T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MOBİL ROBOTLARDA YÖRÜNGENİN OPTİMİZASYONU VE KONTROLCÜ KULLANILARAK İZLENMESİ

Sinan YİĞİT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Programı

DANIŞMAN
Dr.Öğr.Üyesi Aziz SEZGİN

İSTANBUL, 2021

Bu çalışma 26.01.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Dr.Öğr.Üyesi Aziz SEZGİN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Nurkan YAĞIZ
İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Cem ONAT
Fırat Üniversitesi
Sivil Havacılık Yüksekokulu

- **İntihal Programı Beyanı**

20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

- **Proje Destekleri**

Bu tez kapsamında proje desteği alınmamıştır.

- **Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri**

[Yiğit S., Sezgin A.,2020,Trajectory Tracking with PID and Sliding Mode Control for Differential Drive Mobile Robots, International Conference on Progresses In Automotive Technologies, (ISBN 978-605-9546-17-1)]

ÖNSÖZ

Her durumda yanımda olan ve desteğini esirgemeyen aileme ve tez çalışmam süresince her konuda yardımcı olan tez danışmanım Dr. Ögr. Üyesi Aziz SEZGİN'e ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İSTANBUL, 2021 Sinan YİĞİT

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xii**
SUMMARY ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1. ROBOT TANIMI 3
2.2. ROBOT BİLEŞENLERİ 4
2.2.1. Gövde Tasarımı 4
2.2.2. Tahrik ve Hareket Elemanları 5
2.2.3. Sensörler 6
2.2.4. Kontrol Birimi 6
2.2.5. Haberleşme Birimi 7
2.2.6. Güç Kaynağı 8
3. MALZEME VE YÖNTEM **9**
3.1. DİFERANSİYEL SÜRÜŞLÜ GEZER ROBOT SİSTEMİ 9
3.1.1. Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Kinematik Model 10
3.1.2. Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Dinamik Model 12
3.1.3. Aktüatör Modelleme 16
3.2. KONTROL SİSTEMLERİ 17
3.2.1. Kinematik Tabanlı Geri Adımlamalı Kontrol Kuralı 18
3.2.2. PID Kontrol Kuralı 19
3.2.3. Kayan Kipli Kontrol Kuralı 19
3.2.3.1. Birinci Yöntem 20

3.2.3.2. İkinci Yöntem 21
3.2.3.3. Üçüncü Yöntem 21
3.2.3.4. Dördüncü Yöntem 22
3.2.3.5. Beşinci Yöntem 22
4. BULGULAR 23
4.1. YÖRÜNGE TAKİBİ 23
4.1.1. Kinematik Tabanlı Geri Adımlamalı Kontrolcü Tasarımı 23
4.1.2. PID Kontrolcü Tasarımı 24
4.1.3. Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı 25
4.2. DİFERANSİYEL SÜRÜŞLÜ GEZER ROBOT YÖRÜNGE TAKİBİ BENZETİMİ 26
4.3. REFERANS YÖRÜNGE TANIM VE YÖRÜNGE TAKİP PLANLAMASI 28
4.3.1. Ön Tanımlı Yörünge Takip Uygulaması 28
4.3.2. Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi İle Yörünge Takip Uygulaması 35
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 43
KAYNAKLAR 44
EKLER 46
EK 1. Model Değişkenleri 46
EK 2. Kontrol Değişkenleri 46

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Çeşitli Gezer Robot Örnekleri 4

Şekil 2.2: Örnek Gezer Robot Gövde Modeli 5

Şekil 2.3: Örnek Gezer Robot Tekerlek Çeşitleri 6

Şekil 2.4: Atmega8-16PU Mikro Denetleyici 7

Şekil 2.5: Mikro İşlemci Örneği 7

Şekil 2.6: 2.4 Ghz Anten Eklenmiş RF Haberleşme Modül Örneği 8

Şekil 2.7: Lityum Polimer Pil Örneği 8

Şekil 3.1: Koordinat Sistemleri 9

Şekil 3.2: Sağ Tekerlek Kaymasız Dönme Modeli 11

Şekil 3.3: Dc Motor Kontrol Modeli 17

Şekil 3.4: Kontrol Sistemi Şeması 17

Şekil 3.5: Açık Çevrim Kontrol Sistemi 18

Şekil 3.6: Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi 18

Şekil 3.7: PID Kontrol Modeli 19

Şekil 3.8: İkinci Mertebeden Bir Sisteme Ait Kayan Kipli Kontrol Metodu 20

Şekil 4.1: Yörünge Takip Şeması 23

Şekil 4.2: Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Yörünge Takip Şeması 26

Şekil 4.3: En Uygun Yörüngenin Ana Kontrol Modeli 27

Şekil 4.4: En Uygun Yörüngenin PID Kontrolcü ile Takip Modeli 28

Şekil 4.5: En Uygun Yörüngenin SMC Kontrolcü ile Takip Modeli 28

Şekil 4.6: Referans Yörünge 29

Şekil 4.7: Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Yörünge Takibi 30

Şekil 4.8: X Koordinatı Konum Hata Grafiği 31

Şekil 4.9: Y Koordinatı Konum Hata Grafiği 31

Şekil 4.10: Kafa Açısı Hata Grafiği 32

Şekil 4.11: Kontrol Metotları İçin Ön Tanımlı Yörünge RMS Hata Değerlendirme Grafiği 33

Şekil 4.12: Açısal Hız Grafiği 34

Şekil 4.13: Çizgisel Hız Grafiği 34

Şekil 4.14: Matlab İkili Doluluk Haritası 35

Şekil 4.15: Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi İle Yörünge Tayini 36

Şekil 4.16: Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi Referans Yörünge 37

Şekil 4.17: Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Yörünge Takibi . 38

Şekil 4.18: X Koordinatı Konum Hata Grafiği 39

Şekil 4.19: Y Koordinatı Konum Hata Grafiği 39

Şekil 4.20: Kafa Açısı Hata Grafiği 40

Şekil 4.21: Kontrol Metotları İçin Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi RMS Hata Değerlendirme Grafiği 40

Şekil 4.22: Açısal Hız Grafiği 41

Şekil 4.23: Çizgisel Hız Grafiği 42

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1: Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Model Değişkenleri 46

Tablo 2.1: Yörünge Takibi Benzetimi Kontrol Değişkenleri 46

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

V : Çizgisel Hız
W : Açısal Hız
θ : Kafa Açısı Değeri
w_r : Sağ Teker Açısal Hız
w_l : Sol Teker Açısal Hız
m : Kütle
R : Tekerlek Yarıçapı
L : İz Genişliğinin Yarı Ölçüsü
I : Eylemsizlik Momenti
Γ : Kayan Kipli Kontrolcü İçin Kontrol Kazancı
k_p : PID Kontrolcü İçin Oransal Katsayı
k_i : PID Kontrolcü İntegral Sabiti
k_d : PID Kontrolcü Türev Sabiti
e : Hata Değeri
σ : Kayma Yüzeyi
u : Kontrolcü Kuvveti
Γ : Kayan Kipli Kontrolcü Kontrol Kazancı
V_a : Armatür Akım Değeri
i_a : Armatür Akım Değeri
e_a : Doğru Akım Motor Geri Elektromotor Kuvveti
R_a : Direnç
L_a : İndüktans
τ_m : Doğru Akım Motor Tork Değeri
τ : Doğru Akım Motor Çıkış Tork Değeri
K_b, K_t : Tork Sabitleri

Kısaltmalar **Açıklama**

SMC : Kayan Kipli Kontrol Metodu

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MOBİL ROBOTLARDA YÖRÜNGENİN OPTİMİZASYONU VE KONTROLCÜ KULLANILARAK İZLENMESİ

Sinan YİĞİT

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Aziz SEZGİN

Teknolojideki son gelişmelerle birlikte endüstriyel uygulamalarda, akademik çalışmalarda ve askeri uygulamalarda robotlar giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Robot türleri arasında uygulama alanı en geniş olan tür gezer robotlardır. Hava, kara ve deniz olarak sınıflandırılabilen gezer robotlar önceden programlanıp kontrol edilebileceği gibi görev sırasındaki değişkenler anlık olarak değerlendirilerek de kontrol edilebilmektedir.
Robot uygulamalarında fiziksel tasarımın yanında kontrol yöntemlerinin de matematiksel olarak geliştirilmesi robotların görevleri en uygun şekilde yerine getirmesinde önemli bir etken haline gelmiştir.Kontrol metotları arasında yaygın olarak kullanılan PID kontrolcü tasarımının kolay olması ve çok çeşitli sistemlere uygulanabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Bozucu etkiler ve sisteme ait kararsızlıklar göz önüne alındığında alternatif kontrol yöntemlerinin de sistemlere uygulanması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrol metodu doğrusal olmayan sistemlerdeki kararlılık performansının arttırılması amacıyla kontrol sistemlerinde kullanılmaktadır. Kararsız sistemlerin kontrolünde Kayan Kipli Kontrol Metodu, süreksiz kontrol kuralı ile oluşturulan kayma yüzeyi kullanılarak sistemin hata değerlerinin sıfıra götürülmesi yaklaşımı ile başarılı sonuçlar verebilmektedir.
Bu çalışmada diferansiyel sürüşlü gezer robota ait matematiksel modeller elde edilerek çeşitli yörünge durumlarına için en uygun yörünge takibi performansı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda ön tanımlı yörünge ve olasılıksal yol haritası metodu ile planlanan yörüngeler üzerinde PID ve Kayan Kipli Kontrol metotları uygulanmıştır. Uygulama için robota ait matematiksel model ve kontrol metotları bilgisayar ortamında tasarlanarak benzetimleri

yapılmıştır.Son bölümde belirlenen hata değerleri üzerinden kontrolcü performansları kıyaslanmış ve gelecek çalışmalar ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

0cak 2020, 45 sayfa.

Anahtar kelimeler: Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot, Yörünge Takibi, PID Kontrol, Kayan Kipli Kontrol,Kinematik Tabanlı Gerİ Adımlamalı Kontrol

SUMMARY

M.Sc. THESIS

PATH OPTIMIZATION AND TRACKING USING CONTROLLER IN MOBILE ROBOTS

Sinan YİĞİT

İstanbul University -Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Aziz SEZGİN

Recent developments in technology enable to do that robots have started to be used more in industrial areas, academic studies and military applications.Among the robot types, the type with the widest application area is mobile robots.Mobile robots that can be classified as air, land and sea can be pre-programmed and controlled, as well as the variables during the mission can be instantly evaluated and controlled.

In robot applications, it has become important for researchers to develop control methods mathematically as well as physical design in order to accomplish given task to the robots. As a commonly used control method PID control has advantages in terms of different kind of system usage and ease of application. Alternative control methods have need to be developed because of the disturbance and unstable conditions of the systems.

Kinematic based backstepping control method is used for increasing the stability performance of nonholonomic systems. Sliding mode control method has well performance on unstable systems with the discontinuous control rule and the sliding surface which is used for elimination of the error values of the system.

In this study,differential drive mobile robot mathematically modeled and optimum trajectory tracking approach was tried to applied for different trajectory conditions.In this direction, PID and sliding mode control rules are applied to the robot model for tracking of predefined trajectory and probabilistic road map method based trajectory. Robot mathematical model and control methods are modeled and tracking application is simulated in computer software. Finally, trajectory tracking performance of the controllers are compared in terms of error performance and some foresights are given for the further studies.

Ocak 2021, 45 pages.

Keywords: Differential Drive Mobile Robot, PID Control, Sliding Mode Control, Kinematic Based Backstepping Control

1. GİRİŞ

Robotik bilimindeki gelişmelerde, kullanılan donanımsal öğelerin tasarımının yanısıra kontrolcü tasarımı da gelişim sürecinde önemli bir rol oynamıştır. Robotu oluşturan fiziksel bileşenler, malzeme özellikleri ve fiziksel tasarım açılarından geliştirilmekte olup amaca yönelik olarak istenen özelliklerde robotlar üretilebilmektedir.

Bunun yanında kontrol metotları ise her türlü mekanik, elektrik, elektronik sistemlerde süreç yönetimi amacıyla geliştirilmeye çalışılmış, çeşitli metotlar oluşturulmuş ve bu metotlar birçok sistemde uygulama alanı bulmuştur.

Geleneksel kontrol metotları arasında en yaygın kullanılan metotlardan biri olarak PID kontrolcü sade matematiksel yapısı ve çok farklı sistemlere uygulanabilmesi açısından belirli avantajlara sahip bir kontrol metodudur.Ancak sistemin uygulama sırasındaki kararsız özellikleri ve çevrenin bozucu etkileri düşünüldüğünde PID kontrolcüye alternatif metotların denenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

20. yy ortalarında Rusya'da yapılan çalışmalarda ortaya atılan bir kontrol metodu olan Kayan Kipli Kontrol Metodu kontrol sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır[12][26]. Bu kontrol yaklaşımının en belirgin özelliği süreksiz kural kullanılarak kayma yüzeyi aracılığıyla sistemin kararlı bir noktaya doğru yönlendirilmesidir.

Kontrol uygulamalarında çok çeşitli robot türleri kullanılmakta olup gezer robotlar son yıllarda ilginin yoğunlaştığı bir robot sınıfı olarak öne çıkmaktadır. Tekerlekli gezer robotlar da bu grup içinde basit tasarımları, düşük maliyetli üretimleri ve işlevsel yapıları sebebi ile tercih edilmektedirler.

Bu çalışma diferansiyel sürüşlü gezer robot modeli için, kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcü ile birlikte PID kontrolcü ve Kayan Kipli Kontrolcü beraber kullanılarak, en uygun yörüngenin tayin edilmesini ve ilgili kontrolcüler yardımı ile bu yörüngelerin takip edilmesini içermektedir.Ayrıca çalışma kapsamında yörünge referans değerlerinin ön tanımlı olarak sisteme dahil edilmesi ve olasılıksal yol metodu ile en uygun yörünge planlaması da gerçekleştirilmiştir.

İkinci bölümde robotun genel tanımı yapılmış, gezer robotlara dair temel bileşenler tanıtılmış ve tasarım aşamaları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde ise diferansiyel sürüşlü gezer robot sistemine ait kinematik ve dinamik modelleme aşamaları gerçekleştirilmiştir.

Doğru akım motoru için aktüatör modelleme aşaması da bu bölümde verilmiştir.
Ayrıca kontrol sistemlerinin tanıtımına ve çalışmanın devamında kullanılacak olan kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrol kuralı, PID kontrol kuralı ve Kayan Kipli Kontrol Kuralı'nın genel özellikleri ve denklemlerine üçüncü bölümde yer verilmiştir.
Dördüncü bölümde ise diferansiyel sürüşlü gezer robot sistemi için yörünge takibinin temel özellikleri ifade edilmiş ve test edilecek kontrolcüler için gerekli denklemler ve matematiksel modeller elde edilmiştir. Devamında,birinci aşama olarak ön tanımlı bir yörünge için daha sonra olasılıksal yol haritası metodu ile oluşturulan bir yörünge için en uygun yörünge takip benzetimleri ifade edilmiştir.
Son bölümde ise PID kontrol kuralı ve Kayan Kipli Kontrol kuralı için her iki benzetimde elde edilen yörünge takip performansları kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sırasında konum koordinat değerleri ve kafa açısı için hesaplanan hata değerleri ölçü alınmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar üzerine tartışılmış ve gelecek çalışmalar için hedefler paylaşılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ROBOT TANIMI

Robotlar matematiksel olarak modellenen fiziksel çevrede çalışan; yazılım ve donanım birimleri sayesinde belirlenen görevleri yerine getiren sistemlerdir. Bu çerçevede uygulama alanına göre robot tasarımları değişmekle beraber genel çerçevede gezer ve sabit olmak üzere robotlar çalışma şekline göre ikiye ayrılmaktadır. Sabit robotlar belirlenen görevi konumlarını değiştirmeden yaparken, gezer robotlar ise birden fazla konumda çalışabilmektedirler. Son yıllarda gezer robotlar gelişen ihtiyaçlar doğrultusunda farklı çevre ve değişken konumlarda çalışma kabiliyetleri sebebiyle endüstriyel alanlarda, akademik çalışmalarda ve askeri uygulamalarda daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Gezer robotlar uygulama alanına göre hava, kara ve deniz araçları şeklinde üçe ayrılır. Havada çalışan gezer robotlar çeşitli güvenlik, lojistik, meteoroloji faaliyetleri gibi çalışmalarda kullanılırken, su altı gezer robotları canlılık araştırmaları, arkeolojik keşifler ve liman güvenliği gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Karada çalışan gezer robotlar ise fabrika otomasyon sistemleri, otonom araçlar, ekolojik araştırmalar, askeri faaliyetler ve lojistik başta olmak üzere birçok amaç için kullanılabilmektedir.[19][18][5]

Karada çalışan gezer robotlar ana bileşenler olarak robot gövdesi, kontrol birimi, tahrik elemanları, çevre algılama sensörleri ve güç kaynağından oluşur. Tahrik elemanları bakımından kara gezer robotları insansı, hayvansı, paletli ve tekerlekli robotlar şeklinde gruplandırılabilir. Robotun çalışacağı çevre şartları ve yerine getirmesi gereken görevler düşünülerek robotun türüne karar verilmektedir.Kara tipi gezer robotlarda paletli ve tekerlekli tasarımlar diğer türlere göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Tekerlekli gezer robotlar ise tasarım kolaylığı ve maliyet avantajları sebebiyle tercih edilmektedir.[8][25]

Karada çalışan gezer robotlar arasında en yaygın kullanılan tür tekerlekli tasarıma sahip robotlardır. Kullanım amacına göre şekillenen tasarım doğrultusunda; gövde dizaynı, kullanılan motor cinsi, kontrol birimi, tekerlek türleri ve sayıları değişebilmektedir.



