



**KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**DÖRT TEKERDEN TAHRİKLİ MOBİL ROBOTTA
KAZANÇ PLANLAMALI VE KATMANLI PID İLE
HIZ VE POZİSYON KONTROLÜ**

Ali Erkam IŞIK

Yüksek Lisans Tezi

**KONYA
Temmuz 2022**

DÖRT TEKERDEN TAHRİKLİ MOBİL ROBOTTA
KAZANÇ PLANLAMALI VE KATMANLI PID İLE HIZ VE POZİSYON KONTROLÜ

Ali Erkam IŞIK

KTO Karatay Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali Bülent UŞAKLI

Konya
Temmuz 2022

BİLDİRİM

Enstitü tarafından onaylanan Yüksek Lisans tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını basılı veya dijital biçimde arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullar dahilinde erişime açma iznini KTO Karatay Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle, Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak ve gelecekteki çalışmalar (makale, kitap, lisans, patent vb.) için tezimin tamamının veya bir bölümünün kullanım hakları yalnızca bana ait olacaktır.

Tezimin bütünüyle kendi çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izinle kullanılması zorunlu olan kaynakları, yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde izinlerin suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayımlanan “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında, tezim, aşağıda belirtilen koşullar haricince, YÖK Ulusal Tez Merkezi ve KTO Karatay Üniversitesi Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.¹

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ... ay ertelenmiştir.²

Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir.³⁴

19 Temmuz 2022

Ali Erkam IŞIK

¹ MADDE 6(1) Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.

² MADDE 6(2) Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internette paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkânı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.

³ MADDE 7(1) Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir. Kurum ve kuruluşlarla yapılan iş birliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

⁴ MADDE 7(2) Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

ETİK BEYAN

KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Hazırlama ve Yazım Kurallarına uygun olarak Prof. Dr. Ali Bülent UŞAKLI danışmanlığında tarafımdan üretilen bu tez çalışmasında; sunduğum tüm veri, enformasyon, bilgi ve belgeleri bilimsel etik kuralları çerçevesinde elde ettiğimi, tüm değerlendirme, analiz, bulgu ve sonuçları bilimsel usullere uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım kaynakların tümüne bilimsel normlara uygun biçimde atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

19 Temmuz 2022

Ali Erkam IŞIK

Sevgili eşim ve dünyalar tatlısı kızım

TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresi boyunca akademik bilgisi ve donanımı ile teknik anlamda yol gösteren, her sorunda yanımda olup beni destekleyen, motive eden ve tecrübelerini paylaşan kıymetli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Ali Bülent UŞAKLI'ya,

Pozitif ve anlayışlı tavrı ile her anlamda bana destek olup yön veren, hatalarımı mazur gören, tez çalışmasında desteğini esirgemeyen kıymetli hocam ve yöneticim Dr. Öğr. Üyesi Barış Samim NESİMİOĞLU'na,

Yoğun ve yorucu çalışma süreçlerini keyifli hâle getiren değerli mesai arkadaşlarım AKİTEK ailesine,

Maddi manevi desteklerinin eksikliklerini hissetmediğim annem ve babama,

Çalışmanın yoğunluğu ve stresine katlanan, zor zamanlarda anlayışla yaklaşan eşime teşekkür ederim.

19 Temmuz 2022

Ali Erkam IŞIK

ÖZET

Ali Erkam IŞIK

Dört Tekerden Tahrikli Mobil Robotta Kazanç Planlamalı ve Katmanlı

PID ile Hız ve Pozisyon Kontrolü

Yüksek Lisans Tezi

Konya, 2022

Son yıllarda mobil robotların endüstri, savunma, keşif ve tarım gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaya başlanmasıyla, ihtiyaca yönelik farklı mobil robot konfigürasyonları ve kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. İki, üç, dört ve altı tekerden tahrikli, kayma ve bağımsız yönlendirmeli mobil robotlar bu konfigürasyonlara örnek olarak gösterilebilir. Her bir konfigürasyonun kullanım alanları farklılıklar göstermekte ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin dört tekerden tahrikli mobil robotlar, iki ve üç tekere sahip mobil robotlara nazaran engebeli arazilerde daha iyi performans göstermektedir. Bununla birlikte bu konfigürasyondaki mobil robotlarda en sık karşılaşılan sorunlardan bir tanesi kayma sorunudur. Kayma sorunundan dolayı, kinematik hesaplamalar sonucunda üretilen kontrol çıktıları mobil robotun kontrolünde tek başına yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar mobil robotun performansını arttırmak için farklı kontrolcüler ve algoritmalar geliştirmişlerdir. Bu tez çalışmasında dört tekerden tahrikli kayma yönlendirmeli mobil robotun kazanç planlamalı ve katmanlı PID kontrolcü ile hız ve pozisyon kontrolü için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Enkoder verileri ve atalet ölçüm birimlerinden elde edilen verilerin anlamlı bir şekilde yorumlanması sonucunda pozisyon takibinde doğruluk artırılmış, geliştirilen kazanç planlamalı katmanlı PID kontrolcü ile robotun pozisyon hassasiyetinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde tek bir kontrolcünün tüm çalışma koşullarında sistemin kararlılığını koruyamadığı gözlemlenmiştir. Bu soruna çözüm olarak kullanılan kazanç planlama algoritması ile mobil robota farklı çalışma koşullarında kararlılığını korumak için esneklik kazandırılmıştır. Klasik PID kontrolcü yapısında pozisyon kontrolü yapılırken, hız denetimini yapan ara kontrol mekanizmasının olmaması, mobil robotta kayma ve nihai yönelme açısından bozulmalara sebep olmaktadır. Katmanlı PID kontrolcü yapısı ile pozisyon kontrolü yapılırken hız kontrolünün yapılması sağlanmıştır. Bu yaklaşımla pozisyon ve hız kontrolü birbirinden bağımsız hâle getirilmiştir. Yapılan çalışmaların doğruluk testleri, hazırlanan test senaryolarına göre yapılmıştır. Sonuçlar klasik PID kontrolcü ile kıyaslandığında; 100, 200 ve 400 cm için yapılan doğru boyunca hareket testlerinde klasik PID kontrolcüde karşılaşılan aşım ve salınım sorunu azaltılmıştır. Bu testlerde yaklaşık %2 iyileşme sağlanmıştır. 45°, 90°, 180°, 270° ve 360° nokta dönüşlerinde ise klasik PID kontrolcüde meydana gelen kalıcı durum hatasında yaklaşık %2 iyileşme sağlanmıştır. Kare güzergâh takibi testlerinde ise nihai pozisyon hatası 10 cm'nin altına indirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

Mobil robot, katmanlı PID, kazanç planlamalı kontrolcü

ABSTRACT

Ali Erkam IŞIK

Speed and Position Control of Four Wheel Driven Mobile Robot with Gain Scheduled
and Cascaded PID

Master's Thesis

Konya, 2022

In recent years, with the frequent use of mobile robots in areas such as industry, defense exploration and agriculture, different mobile robot configurations and control methods have been developed. Two-, three-, four-, and six-wheel driven, skid and independent steered mobile robots are examples of these configurations. Usage areas of each configuration vary and have advantages and disadvantages compared to each other. As an example, mobile robots with four-wheel drive performs better on rough terrain than mobile robots with two- and three-wheel. However, one of the most common problems in the mentioned mobile robot configuration is slip problem. Due to slip problem, control outputs produced by kinematic calculations are insufficient for the control of mobile robot alone. For this reason, researchers have developed different controllers and algorithms to increase the performance of the mobile robot. In this thesis, a new system has been developed for speed and position control of a four-wheel driven skid-steer mobile robot with a PID controller. As a result of the meaningful interpretation of the encoder data and the data obtained from the inertial measurement units, the accuracy in position tracking has been increased and studies have been carried out on the gain scheduled cascaded PID controller and position accuracy of mobile robot has been increased. In the tests, it was observed that a single controller could not maintain the stability of the system under all operating conditions, and the gain scheduling algorithm used as a solution to this problem gave the mobile robot flexibility to maintain stability in different operating conditions. While position control is performed in the classical PID controller structure, the absence of an intermediate control mechanism that controls the speed causes slippage and deterioration in the final orientation angle of the mobile robot. With the cascaded PID controller structure, speed control is provided while position control is performed. With this approach, position and speed control are made independent from each other. Accuracy tests of the studies were carried out according to the prepared test scenarios. When the results are compared with the classical PID controller; in the linear motion tests for 100, 200 and 400 cm, the overshoot and oscillation problem encountered in the classical PID controller has been reduced. Approximately 2% improvement was achieved in these tests. In the 45°, 90°, 180°, 270° and point turns, approximately 2% improvement was achieved in the steady state error that occurred in the classical PID controller. In the square path tracking tests, the final position error was reduced below 10 cm.

Keywords

Mobile robot, cascaded PID, gain scheduled controller

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
BİLDİRİM	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER DİZİNİ.....	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	7
2.1. Kullanılan Ekipman ve Algoritmalar	8
2.1.1. Mikrodenetleyici.....	8
2.1.2. Motor ve Motor Sürücüler	9
2.1.3. Enkoder.....	11
2.1.4. Atalet Ölçüm Birimi	13
2.1.5. RF Haberleşme	16
2.1.6. Odometri	17
2.1.7. Hedefe Gitme Algoritması.....	20
2.2. Mobil Robot Tasarımı	21
2.2.1. Mekanik Tasarım.....	22
2.2.2. Elektronik Tasarım	26
2.3. Kontrol Sistem Tasarımı	30
2.3.1. Parametrelerin Belirlenmesi	35
2.3.2. Kazanç Planlama	48
2.3.3. Katmanlı PID	50
3. DENEYSEL SONUÇLAR	51
3.1. Hız Testi Sonuçları.....	51
3.2. Doğru Boyunca Hareket Test Sonuçları.....	54
3.3. Nokta Dönüşü Test Sonuçları.....	57

3.4. Kare Güzergâh Takip Testi Sonuçları	58
4. SONUÇ	61
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	64

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Benzer 4WD Robotların Kıyaslanması.....	21
Tablo 2. P, I, D Katsayılarının Sinyal Bileşenleri Üzerinde Etkisi.....	36
Tablo 3. Ziegler Nichols Parametre Belirleme Yöntemi	37
Tablo 4. Tyreus-Luyben Parametre Belirleme Yöntemi.....	37
Tablo 5. Doğru Boyunca Hareket Test Sonuçları	56
Tablo 6. Nokta Dönüşü Test Sonuçları	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Mobil Robot Türleri	1
Şekil 2. Mobil Robot Hareketini Oluşturan Alt Bileşenler	3
Şekil 3. Sistemi Oluşturan Ana Bileşenler	7
Şekil 4. Arduino Due Kartı	8
Şekil 5. DC Motor	10
Şekil 6. PWM Sinyali.....	10
Şekil 7. Motor Sürücü IBT-2 Modülü.....	11
Şekil 8. Enkoder Sensör Çıkışları	12
Şekil 9. Atalet Ölçüm Birimi	13
Şekil 10. İvmeölçer Ham Sensör Verisi	14
Şekil 11. İvmeölçer Veri Karşılaştırması	14
Şekil 12. Tamamlayıcı Filtre ile Elde Edilen Veri	16
Şekil 13. Dorji DRF7020D RF Modülü	16
Şekil 14. Odometri Geometrisi	17
Şekil 15. Hedefe Gitme Algoritması	20
Şekil 16. Mobil Robot İlk Prototip.....	22
Şekil 17. Mobil Robot Prototip 1- Analiz Önden Görünüm	22
Şekil 18. Mobil Robot Prototip 1- Analiz Üstten Görünüm	23
Şekil 19. Ana Gövde Tasarımı	24
Şekil 20. Motor Gövde Teker Bağlantısı	24
Şekil 21. Mobil Robot Nihai Tasarım	25
Şekil 22. Mobil Robot Nihai Üretim Sonrası.....	25
Şekil 23. Şematik – Güç.....	26
Şekil 24. Şematik – Motor Sürücü	27
Şekil 25. Şematik – Mikrodenetleyici	27
Şekil 26. Baskı Devre Kartı-Tasarım	28
Şekil 27. Baskı Devre Kartı-Üç Boyutlu Görünüm	29
Şekil 28. Baskı Devre Kartı-Üretim Sonrası.....	29
Şekil 29. Açık Çevrim Sistemler.....	30
Şekil 30. Kapalı Çevrim Sistemler.....	30
Şekil 31. Klasik PID Kontrolcü-1	31
Şekil 32. Klasik PID Kontrolcü-2	31

Şekil 33. Motorların Açık Çevrim Hız Cevapları	32
Şekil 34. Motorların Açık Çevrim Pozisyon Cevapları	32
Şekil 35. Kapalı Çevrim Motor Cevabı.....	33
Şekil 36. Mobil Robot Akış ve Kontrol Şeması.....	34
Şekil 37. Nötr Kararlılık Tespiti $k_p=1$	38
Şekil 38. Nötr Kararlılık Tespiti Filtreleme Sonrası $k_p=1$	39
Şekil 39. Nötr Kararlılık Tespiti $k_p=3$	39
Şekil 40. Nötr Kararlılık Tespiti $k_p=4,5$	40
Şekil 41. Salınım Periyodunun Tayin Edilmesi 1	40
Şekil 42. Parametrelerin Belirlenmesi 1	41
Şekil 43. Ziegler-Nichols P kontrolcü.....	41
Şekil 44. Ziegler-Nichols PI Kontrolcü	42
Şekil 45. Ziegler-Nichols PID Kontrolcü	42
Şekil 46. Tyreus-Luyben PI Kontrolcü	43
Şekil 47. Tyreus-Luyben PID Kontrolcü	43
Şekil 48. Tyreus-Luyben PID Kontrolcü + Manuel Ayarlama	44
Şekil 49. Nötr Kararlılık Tespiti $k_p=1,7$	44
Şekil 50. Salınım Periyodunun Tayin Edilmesi 2	45
Şekil 51. Parametrelerin Belirlenmesi 2.....	45
Şekil 52. Ziegler-Nichols PI Kontrolcü	46
Şekil 53. Ziegler-Nichols PID Kontrolcü	46
Şekil 54. Tyreus-Luyben PI Kontrolcü	47
Şekil 55. Tyreus-Luyben PID Kontrolcü	47
Şekil 56. Tyreus-Luyben PID Kontrolcü + Manuel Ayarlama	48
Şekil 57. Test Düzenegi 50 Devir/Dakika.....	51
Şekil 58. 50 Devir/Dakika Çevrimiçi Manuel Parametre Belirleme.....	52
Şekil 59. %15 Eğim – Tırmanma	52
Şekil 60. Açık Çevrim 100 Devir/Dakika	53
Şekil 61. 100 Devir/Dakika %15 Eğim Tırmanma	53
Şekil 62. 1m Pozisyon Kontrolü	54
Şekil 63. 50 Devir/Dakika 1m Hız ve Pozisyon Kontrolü Zemin.....	54
Şekil 64. 50 Devir/Dakika 1m Hız ve Pozisyon Kontrolü Tırmanma	55
Şekil 65. 200 Devir/Dakika 1m Hız ve Pozisyon Kontrolü	55
Şekil 66. Klasik PID 2 m ²	58

Şekil 67. Kazanç Planlamalı Katmanlı PID 2 m ²	59
Şekil 68. Klasik PID 4 m ²	59
Şekil 69. Kazanç Planlamalı Katmanlı PID 4 m ²	60

SİMGELER DİZİNİ

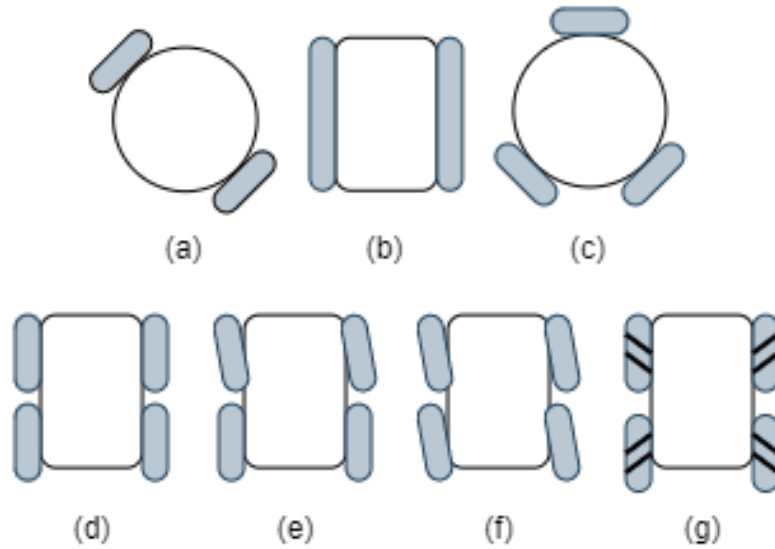
Simge	Açıklama
d	Hedef pozisyon
d_b	Mobil robotun aks uzunluğu
d_m	Mobil robot merkez noktasının kat ettiği mesafe
d_{sol}	Sol tekerleklerin kat ettiği toplam mesafe
$d_{sağ}$	Sağ tekerleklerin kat ettiği toplam mesafe
$e(t)$	Hata sinyali
k_d	Türev kazanç parametresi
k_i	İntegral kazanç parametresi
k_p	Oransal kazanç parametresi
K_u	Nötr kararlılık oransal kazancı
T_u	Nötr kararlılık salınım periyodu
$u(t)$	Kontrolcü sinyali
y	Mobil robot y-eksen konumu
y'	Mobil robot y-eksen hedef konumu
x	Mobil robot x-eksen konumu
x'	Mobil robot x-eksen hedef konumu
α	Atalet ölçüm birimi filtre katsayısı
θ_i	İvmeölçer yatay eksen yunuslama açısı
θ_f	Atalet ölçüm birimi filtrelenmiş yunuslama açısı
θ_j	Jiroskop yatay eksen yunuslama açısı
θ	Mobil Robot Yönelme Açısı
θ'	Mobil Robot hedef yönelme açısı
φ_i	İvmeölçer dikey eksen dönme açısı
φ_j	Jiroskop dikey eksen dönme açısı

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma	Açıklama
DC	Doğru Akım
V	Volt – Gerilim
A	Amper
W	Watt – Güç
PWM	Darbe Genişliği Modülasyonu
IMU	Atalet Ölçüm Birimi
AÖB	Atalet Ölçüm Birimi
RF	Radyo frekans
4WD	Dört Tekerden Tahrikli
4WDSSMR	Dört Tekerden Tahrikli Kayma Yönlendirmeli Mobil Robot
P	Oransal
PI	Oransal İntegral
PID	Oransal İntegral Türev
DD	Değişim Değişkeni
T-L	Tyreus-Luyben
Z-N	Ziegler-Nichols

1. GİRİŞ

Mobil robotların kullanımı teknolojinin gelişmesi ile beraber endüstri, keşif, tarım ve askerî alanlarda giderek yaygınlaşmaktadır. Endüstride yük taşıma, lojistik ve otomasyon uygulamaları, askerî ve keşif amaçlı alanlarda görüntü aktarımı, harita çıkarma ve istihbarat toplamada, tarımda ise çapalama ve ilaçlama gibi işleri otomatik veya kullanıcı kontrollü bir şekilde yapabilen insansız kara araçları kullanılmaya başlanmıştır. Her bir kullanım alanının kendine özgü farklılıklarının ve ihtiyaçlarının olması insansız kara araçlarında farklı konfigürasyonların kullanılmasına neden olmuştur. Gövde şekli ve yapısına ek olarak dümenleme, teker tipi, teker sayısı, paletli olması gibi farklılıklar bu konfigürasyonların temel farklarını oluşturmaktadır. Şekil 1’de yaygın olarak kullanılan mobil robot konfigürasyonlarından yedi tanesi gösterilmiştir.



Şekil 1. Mobil Robot Türleri

Şekil 1’de gösterilen mobil robotlar:

- a) İki tekerden tahrikli (diferansiyel)
- b) Paletli (diferansiyel)
- c) Üç tekerden tahrikli
- d) Dört tekerden tahrikli kayma yönlendirmeli (diferansiyel)
- e) Dört tekerden tahrikli araba benzeri yönlendirmeli
- f) Dört tekerden tahrikli bağımsız yönlendirmeli
- g) Swedish (çok yönlü) tekerlekli

Kullanım alanı ve ihtiyaca göre ortaya çıkan bu çeşitliliğe ek olarak altı ve sekiz tekerlekli ve bu tekerleklerin bağımsız yönlendirmeli çeşitleri de bulunmaktadır. Diferansiyel tahrikli mobil robotlar sağ ve sol tarafta bulunan motorların aynı hızlarda sürülmesi ile ileri veya geri, farklı hızlarda sürülmesi ile dönme hareketi yapmaktadırlar. Bu konfigürasyondaki mobil robotlar, nokta dönüşlü mobil robotlardır. Teker sayısına bağlı olarak kendi içerisinde alt konfigürasyonları bulunmaktadır. Yaygın bir şekilde kullanılan iki tekerden tahrikli diferansiyel mobil robotlar; mekanik yapı ve kontrol sistemi açısından diğer diferansiyel tahrikli robotlara göre daha basittirler. Genellikle iki aktif ve en az bir pasif tekeri bulunmaktadır. Dört tekerden tahrikli kayma yönlendirmeli mobil robotlar ise Mandow vd. (2007) yaptıkları çalışmada belirttikleri gibi iki tekerden tahrikli robotlar ile kinematik açıdan benzerlik göstermektedirler. Bu robotlar diferansiyel sürüşlü mobil robotlar kategorisinde yer almaktadır (Mandow vd., 2007). İki tekerden tahrikli mobil robotlarla kıyaslandığında yük taşıma kabiliyeti ve çalışma ortamlarındaki esneklik açısından avantajlı, ancak tekerleklerin kayma sorunundan dolayı erken yıpranması, karmaşık sistem modellemesi ve güç tüketimi açısından dezavantajlıdır (Kozłowski ve Pazderski, 2004; Martínez vd., 2005; Wang vd., 2015). Dört tekerden tahrikli araba benzeri ve bağımsız yönlendirmeli mobil robotlar ise kayma yönlendirmeli mobil robotlar ile aynı avantajlara sahip olmalarının yanı sıra yönlendirmenin ek eyleyiciler ile yapılmasının getirdiği kayma bağımsız yönelme avantajına da sahiptirler. Ancak bu konfigürasyonlarda yönlendirme için ek eyleyicilere ihtiyaç duyulması, kontrol sistemini karmaşık hâle getirmesi, güç tüketimini arttırması ve ek programlama gerektirmesinden dolayı dezavantajlıdır. Ayrıca tekerlekli mobil robotların hepsi engebeli arazi, rampa yukarı hareket ve kaygan zeminlerde kayma sorunu yaşar ve pozisyon doğruluğunu koruyarak hareket edemeyebilirler. Bu durum tekerlekli mobil robotların en büyük dezavantajı olarak bilinmektedir (Soffar, 2019).

Birbirlerine nazaran avantaj ve dezavantajları bulunan mobil robot konfigürasyonları araştırmacıların dikkatini çekmiş, farklı metotlar ve stratejiler izleyerek hız ve pozisyon kontrolünde doğruluğu ve hassasiyeti arttırmak için çalışmalar yapılmıştır.

Borenstein ve Feng (1996), mobil robotlarda pozisyon kontrolünü yapabilmek için enkoder verilerini ve jiroskop sensöründen elde ettikleri verileri birleştirerek “gyrodometry” adını verdikleri algoritmayı geliştirmişlerdir. Çalışmalarında mobil

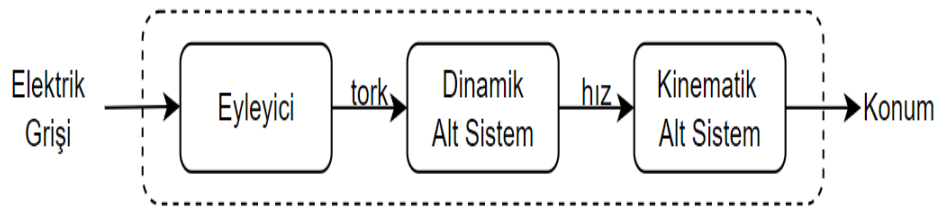
robotlarda sık karşılaşılan sorunları sistematik ve sistematik olmayan hatalar başlıkları altında iki grupta toplamışlardır. Sistematik hatalar aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir.

- teker çaplarının eşit olmaması,
- teker çaplarının ortalamasının nominal değerden farklı olması,
- noktasal olmayan teker-yer temasından dolayı teker açıklığındaki belirsizlik ve
- sınırlı enkoder çözünürlüğü ve
- sınırlı enkoder örnekleme zamanıdır.

Sistematik olmayan hatalar ise

- düzensiz zemin üzerinde hareket etme,
- beklenmedik nesnelere üzerinden hareket etme ve
- teker kayması sorunudur (J. Borenstein ve Feng, 1996).

Kozłowski ve Pazderski (2004), mobil robot üzerine yapılan araştırmaların bir çoğunun güzergâh belirlenmesi üzerine olduğu ve kayma probleminin pratik uygulamalarda sorunlar oluşturacağını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada mobil robot hareketinin Şekil 2’de gösterildiği gibi alt bileşenlerden oluştuğunu belirtmişlerdir. Robot üzerinde bulunan eyleyicilere uygulanan gerilimle robotun alt sistemlerinin etkileşmesi ve bu etkileşim ile robotun konumunda değişiklik olmaktadır.



Şekil 2. Mobil Robot Hareketini Oluşturan Alt Bileşenler

(Kaynak: Kozłowski ve Pazderski, 2004)

Bu araştırma grubu çalışmalarında dört tekerden tahrikli mobil robotu mekanik bağlantı ile diferansiyel sürürlü hâle getirip kinematik ve dinamik kontrolcüler üzerine çalışmışlardır (Kozłowski ve Pazderski, 2004).

Mandow vd. (2007), yaptıkları çalışmada iki, dört, altı tekerli ve paletli robotların, bağımsız dümenleme mekanizmasına sahip olmadıkları durumlarda kinematik açıdan benzetim yapılabileceğini vurgulamışlardır. Deneysel kinematik kontrolcü üzerine çalışmalar yapan araştırmacılar; test ve ölçüm için harici küresel pozisyonlama sistemini (GPS) kullanmışlardır (Mandow vd., 2007).

Yi vd. (2009), çalışmalarında karmaşık teker/zemin etkileşimleri ve kinematik kısıtlamalardan dolayı dört tekerden tahrikli mobil robotlarda kesin bir kinematik ve dinamik model oluşturmanın zor olduğunu vurgulayıp, mobil robotlarda meydana gelen kayma sorununu tespit edebilmek için ivmeölçer sensöründen faydalanmışlar ve atalet ölçüm birimi tabanlı hareket planlama algoritması geliştirmişlerdir (Yi vd., 2009).

