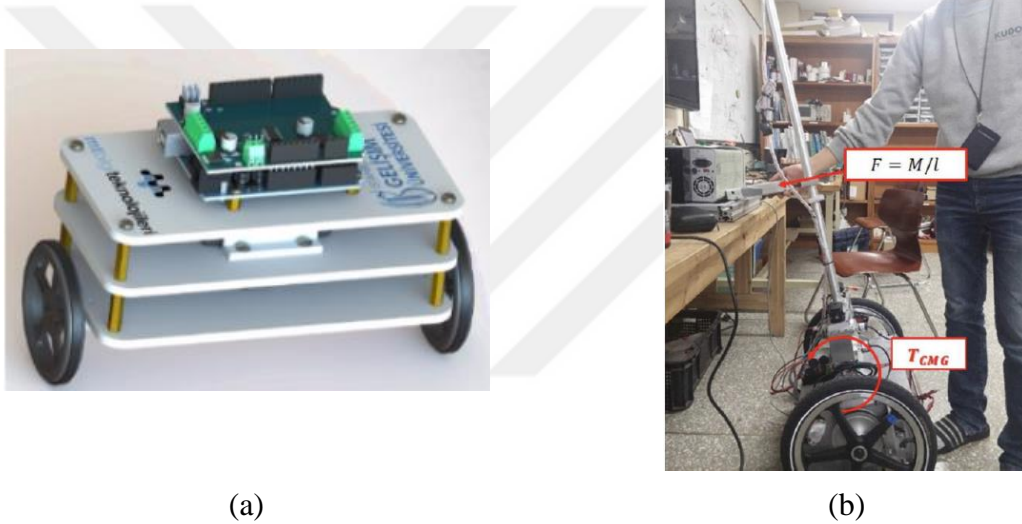
2015 senesinde Junoh’ un yaptığı çalışmada; iki tekerlekli bir denge modeli üzerine PID kontrol uygulanmıştır. Dengenin sağlanmasından sonra PID kazanç katsayıları ile oynayarak daha stabil bir denge elde etmeye çalışmıştır. Sonuç olarak, farklı kazanç katsayıları ile farklı denge eğrileri elde edildiğini görmüştür ve stabil bir denge için optimum kazanç katsayılarını belirlemiştir [30].

2016 senesinde İlgen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, çok tekerlekli bir simülasyon modelinin geliştirilmesi ve tek tekerlekli bir ters sarkacın dengelenmesinin kontrolü amaçlanmıştır. Sistemin sanal bir prototipi Adams yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Model, Matlab ve Adams yazılımında birlikte simüle edilmiştir. Adams modelinde iki giriş (bozulma ve kontrol) ve iki çıkış (sarkaç açısı ve tekerlek konumu) bulunur. PID kontrolör, sarkaç açısının dengeleme kontrolü ile simülasyonu için tasarlanmış ve uygulanmıştır [31].

Yavuz ve arkadaşları (2016) çalışmalarında, iki tekerlekli kendini dengeleyen robotun tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tasarımı gerçekleştirilen robot üzerinde kontrolcü uygulamasında geri besleme verilerini elde edebilmek için ivmeölçer ve gyro sensörü kullanmışlardır. Sensörlerden elde edilen veriler ile robotun açısal pozisyonu kontrol edilmeye çalışılmıştır. Tasarım üzerine üç farklı kontrol algoritması (PI kontrol, PD kontrol ve PID kontrol) uygulanmıştır. Şekil 2.9 (a)’da tasarladıkları robotun SolidWorks (SW) ara yüzünde oluşturulan katı modeli görülmektedir [32].

2018 senesinde Park ve Cho’ nun yaptıkları çalışmada, kontrol momenti jiroskop modülüne dayanan, iki tekerlekli, kendini dengeleyen bir mobil robotu tanıtmışlardır. İki tekerlekli mobil robotlar, küçük alanlarda daha iyi mobilite ve dönüş elde edebilmekte ve insansı tip robotlar gibi bacaklı robotlardan daha hızlı hareket edebilmektedir.

Bu nedenle, iki tekerlekli mobil robot genellikle mobil robot platformu olarak kullanılır. Bununla birlikte, dengesini korumak için, iki tekerlekli robotun iki tekerlek hareketlerini kullanması gerekir. Beklenmedik bir rahatsızlık robotu etkilediğinde, robot tekerleklerin hareketleri ve gövdenin eğilmesiyle dengesini korur. Rahatsızlık robotun tepki yeteneğini aşarsa, robot dengesini kaybeder. Bu sorunları çözmek için, hareketi en aza indirirken dengeyi iyileştirmek için kontrol momenti jiroskop modülü ile bir robot tasarlanmıştır. Robota bir rahatsızlık uygulandığında, rahatsızlığın bir gözlemci tarafından tahmin edildiği tahmin edilir ve kontrol momenti jiroskop denetleyicisi rahatsızlığı telafi eder. Kontrol momenti jiroskop modülünü kullanarak robot, tekerleklerinin sadece küçük hareketleriyle dengeyi koruyabilir. Şekil 2.9 (b)'de tasarladıkları robot görülmektedir [33].



Şekil 2.9. (a) Yavuz ve arkadaşlarının tasarladıkları robotun Solid Works (SW) ara yüzünde oluşturulan katı modeli, (b) Kontrol momenti jiroskopu

2019 senesinde Gandarilla ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; iki serbestlik dereceli kendini dengeleyen bir robotu sürmek için, ara bağlantı ve sönümlendirme ataması pasivitesine dayalı kontrol (IDA-PBC) tekniğini incelemişlerdir. Kontrol sistemi tasarımı, kararlılık analizi ve çekim alanının tahmini ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Değişkenlerin uygun bir şekilde değiştirilmesi ve eşleşen denklemlerin uygun bir şekilde ele alınması, kontrol yasalarının tasarlanması ve sırasıyla asimptotik stabilite analizinin yapılması için anahtar olmuştur. Arzu edilen potansiyel enerji için farklı önerilerin kapalı devre halindeki kendi kendini dengeleyen robotun davranışını nasıl şekillendirdiğini vurgulamak için kontrol ünitesinin tasarımında iki skalar fonksiyon kullanılmıştır.

Teorik öneriyi onaylamak ve önerilen kontrol yasasının düzenleme görevindeki performansını ve dış rahatsızlıklara karşı pratik sağlamlığı göstermek için deneysel sonuçlar sunulmuştur [34].

Araştırmacıların, günümüzde de iki tekerlekli denge robotu üzerine yaptıkları çalışmalar devam etmektedir. Elde edilen veriler ışığında daha karmaşık sistemler çözümlenebilmektedir.

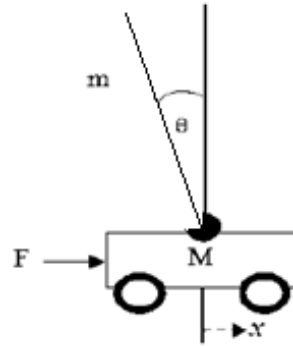


3. GENEL BİLGİLER

Diğer denge problemlerinde olduğu gibi, iki tekerlekli denge robotu da ters sarkaç problemi esas alınarak çözümlenmiştir. Ters sarkaç problemi temelinde lagrange yöntemi ile robotun doğrusal olmayan (nonlinear) dinamik denklemleri elde edilmiştir. Sonrasında ise robot için kontrol sistemleri tasarlanmıştır. Bu kısımda iki tekerlekli denge robotu analizinin anlaşılabilmesi için temel bilgiler verilmiştir.

3.1 Ters Sarkaç Problemi

Ters sarkaç, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi; sarkaç ve araba olmak üzere iki ana kısımdan meydana gelir. Sarkaç, bir ucundan araba üzerine döner serbestisi olacak şekilde mesnetlenmiştir. Düşey ekseninde serbest halde bulunan sarkaç, ağırlığına etki eden yer çekimi etkisiyle dengesini koruyamamaktadır. Bu sebeple sarkaç ile düşey eksen arasında bir θ açısı oluşur. Sarkacı taşıyan arabaya etki eden F kuvveti ile θ açısı kontrol edilir. F kuvveti ile θ açısı arasındaki dinamik bağıntı çeşitli matematiksel yöntemler ile çıkarılabilir. Araştırmacıların kuvvet ve açı arasındaki dinamik bağıntıyı bulmak için kullandıkları en sık yöntem lagrange enerji yöntemidir. Bu sayede elde edilen matematiksel bağıntılar ile sistem dinamikleri tanımlanabilir ve kontrol diyagramları oluşturulabilir.



Şekil 3.1. Ters sarkaç sistemi [35]

3.2 Lagrange Yöntemi

Denge robotu sistem modellemesi, ters sarkaç problemi temelinde gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple ters sarkaç problemi için geçerli olan matematiksel yaklaşımlar, denge robotu için de geçerlidir. Matematiksel model, bir sistemin dinamik davranışlarının belirlenmesini sağlar. Diğer yandan matematiksel modeli, sistemin analitik gösterimidir.

Çalışmada; denge robotunun, matematiksel modelinin çıkarılması için lagrange enerji yöntemi tercih edilmiştir. Lagrange denklemi; Hamilton prensibinin holonomik sistemlere genelleştirilmiş değişkenler kullanılarak uygulanması sonucu, genelleştirilmiş değişkenler cinsinden bütün holonomik sistemlerde kullanılabilir bir denklem elde edilmesiyle meydana gelmektedir [36]. Lagrange denklemi kinetik ve potansiyel enerjileri içerdiğinden, öncelikle robotun toplam kinetik enerjisi ve toplam potansiyel enerjisi belirlenmelidir.

3.3 Kontrol Sistemi

Bir maraton koşucusu, mesafeyi en kısa zamanda koşmanın yanı sıra, enerji tüketimini de kontrol etmek, kendisi için en uygun yarış stratejisini izlemek zorundadır. Bu hedeflere ulaşabilmek için genellikle kontrol stratejilerini gözeterek kontrol sistemlerini kullanmak gerekir. Bir kontrol sisteminin öğeleri şunlardır;

- Kontrolün amaçları
- Kontrol sistemi öğeleri
- Sonuç ya da çıkışlar

Bu üç öğenin birbirleriyle ilişkisi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Daha teknik terimlerle ifade edilirse amaçlar, u girişleri ya da sürücü işaretler ile belirlenir; sonuçlar ise y çıkışları ya da kontrol edilen değişkenleri etkiler. Genel olarak kontrol sisteminin amacı; kontrol sisteminin elemanları aracılığı ile girişleri kullanarak, çıkışları önceden belirlenmiş bir şekilde kontrol etmektir [37].



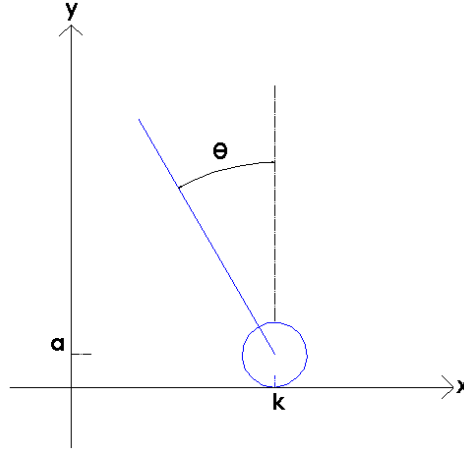
Şekil 3.2. Genel kontrol sistemi

4. İKİ TEKERLEKLİ ROBOTUN LAGRANGE ANALİZİ

Bu kısımda; iki tekerlekli robotun (İTR), ters sarkaç problemi temelinde lagrange yöntemi kullanılarak dinamik denklemleri elde edilmiştir. Lagrange analizi iki kısma ayrılmaktadır. İlk olarak robotun kinematik analizi yapılarak gerekli tanımlamalar yapılmıştır. Sonrasında kinematik temelde dinamik analiz yapılarak robotun dinamik denklemleri elde edilmiştir.

4.1 Kinematik Model

Şekil 4.1’de iki tekerlekli robotun ters sarkaç modeli temelinde düzlemsel iz düşümü görülmektedir. Buna göre; robotun düşey ekseninde (y eksen) ve yatay ekseninde (x eksen) iki boyutlu analitik gösterimi verilmektedir.



Şekil 4.1. İTR modeli

Serbest cisim diyagramında görüldüğü gibi robot; tekerlek ve gövde olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Bu sayede robot parçaları için, ayrı ayrı matematiksel tanımlamalar yapılabilmiş ve sonrasında birleşik bağıntılar elde edilmiştir. İlk parça gövdenin olduğu kısım ve ikinci parça da tekerleğin olduğu kısımdır. Her iki parça için de enerji denklemleri yazılmıştır. Çizelge 4.1’de İTR’ nin parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. İTR parametreleri

Parametre	Açıklama
k	Sabit eksen takımına göre robotun yatayda yaptığı yer değiştirme
y	Sabit eksen takımına göre robotun düşeyde yaptığı yer değiştirme
Θ	Sarkacın y eksenine göre yaptığı açı
M	Arabanın kütlesi
m	Sarkacın kütlesi
g	Yer çekimi ivmesi
l	Sarkaç kütle merkezi ile çubuk bağlantı noktası arasındaki uzaklık
I	Sarkacın atalet momenti
a	Arabanın kütle merkezi ile sabit eksen takımının y eksenine göre uzaklığı
b	Araba ile yer arasındaki sürtünme katsayısı
F	Arabaya x doğrultusunda etkiyen harici kuvvet

Şekil 4.1’ de verilen serbest cisim diyagramındaki eksen takımına göre; tekerleğin ağırlık merkezinin konumu ve sarkacın ağırlık merkezinin konumu veren bağıntılar sırasıyla denklem (4.1) ve denklem (4.2)’de verilmiştir.

$$\vec{x}_1 = k\vec{i} + a\vec{j} \quad (4.1)$$

$$\vec{x}_2 = (k + l \sin \Theta)\vec{i} + (2a + l \cos \Theta)\vec{j} \quad (4.2)$$

Lagrange yönteminde, kinetik ve potansiyel enerjiler kullanılmaktadır. Gövdenin ve tekerleğin kinetik enerjilerini belirleyebilmek için öncelikle kütle merkezlerinin çizgisel hızları belirlenmelidir. Gövdenin ve tekerleğin konumlarının birinci türevleri alınarak, sırasıyla denklem (4.3) ve denklem (4.4)’te çizgisel hızları veren bağıntılar elde edilmiştir.

$$\vec{v}_1 = \dot{\vec{x}}_1 = \dot{k}\vec{i} \quad (4.3)$$

$$\vec{v}_2 = \dot{\vec{x}}_2 = (\dot{k} + l\dot{\Theta} \cos \Theta)\vec{i} + (-l\dot{\Theta} \sin \Theta)\vec{j} \quad (4.4)$$

Toplam kinetik enerji, ötelemeden kaynaklanan kinetik enerjiler ile dönmeden kaynaklanan kinetik enerjilerin toplamıdır. Denklem (4.5)’te toplam kinetik enerji ifadesi verilmiştir. Buna göre tekerleğin ve gövdenin kinetik enerjileri ayrı ayrı belirlenmiştir.