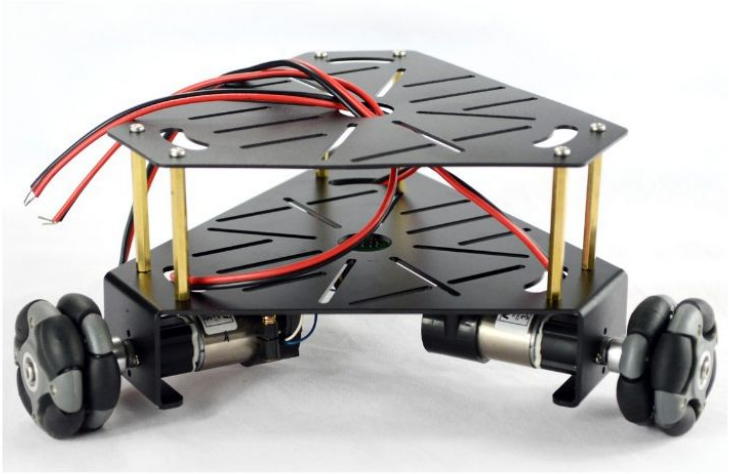
Şekil 2.1: Çeşitli Gezer Robot Örnekleri

2.2. ROBOT BİLEŞENLERİ

2.2.1. Gövde Tasarımı

Robot gövdesi hareket elemanı, motorlar, güç kaynağı ve kontrol devreleri başta olmak üzere tüm donanım birimlerini birleştiren ana parçadır. Gezer robot gövdesi, robotun boyut ölçeği, gereken mukavemet özellikleri ve maliyet gibi değişkenler doğrultusunda farklı malzemelerden üretilebilmektedir. Bu malzemelerin başında alüminyum, plastik ve çeşitli kompozit türleri gelmektedir. Küçük ve orta boyut ölçekli gezer robot tasarımlarında ise yaygın olarak alüminyum veya üç boyutlu yazıcıda üretilen plastik türevi gövdeler tercih edilmektedir.

Gövde tasarımı gerçekleştirilirken robota ait matematiksel model göz önünde bulundurularak, hesaplamalarda kullanılacak olan robota ait fiziksel ölçülere karar verilmektedir. Tekerlekli gezer robotlarda aks aralığı, iz genişliği, gövde dış boyutsal değerler gibi değişkenler matematiksel modele altyapı oluşturmaktadır.Şekil 2.2'de üç adet her yöne dönebilen tekerlekli bir gezer robot gövde tasarım örneği[1] verilmiştir.

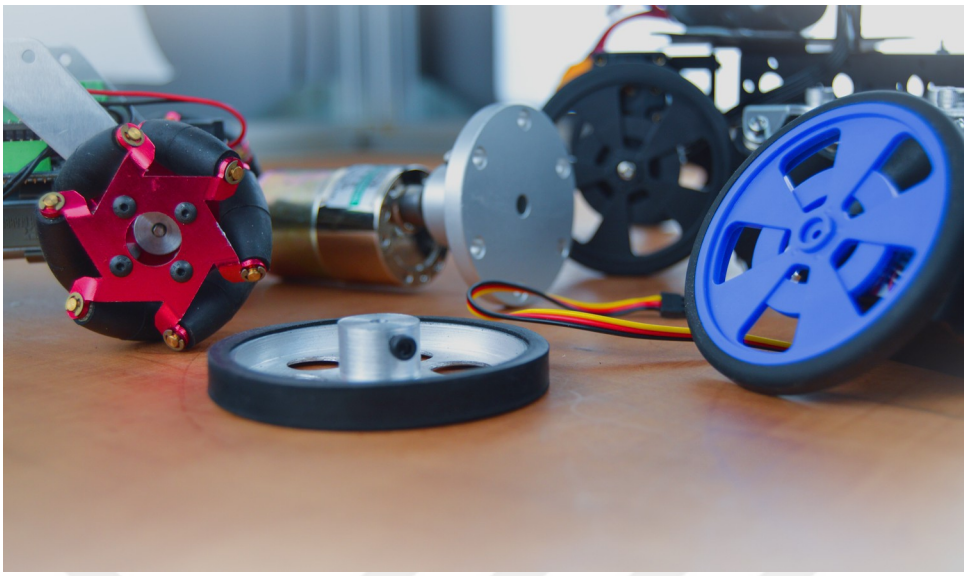


Şekil 2.2: Örnek Gezer Robot Gövde Modeli

2.2.2. Tahrik ve Hareket Elemanları

Gezer robotlarda gerekli tahrik gücü elekrik motorları tarafından sağlanmakta ve üretilen güç tekerlek, palet, kanat gibi hareket elemanlarına aktarılarak robotun hareketi sağlanmaktadır.Alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) motorları en yaygın kullanılan elektrik motoru türleridir. Doğru motor seçimi için motora etki edecek yük miktarının aralığı, haraket için gereken maksimum tork ve tekerleklerin açısal hız değer aralığı gibi değişkenler değerlendirilerek seçim yapılması gerekmektedir. DC motorların tork ve verimlilik açısından sağladığı avantajlar ve kolay kontrol edilebilir olmalarından dolayı gezer robotlarda daha yaygın olarak tercih edilmektedirler. Elektrik motorlarının hareketi ise işlemciden gelen veriler doğrultusunda çalışan motor sürücüleri sayesinde kontrol edilmektedir. Karada çalışan gezer robotlarda hareket elemanları tercih edilirken fiziki çevre şartları, üzerinde çalışılan zemin ve hareket kabiliyeti gibi temel faktörler göz önünde bulundurulmaktadır.

[1] https://ozrobotics.com/shop/omni-wheel-robot-platform-chassis-with-encoder-black/



Şekil 2.3: Örnek Gezer Robot Tekerlek Çeşitleri

2.2.3. Sensörler

Sensörler bulundukları çevreye ait belirlenen fiziksel verileri toplayarak ilgili işlem birimine aktarmakla görevli araçlardır. Robotik sistemlerde renk, mesafe, ses algılayıcı sensör çeşitleri yaygın olarak kullanılmaktadır.Buna ek olarak kameralar görüntü işleme yazılımları ile kullanılarak robotik sistemlerde algılayıcı olarak kullanılmaktadır. Gezer robotlarda yörünge takibinde mesafe algılayıcı sensörler ile çevre bir boyuttan üç boyuta kadar modellenerek çarpışma açısından güvenli algoritmalar oluşturulabilmektedir. Ayrıca motorların hızlarının anlık olarak ölçülmesi ve işlemci birimine aktarılması amacıyla da sensörler kullanılmaktadır.

2.2.4. Kontrol Birimi

Robotlarda hareketin matematiksel modelinin işlenmesi ve hareket elemanlarına gerekli komutların aktarılması görevi kontrol biriminde gerçekleşmektedir. Bu birimde yaygın olarak, yapılarında CPU (Central Processing Unit),RAM (Random Access Memory), ROM (Read only Memory), giriş/çıkış pinleri gibi donanımları bulunduran mikro kontrolcü ve mikro denetleyici adı verilen mini bilgisayarlar kullanılır. Robotun yerine getireceği görevin karmaşıklığı, gerçek zamanlı kontrol ihtiyacı ve maliyet gibi değişkenler göz önünde bulundurularak uygun kontrolcüye karar verilir. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te farklı firmalara ait mikrodenetleyici[2] ve mikroişlemci[3] örnekleri eklenmiştir.[16][9]



Şekil 2.4: Atmega8-16PU Mikro Denetleyici



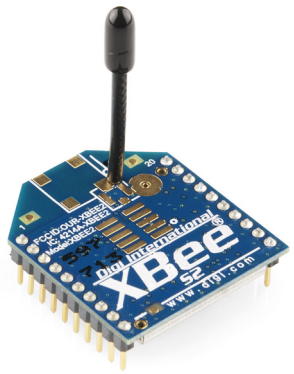
Şekil 2.5: Mikro İşlemci Örneği

2.2.5. Haberleşme Birimi

Robot sistemlerinde robotların türlerine, çalışma şekillerine göre görev süresince merkezi ana bir bilgisayara bağlı olarak veya görev öncesi tanımlanmış komutlar doğrultusunda robot üzerine yerleştirilen bir işlemci elemanı ile kontrol edilebilmektedir. Ayrıca çalışma süresince ana bilgisayara komut gönderen veya görev sonunda robot üzerindeki işlemci biriminden verilerin alındığı robot türleri vardır. Gezer robotlarda merkezi bir bilgisayarla bağlantı kurma gerekliliği olan durumlarda robot üzerine çevresel bir haberleşme aygıtı eklenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda kablosuz haberleşmede; wifi, bluetooth veya kısa mesafeli radyo frekansı kullanan elemanlar haberleşme aygıtı olarak kullanılmaktadır. Gezer robotlarda açık alan kapalı alan çalışması, robotun menzili, maliyeti, ses ve veri iletim kapasiteleri gibi temel faktörler değerlendirilerek uygun aygıt seçilmektedir. Xbee, ZigBee gezer robot sistemlerinde tercih edilen düşük güçlü ve uygun maliyetli yakın mesafe

[2] https://www.elprocus.com/avr-atmega8-microcontroller-architecture-applications/
[3] https://www.indiamart.com/proddetail/microprocessor-ic-chip-20169761733.html

uygulamalarında kullanılan radyo frekans teknolojileridir.Şekil 2.6 da 2.4 Ghz frekansta radyo sinyali kullanarak çalışan anten eklenmiş bir haberleşme modülü örneği [4] verilmiştir.

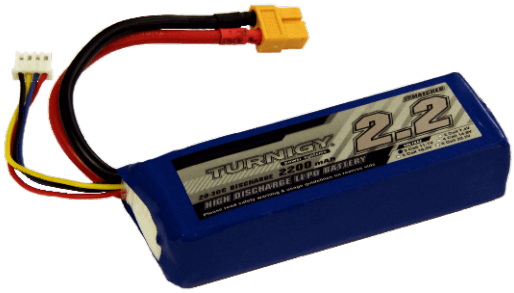


Şekil 2.6: 2.4 Ghz Anten Eklenmiş RF Haberleşme Modül Örneği

2.2.6. Güç Kaynağı

Robotun çalışma süresi boyunca başta motorlar, sensörler olmak üzere kullanılan elektronik bileşenlerin çalışması için gerekli enerjiyi sağlayan elemandır. Robotun yerleşik veya gezer çalışması durumuna göre sabit bir elektrik kaynağı veya gövdeye monte edilmiş batarya şeklinde uygun güç kaynağı tercih edilmektedir.

Gezer robot sistemlerinde ise Lityum-İyon ve Lityum Polimer piller yaygın olarak kullanılmaktadır. Lityum-Polimer piller istenen şekilde üretilebilmeleri, daha hafif olmaları gibi özelliklerinden dolayı daha geniş bir kullanım alanına sahiptirler.Şekil 2.8'de gezer robotlarda yaygın olarak kullanılan lityum polimer pil örneği[5] verilmiştir.



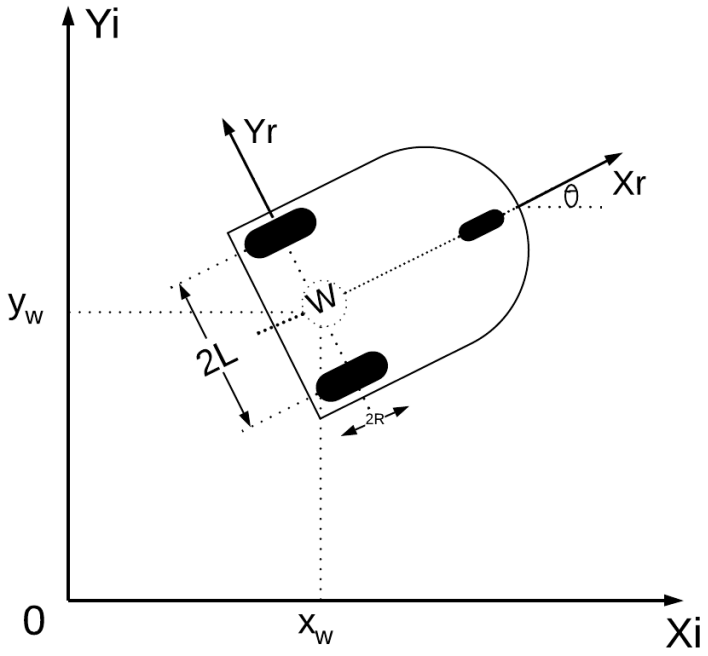
Şekil 2.7: Lityum Polimer Pil Örneği

[4] http://www.robotpark.com.tr/XBee-2mW-Kablo-Anten-Seri-2-ZigBee-Mesh-XB24-Z7WIT-004
[5] https://www.studentrobotics.org/docs/kit/batteries/

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. DİFERANSİYEL SÜRÜŞLÜ GEZER ROBOT SİSTEMİ

Tekerlekli gezer robotlar arasında iki tekerlekli diferansiyel sürüşlü robotlar sade tasarımları ve düşük maliyetle üretilebilmelerinden dolayı öncelikli olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada arkada dc motorlar tarafından hareket verilen iki tekerlek ve önde serbest dönebilen bir tekerlekli robot tasarımı kullanılmıştır. Robot matematiksel modelinde robot gövdesi üzerinde sabitlenmiş kabul edilen robot koordinat sistemi $\{X_R, Y_R\}$ ve evrensel koordinat sistemi üzerinde konumlandırılan $\{X_I, Y_I\}$ koordinat sistemleri esas alınmıştır.



Şekil 3.1: Koordinat Sistemleri

3.1.1. Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Kinematik Model

Diferansiyel sürüşlü gezer robotlarda konum ve yönelim evrensel koordinat sistemi ve robot koordinat sistemlerine göre vektörel olarak tanımlanabilir.

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}, q_i = \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ \theta \end{bmatrix}, q_r = \begin{bmatrix} x^r \\ y^r \\ \theta \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Evrensel koordinat sistemi ve robot koordinat sistemi arasındaki ilişkiyi tanımlayan matematiksel dönüşüm ortogonal rotasyon matrisi ($R(\theta)$) ile aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} cos(\theta) & -sin(\theta) & 0 \\ sin(\theta) & cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Bu dönüşüm matrisi sayesinde robot tekerlek açısal hızları ile konum değerleri arasındaki bağlantı matematiksel modelleme ile oluşturulabilmektedir.