Wang vd. (2015), yaptıkları çalışma kapsamında dört tekerden tahrikli diferansiyel sürürlü mobil robota yerleştirilen lazer sensörünü referans olarak kullanıp dönüş çaplarında doğruluğu arttırmak için çalışmalar yapmışlardır. Kayma sorunundan dolayı kinematik kontrolcülerin tek başına yetersiz kalacağı vurgulanan çalışmada, geliştirdikleri kontrol algoritması ile pozisyon doğruluğunu arttırmışlardır (Wang vd., 2015).

Orman vd. (2016) yaptıkları çalışmada, dört tekerden tahrikli kayma yönlendirmeli mobil robotun hız ve yönelme açısının doğruluğunu arttırabilmek için kesir dereceli oransal-integral (FOPI) kontrolcü tasarlayıp sonuçlarını; klasik oransal-integral (PI) kontrolcü ile kıyaslamışlardır. Tasarladıkları FOPI kontrolcü ile klasik PI kontrolcü kıyaslandığında daha düşük kalıcı durum ve hız hatasına sahip sonuçlar elde etmişlerdir (Orman vd., 2016).

Konu ile ilgili çalışan araştırma grupları genellikle tespit edilen ve/veya ettikleri sorunlara dikkat çekerek, uyguladıkları çözüm ve yöntemleri açıklamışlardır. Borenstein ve Feng (1996) tarafından yapılan çalışmada belirtilen sistematik ve sistematik olmayan hatalara ek olarak mobil robot üzerine yapılan diğer çalışmalarda belirtilen başka bir konu ise kinematik ve dinamik kontrolcülerin düzgün bir şekilde çalışması için kabul edilmesi gereken varsayımların olmasıdır (Wang vd., 2015). Bu varsayımlar;

- Robotun ağırlık merkezi, robotun geometrik merkezindedir.

- Robot düz bir zemin üzerinde hareket etmekte ve dört teker yere eşit bir şekilde temas etmektedir.
- Sağ ve sol tarafta bulunan motorlar eşit hızlarda dönmektedirler.
- Tekerlekler kayma hareketi olmaksızın dönmektedirler.

Ancak bu varsayımlar teorik ve benzetim tabanlı uygulamalar için geçerlidir. Gerçek uygulamada geçerliliğini yitirmektedir. Bu nedenle kinematik ve dinamik çalışmalar yapılmadan önce bu sorunların çözülmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında yukarıda listelenen varsayımlar üzerine yoğunlaşarak dört tekerden tahrikli kayma yönlendirmeli mobil robot tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. Hassas hız ve pozisyon kontrolü üzerine yoğunlaşmıştır. Mobil robotun doğru boyunca hareket (sonsuz çap) ve nokta dönüşlerindeki doğruluğunu arttırmak için tahrik elemanı olarak kullanılan doğru akım (DC) motorların istenen hız ve/veya pozisyon değerini en doğru şekilde takip etmesi gerekmektedir. Burada karşılaşılan sorun ise motorların redüktörlerindeki öngörülemeyen yıpranma ve elektriksel bağlantıdaki endüktans ve iç direnç değerlerinin değişmesi ve buna bağlı olarak motorun matematiksel modelinin değişmesidir. Bu durum sistemin matematiksel modellemesinde belirsizlik oluşturmaya ek olarak, aynı girdi ile kontrol edilen iki motorun farklı cevaplar vermesine de neden olmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda tespit edilen bir diğer sorun ise motorların farklı hız girdilerinde aynı kontrolcü parametreleriyle aynı doğruluğu vermemesi ve mobil robotun hız ve pozisyon değerlerinde sapmalara sebep olmasıdır.

Literatürde bahsedilen ve tespit edilen 1) kayma, 2) aynı girdi ile sürülen motorların farklı hızlarda dönmesi ve 3) farklı hız/yön komutlarında tek bir kontrolcü parametre grubunun mobil robotun doğruluğunu koruyamaması sorunlarına çözüm aranmıştır.

Kayma sorununun giderilmesi iki ve üçüncü maddelere bağlı olduğundan bu konulardaki çözümler kayma sorununda iyileşme sağlamaktadır. Mobil robotta bulunan motorların aynı girdide farklı hızlarda dönmesi sorununa çözüm olarak katmanlı PID kontrolcü algoritması uygulanmıştır. Bu sayede pozisyon kontrolüne ek hız denetim mekanizması oluşturulmuştur. Pozisyon ve hız kontrolü birbirinden bağımsız hâle getirilmiştir. Farklı hız ve yön girdilerinde oluştuğu gözlemlenen kararsızlık sorununa ise kazanç planlama algoritması uygulanmıştır. Mikrodenetleyicinin farklı hız/yön girdilerinde önceden

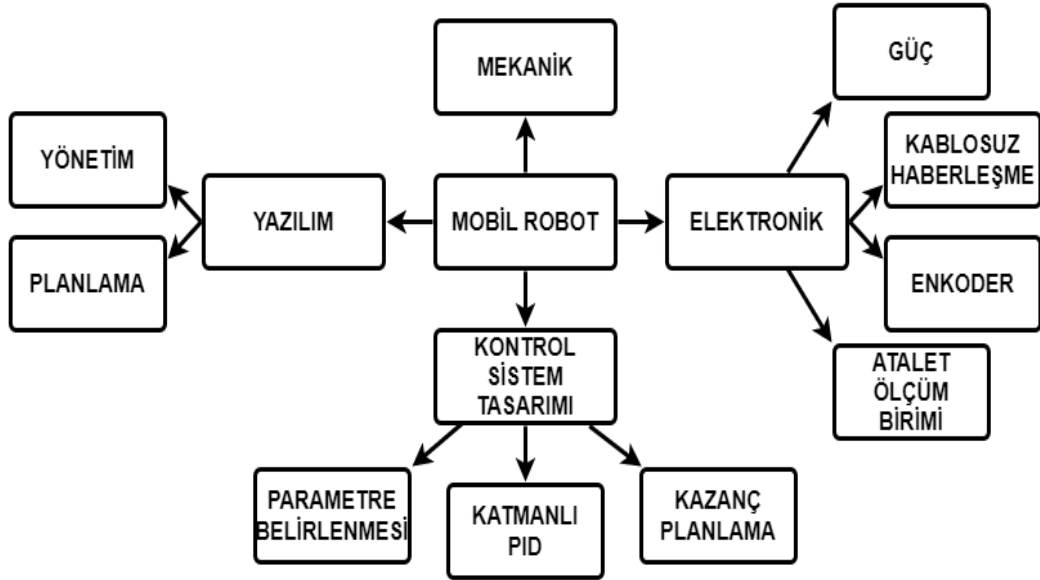
belirlenen uygun parametre setine geçiş yapması ve robotun doğruluğu koruması sağlanmıştır. Bu algoritma sayesinde çalışma koşullarında esneklik oluşturulmuştur.

Gözlemlenen sorunlara çözüm bulmak ve mobil robotun hız ve pozisyon doğruluğunu arttırmak için kazanç planlamalı katmanlı oransal – integral – türev (PID) kontrolcü tasarlanmış elde edilen sonuçlar klasik PID kontrolcü ile karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci bölümü olan Materyal ve Yöntem başlığı altında kullanılan ekipman ve algoritmalar, mobil robot tasarımı ve kontrol sistem tasarımı incelenmiştir. Üçüncü bölümde deneysel sonuçlar verilmiştir. Son bölümünde ise tez çalışmasının sonucu sunulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Mühendislik bakış açısıyla incelendiği zaman robotik uygulamalar; mekanik tasarım, sayısal elektronik, güç elektroniği, kablosuz haberleşme, kontrol sistem tasarımı gibi konuları içermektedir. Disiplinler arası yapıya sahip olması nedeniyle farklı alanlardaki çalışma grupları, mobil robot alanında değişik bakış açılarıyla çalışmalar yapmaktadırlar. Yapılan çalışmalarda araştırmacıların büyük bir bölümü mobil robotun alt bileşenlerinden bir tanesine odaklanıp, çalıştıkları alanda yeni metotlar ve çözümler geliştirmişlerdir. Bu tez çalışmasının odak noktası ise hız ve pozisyonda doğruluğu arttırmak olduğu için robotun anlık konum ve hız bilgisini takip edebilmek için sensör verilerinin okunması, kontrol sistem tasarımı ve uygulamanın gerçekleştiği yazılıma odaklanılmıştır. Çalışma kapsamında tasarlanan mobil robot temelde; 1) mekanik, 2) elektronik, 3) yazılım ve 4) kontrol sistem tasarımı olarak dört ana başlıktan oluşmaktadır. Her bir alt başlık kendi içerisinde farklı konular içermektedir ve diğer alt başlıklarla etkileşim hâlinde çalışmaktadır. Şekil 3'te gerçekleştirilen mobil robotun ana bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Sistemi Oluşturan Ana Bileşenler

Çalışma kapsamında tasarlanıp gerçekleştirilen mobil robotun mekanik ve elektronik tasarımı, robot üzerinde bulunan sensörler ve haberleşme modüllerinin kullanımı ve filtrelenmesi, kontrol sistem tasarımı ile alakalı yapılan çalışmalar alt başlıklar hâlinde açıklanmıştır.

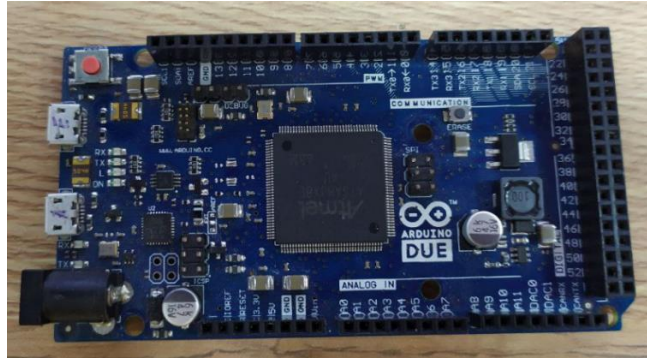
2.1. Kullanılan Ekipman ve Algoritmalar

2.1.1. Mikrodenetleyici

Mobil robotun gerçekleştirmesi gereken yönetim, planlama ve kontrol görevleri bulunmaktadır. Bu görevler;

- Kablosuz haberleşmeden gelen verilerin okunması,
- Atalet ölçüm birimi ve enkoder sensörlerinin okunup, filtrelenip anlamlı ve kullanışlı veriler elde edilmesi,
- Anlık pozisyon ve hız verilerinin elde edilmesi,
- Gelen hedef pozisyon bilgisi doğrultusunda uygun hızda uygun pozisyona gitmek için gerekli hesaplamaların yapılması,
- Motorların sürülmesi ve
- Kullanıcıya istenen verilerin kablosuz iletilmesi şeklinde sıralanabilir.

Bu görevlerin yerine getirilebilmesi için mikrodenetleyiciler kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında bahsedilen görevlerin icra edilmesi için üzerinde ATSAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU bulunduran 32 bitlik ARM destekli Arduino Due kartı kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Arduino Due Kartı

Arduino Due kartının özellikleri:

- Çalışma gerilimi: +3,3V DC, besleme gerilimi: 7 – 12V DC
- Sayısal giriş çıkış pin sayısı: 54 (12 tanesi PWM çıkış)
- Analog giriş: 12
- Analog çıkış: 2
- Saat hızı: 84 MHz

Seçilen bu mikrodnetleyiciye alternatif olarak başka mikrodnetleyiciler de vardır. Ancak bu kartın seçilme nedenleri:

- Maliyet: Arduino kartlar ve modüller yaygın kullanıldığı için maliyet ve tedarik açısından avantaj göstermektedir.
- Açık kaynaklı geliştirme ortamı: Kullanılan mikrodnetleyicinin açık kaynaklı Arduino ailesinin bir üyesi olması, geliştirme aşamalarında karşılaşılabilecek yazılımsal ve donanımsal arızalarda hızlı ve etkin çözümler sunmaktadır.

Due kartının seçilmesinin bir diğer nedeni ise yüksek hızlı olmasına ek olarak, bütün girişlerinin kesme olarak kullanılabilmesidir. Bu sayede mobil robotun pozisyon takibi yapılırken kullanılan dört adet iki çıkışlı enkoder sensörün her birinden eş zamanlı olarak veri alınmaktadır.

Arduino Due kartının kullanılması için geliştirilen elektrik/elektronik devre şeması ve tasarlanan baskı devre kartı Elektronik Tasarım başlığı altında şekilde açıklanmıştır.

2.1.2. Motor ve Motor Sürücüler

Gerçekleştirilen mobil robotta teker hareketlerini sağlamak amacıyla dört adet redüktörlü fırçalı DC motor kullanılmıştır. Hızlı kalkış/duruş, kolay yön değişimi, değişken hızlarda kontrol edilebilirlik ve yüksek kalkış torku gibi özelliklere sahip olan DC motorlar; robotik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar (MET Motors, 2016; Motion Control Online Marketin Team, 2019).

Kullanılan DC motorların (Şekil 5) teknik özellikleri:

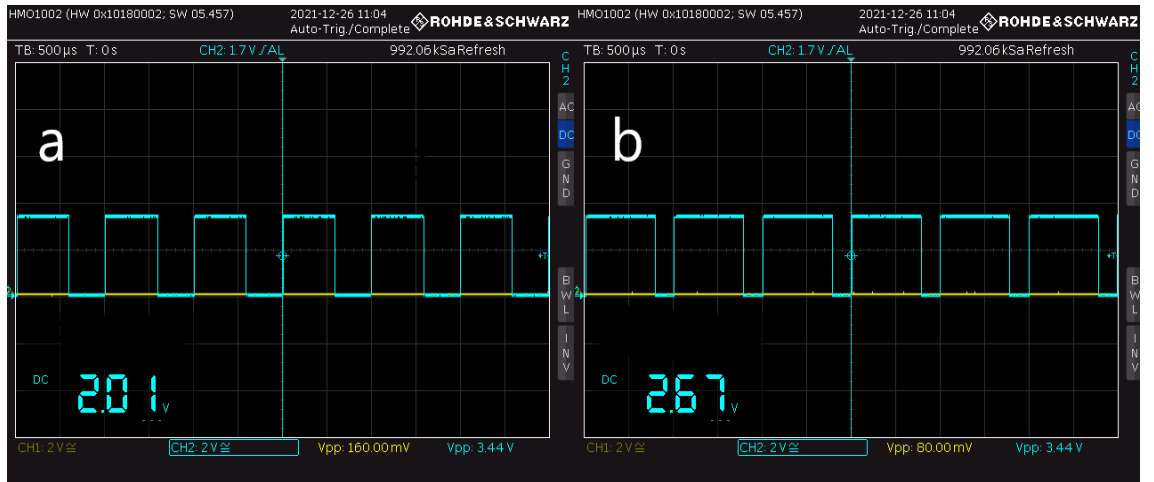
- Çalışma gerilimi: 24 V DC
- Güç: 100 W
- Nominal tork: 3 Nm
- 1/15 Redüktör oranı
- 235 devir/dakika
- 100 darbe manyetik enkoder
- Kilitlenme torku: 15 Nm



Şekil 5. DC Motor

Mobil robotun sağ ve sol tarafında bulunan DC motorlar ikişerli gruplar hâlinde birbirlerine paralel olarak bağlanmıştır. Bu sayede mobil robot kayma yönlendirmeli mobil robot hâline getirilmiştir.

Mobil robotta kullanılan motorların hızlarında değişiklik yapabilmek için motora uygulanan gerilim değerinde de değişiklik olması gerekmektedir. Bunu yapabilmek için motorlara uygulanan gerilime anahtarlama yapılmaktadır. Yapılan anahtarlama ile uygulanan sinyalin/gerilimin açık ve kapalı kalma süreleri değiştirilerek, motora uygulanan ortalama gerilim değeri değiştirilebilmektedir. Bu yöntem darbe genişliği modülasyonu (PWM, Pulse Width Modulation) olarak adlandırılmaktadır (Agung vd., 2014). Şekil 6'da Arduino Due kartından üretilen PWM sinyalleri gösterilmiştir. Şekil 6 a'da elden edilen ortalama gerilim değeri 2,01 V iken sinyalin açık kalma süresi arttırıldığında b'de görüldüğü gibi elde edilen ortalama gerilim değeri 2,67 V olmuştur. Gerekli hesaplamalar sonucunda mikrodenetleyici tarafından üretilen PWM sinyallerinin motor sürücü modüllerine aktarılması ile DC motorların hız ve pozisyon kontrolü yapılmaktadır.



Şekil 6. PWM Sinyali

Mikrodenetleyici tarafından üretilen PWM sinyalleri ile motorları kontrol edebilmek için iki adet IBT-2 DC motor sürücü modül (Şekil 7) kullanılmıştır. IBT-2 modülünde iki adet BTS7960B yüksek akım yarım köprü entegre (2x (high side-low side): H-Bridge) bulunmaktadır.



Şekil 7. Motor Sürücü IBT-2 Modülü

IBT-2 motor sürücü modülünün teknik özellikleri:

- Çalışma gerilimi: 5 – 27 V
- PWM ile motor hız kontrolü
- Maksimum akım: 30 A
- Akım ölçümü
- Aşırı ısınma – aşırı gerilim korumaları

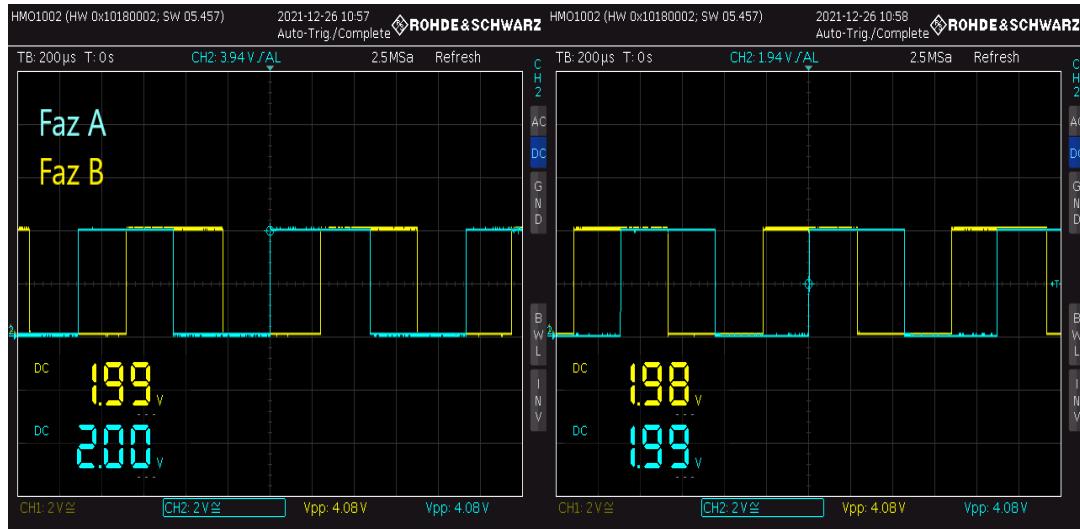
2.1.3. Enkoder

Mobil robotun hız ve pozisyon kontrolünün yapılabilmesi için motorların shaft hızı, shaft pozisyonu ve dönüş yönü bilgilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu işin yapılabilmesi için enkoder sensörler kullanılmıştır. Enkoder sensörler bir nesnenin fiziksel olarak dönüşünü ölçerek elektriksel sinyal olarak aktaran elemanlardır. Tasarımda mekanik, optik, manyetik ve elektromanyetik olmak üzere dört enkoder tipinden birisini kullanma imkânı bulunmaktadır. Çalışma kapsamında motorlarda dahil olarak bulunan devir başına 100 darbe üreten çift çıkışlı manyetik enkoder sensörler kullanılmıştır. Motorun hareket eden bölümü olan rotor dönmeye başladığında rotora sabitlenen mıknatıstan dolayı oluşan manyetik alan dağılımı da değişmektedir. Bu değişimi ölçen manyetik alan sensörü (Hall sensörü) sayesinde, rotor hareketinin bileşenleri olan hız, yön ve pozisyon bilgileri elde edilir (Asai Kasei Microdevices Corp., 2022).

Hız ve pozisyon kontrolünde doğruluğu arttırabilmek için enkoder sensör verilerinin eksiksiz ve doğru bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir. Eksik sensör okumaları mobil

robot pozisyon takibinde hatalı sonuçlara neden olmaktadır. Enkoder sensör verilerinin mikrodenetleyici tarafından verimli ve eksiksiz bir şekilde okunabilmesi için kesme (interrupt) adı verilen özel bir yöntem kullanılmaktadır. Kesme ile takibi yapılan girişlerde, sinyallerde gerçekleşen değişiklik mikrodenetleyici tarafında öncelikli işlem olarak ele alınmaktadır. Yazılımsal olarak incelendiğinde, sensör verilerinin hangi durumda kesme rutinine dahil edileceğini tayin etmek mümkündür. Bahsedilen durumlar sensör tarafından üretilen sinyalin mantık sıfır, yükselen kenar tetikleme, mantık bir, düşen kenar tetikleme ve değişim durumlarıdır. Geliştirilen algorithmada kesme rutini değişim durumuna atanmış, sensör tarafından üretilen darbenin hem yükselen hem düşen kenar tetikleme takip edilmiştir. Bu sayede shaft devri başına 100 darbe üreten enkoder sensör, değişim durumunda 200 kesme tetikleme göndermektedir. Kullanılan DC motorların redüktör oranı 1/15 olduğu için toplamda devir başına 3000 kesme tetiklenmesinin takibi mikrodenetleyici tarafından yapılmaktadır.

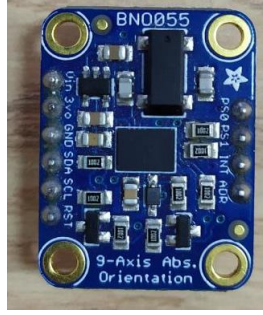
Kullanılan motorların hızları, enkoder verisinin güncel ve bir önceki örnekleme zamanına ait kaydedilen verisi ile kıyaslanarak tespit edilmektedir. Çalışma kapsamında hassasiyeti arttırmak amacıyla örnekleme zaman aralığı 20 ms seçilmiştir. Bir saniye içerisinde sensörlerden elli adet veri okunmaktadır. Motorun dönüş yönünü tespit etmek için iki çıkışlı enkoder sensör tarafından üretilen sinyallerin çıkış sıralaması takip edilmiştir. Enkoder sensörün çıkışları A kanalı ve B kanalı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 8’de gösterildiği gibi A kanalının öncülük ettiği ölçümlerde motor saat yönünde, B kanalının öncülük ettiği ölçümlerde ise motor saat yönü tersinde hareket etmektedir.



Şekil 8. Enkoder Sensör Çıkışları

2.1.4. Atalet Ölçüm Birimi

Pozisyon hassasiyetini arttırmak için mobil robotun 1) dönüş açılarını, 2) güzergâhtan sapmasını tespit etmek ve 3) üzerinde hareket ettiği zeminin durumu hakkında bilgi toplanması gerekmektedir. Bu bilgilerin toplanabilmesi için içerisinde farklı sensörler bulunduran atalet ölçüm birimi (IMU, Inertial Measurement Unit) kullanılmıştır. Şekil 9’da çalışmada kullanılan Bosch firmasına ait BNO055 atalet ölçüm birimi gösterilmiştir.



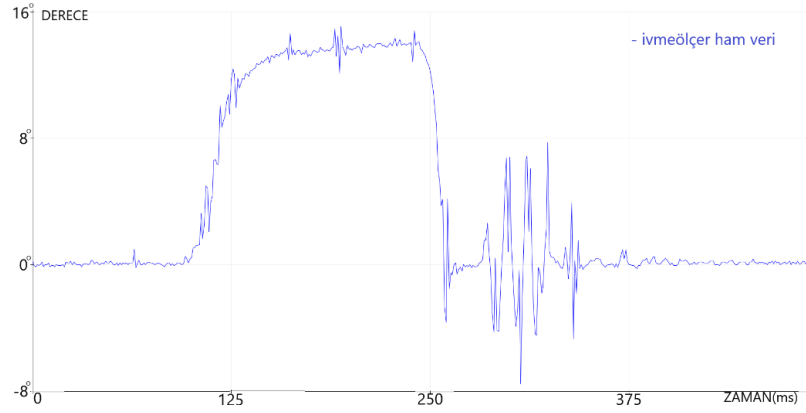
Şekil 9. Atalet Ölçüm Birimi

Atalet ölçüm biriminin içerisinde üç eksen ivmeölçer, üç eksen jiroskop ve üç eksen manyetik sensör bulunmaktadır. Buna ek olarak kullanılan atalet ölçüm birimi tümleşik bir birim olduğundan; Euler açıları, kuaterniyon ve rotasyon vektörü verilerini doğrudan verebilmektedir. Çalışma kapsamında bu verilerden Euler açı verileri yönelme açısını tespit etmek için kullanılmıştır. Atalet ölçüm birimi üzerinde bulunan ivmeölçer ve jiroskop sensörleri sayesinde, mobil robotun boylamsal ekseninde yaptığı yalpa, yatay ekseninde yaptığı yunuslama (Θ) ve dikey ekseninde yaptığı dönme (Φ) hareketleri ölçülebilmektedir (Samancı B., 2011). Yalpa ve yunuslama açılarının daha doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için jiroskop ve ivmeölçer sensör verileri birleştirilerek kullanılmıştır.

İvmeölçer sensörden elde edilen veriler: $a = [a_x, a_y, a_z]$ m/s² şeklinde gösterilmektedir. İvmeölçer verisini açıya dönüştürmek için ise Denklem 1’de verilen formüller kullanılmıştır.

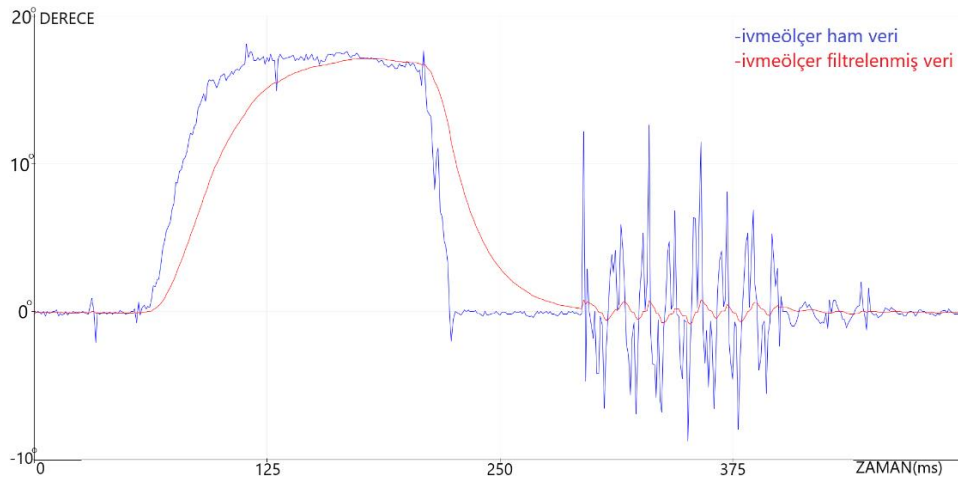
$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{a_x/9,8}{a_z/9,8}\right), \quad \varphi_i = \tan^{-1}\left(\frac{a_y/9,8}{a_z/9,8}\right) \quad (1)$$

Şekil 10’da bir test düzeneği üzerine bağlanan atalet ölçüm birimi üzerinden ivmeölçer verileri okunmuştur.