Denklem (4.6) ve denklem (4.7)'de sırasıyla tekerleğin ve gövdenin kinetik enerji bağıntıları verilmiştir. Gövdenin, düşey eksen ve yatay eksen hareketi bulunduğu için, hem ötelemeden kaynaklı kinetik enerjisi hem de dönmeden kaynaklı kinetik enerjisi bulunmaktadır. Tekerleğin ise düşey eksen hareketi bulunmadığı için yalnızca yatay eksen ötelemeden kaynaklı kinetik enerjisi bulunmaktadır. Denklem (4.6) ve denklem (4.7), denklem (4.5)'de yerine yazılarak, kinetik enerji denklemi denklem (4.8) elde edilir. Denklem (4.8)'deki hız ifadelerinin kareleri yerine yazılarak düzenlenirse, İTR'nin kinetik enerji denklemi en genel haliyle denklem (4.9)'da ki gibi elde edilir.

$$T = \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \quad (4.5)$$

$$T_T = \frac{1}{2} M v_1^2 \quad (4.6)$$

$$T_G = \frac{1}{2} m v_2^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (4.7)$$

$$T = \frac{1}{2} M v_1^2 + \frac{1}{2} m v_2^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (4.8)$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{k}^2 + \frac{1}{2} m [\dot{k}^2 + 2\dot{k}\dot{\theta}l \cos \theta + l^2 \dot{\theta}^2] + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (4.9)$$

Lagrange yönteminde bulunan kinetik-potansiyelin (L) yazılabilmesi için robotun toplam potansiyel enerjisinin de belirlenmesi gerekir. Denklem (4.10)'da toplam potansiyel enerji ifadesi verilmiştir. Buna göre tekerleğin ve gövdenin potansiyel enerjileri ayrı ayrı belirlenmiştir. Tekerleğin düşey eksen hareketi bulunmadığı için potansiyel enerjisi sıfırdır. Denklem (4.11)'de gövdenin potansiyel enerji bağıntısı verilmiştir. Toplam potansiyel enerji gövdenin ve tekerleğin potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Buna göre, tekerleğin potansiyel enerjisi sıfır olduğu için İTR'nin toplam potansiyel enerjisi gövdenin potansiyel enerjisine eşittir. Gövdenin potansiyel enerjisi, denge konumunun potansiyel enerjisinin sıfır olması varsayımı ile yazılır [27]. Denklem (4.11), içerisindeki "h" ifadesi denge konumunda potansiyel enerjinin sıfır olması varsayımına yazılarak tekrar düzenlenirse denklem (4.12) elde edilir. θ açısı sıfır derece olduğunda yani robot dengede olduğunda, "h" ifadesi sıfır olmakta ve dolayısıyla gövdenin potansiyel enerjisi de sıfır olmaktadır. Denklem (4.12) İTR'nin genel potansiyel enerji bağıntısıdır.

$$V = m_i g_i h_i \quad (4.10)$$

$$V_G = V = mgh \quad (4.11)$$

$$V = mgl(1 - \cos \Theta) \quad (4.12)$$

Lagrange yöntemindeki kinetik-potansiyel (L), robotun kinetik ve potansiyel enerjilerinin farkıyla elde edilmektedir. Denklem (4.13)'de kinetik-potansiyel bağıntısı verilmektedir. Denklem (4.9) ve denklem (4.12), denklem (4.13)'de yerine yazılarak gerekli sadeleştirmeler yapıldığında, İTR' nin kinetik potansiyeli bağıntısı en genel haliyle denklem (4.14)'de ki gibi elde edilir.

$$L = T - V \quad (4.13)$$

$$L = \left[\frac{1}{2} M \dot{k}^2 + \frac{1}{2} m [\dot{k}^2 + 2\dot{k}\dot{\Theta} \cos \Theta + l^2 \dot{\Theta}^2] + \frac{1}{2} I \dot{\Theta}^2 \right] - [mgl(1 - \cos \Theta)] \quad (4.14)$$

Elde edilen kinetik-potansiyeli kullanarak, robotun dinamik denklemlerini elde edilmiştir. Buna göre lagrange denkleminin en genel hali denklem (4.15)'de verilmiştir. İTR, iki serbestlik derecesine sahip olduğu için iki ayrı dinamik denklemi bulunmaktadır. Buna göre, lagrange denklemi iki ayrı koordinata göre çözümlenecektir. Denklem (4.16)'da genelleştirilmiş iki koordinat olan k ve Θ bağıntıları verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta q_i} \right) = Q_i \quad (4.15)$$

$$q_{1,2} = k, \Theta \quad (4.16)$$

Robot iki serbestlik derecesine sahip olduğu için iki ayrı dinamik denklemi bulunmaktadır. Bu dinamik denklemler genelleştirilmiş koordinatların varyasyonları ile belirlenecektir. $q_1=k$ genelleştirmesi ile birinci dinamik denklem, $q_2=\Theta$ genelleştirmesi ile ikinci dinamik denklem oluşturulmuştur. Buna göre kinetik-potansiyelin genelleştirilmiş koordinatlara göre varyasyonları alınarak gerekli işlemler ve düzenlemeler yapıldığında, denklem (4.17), denklem (4.18) ve denklem (4.19) elde edilir. Kinematik tanımlamaların yapılmasından sonra dinamik model oluşturulmuştur.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{k}} \right) = (M + m)\ddot{k} + ml \cos \Theta \ddot{\Theta} - ml \sin \Theta \dot{\Theta}^2 \quad (4.17)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\Theta}} \right) = (ml^2 + I)\ddot{\Theta} + m\dot{k}l \cos \Theta - ml\dot{k}\dot{\Theta} \sin \Theta \quad (4.18)$$

$$\frac{\delta L}{\delta \theta} = m\dot{k}\dot{\theta} \sin \theta + mg \sin \theta \quad (4.19)$$

4.2 Dinamik Model

Denklem (4.15)'i $q_1=k$ genelleştirmesine göre düzenlersek, denklem (4.20) elde edilir. Denklem (4.20) içerisindeki “u” ifadesi, korunumlu olmayan dış kuvvetleri temsil etmektedir ve denklem (4.21)' de bağıntısı verilmiştir. Denklem (4.17) ve denklem (4.21), denklem (4.20)' de yerine yazılarak, gerekli işlemler ve sadeleştirmeler yapıldığında İTR'nin birinci hareket denklemi olan denklem (4.22) elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{k}} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta k} \right) = u \quad (4.20)$$

$$u = F - b\dot{k} \quad (4.21)$$

$$(M + m)\ddot{k} + b\dot{k} + m\dot{\theta} \cos \theta \dot{\theta} - m\dot{\theta} \sin \theta \dot{\theta}^2 = F \quad (4.22)$$

İTR'nin ikinci dinamik denklemini oluşturmak için Denklem (4.15)'i $q_2=\theta$ genelleştirmesine göre düzenlersek, denklem (4.23) elde edilir. Gövdeye dışarıdan bir kuvvet etki etmediği için denklem (4.23) sifıra eşittir. Denklem (4.18) ve denklem (4.19), denklem (4.23)' de yerine yazılarak, gerekli işlemler ve sadeleştirmeler yapıldığında İTR'nin ikinci hareket denklemi olan denklem (4.24) elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta \theta} \right) = 0 \quad (4.23)$$

$$(m\dot{\theta}^2 + I)\ddot{\theta} + m\dot{k}\dot{\theta} \cos \theta - 2m\dot{k}\dot{\theta} \sin \theta - mg \sin \theta = 0 \quad (4.24)$$

Denklem (4.22) ve denklem (4.24) düzenlenirse; denklem (4.25) ve denklem (4.26) elde edilir. Denklem (4.25) ve denklem (4.26) İTR'nin en genel haliyle doğrusal olmayan (nonlinear) dinamik denklemlerdir.

$$\ddot{k} = \frac{F - b\dot{k} - m\dot{\theta} \cos \theta \dot{\theta} + m\dot{\theta} \sin \theta \dot{\theta}^2}{(M + m)} \quad (4.25)$$

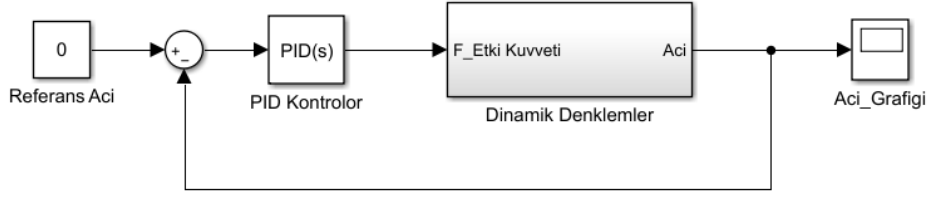
$$\ddot{\theta} = \frac{mg \sin \theta + 2m\dot{k}\dot{\theta} \sin \theta - m\dot{k}\dot{\theta} \cos \theta}{(m\dot{\theta}^2 + I)} \quad (4.26)$$

5. İKİ TEKERLEKLİ ROBOTUN FARKLI KONTROL SİSTEMLERİ VE SİMÜLASYONLARI

Bu kısımda, İTR için farklı kontrol sistemleri tasarlanmış ve simülasyonları çalıştırılmıştır. Robot modelinde; bir açıölçer sensör, tekerleklere tahrik veren motorlar ve kontrolcü bulunmaktadır. Açıölçer sensör, robot gövdesinin düşey eksen ile yaptığı açı bilgisini sürekli olarak kontrolcüye bildirmektedir. Kontrolcü ise sensörden gelen açı bilgilerini işleyerek tahrik motorlarına, mevcut konuma göre dengenin sağlanabilmesi ve robotun istenilen referanslara yönelebilmesi için gereken motor torku değeri ile motor dönüş yön bilgisini sürekli olarak bildirmektedir. Bu sayede robot, istenilen referansa dengeli bir şekilde ilerleyebilmektedir. Denge robotu için dört farklı kontrol sistemi tasarlanmıştır. Bu yüzden dört ayrı blok diyagramı oluşturulmuştur. Birinci oluşturulan kontrol sisteminde; dinamik denklemler kullanılarak, açı geri beslemesine sahip bir kontrolcü tasarlanmıştır. İkinci oluşturulan kontrol sisteminde; dinamik denklemler kullanılarak, açı ve hız geri beslemesine sahip bir kontrolcü tasarlanmıştır. Üçüncü oluşturulan kontrol sisteminde; dinamik denklemler kullanılmamış, bunun yerine doğrudan açı geri beslemesine sahip bir kontrolcü tasarlanmıştır. Dördüncü kontrol sisteminde ise; yine dinamik denklemler kullanılmamış, bunun yerine doğrudan açı ve hız geri beslemesine sahip bir kontrolcü tasarlanmıştır. Sonrasında bilgisayar ortamında robotun hareket simülasyonları yapılmıştır. Dinamik denklemlerin kullanıldığı simülasyonlar için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. Dinamik denklemlerin kullanılmadığı kontrol sistemleri simülasyonları için ise WM2D programı kullanılmıştır.

5.1 Dinamik Denklemler Kullanılan Açı Geri Beslemeli Kontrol Sistemi ve Simülasyon

İTR, iki serbestlik derecesine sahip olduğundan hareketinin matematiksel olarak çözümlenebilmesi için iki ayrı hareket denklemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden, yapılan lagrange analizi neticesinde denklem (4.25) ve denklem (4.26) elde edilmiştir. Elde edilen hareket denklemleri Şekil 5.1'de görülen blok diyagramı (BD) içerisine gömülmüştür. Şekil 5.1'de verilen blok diyagramı incelendiğinde; iki tekerlekli robot modeline, açı geri beslemesine sahip bir PID kontrolör uygulandığı görülmektedir. PID kontrolör, açıölçer sensörden gelen mevcut açı bilgisi ile referans açı bilgisini karşılaştırarak bir hata sinyali üretir ve bu sinyali dinamik denklemlere iletir. Dinamik denklemler de gelen hata sinyaline göre bir tork değeri hesaplar ve tahrik motorlarına bildirir. Bu sayede, robot sürekli olarak referans açı değerine ulaşmaya çalışır.



Şekil 5.1. Dinamik denklemler ile oluşturulan açı geri beslemeli BD

Elde edilen dinamik denklemler doğrusal olmayan (nonlinear) denklemlerdir. Matlab/Simulink programı doğrusal olmayan denklemleri çözümleyebildiği için; elde edilen denklemler, doğrusallaştırma (lineerleştirme) uygulanmadan kullanılmıştır. İlk tasarlanan kontrol sisteminde, açı geri beslemesine sahip bir PID kontrolör kullanılmıştır. Bu kontrol sisteminde, robotun sadece gövde açısı kontrol edilmektedir. PID kontrolör, referans açı ile mevcut açı arasındaki farkı kullanarak sürekli olarak bir katsayı türetir. Türetilen bu katsayı doğrudan dinamik denklemleri etkilediği için, robotun referans açı değerine ulaşmasını sağlar. Referans açı (0°) ile mevcut açı aynı değerde olduğunda, farkları sıfır olacağı için PID kontrolör de herhangi bir katsayı türetmez. Ayrıca, PID kontrolörün yapısında kazanç katsayıları bulunur. Çizelge 5.1’de genel PID kontrolör parametreleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. PID parametreleri

Parametre	Açıklama
K_p	Oransal kazanç katsayısı
K_i	Integral kazanç katsayısı
K_d	Türevsel kazanç katsayısı
$e(t)$	Hata fonksiyonu

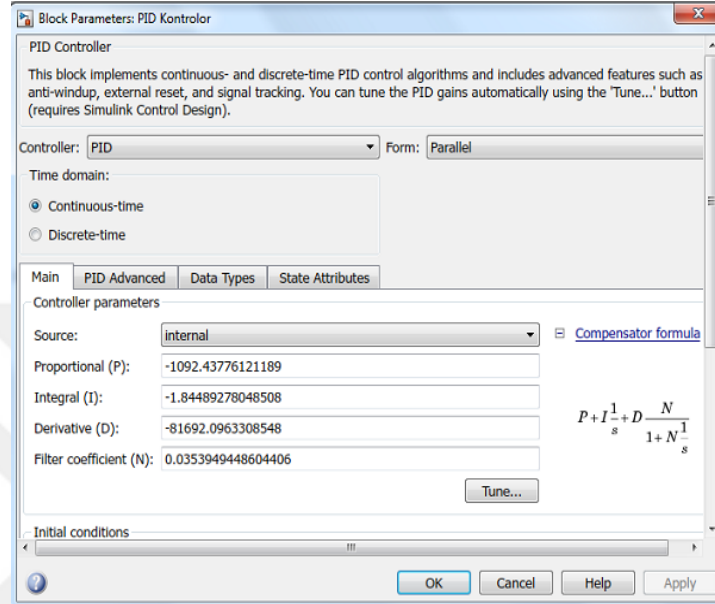
Denklem (5.1)’de ise PID kontrolörün genel denklemini verilmiştir. Denklem (5.1)’nin içerisindeki $e(t)$, hata fonksiyonudur ve denklem (5.2)’de bağıntısı verilmektedir. Hata fonksiyonunun; oransal, integral ve türevsel bağıntıları alınarak ayrı ayrı katsayılar ile çarpılır ve tüm bağıntılar toplanır. Bu sayede genel PID katsayısı elde edilir.

$$PID(s) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (5.1)$$

$$e(t) = \text{referans değer} - \text{gerçekleşen değer} \quad (5.2)$$

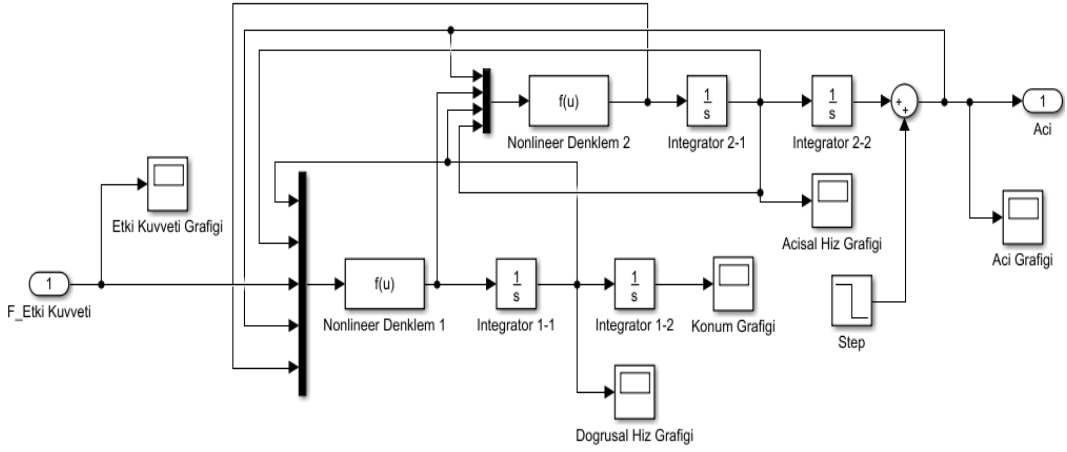
Kontrol sisteminin sağlıklı çalışabilmesi için, PID kontrolörün yapısındaki kazanç katsayılarının en uygun değerlerinde belirlenmesi gerekir.