Diferansiyel sürüşlü gezer robot hareketinin benzetimi elde edilen matematiksel model doğrultusunda bilgisayar ortamında yapılmıştır. Bu benzetim süresince gezer robot hareketi için öncelikli olarak tekerlekler için kaymasız tam verimli tur kabulü yapılmıştır. Robotun Y_R ekseni boyunca tekerlekler vasıtasıyla kaymadan hareket ettiği kabul edilmiştir.

$$\dot{y}_w^r = 0 \tag{3.3}$$

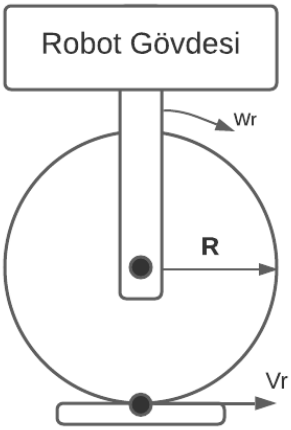
Rotasyon matrisi kullanılarak evrensel koordinat sisteminde hızlar denklem 3.4 olarak yazılabilir.

$$-\dot{x}_w sin(\theta) + \dot{y}_w cos(\theta) = 0 \tag{3.4}$$

Ayrıca yörünge takibi süresince tekerleklerin zemine yanlızca bir noktadan temas ettiği, X_R ekseni doğrultusunda kaymanın olmadığı kabul edilmiştir. Kaymasız dönme hızları sağ ve

sol teker için tekerlerin açısal hızlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_r = Rw_r, \qquad V_l = Rw_l \tag{3.5}$$



Şekil 3.2: Sağ Tekerlek Kaymasız Dönme Modeli

Aynı zamanda evrensel koordinatlarda kaymasız dönme hızları robot gövdesi için merkez kabul edilen W noktasına bağlı olarak genel formda ifade edilmiştir.

$$\dot{X}_r = \dot{X}_w + L\theta cos(\theta) \tag{3.6}$$

$$\dot{Y}_r = \dot{Y}_w + L\theta cos(\theta) \tag{3.7}$$

Kısıt denklemleri 3.1, 3.3, 3.5 ve $R(\theta)$ matris formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\delta(q) = \begin{bmatrix} -sin(\theta) & cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ cos(\theta) & sin(\theta) & L & -R & 0 \\ cos(\theta) & sin(\theta) & -L & 0 & -R \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

$$\delta(q)\dot{q} = 0 \tag{3.9}$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{\theta} & w_r & w_l \end{bmatrix}^T \tag{3.10}$$

Diferansiyel sürüşlü gezer robota ait çizgisel (V) hız ve kafa açısal hızı (W) denklem 3.11, 3.12'te tekerleklere ait açısal hızlar ve robota ait fiziksel boyutların fonksiyonu olarak gösterilmiştir.[11]

$$V = \frac{v_r + v_l}{2} = R(\frac{w_r + w_l}{2}) \tag{3.11}$$

$$W = \frac{v_r - v_l}{2L} = R(\frac{w_r - w_l}{2L}) \tag{3.12}$$

Şekil 3.1'de gösterilen W referans noktasına göre, robota ait konum bileşenleri aşağıdaki gibi matematiksel olarak hesaplanabilmektedir.

$$\dot{q}^r = \begin{bmatrix} \dot{x}_w^r \\ \dot{y}_w^r \\ \dot{\theta}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R/2 & R/2 \\ 0 & 0 \\ R/2 & R/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_r \\ w_l \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

$$\dot{q}^i = \begin{bmatrix} \dot{x}_w^i \\ \dot{y}_w^i \\ \dot{\theta}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2}cos(\theta) & \frac{R}{2}cos(\theta) \\ \frac{R}{2}sin(\theta) & \frac{R}{2}sin(\theta) \\ \frac{R}{2}L & -\frac{R}{2}L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_r \\ w_l \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^i \\ \dot{y}_a^i \\ \dot{\theta}^i \\ w_r \\ w_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2}cos(\theta) & \frac{R}{2}cos(\theta) \\ \frac{R}{2}sin(\theta) & \frac{R}{2}sin(\theta) \\ \frac{R}{2}L & -\frac{R}{2}L \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_r \\ w_l \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

3.1.2. Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Dinamik Model

Kinematik model temelli hedeflenen yörünge takibi ile gerçek yörünge takibi arasındaki farkı azaltmak ve yörünge takibini en uygun hale getirmek için dinamik modelleme kullanılmı[20] Diferansiyel sürüşlü gezer robotlarda kontrol esnasında girdi yapılan serbestlik dereceleri robotun sahip olduğu serbestlik derecesi sayısından daha düşük olduğundan dolayı sistem

holonomik olmayan robot sistemi sınıfına girer. Ve n genelleştirilmiş koordinatlarda $(q_1, q_2 ... q_n)$ bağlı olduğu kısıtlar denklem 3.16 ile ifade edilmiştir. [2];

$$M(q)\ddot{q} + V(q,\dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \tag{3.16}$$

Lagrange Metodu kullanılarak sistemin dinamik modeli, robota ait kinetik enerji (T) ve potansiyel enerji (U) kullanılarak denklem haline getirilmiştir.

$$L = T - U \tag{3.17}$$

Lagrange denklemleri türev yöntemi kullanılarak alternatif bir forma kavuşturulmuştur.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) + \left(\frac{\partial L}{\partial q_i}\right) = F - A^T(q)\lambda \tag{3.18}$$

Gezer robot yanlızca X_iY_i düzleminde hareket ettiği için sistemin potansiyel enerjisi sıfır kabul edilmiştir. Kinetik enerji ise robot gövde bileşenleri, tekerlek ve dc motorlara ait toplam kinetik enerji şeklinde hesaplanmıştır.

$$m = m_c + 2m_w, \quad I = I_c + m_c d^2 + 2m_w L^2 + 2I_m \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned} T = &\frac{1}{m}(\dot{x_a}^2 + \dot{y_a}^2) - m_c d\dot{\theta}(\dot{y_a}cos(\theta) - \dot{x_a}sin(\theta)) \\ &+ \frac{1}{2}I_w(\dot{w_r}^2 + \dot{w_l}^2) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Denklem 3.18 ve $L = T$ Lagrange ifadesi kullanılarak robota ait hareket denklemleri matematiksel olarak modellenmiştir.

$$m\ddot{x}_a - md\ddot{\theta}sin(\theta) - md\dot{\theta}^2cos(\theta) = A_1 \tag{3.21}$$

$$m\ddot{y}_a - md\ddot{\theta}cos(\theta) - md\dot{\theta}^2sin(\theta) = A_2 \tag{3.22}$$

$$I\ddot{\theta} - md\ddot{x}_asin(\theta) + md\ddot{y}_acos(\theta) = A_3 \tag{3.23}$$

$$I_w\ddot{\theta}_r = \tau_r + A_4 \tag{3.24}$$

$$I_w\ddot{\theta}_l = \tau_l + A_5 \tag{3.25}$$

$$A^T(q) = \begin{bmatrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \\ A5 \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

Hareket denklemleri (3.21-3.25), denklem 3.15'teki genel formda tekrar yazılmıştır.

$$M(q)\ddot{q} + V(q,\dot{q})\dot{q} = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \tag{3.27}$$

Bu noktada gerekli matris ifadeleri aşağıdaki aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -mdsin(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & m & mdcos(\theta) & 0 & 0 \\ -mdsin(\theta) & mdcos(\theta) & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

$$V(q,\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & m & md\dot{\theta}cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & m & md\dot{\theta}cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

$$A^T(q)\lambda = \begin{bmatrix} -sin(\theta) & cos(\theta) & cos(\theta) \\ cos(\theta) & sin(\theta) & sin(\theta) \\ 0 & L & -L \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix} \tag{3.30}$$

Sistemin daha kolay yoldan kontrol edilmesi amacıyla denklem 3.21 tekrar düzenlenerek $A^T(q)\lambda$ terimi kaldırılmıştır.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^i \\ \dot{y}_a^i \\ \dot{\theta}^i \\ w_r \\ w_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2}cos(\theta) & \frac{R}{2}cos(\theta) \\ \frac{R}{2}sin(\theta) & \frac{R}{2}sin(\theta) \\ \frac{R}{2}L & -\frac{R}{2}L \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_r \\ w_l \end{bmatrix} \tag{3.31}$$

$$S(q) = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} Rcos(\theta) & Rcos(\theta) \\ Rsin(\theta) & sin(\theta) \\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} \\ 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, \eta = \begin{bmatrix} w_r \\ w_l \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

$$\dot{q} = S(q)\eta, \quad \ddot{q} = \dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta} \tag{3.33}$$

$\dot{q}$ ve $\ddot{q}$ eqn 3.27'de elde edilen genel ifadeyle tekrar yazılırsa;

$$M(q)[\dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta}] + V(q,\dot{q})[S(q)\eta] = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \tag{3.34}$$

Denklemin tüm elemanları $S^T(q)$ ile çarpılarak düzenlenirse;

$$\begin{aligned} &S^T(q)M(q)[\dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta}] \\ &+ S^T(q)V(q,\dot{q})[S(q)\eta] = S^T(q)B(q)\tau - S^T(q)A^T(q)\lambda \end{aligned} \tag{3.35}$$

$$S^T(q)M(q)\dot{S}(q)\eta + S^T(q)M(q)S(q)\dot{\eta} + S^T(q)V(q,\dot{q})[S(q)\eta] = S^T(q)B(q)\tau - S^T(q)A^T(q)\lambda \tag{3.36}$$

$$S^T(q)M(q)S(q)\dot{\eta} + S^T(q)[M(q)\dot{S(q)} + V(q,\dot{q})S(q)]\eta = S^T(q)B(q)\tau - S^T(q)A^T(q)\lambda \tag{3.37}$$

İlgili matrisler bu düzenlemelerle birlikte aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$M'(q) = S^T(q)M(q)S(q)$

$V'(q) = S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V(q,\dot{q})S(q)$

$B' = S^T(q)B(q)$

Hareket denklemleri yeni matris formunda denklem 3.38 şeklinde elde edilir.

$$M'(q)\dot{\eta} + V'(q,\dot{q})\eta = B'(q)\tau \tag{3.38}$$

3.1.3. Aktüatör Modelleme

Diferansiyel sürüşlü gezer robotlarda kullanılan dc motorların hızları yaygın olarak armatür voltaj değerinin değiştirilmesi ile ayarlanır. Bu doğrultuda tasarlanan kontrol sisteminde armatür voltaj değeri sistemde kontrol girdisi olarak kullanılır. Daimi mıknatıslı dc motora ait armatür devresi denklem 3.39-3.42 ile verilmiştir.[6][7]

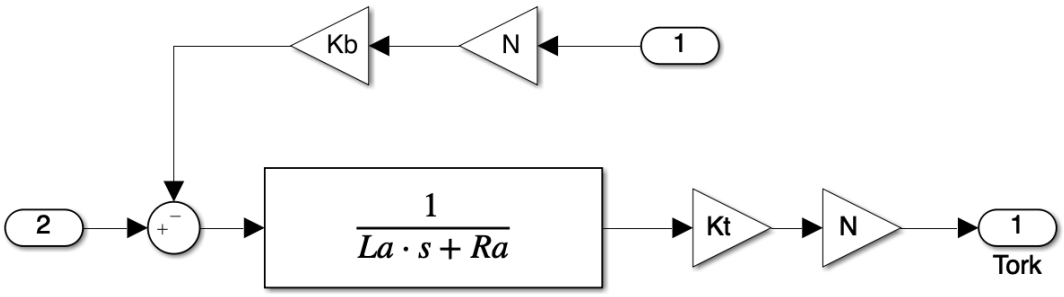
Şekil 3.3'te doğru akım motora ait kontrol modeli veilmiştir. 1 numaralı giriş motorun mevcut açısal hızını 2 numaralı giriş ise sistemin kontrolcü kuvvetini temsil etmektedir.

$$V_a = R_a + L_a\frac{di_a}{dt} + e_a \tag{3.39}$$

$$e_a = K_b w_m \tag{3.40}$$

$$\tau_m = K_t i_a, \tag{3.41}$$

$$\tau = N\tau_m \tag{3.42}$$



Şekil 3.3: Dc Motor Kontrol Modeli

Diferansiyel sürüşlü gezer robot sisteminde dc motorlar mekanik olarak tekerleklere bağlı olduğundan dolayı, dc motor denklemleri ile sistemin dinamik yaklaşımı arasındaki ilişki matematiksel olarak elde edilebilir.

$$w_m r = N w_r, \quad w_m l = N w_l \tag{3.43}$$

3.2. KONTROL SİSTEMLERİ

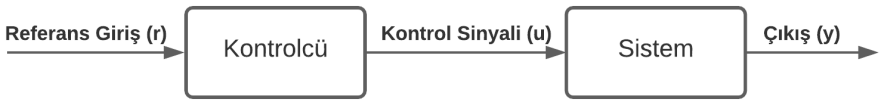
Kontrol sistemleri, üzerinde çalışılan sisteme ait belirlenen değişkenlere istenen koşulları oluşturma yönünde müdahale edilmesidir. Sisteme ait giriş ve çıkışların matematiksel olarak modellenmesi ve bu model doğrultusunda gerekli birimlere çıkış sinyali olarak müdahale edilmesi kontrol yaklaşımlarının temelini oluşturur.Şekil 3.4'de kontrol sistemine ait temel giriş ve çıkış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Kontrol Sistemi Şeması

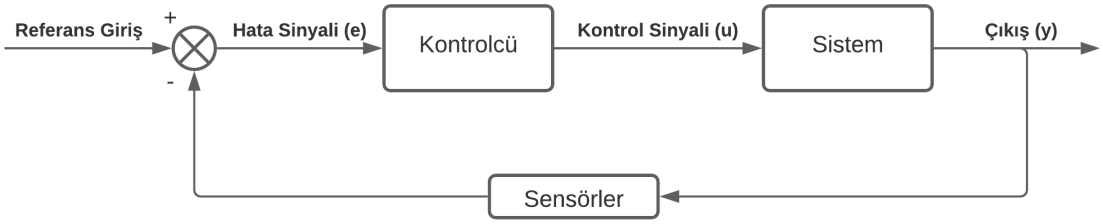
Açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere iki çeşit kontrol modeli vardır. Açık çevrim kontrolcülerde sisteme ait kontrol giriş sinyalleri alınarak algoritmaya dahil edilir ve

kontrolcü çıkış sinyali ile sistemin çalışmasında değişiklikler yapılır.Referans değerin kontrolcü tarafından işleme alınıp sisteme kontrolcü ile müdahale edilmesi Şekil 3.5'le ifade edilmiştir.



Şekil 3.5: Açık Çevrim Kontrol Sistemi

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ise sistemin üzerinde yapılan kontrol müdahaleleri sonucunda sistemdeki değişimler geri bildirim olarak tekrar algoritmaya dahil edilerek daha hassas ve daha kararlı kontrol uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir.Şekil 3.6'da çıkış sinyalinden sensörler ile veri alınması ve hata sinyalinin oluşturulması ile sistemin geri bildirimli olarak kontrol edilmesi gösterilmiştir.



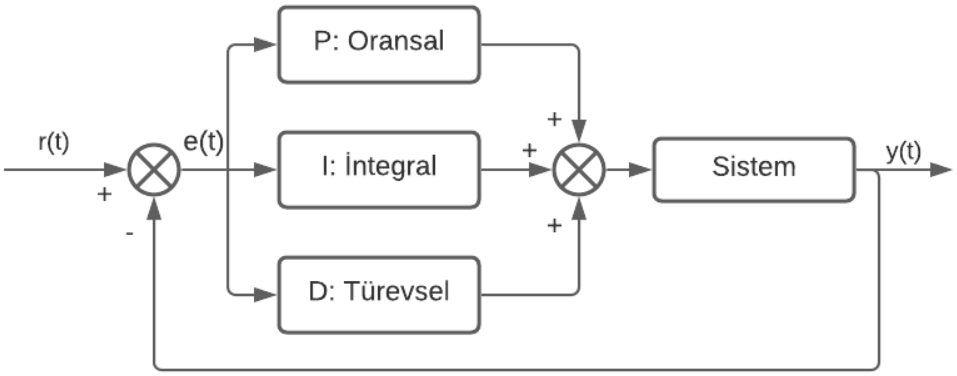
Şekil 3.6: Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi

3.2.1. Kinematik Tabanlı Geri Adımlamalı Kontrol Kuralı

Kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrol metodu doğrusal olmayan sistemlerde kontrol uygulamasında geri besleme metodu ve kararlılık değerlendirmesi için kullanılacak Lyapunov fonksiyonunun etkili bir şekilde elde edilmesinde kullanılmaktadır.[13] Kontrol kuralının elde edilmesinde Lyapunov denklemleri kullanıldığından dolayı kararlılık açısından sistem iyileştirilmiş olmaktadır.[23][22][4]