Şekil 10. İvmeölçer Ham Sensör Verisi

İvmeölçer sensörü 15° x-ekseninde yukarı kaldırılıp bırakılarak test edilmiştir. Şekil 10’da görüldüğü gibi ivmeölçer sensörler titreşim ve sarsıntıdan kolay etkilenebilmektedirler. İvmelenme üzerinden açı hesabı yapıldığı için ivmeölçer sensöründen okunan veriler yalnızca sensör durağan hâldeyken doğru sonuç vermektedir. Hareket hâlinde oluşan titreşim ve sarsıntı, sensör verisinde gürültü oluşturmaktadır. Bu durum ivmeölçer sensör çıkışlarının filtrelenmeden doğrudan mobil robota uygulanmasını mümkün kılmamaktadır. İvmeölçer sensörün verimli bir şekilde kullanılması için tasarlanan filtre, sensörden alınan bir önceki verinin %95’i, anlık okunan verinin ise %5’inin toplanması algoritması ile çalışmaktadır. Bu sayede anlık gürültü kaynaklarından gelen etkiler minimize edilmiştir. Bu oranlar deneysel çalışmalar sonunda bu şekilde optimize edilmiştir. Şekil 11’de filtrelenmiş ivmeölçer sensör verisi gösterilmektedir.



Şekil 11. İvmeölçer Veri Karşılaştırması

Jiroskop sensöründen elde edilen açısal hız verileri ise: $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ rad/s şeklinde gösterilmektedir. Jiroskop sensör verisini açığa dönüştürmek için Denklem 2’de verilen formüller kullanılmıştır.

$$\theta_j = \theta_j + \omega_x \cdot d_t, \varphi_j = \varphi_j + \omega_y \cdot d_t \quad (2)$$

Jiroskop sensör, ivmeölçer sensörden farklı olarak sarsıntı ve titreşim gibi gürültü kaynaklarından etkilenmemektedir. Ancak filtresiz ham jiroskop verisinde düzensiz sapmalar gözlemlenmektedir.

Bu bilgiler doğrultusunda ivmeölçer sensörünün uzun süreli kullanımlarda, jiroskop sensörünün ise kısa süreli kullanımlarda daha başarılı olduğu çıkarımı yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında sensörlerin sapma ve gürültüden etkilenmelerini azaltmak, güvenilir, tutarlı ve doğru veriler elde edebilmek için sensör füzyon algoritmalarından biri olan tamamlayıcı filtre kullanılmıştır. Tamamlayıcı filtrenin matematiksel ifadesi Denklem 3’te gösterilmiştir (Hajdu vd., 2017).

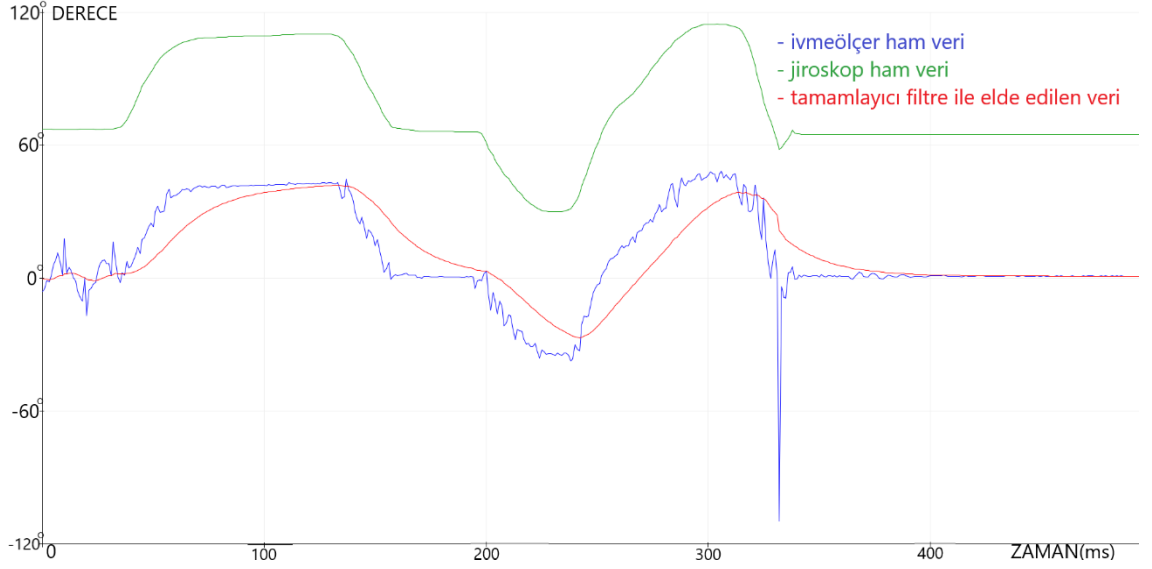
$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{a_x/9,8}{a_z/9,8}\right)$$

$$\theta_j = \theta_j + \omega_x \cdot d_t \quad (3)$$

$$\theta_f = [\theta_j + \omega_x \cdot d_t] \cdot [1 - \alpha] + \theta_i[\alpha] \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

Denklemden gösterilen d_t sensör okumaları arasında geçen zamanın saniye olarak karşılığını, α ise ampirik yöntemlerle belirlenen katsayıyı ifade etmektedir ve 0’a yakın seçilmektedir.

Denklemden yatay ekseninde yapılan yunuslama (θ) hareketi için işleyiş gösterilmiştir. Dikey ekseninde yapılan dönme (φ) hareketi için de aynı prosedür işlemektedir. Bu sayede ivmeölçer sensörün titreşim ve sarsıntı kaynaklı gürültü sorunu ve jiroskop sensörünün belirsiz kayma sorunu azaltılmıştır. Şekil 12’de sensörlerden alınan verilerin filtre uygulanmamış ham hâli ve tamamlayıcı filtre uygulanmış verileri gösterilmiştir.



Şekil 12. Tamamlayıcı Filtre ile Elde Edilen Veri

2.1.5. RF Haberleşme

Mobil robot ile bilgisayar arasında bilgi-komut akışını sağlamak amacıyla radyo frekans (RF) modülü kullanılmıştır. Şekil 13'te gösterilen Dorji firmasına ait DRF7020D20 alıcı-verici modülünün teknik özellikleri:

- 433 MHz frekans bandı
- 20 dBm maksimum çıkış gücü
- Ayarlanabilir veri iletişim hızı (Baud rate)
- Bekleme durumunda çekilen akım $<5 \mu\text{A}$
- Çalışma gerilimi 3,4-5,5 V



Şekil 13. Dorji DRF7020D RF Modülü

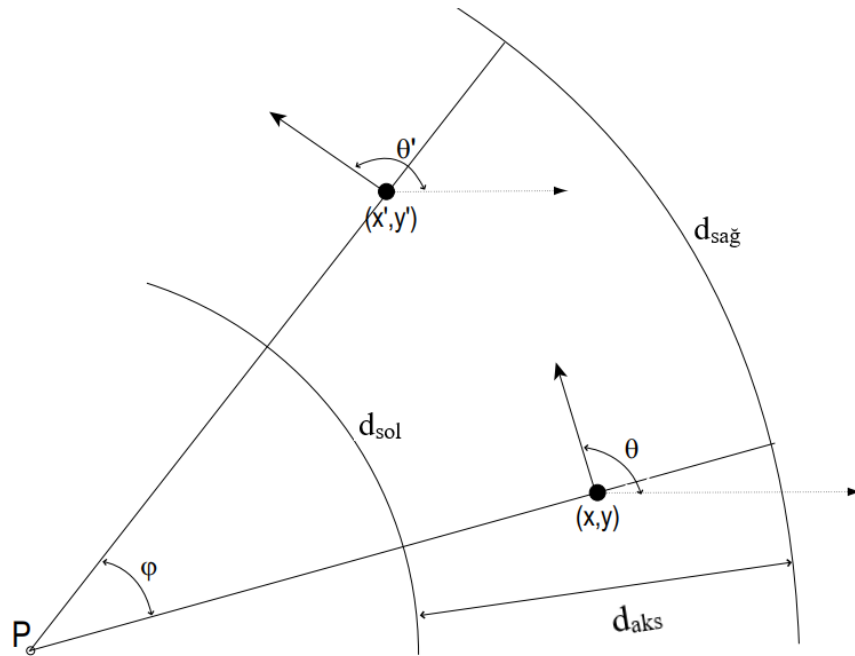
RF ile haberleşme yapılırken veri aktarımı esnasında gönderilen verilerde mesafe gibi etkenlere bağlı olan bozulmalar meydana gelebilmektedir. Çalışmada verilerin doğruluğundan emin olmak amacıyla iki aşamalı doğrulama mekanizması

kurgulanmıştır. İlk aşamada gönderilen veri paketinin başına ve sonuna istenilen bir tanımlayıcı karakter eklenmektedir. Alıcı tarafa veri ulaştığında ilk olarak veri paketi ayrıştırılır ve belirlenen tanımlayıcı karakterlerin doğruluğu test edilmektedir. İkinci aşamada ise gelen verinin geliş zamanı takip edilerek, veri paketinin güncelliği kontrol edilmektedir. 200 ms süre sınırını aşan veri paketleri işleme alınmamaktadır.

2.1.6. Odometri

Odometri, hareket sensörlerinden elde edilen veriler doğrultusunda pozisyondaki değişimin zamana bağlı olarak gözlemlenmesidir. Mobil robotlarda başlangıç pozisyonunu referans alarak, robotun anlık pozisyonunun tespit edilmesinde kullanılmaktadır.

Mobil robotun uzaydaki konumu altı alt bileşen ile tanımlanmaktadır. Bunlar Kartezyen koordinatlardaki ötelenmesi (x, y, z) ve bu üç eksen etrafındaki dönüşüdür $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$. Ancak diferansiyel sürürlü mobil robotlar z ekseninde öteleme, θ_x ve θ_y eksenlerinde dönme hareketi yapmamaktadır. Buradan yola çıkarak, mobil robotun pozisyonunu (x, y, θ_z) olarak tanımlamak mümkündür.



Şekil 14. Odometri Geometrisi

(Kaynak: Olson, 2004)

Şekil 14'te gösterilen d_{sol} sol tekerin kat ettiği mesafeyi, $d_{sağ}$ sağ tekerin kat ettiği mesafeyi, d_{aks} ise sağ ve sol tarafta bulunan tekerlekler arasındaki mesafe olan tekerlek aksının uzunluğunu göstermektedir. Mobil robotun başlangıç pozisyonu (x, y, θ) , son pozisyonu ise (x', y', θ') olarak gösterilmiştir.

Mobil robotun merkez noktasının kat ettiği mesafe (d_m);

$$d_m = \frac{d_{sol} + d_{sağ}}{2} \quad (4)$$

Mobil robotun yönelme açısı (φ);

$$\varphi = \frac{d_{sağ} - d_{sol}}{d_{aks}} \quad d_{aks} = 40,5 \text{ cm ölçülmüştür.} \quad (5)$$

Mobil robotun pozisyonunu tayin etmekte kullanılan odometri denklemleri;

$$\begin{aligned} x' &= x + d_m \cos(\theta) \\ y' &= y + d_m \sin(\theta) \\ \theta' &= \varphi + \theta \end{aligned} \quad (6)$$

Odometri hesabı yapılırken kullanılan $d_{sağ}$ ve d_{sol} değerleri, motorlara bağlı enkoder sensörlerden alınmaktadır. Mobil robotun sağ ve sol taraflarında bulunan motorlar aynı sürücü ile kontrol edilmesine rağmen çıkışlarında farklılıklar görülebilmektedir. Bunun için birbirine paralel bağlı ön ve arka tarafta bulunan motorların enkoder sensör verilerinin ortalaması alınarak optimum darbe sayısı elde edilmiştir. Bölüm 2.1.3 Enkoder başlığı altında açıklandığı gibi çalışma kapsamında kullanılan enkoder sensörler, shaft devri başına 3000 darbe üretmektedirler. Bilinen/ölçülen teker çaplarını kullanarak robotun istenilen mesafeye gidebilmesi için kaç enkoder darbesine ihtiyaç duyulduğu Denklem 7'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{Teker Dönüş Sayısı} = \frac{\text{Toplam Enkoder Darbe Sayısı}}{\text{Devir Başına Darbe Sayısı}} \quad (7)$$

$$\text{Toplam Kat Edilen Mesafe} = \frac{\text{Toplam Enkoder Darbe Sayısı}}{\text{Devir Başına Darbe Sayısı}} \times 2\pi r$$

Ölçülen teker çevresi ve yarıçapları:

- Sol ön: 66,8 cm $\rightarrow 2 \times 3,1415 \times r \rightarrow r = 10,63$ cm
- Sol arka: 66,5 cm $\rightarrow 2 \times 3,1415 \times r \rightarrow r = 10,58$ cm
- Sağ ön: 66,8 cm $\rightarrow 2 \times 3,1415 \times r \rightarrow r = 10,63$ cm
- Sağ arka: 66,4 cm $\rightarrow 2 \times 3,1415 \times r \rightarrow r = 10,56$ cm

Ölçülen teker çapının ortalaması 10,6 cm referans değeri olarak alınmıştır. Denklem 7’de verildiği gibi motorlar bir metrelik mesafeyi kat ettiğinde okunması gereken enkoder darbe sayısı:

$$100 \text{ cm} = \frac{x}{3000} \times 2 \times 3,1415 \times 10,6 \quad x \cong 4504 \text{ Enkoder Darbesi}$$

Robot üzerinde yapılan kalibrasyon testlerinde ise bir metrelik mesafe için 4630 enkoder darbe sayısı ölçülmüştür. Referans olarak 4600 enkoder darbe ölçümü kullanılmış ve pratikte verimli sonuçlar alınmıştır.

Mobil robotun nokta dönüşlerinde ise, 1° dönüş için gerekli olan enkoder darbe sayısının hesaplanması ve testler ile kalibre edilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen mobil robot konfigürasyonunda nokta dönüşü motorların farklı yönlerde eşit hızlarda sürülmesi ile gerçekleşmektedir. Bu doğrultuda 360° dönüş esnasında her bir tekerin kat etmesi gereken mesafe ve enkoder darbe sayısı;

$$2 \times \pi \times \frac{\text{Aks Uzunluğu}}{2} = 2 \times 3,1415 \times \frac{40,5}{2} = 127,23 \text{ cm}$$
$$\frac{127,23}{66,6} = 1,91 \text{ m} \quad (8)$$

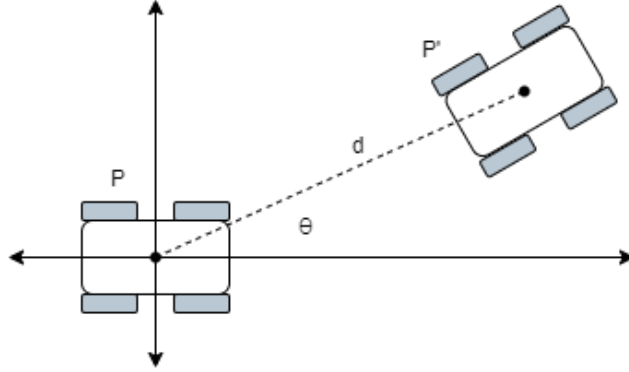
$$360^\circ \text{ için } 1,91 \times 4600 = 8736 \text{ Enkoder darbesi}$$

$$1^\circ \text{ için } 8736 / 360^\circ \cong 24 \text{ Enkoder darbesi}$$

Robot üzerinde yapılan kalibrasyon testlerinde bir derecelik dönüş için 28 enkoder darbe sayısı ölçülmüştür. Referans değer olarak kullanılmıştır (Dudek ve Jenkin, t.y.; Olson, 2004).

2.1.7. Hedefe Gitme Algoritması

Mobil robotun anlık pozisyonu odometri algoritması ile hesaplandıktan sonra hedef noktaya gidebilmesi için gerekli olan yönelme açısı ve ilerleme mesafesinin hesaplanması gerekmektedir. Şekil 15'te gösterilen P noktası (x, y, θ) , P' noktası (x', y', θ') noktalarını göstermektedir.



Şekil 15. Hedefe Gitme Algoritması

Buradan hareketle mobil robotun yönelmesi gereken açı θ ve ilerlemesi gereken mesafe d , Denklem 9'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$d = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}$$
$$\theta = \tan^{-1} \frac{(y' - y)}{(x' - x)} \quad (9)$$

Robotun bulunduğu noktada yönelme açısında değişme olmadan ilerlemesi gerektiği durumlarda, hedef y konumu ile güncel y konumunun veya hedef x konumu ile güncel x konumunun eşit olması gerekmektedir. Bu durumda pay veya paydanın sıfıra eşit olması belirsizliği ortaya çıkmaktadır. Sorunun çözülmesine yönelik olarak geliştirilen algoritma ve hesap edilen θ değeri ise aşağıda belirtildiği şekildedir;

- Pay sıfır ise
 - $x' > x$: Hedef $\theta = 0^\circ$
 - $x > x'$: Hedef $\theta = 180^\circ$
- Payda sıfır ise
 - $y' > y$: Hedef $\theta = 90^\circ$
 - $y > y'$: Hedef $\theta = 270^\circ$

2.2. Mobil Robot Tasarımı

Bu başlık altında tasarlanan dört tekerden tahrikli kayma yönlendirmeli mobil robotun mekanik ve elektronik tasarımı anlatılmıştır. Mobil robot tasarımı yapılırken kullanılan ürünler alternatif ürünlerle maliyet ve performans kıyaslamaları yapılarak seçilmiştir. Tasarım için optimum çözüm hedeflenmiştir.

Mobil robot tasarımında, firmalar ve araştırmacılar tarafından tasarlanan mobil robotlar incelenerek yola çıkılmıştır. Dört tekerden tahrikli mobil robotlar mekanik açıdan basit bir yapıya sahiptirler. Araştırmalar sonucundan bulunan mobil robotlardan üç tanesi Tablo 1’de verilerek çalışma kapsamında geliştirilen mobil robot ile kıyaslanmıştır.

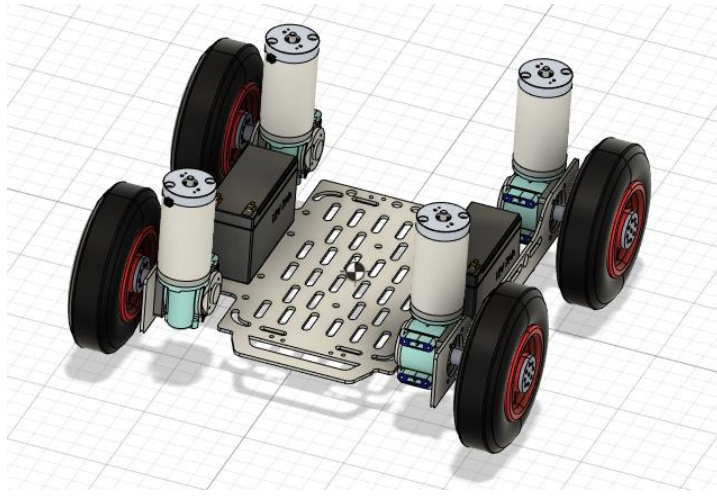
Tablo 1. Benzer 4WD Robotların Kıyaslanması

				
	Pioneer 3-AT	Dr. Robot Jaguar	Seekur Jr	Robot
UxGxY(mm)	500x490x260	570x530x255	1198x835x494	520x460x250
Ağırlık	12	19.5	77	13
Teker Çapı	200	-	406	200
Batarya	12V, 7Ah	22.2V 10Ah LiPo	3x24V NiMH	24V, 7Ah
Hız (m/s)	0.8	4.15	1.2	2.3
Sensörler	Ultrasonik Lazer Tarayıcı	Kamera GPS AÖB	LiDAR Kamera AÖB	AÖB
Maliyet	10500\$	8000\$	8000\$	~5000 ₺

(Kaynak: Gönüllü, 2013)

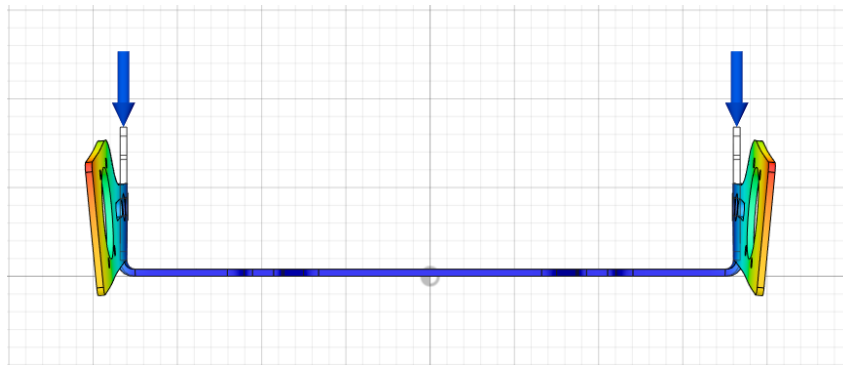
2.2.1. Mekanik Tasarım

Mobil robotun ana gövdesi tasarlanırken, arıza durumlarında hızlı müdahaleye imkân sağlayacak yapıda modüler olması ve sarsıntı/devrilme gibi durumlara karşı mekanik olarak mukavemetli olması hedeflenmiştir. Mobil robot geliştirilirken iki farklı prototip tasarım aşamasından geçilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan ilk prototip Şekil 16’da gösterilmiştir. Bu prototip; gerçekleştirme, taşıma ve müdahale kolaylığı göz önüne alınarak açık şase şeklinde tasarlanmıştır.

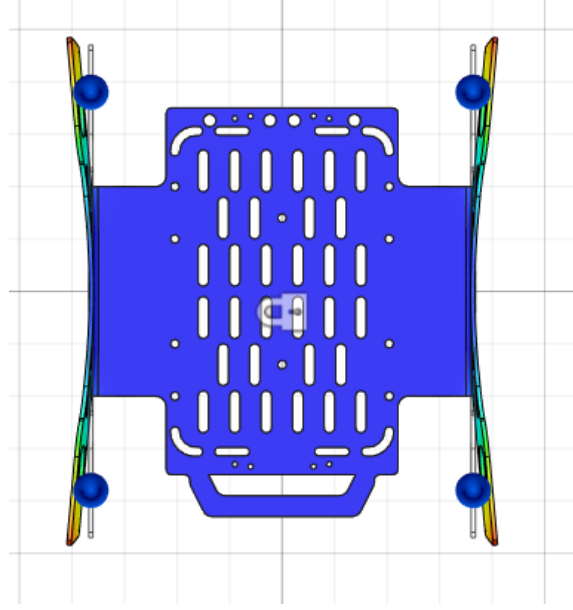


Şekil 16. Mobil Robot İlk Prototip

Ancak uzun süreli kullanım sonrasında mobil robotun şasesinde esneme ve bükülmeler gözlemlenmiştir. Bu deformasyon mobil robota monte edilen motor-teker gruplarının yer ile temasından kaynaklıdır. Bu durum mobil robotun pozisyon kontrolünde ek sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Şekil 17 ve Şekil 18’de ilk prototip şasenin, maruz kaldığı yükler Autodesk Fusion 360 programında benzetim yolu ile mobil robota yüklenmiş ve analizleri yapılmıştır.



Şekil 17. Mobil Robot Prototip 1- Analiz Önden Görünüm



Şekil 18. Mobil Robot Prototip 1- Analiz Üstten Görünüm

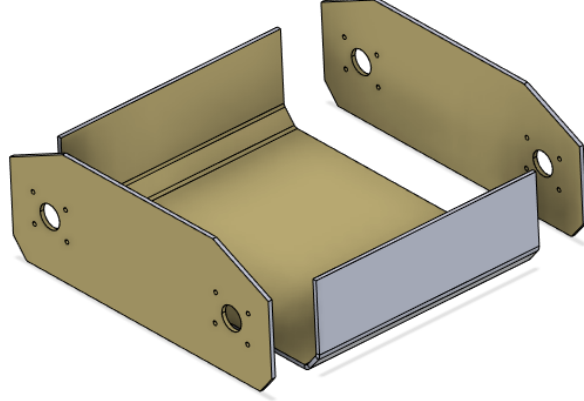
Şekiller görüldüğü üzere motor bağlantı noktalarında oluşan bu sorun, tekerleklerin yer ile temas ettiği açığı değiştirmekte ve kayma sorununa sebep olmaktadır. Bu sorun ise mobil robotun pozisyon doğruluğunu etkilemektedir.

Gözlemlenen bu sorunları aşmak için mobil robotun ikinci prototipi tasarlanmıştır. İkinci prototipin tasarımında, ilk prototipte olduğu gibi modüler ve sarsıntı/devrilme gibi durumlara karşı dayanıklı yapı göz önüne alınmış ve ilk prototipte oluşan sorunların çözülmesi hedeflenmiştir. İkinci prototip tasarlanırken, ilk prototipte gözlemlenen sorunlar ve araştırmacılar/üreticiler tarafından tasarlanan robotlar referans alınmıştır.

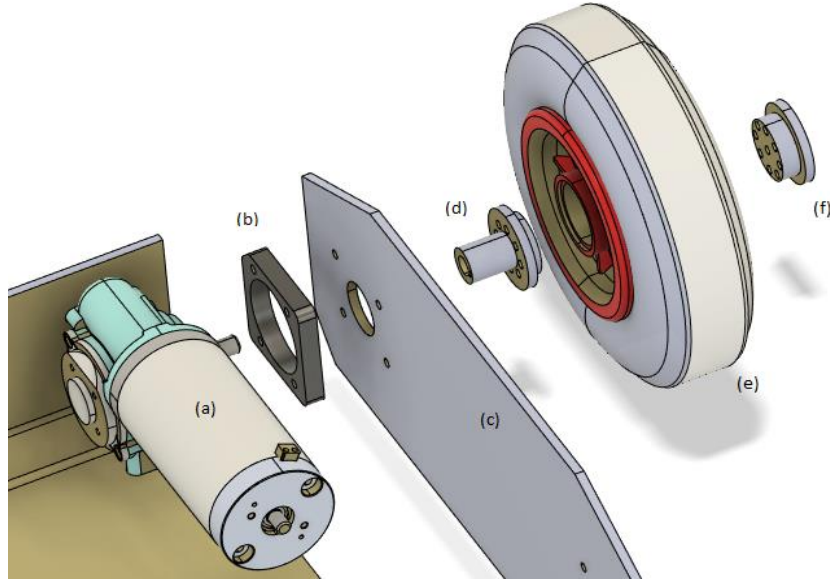
Tasarlanan mobil robotun teknik özellikleri:

- Boyutlar: 52 cm uzunluk x 46 cm Genişlik x 25 cm Yükseklik
- Gövde Malzemesi: 5 mm Sac
 - Lazer kesim, büküm ve kaynaklama işlemleri ile üretilmiştir.
- Bağlantı Aparatları Malzemesi: PA2200 ve PA3200GF
 - Lazer sinterleme metodu ile üretilmiştir.
- Ağırlık: ~13 kg
- Teker Çapı: 20 cm (nominal)
 - Tekerlekler hava ile şişirildiği için boyutları farklılık gösterebilmektedir.