Bu kazanç katsayıları, deneme yanılma yoluyla veya çeşitli programlar kullanılarak en uygun değerlerde belirlenebilir. Matlab/Simulink programında PID Tuning aracı bulunur. PID Tuning aracı kullanılarak, en uygun PID kazanç katsayıları belirlenmiştir. Şekil 5.2’de; PID Tuning aracı ile belirlenen, sadece açılı geri beslemesine sahip PID kontrolörün kazanç katsayıları verilmiştir.

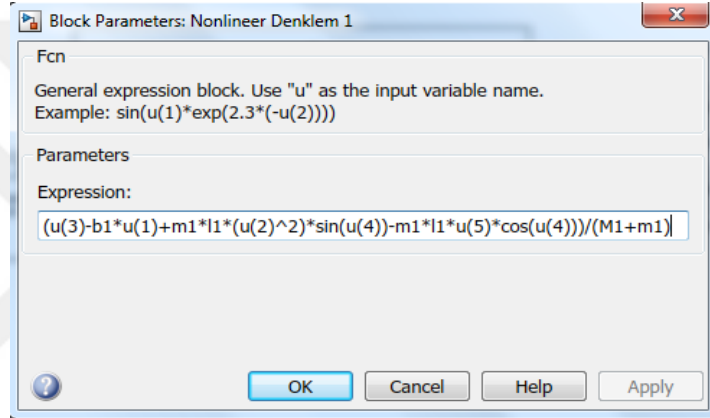


Şekil 5.2. Açılı geri beslemeli PID kontrolör kazanç katsayıları

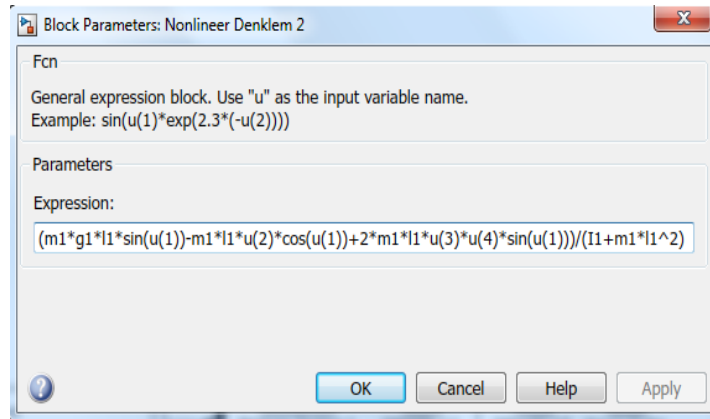
Dinamik denklemler ile oluşturulan açılı geri beslemeli BD incelendiğinde; dinamik denklemler isimli blok görülür. Bu blok bir alt blok diyagramını temsil eder. Burada görüldüğü üzere bir “F_etki kuvveti” girdisi ve bir “açılı” çıktısı bulunur. Robot için elde edilen dinamik denklemler bu blok içerisine gömülmüştür. Şekil 5.3’de bu bloğa ait alt blok diyagramı verilmiştir. Şekil 5.3’de görülen blok diyagramında, elde edilen dinamik denklemler çalışır. Blok diyagramı incelendiğinde, nonlinear denklem 1 ve nonlinear denklem 2 görülür. Bunlar sırasıyla, denklem (4.25)’i ve denklem (4.26)’yı temsil ederler. Şekil 5.4’de nonlinear denklem 1’in blok diyagramına yazılan bağıntısı ve Şekil 5.5’de ise nonlinear denklem 2’nin blok diyagramına yazılan bağıntısı verilmiştir. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 incelendiğinde, verilen bağıntıların denklem (4.25) ve denklem (4.26) ile uyduğu görülür. Diyagram içerisine yazılan bağıntıların parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Açık geri beslemeli kontrol sistemine ait, dinamik denklemler alt BD



Şekil 5.4. Açık geri beslemeli diyagrama ait nonlinear denklem 1



Şekil 5.5. Açık geri beslemeli diyagrama ait nonlinear denklem 2

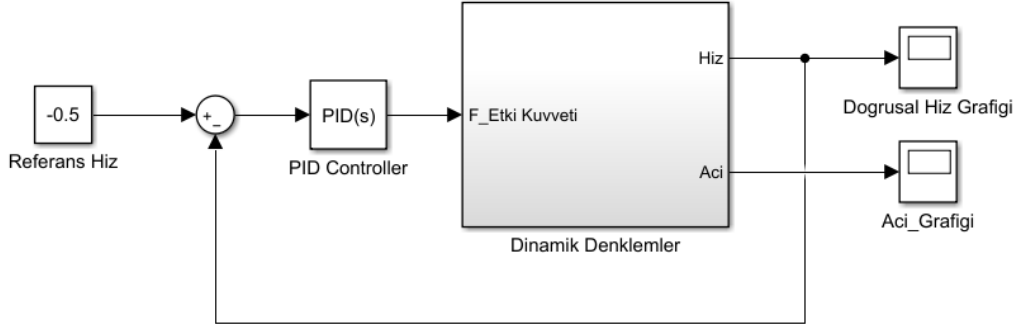
Çizelge 5.2. Nonlinear denklem parametreleri

Parametre	Açıklama	Değer
M	Tekerleğin kütlesi	3 kg
m	Gövdenin kütlesi	15 kg
l	Gövdenin kütle merkezi ile çubuk bağlantı noktası arasındaki uzaklık	0,0125 m
I	Gövdenin atalet momenti	0.0000785398 m ⁴
g	Yerçekimi ivmesi	9,81 m/s ²
b	Tekerlek ile yer arasındaki sürtünme katsayısı	0,90
u(s)	Blok giriş istasyonu numarası	1, 2, 3, 4 ve 5

İlk tasarlanan kontrol sisteminde robotun sadece gövde açısı kontrol edilmiştir. Bu sayede robot, devrilmeden dengeli bir şekilde hareket edebilmiştir. Fakat robotun kontrol sistemi içerisinde, yön ve hız kontrolü olmadığı için robot kararsız bir şekilde farklı yönlerde ve farklı hızlarda hareket etmiştir. Bu yüzden ikinci bir kontrol sistemi tasarımına ihtiyaç duyulmuştur. İlk tasarlanan kontrol sisteminin başarılı bir şekilde robot dengesini sağlaması, ikinci tasarlanan kontrol sistemi için bir alt yapı oluşturmuştur.

5.2 Dinamik Denklemler Kullanılan Açık ve Hız Geri Beslemeli Kontrol Sistemi ve Simülasyon

İki tekerlekli denge robotu için oluşturulan açık ve hız geri beslemesine sahip kontrol sistemi, sadece açı bilgisi geri beslemesine sahip kontrol sistemi modeline benzerdir. Bu modele ilave olarak kontrol sistemine sadece hız geri beslemesine sahip bir PID kontrolör daha eklenmiştir. Yine yapılan lagrange analizi neticesinde elde edilen denklem (4.25) ve denklem (4.26) Şekil 5.6'da görülen BD içerisine gömülmüştür. Şekil 5.6'da verilen blok diyagramı incelendiğinde; iki tekerlekli robot modeline, hız geri beslemesine sahip bir PID kontrolörün eklendiği görülür. Ayrıca blok diyagramında görülen dinamik denklemler alt sisteminde açı geri beslemesine sahip bir PID kontrolör daha bulunur. Kontrol sisteminde bulunan iki ayrı PID kontrolör sayesinde, robot sürekli olarak referans açı ile referans hız bilgisini kontrol eder ve buna göre dinamik denklemlere hata sinyali gönderir. Dinamik denklemler de gelen hata sinyaline göre bir tork değeri hesaplar ve tahrik motorlarına bildirir. Bu sayede, robot sürekli olarak referans açı ve referans hız değerine ulaşmaya çalışır.

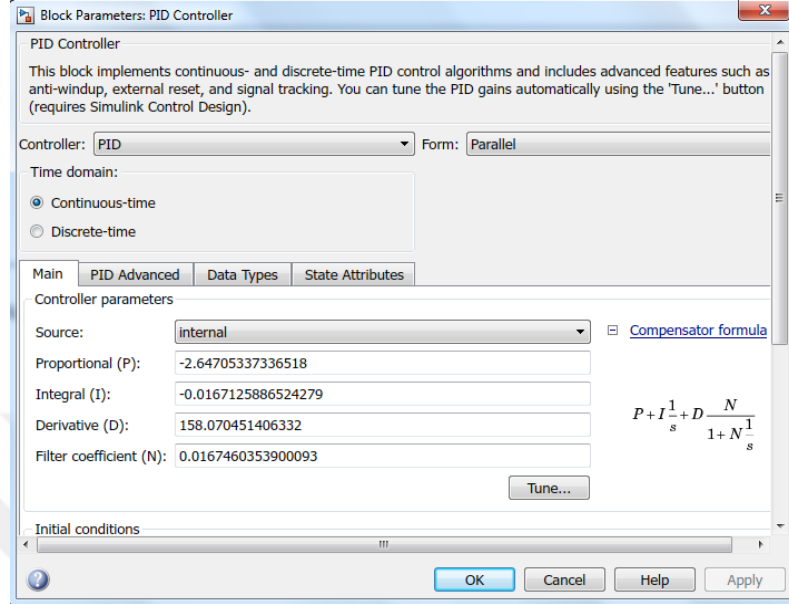


Şekil 5.6. Dinamik denklemler ile oluşturulan açı ve hız geri beslemeli BD

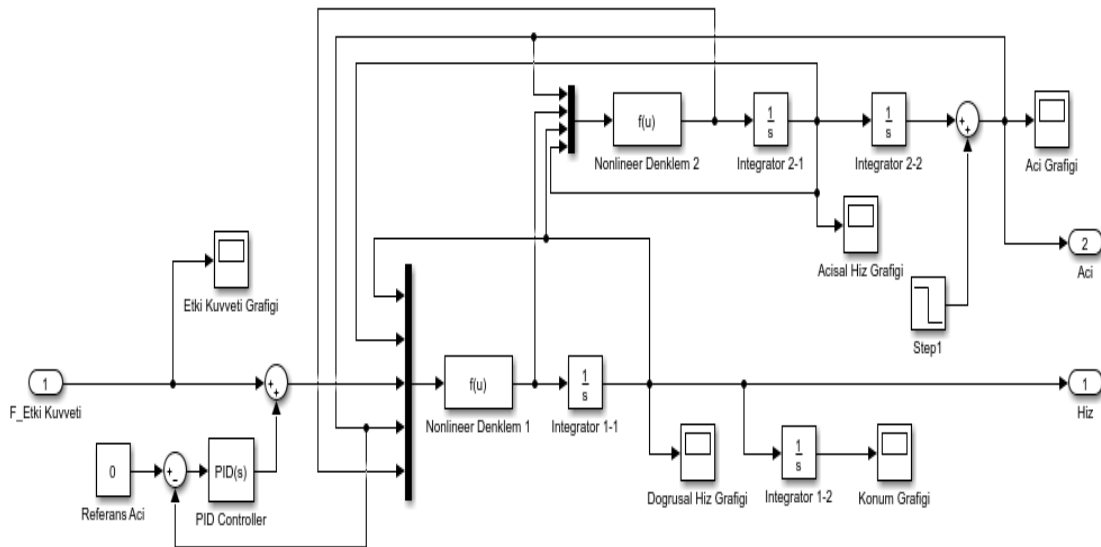
İkinci tasarlanan kontrol sisteminin amacı, hem robotun dengesini sağlaması hem de robotun yön ve hız değerinin belirlenen referanslarda olmasını sağlamasıdır. Bu yüzden ilk tasarlanan kontrol sistemi üzerine ikinci bir PID kontrolör uygulanarak, robotun yön ve hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Yeni tasarlanan bu kontrol sisteminde iki ayrı PID kontrolör olduğu için iki ayrı geri besleme bulunur. Bunlar, açı geri beslemesi ve hız geri beslemesidir. Bu geri beslemeler sayesinde robot sürekli olarak belirlenen açı ve hız referansları çerçevesinde hareket eder. Bu kontrol sistemi de yine Matlab/Simulink programı ve denklem (4.25) ile denklem (4.26) kullanılarak oluşturulmuştur. PID kontrolörün çalışma mantığı ve parametreleri yukarıda açıklanmıştır. Kontrol sisteminin sağlıklı çalışabilmesi için, PID kontrolörün yapısındaki kazanç katsayılarının en uygun değerlerinde belirlenmesi gerekir. Bu kazanç katsayıları da Matlab/Simulink programında bulunan PID Tuning aracı kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 5.7’de; PID Tuning aracı ile belirlenen, hız geri beslemesine sahip PID kontrolörün kazanç katsayıları verilmiştir. Şekil 5.6 tekrar incelendiğinde; dinamik denklemler isimli blok görülmektedir. Bu blok bir alt diyagramı temsil eder. Burada görüldüğü üzere bir “F_etki kuvveti” girdisi ile “açı” ve “hız” çıktısı bulunur. Robot için elde edilen dinamik denklemler bu blok içerisine gömülmüştür. Şekil 5.8’de bu bloğa ait alt blok diyagramı verilmiştir. Şekil 5.8’de görülen blok diyagramında, elde edilen dinamik denklemler çalışır. Blok diyagramı incelendiğinde, nonlinear denklem 1 ve nonlinear denklem 2 görülür. Bu kontrol sistemi; ilk tasarlanan kontrol sistemi alt yapısında oluşturulduğu için bu denklemlerde sırasıyla, denklem (4.25)’i ve denklem (4.26)’yı temsil ederler. Bu yüzden, denklemlerin blok diyagramlarındaki bağıntıları birbiri ile eştir. Bu bağıntılar eş olduğu için Çizelge 5.2’de verilen denklem parametreleri de her iki kontrol sisteminde kullanılmaktadır.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.8 ayrı ayrı incelendiğinde açı ve hız geri beslemesine sahip PID kontrolörler görülmektedir. Şekil 5.8’de görülen blok diyagramında görülen, ikinci PID kontrolör robotun açı referansını kontrol eder.

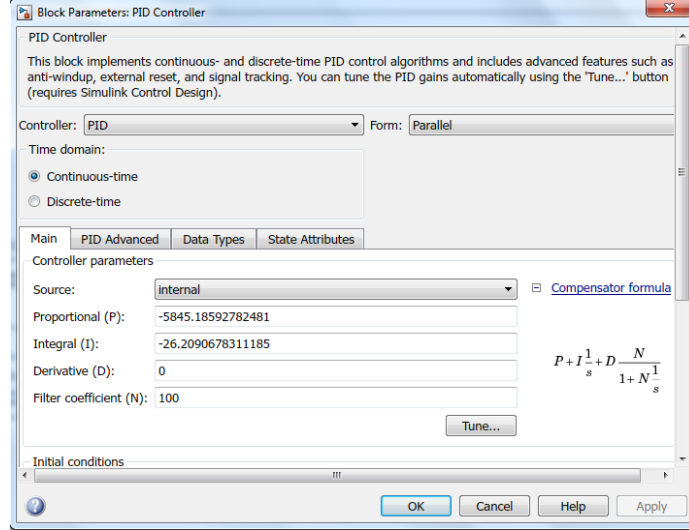
Bu kontrolörün kazanç katsayıları da Matlab/Simulink programında bulunan PID Tuning aracı kullanılarak, belirlenmiştir. Şekil 5.9’da; PID Tuning aracın ile belirlenen, açığı geri beslemesine sahip PID kontrolörün kazanç katsayıları verilmiştir.