3.2.2. PID Kontrol Kuralı

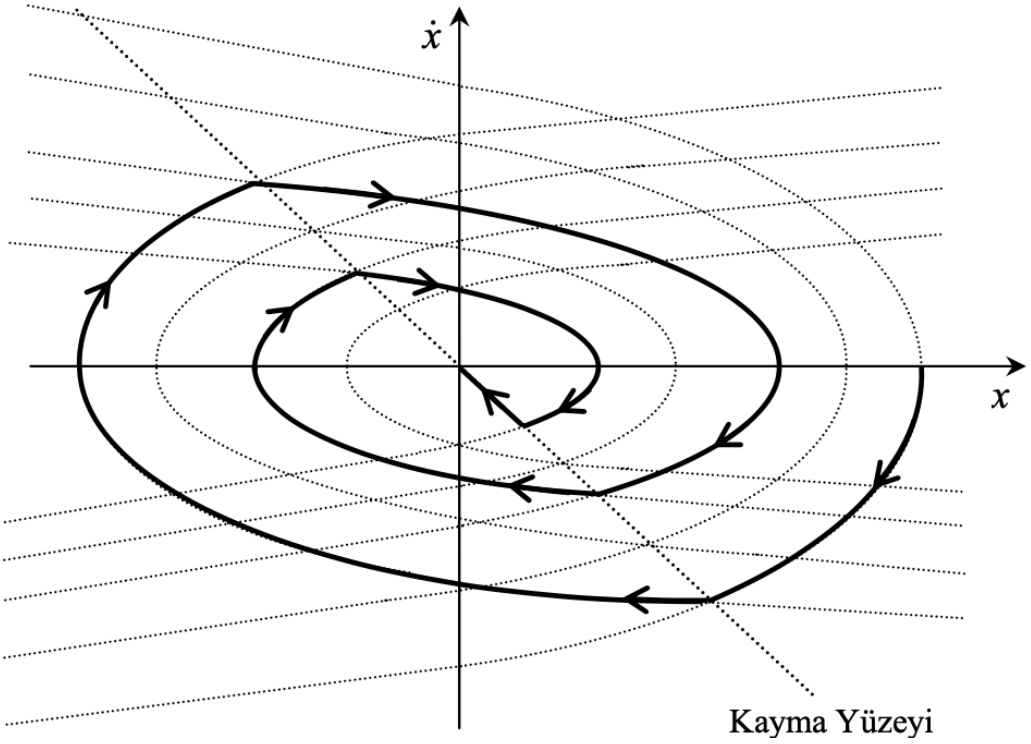
PID kontrolcü tasarımı sisteme ait hatalar üzerinde; oransal, integral ve türevsel olmak üzere üç farklı matematiksel işlem uygulanarak elde edilen toplamın kontrol çıkış sinyali olarak kullanılmasıdır. Bu doğrultuda oransal işlemde hatalar belirli bir kazanç değeri ile çarpılarak azaltılmaya çalışılır. İntegral işlemde ise sisteme ait geçmiş hata değerlerinin toplamı üzerinden kontrol performansına etki eder. Türevsel etkide ise elde edilen hata değişim eğilimi üzerinden sisteme ait hata öngörüsünde bulunulur ve sisteme bu doğrultuda müdahale edilir.PID kontrol şeması Şekil 3.7 ile ifade edilmiştir.[1][15]



Şekil 3.7: PID Kontrol Modeli

3.2.3. Kayan Kipli Kontrol Kuralı

Kayan Kipli Kontrolcü tasarımında kontrol algoritması sistemin değişen durumu karşısında önceden planlanarak değişken bir yapıda tasarlanmaktadır. Tanımlanan kontrol metodu sistemin mevcut hata durumuna göre değiştirilerek sistemin kararlı veya kararsız durumlar arasında gidip gelmesi sağlanır ve bu sayede bir kayma yüzeyi elde edilir. Kontrolcü bu kayma yüzeyini takip ederek sistemin hedeflenen kararlı hal olan orijine ulaşmasını sağlar. Şekil 3.8’ de ikinci mertebeden bir sistem için Kayan Kipli Kontrol’de kayma yüzeyinin işleyişini anlatan bir görsel paylaşılmıştır.[10]



Şekil 3.8: İkinci Mertebeden Bir Sisteme Ait Kayan Kipli Kontrol Metodu

Kayan Kipli Kontrol Metodu'nun geleneksel kontrol metotlarına göre en önemli faydası gürbüz bir kontrolcü olmasıdır. Kontrol algoritmasında temel alınan model ile uygulamada kullanılan sistem arasındaki farklılıklardan etkilenmez. Aynı zamanda holonomik olmayan sistemlere de geçişli yapısı sayesinde kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Nonlineer bir dinamik modele ait genel denklem ve S kayma yüzeyi aşağıdaki denklemlerle tanımlanabilir.

$$\underline{\dot{x}} = \underline{f}(x) + [B]\underline{u} \tag{3.44}$$

$$S = (\underline{x} : \underline{\sigma}(x,t) = 0) \tag{3.45}$$

3.2.3.1. Birinci Yöntem

σ kayma yüzeyi, Δx hatalar olmak üzere;

$$\underline{\sigma} = [G]\Delta\underline{x} = [G](\underline{x}_r - \underline{x}) = [G]e \tag{3.46}$$

Lyapunov fonksiyonu ve limit durumu uygulanırsa genel denklem,

$$\frac{d\underline{\phi}(t)}{dt} - [G](\underline{f}(x) + [B]\underline{u}_{eq}) \tag{3.47}$$

Eşdeğer kontrolcü kuvveti ise;

$$\underline{u}_{eq} = [GB]^{-1}(\frac{d\underline{\phi}(t)}{dt} - [G]\underline{f}(x)) \tag{3.48}$$

şeklinde elde edilebilir.-referans–

3.2.3.2. İkinci Yöntem

Eşdeğer kontrolcünün çalışacağı kayma yüzeyine sistemi taşıyabilmek amacıyla kontrol kuralına yeni bir terim eklenmelidir.

$$v(\underline{\sigma}) = \frac{1}{2}\underline{\sigma\sigma}^T \tag{3.49}$$

Lyapunov fonksiyonu kullanılarak kontrolcü kuvveti tekrar elde edilirse,

$$\dot{v}(\sigma) = -\sigma^T[\Gamma]sign(\underline{\sigma}) \leq 0 \tag{3.50}$$

$$\dot{v}(\underline{\sigma}) = \underline{\sigma}^T\underline{\dot{\sigma}} \tag{3.51}$$

Kontrolcü kuvveti $\underline{u}$ olarak elde edilir.

$$\underline{u} = \underline{u}_{eq} + [GB]^{-1}[\Gamma]sign(\underline{\sigma}) \tag{3.52}$$

3.2.3.3. Üçüncü Yöntem

Sisteme ait belirsizlikler dolayısıyla teorik olarak elde edilen eşdeğer kontrol kuvveti ile istenen kontrolcü değeri arasında yüksek hata oranı çıkarsa kontrolcü kuvvetine alcak geçirimli filtre uygulanarak bu durum ortadan kaldırılabilir.

$$\underline{\hat{u}}_{eq} = \frac{1}{\tau s + 1}\underline{u} \tag{3.53}$$

Uygulanan bu filtre ile alçak ve yüksek frakanslı sinyaller sınıflandırılarak kontrolcü kuvveti üçüncü yöntem için elde edilebilir. –referans–

$$\underline{u} = \underline{\hat{u}}_{eq} + [K] sign(\underline{\sigma}) \tag{3.54}$$

3.2.3.4. Dördüncü Yöntem

Konttrol işaretinin süreksizliğinden kaynaklanan çatırtı halini ortadan kaldırmak amacıyla kontrol kuralı geliştirilmelidir.Bu doğrultulda Lyapunov fonksiyonu ve türevi tekrar seçilirse,

$$\underline{v} = \frac{1}{2} \underline{\sigma}^T \underline{\sigma} > 0 \tag{3.55}$$

$$\dot{v}(\underline{\sigma}) = \underline{\sigma}^T \underline{\dot{\sigma}} \tag{3.56}$$

$$\dot{v}(\underline{\sigma}) = \underline{\sigma}^T [\Gamma] \underline{\dot{\sigma}} \tag{3.57}$$

Denklem 3.56 ve 3.57 ortak çözülürse denklem 3.58 elde edilir.

$$\underline{\sigma}(t) = e^{[\Gamma]t} + \underline{\sigma(0)} \tag{3.58}$$

Dördüncü yöntem için kontrolcü kuvveti;

$$\underline{u} = \underline{u}_{eq} + [K] \underline{\sigma} \tag{3.59}$$

olarak tanımlanır.

3.2.3.5. Beşinci Yöntem

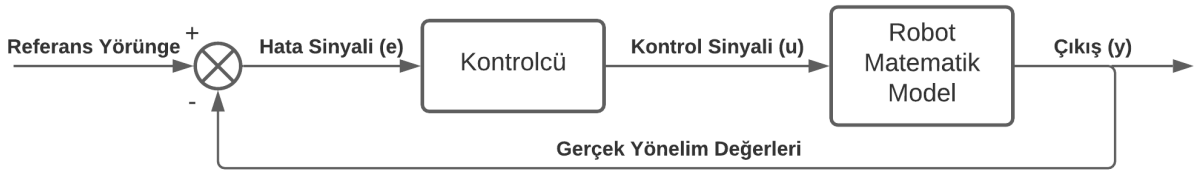
Üçüncü yöntemdeki ve dördüncü yöntemlerde yapılan sign teriminin kaldırılması ve filtre eklenmesi birleştirilerek bu beşinci yöntem için kontrolcü kuvveti elde edilebilir.

$$\underline{u} = \underline{\hat{u}}_{eq} + [K] \underline{\sigma} \tag{3.60}$$

4. BULGULAR

4.1. YÖRÜNGE TAKİBİ

Diferansiyel sürüşlü gezer robotlarda yörünge; konum ve yönelim değerlerinin mevcut durum değerleri ile referans yoldan elde edilen değerlerin kıyaslanmasıyla elde edilen hataların azaltılması prensibine göre gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.1 ile tayin edilen yörünge doğrultusunda robotun matematiksel model kullanılarak kontrolcü yardımıyla yörünge takibi şema halinde ifade edilmiştir.



Şekil 4.1: Yörünge Takip Şeması

Konum ve yönelim hatalarının (e_p) tanımlanabilmesi için referans yönelim (q_r) ve mevcut yönelim (q) matematiksel olarak ifade edilmelidir.

$$q_r = [x_r \quad y_r \quad \theta]^T, \quad q = [x \quad y \quad \theta]^T \tag{4.1}$$

$$e_p = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos(\theta) & sin(\theta) & 0 \\ -sin(\theta) & cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

4.1.1. Kinematik Tabanlı Geri Adımlamalı Kontrolcü Tasarımı

Gezer robot sisteminde hareket denklemlerinin karmaşık yapısı gereği kontrol problemini sadeleştirmek ve daha kararlı bir kontrol çözümü üretmek adına kinematik tabanlı geri

adımlamalı kontrolcü tercih edilmiştir. Bu yöntemle sisteme ait kontrol edilecek girdiler olarak tanımlanan e_x,e_y ve e_θ hata bileşenleri matematiksel bir modelle robota ait çizgisel hız ve kafa dönüşü açısal hızı olmak üzere yeni iki referans girdiye çevrilmektedir. Bu sayede sistem elde edilen yeni kontrolcü girişleri üzerinde çalışan tamamlayıcı kontrolcü sayesinde daha kararlı ve etkili bir şekilde kontrol edilebilmektedir.[17]

Başlangıç olarak yönelim hatasının birinci türevi alınırsa aşağıdaki matrisler elde edilir.[27],

$$\dot{e_p} = \begin{bmatrix} \dot{e_x} \\ \dot{e_y} \\ \dot{e_\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_d e_y - v_d + v_r cos(e_\theta) \\ -w_d e_x + v_r sin(e_\theta) \\ w_r - w_d \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Kontrolcü tasarımının bu aşamasında Lyapunov kararlılık yaklaşımı kullanılmıştır.[13][21]

$$L_1 = \frac{(e_x^2 + e_y^2)}{2} + \frac{1 - cos(e_\theta)}{k_2} \tag{4.4}$$

Bu denklemde, $k_2 > 0$ and $L_1 \geq 0$.

$$\dot{L}_1 = -e_x(v_d - v_r cos(e_\theta)) - sin(e_\theta)(\frac{w_d - w_r}{k_2} - v_r e_y) \tag{4.5}$$

$$\dot{L}_1 < 0 \tag{4.6}$$

Kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrol kuralı denklem 4.7 ile ifade edilmiştir.

$$v_d = \begin{bmatrix} k_1 e_x + v_r cos(e_\theta) \\ w_r + k_2 v_r e_y + k_3 v_r sin(e_\theta) \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

4.1.2. PID Kontrolcü Tasarımı

PID kontrol sistemine ait kontrolcü kuvveti aşağıda ifade edilmiştir.

Burada,

k:oransal katsayı k_i:integral katsayı k_d: türevsel katsayıyı ifade etmektedir.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_o^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \tag{4.8}$$

4.1.3. Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı

Kayma yüzeyinin tanımlanabilmesi için diferansiyel sürüşlü gezer robot modeli matematiksel olarak denklem 4.9 ile tanımlanmıştır.

$$\underline{\dot{x}} = \underline{f}(x) + [B]\underline{u} \tag{4.9}$$

Çizgisel hız, kafa açısal hızı ve referans hız deperleri kontrolcü tasarımında kontrol edilen değişkenler olarak kullanılmıştır. Denklem 3.38'i denklem 3.11, 3.12 ile tekrar düzenlersek aşağıdaki denklemler elde edilir.[7];

$$(m + \frac{2I_w}{R^2})\dot{V} - m_c d W^2 = \frac{1}{R}(\tau_r + \tau_l) \tag{4.10}$$

$$(I + \frac{2L^2}{R^2} I_w)\dot{W} - m_c d W V = \frac{1}{R}(\tau_r - \tau_l) \tag{4.11}$$

Kontrolcü giriş sinyalleri denklem 4.12 ile ifade edilmiştir.

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_r + \tau_l \\ \tau_r - \tau_l \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

σ kayma yüzeyi olarak tanımlanmıştır.

$$\sigma = G\Delta X \tag{4.13}$$

$$G = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

Γ kontrol sonuçlarını iyileştirmek adına tanımlanan pozitif bir köşegen matristir. Kayan Kipli Kontrol için kontrolcü kuvveti olarak eşdeğer kontrolcü kuvveti (u_{eq}) aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır.[3]

$$u = u_{eq} + (GB)^{-1}\Gamma\sigma \tag{4.15}$$

Kontrolcüden elde edilen eşdeğer kontrol kuvveti ile gerçek eş değer kontrolcü kuvveti arasındaki farkı ortadan kaldırmak amacıyla kontrol sinyaline alçak geçişli filtre

uygulanmıştır.

$$\tau\dot{\hat{u}}_{eq} + \hat{u}_{eq} = u \tag{4.16}$$

Kayan Kipli Kontrolcü'ye ait kontrolcü kuvveti denklem 4.17 ile ifade edilmiştir.

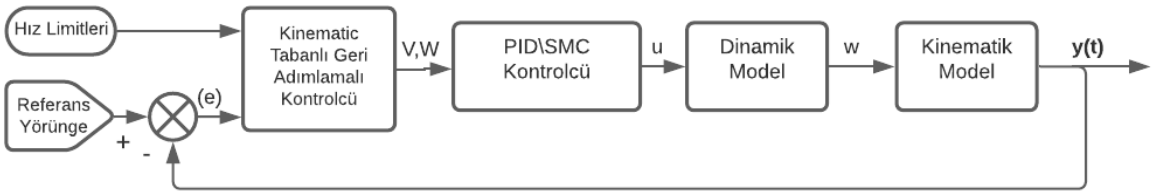
$$u(t) = \hat{u}_{eq}(t) + (GB)^{-1}\Gamma\sigma \tag{4.17}$$

4.2. DİFERANSİYEL SÜRÜŞLÜ GEZER ROBOT YÖRÜNGE TAKİBİ BENZETİMİ

Yörünge takibi benzetimi MacOS işletim sistemine sahip Intelcore i5 işlemcili, 8GB 1600 Mhz LPDDR3 Ram altyapısını kullanan bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir

Benzetim sırasında hesaplamalar, Mathworks şirketi tarafından geliştirilen yaygın olarak matematiksel ve algoritmik hesaplamalarda kullanılan bir programlama dili olan Matlab programında yapılmıştır. Sistemin modellenmesi ise Matlab tabanlı olarak geliştirilen, grafiksel ve model tabanlı mühendislik uygulamaları için kullanılan Simulink programında yapılmıştır. Simulink ortamında, diferansiyel sürüşlü gezer robota ait elde edilen kinematik ve dinamik hareket denklemleri modellenmiş ve bu sayede yörünge takibi benzetim ortamı oluşturulmuştur. Aynı şekilde robota ait konum koordinat değerleri ve kafa açısı için mevcut değerler ile referans değerlerler kıyaslanarak hatalar hesaplanmıştır.Oluşturulan kontrol algoritmaları da modele dahil edilmiş ve hata değerleri kabul edilebilir düzeylere indirilmeye çalışılmıştır.

Şekil 4.2'de kullanılan kontrolcü türleri ve matematiksel modeller giriş ve çıkış sinyalleri şematik olarak ifade edilmiştir.