Mobil robotun ana gövdesi; alt gövde, yan kapaklar ve üst kapak olacak şekilde dört parçadan oluşmaktadır ve parçalar 5 mm sac malzemeden üretilmiştir. Şekil 19’da görüldüğü üzere gövdenin alt kısmını oluşturan parça büküm makinası ile bükülmüş ve gövdenin yan kapakları ile kaynak yapılarak birleştirilmiştir.



Şekil 19. Ana Gövde Tasarımı



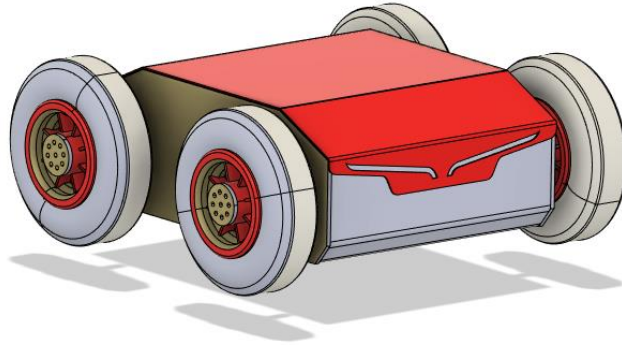
Şekil 20. Motor Gövde Teker Bağlantısı

Şekil 20’de görüldüğü üzere, mobil robotun hareketini sağlayan tekerlerin motor ile bağlantısı ise toplamda altı parçadan oluşan yapıya sahiptir. Motorlar (a), sağlam bağlantı kurmak ve uygun mesafe vermek amacıyla kullanılan flanş (b) adı verilen parça kullanılarak ana gövdenin yan kapaklarına (c) bağlanmıştır. Flanşlar lazer sinterleme yöntemi ile çalışan üç boyutlu yazıcılar kullanılarak, cam elyaf katkılı PA12-GB tabanlı

polimer malzemeden üretilmiştir. Yan kapaklara flanşların bağlanabileceği ve motor milinin gövdeden dışarıya çıkacağı uygun delikler lazer kesim ile açılmıştır.

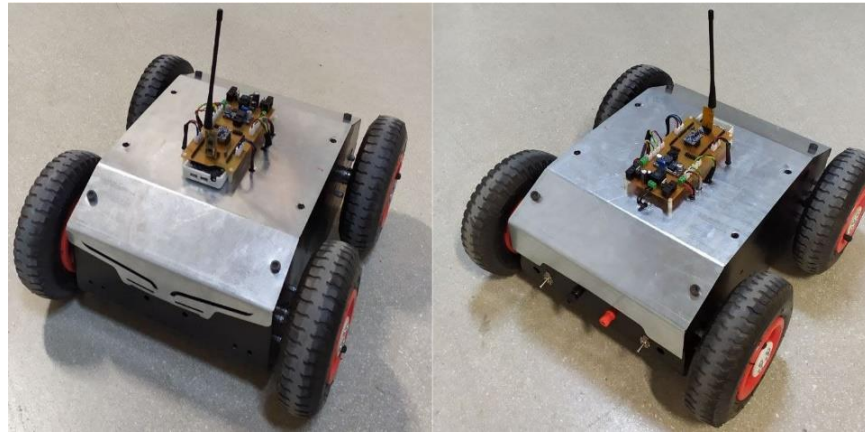
Teker-motor bağlantısında kaplin kullanılmıştır. Kaplinler mekanik sistemlerde, hareketin bir parçadan başka bir parçaya aktarılması için kullanılan makine elemanlarıdır. Motor şaftının hareketini tekerleğe aktarmak amacıyla kullanılmıştır. Kaplinin (d) bir ucu motor şaftına bağlanmış, diğer ucu ise tekerlek jant boşluğu boyunca ilerleyen 50mm uzunluğunda vidalar ile tutucu (f) parçaya bağlanarak motor-teker bağlantısı sağlanmıştır.

Mekanik tasarımın son aşaması olarak gövdenin üst kısmına kapak tasarlanmıştır. Kapak sayesinde mobil robotun içerisinde bulunan batarya, motor ve elektronik aksamlar koruma altına alınmış olmasının yanı sıra mobil robota estetik bir görünüş de katılması hedeflenmiştir. Tasarlanan kapak Şekil 21’de kırmızı renk ile gösterilmiştir.



Şekil 21. Mobil Robot Nihai Tasarım

Elektronik kontrol birimi, açma/kapama anahtarları ve batarya şarj işlemleri için kullanılan soket ve bağlantı elemanları için uygun deliklerin açılmasının ardından, mobil robot ana gövdesi Şekil 22’de görüldüğü üzere son hâline ulaşmıştır.

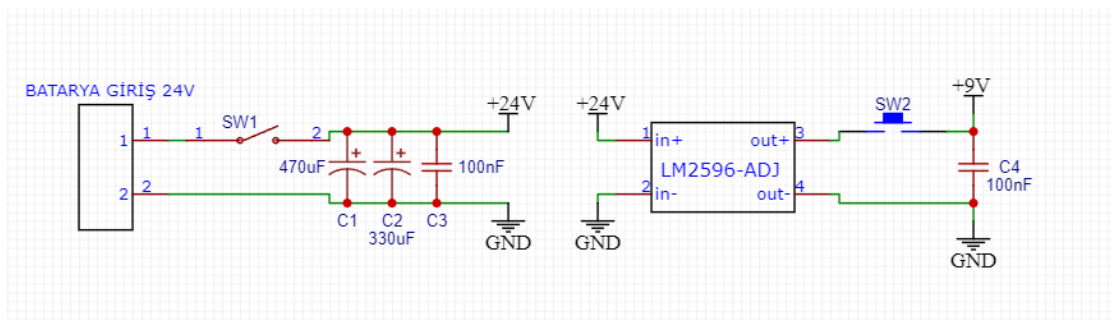


Şekil 22. Mobil Robot Nihai Üretim Sonrası

2.2.2. Elektronik Tasarım

Motorlara giden enerjinin dağıtımı, işlemcinin beslenmesi, RF haberleşme modülü, hareket kontrol ve pozisyon ölçüm işlemlerinde kullanılan sürücü ve sensörlerin elektronik bağlantısının yapılabilmesi için Arduino Due mikrodenetleyici kartına takılabilen baskı devre kartı tasarlanıp üretilmiştir. Üretilen baskı devre kartı, robotun çalışması için gerekli olan modüller ve tamamlayıcı elektronik devre elemanlarından oluşmaktadır.

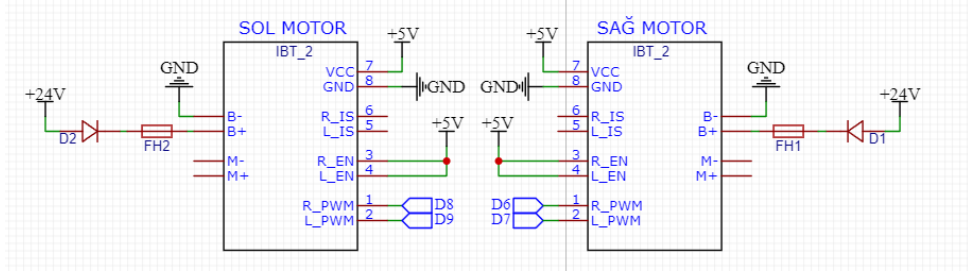
Baskı devre kartı tasarımının ilk aşaması sistem şematığının hazırlanmasıdır. Şematik hazırlanırken güç dağıtımından başlanmıştır. Mobil robot enerjisini iki adet seri bağlı 12V-7Ah kurşun asit aküden almaktadır, bu sayede sisteme giren toplam gerilim 24 V olmaktadır. DC motorların kalkış anında yüksek akım çektikleri bilinmektedir. Çekilen yüksek akımın etkilerini minimize edebilmek için Şekil 23'te gösterildiği üzere üç adet kapasitör kullanılmıştır. Bu sayede giriş geriliminde oluşması muhtemel dalgalanmalardan sistem izole edilmiş ve kalkış anında çekilen yüksek akımların olumsuz etkileri giderilmiştir. Kullanılan mikrodenetleyicinin besleme gerilimi 7 – 12 voltur. Bu sebeple 24 V ana besleme geriliminden, uygun gerilime düşümün sağlanması gerekmektedir. Gerilimi düşürmek için LM2596 anahtarlamalı voltaj regülatörü kullanılmış, çıkış 9 V'a sabitlenmiştir. Kullanılan voltaj düşürücü modülün çıkışına aç/kapa anahtar eklenmiş, kapasitör ile anlık düşüm ve dalgalanmalarına karşı önlem alınmıştır. Şekil 23'te sistem şematığı güç bölümü gösterilmektedir.



Şekil 23. Şematik – Güç

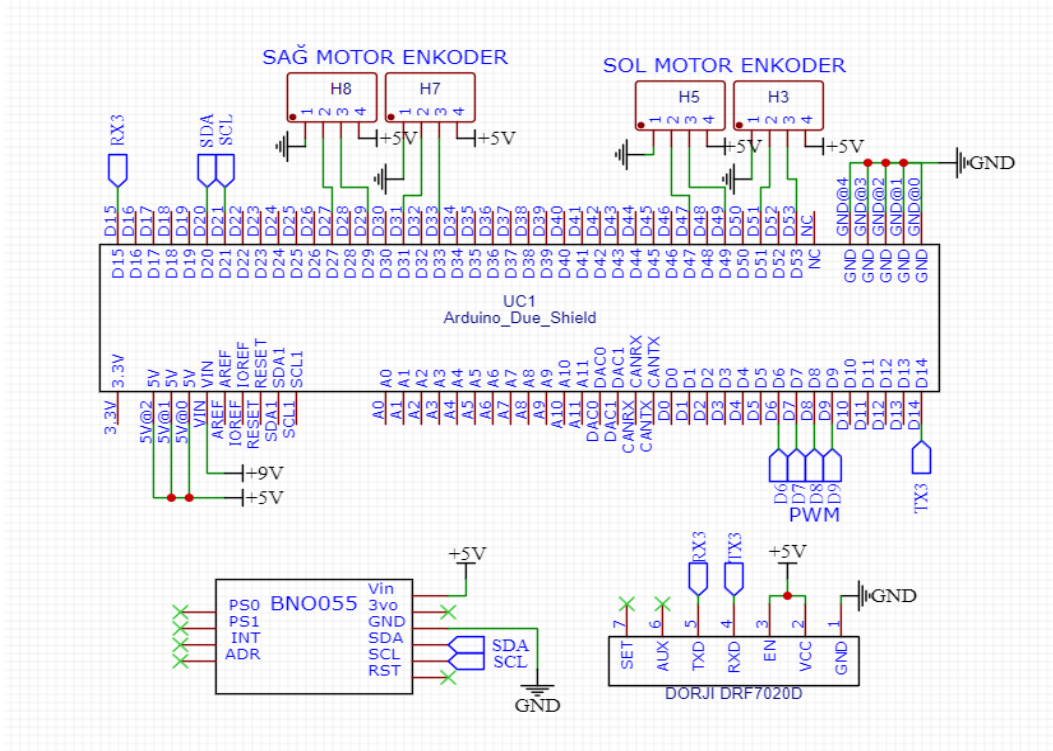
Motorların kontrol edilmesi için kullanılan BTS7960 entegreli IBT-2 motor sürücü modülleri, 24 V ana giriş beslemesi ile çalışmaktadır. Besleme gerilimi sigorta ve diyot üzerinden sürücü modüle aktarılmaktadır. Kalkış ve yön değiştirme gibi durumlarda motorların yüksek akım çekmesi bilinen davranışlarıdır. Çekilen anlık yüksek akımlar

akülerin ömrüne zarar vereceğinden uygun değerlerde sigorta ile önlem alınmıştır. Öngörülen değerlerden yüksek akımlar çekildiğinde, sigortalar açılarak devreyi açık devre hâline getirmektedir. Şekil 24’te motor sürücü modüllerin bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 24. Şematik – Motor Sürücü

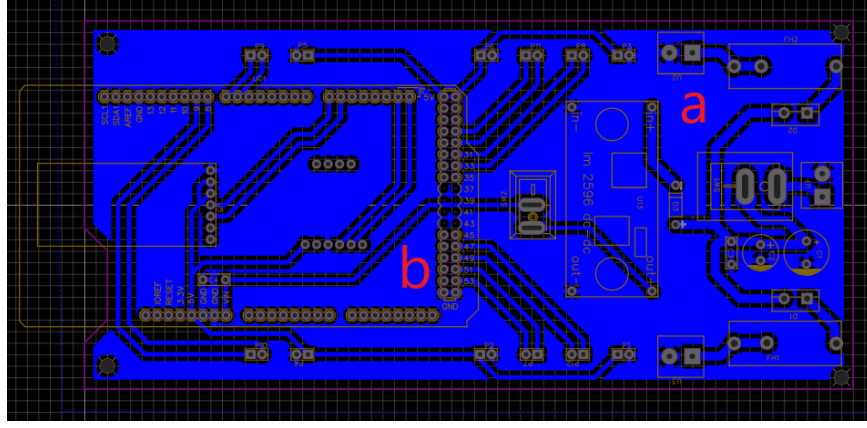
Çalışma kapsamında kullanılan enkoder sensörlerin, haberleşme modülünün ve atalet ölçüm biriminin bağlantıları terminal ve soketler ile sağlanmıştır. Motor sürücülerin PWM çıkışları etiketlenerek Şekil 25’te görüldüğü üzere şematik tasarım son hâline ulaşmıştır.



Şekil 25. Şematik – Mikrodenetleyici

Şematik tasarımın ardından baskı devre kartı tasarlanmıştır. Tasarlanan baskı devre kartı, Arduino Due kartına doğrudan takılabilir şekildedir. Baskı devre kartı sistem güç beslemesinin dağıtımını ve kullanılan modül ve sürücülerin Arduino Due kartına

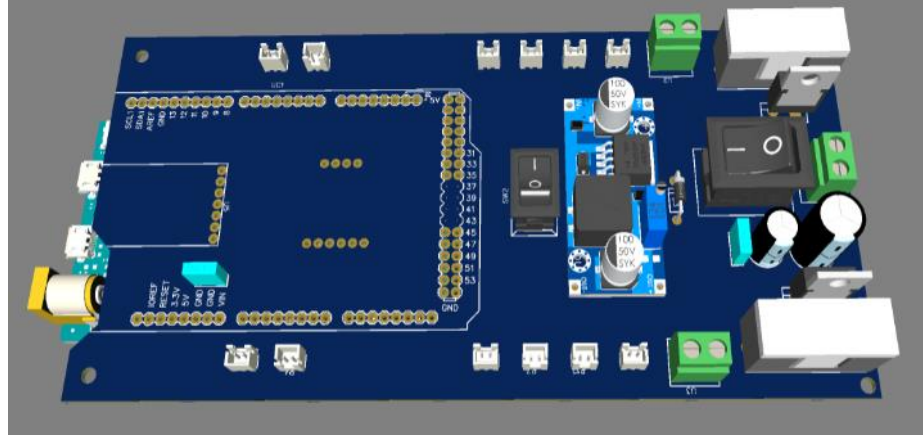
bağlanması için tasarlanmıştır. Baskı devre kartı, 35µm bakır kalınlığına sahip FR4 tabanlı tek katmanlı plaka kullanılarak üretilmiştir. Şekil 26’da baskı devre kartının tasarımı gösterilmiştir.



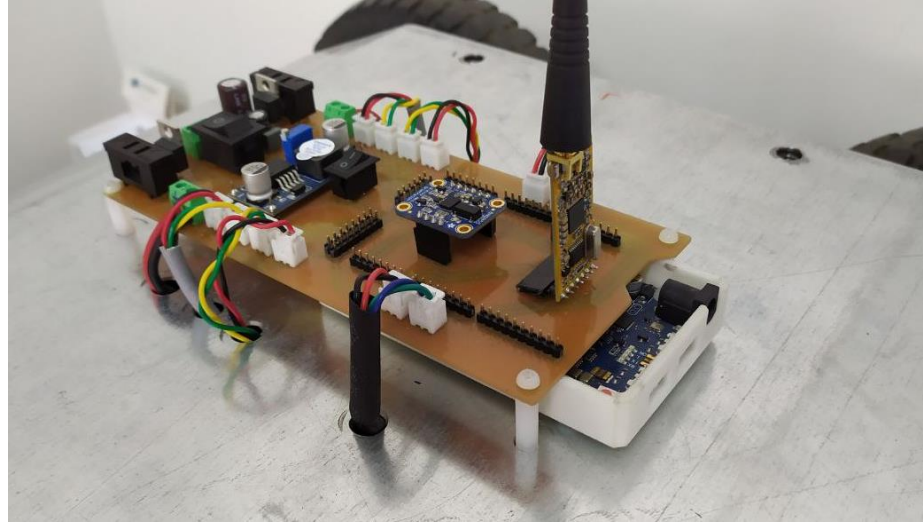
Şekil 26. Baskı Devre Kartı-Tasarım

Şekil 26’da gösterildiği üzere güç girişi ve dağıtımını kartın ‘a’ ile gösterilen bölümünde yapılmaktadır. Çekilen yüksek akım değerlerinde devrenin ve devre yollarının zarar görmemesi için 2 mm kalınlığında çizilmiştir. Kartın ‘b’ bölümünde ise sensörler, haberleşme modülü ve lojik besleme için gerekli olan sinyal hatları gösterilmektedir. Yollar 1 mm kalınlığında çizilmiştir. Sinyal bütünlüğü için çizilen yollar arasında toprak hattı olması veya çizilen yolların kalınlığı kadar boşluk bırakılması gerekmektedir. Kart tasarımı yapılırken sinyal hatları arasında uygun boşluklar bırakılmıştır. Baskı devre kartlarının sinyal ve güç uyumluluğu açısından verimli bir şekilde çalışabilmesi için çok katmanlı kartlarda bakır alan oluşturulmakta, katmanlardan bir tanesi ortak toprak katmanı olacak şekilde tasarlanmaktadır. Tek katmanlı baskı devre kartlarında ise sinyal ve güç hatları çizildikten sonra kartın boş kalan alanlarında bakır alan bırakılarak ortak toprak hattı oluşturulmaktadır. Bu sayede kart üzerinde taşınan sinyaller için ortak referans oluşturulur ve kart üzerinde akım döngüleri minimize edilir.

Atalet ölçüm birimi içerisinde bulunan manyetometre sensörü gibi sensörler, manyetik alandan ve endüktif yüklerden etkilenmektedir. Atalet ölçüm biriminin verimli bir şekilde çalışabilmesi ve motorların oluşturacağı manyetik alanlardan olumsuz etkilenmemesi için, tasarlanan kart mobil robotun üzerine monte edilmiştir. Tasarımın üç boyutlu görünümü Şekil 27’de ve üretim sonrası hâli ise Şekil 28’de gösterilmiştir.



Şekil 27. Baskı Devre Kartı-Üç Boyutlu Görünüm

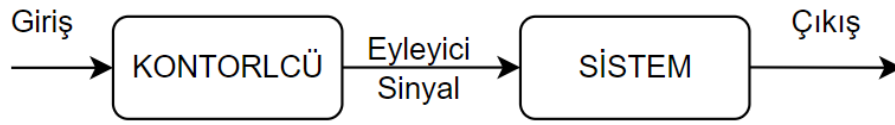


Şekil 28. Baskı Devre Kartı-Üretim Sonrası

2.3. Kontrol Sistem Tasarımı

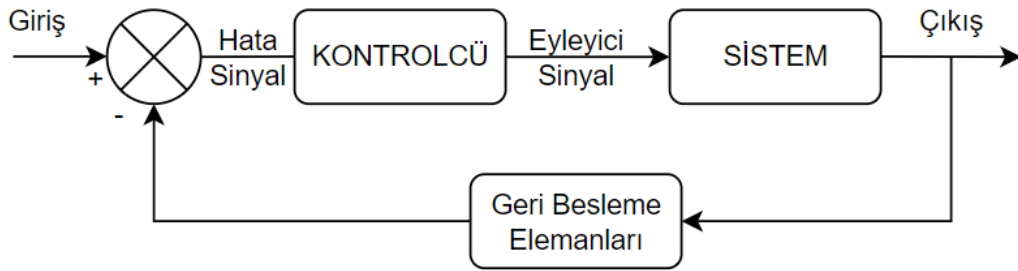
Çalışmanın odak noktası olan kontrol sistem tasarımı bölümünde, literatürde bahsedilen ve çalışma esnasında karşılaşılan sorunlar göz önünde bulundurularak, bu sorunları çözmeye yönelik tasarlanan kontrolcüler anlatılmaktadır.

Kontrol sistemleri geri besleme durumuna göre açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Açık çevrim kontrol sistemleri Şekil 29’da görüldüğü üzere, sistemin anlık durumunu denetlemeksizin verilen girdi doğrultusunda üretilen eyleyici sinyal ile çıkışları kontrol ederek çalışmaktadırlar.



Şekil 29. Açık Çevrim Sistemler

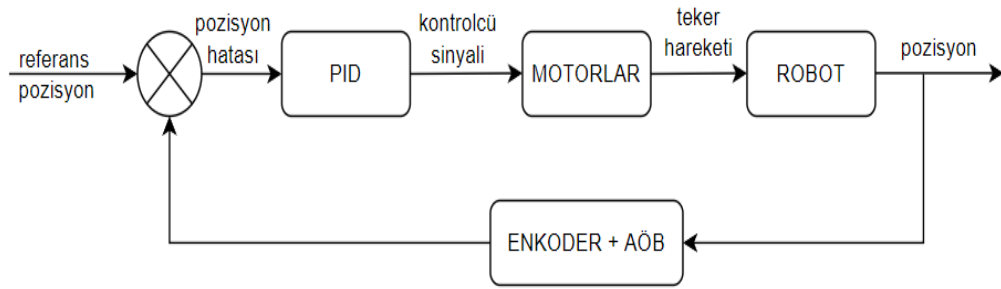
Kapalı çevrim sistemlerde ise çıktı ve girdi arasında geri besleme hattı kurulur, bu sayede kontrolcü tarafından üretilen eyleyici sinyal çıktıya bağlı hâle gelmektedir. Şekil 30’da görüldüğü üzere sistemin çıkışları geri besleme elemanları (sensörler) yardımı ile okunmaktadır. Sistemin anlık durumu, girişlerden çıkartılarak hata sinyali elde edilir. Sisteme gönderilen eyleyici sinyal, sistemin arzu edilen ayar noktasına gelmesini sağlamaktadır. Bu sebeple, kapalı çevrim sistemler, otomatik kontrol sistemleri olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 30. Kapalı Çevrim Sistemler

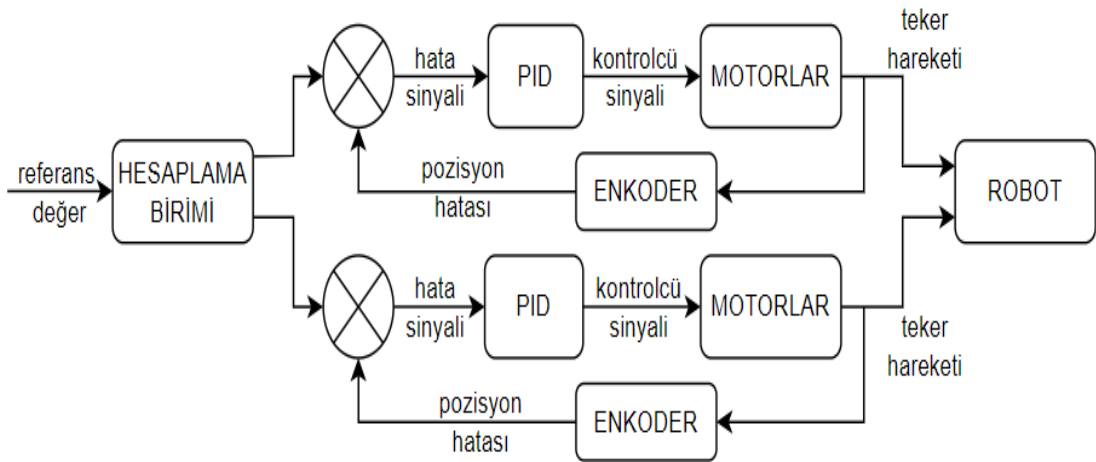
Eyleyicilerin kontrolü yapılırken, ayar noktasına/arzu edilen değere hızlı, kesin ve istikrarlı bir şekilde ulaşması hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında, kapalı çevrim kontrolcülerden biri olan oransal-türev-integral (PID) kontrolcü kullanılmıştır. PID kontrolcü endüstride basınç, akış, hız, sıcaklık kontrolü gibi uygulamalarda yaygın olarak

kullanılan bir kontrolcüdür. Yaygın olarak kullanılmasının sebebi pratik uygulamalarda kolaylık sağlaması ve sistem modeli olmadan da kullanılmasının mümkün olmasıdır. PID kontrolcüler yapısal olarak basit ve istikrarlı performans sergilemektedirler (Kumar vd., 2018). Sistemlerde kararlılığı sağlamak için kullanılan PID kontrolcüler sayesinde, sistemin arzu edilen ayar noktasına ulaşırken iç veya dış etkenlerden kaynaklı oluşan bozuculardan minimum şekilde etkilenmesi sağlanmaktadır. Çalışmada pozisyon kontrolü için kullanılan kontrolcü akış şematığı Şekil 31’de gösterilmiştir, bu kontrol şeması hız kontrolü için de geçerli olmaktadır.