Şekil 5.7. Hız geri beslemeli PID kontrolör kazanç katsayıları



Şekil 5.8. Açığı ve hız geri beslemeli kontrol sistemine ait, dinamik denklemler alt BD

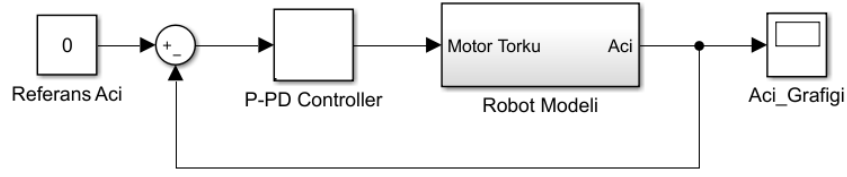


Şekil 5.9. Açık geri beslemeli PID kontrolör kazanç katsayıları

Yeni tasarlanan kontrol sistemi çalıştırıldığında, robotun hem dengesini sağlayabildiği hem de belirlenen yönde belirlenen hızda hareket edebildiği görülmüştür. Sonucun başarılı olmasında Matlab/Simulink programında bulunan PID Tuning aracı faydalı olmuştur. Bu araç sayesinde PID kontrolörlerin kazanç katsayıları en uygun değerlerde seçilebilmiştir. PID Tuning aracı kullanılmadan, kontrolörlere doğrudan farklı kazanç katsayıları girildiğinde robotun belirlenen referanslardan uzaklaşarak farklı davranışlar sergilediği görülmüştür.

5.3 Dinamik Denklemler İçermeyen Açık Beslemeli Kontrol Sistemi ve Simülasyon

İTR için dinamik denklemler kullanılmadan bir kontrol sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kontrol sisteminin, dinamik denklemler ile oluşturulan kontrol sistemlerine alternatif olması düşünülmüştür. Bu yeni sistemde, açık kontrolü doğrudan açık geri beslemesine sahip bir P-PD kontrolör tarafından gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10'da oluşturulan yeni kontrol sistemine ait blok diyagramı verilmiştir. Şekil 5.10'da verilen blok diyagramı incelendiğinde; iki tekerlekli robot modeline, açık geri beslemesine sahip bir P-PD kontrolör uygulandığı görülür. P-PD kontrolör, açıölçer sensörden gelen mevcut açı bilgisi ile referans açı bilgisini karşılaştırarak bir hata sinyali üretir ve bu sinyali doğrudan tahrik motorlarına iletir. Tahrik motorları aldığı hata sinyaline göre sürekli bir tork üretir. Bu sayede, robot sürekli olarak referans açı değerine ulaşmaya çalışır.



Şekil 5.10. Dinamik denklemler kullanılmadan oluşturulan açı geri beslemeli BD

Bu kontrol sisteminin simülasyonu, WorkingModel2D (WM2D) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. P-PD kontrolörün yapısında, diğer kontrolörlere benzer olarak kazanç katsayıları bulunur. Denklem (5.3)'de P-PD kontrolörün genel denklemi verilmiştir. Denklem (5.3) içerisindeki $e(t)$, hata fonksiyonudur ve denklem (5.4)'de bağlantısı verilmiştir.

$$P - PD(s) = K_{p1}e(t) + K_{p2}e(t) + K_d \frac{de}{dt} \quad (5.3)$$

$$e(t) = \text{referans değer} - \text{gerçekleşen değer} \quad (5.4)$$

Kontrolörün yapısında bulunan kazanç katsayılarının en uygun değeri; bu kontrol sisteminde bir program aracılığıyla değil bunun yerine deneysel olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.3'de deneysel olarak belirlenen kazanç katsayıları verilmiştir.

Çizelge 5.3. P-PD parametreleri

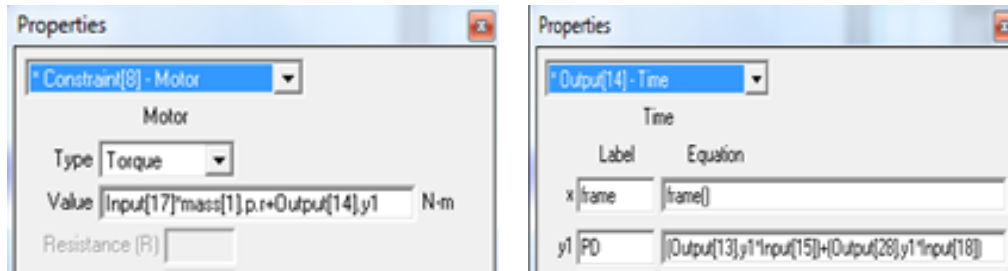
Parametre	Açıklama	Değer
K_{p1}	Oransal kazanç katsayısı	38
K_{p2}	Oransal kazanç katsayısı	5
K_d	Türevsel kazanç katsayısı	-0.5
$e(t)$	Hata fonksiyonu	

WM2D basic tabanlı bir program olduğu için simülasyon parametrelerinin buna uygun olarak tanımlanması gerekir. Çizelge 5.4'de WM2D parametreleri verilmiştir.

Çizelge 5.4. P-PD Kontrolörü için tanımlanan WM2D parametreleri

Parametre	Açıklama
mass[1].p.r	P alt denklemi
Output[14].y1	PD alt denklemi
Output[13].y1	PD alt oransal ifadesi
Output[28].y1	PD alt türevsel ifadesi
Output[30].y1	Robot gövde açısı bilgisi
Output[38].y1	Robot gövde açısal hız bilgisi
Input[17]	K_{p1} veri girişi
Input[15]	K_{p2} veri girişi
Input[18]	K_d veri girişi
Input[10]	Referans açı veri girişi
time	Zaman

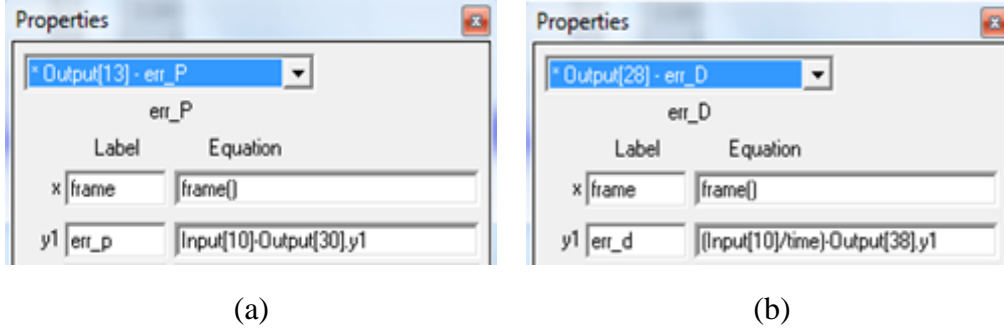
Şekil 5.11 (a)' da WM2D programına uyarlanan P-PD kontrolörün denklemi verilmiştir. Bu denklem doğrudan tekerlekleri tahrik eden motorların torklarını etkiler. Simülasyon çalıştırıldığında tasarlanan kontrol sisteminin başarılı bir şekilde dengeyi sağlayabildiği görülmüştür. Ayrıca, kontrolör kazanç katsayılarının değiştirildikçe, robotun farklı davranışlar sergilediği de görülmüştür. Şekil 5.11 (a)'da görülen "Output[14].y1" ifadesi, kontrolörün PD kısmını temsil etmektedir ve Şekil 5.11 (b)'de WM2D'ye uyarlanan alt denklemi verilmiştir. Şekil 5.11 (b) incelendiğinde, "Output[13].y1" ve "Output[28].y1" ifadeleri görülmektedir. Bu ifadeler kontrolörün PD kısmının sırasıyla, oransal (P) ve türevsel (D) değişkenlerini temsil etmektedir. Bu oransal ve türevsel ifadelerin WM2D' ye uyarlanan alt denklemleri sırasıyla Şekil 5.12 (a) ve Şekil 5.12 (b)'de verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 5.11. (a) Açık geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan P-PD denklemi, (b) Açık geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan alt PD denklemi

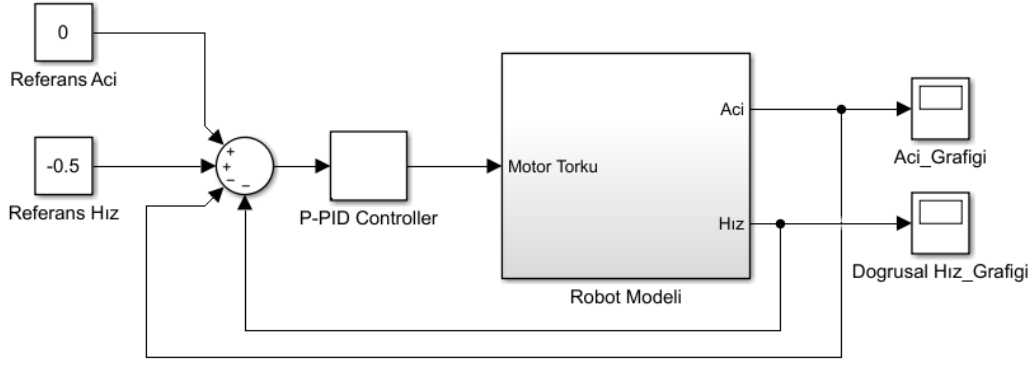


Şekil 5.12. (a) Açık geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PD kontrolörünün alt oransal ifadesi, (b) Açık geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PD kontrolörünün alt türevsel ifadesi

WM2D programı ile dinamik denklemler kullanılmadan oluşturulan açık geri beslemesine sahip P-PD kontrolör, robotun dengesini başarılı bir şekilde sağlamıştır. Robot devrilmeden dengeli bir şekilde hareket edebilmiştir. Fakat herhangi bir yön ve hız kontrolü olmadığı için farklı yönlerde ve farklı hızlarda kontrolsüz bir şekilde yol almıştır. Bu yüzden robotun hem açı dengesini sağlayabilecek hem de yön ve hız bilgisini kontrol edebilecek, WM2D’ de ikinci bir kontrol sistemi daha tasarlanmıştır.

5.4 Dinamik Denklemler İçermeyen Açık ve Hız Beslemeli Kontrol Sistemi ve Simülasyon

İki tekerlekli denge robotu için yine dinamik denklemler kullanılmadan bir kontrol sistemi daha oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kontrol sisteminin de, dinamik denklemler ile oluşturulan kontrol sistemlerine alternatif olması düşünülmüştür. Bu yeni sistemde, açı kontrolü ile hız kontrolü doğrudan açı ve hız geri beslemesine sahip bir P-PID kontrolör tarafından gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.13’de oluşturulan yeni kontrol sistemine ait blok diyagramı verilmiştir. Şekil 5.13’ de verilen blok diyagramı incelendiğinde; iki tekerlekli robot modeline, açı ve hız geri beslemesine sahip bir P-PID kontrolörün eklendiği görülür. P-PID kontrolör, sensörlerden gelen mevcut açı ve hız bilgileri ile referans açı ve hız bilgilerini karşılaştırarak bir hata sinyali üretir ve bu sinyali doğrudan tahrik motorlarına iletir. Tahrik motorları da hata sinyaline göre sürekli bir tork üretir. Bu sayede, robot sürekli olarak referans açı ve referans hız değerine ulaşmaya çalışır.



Şekil 5.13. Dinamik denklemler kullanılmadan oluşturulan açı ve hız geri beslemeli BD

Yeni tasarlanan bu alternatif kontrol sistemi de dinamik denklemler kullanılmadan oluşturulmuştur. Bu alternatif kontrol sistemi için yine WM2D programında; açı geri beslemesine sahip P-PD kontrolörün alt yapısı kullanılarak, açı ve hız geri beslemesine sahip bir P-PID kontrolör tasarlanmıştır. Şekil 5.13 incelendiğinde; P-PID kontrolör tarafından gönderilen katsayının doğrudan motor torklarına etki ettiği görülür. P-PID kontrolörün yapısında, diğer kontrolörlere benzer olarak kazanç katsayıları bulunur. Denklem (5.5)'de P-PID kontrolörün genel denklemi verilmiştir. Denklem (5.5) içerisindeki $e(t)$, hata fonksiyonudur ve denklem (5.6)'de bağıntısı verilmiştir.

$$P - PID(s) = K_{p1}e(t) + K_{p2}e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (5.5)$$

$$e(t) = referans\ değer - geręekleşen\ değer \quad (5.6)$$

Kontrolörün yapısında bulunan kazanç katsayılarının en uygun değeri; bu kontrol sisteminde bir program aracılığıyla değil bunun yerine deneysel olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.5'de deneysel olarak belirlenen kazanç katsayıları verilmiştir. WM2D basic tabanlı bir program olduğu için simülasyon parametrelerinin buna uygun olarak tanımlanması gerekir. Çizelge 5.6'da WM2D parametreleri verilmiştir.

Çizelge 5.5. P-PID parametreleri

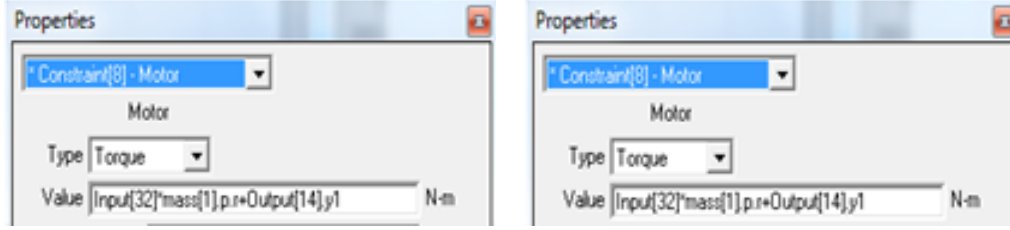
Parametre	Açıklama	Değer
K_{p1}	Oransal kazanç katsayısı	38
K_{p2}	Oransal kazanç katsayısı	40
K_i	Integral kazanç katsayısı	9
K_d	Türevsel kazanç katsayısı	-0.01
$e(t)$	Hata fonksiyonu	

Çizelge 5.6. P-PID Kontrolörü için tanımlanan WM2D parametreleri

Parametre	Açıklama
mass[1].p.r	P alt denklemi
Output[14].y1	PID alt denklemi
Output[13].y1	PID alt oransal ifadesi
Output[28].y1	PID alt integral ifadesi
Output[29].y1	PID alt türevsel ifadesi
Output[11].y1	Robot gövde doğrusal hız bilgisi
Output[19].y1	Robot gövde konum bilgisi
Output[23].y1	Robot gövde doğrusal ivme bilgisi
Input[32]	K_{p1} veri girişi
Input[15]	K_{p2} veri girişi
Input[18]	K_i veri girişi
Input[17]	K_d veri girişi
Input[10]	Referans hız veri girişi
time	Zaman

Şekil 5.14 (a)'da WM2D programına uyarlanan P-PID kontrolörün denklemi verilmiştir. Bu denklem doğrudan tekerlekleri tahrik eden motorların torklarını etkiler. Simülasyon çalıştırıldığında tasarlanan kontrol sisteminin başarılı bir şekilde robotun, hem dengesini sağlayabildiği hem de belirlenen referans hız değerinde hareket ettirebildiği görülmüştür. Ayrıca, kontrolör kazanç katsayılarının değiştirildikçe robotun farklı davranışlar sergilediği de görülmüştür. Şekil 5.14 (a)'da görülen “Output[14].y1” ifadesi, kontrolörün PID kısmını temsil eder ve Şekil 5.14 (b)'de WM2D' ye uyarlanan alt denklemi verilmiştir. Şekil 5.14 (b) incelendiğinde, “Output[13].y1”, “Output[28].y1” ve “Output[29].y1” ifadeleri görülür.