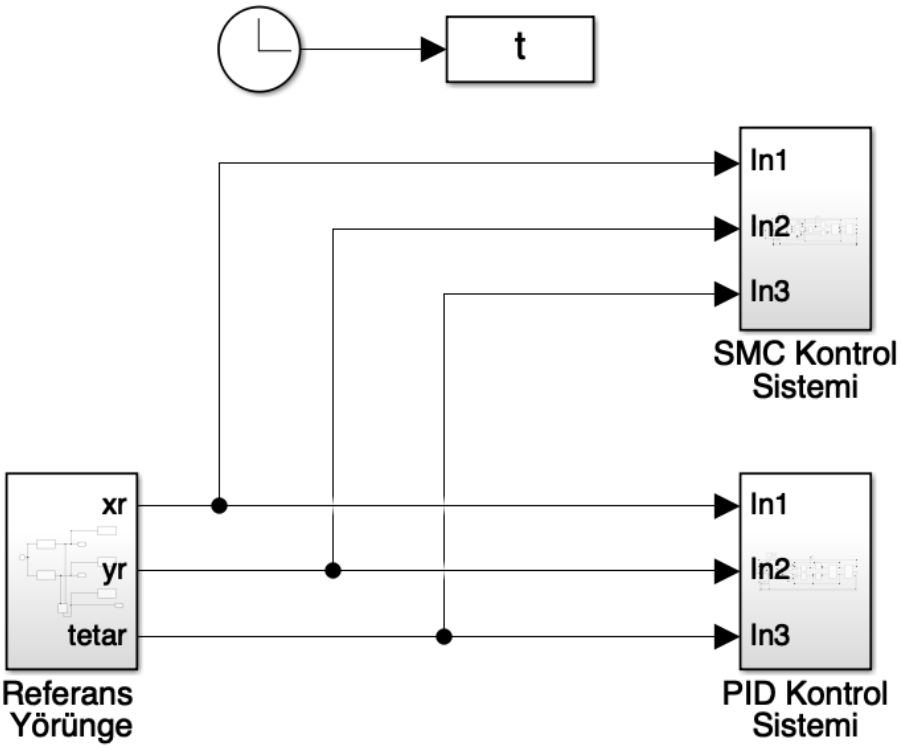


Şekil 4.2: Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Yörünge Takip Şeması

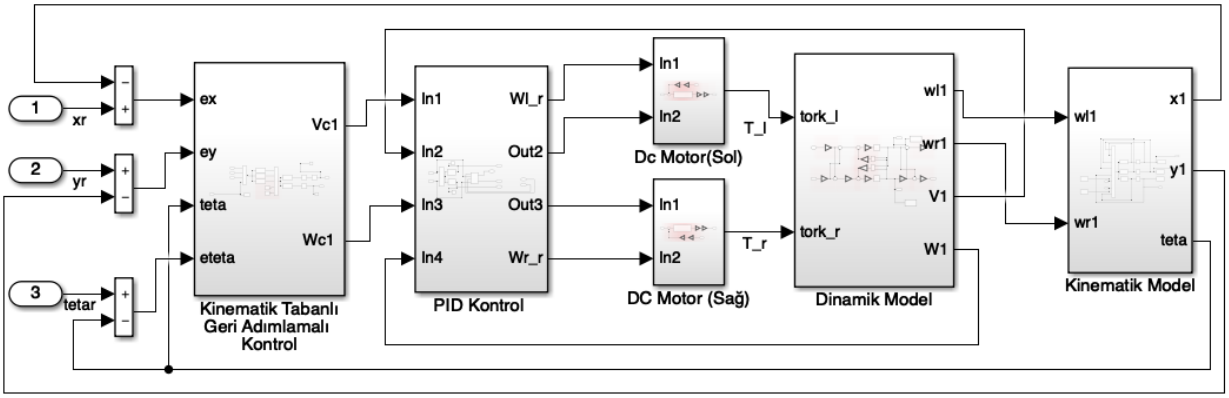
Şekil 4.3'te en uygun yörüngenin referans giriş olarak tanımlanması ve kontrol sistemlerine

dahil edilmesinin bilgisayar programında elde edilen modeli gösterilmiştir.İlk benzetimde en uygun yörünge olarak ön tanımlı yörünge girişi metodu kullanılmış, ikinci benzetimde ise olasılıksal yol hesaplama metodu ile yörünge tayin edilmiş ve her iki kontrol metodu için yörünge takip benzetimleri gerçekleştirilmiştir. PID kontrolcü ve Kayan Kipli Kontrol Metodu için aynı referans değerleri kullanılmış ve bu sayede kontrolcü yörünge takip performanslarının kıyaslanması hedeflenmiştir.

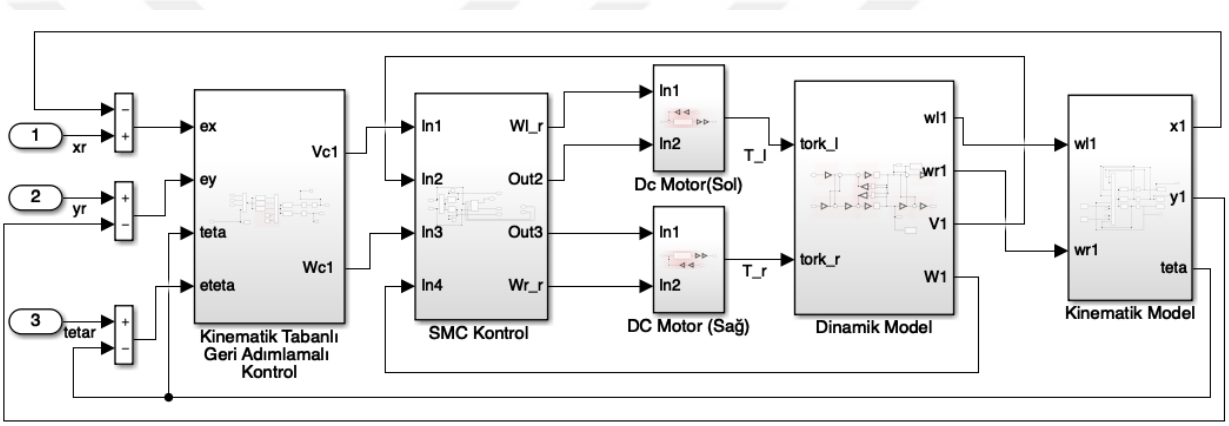
Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 te ise kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcü ile birlikte benzetimde kullanılan PID kontrol ve Kayan Kipli Kontrol metotlarının sistemin matematiksel modellerine uygulanması gösterilmiştir. Geri adımlamalı kontrolcüden elde edilen çizgisel hız değerleri ve açısal hız değerleri kontrolcüye giriş sinyali olarak kullanılmış ve dc motora kontrol çıkış sinyali uygulanarak tekerlek hızları değiştirilmiştir. Aynı zamanda dinamik modelden elde edilen hız değerleri geri bildirim olarak değerlendirilmiştir.Dc motor modelinden elde edilen tork değerleri kullanılarak önce dinamik modelle tekerlek açısal hızları elde edilmiş ve bu açısal hız değerlerinden sistemin mevcut yörünge ve yönelim değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.3: En Uygun Yörüngenin Ana Kontrol Modeli



Şekil 4.4: En Uygun Yörüngenin PID Kontrolcü ile Takip Modeli



Şekil 4.5: En Uygun Yörüngenin SMC Kontrolcü ile Takip Modeli

4.3. REFERANS YÖRÜNGE TANIM VE YÖRÜNGE TAKİP PLANLAMASI

Robot sistemlerinde referans yörünge, kontrol sistemine istenen yörünge doğrultusunda matematiksel girdi şeklinde dahil edilebilir. Ayrıca kontrol sistemi içine mevcut duruma göre belirlenen parametreler doğrultusunda yörüngeyi planlayan bir matematiksel bileşen olarak da eklenebilir. Bu durumda referans yörünge uygulama esnasında değişen durumlara göre değişebilen bir özellik taşır. Ayrıca iki yörünge takibi uygulama yönteminde de robota ait kısıtlar göz önünde bulundurularak hız değerleri üzerine limit uygulanması gerekmektedir.

4.3.1. Ön Tanımlı Yörünge Takip Uygulaması

Referans yörünge değerleri, ilk aşamada X,Y koordinat değerleri ve kafa açısı değerleri zamana bağlı olarak tanımlanmasıyla sisteme dahil edilmiştir.

Referans değerler sinüs dalgası şeklinde bir yörünge oluşturacak şekilde seçilmiştir.

Benzetimde kullanılan referans yörünge değerleri;

$x = t$,

$y = sin(t)$,

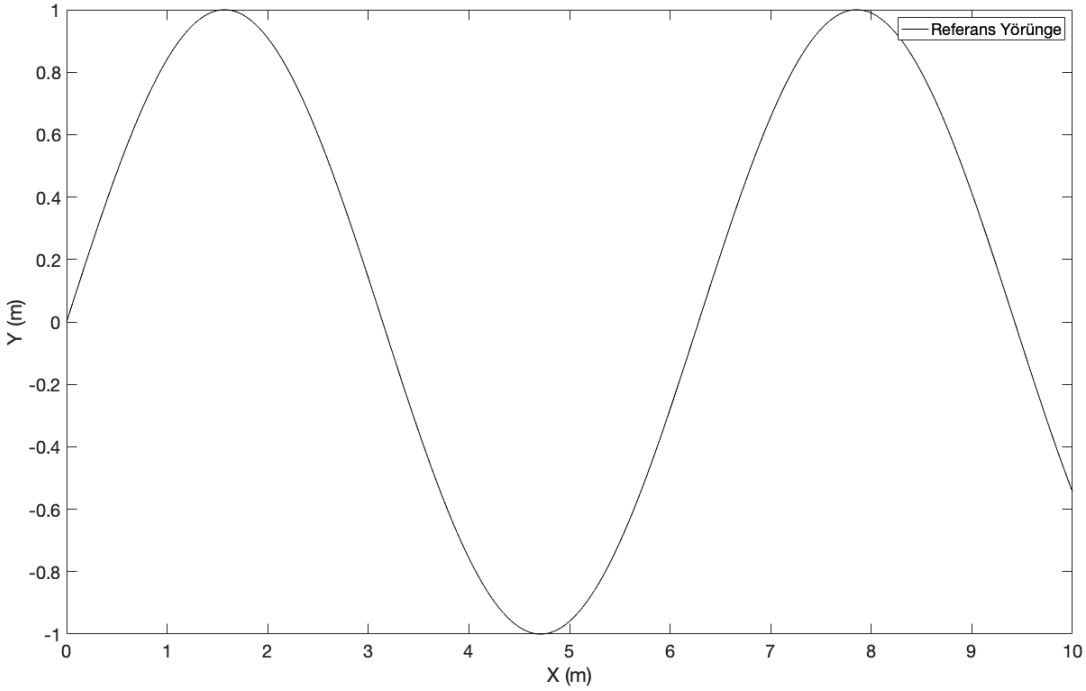
$\theta = atan(y/x)$,

Tanımlanan limit hız değerleri;

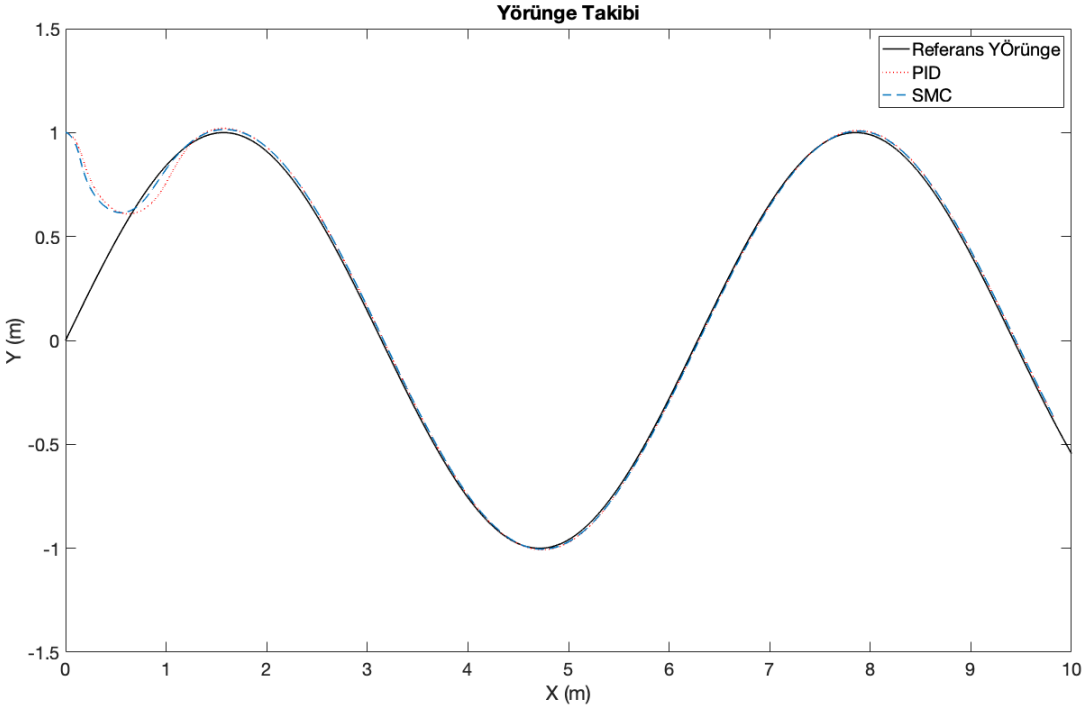
$V_r = 0.15m/s$, $W_r = 0.1rad/s$

Ön tanımlı yörünge takibinde kullanılan kontrolcü parametreleri ekler kısmında Tablo 2.1'de 1. benzetim değeri olarak verilmiştir.

Şekil 4.6 da ilk benzetimde takip edilen yörünge, robot konumunun X ve Y koordinat değerlerinin anlık değişimi şeklinde ifade edilmiştir.



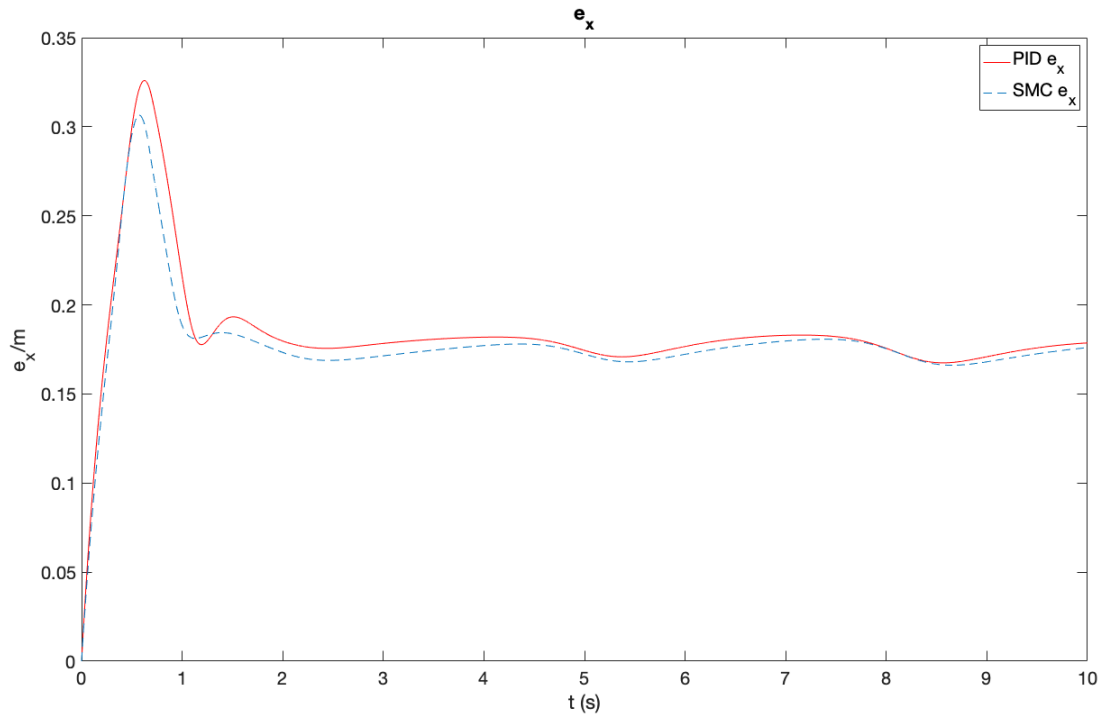
Şekil 4.6: Referans Yörünge



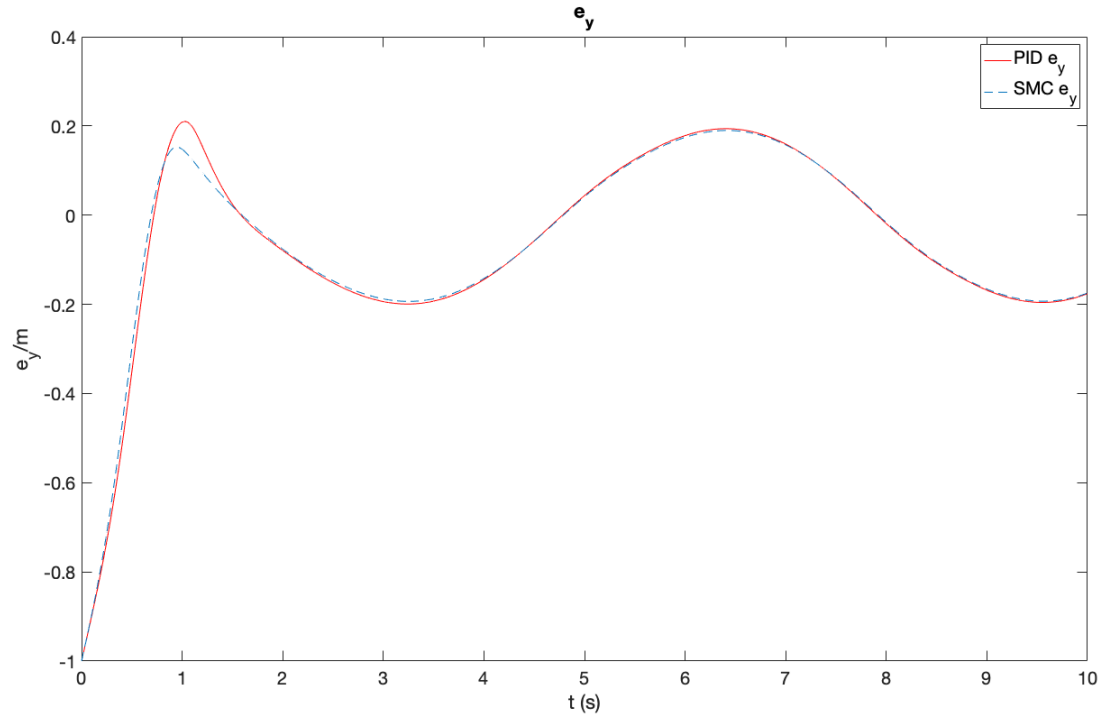
Şekil 4.7: Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Yörünge Takibi

Şekil 4.7 de kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcü ile birlikte yörünge takibi için kullanılan PID kontrol metodu ile Kayan Kipli Kontrol Metodunun yörünge takip grafiği verilmiştir. Benzetim başlangıcında Kayan Kipli Kontrol Metodu'nun robotun mevcut konum değerlerini verilen referans değerlere PID kontrol metodundan daha hızlı yaklaştırdığı görülmektedir. İkinci saniyeden sonra kontrolcüler yörüngenin takibinde aynı başarıyı göstermişlerdir.