Şekil 31. Klasik PID Kontrolcü-1

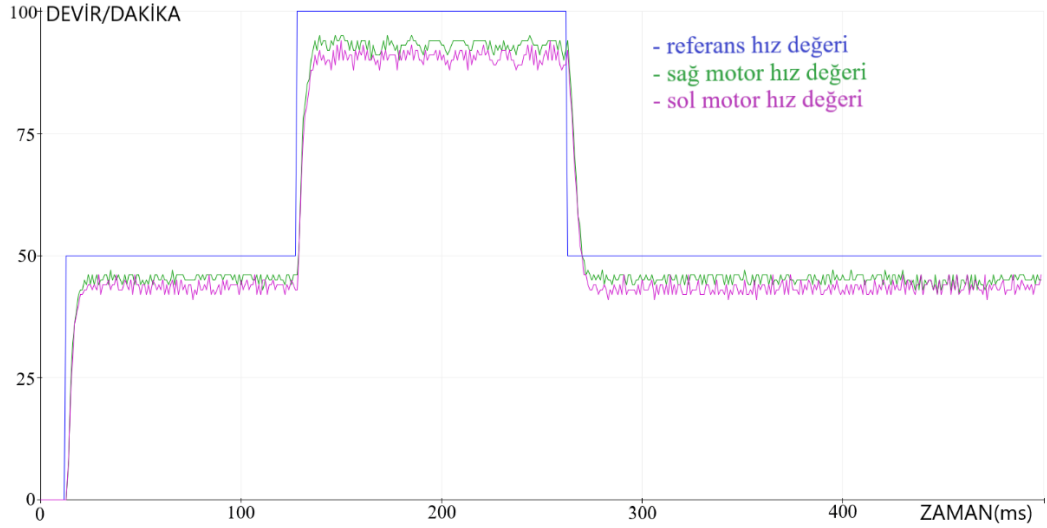
Şekil 31’de gösterilen klasik PID kontrol yöntemi mobil robota entegre edilirken sağ ve sol tarafta çalışan motorlar için ayrı kontrolcüler tasarlanmıştır. Ek bir hesaplama algoritması sağ ve sol tarafta bulunan motorlar için referans değerlerini ayrı ayrı hesaplayarak PID kontrolcülere iletmektedir. Bu sayede hata sinyali, sensör geri beslemesi ve eyleyici sinyali sağ ve sol tarafta çalışan motorlar için bağımsız şekilde üretilmiştir. Şekil 32’de bahsedilen kontrolcü yapısı gösterilmiştir.



Şekil 32. Klasik PID Kontrolcü-2

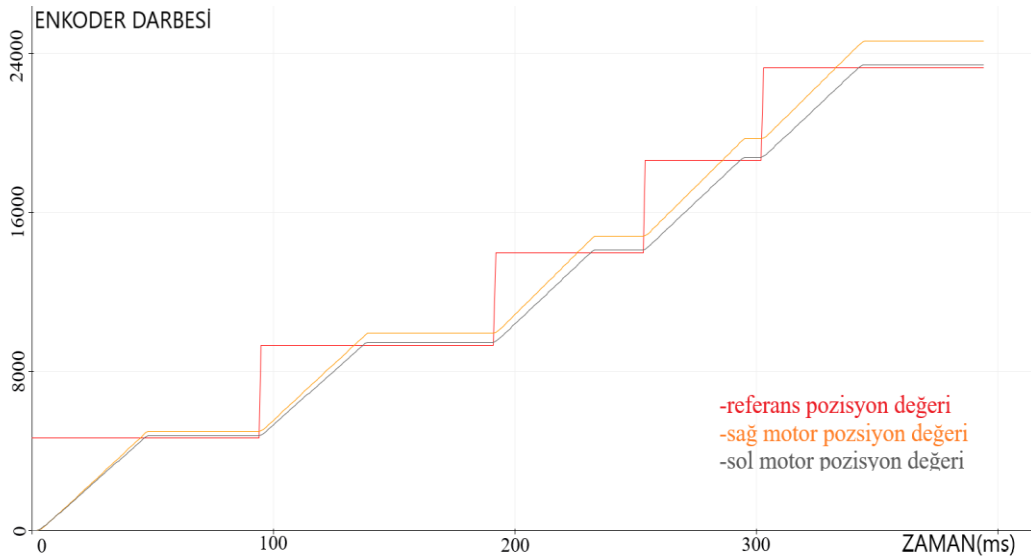
Yapılan deneyler esnasında literatür taramasında bahsedilen ve araştırmacılar tarafından değinilen problemlerin, geliştirilen mobil robotta da gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bahsedilen sorunlar;

- Eşdeğer motorlar, üretilen eşdeğer sinyallere aynı cevabı vermemektedir. Bahsedilen hata Şekil 33'te gösterilmiştir.



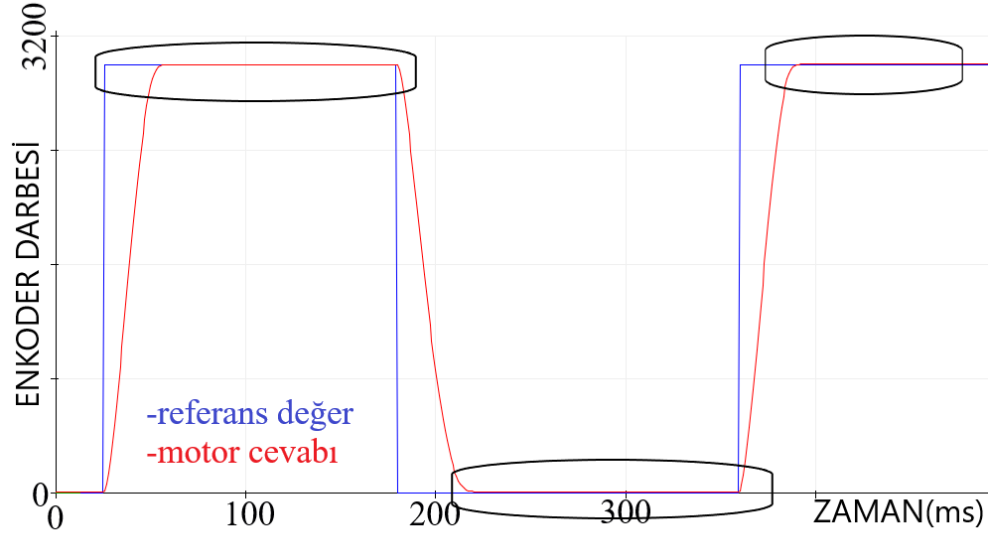
Şekil 33. Motorların Açık Çevrim Hız Cevapları

- Eşdeğer motorların iç dinamiklerinden kaynaklı oluşan hız farklılıkları, pozisyon hatalarına da sebep olmaktadır. Robotun bir tarafında bulunan motorlar hedef pozisyona daha erken ulaşacağından mobil robotun yönelme açısında bozulmalara sebep olmaktadır.



Şekil 34. Motorların Açık Çevrim Pozisyon Cevapları

- Motorların denetimi için geliştirilen kontrolcüler, motorların iç dinamiklerinden dolayı, yön değişimlerinde aynı cevabı vermemekte, küçük farklılıklara sebep olmaktadır. Bu farklılıklar, özellikle uzun süreli sürüşlerde kümülatif etki göstererek hatalara sebep olmaktadır. Şekil 35'te referans değer ve motorun cevapları işaretlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda hesaplanan PID parametreleri ile kontrol edilen motor, motor saat yönünde dönerken hata olmaksızın çalışmaktadır. Ancak motor saat yönünün tersi yönde hareket ederken kalıcı durum hatası oluşmaktadır. Oluşan bu hata, sürüş boyunca etkisini göstermektedir.



Şekil 35. Kapalı Çevrim Motor Cevabı

- Bir önceki sorunda bahsedilen eşdeğer motorların farklı cevabı vermeme sorunu, hız kontrolü için de geçerli olduğu gözlemlenmiştir. Belirli bir hız değeri için belirlenen kontrolcü parametresi ile farklı hız değerlerinde kontrol edildiği zaman sistemde hatalara sebep olmaktadır.

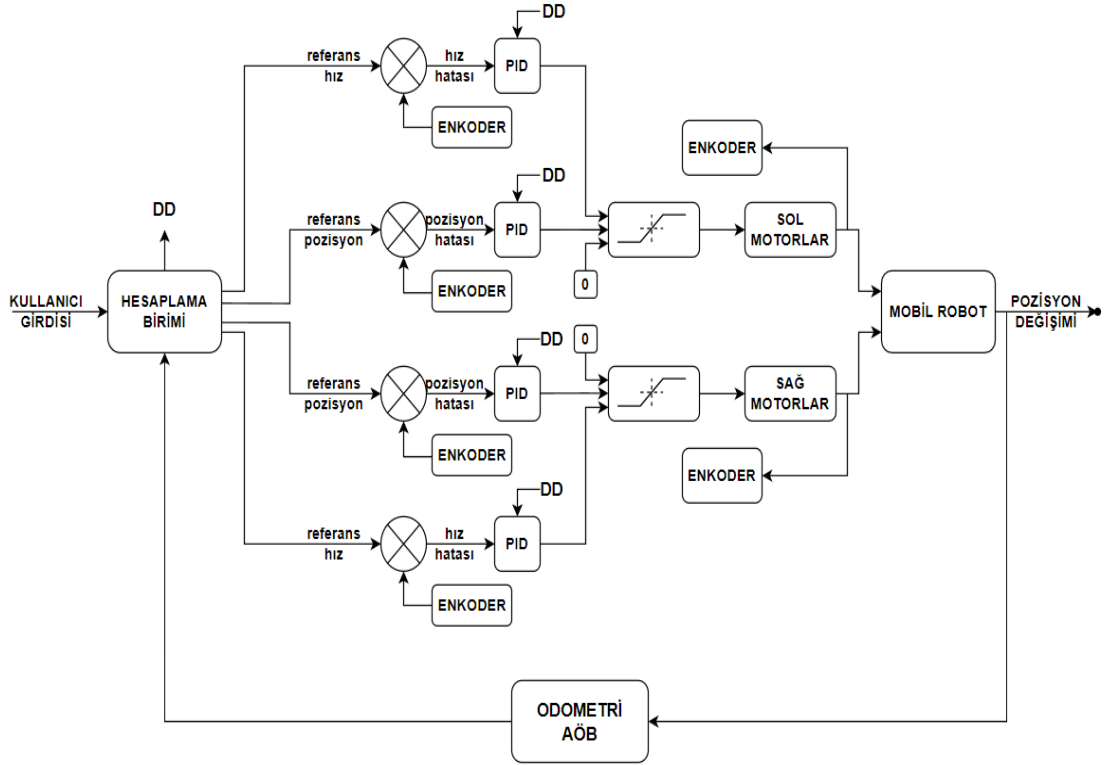
Görüldüğü üzere hız ve pozisyon kontrolünü yapabilmek klasik kontrolcü yapısı ile mümkün olmamakta, sistemin kararlılığını etkileyecek sorunlar oluşmaktadır. Bu sebeple kazanç planlamalı katmanlı PID algoritması kullanılmıştır. Kazanç planlama ile sistemin yön ve hız değişimi gibi kararlılığını etkileyecek durumlarda uygun parametre setine geçiş yapması sağlanmış ve kararlılık korunmuştur. Katmanlı PID algoritması sayesinde

hız ve pozisyon kontrolü birbirinde bağımsız hâle getirilmiş ve oluşabilecek hatalar birbirinden izole edilmiştir.

Mobil robotun genel çalışma prensibi ise şu şekildedir:

- Enkoder, atalet ölçüm birimi, zamanlayıcılar, seri haberleşme portları başlatılır.
- RF alıcısı ile kullanıcıdan gelen veriler okunur.
- Veriler 2.1.5 RF Haberleşme bölümünde bahsedilen esaslara göre ayrıştırılıp, düzenlenir.
- Gelen veri uygunsa, hesaplama birimi arzu edilen ayar noktalarını kontrolcülere gönderir.

Hesaplama biriminin ana vazifesi, gelen veriler doğrultusunda mobil robotun sağ ve sol tarafında bulunan motorlar için arzu edilen ayar noktalarını ve Şekil 36'da 'DD' olarak gösterilen değişim değişkenini belirleyerek kontrolcülere göndermektedir. Değişim değişkeni olarak adlandırılan veri, kontrolcülere parametre seti hakkında bilgi taşımaktadır. Bu veri sayesinde, gerekli durumlarda parametreler arası geçiş yapılabilir.



Şekil 36. Mobil Robot Akış ve Kontrol Şeması

Değişim değişkeni ve ilgili referans hız ve pozisyon değerleri PID kontrolcülere gönderilir. Hız ve pozisyon kontrolcülerinin geri beslemesi enkoder sensörü kullanılarak sırasıyla devir/dakika ve konum değerlerini alarak sağlanmaktadır. Pozisyon ve hız kontrolcülerinin çıktıları Şekil 36'da gösterilen dinamik doyum (satürasyon) bloğu yardımıyla birleştirilerek tek bir sinyal oluşturulur. Sinyal oluşturulurken, pozisyon kontrolcüsünün çıkışı, sıfır (alt limit) ve hız kontrolcüsünün çıkışı (üst limit) arasında sınırlandırılmaktadır. Bu sayede pozisyondan bağımsız hız kontrolü yapılabilmektedir. İstenilen pozisyona istenilen hızda gitme hedefine ulaşılmıştır.

Şekil 36'da geliştirilen kazanç planlamalı katmanlı PID algoritmasının alt bileşenleri Bölüm 2.3.1 Parametrelerin Belirlenmesi, Bölüm 2.3.2 Katmanlı PID ve Bölüm 2.3.3 Kazanç Planlama başlıkları altında anlatılmıştır.

2.3.1. Parametrelerin Belirlenmesi

Kapalı çevrim kontrolcüler, geri besleme elemanlarını kullanarak sistemin istenen ayar noktası arasındaki farkı -hatayı- hesaplayarak, sistemi kararlı hâle getirmek için eyleyici sinyalleri üretirler.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

Denklem 10'da PID kontrolcünün matematiksel ifadesi gösterilmektedir. $u(t)$ üretilen eyleyici sinyali, $e(t)$ hata sinyalini, k_p , k_i , k_d ise sırasıyla PID kontrolcünün oransal, integral ve türev bileşenlerinin katsayılarını göstermektedir.

Kontrolcü tarafından üretilen eyleyici sinyalin dört büyük karakteristik özelliği vardır; yükselme zamanı, aşım, oturma süresi ve kalıcı durum hatasıdır. Bahsedilen k_p , k_i , k_d kontrolcü tarafından üretilen eyleyici sinyal üzerinde etkileri olan katsayılardır. Oransal katsayı istenilen ayar noktasını takip ederken, integral ve türev katsayıları geçmiş hataların toplamına ve hatanın değişim oranını takip ederek uygun sinyalin üretilmesine katkıda bulunurlar. PID parametrelerinin, üretilen eyleyici sinyalleri üzerindeki etkileri Tablo 2'da verilmiştir.

Tablo 2. P, I, D Katsayılarının Sinyal Bileşenleri Üzerinde Etkisi

	Yükselme Zamanı	Aşım	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
k_p	Azaltır	Arttırır	Küçük Artış	Azaltır
k_i	Küçük Azalma	Arttırır	Arttırır	Büyük Azalma
k_d	Küçük Azalma	Azaltır	Azaltır	Küçük Değişiklik

(Kaynak: Li vd., 2007)

PID kontrolcü ile çalışan kapalı çevrim sistemlerde, sistemin kararlılığını arttırmak için k_p , k_i , k_d kazançlarının belirlenmesi gerekmektedir. Kazançlar belirlenirken sıklıkla kullanılan iki yöntem vardır. Birincisi, sistemin matematiksel modeli üzerinden sistemi kararlı hâle getiren kazançların hesaplanmasıdır, buna model tabanlı ayarlama denir. İkincisi ise sistem üzerinden doğrudan test yapılması ile kazanç ayarlamadır.

Kullanılan DC motorların tüm parametrelerinin bilinmemesi, motorların paralel bağlı olmasından dolayı bilinen parametre değerlerinde değişmelerin olması ve sistemin farklı koşullar altında kararlı bir şekilde çalışması için geniş parametre yelpazesine ihtiyaç duyulmasından dolayı çalışma kapsamında mobil robotun PID kazançları kapalı çevrim Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben ve manuel kazanç belirleme yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.

Ziegler-Nichols (Z-N) ve Tyreus-Luyben (T-L) parametre belirleme yöntemi, deneme yanılma prensibi ile çalışan, en çok bilinen ve kullanılan PID parametre belirleme yöntemidir. Z-N ve T-L parametre belirleme yönteminin avantajı ise sistemin modeline ihtiyaç duyulmamaktadır. Dezavantajları ise deneme-yanılma süreçlerinin tekrarlanması gerektiği için zaman alıcıdır, parametre belirlenirken sistemi kararsız koşullar altında çalıştırmayı gerektirir bu durum ise tehlikeli sonuçlar doğurabilir ve açık çevrimde kararsızlık gösteren sistemlerde kullanılamaz (Shahrokhi ve Zomoroddi, 2014).

Sistemin genel çalışma prensibi;

- k_p kazancı sistem nötr kararlılık durumuna gelene kadar arttırılır. Nötr kararlılık durumu, kontrol edilen sistemin salınımına girmesidir, nihai kazanç olarak da adlandırılmıştır. Şekil 40'ta gösterilmiştir. k_p değeri arttırılırken k_i ve k_d değerleri sifıra eşitlenir.

- Elde edilen salınım, istikrarlı bir salınım olmalıdır, belli bir zaman sonra yatışması veya genişlemesi sistemin nötr kararlı hâlinde olmadığını gösterir.
- Sistemi nötr kararlı hâle getiren $K_u = k_p @$ nötr kararlılık (k_c veya k_{cu}) değeri ve T_u (P_u) salınım periyodu elde edilir.
- Elde edilen veriler ile Tablo 3 ve Tablo 4 referans alınarak, sistemi kararlı hâle getiren k_p , k_i ve k_d değerleri tespit edilir.

Tablo 3. Ziegler Nichols Parametre Belirleme Yöntemi

Kontrolcü Tipi	k_p	τ_i	τ_d
P	0,5 K_u	–	–
PI	0,45 K_u	$T_u / 1,2$	–
PID	0,6 K_u	$T_u / 2$	$T_u / 8$

(Kaynak:Shahrokhi ve Zomoroddi, 2014)

Deneme yanılma yöntemi ile K_u ve T_u değerleri elde edildikten sonra Ziegler Nichols metodu ile k_p , τ_i ve τ_d değerleri elde edilir. Denklem 11’de gösterildiği şekilde nihai parametreler elde edilir.

$$k_i = \frac{k_p}{\tau_i} \text{ ve } k_d = k_p \tau_d \quad (11)$$

Tyres-Luyben (T-L) yöntemi ise, Ziegler-Nichols yöntemi ile aynı hesaplama mekanizmasına sahiptir. Yalnızca son kontrolcü ayarlamaları Tablo 4’te görüldüğü üzere farklıdır ve Tyres-Luyben metodu yalnızca PI ve PID kontrolcü için parametre hesaplaması yapmaktadır.

Tablo 4. Tyres-Luyben Parametre Belirleme Yöntemi

Kontrolcü Tipi	k_p	τ_i	τ_d
PI	$K_u / 3,2$	$2,2 T_u$	–
PID	$K_u / 3,2$	$2,2 T_u$	$T_u / 6,3$

(Kaynak:Shahrokhi ve Zomoroddi, 2014)

Ziegler-Nichols ve Tyres-Luyben parametre belirleme metotları donanım üzerinde testler yapılarak çalışan, yinelemeli ve sonucunda kesin olmayan ancak sistemin genel

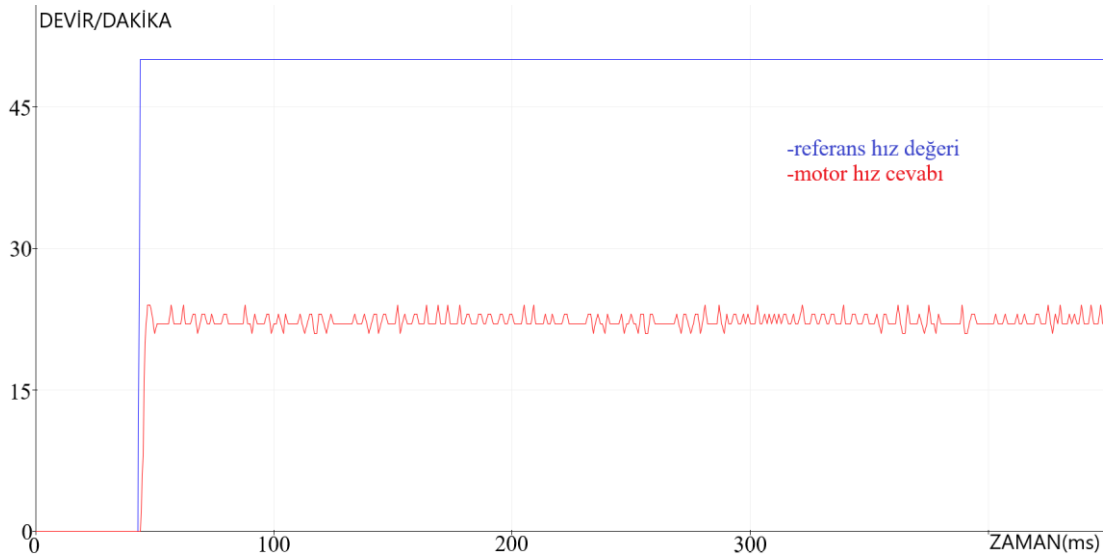
durumu hakkında bilgi verip, gerekli olduğu noktalarda manuel ayarlama için başarılı başlangıç noktaları tayin eden metotlardır.

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere mobil robot üzerinde çalışan katmanlı PID algoritması kazanç planlamalı bir kontrolcüdür. Hız ve pozisyon kontrolü yapılırken kullanılacak olan farklı parametre setlerinin hesaplanması gerekmektedir.

Bu nedenle sağ ve sol taraf motorları 50, 100, 150 ve 200 devir/dakika değerleri ve saat yönü/saat yönünün tersi hareket için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Sağ motor 50 devir/dakika ve sağ motor saat yönünde hareket için yapılan kontrolcü hesaplamaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

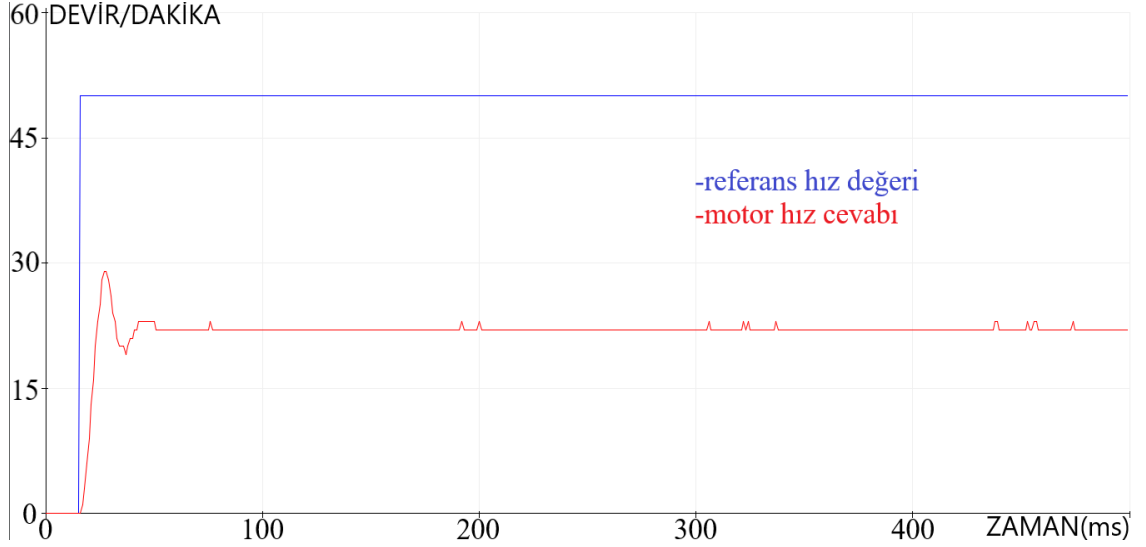
2.3.1.1. Sağ motor 50 devir/dakika

Öncelikle k_i ve k_d değerleri sıfıra eşitlenerek k_p değeri arttırılmaya başlanır. Şekil 37’de görüldüğü üzere elde edilen sinyal gürültülü sinyaldir. Sinyalin gürültü seviyesini azaltmak ve doğru sonuçlar elde etmek amacıyla ortalama filtre uygulanmıştır.



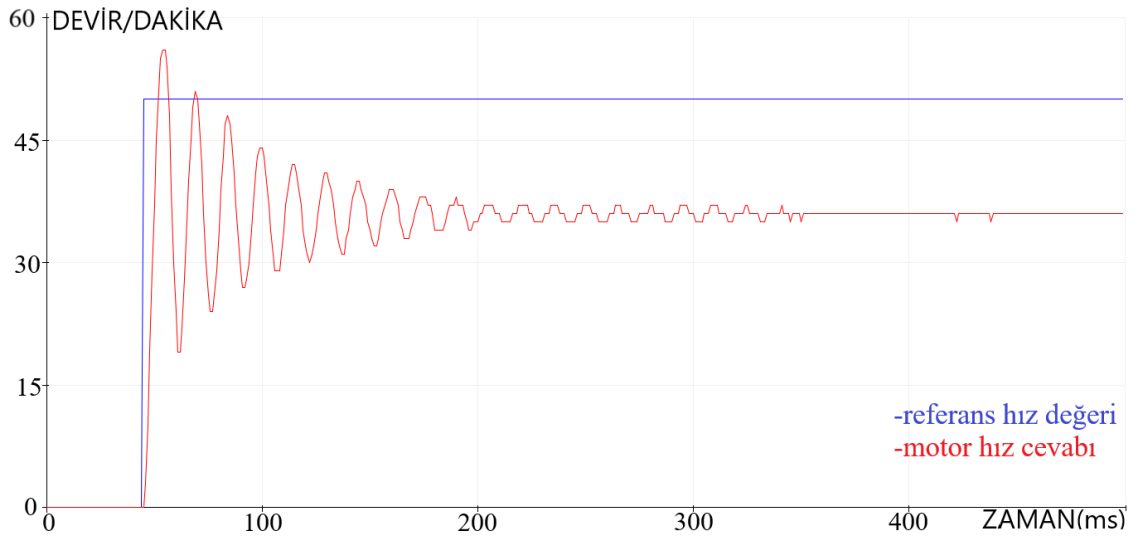
Şekil 37. Nötr Kararlılık Tespiti $k_p=1$

Okunan on verinin ortalaması alınarak motor hız cevabındaki gürültü azaltılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 38’de gösterilmiştir.