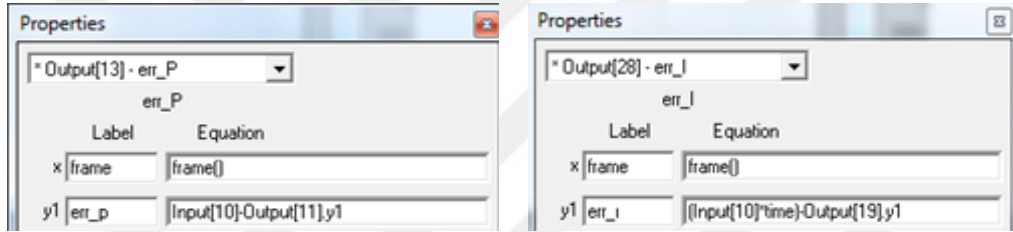
Bu ifadelerde kontrolörün PID kısmının sırasıyla oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) değişkenlerini temsil eder. Bu ifadelerin WM2D'ye uyarlanan alt denklemleri sırasıyla Şekil 5.15 (a), Şekil 5.15 (b) ve Şekil 5.15 (c)'de verilmiştir.



(a)

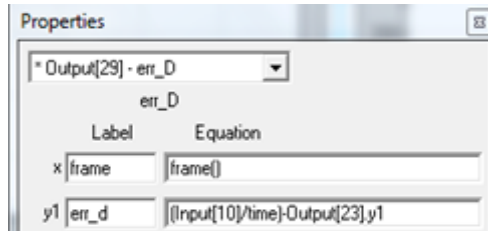
(b)

Şekil 5.14. (a) Açık ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan P-PID denklemi, (b) Açık ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan alt PID denklemi



(a)

(b)



(c)

Şekil 5.15. (a) Açık ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PID kontrolörünün alt oransal (P) ifadesi, (b) Açık ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PID kontrolörünün alt integral (I) ifadesi, (c) Açık ve hız geri beslemesine sahip WM2D programına uyarlanan PID kontrolörünün alt türevsel (D) ifadesi

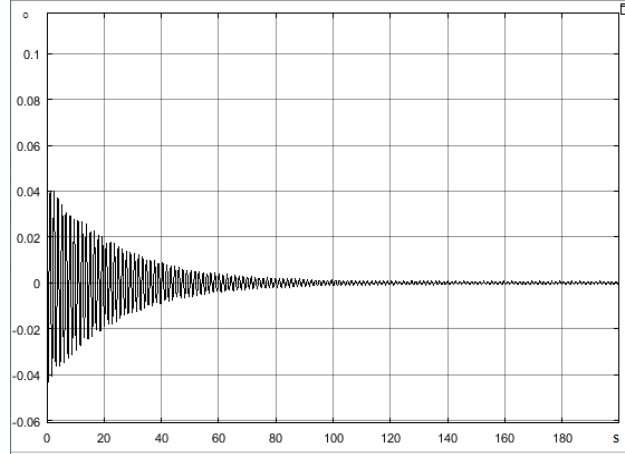
WM2D ara yüzünde oluşturulan simülasyon olumlu sonuçlar vermiştir. Tasarlanan kontrol sistemi hem robot dengesini sağlayabilmiş hem de robotun belirlenen yönde ve hızda hareket etmesini sağlamıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

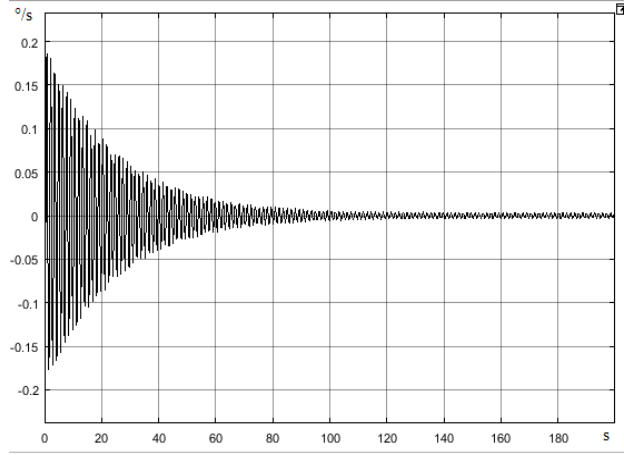
Bu kısımda; İTR için tasarlanan farklı kontrol sistemlerinden elde edilen simülasyon verileri incelenmiştir.

6.1 Dinamik Denklemler Kullanılan Aç, Aç ve Hız Geri Beslemeli Kontrol Sistemleri

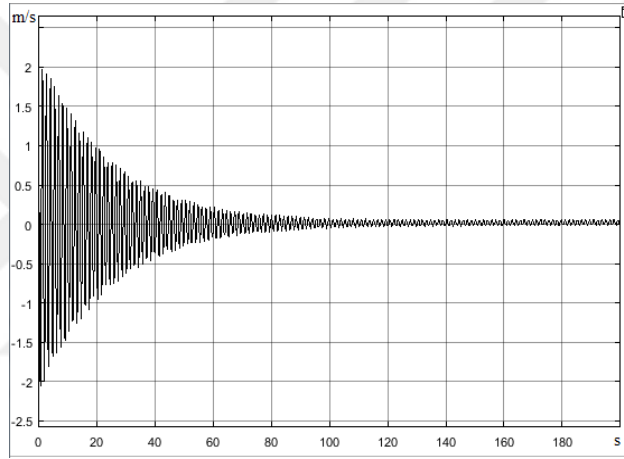
Birinci tasarlanan kontrol sisteminde; robotun dinamik denklemleri kullanılarak, Matlab/Simulink programında açı geri beslemesine sahip bir PID kontrolör ile robotun sadece açısal dengesi kontrol edilmiştir. Simülasyon çalıştırıldığında, robotun dengesini sağlayabildiği görülmüştür. Şekil 6.1’de robotun çalışma sırasındaki açısal değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.1 incelendiğinde, robotun harekete başladıktan 200 s sonra, $0,01^\circ$ ’den daha az salınımlarla dengesini koruyabildiği görülür. Şekil 6.2’de robotun çalışma sırasındaki açısal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.2 incelendiğinde; robotun harekete başladıktan 100 s sonra, $0,02^\circ/s$ ’den daha az bir açısal hıza sahip olduğu görülmektedir. Buna göre robot dengesini koruma eğilimindedir. Şekil 6.3’de robotun çalışma sırasındaki doğrusal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.3 incelendiğinde; robotun harekete başladıktan yine 100 s sonra, ortalama 0.1 m/s hızında ileri geri yönde bir salınım hareketi gerçekleştirdiği görülür. Buna göre robot mevcut konumunu koruma eğilimindedir.



Şekil 6.1. Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)



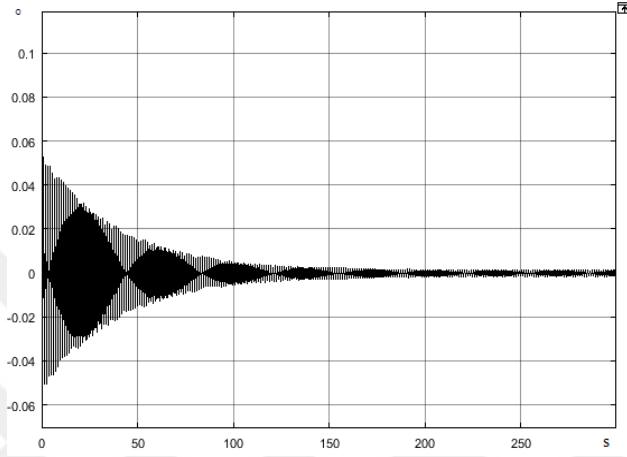
Şekil 6.2. Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal hız değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)



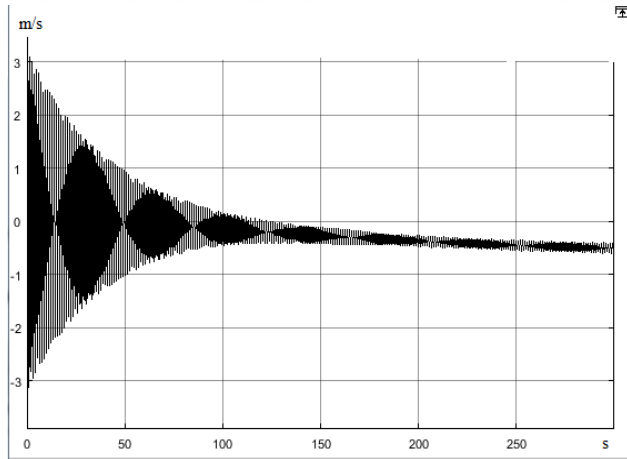
Şekil 6.3. Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)

Robotun, dengeli bir şekilde hareket ettiği görülmüştür fakat herhangi bir yön ve hız kontrolü olmadığı için kontrolsüz olarak hareket etmektedir. Bu durumun ortadan kaldırılması için yine Matlab/Simulink programında dinamik denklemler kullanılarak ikinci bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. Bu kontrol sisteminde, öncekine ek olarak bir de hız geri beslemesine sahip PID kontrolör kullanılmıştır. Açık ve hız bilgisine sahip iki ayrı PID kontrolör sayesinde robot dengeli bir şekilde belirlenen yönde ve hızda hareket edebilmiştir. Simülasyon çalıştırıldığında aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Şekil 6.4'de robotun çalışma sırasındaki açısal değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.4 incelendiğinde, robotun harekete başladıktan 200 s sonra 0,01°'den daha az salınımlarla dengesini koruyabildiği görülür. Robot için referans verilen hız negatif yönde -0,5 m/s'dir. Şekil 6.5'de robotun çalışma sırasındaki doğrusal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir.

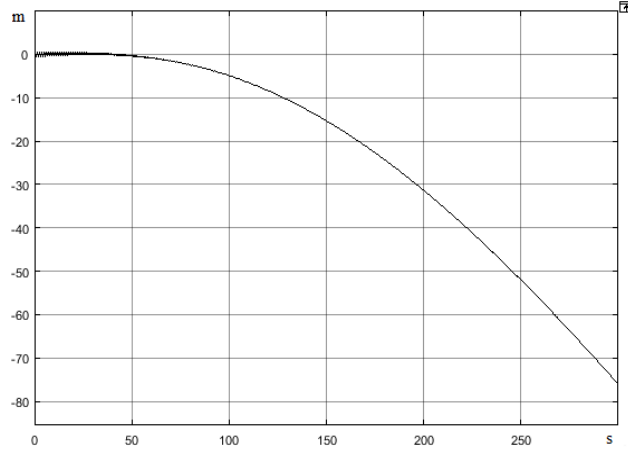
Ek A'da, Matlab/Simulink'te farklı yön ve hız referanslarında çalıştırılan simülasyonların grafikleri verilmiştir. Şekil 6.5 incelendiğinde, robotun doğrusal hızının negatif yönde ve ortalama $-0,4$ m/s ile $-0,6$ m/s arasında salınım yaptığı görülür. Şekil 6.6'da robotun çalışma sırasındaki doğrusal konum değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.6 incelendiğinde, robotun referans verilen yön ve hız bilgisine uygun olarak negatif yönde yol aldığı görülür.



Şekil 6.4. İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)



Şekil 6.5. İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)



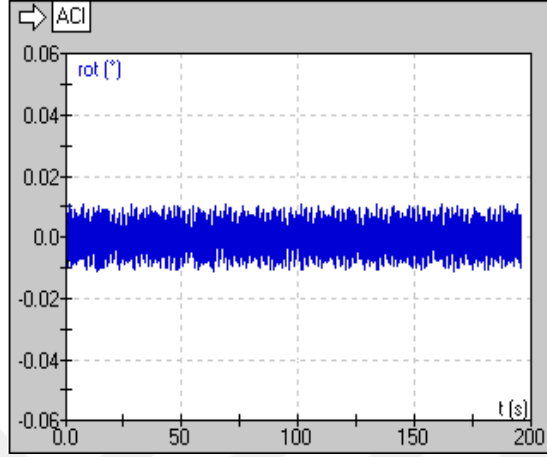
Şekil 6.6. İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik (Matlab/Simulink)

Birinci kontrol sistemi ile ikinci kontrol sistemi tasarlanırken dinamik denklemler kullanılmıştır ve her iki kontrol sistemi için Matlab/Simulink programında simülasyonlar oluşturulmuştur. Çalıştırılan simülasyonlar sonucunda elde edilen robotun açısal değişim grafikleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.4 karşılaştırıldığında; açı ve hız geri beslemesine sahip kontrol sisteminin, sadece açı geri beslemesine sahip kontrol sistemine göre yaklaşık 100 s sonra stabil denge durumuna geldiği görülmektedir. Bu gecikmenin, açı ve hız geri beslemesine sahip kontrol sisteminin, açı geri beslemesine sahip kontrol sistemine göre daha karmaşık yapıda olmasından dolayı kaynaklandığı düşünülmüştür.

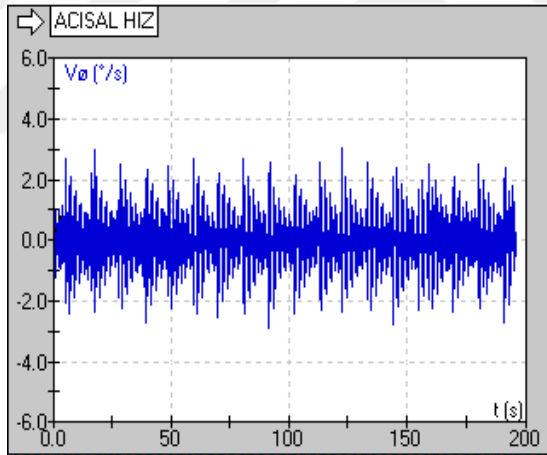
6.2 Dinamik Denklemler İçermeyen Açı, Açı ve Hız Geri Beslemeli Kontrol Sistemleri

Dinamik denklemler ile oluşturulan simülasyonların olumlu sonuçlar vermesinin ardından, alternatif olması amacıyla dinamik denklemler içermeyen iki ayrı kontrol sistemi daha tasarlanmıştır. Dinamik denklemler kullanılmadan tasarlanan birinci kontrol sistemi, sadece açı geri beslemesine sahip P-PD kontrolör ile oluşturulmuştur. Bu kontrol sisteminin simülasyonu WM2D programında çalıştırılarak, robot test edilmiştir. Test sonucunda, sadece açı geri beslemesine sahip P-PD kontrolörün robot dengesini sağlamada yeterli olduğu görülmüştür. Şekil 6.7’de robotun çalışma sırasındaki açısal değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.7 incelendiğinde, robot harekete başladığında gövde açısının $0,01^\circ$ ’yi aşmadan küçük salınımlarla dengesini koruyabildiği görülür. Şekil 6.8’de robotun çalışma sırasındaki açısal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.8 incelendiğinde, robot harekete başladığında gövde açısal hızının $3^\circ/s$ ’yi aşmadan küçük salınımlarla hareket edebildiği görülür.

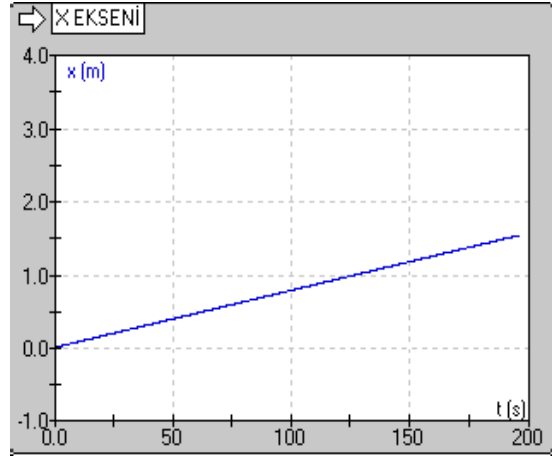
Robot kontrolsüz olarak düşük hızlarda seyretmektedir. Şekil 6.9’de robotun çalışma sırasındaki doğrusal konum değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.9 incelendiğinde, robotun hareketi sırasında herhangi bir yönde kontrolsüz olarak ilerlediği görülür.