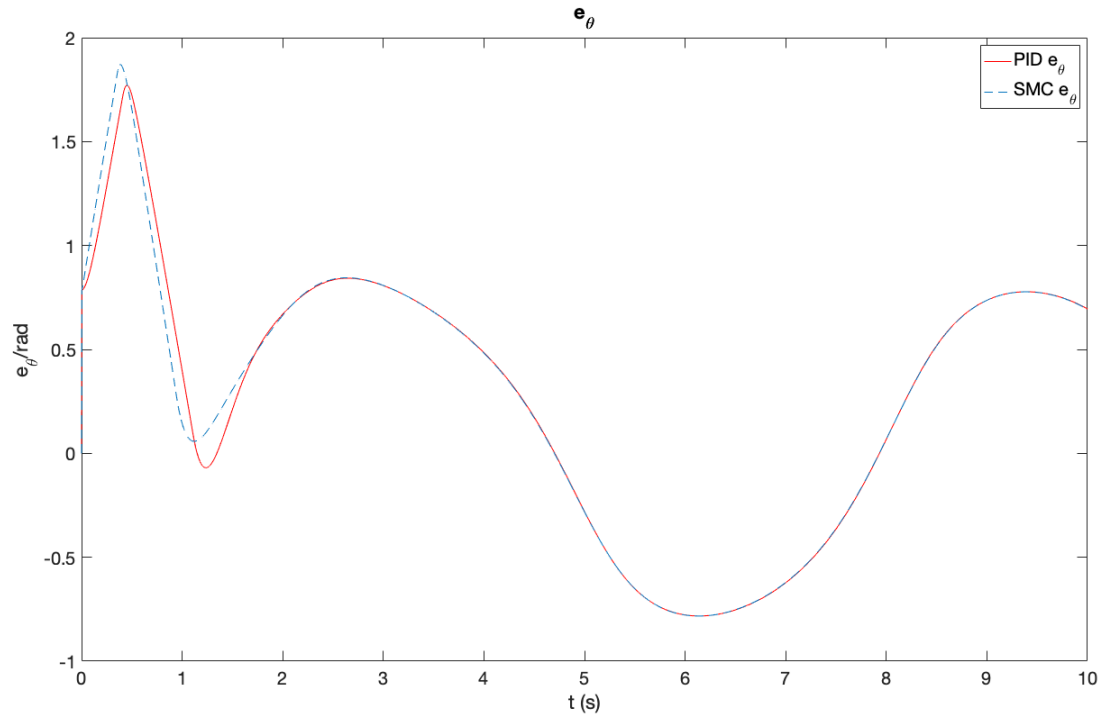
Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10 da hata değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri verilmiştir. İki kontrol metodu için de hata değerleri yörünge takibi süresince birbirine yakın olmakla beraber benzetimin 0-2 saniye zaman aralığında Kayan Kipli Kontrolcünün hataların azaltılması açısından biraz daha başarılı olduğu söylenebilir.



Şekil 4.8: X Koordinatı Konum Hata Grafiği

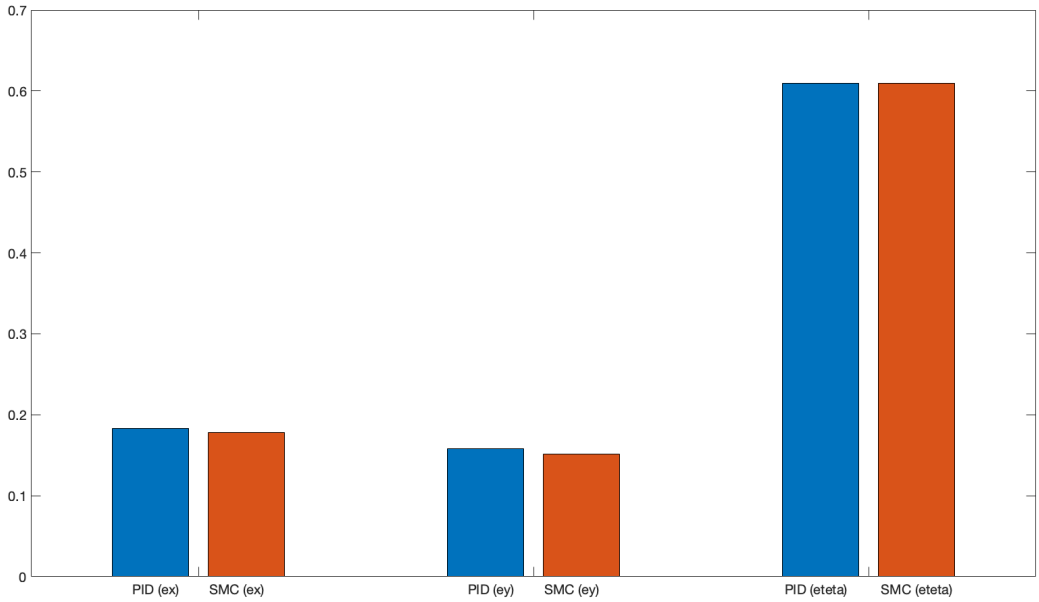


Şekil 4.9: Y Koordinatı Konum Hata Grafiği



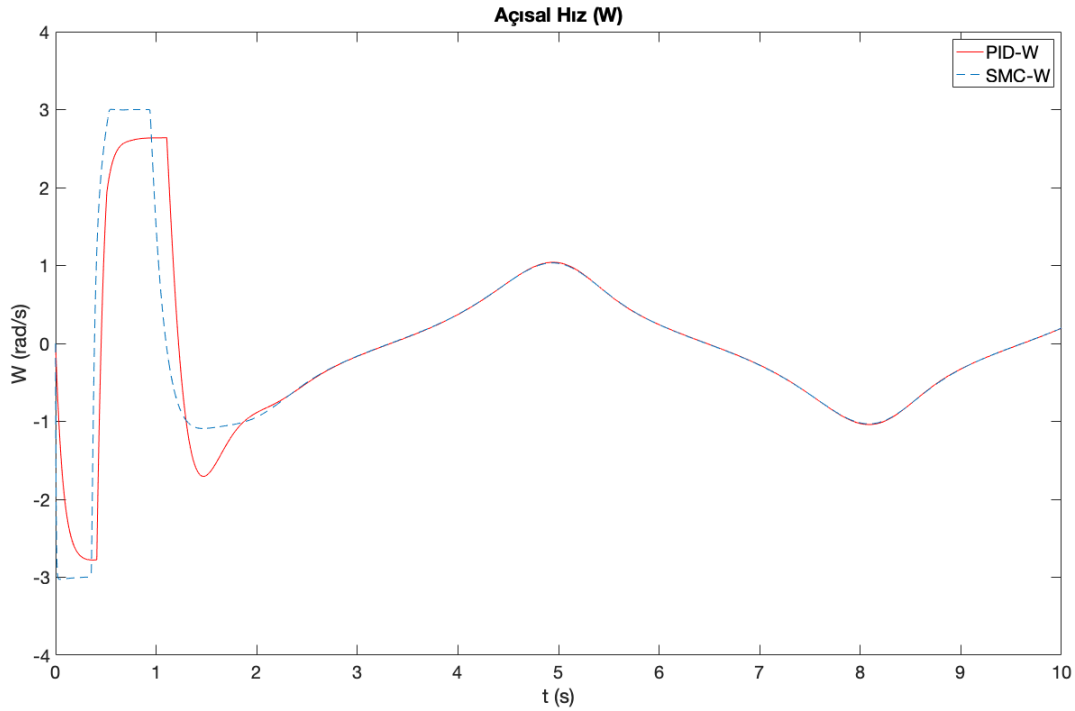
Şekil 4.10: Kafa Açısı Hata Grafiği

Şekil 4.11'de ön tanımlı yörünge benzetimi için PID kontrol ve kayan kipli kontrol için hata değerleri RMS (Root Mean Square) hata analiz yöntemi ile X,Y ve kafa açısı hata değerleri incelenmiştir ve bu analiz sonucunda da her iki kontrol metodu için hata değerlerinin yaklaşık seyrettiği ancak kayan kipli kontrolcünün az bir farkla hatayı sıfıra daha iyi yakınsadığı gözlemlenmiştir.

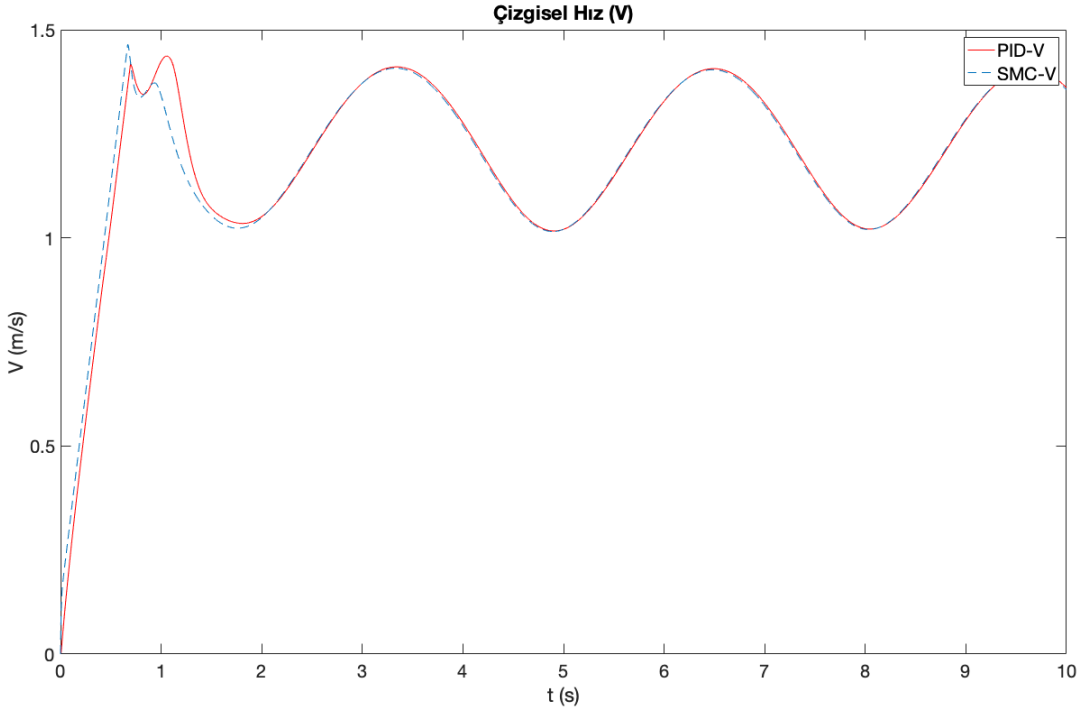


Şekil 4.11: Kontrol Metotları İçin Ön Tanımlı Yörünge RMS Hata Değerlendirme Grafiği

Şekil 4.12 ve 4.13 de ise robota ait çizgisel hız ve kafa açısal hız değerlerinin yörünge takibi boyunca her iki kontrol metodu için değişimi verilmiştir. Hata performanslarına benzer şekilde 0-2 saniye arası hız değerlerinde farklılıklar gözlenmiş olup, benzetimin devamında ise her iki hız değerinin de kontrolcüler için yaklaşık seyrettiği görülmektedir.



Şekil 4.12: Açısal Hız Grafiği

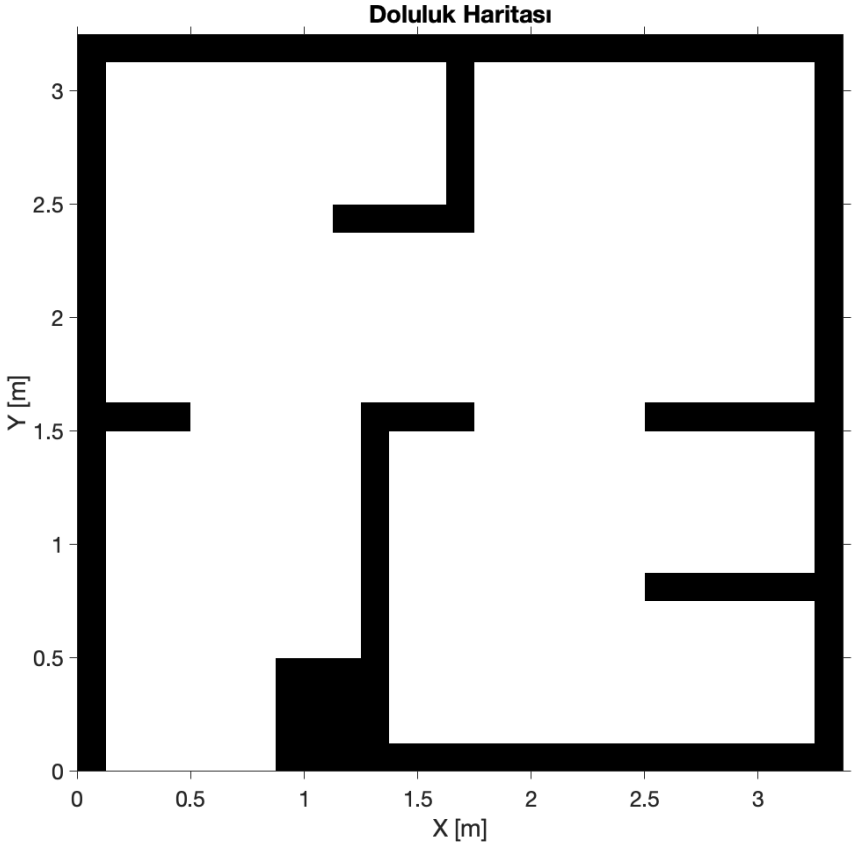


Şekil 4.13: Çizgisel Hız Grafiği

4.3.2. Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi İle Yörünge Takip Uygulaması

Olasılıksal yol haritası metodu robotik uygulamarında kullanılan, başlangıç noktası ile hedef nokta arasında hareket planlama algoritmasıdır. Bu yöntemde robotun çalışma alanı üzerine noktalar atanarak engeller ve güvenli bölgeler tanımlanarak haritalama işlemi gerçekleştirilir. Bu sayede mevcut konum ve hedef konum arasında izlenecek yörünge belirlenen noktalar arasında olasılıklar değerlendirilerek planlanır. Oluşturulan kontrol kuralı doğrultusunda dc motorların hızları değiştirilerek, gezer robot hareketi için planlanan çarpışmasız en uygun yörüngenin takibi gerçekleştirilir.[14][24]

Bu aşamada olasılıksal yol metodunun uygulanacağı çalışma alanı olarak Şekil 4.14 te verilen örnek Matlab doluluk haritası[6] kullanılmıştır. Siyah renkle ifade edilen kısımlar yörünge planlaması için engel olarak tanımlanmış bölgelerdir beyaz renkle ifade edilen kısımlar ise robotun hareket için kullanabileceği güvenli bölgeler olarak tanımlanmıştır.