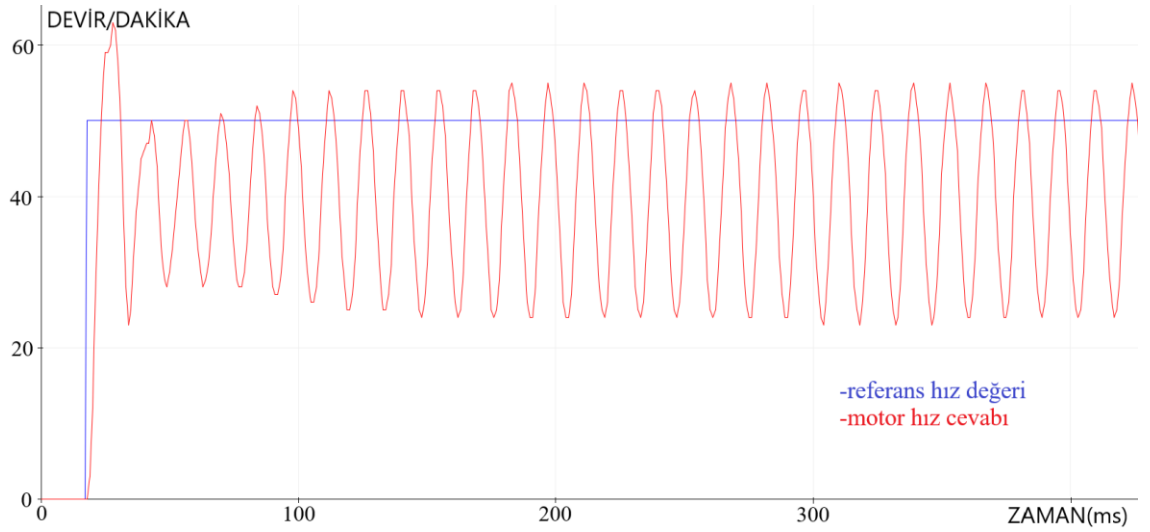
Şekil 38. Nötr Kararlılık Tespiti Filtreleme Sonrası $k_p=1$

Şekil 39 ve Şekil 40'ta görüldüğü üzere k_p değeri sistem nötr kararlılık cevabını verene kadar yükseltilmektedir. Sürecin bu aşaması Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben gibi yöntemlerin dezavantajıdır. Deneme yanılma prosedürü işlediği için oldukça vakit alıcı olan bu süreç, donanım üzerinde sorunlar doğurabilmektedir.



Şekil 39. Nötr Kararlılık Tespiti $k_p=3$

Deneme yanılma yöntemi sonucunda sağ tarafta bulunan motorlar 50 devir/dakika için nötr kararlılık durumuna getirilmiştir. Sistemin nötr kararlılık noktasına ulaştığında elde edilen salınım Şekil 40'ta görüldüğü üzere sabit olmalıdır. Zaman içerisinde sönümlenen veya artış gösteren salınım kullanılan yöntemler için geçerli olmamaktadır.



Şekil 40. Nötr Kararlılık Tespiti $k_p =4,5$

Salınım periyodu belirlenirken, Arduino geliştirme ortamında bulunan seri haberleşme monitörü kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 41’de gösterilmiştir.

13:56:54.059 -> 50.00 , 50	} 1. Tekrar 279ms	13:56:54.338 -> 50.00 , 50	} 2. Tekrar 281ms
13:56:54.104 -> 50.00 , 54		13:56:54.386 -> 50.00 , 53	
13:56:54.104 -> 50.00 , 55		13:56:54.386 -> 50.00 , 54	
13:56:54.151 -> 50.00 , 55		13:56:54.431 -> 50.00 , 54	
13:56:54.151 -> 50.00 , 54		13:56:54.431 -> 50.00 , 53	
13:56:54.151 -> 50.00 , 51		13:56:54.477 -> 50.00 , 51	
13:56:54.198 -> 50.00 , 46		13:56:54.477 -> 50.00 , 45	
13:56:54.198 -> 50.00 , 37		13:56:54.477 -> 50.00 , 36	
13:56:54.245 -> 50.00 , 29		13:56:54.525 -> 50.00 , 29	
13:56:54.245 -> 50.00 , 24		13:56:54.525 -> 50.00 , 24	
13:56:54.292 -> 50.00 , 22		13:56:54.571 -> 50.00 , 22	
13:56:54.292 -> 50.00 , 26		13:56:54.571 -> 50.00 , 26	
13:56:54.292 -> 50.00 , 34		13:56:54.619 -> 50.00 , 34	
13:56:54.338 -> 50.00 , 43		13:56:54.619 -> 50.00 , 43	

Şekil 41. Salınım Periyodunun Tayin Edilmesi 1

Şekil 41’de görüldüğü üzere monitörden belirli aralıklarla tekrar eden veriler tespit edilir, grafiklerle kıyaslaması ve doğrulaması yapılır. Elde edilen veriler haberleşme hızı, arka planda koşan yazılımın hızı, sensörlerin ve hesaplama algoritmalarının çözünürlüğü gibi birçok sebepten dolayı küçük değişiklikler gösterebilmektedir. Tespit edilen değerlerin ortalaması alınarak geliştirilen algoritmalarda kullanılmıştır. Tekrar eden verilerin, tekrar etme zaman aralığı tespit edilir ve T_u değeri elde edilmiş olur. Referans değer olarak 280 ms kullanılmıştır.

Şekil 42’de C++ programlama dili kullanılarak geliştirilen programın çıktısı verilmiştir.


```
PID Parameter Estimation using Ziegler-Nichols and Tyreus-Luyben!
-----
Please Enter Kp@Neutral Stability : 4.5
Please Enter Tu = Oscillation Period in Seconds : 0.28
-----

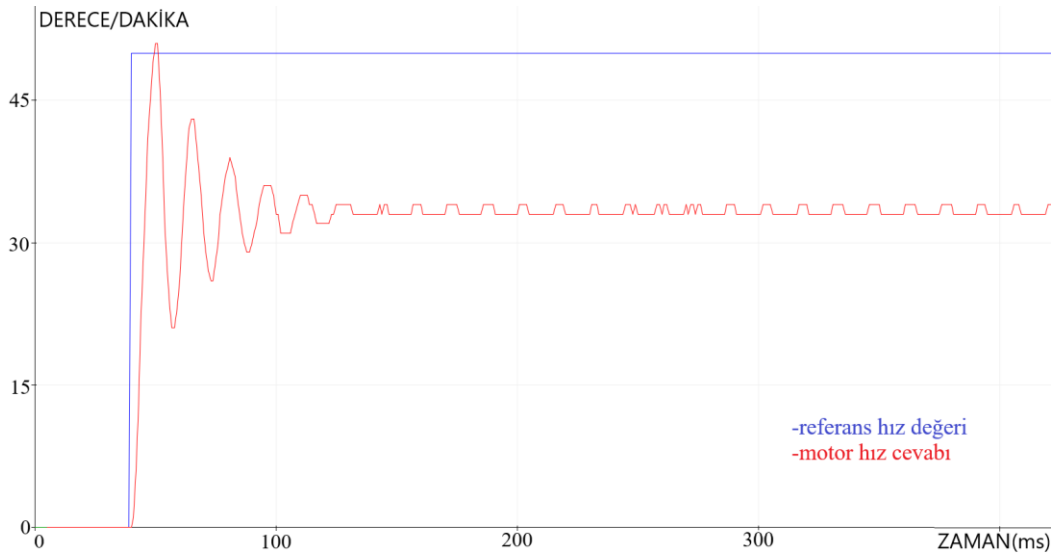
Ziegler-Nichols Method :
P          : 2.25          ||
PI         : 2.025        ||      8.67857
PID        : 2.7          ||      19.2857 ||      0.0945
-----

Tyreus-Luyben Method :
PI         : 1.40625      ||      2.28214
PID        : 1.40625      ||      2.28214 ||      0.062496
-----
```

Şekil 42. Parametrelerin Belirlenmesi 1

Geliştirilen program Tablo 3, Tablo 4 ve Denklem 11'de verilen bilgiler doğrultusunda Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben yöntemleri için PID parametrelerini hesaplamaktadır. Belirlenen parametreler doğrultusunda elde edilen sistem cevapları aşağıda verilmiştir.

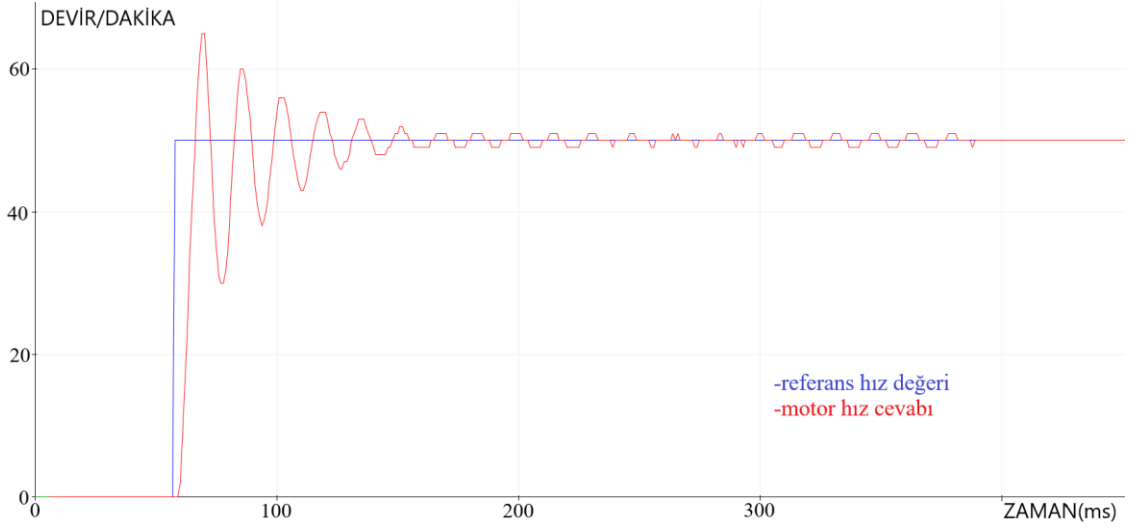
Şekil 43'te görüldüğü üzere Ziegler-Nichols yöntemi ile elde edilen veri sonucunda P kontrolcünün tek başına yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Sistem cevabında kalıcı durum hatası gözlemlenmektedir.



Şekil 43. Ziegler-Nichols P kontrolcü

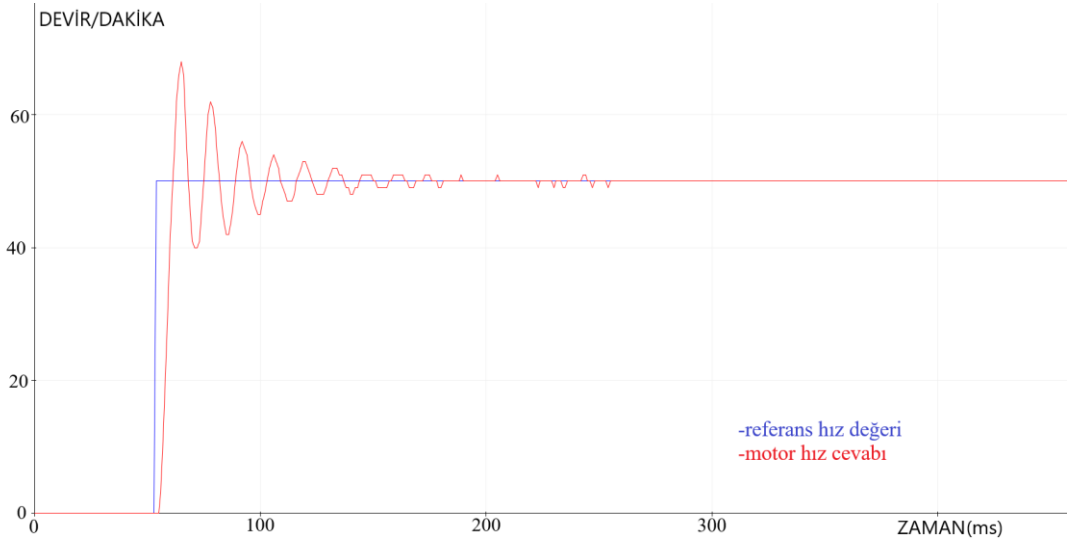
Bahsedildiği üzere kontrolcü parametrelerinin eyleyici sinyal üzerinde etkileri bulunmaktadır. Şekil 44'te görüldüğü üzere P kontrolcüye integral kazancı eklendiğinde

sistem cevabında gözlemlenen kalıcı durum hatası giderilmiştir. Ancak motor hız cevabında gözlemlenen salınım, kontrolcünün verimli olmadığını göstermektedir.



Şekil 44. Ziegler-Nichols PI Kontrolcü

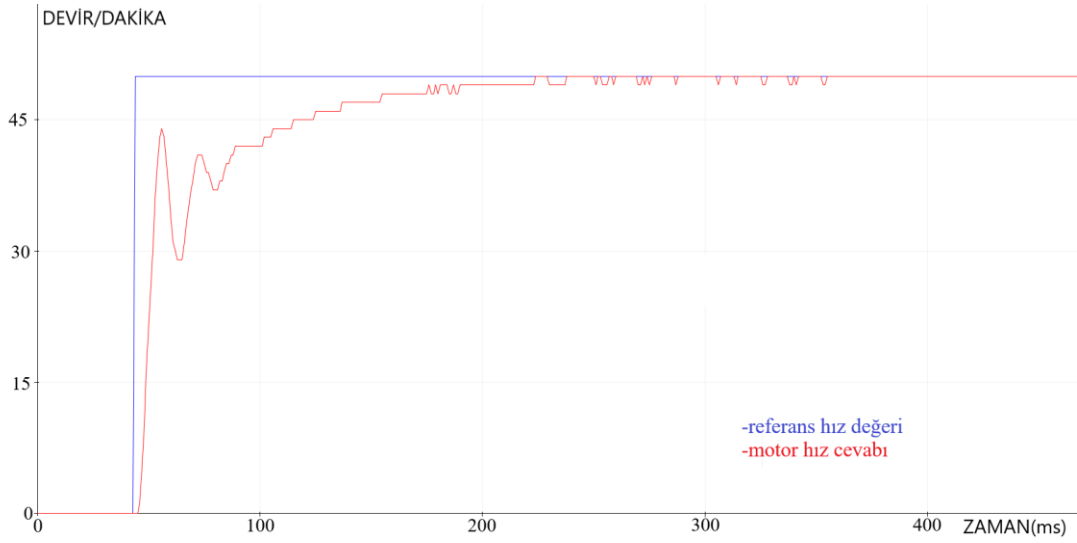
Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan PI kontrolcünün cevabında gözlemlenen salınımın sönümlenmesi için Z-N PID kontrolcü motor üzerinde denenmiştir. Şekil 45'te elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 45. Ziegler-Nichols PID Kontrolcü

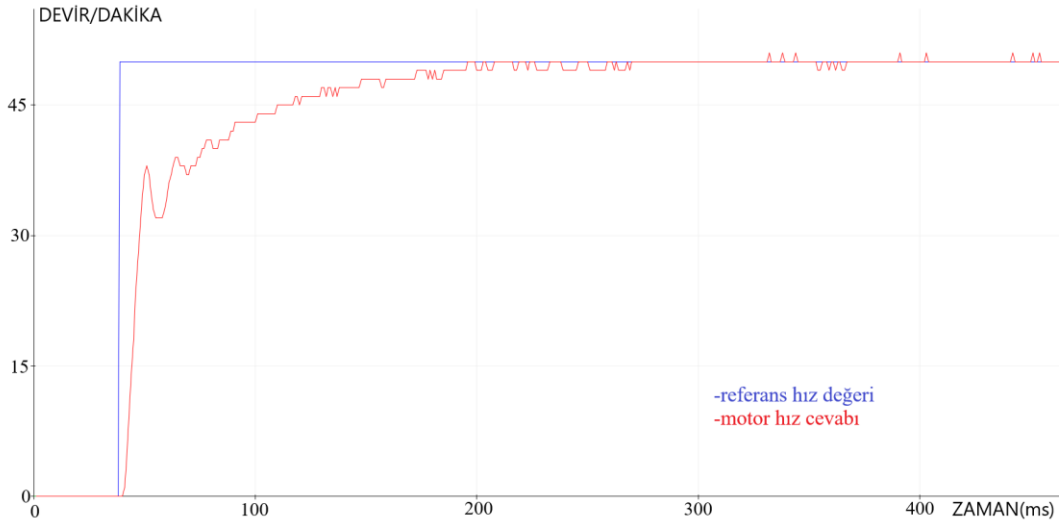
Ancak Ziegler-Nichols yöntemi ile elde edilen motor hız cevapları robot üzerinde kullanılmaya aşım ve salınımdan dolayı uygun değildir. Tablo 3 ve Tablo 4'te verilen bilgiler doğrultusunda Ziegler-Nichols yöntemi, Tyreus-Luyben yöntemine kıyasla

yüksek aşım değerlerine sahip sonuçlar vermektedir. Sonuçlar Şekil 46 ve Şekil 47’de gösterilmiştir.



Şekil 46. Tyreus-Luyben PI Kontrolcü

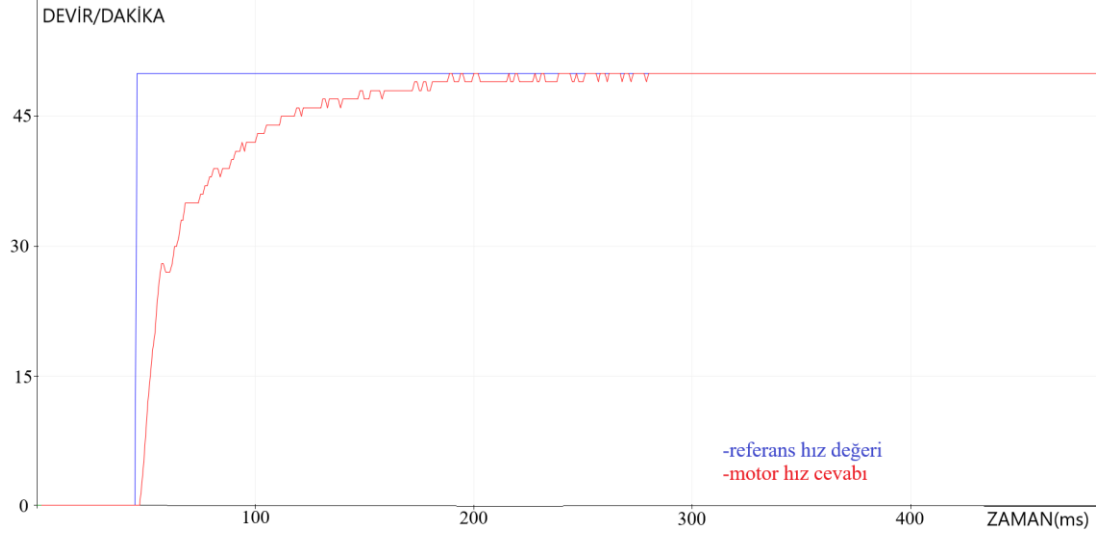
Tyreus-Luyben yöntemi, formül gereği düşük aşım değerlerine sahip daha kararlı sonuçlar vermektedir. Ancak Şekil 47’de görüldüğü üzere, sistem cevabının yükseliş zaman aralığında salınım yaşadığı görülmektedir.



Şekil 47. Tyreus-Luyben PID Kontrolcü

Bu salınımın giderilmesi amacıyla, elde edilen referans değerlerden yola çıkılarak, manuel parametre belirleme yöntemleri kullanılmıştır. Tyreus-Luyben yöntemiyle elde edilen PID parametreleri, Tablo 2’de verilen bilgiler doğrultusunda manuel ayarlama yöntemi ile yeniden belirlenmiştir. Referans değeri $k_p=1,40625$ $k_i=2.28214$

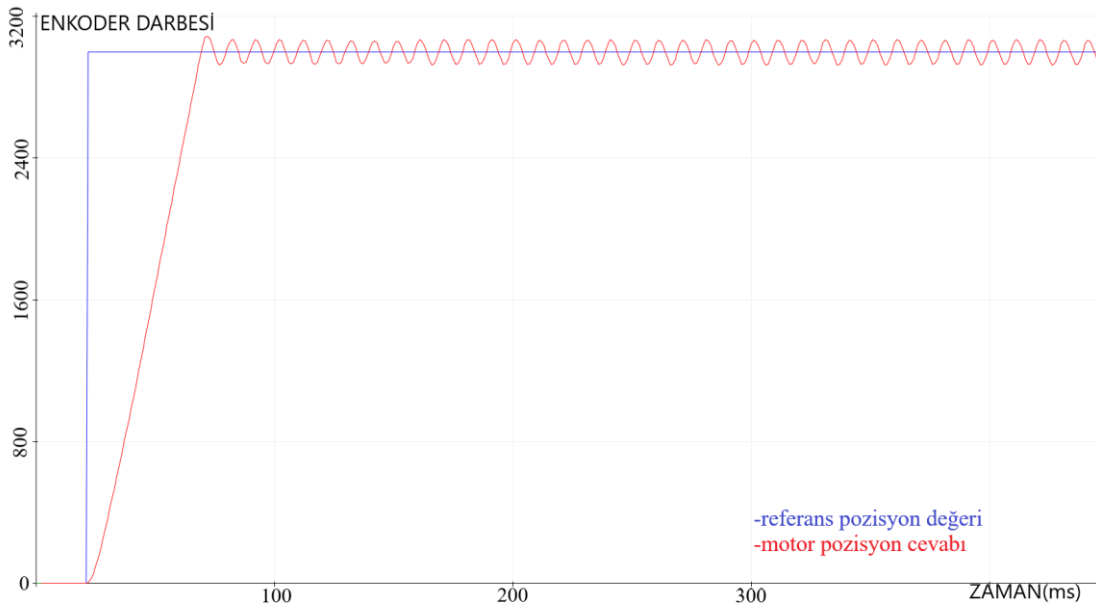
$k_d=0,062496$ olan PID kontrolcü parametreleri, $k_p=1,2$ $k_i=2$ $k_d=0,15$ olacak şekilde güncellenmiştir. Şekil 48’de sistemin nihai kontrolcü parametreleri ile verdiği cevap gösterilmiştir.



Şekil 48. Tyreus-Luyben PID Kontrolcü + Manuel Ayarlama

2.3.1.2. Sağ motorun saat yönünde hareketi

Bir önceki bölümde anlatılan parametre belirleme yöntemi aynı şekilde pozisyon kontrolü için de uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda motor nötr kararlılığa $k_p=1,7$ değerinde ulaşmıştır. Sistem cevabı ve değerleri Şekil 49 ve Şekil 50’de gösterilmiştir.



Şekil 49. Nötr Kararlılık Tespiti $k_p = 1,7$

```

16:48:39.312 -> 3000.00,3001 16:48:39.451 -> 3000.00,3000
16:48:39.312 -> 3000.00,3045 16:48:39.451 -> 3000.00,3045
16:48:39.312 -> 3000.00,3065 16:48:39.451 -> 3000.00,3065
16:48:39.359 -> 3000.00,3063 16:48:39.498 -> 3000.00,3062
16:48:39.359 -> 3000.00,3039 16:48:39.498 -> 3000.00,3038
16:48:39.359 -> 3000.00,2998 16:48:39.498 -> 3000.00,2998
16:48:39.406 -> 3000.00,2961 16:48:39.545 -> 3000.00,2962
16:48:39.406 -> 3000.00,2931 16:48:39.545 -> 3000.00,2932
16:48:39.406 -> 3000.00,2934 16:48:39.545 -> 3000.00,2935
16:48:39.451 -> 3000.00,2960 16:48:39.592 -> 3000.00,2960

```

Şekil 50. Salınım Periyodunun Tayin Edilmesi 2

Kullanılan DC motorlar 3000 enkoder darbe sayısında bir tam tur atmaktadır. Salınım periyodu ise örnekleme zaman aralıkları ve grafik değerleri takip edilerek tespit edilmektedir. Şekil 50’de salınım periyodunu tespit etmek için alınan iki örnek gösterilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda sistemin salınım periyodu 139-141 ms arasında olduğu gözlemlenmiştir. Referans değer olarak 140 ms kullanılmıştır.

$K_u=1,7$ ve $T_u=0,14$ değerleri parametre belirleme programına yerleştirildiğinde Şekil 51’de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

```

PID Parameter Estimation using Ziegler-Nichols and Tyreus-Luyben!
-----
Please Enter Kp@Neutral Stability : 1.7
Please Enter Tu = Oscillation Period in Seconds : 0.14
-----

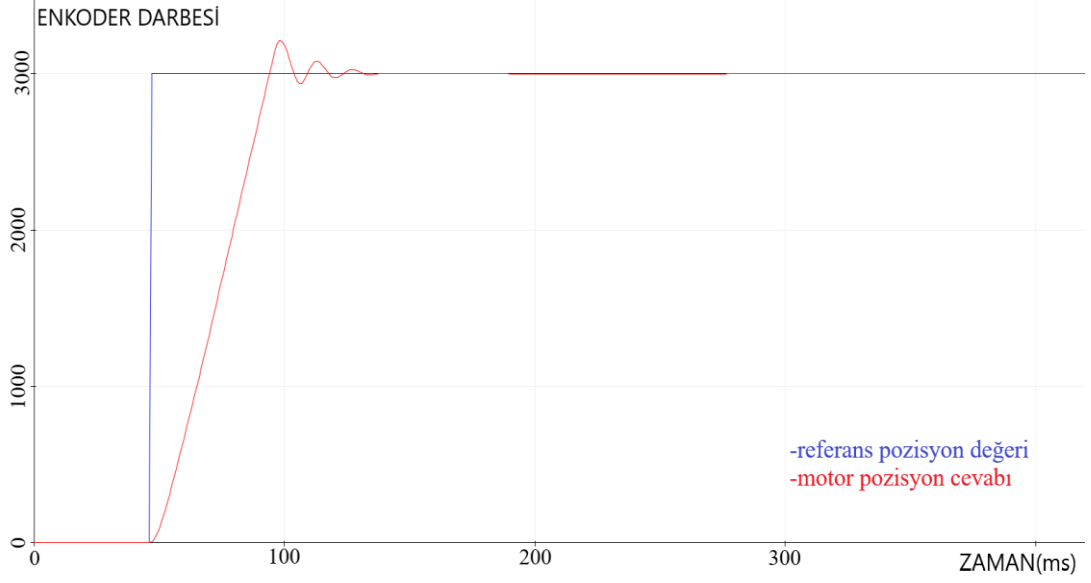
Ziegler-Nichols Method :
P          : 0.85          ||
PI         : 0.765         ||          6.55714
PID        : 1.02          ||          14.5714 ||          0.01785
-----

Tyreus-Luyben Method :
PI         : 0.53125      ||          1.72429
PID        : 0.53125      ||          1.72429 ||          0.0118048

```

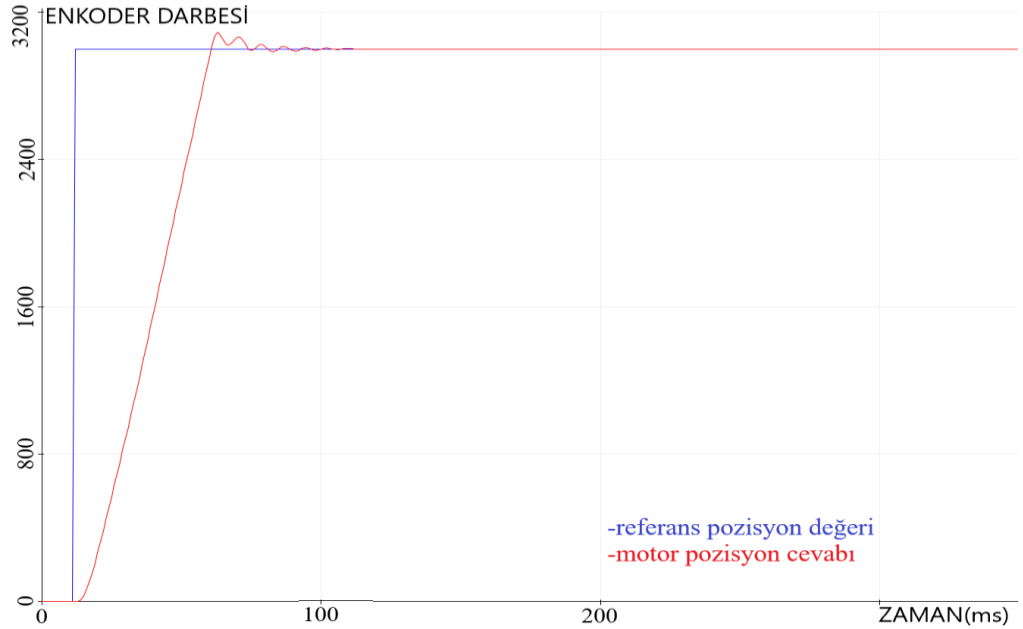
Şekil 51. Parametrelerin Belirlenmesi 2

Elde edilen sonuçlar motor üzerinde denenerek, cevaplar kıyaslanmıştır. Ziegler-Nichols yöntemi ile belirlenen PI kontrolcününün, aşım değerine sahip olduğu, oturma zamanının geç olduğu Şekil 52’de görülmektedir. Bu aşım değerleri mobil robot üzerinde kullanıldığında kayma sorununa yol açmaktadır.