Şekil 6.7. Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik (WM2D)

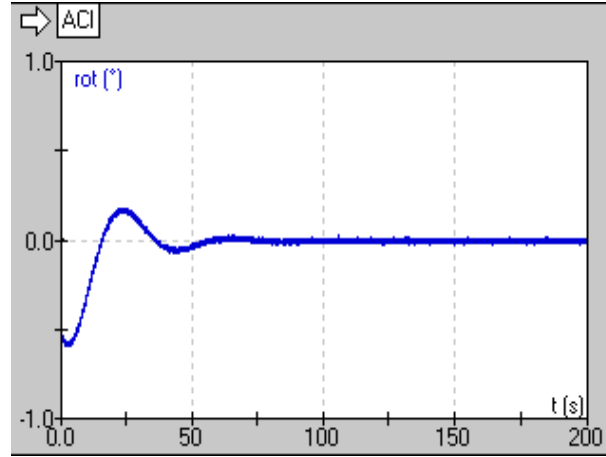


Şekil 6.8. Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal hız değişimini gösteren grafik (WM2D)

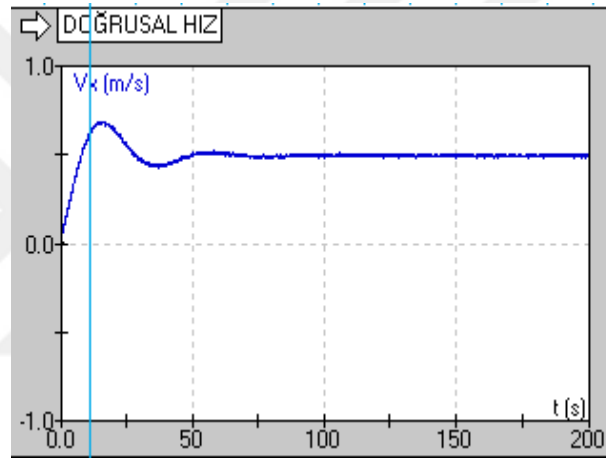


Şekil 6.9. Birinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik (WM2D)

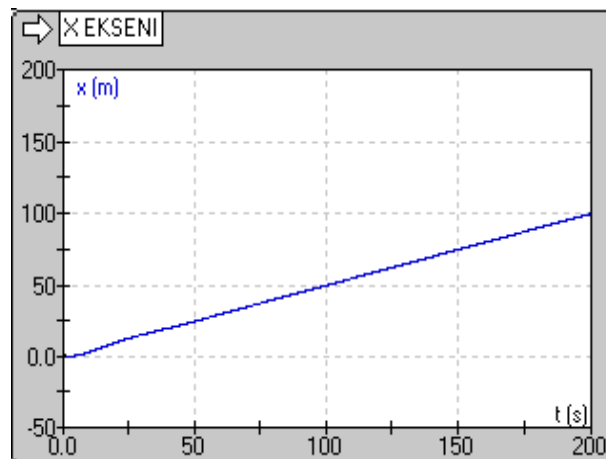
Robot, dengeli bir şekilde hareket ediyor fakat herhangi bir yön ve hız kontrolü olmadığı için kontrolsüz olarak yer değiştirmiştir. Robotun hem denge kontrolünün hem de hız ve yön kontrolünün sağlanması için, yine dinamik denklemler kullanılmadan ikinci bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrol sisteminde açı ve hız geri beslemesine sahip P-PID kontrolör kullanılmıştır. Bu kontrol sisteminin de simülasyonu WM2D programı ile oluşturularak, robot test edilmiştir. Test sonucunda, açı ve hız geri beslemesine sahip P-PID kontrolörün hem robot dengesini sağladığı hem de robotu belirlenen yön ve hız değerinde hareket ettirebildiği görülmüştür. Şekil 6.10'da robotun çalışma sırasındaki açısal değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.10 incelendiğinde, robot ilk harekete başladığında gövde açısının $0,2^\circ$ 'yi aşacak şekilde büyük salınımlar yaptığı sonrasında ise bu salınımların azalarak devam ettiği ve $0,01^\circ$ 'ye kadar düştüğü görülür. Robot için referans verilen hız pozitif yönde $0,5 \text{ m/s}$ 'dir. Şekil 6.11'de robotun çalışma sırasındaki doğrusal hız değişimini gösteren grafik verilmektedir. Şekil 6.11 incelendiğinde, robot ilk harekete başladığında gövde doğrusal hızının $0,7 \text{ m/s}$ 'yi aşacak şekilde büyük salınımlar yaptığı sonrasında ise bu salınımların azalarak devam ettiği ve referans verilen $0,5 \text{ m/s}$ değerine kadar düştüğü görülür. Şekil 6.12'da robotun çalışma sırasındaki doğrusal konum değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.12 incelendiğinde, robotun referans verilen yön ve hız bilgisine uygun olarak negatif yönde yol aldığı görülür. Ek B'de, WM2D'de farklı yön ve hız referanslarında çalıştırılan simülasyonlarının grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.10. İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik (WM2D)



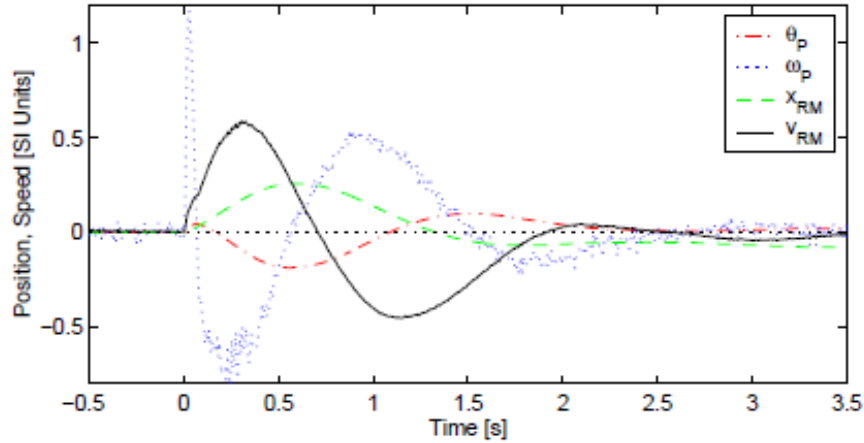
Şekil 6.11. İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik (WM2D)



Şekil 6.12. İkinci kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik (WM2D)

Dinamik denklemler kullanılmadan tasarlanan iki ayrı kontrol sisteminin robot dengesini sağlamadaki yeterlilik durumu karşılaştırılmıştır. Açık ve hız geri beslemesine sahip kontrol sistemine ait olan Şekil 6.10'da ki açı değişim grafiği incelendiğinde, robot ilk harekete başladığında gövde açısının $0,2^\circ$ 'yi aşacak şekilde büyük salınımlar yaptığı sonrasında ise bu salınımların azalarak devam ettiği ve $0,01^\circ$ 'ye kadar düştüğü görülür. Sadece açı geri beslemesine sahip kontrol sistemine ait olan Şekil 6.7'deki açı değişimi grafiği incelendiğinde ise robot ilk harekete başladığında gövde açısının $0,01^\circ$ 'yi aşmadan küçük salınımlarla dengesini koruyabildiği görülür. Açık ve hız bilgisine sahip kontrol sisteminin, sadece açı geri beslemesine sahip kontrol sistemine göre daha karmaşık yapıda olmasının bu duruma sebep olduğu düşünülmüştür.

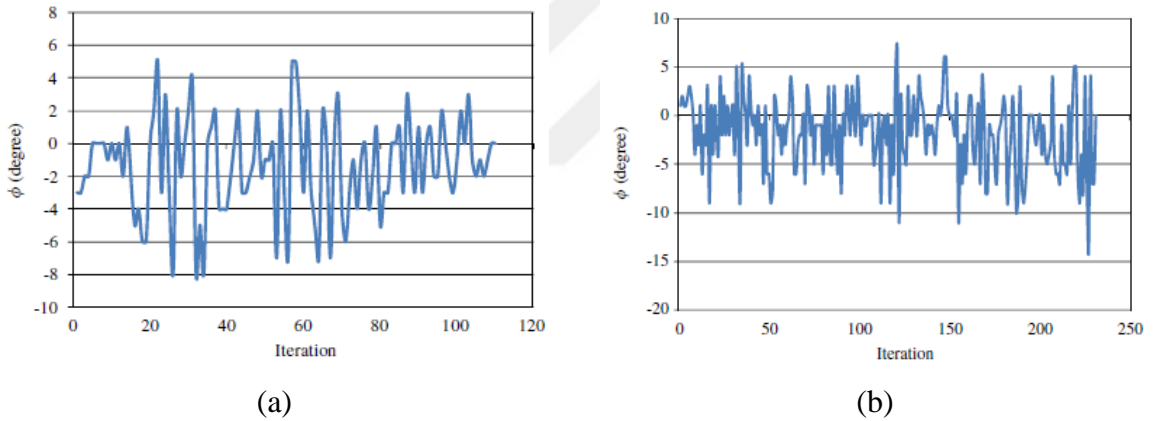
Felix ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (2002); tasarladıkları "Joe" isimli iki tekerlekli robotu dengede tutabilmek için, dinamik denklemler kullanılarak özel tasarlanan denetleyici ile oluşturulan bir kontrol sistemi kullanmışlardır. Şekil 6.13'de "Joe" isimli robotun çalışma durumundaki parametrelerini içeren grafiği verilmiştir. Şekil 6.13'deki kırmızı kesikli çizgi robotun açı değişimini ifade etmektedir. Buna göre robotun ilk harekete başladığındaki açı salınımını ve sonrasındaki davranışını, bu çalışmada test edilen kontrol sistemleri simülasyonlarından elde edilen açı değişimi grafikleri ile karşılaştırdığımızda değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir [15].



Şekil 6.13. "Joe" isimli robotun çalışma durumundaki denge grafiği

Su ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada (2010); iki tekerlekli robot için yeni bir sinir bulanıklığına dayalı kontrolör geliştirilmiştir. Dinamik denklemler kullanılarak geliştirilen kontrolör model üzerine uygulanmıştır. Yeni kontrol sistemi bilinen iki tekerlekli PD kontrol yöntemiyle karşılaştırıldığında, önerilen sinirsel bulanık temelli denetleyici göze çarpan özelliklere sahiptir.

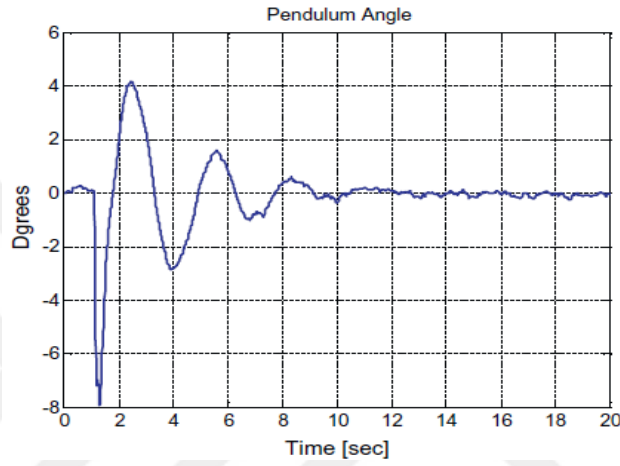
Kendi kendine ayar özelliği, toplam kayma yüzeyi bulanık sisteme gömüldüğü için belirsizliklerin duyarlılığı azaltılması önemli özelliklerdir. Ayrıca; sadece bir adet çevresel jiroskop ile ivmeölçer gerektiğinden, iki tekerlekli robotun maliyeti de azaltılabilir. Şekil 6.14 (a)'da yeni tasarlanan bulanık sinir ağı kontrolörünün kullanıldığı robotun açı değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.14 (b)'de ise geleneksel PD kontrolörünün kullanıldığı robotun açı değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 6.14 (a) ve Şekil 6.14 (b)'de verilen grafikler incelendiğinde; bulanık sinir ağı kontrolörünün, geleneksel PD kontrolöre göre daha küçük açı salınımları yaptığı görülmektedir. Bulanık sinir ağı kontrolörünün ve PD kontrolörünün açı değişimini gösteren grafiklerini; bu çalışmada test edilen kontrol sistemlerinin simülasyonlarından elde edilen açı değişimi grafikleri ile karşılaştırdığımızda, bu çalışmada elde edilen simülasyon verileri grafiklerinde açı değişimi salınımının daha küçük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada test edilen kontrol sistemleri, Su ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada test edilen kontrol sistemlerine göre robotun daha kararlı olarak dengede kalmasını sağlamışlardır [17].



Şekil 6.14. (a) Bulanık sinir ağı kontrolörü test sonuçları, (b) Geleneksel PD kontrolörü test sonuçları,

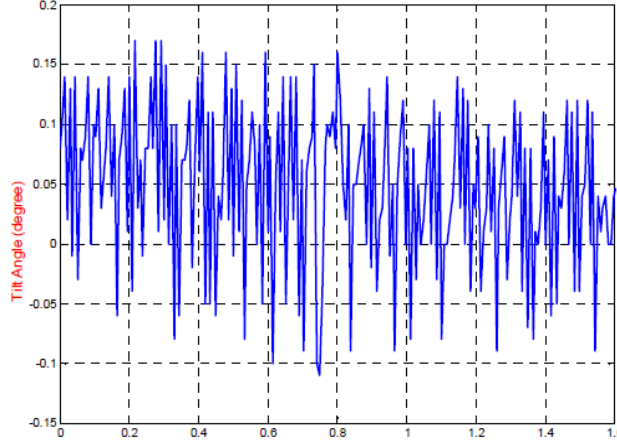
Lee ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada (2012), dengeleme açısını düşük maliyetli sensörlerle doğru olarak ölçmek için filtreler tasarlanmıştır. Gyro sensörünün kayması ve eğim sensörünün yavaş tepkisi ile ilgili sorunları çözmek için tamamlayıcı filtre deneysel olarak tasarlanmıştır. Filtrelenen veriler, Kalman filtresinin açığı daha doğru tahmin edebilmesi için kullanılmıştır. Tasarladıkları MIPS isimli robot, dengeleme açısını ve pozisyon ve rota açısının izlenmesini kontrol etmek için dinamik denklemler de kullanılarak basit PD ve PID kontrolörleri tarafından kontrol edilmiştir. Deneysel sonuçlar MIPS'nin kasıtlı isabetler gibi dış rahatsızlıklara karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir.

MIPS, sarkaç balanslanırken joystick tarafından kablosuz iletişim yoluyla üretilen istenen yörüngeleri iyi izler. Şekil 6.15’de MIPS’in çalışma durumuna ait denge grafiği verilmiştir. Şekil 6.15 incelendiğinde; robotun ilk harekete başladığındaki açı salınımını ve sonrasındaki davranışını; bu çalışmada test edilen kontrol sistemleri simülasyonlarından elde edilen açı değişimi grafikleri ile karşılaştırdığımızda, Lee ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada robot harekete ilk başladığında fazla açı salınımı yaptığı ve açı salınımının 10. s’den sonra bu çalışmada elde edilen simülasyon verileri değerlerine yaklaştığı görülmektedir [20].