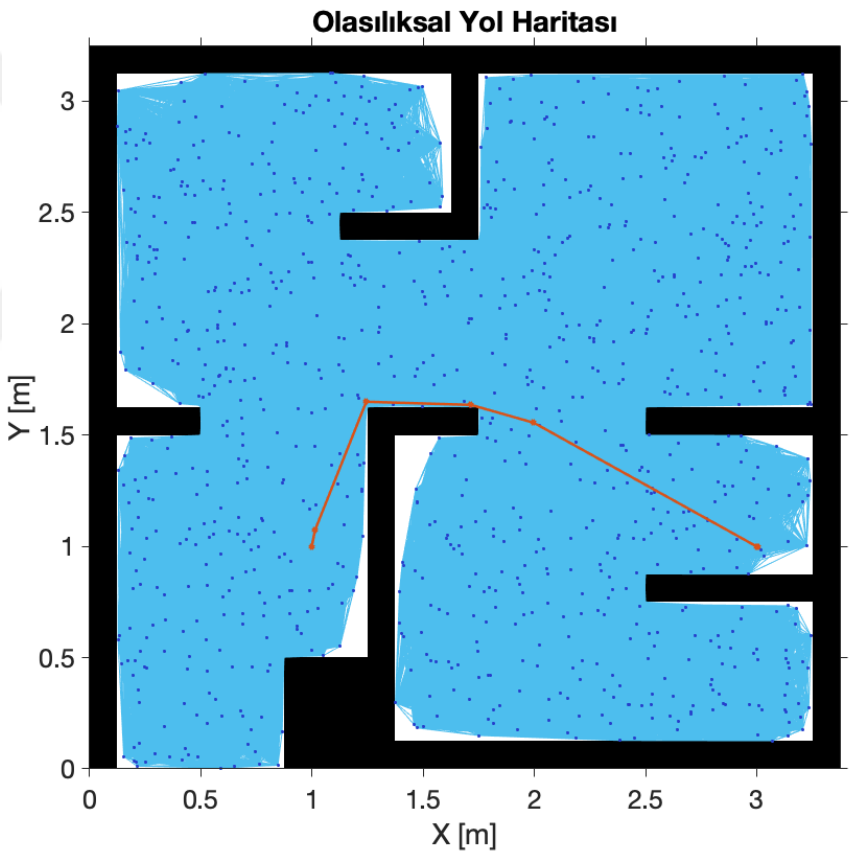
Şekil 4.14: Matlab İkili Doluluk Haritası

[6] https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/mapping-with-known-poses.html

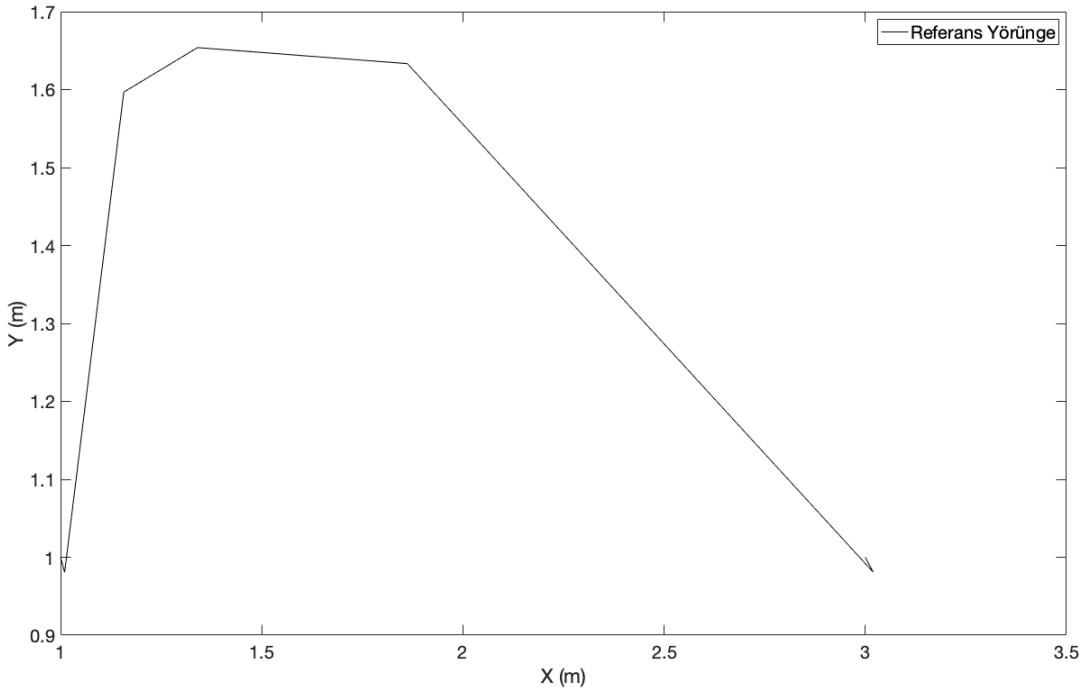
Şekil 4.15'te olasılıksal yol metodu ile güvenli bölgelere noktaların dağılımı ve bu noktalar kullanılarak en uygun yörüngenin çizilmesi görülmektedir. Noktaların örnek harita üzerine yerleştirilmesi bilgisayar programında yapılmış olup en uygun yörünge için Matlab Olasılıksal Yol Haritalama Metodu (PRM Complex Method) kullanılmıştır.Başlangıç konumu için $X = 1, Y = 1$ hedef konum için $X = 3, Y = 1$ seçilmiştir.

Bu aşamada kullanılan kontrolcü parametreleri 2. benzetim değeri olarak ekler kısmında Tablo 2.1'de verilmiştir.

Şekil 4.16 te doluluk haritası için mevcut konumdan hedeflenen konuma ulaşmak için tayin edilen en uygun yörünge grafiği X ve Y koordinat değerlerinin sıralı olarak ifade edilmesiyle elde edilmiştir.



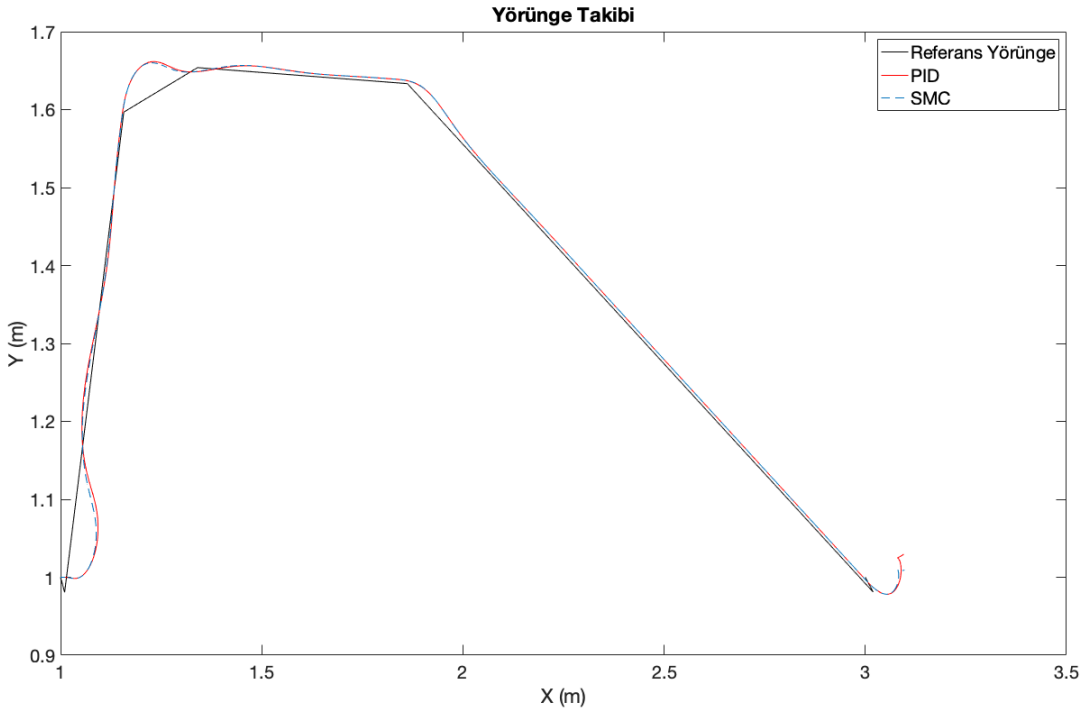
Şekil 4.15: Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi İle Yörünge Tayini



Şekil 4.16: Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi Referans Yörünge

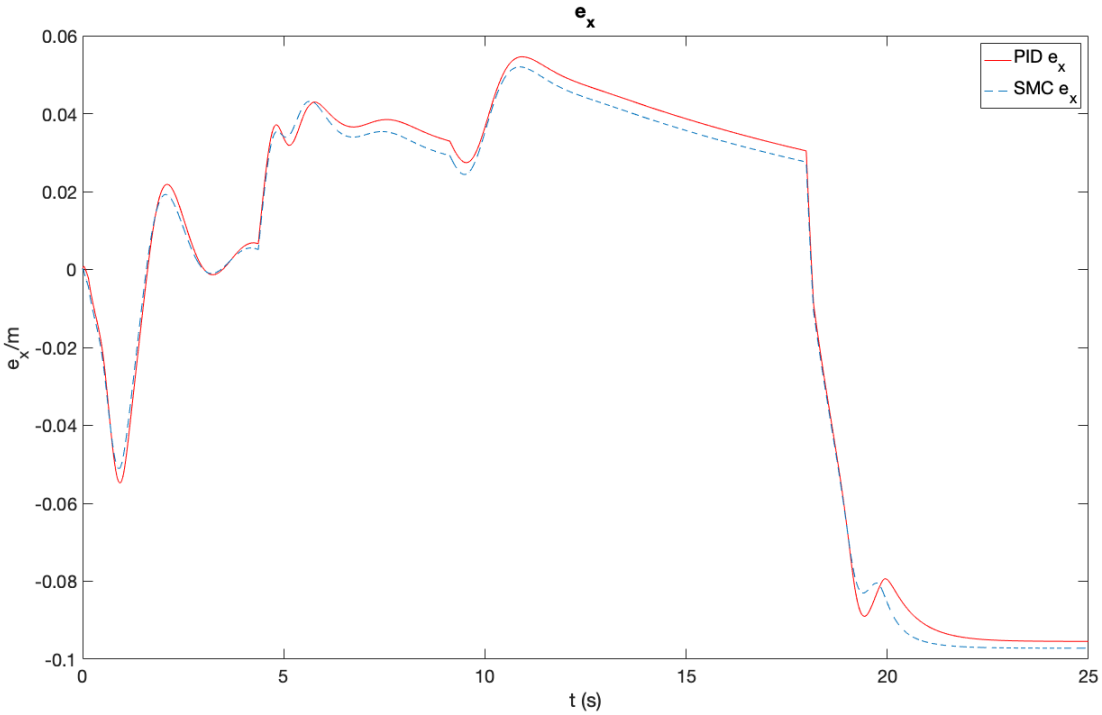
Şekil 4.17 da PID kontrol ve Kayan Kipli Kontrol Metodu için doluluk haritası üzerinde engellere çarpmadan hedef konuma ulaşabilmek için tayin edilen en uygun yörüngenin takibi verilmiştir. Benzetimin ilk aşamasında her iki kontrolcü için de referans yörünelime yaklaşmak için bir süre gerekmiş ve mevcut konumda salınım gözlenmiştir. Ancak her iki kontrolcü de kısa sürede referans değerlere başarılı bir şekilde yaklaşarak yörüngeyi takip edebilmiştir.

Tayin edilen yörüngenin dönüş noktalarında referans yörüngeye yaklaşmak için tekrardan bir süre gerekmiş ve bu durum grafik üzerinde de referans yörüngeden uzaklaşma şeklinde görülmektedir.

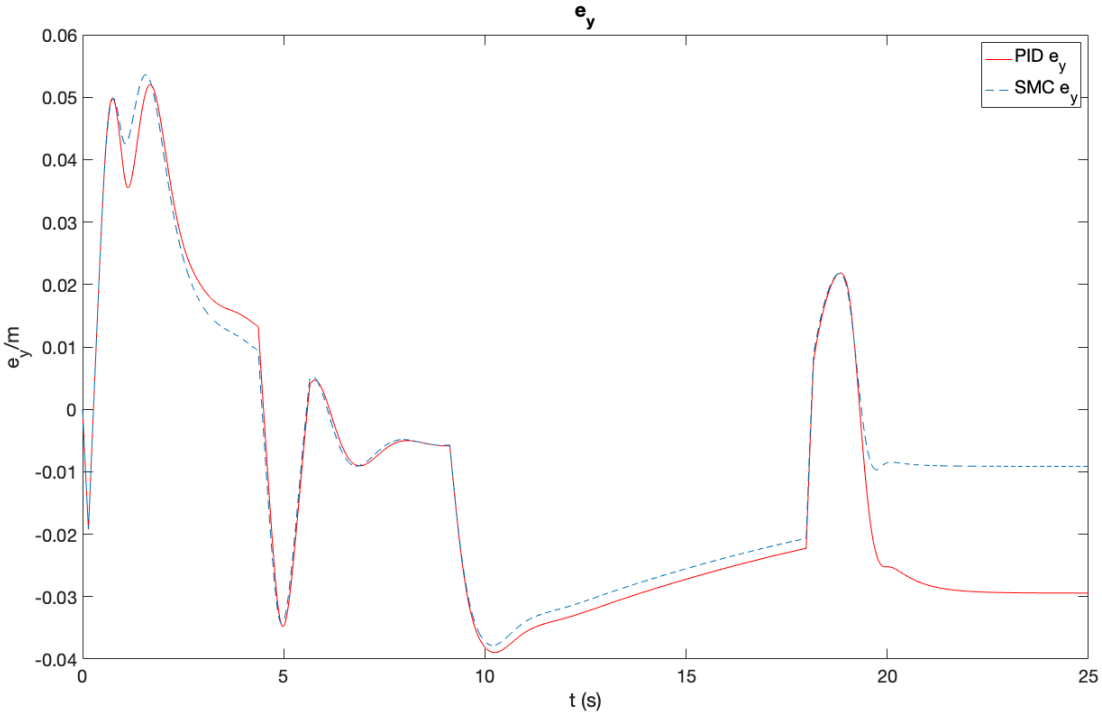


Şekil 4.17: Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Yörünge Takibi

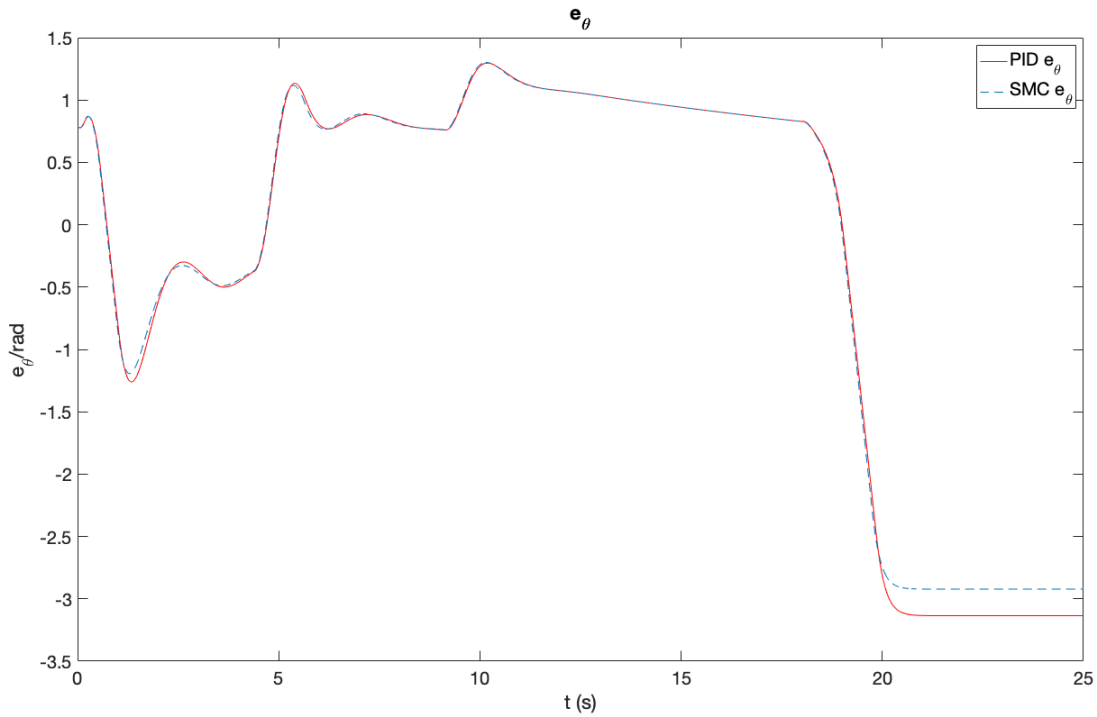
Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20 da ise PID kontrol ve Kayan Kipli Kontrol Metodu için referans konum ve kafa açısı değerleri ile mevcut değerler arasındaki farklardan doğan hata grafikleri verilmiştir. Hata değerleri her iki kontrolcü için de benzer değişimler göstermekle beraber X koordinatı konum değeri için hesaplanan hata değerinde Kayan Kipli Kontrol Metodu az bir farkla daha iyi performans göstermiştir. Y koordinatı konumu ve kafa açısı için hata değerleri oldukça yakın değişimler göstermiştir.