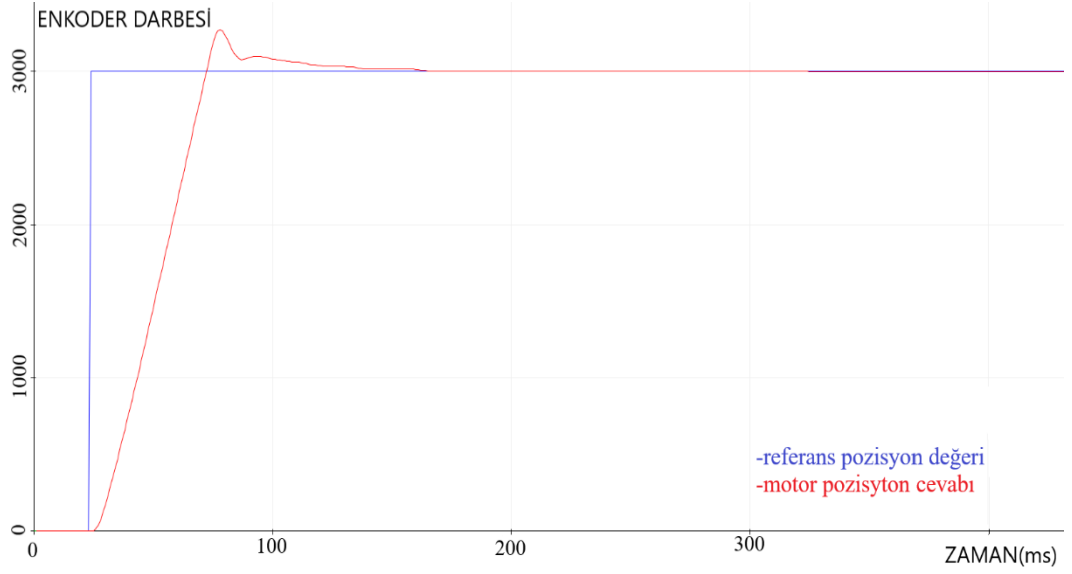
Şekil 52. Ziegler-Nichols PI Kontrolcü

Aynı metot ile geliştirilen PID kontrolcüde ise türev kazancı sayesinde aşım sönümlenmiş ve oturma zamanındaki bozukluk giderilmiştir. Ancak Şekil 53'te görüldüğü üzere türev kazancının sonucu olan sinyalin yerleşme anında gözlemlenen salınım verimli çalışmanın önüne geçmektedir.



Şekil 53. Ziegler-Nichols PID Kontrolcü

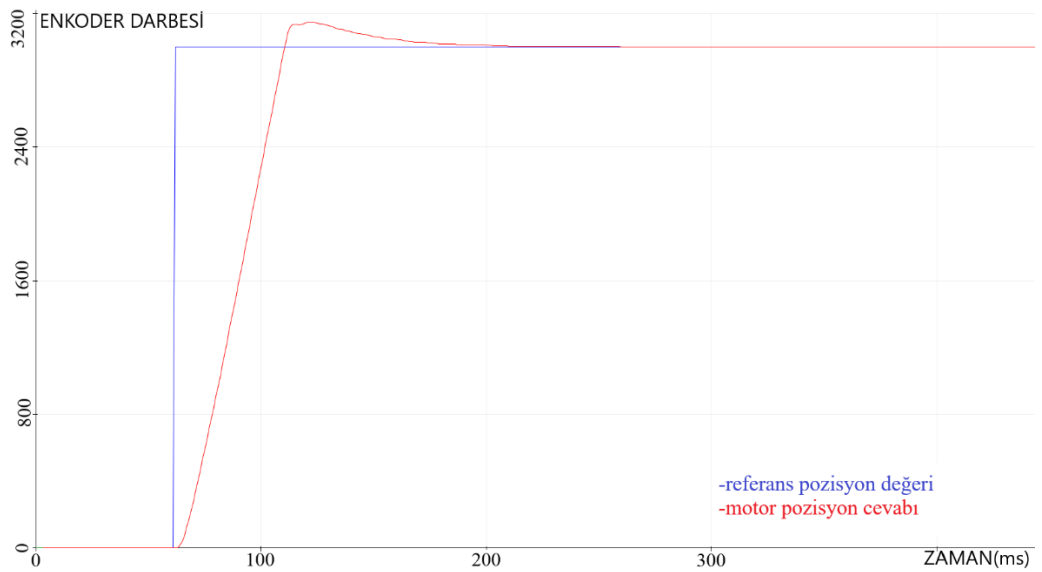
Tyres-Luyben yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 54 ve Şekil 55'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere aşım ve oturma zamanında meydana gelen bu bozukluklar sistemin verimli bir şekilde çalışmasına engel olmaktadır.



Şekil 54. Tyreus-Luyben PI Kontrolcü

T-L PI kontrolcü ile elde edilen cevaplarda aşım gözlemlenmektedir. Tablo 2’de verilen bilgilerden yola çıkıldığında integral kazancının sinyalin oturma zamanını geciktirdiği bilinmektedir. Şekil 54’te görüldüğü üzere sinyalin oturması gerçekleşmemiş 300 – 400 ms aralığında salınım yaptığı görülmüştür.

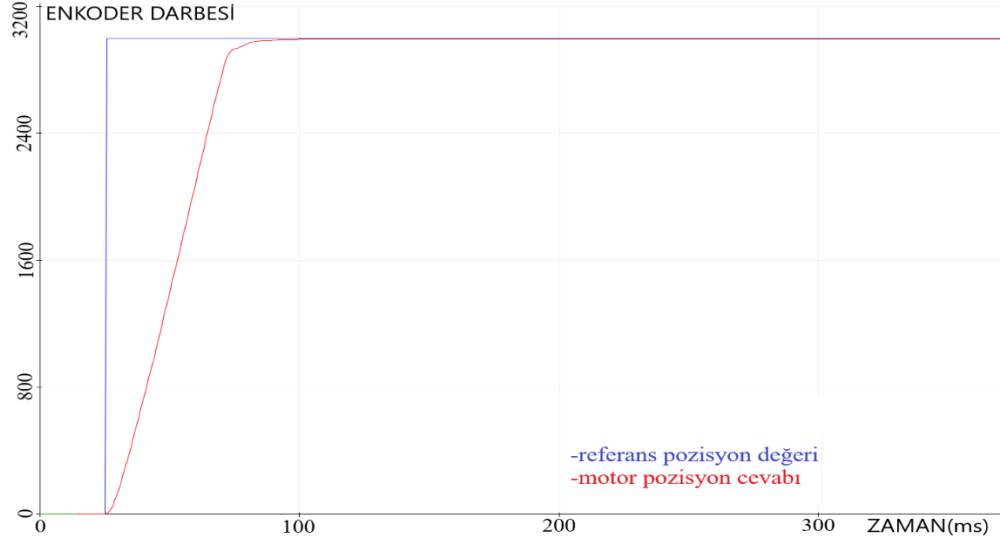
Oluşan bu etkinin bastırılması için kontrolcüde türev etkisine ihtiyaç vardır. Şekil 55’te PID kontrolcü motor cevapları gösterilmiştir. Aşım değerinde azalma sağlanmış, evet 300-400 ms arası gözlemlenen salınım bastırılmıştır. Ancak aşım değeri sönümlenememiştir.



Şekil 55. Tyreus-Luyben PID Kontrolcü

Sinyallerin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için manuel ayarlama yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar arasında aşım ve salınım değerlerinin en az olduğu gözlemlenen Tyreus-Luyben PID kontrolcü parametreleri referans olarak kullanılmıştır.

Başlangıç değerleri $k_p=0,53125$ $k_i=1,72429$ $k_d=0,0118048$ olan PID kontrolcü parametreleri manuel ayarlama yöntemi ile $k_p=0,4$ $k_i=1$ $k_d=0,015$ olarak ayarlanıp test edilmiştir. Sonuçlar Şekil 56'da gösterilmiştir.



Şekil 56. Tyreus-Luyben PID Kontrolcü + Manuel Ayarlama

Görüldüğü üzere Tyreus-Luyben PID kontrolcü referans değerleri ve manuel ayarlama yöntemi birlikte kullanılarak salınım ve aşım değerleri olmayan sonuçlar elde edilmiştir. Sistem cevabında gözlemlenen yaklaşık beş enkoder darbe sayısına karşılık gelen kalıcı durum hatası, bir tam turda elde edilen enkoder darbe sayısı ile karşılaştırıldığında oldukça küçük bir değer olduğu için ihmal edilmektedir.

2.3.2. Kazanç Planlama

Çalışma kapsamında ilk etapta, mobil robot saat yönünde 50 devir/dakika hızla hareket ederken elde edilen veriler ile Ziegler-Nichols parametre belirleme yöntemi kullanılarak PID kontrolcü tasarlanmıştır. Önceki başlıklar altında da incelendiği üzere, geliştirilen PID kontrolcü ile mobil robotun tüm çalışma koşullarında kararlılığı ve doğruluğu koruyamadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple mobil robotun ileri/geri hareketi, dönüşler ve hız girdilerinin değişmesi gibi çalışma koşullarındaki değişim durumlarında kararlılığını koruyabilmesi için kazanç planlama algoritması kullanılmıştır. Kazanç planlama,

doğrusal olmayan sistemler üzerinde yaygın olarak kullanılan bir mühendislik uygulamasıdır. Doğrusal olmayan sistemlerin, doğrusal zaman bağımsız parçalara indirgenerek sistemin kontrolünü kolaylaştırmayı hedeflemektedir (Shamma ve Athans, 1991).

Şekil 36’da gösterilen hesaplama birimi kullanıcıdan gelen verileri okuyarak ilgili motor gruplarının ayar noktalarını hesaplayıp ilgili kontrolcülere iletmektedir. Girdileri ve robot üzerinde bulunan sensörleri takip ederek, değişim değişkenini (DD) belirlemektedir. Değişim değişkeni kontrolcülerin ilgili parametre setleri arasında geçiş yapmasını sağlamaktadır. Kazanç planlama algoritmasının tetiklendiği, kontrolcü kazançlarında değişimin yapıldığı senaryolar ve tasarım noktaları aşağıda belirtilmiştir:

- Hız girdisinde değişim, Tasarım noktası: 50-100-150-200 devir/dakika
- Yön girdisinde değişim, Tasarım noktası: saat yönü ve saat yönünün tersi hareket
- Nokta dönüşü komutu

Tasarım noktaları belirlenirken sistemin çalışma koşulları göz önünde bulundurularak, tüm şartlar için parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Parametre belirsizliği veya yazılım mimarisinde oluşacak herhangi bir hata sistemi kararsızlığa götürecektir ve mobil robotun hız/pozisyon doğruluğu bozulacaktır.

Kazanç planlama algoritması sayesinde farklı tasarım noktaları için farklı parametreler belirlenebilmektedir. Üretilen kontrolcü işareti esneklik oluşturan bu durum sayesinde farklı tasarım noktalarında farklı yaklaşımlar sergilemek mümkündür.

Örneğin mobil robotun yüksek hızlarda hareket etmesi için üretilen kontrolcü sinyalinin aşım olmayacak/sönümlenecek şekilde ayarlanması, sistemin daha sağlıklı bir şekilde çalışmasını sağlayacaktır. Nokta dönüşü yapılırken üretilen kontrolcü sinyalinde ise aşım olması, robotun dönme esnasında kaymasına ve zorlanmasına sebep olan, dönme hareketi direnci olarak bilinen atalet momentinin etkilerinin azaltılmasına fayda sağlamaktadır.

Bahsedilen bu esneklik kullanılan kazanç planlama algoritmasının en büyük dezavantajı olmaktadır. Belirlenen her bir senaryo ve tasarım noktası için farklı kontrolcü parametreleri belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen tasarım noktası çeşitliliği arttıkça, ek parametre belirlenmesi gerekmekte ve bu durum zaman kaybına sebep olmaktadır.

2.3.3. Katmanlı PID

Mobil robotun eyleyicileri olan DC motorlara gerilim uygulandığında şaft pozisyonu ve hızı değişmektedir. Motor armatürüne uygulanan gerilimin süresi şaft pozisyonunu, seviyesi ise şaftın açısal hızını değiştirmektedir. Şekil 32’de gösterilen klasik PID kontrolcü yaklaşımında, DC motorların çıktısı olan hız ve pozisyon değerleri birbirinden bağımsız şekilde kontrol edilememektedir. DC motorların hızı doğrudan pozisyon kontrolcüsünün ürettiği kontrol işaretlerine bağlı olarak değişmektedir, motor şaft hızının denetimini yapan ara kontrol mekanizması bulunmamaktadır.

Şekil 33’te gösterilen motorların açık çevrim hız cevapları incelendiğinde uygulanan gerilimin seviyesi eşit olduğunda, motorların iç dinamikleri ve bağlantı için kullanılan kablolama farklılıklarından dolayı aynı hızda dönmedikleri görülmektedir. Hız denetiminin yapıldığı ek bir mekanizmanın olmadığı kontrol konfigürasyonunda, sağ tarafta bulunan motorlar sol tarafta bulunan motorlardan hızlı hareket ederek hedef pozisyona erken ulaşacak bu da mobil robotun yönelmesinde ve pozisyonunda hatalar oluşmasına neden olacaktır. Bu sebeple sağ ve sol tarafta bulunan motorların, dönüş hızlarının eşitlenmesi ve/veya motorların istenilen hız değerlerini takip etmesi gerekmektedir.

Kullanılan katmanlı PID kontrolcü yapısı ile hız ve pozisyon kontrolü birbirinden bağımsız olarak yapılabilmektedir. Bu sayede motor hızlarının birbirine eşit olmaması hatası çözülmüştür. Ayrıca hız kontrolü, pozisyon kontrolünden bağımsız hâle getirildiği için robot hedef pozisyona giderken istenilen hız değerinde kontrol edilebilmektedir.

Şekil 36’da gösterildiği üzere iç döngü motorların hızını, dış döngü ise motorların pozisyonunu kontrol etmektedir. Sistemin verimli çalışabilmesi için iç döngü hızı dış döngü hızından fazla olmalıdır. Böylece, pozisyon kontrolünü yapan kontrolcü, iç döngü üzerinde etki gösteren gerilim düşümü veya eğimli zeminde hareket sonucu oluşacak hız düşümü gibi bozuculardan etkilenmemektedir. Döngülerin kendi içlerinde oluşan hataları birbirinden izole edilmiştir.

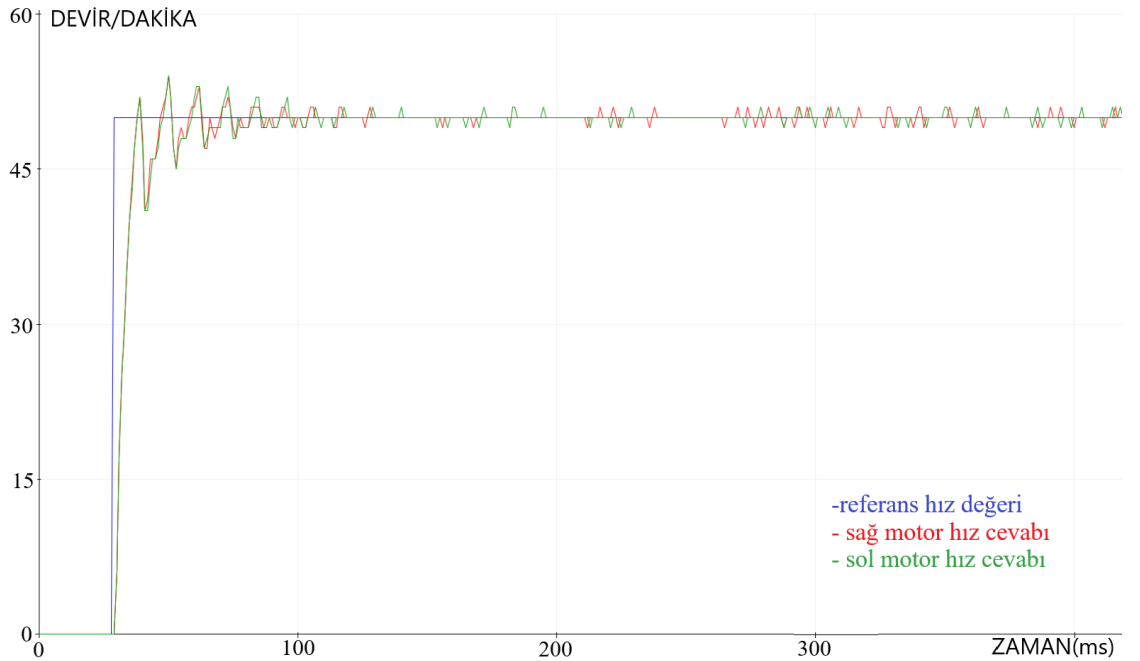
3. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde gerçekleştirilen mobil robotun kararlılığını, tasarlanan PID kontrolcülerin ve belirlenen parametrelerin performansların test etmek amacıyla dört farklı kategoride yapılan testler anlatılmıştır.

3.1. Hız Testi Sonuçları

Mobil robotun geliştirilmesi esnasında karşılaşılan ilk sorun sağ ve sol tarafta bulunan motorların eşit hızlarda dönmemesi sorunudur. Bu soruna çözüm olarak hız kontrolünü yapan PID kontrolcü geliştirilip test edilmiştir.

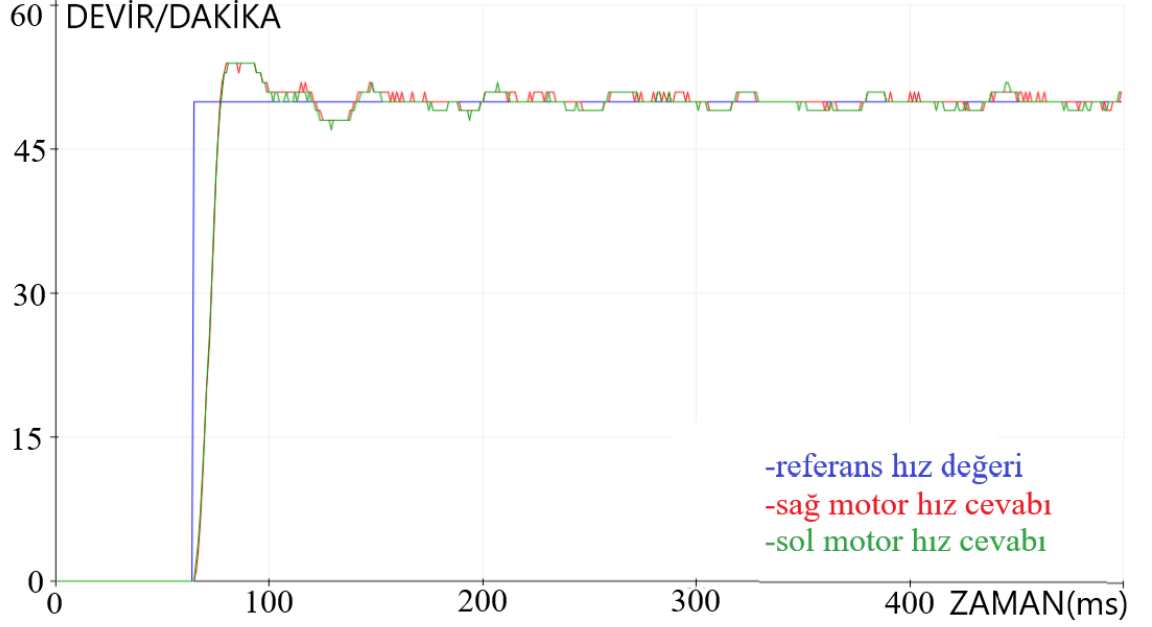
Mobil robot test düzeneği üzerinde kontrol edilirken (yük ve bozucu etkileri olmadığı durumlarda) 50 devir/dakika ve 100 devir/dakika için sistem cevabı Şekil 33'te gösterilmiştir. Parametre belirlenmesi bölümünde bahsedilen yöntemlerle elde edilen parametreler sonucunda alınan cevap ise Şekil 57'de gösterilmiştir.



Şekil 57. Test Düzeneği 50 Devir/Dakika

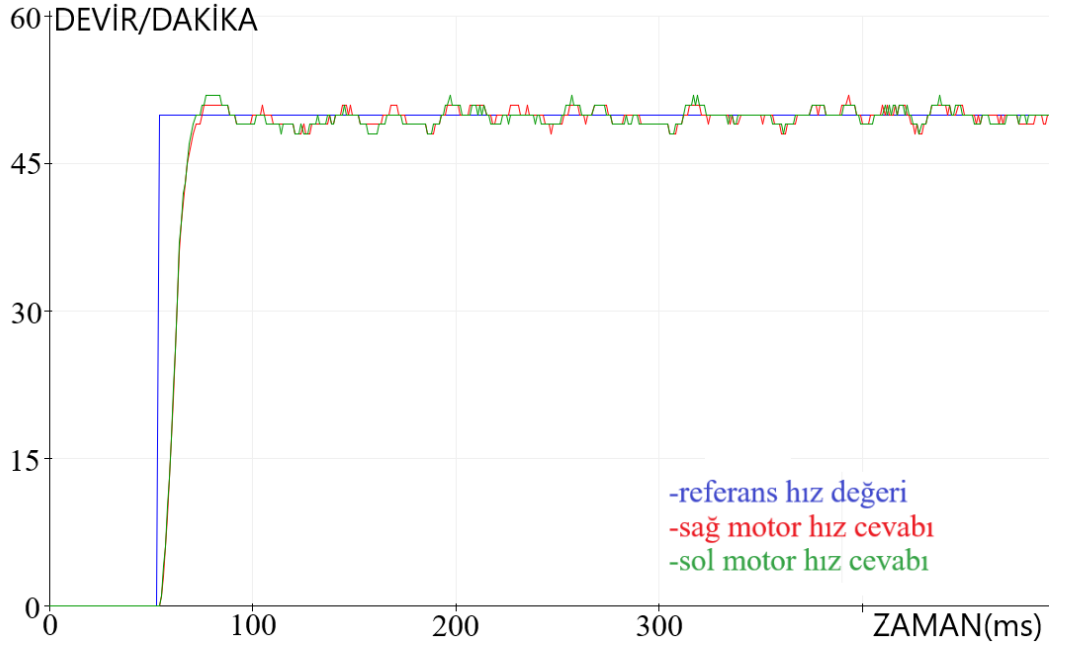
Görüldüğü üzere, bağımsız şekilde verimli sonuçlar alınan kontrolcüler senkronize çalıştıklarında yazılım mimarisi ve sistem gecikmelerinden dolayı sistem cevabında bozulmalara sebep olmaktadır.

Bu duruma çözüm olarak manuel PID parametre belirleme yöntemi kullanılarak sistem cevabı çevrimiçi olarak test edilerek uygun parametreler belirlenmiştir. Şekil 58’de elde edilen sistem cevabı gösterilmiştir.



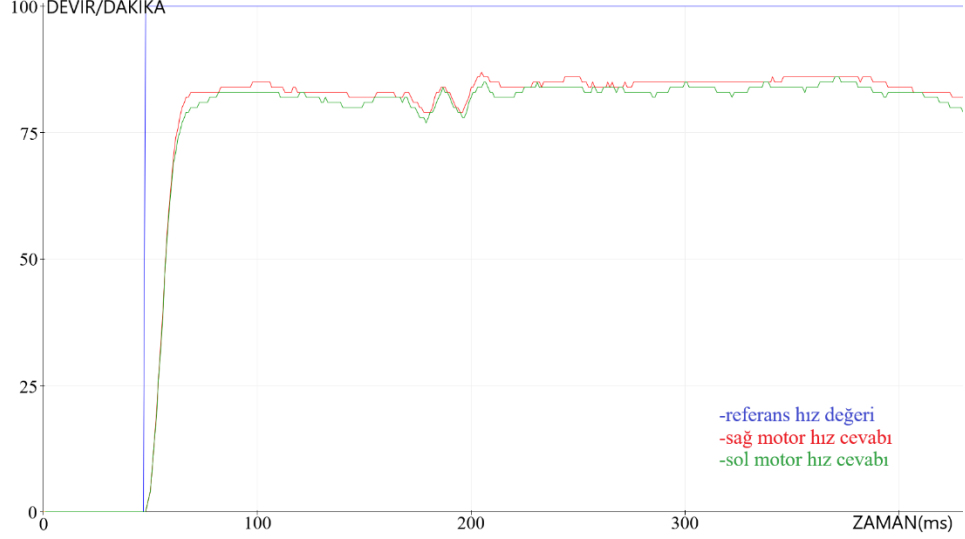
Şekil 58. 50 Devir/Dakika Çevrimiçi Manuel Parametre Belirleme

Yeniden belirlenen parametreler yaklaşık %15 eğimli bir zemin üzerinde test edilmiş, sonuçları Şekil 59’da gösterilmiştir.