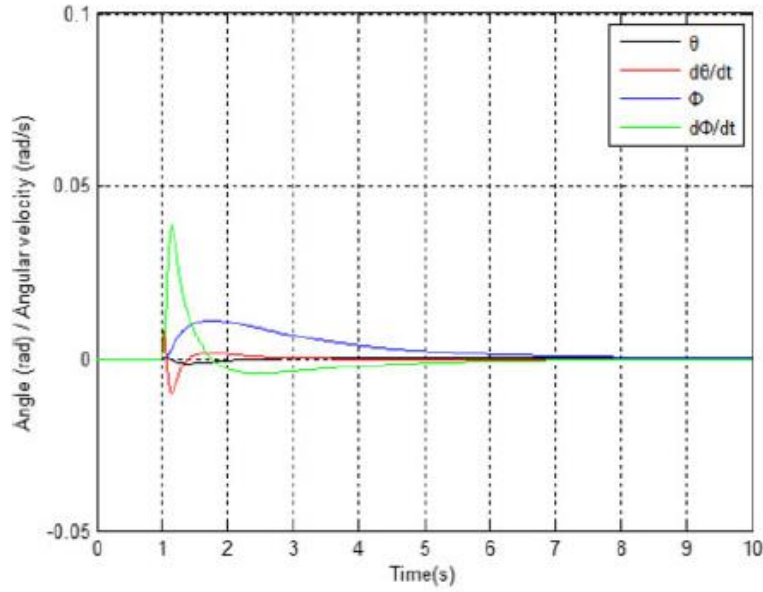
Şekil 6.15. “MIPS” isimli robotun çalışma durumundaki denge grafiği

Son ve Anh yaptıkları çalışmada (2014); bir eScooter’ın kendini dengeleme kontrolü için dinamik denklemler kullanılarak uyarlamalı bir geri tepme yöntemi önerilmiştir, sola ve sağa dönüş için PD kontrolü önerilmiştir. Çalışmada; modelleme, Kalman filtresi kullanarak sinyal işleme, donanım yapılandırması ve bir kontrol şeması gibi eScooter terimleri tartışılmaktadır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar, önerilen uyarlanabilir kontrolün belirsiz parametreleri etkin bir şekilde tahmin edebileceğini ve sağlam bir dengeleme kontrolü sağlayabildiğini göstermektedir. Buna göre eScooter istikrarlı ve iyi performansla çalışabilmektedir. Şekil 6.16’da eScooter’ın çalışma durumuna ait denge grafiği verilmiştir. Şekil 6.16 incelendiğinde; robotun ilk harekete başladığındaki açı salınımını ve sonrasındaki davranışını; bu çalışmada test edilen kontrol sistemleri simülasyonlarından elde edilen açı değişimi grafikleri ile karşılaştırdığımızda, Son ve Anh’ın yaptıkları çalışmada robotun açı salınımının aşırı olmasa da daha fazla olduğu görülmektedir [25].



Şekil 6.16. “eScooter” isimli robotun çalışma durumundaki denge grafiği

Park ve Cho yaptıkları çalışmada (2018), kendini dengeleyen bir robota harici bir kuvvet uygulandığında dengesini daha iyi koruyabilmesi için dinamik denklemler kullanılarak oluşturulan kontrol sistemine bir modül eklemiştir. Bu sayede, CMG (Control Moment Gyroscope) modülünü içeren iki tekerlekli kendini dengeleyen KUWAY isimli robot geliştirilmiştir. Deneysel olarak; KUWAY'daki CMG modülünün, rahatsızlığın etkisini azaltmak için yeterli tork ürettiği doğrulanmıştır. Ek olarak, CMG modülü tekerlekli motorların yükünü dağıtmıştır. Her ne kadar CMG modülü bir rahatsızlık uygulandığında deney robotunun hareketini ve eğimini azaltmış olsa da, mükemmel bir performans göstermemiştir. Simülasyon çalışmalarıyla, daha yüksek bir performansa sahip CMG modülü geliştirilmiştir. Şekil 6.17’de KUWAY’in çalışma durumuna ait denge grafiği verilmiştir. Şekil 6.17 incelendiğinde; robotun ilk harekete başladığındaki açı salınımını ve sonrasındaki davranışını; bu çalışmada test edilen kontrol sistemleri simülasyonlarından elde edilen açı değişimi grafikleri ile karşılaştırdığımızda, değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir [33].



Şekil 6.17. “KUWAY” isimli robotun çalışma durumundaki denge grafiği

Literatür incelendiğinde; iki tekerlekli denge robotları üzerine yapılan çalışlarda, kontrol sistemlerinde farklı kontrolörler kullanıldığı görülse de genel olarak bu kontrol sistemleri dinamik denklem modelleri üzerine tasarlanmışlardır. Robotların dinamik denklemleri tek bir yöntem ile değil farklı yöntemler ile de elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, tasarlanan kontrol sistemleri simülasyonlarından elde edilen veriler aynı kategorideki farklı çalışmalardan elde edilen veriler ile karşılaştırıldığında; dinamik denklemler kullanılmadan tasarlanan kontrol sistemlerinin robot dengesini sağlamada, dinamik denklemler kullanılarak tasarlanan kontrol sistemlerine alternatif olabileceğini göstermiştir. İlerleyen teknolojiyle beraber daha donanımlı elektronik ekipmanların (sensörler, kontrolcü kartları, motorlar, modüller.. vs.) geliştirilmesiyle, dinamik denklemler kullanılmadan tasarlanan kontrol sistemleri daha verimli çalışabileceklerdir. Bu sayede, robotlar daha yalın bir kontrol yapısına sahip olarak düşük maliyetlerle insanların kullanımına sunulabilecektir.

7. SONUÇLAR

İTR, ters sarkaç problemi temelinde çözümlenmiştir. Yapılan bu çalışmada;

I. İTR için, ters sarkaç problemi temelinde lagrange yöntemi kullanılarak doğrusal olmayan (nonlinear) dinamik denklemler elde edilmiştir. Elde edilen dinamik denklemler kullanılarak Matlab/Simulink programında iki ayrı kontrol sistemi tasarlanmıştır. Birinci tasarlanan kontrol sistemi sadece açı geri beslemesine sahiptir ve bir PID kontrolör kullanılmıştır. İkinci tasarlanan kontrol sistemi ise açı ve hız geri beslemesine sahiptir ve iki ayrı PID kontrolör kullanılmıştır. Kontrol sistemi simülasyonları ayrı ayrı çalıştırılmıştır ve sonuçları incelenmiştir. Buna göre; sadece açı geri beslemesine sahip kontrolörün yaklaşık 100 s sonra, $0,01^\circ$ 'den daha az açı salınımlarıyla robot dengesini koruyabildiği görülmüştür. Buna karşılık, açı ve hız geri beslemesine sahip kontrolörün ise yaklaşık 200 s sonra, $0,01^\circ$ 'den daha az açı salınımlarıyla robot dengesini koruyabildiği görülmüştür. İki kontrol sistemi arasındaki bu farkın, açı ve hız geri beslemesine sahip kontrol sisteminin diğerine göre daha karmaşık yapıda olmasından dolayı kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Ayrıca, kontrol sistemlerinde PID kontrolör kullanılması, dinamik denklemlerde yapılabilecek küçük hataları tolere etmiştir. Dinamik denklemlerde yapılabilecek küçük hatalar, yalnızca PID kontrolörün kazanç katsayılarını etkiler ve robot dengeli bir şekilde çalışır.

II. İTR için dinamik denklemler ile oluşturulan kontrol sistemlerine alternatif olması amacıyla, dinamik denklemler kullanılmadan iki ayrı alternatif kontrol sistemi daha tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrol sistemlerinin simülasyonları WM2D programında çalıştırılmıştır. Birinci alternatif kontrol sistemi sadece açı geri beslemesine sahiptir ve P-PD kontrolör kullanılmıştır. İkinci alternatif kontrol sistemi ise açı ve hız geri beslemesine sahiptir ve P-PID kontrolör kullanılmıştır. Kontrol sistemleri ayrı ayrı çalıştırılmıştır ve sonuçları incelenmiştir. Buna göre; sadece açı geri beslemesine sahip alternatif kontrol sisteminde, robot harekete başladığında gövde açısının $0,01^\circ$ 'yi aşmadan küçük salınımlarla dengesini koruyabildiği görülür. Açı ve hız geri beslemesine sahip alternatif kontrol sisteminde ise, robot ilk harekete başladığında gövde açısının $0,2^\circ$ 'yi aşacak şekilde büyük salınımlar yaptığı sonrasında ise bu salınımların azalarak devam ettiği ve yaklaşık 200 s'de $0,01^\circ$ 'ye kadar düştüğü görülür. Bu iki kontrol sistemi arasındaki zamanlama farkının da dinamik denklemlerle oluşturulan kontrol sistemlerinde de olduğu gibi, açı ve hız geri beslemesine sahip alternatif kontrol sisteminin diğer alternatif kontrol sistemine göre daha karmaşık yapıda olmasından dolayı kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

III. İki tekerlekli denge robotu için tasarlanan kontrol sistemleri karşılaştırılmıştır. Buna göre; dinamik denklemler kullanılmadan tasarlanan kontrol sistemlerinin, dinamik denklemler kullanılarak tasarlanan kontrol sistemlerine alternatif olabileceği görülmüştür. Her iki kontrol sisteminin denge sapmaları kabul edilebilir tolerans sınırları içerisindedir. Dinamik denklemler kullanılmadan oluşturulan kontrol sistemleri daha basit yapıda olduğu için, uygulamada dinamik denklemler ile oluşturulan kontrol sistemlerine göre daha düşük seviyeli elektronik ekipmanlar kullanılmasına imkân sağlar. Bu durum, doğrudan tasarımın maliyetini etkiler. Bu yüzden ileri teknoloji gerektirmeyen bazı ticari uygulamalarda kullanımı hem daha ekonomik hem de daha makuldür. Diğer yandan, dinamik denklemler ile oluşturulan kontrol sistemleri daha bilimsel bir yaklaşımdır ve ileri teknoloji gerektiren uygulamalarda tercih edilmesinin daha doğru olduğu değerlendirilmiştir. İTR' nin yalnızca günümüz şartlarında değil de sonraki zamanlarda ileri teknoloji gerektiren birçok uygulamanın alt yapısını oluşturabileceğini düşündüğümüzde, bu yaklaşım daha faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

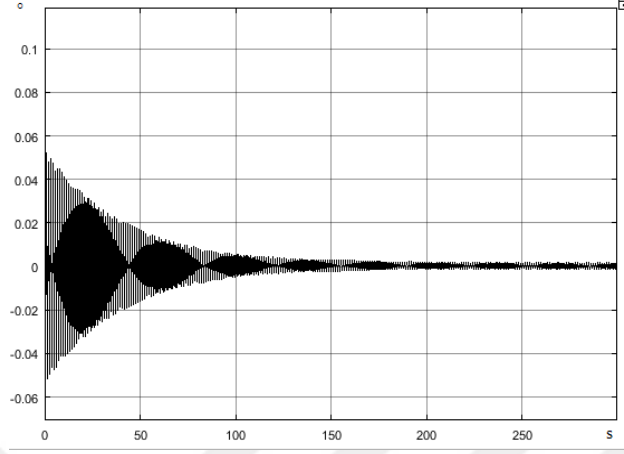
- [1] Barutçuoğlu, I.E (2001), Robotların Tarihçesi, İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Bitirme tezi.
- [2] URL 1, 2019, tr-tr.segway.com (01/06/2019)
- [3] URL 2, 2019, www.europesecureguvenlik.com (25/05/2019)
- [4] URL 3, 2019, www.log.com.tr (20/05/2019)
- [5] Kahvecioğlu, S., Karamancioğlu, A., Yazıcı, A. Enerji Kontrolüne Dayalı Doğrusal Olmayan Model Öngörümlü Denetim ile Ters Sarkacın Yukarı Kaldırılması, *ELECO'2008 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, (2008).
- [6] Hellman, Hanna, Sunnerman, Henrik, Two-Wheeled Self-Balancing Robot, *KTH Royal Institute of Technology in Stockholm*, Stockholm, (2015).
- [7] Mahmood, Z.S. Nicemli Kontrol Girişi ile Ters Sarkaç Yukarı Kaldırma Benzetimi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*, Eskişehir, (2012).
- [8] Matthews, M., Stinner, S. The Pendulum: Its Place in Science, *Science & Education* 13: 261–277, (2004).
- [9] Şen, M.A. İki Tekerlekli Robot İçin Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolcü Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanarak Optimizasyonu, *Selçuk Üniversitesi*, Konya, (2014).
- [10] Arda, M. Çift Eksenli Ters Sarkaç Tasarımı ve Kontrolü Üzerine Bir Araştırma, *Trakya Üniversitesi*, Edirne, (2012).
- [11] Bilgiç., H.H., Şen., M.A., Kalyoncu., M., Yapıcı., A., Doğrusal Ters Sarkacın Denge Kontrolü İçin Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık & LQR Kontrolcü Tasarımı, *TOK 2014 Bildiri Kitabı*, Kocaeli, (2014).
- [12] Kizir., S., Bingül., Z., Oysu., C., Ters Sarkaç Probleminin PID ve Tam Durum Geri-Besleme Yöntemleri ile Kontrolü, *TOK'07 Bildiriler Kitabı*, İstanbul, (2004).
- [13] İmamoğlu., N., Eresen., A., Efe., M., Döner Ters Sarkaç Sisteminin Pekiştirmeli Öğrenme Algoritmaları ile Kontrolü, *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi*, Ankara, (2014).
- [14] D. Kamen, "Segway," 2001. URL 4, www.segway.com (Accessed: 25/04/2015)
- [15] Grasser., F., D'Arrigo., A., Colombi., S., Rufer, A. JOE: A Mobile, Inverted Pendulum, *Laboratory of Industrial Electronics Swiss Federal Institute of Technology Lausanne EPFL*, Lausanne, (2002).
- [16] Ooi., R.C., Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot, *The University of Western Australia School of Mechanical Engineering*, Australia, (2003).

- [17] Su., K.H., Chen., Y.Y. Su., S.H., Design of Neural-Fuzzy-Based Controller for Two Autonomously Driven Wheeled Robot, *Neurocomputing* 73(2010)2478–2488, (2010).
- [18] Vermeiren., R., Dequidt., A., Guerra., T.M., Tirmant., H.R., Parent., M., Modeling, Control and Experimental Verification on a Two-Wheeled Vehicle With Free Inclination: An Urban Transportation System, *Control Engineering Practice* 19(2011)744–756, (2011).
- [19] Ghani., N.M.A., Dequidt., A., Naim., F., Yon., T.P., Two Wheels Balancing Robot with Line Following Capability, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering Vol:5, No:7*, (2011).
- [20] Jung., S., Lee., H., Two Balancing and Navigation Control of a Mobile Inverted Pendulum Robot Using Sensor Fusion of Low Cost Sensors, *Mechatronics* 22 (2012) 95–105, (2012).
- [21] Tomašić., T., Demetlika., A., Crneković., M., Self-Balancing Mobile Robot Tilter, *ISSN 1333-1124*, (2012).
- [22] Enginoğlu., O., Design and Control of Balancing Robot, *Dokuz Eylül Üniversitesi* (2012).
- [23] Almeshal., A.M., Goher., K.M., Tokhi., M.O., Dynamic Modelling and Stabilization of a New Configuration of Two-Wheeled Machines, *Robotics and Autonomous Systems* 61 (2013) 443–472, (2013).
- [24] Adeel., U., Alimgeer., K.S., Inam., O., Hameed., A., Qureshi., M., Ashraf., M., Autonomous Dual Wheel Self Balancing Robot Based on Microcontroller, *Journal of Basic and Applied Scientific Research ISSN 2090-4304*, (2013).
- [25] Son., N.N., Anh., H.P.H., Adaptive Backstepping Self-balancing Control of a Two-wheel Electric Scooter, *International Journal of Advanced Robotic Systems DOI: 10.5772/59100*, (2014).
- [26] Çelik., U., Kendini Dengeleyebilen İki Tekerlekli Aracın Tasarımı ve Kontrolü, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2014).
- [27] Kara., S.E., Control of Two Wheel Self Stabilizing Mobile Robot With a Simple Arm, *Atilim University*, (2014).
- [28] Dai., F., Gao., X., Guo., W., Jiang., S., Liu., Y., A Two-Wheeled Inverted Pendulum Robot With Friction Compensation, *Mechatronics* 30 (2015) 116–125, (2015).
- [29] Velazquez., M., Cruzo., D., Garcia., S., Bandala., M., Velocity and Motion Control of a Self-balancing Vehicle Based on a Cascade Control Strategy, *International Journal of Advanced Robotic Systems DOI: 10.5772/63933*, (2015).
- [30] Junoh., S.A.B., Two-Wheeled Balancing Robot Controller Designed Using PID, *Faculty of Electrical and Electronic Engineering Universiti Tun Hussein Onn Malaysia*, (2015).