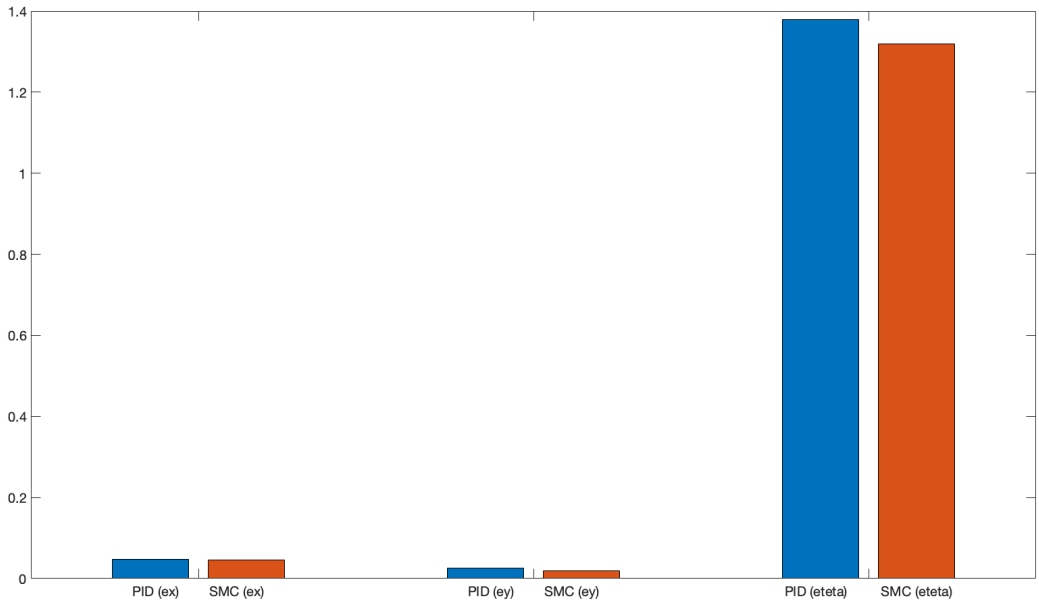
Şekil 4.18: X Koordinatı Konum Hata Grafiği



Şekil 4.19: Y Koordinatı Konum Hata Grafiği



Şekil 4.20: Kafa Açısı Hata Grafiği

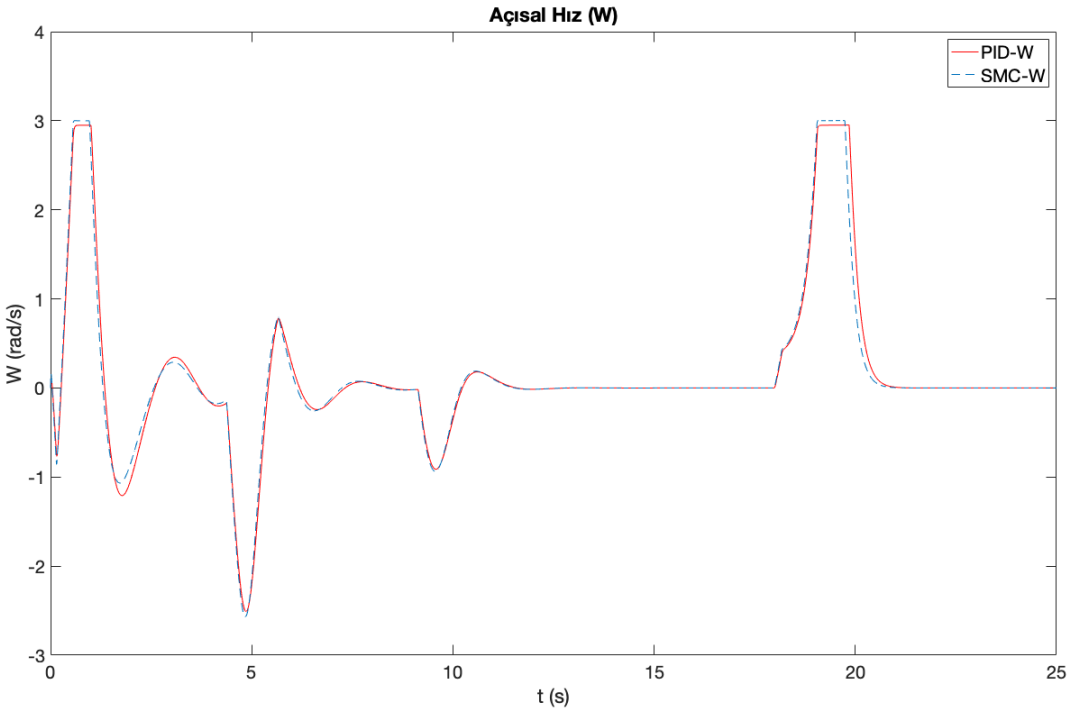


Şekil 4.21: Kontrol Metotları İçin Olasılıksal Yol Haritası Yöntemi RMS Hata Değerlendirme Grafiği

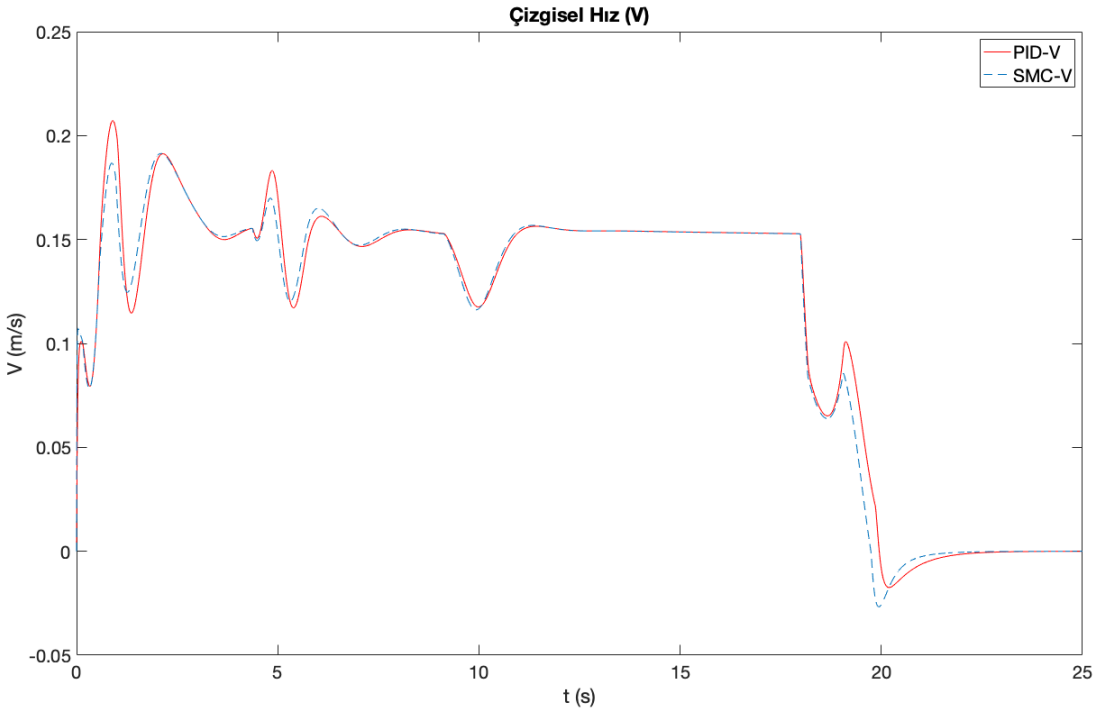
Şekil 4.21'de her iki kontrol metodu için olasılıksal yol haritası yöntemi benzetimi hata

performansları, RMS (Root Mean Square) hata analiz yöntemi ile değerlendirilmiştir ve yaklaşık değerlere rağmen kayan kipli kontrolcünün hatayı sıfırlama açısından bir adım daha önde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 4.22 ve 4.23 de yörüngenin takibi süresince robota ait çizgisel hız ve kafa açısal hız değerinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Her iki kontrolcü de robotun hız bileşenlerini yaklaşık değerlerle kontrol etmiştir ancak dönüm noktalarında Kayan Kipli Kontrol Metodu daha düşük hız değerleri ile robotu referans yörüngeye yöneltebilmiştir.



Şekil 4.22: Açısal Hız Grafiği



Şekil 4.23: Çizgisel Hız Grafiği

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tezde iki tekerlekli bir diferansiyel sürüşlü gezer robotun kinematik ve dinamik açıdan analizi yapılmış ve matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrol kuralı, PID kontrol kuralı ve Kayan Kipli Kontrol Metodu iki tekerlekli diferansiyel sürüşlü gezer robot için oluşturulmuştur. Elde edilen matematiksel modeller bilgisayar programına aktarılarak benzetim ortamı oluşturulmuş ve kontrol metotları bu benzetim ortamında sınanmıştır.

Benzetim için öncelikle robotun önceden tanımlanmış bir referans yörünge üzerinde hareketi planlanmış ve bu doğrultuda yörünge takip edilmiştir.

Kontrolcü yörünge takip performansları, bir diğer benzetim ortamı olarak olasılıksal yol haritası metodu ile elde edilen en uygun yörüngenin takibiyle kıyaslanmıştır. Bu doğrultuda örnek doluluk haritası bilgisayar programı aracılığıyla kullanılabilir alanlar ve engel kısımları olarak haritalanmıştır. Harita üzerine kullanılabilir alanlara noktalar tanımlanarak bu noktalar kullanılarak en uygun yörünge tayin edilmiştir.

Yörünge takibi benzetimleri değerlendirilirken kontrolcülerin konum ve yönelim hata azaltma performansları dikkate alınmıştır.

PID kontrol metodu ve Kayan Kipli Kontrol, kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcü ile birlikte kullanıldığında ön tanımlı yörünge ve olasılıksal yol haritası metodu ile elde edilen yörüngeleri başarılı bir şekilde takip edebilmiş ve hata değerlerini kabul edilebilir aralıklara indirebilmişlerdir.

Kayan Kipli Kontrol metodunun benzetim başlangıcı ve kritik dönüş noktalarında daha başarılı sonuçlar verdiği hata değerlerinde gözlemlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda bilgisayar ortamında gerçekleştirilen çalışmaların fiziksel model üzerinde gerçeklenmesi somut sonuçlar gözlemlemek adına faydalı olacaktır. Buna ek olarak yörünge takibi sırasında çevreye ait değişkenlerin dinamik olarak algılanması adına fiziksel modele ilgili donanımların eklenmesi ve kontrol sisteminin bu yönde geliştirilmesi kontrolcü performanslarının daha kapsamlı bir şekilde test edilmesi adına önerilir.

KAYNAKLAR

[1]. Ang, K. H., Chong, G., Li, Y.. *PID control system analysis, design, and technology*. IEEE transactions on control systems technology, 13(4), 559-576.

[2]. Armesto, L., Girbés, V., Sala, A., Zima, M., Šmídl, V. 2015. *Duality-based nonlinear quadratic control: Application to mobile robot trajectory-following*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 23(4), 1494-1504.

[3]. Arslan, Y. Z., Sezgin, A., Yagiz, N. 2015. *Improving the ride comfort of vehicle passenger using fuzzy sliding mode controller*. Journal of vibration and control, 21(9), 1667-1679.

[4]. Blažič, S. 2011.*A novel trajectory-tracking control law for wheeled mobile robots*. Robotics and Autonomous Systems, 59(11), 1001-1007.

[5]. Dang, Q. V., Nielsen, I., Bøgh, S.,Bocewicz, G. 2013.*Modelling and scheduling autonomous mobile robot for a real-world industrial application*. IFAC Proceedings Volumes, 46(9), 2098-2103.

[6]. Demirbaş, F., Kalyoncu, M. 2017. *Differential drive mobile robot trajectory tracking with using pid and kinematic based backstepping controller*. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 1-15.

[7]. Dhaouadi, R., Hatab, A. A. 2013. *Dynamic modelling of differential drive mobile robots using lagrange and newton-euler methodologies: A unified framework.* Advances in Robotics Automation, 2(2), 1-7.

[8]. Dragoicea, M.,Dumitrache, I. 2003. *Intelligent Control Techniques for Mobile Robotics*. IFAC Proceedings Volumes, 36(23), 149-153.

[9]. Godse, A. P., Godse, D. A. (2010). *Microprocessor and microcontroller*. Technical publications.

[10]. Hacıoğlu, M. M. Y., Yağız, N. *Bir Robotun Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrolü*,Yüksek Lisans Tezi.

[11]. Hellström, T. 2011. *Kinematics equations for differential drive and articulated steering*. Department of Computing Science, Umeå University.

[12]. Itkıs, U.,*Control systems of variable structure, Wiley*, New York.

[13]. Kanayama, Y., Kimura, Y., Miyazaki, F., Noguchi, T. 1990. *A stable tracking control method for an autonomous mobile robot*. In Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 384-389). IEEE.

[14]. Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J. C., Overmars, M. H. (1996). *Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces*. IEEE transactions on Robotics and Automation, 12(4), 566-580.

[15]. Kiong, T. K., Qing-Guo, W., Chieh, H. C., Hägglund, T. J. (1999). *Advances in PID control* (pp. 2-262). Springer London.

[16]. Kleitz, W. (1997).*Microprocessor and microcontroller fundamentals: the 8085 and 8051 hardware and software*. Prentice Hall Professional Technical Reference.

[17]. Krstic, M., Kokotovic, P. V., Kanellakopoulos, I. (1995). *Nonlinear and adaptive control design*. John Wiley and Sons, Inc..

[18]. Li, H., ve Savkin, A. V. 2018. *An algorithm for safe navigation of mobile robots by a sensor network in dynamic cluttered industrial environments*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 54, 65-82.

[19]. Mahmud, M. S. A., Abidin, M. S. Z., Mohamed, Z., Abd Rahman, M. K. I.,ve Iida, M.2019. *Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment. Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 488-499.

[20]. Martins, F. N., Sarcinelli-Filho, M., Carelli, R. (2017). *A velocity-based dynamic model and its properties for differential drive mobile robots*. Journal of Intelligent Robotic Systems, 85(2), 277-292.

[21]. Mohareri, O.2009. *Mobile Robot Trajectory Tracking Using Neural Networks* (Doctoral dissertation).

[22]. Obaid, M. A. M., Husain, A. R., Al-Kubati, A. A. M. 2016. *Robust Backstepping Tracking Control of Mobile Robot Based on Nonlinear Disturbance Observer*. International Journal of Electrical and Computer Engineering (2088-8708), 6(2).

[23]. Panahandeh, P., Alipour, K., Tarvirdizadeh, B., Hadi, A. 2019. *A kinematic Lyapunov-based controller to posture stabilization of wheeled mobile robots*. Mechanical Systems and Signal Processing, 134, 106319.

[24]. Patle, B. K., Pandey, A., Parhi, D. R. K.,Jagadeesh, A. (2019). *A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot*. Defence Technology, 15(4), 582-606.

[25]. Taheri, H., Zhao, C. X. 2020. *Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches*. Mechanism and Machine Theory, 153, 103958.

[26]. Utkin, V.I.,*Variable structure systems with sliding modes*, IEEE

[27]. Wada, N., Tagami, S., Saeki, M. 2007. *Path-following control of a mobile robot in the presence of actuator constraints*. Advanced Robotics, 21(5-6), 645-659.

EKLER

EK 1. Model Değişkenleri

Tablo 1.1: Diferansiyel Sürüşlü Gezer Robot Model Değişkenleri

Simge	Değer	Birim	Simge	Değer	Birim
m_c	26	kg	K_b	$12.939 * 10^-3$	V*s
m_w	0.5	kg	K_t	$12.939 * 10^-3$	N*m/A
I_c	0.7	$kg.m^2$	R_a	1.01	Ω
I_w	0.0020	$kg.m^2$	L_a	$0.088 * 10^-3$	V*s/A
I_m	0.0011	$kg.m^2$	N	38	-
R	0.10	m			
L	0.170	m			
d	0.05	m			

EK 2. Kontrol Değişkenleri

Tablo 2.1: Yörünge Takibi Benzetimi Kontrol Değişkenleri

Simge	1. Benzetim Değeri	2. Benzetim Değeri
K_p	10	30
K_i	0.5	0.5
K_d	0.5	2
α_{12}	40	30
Γ_{12}	10	10
k_1	5	1.5
k_2	300	400
k_3	5	1.5