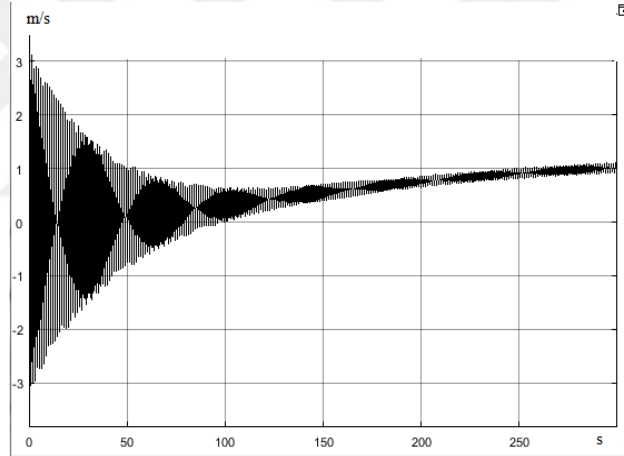
- [31] İlgen., S., Oflaz., E., Gülbahçe., E., Çakan., A., Modelling and Control of a Single-Wheel Inverted Pendulum by Using Adams and Matlab, *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers* ISSN: 2147-8228/2147-, (2016).
- [32] Yavuz., O.İ., Çetin A., Eyecioğlu., Ö., İki Tekerlekli Kendini Dengeleyen Robot, *EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyum*, Tokat, (2016).
- [33] Park., J.H., Cho., B.K., Development of a Self-Balancing Robot With a Control Moment Gyroscope, *International Journal of Advanced Robotic Systems* DOI: 10.1177/1729881418770865, (2018).
- [34] Gandarilla., I., Santibañez., V., Sandoval., J., Control of a Self-Balancing Robot With Two Degrees of Freedom Via IDA-PBC, *ISA Transactions* 88 (2019) 102–112, (2019).
- [35] Hasan., M., Saha., C., Rahman., M., Sarker., R.I., Aditya., K., Balancing of an Inverted Pendulum Using PD Controller, *Dhaka Univ. J. Sci.* 60(1): 115-120, (2012).
- [36] Ercan., Yücel (2014), İleri Dinamik, Ankara, ISBN: 978-605-030-981-2.
- [37] Kuo., Benjamin C. (2005), Otomatik Kontrol Sistemleri, İstanbul, ISBN: 975-8431-17-X, Literatür Yayınevi.

EKLER

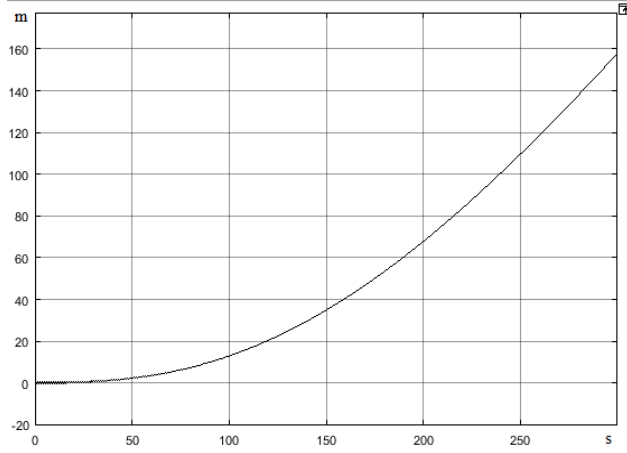
EK A



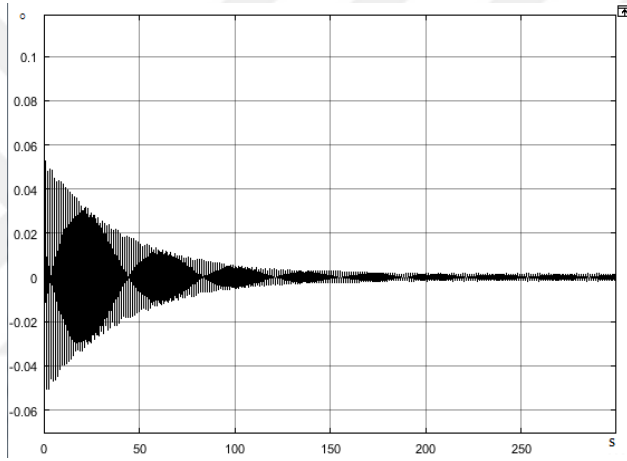
Şekil A.1. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun açısal değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (Matlab/Simulink)



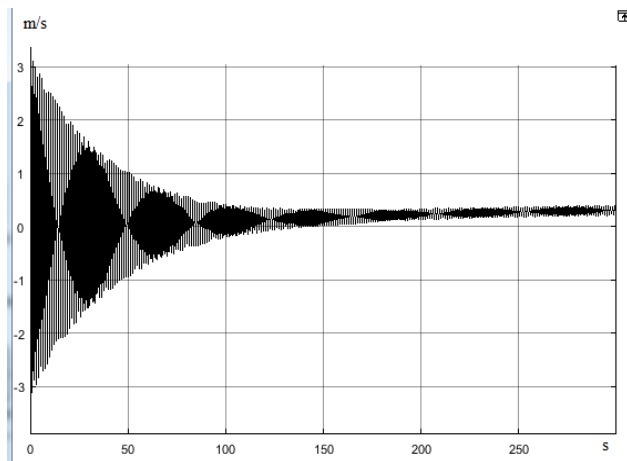
Şekil A.2. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (Matlab/Simulink)



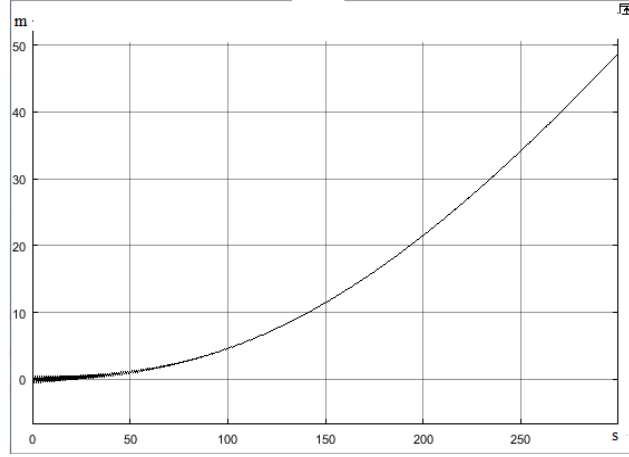
Şekil A.3. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (Matlab/Simulink)



Şekil A.4. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun açısal değişimini gösteren grafik, referans hız 0,30 m/s (Matlab/Simulink)



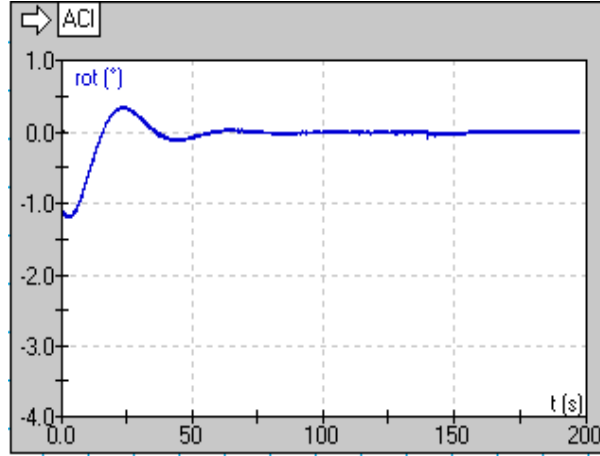
Şekil A.5. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik, referans hız 0,30 m/s (Matlab/Simulink)



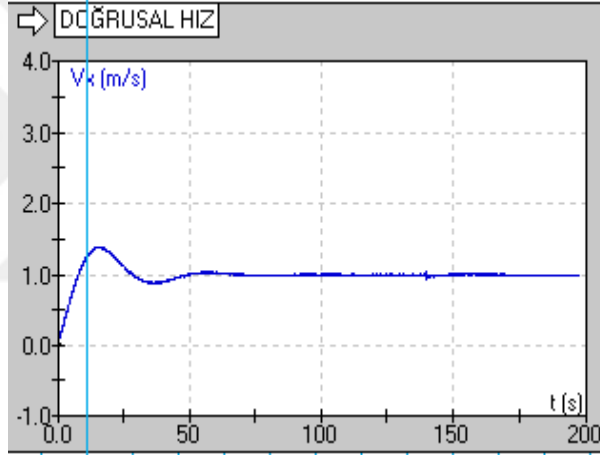
Şekil A.6. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu; robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik, referans hız 0,30 m/s (Matlab/Simulink)



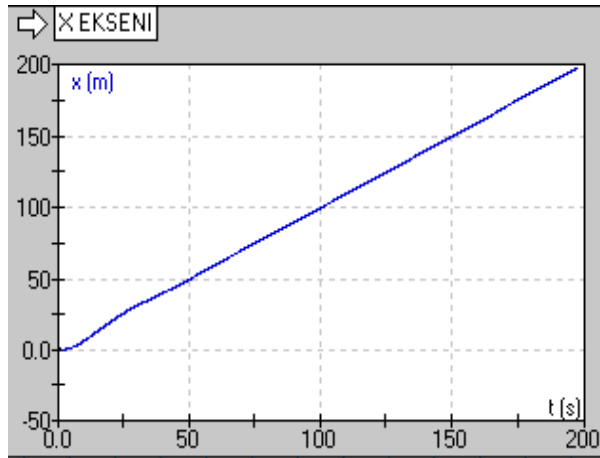
EK B



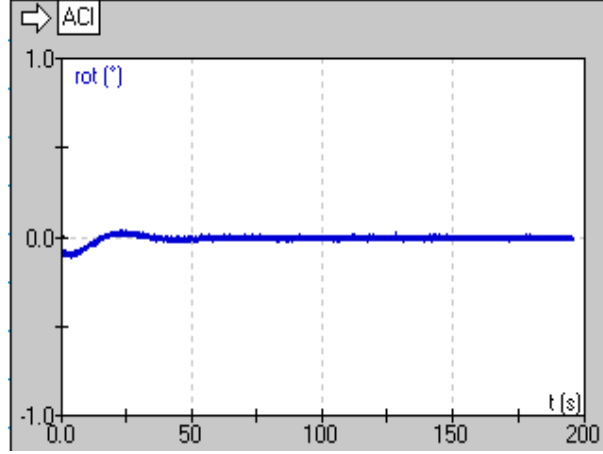
Şekil B.1. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (WM2D)



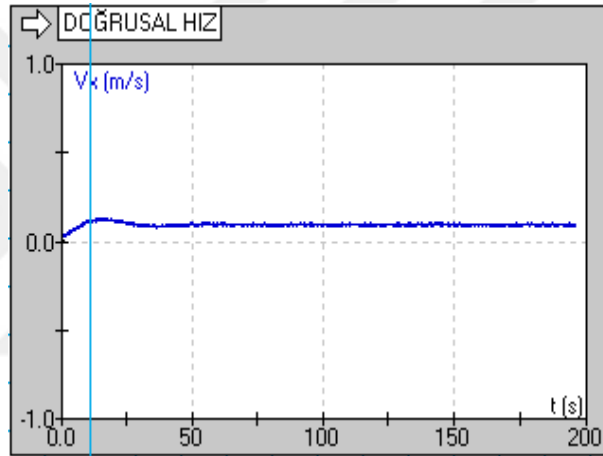
Şekil B.2. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (WM2D)



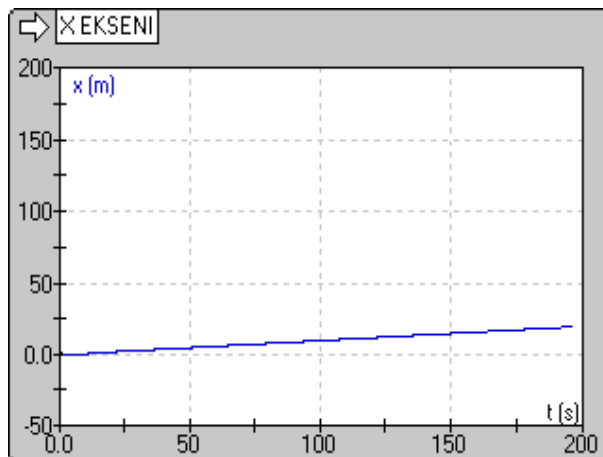
Şekil B.3. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik, referans hız 1 m/s (WM2D)



Şekil B.4. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun açısal değişimini gösteren grafik, referans hız 0,10 m/s (WM2D)

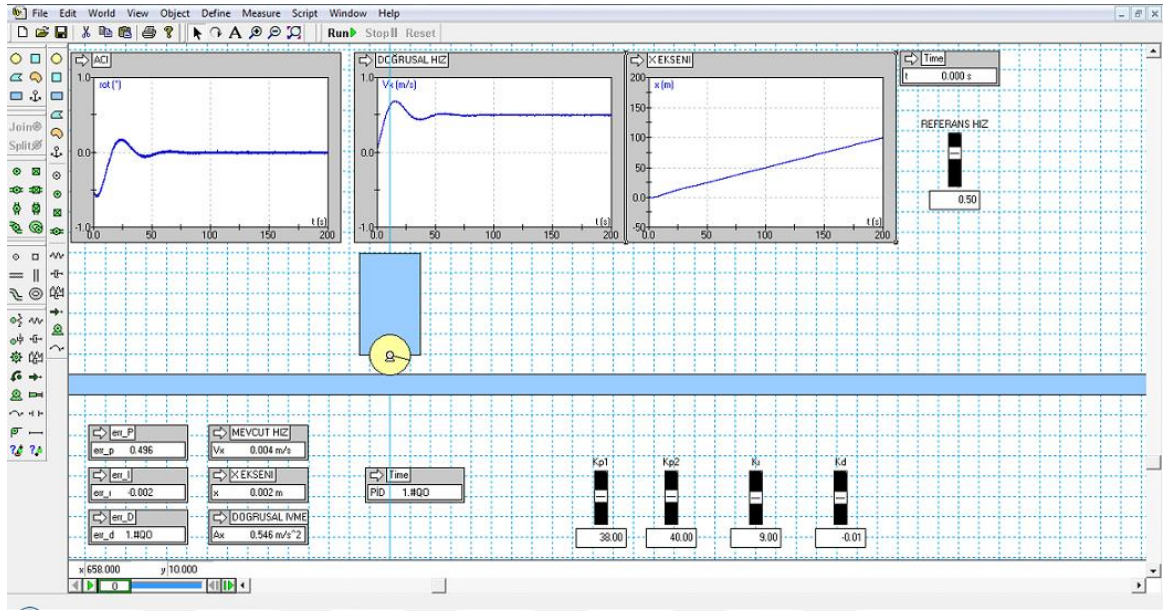


Şekil B.5. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal hız değişimini gösteren grafik, referans hız 0,10 m/s (WM2D)



Şekil B.6. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, robotun doğrusal konum değişimini gösteren grafik, referans hız 0,10 m/s (WM2D)

EK C



Şekil C.1. Açık ve hız geri beslemeli kontrol sistemi simülasyonu, WM2D arayüzü

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Güçhan Taşlıalan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 17.03.1991, Kahramanmaraş
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (541) 647 30 25
e-posta : guchantaslialan@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Bayburt Üniversitesi / Makine Müh. Bölümü	2014
Lise	Mehmet Gümüşer Anadolu Lisesi	2009

İş Denevimi

Yıl	Yer
2016- Devam	Şekermaksan Makine-Tarım Sanayi Tic. Ltd. Şti.
	Görev Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. CONTROLLING A TWO-WHEELED BALANCE ROBOT WITH PD,
International Symposium on Advanced Engineering Technologies,
Kahramanmaraş, 2019

Hobiler

Mühendislik bilimleri, Yüzme, Voleybol, Masa tenisi, Kitap okuma