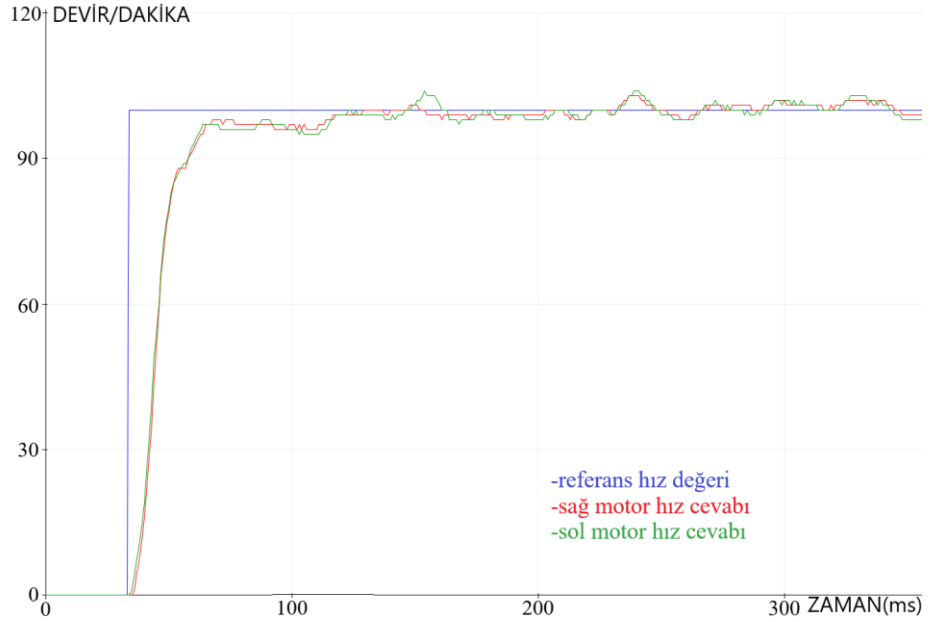
Şekil 59. %15 Eğim – Tırmanma

50 devir/dakika için uygulanan prosedürler, diğer hız değerleri için de uygulanmıştır. Şekil 60'ta sistemin test düzeneği üzerinde dış bozucu etkisi olmadan açık çevrim 100 devir/dakika için sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 60. Açık Çevrim 100 Devir/Dakika

Elde edilen sonuçlar kıyaslanarak, farklı çalışma koşullarında mobil robotun hız kontrolünde verimliliği arttırmak için manuel parametre ayarlaması yapılmıştır.

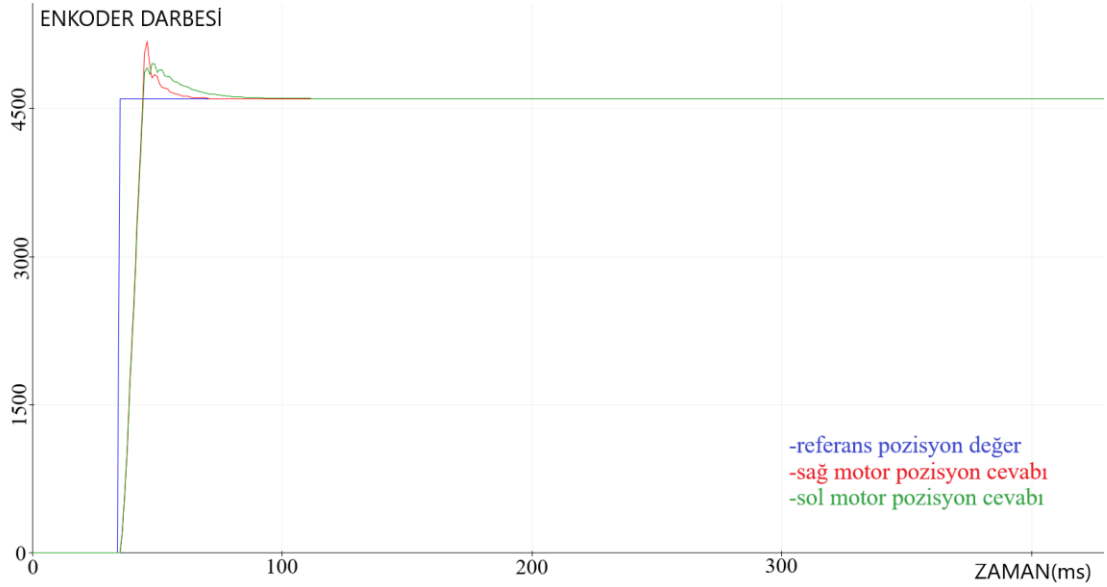


Şekil 61. 100 Devir/Dakika %15 Eğim Tırmanma

Şekil 61'de 100 devir/dakika hızla %15 eğim tırmanma test sonuçları gösterilmiştir. Görüldüğü üzere çevrimiçi ayarlanan parametreler ile zemin bozuklukları, eğim ve yük gibi bozucuların doğurduğu olumsuz sonuçlara çözüm sağlanmıştır.

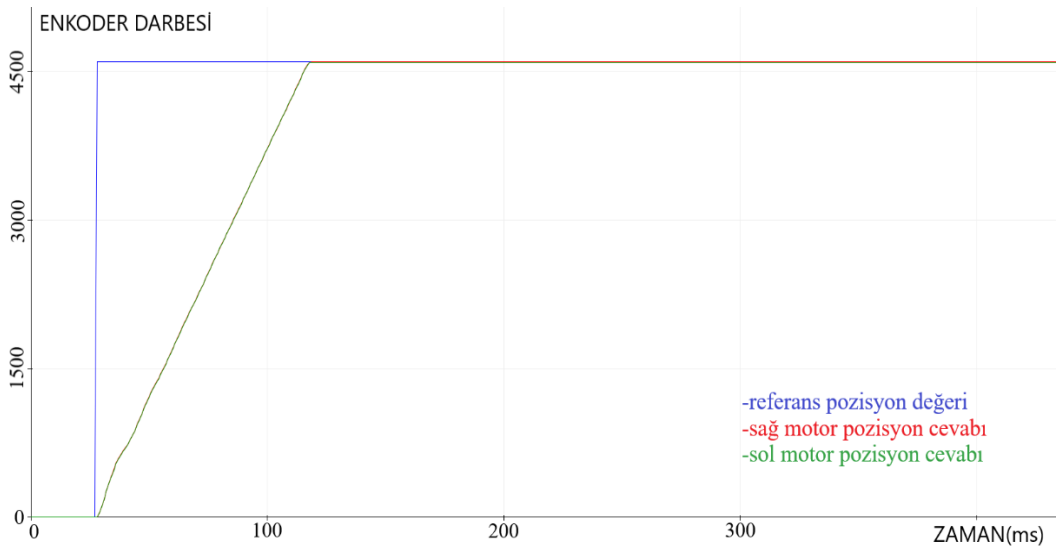
3.2. Doğru Boyunca Hareket Test Sonuçları

Çalışma kapsamında uygulanan testlerden biri olan doğru boyunca hareket testi ile mobil robotun istenilen mesafeye doğru bir şekilde hareketi test edilmiştir.



Şekil 62. 1m Pozisyon Kontrolü

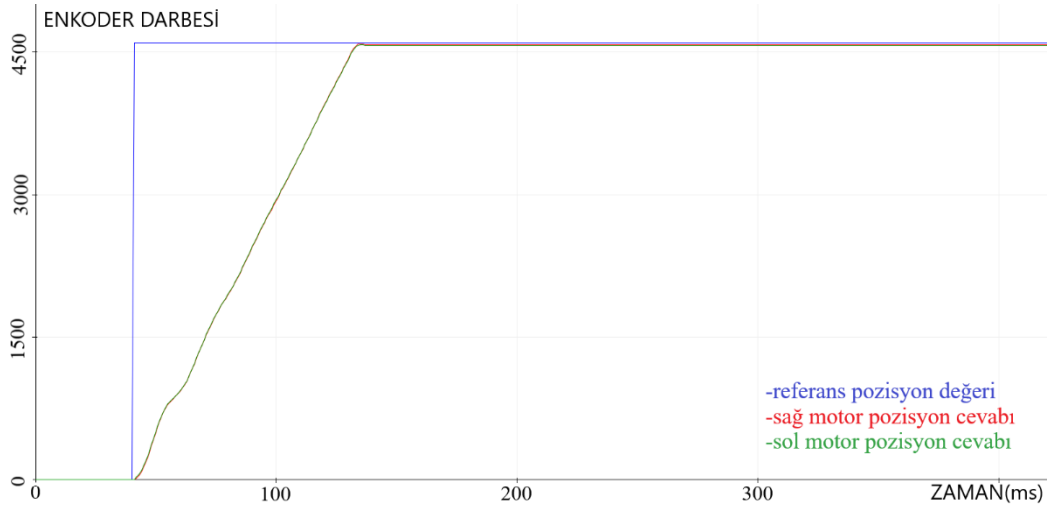
Hız testi sonuçları bölümünde anlatıldığı üzere tek başına verimli sonuçlar veren PID parametreleri, mobil robotta test edildiğinde verimlerinde kayıplar gözlemlenmektedir. Şekil 62’te gösterildiği üzere, motorların pozisyon takibi cevaplarında referans değer aşımaları oluşmakta ve motor gruplarında hız denetimi yapılmadığı için motor cevaplarında farklılıklar oluşmaktadır.



Şekil 63. 50 Devir/Dakika 1m Hız ve Pozisyon Kontrolü Zemin

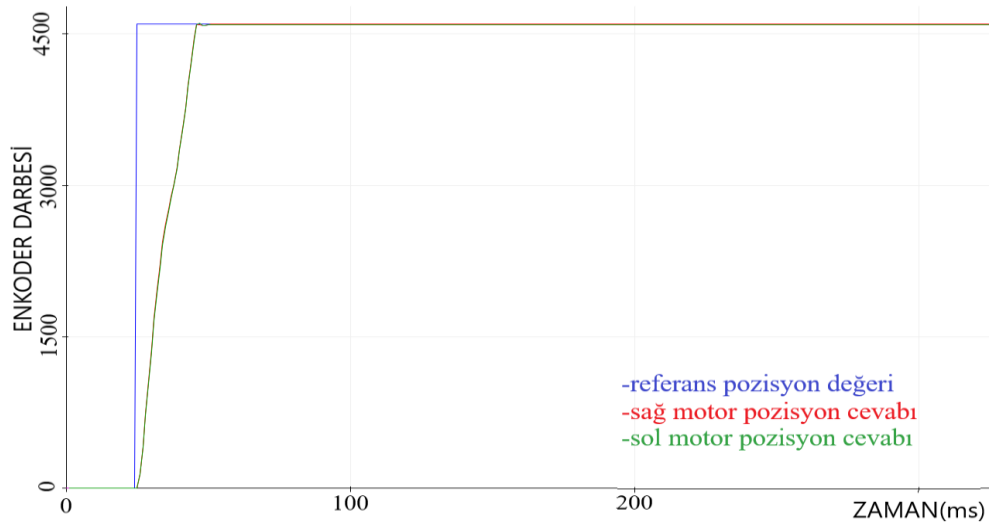
Bu soruna çözüm olarak, kazanç planlamalı katmanlı PID algoritması kullanılmıştır. Bu sayede hız ve pozisyon kontrolü bağımsız olarak yapılmakta, mobil robot istenilen hedef pozisyona ilerlerken hız kontrol yapılabilmektedir. Şekil 63'te görüldüğü üzere mobil robot 50 devir/dakika için bir metre pozisyon takibi aşım, salınım, kalıcı durum hatası ve motor grupları arasında farklılıklar olmadan başarılı bir şekilde yapılmıştır.

Kazanç planlamalı katmanlı PID algoritması kullanılarak elde edilen sonuçlar farklı hız değerleri ve farklı senaryolarda test edilmiştir.



Şekil 64. 50 Devir/Dakika 1m Hız ve Pozisyon Kontrolü Tırmanma

Şekil 64'te mobil robotun yaklaşık %15 eğime sahip zeminde 50 devir/dakika ile bir metre pozisyon takibinin sonuçları gösterilmiştir. Kalıcı durum hatası ve yönelme bozulması olmayan sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 65. 200 Devir/Dakika 1m Hız ve Pozisyon Kontrolü

Şekil 65’te ise kazanç planlamalı katmanlı PID kontrolcünün bir metre pozisyon 200 devir/dakika hız değerleri için sonuçları gösterilmiştir.

Kazanç planlama algoritması mobil robotun eğim, hız ve yön girdilerini takip ederek önceden belirlenen parametre setleri arasında geçiş yapmasını sağlamaktadır. Bu sayede sistem farklı girdilerde kararlılığını koruyarak hareket etmektedir.

Geliştirilen algoritma farklı hız ve pozisyon değerleri için test edilmiş ve klasik PID kontrolcü ile kıyaslaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 5. Doğru Boyunca Hareket Test Sonuçları

Hedef Pozisyon	Hız	Kontrolcü Tipi	Maksimum Yönelme	Nihai Yönelme	Maksimum Pozisyon	Nihai Pozisyon
100 cm	50 Devir/Dakika	PID	0°	0°	103 cm	101 cm
100 cm	50 Devir/Dakika	Katmanlı PID	0°	0°	100,8 cm	100,4 cm
200 cm	100 Devir/Dakika	PID	0,7°	0,7°	201,5 cm	200,5 cm
200 cm	100 Devir/Dakika	Katmanlı PID	0,3°	0,3°	201 cm	200,5 cm
400 cm	100 Devir/Dakika	PID	2,38°	2,38°	402,63 cm	400,29 cm
400 cm	100 Devir/Dakika	Katmanlı PID	0°	0°	400,3cm	400,2 cm
400 cm	200 Devir/Dakika	Katmanlı PID	2,63°	0,07°	401,1 cm	400,08 cm
20 m	50 Devir/Dakika	Katmanlı PID	-0,91°	-0,04°	20,016 m	20,002 m
20 m	100 Devir/Dakika	Katmanlı PID	-2,38°	0,04°	20,016 m	20,0003 m
50 m	50 Devir/Dakika	Katmanlı PID	-8,76°	0,02°	50,004 m	50,0039 m

Tablo 5’te gösterilen maksimum yönelme ve maksimum pozisyon değerleri aşım sonucu oluşan hataların maksimum değerleridir. Nihai pozisyon ve yönelme değerleri robotun verilen görev bittikten sonraki değerlerini ifade etmektedir.

3.3. Nokta Dönüşü Test Sonuçları

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere çalışma kapsamında tasarlanan mobil robot dört tekerden tahrikli kayma yönlendirmeli mobil robottur. Mobil robotun dönüşü için ek eyleyici bulunmamakta, robotun sağ ve sol tarafında bulunan motorlar zıt yönlerde döndürülerek nokta dönüşü sağlanmaktadır. Kullanılan konfigürasyonda karşılaşılan en büyük sorun doğruluğu yüksek dönüş sağlayabilmektir.

Mobil robotun dönüşleri için yapılan testler sırasında en verimli sonuçların 150 devir/dakika hızında sağlandığı gözlemlenmiştir. Tablo 6'da yapılan testlerden elde edilen sonuçlar ve klasik PID ile yapılan kıyaslama gösterilmiştir. Tabloda gösterilen yönelme bozulması mobil robotun hareketinde gözlemlenen aşım değerini, nihai yönelme ise mobil robot nihai yönelme açısını ifade etmektedir.

Tablo 6. Nokta Dönüşü Test Sonuçları

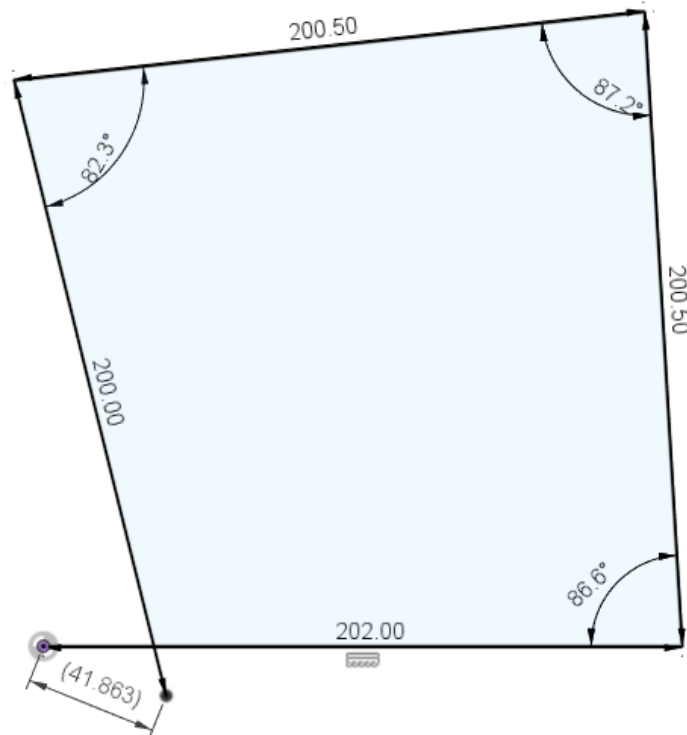
Hedef Yönelme	Kontrolcü Tipi	Yönelme Bozulması	Nihai Yönelme
45°	PID	47,9°	47,2°
45°	Katmanlı PID	45,7°	45,7°
90°	PID	88,37°	88,31°
90°	PID	86,6°	86,6°
90°	Katmanlı PID	90,44°	90,44°
90°	Katmanlı PID	89,94°	89,94°
90°	Katmanlı PID	89,87°	89,87°
180°	PID	177,81°	177,75°
180°	Katmanlı PID	180,19°	180,12°
180°	Katmanlı PID	180,06°	180°
270°	PID	272,3°	272,3°
270°	Katmanlı PID	270,44°	270,44°
360°	PID	358,94°	358,62°
360°	Katmanlı PID	359,62°	359,62°

3.4. Kare Güzergâh Takip Testi Sonuçları

Borenstein ve Feng (1995), yaptıkları çalışmada mobil robotların doğruluklarını test amacıyla kare güzergâh takip testini kurgulamışlardır. Bu test sayesinde mobil robotun doğru boyunca hareket ve açı dönme testi birlikte yapılabilmekte ve mobil robotun çalışma koşullarında genişlik oluşturulmaktadır, kare test alanında mobil robotun başlangıç bitiş pozisyonları kıyaslanarak toplam bozulma elde edilebilmektedir (Borenstein ve Feng, 1995).

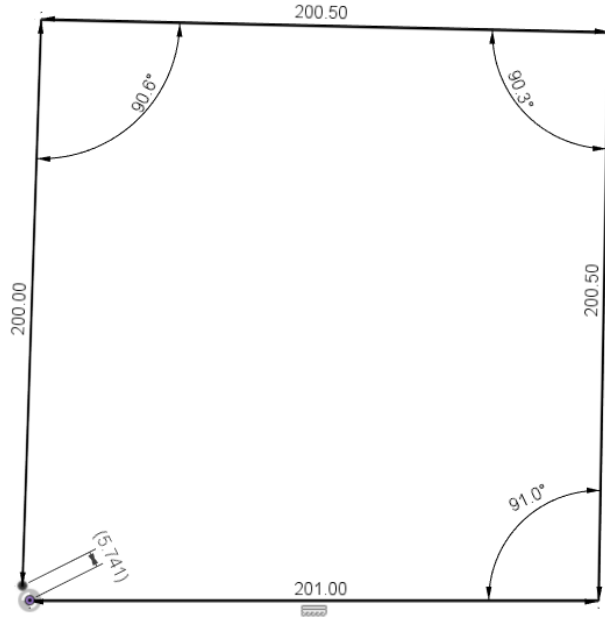
Çalışma kapsamında tasarlanan mobil robotun testleri yapılırken kıyaslama için Şekil 32 ve Şekil 36'da gösterilen iki farklı kontrolcü yapısı kullanılmıştır. Kontrolcülerin parametreleri Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben parametre belirleme yöntemi esas alınarak ayrı ayrı hesaplanmış, verimliliği arttırmak için gerekli noktalarda manuel ayarlama yapılmıştır.

İlk etapta klasik PID kontrolcü yapısı ile test edilen mobil robot 2 m^2 alan üzerinde yürütülerek Şekil 66'da gösterilen güzergâh elde edilmiştir



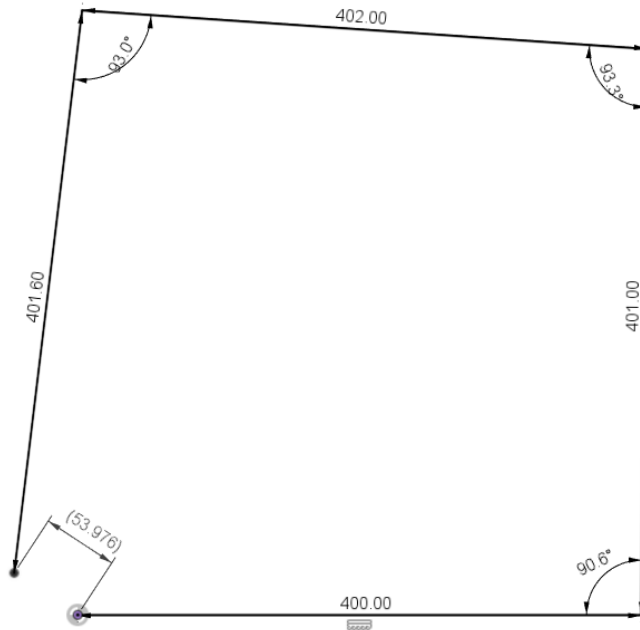
Şekil 66. Klasik PID 2 m^2

Nokta dönüşlerinde meydana gelen büyük hatalardan dolayı, mobil robotun nihai pozisyonunda 41,8 cm hata oluşturmuştur.



Şekil 67. Kazanç Planlamalı Katmanlı PID 2 m²

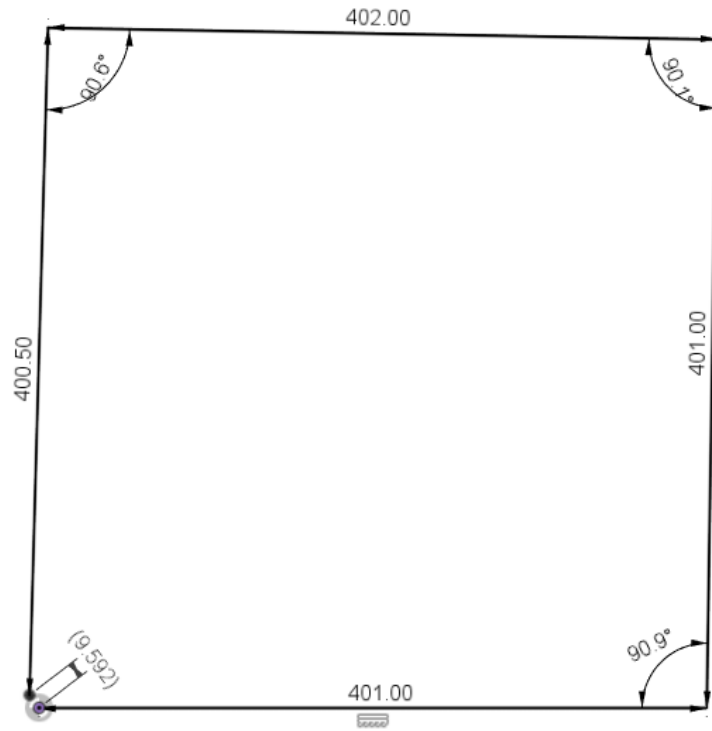
Çalışma kapsamında tasarlanan kazanç planlamalı katmanlı PID kontrolcü sayesinde, nokta dönüşlerinde karşılaşılan hatalar minimize edilmiştir. Mobil robota dönüş veya düz gitme komutu geldiğinde, mobil robot gelen göreve uygun olan hız ve parametre setine geçiş yaparak sistemin kararlılığını koruduğu Şekil 67’de gözlemlenmektedir. Mobil robotun nihai pozisyonunda hata 5,74 cm’ye indirilmiştir.



Şekil 68. Klasik PID 4 m²

Uzun mesafelerde görülebilecek bozulmaların varlığını test etmek amacıyla test 4 m² kare alan üzerinde uygulanmıştır. Şekil 68’de klasik PID kontrolcü ile elde edilen sonuçlar test edilmiştir. 2 m² testinde gözlemlenen nokta dönüşündeki yüksek hatalar 4 m² testinde de gözlemlenmekte ve mobil robotun nihai pozisyon sapması 53,97 cm olarak ölçülmüştür.

Şekil 69’da 4 m² kare güzergâh takip testinin sonuçları gösterilmiştir. Kazanç planlamalı katmanlı PID algoritması ile mobil robotta nokta dönüşü hataları indirgenmiş ve doğruluk artırılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda mobil robotun nihai pozisyon hatası 9,59 cm’ye indirilmiştir.



Şekil 69. Kazanç Planlamalı Katmanlı PID 4 m²

4. SONUÇ

Bu tez çalışmasında dört tekerden tahrikli kayma yönlendirmeli mobil robot tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından tespit edilen ve çalışmalar esnasında karşılaşılan sorunlara çözüm bulmak ve mobil robotun pozisyon hassasiyetini arttırmak amacıyla kazanç planlamalı katmanlı PID algoritması uygulanmıştır. Kazanç planlama algoritması ile mobil robotun çalışma koşullarında değişim gerçekleştiğinde önceden belirlenen parametre setlerine geçiş sağlanmıştır. Katmanlı PID algoritması ise pozisyon ve hız takibini birbirinden bağımsız hâle getirilmiştir. Bu sayede farklı çalışma koşullarında ve hız değerlerinde doğruluğunu ve kararlılığını koruyan kontrolcü yapısı oluşturulmuştur. Tasarlanan PID kontrolcülerin parametrelerini belirlemek için Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben ve manuel ayarlama yöntemleri kullanılmıştır.

Mobil robotun doğruluğunu ve kararlılığını test etmek amacıyla hız, doğru boyunca, nokta dönüşü ve kare güzergâh takip testleri uygulanmış ve sonuçları klasik PID kontrolcü ile kıyaslanmıştır. Testler tekrarlı bir şekilde yapılarak doğru sonuca ulaşabilmek için sonuçların ortalaması alınmıştır. Uygulanan kontrolcü yapısı sayesinde;

- Doğru boyunca hareket görevlerinde 100, 200, ve 400 cm için sistem cevaplarından aşım ve salınım ortadan kaldırılarak yaklaşık %2 iyileştirme sağlanmıştır.
- Nokta dönüşlerde meydana gelen kalıcı durum hatası yaklaşık %2 iyileştirme sağlanmıştır.
- Kare güzergâh takibi testlerinde başlangıç ve bitiş pozisyonları arasındaki nihai pozisyon hatası 2 m² ve 4 m² kare alan için 10 cm'nin altına indirilmiştir.

Elde edilen veriler doğrultusunda kazanç planlamalı katmanlı PID kontrolcü sayesinde mobil robotun pozisyon hassasiyeti artırılmış, pozisyon kontrolcüsüyle eş zamanlı çalışan hız kontrolcüsü sayesinde istenilen pozisyona istenilen hızda gitme hedefine ulaşılmış, nokta dönüşlerinde kayma azaltılarak yönelme açısında iyileştirme sağlanmıştır. Farklı sektörlerde çeşitli uygulama alanlarında kullanılacak kararlı bir dört tekerden tahrikli kayma yönlendirmeli mobil robot platformu gerçekleştirilip testleri yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- Agung, I. G. A. P. R., Huda, S. ve Wijaya, I. W. A. (2014). Speed control for DC motor with pulse width modulation (PWM) method using infrared remote control based on ATmega16 microcontroller. *Proceedings - 2014 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems: Towards Greener Globe Through Smart Technology, ICSGTEIS 2014*
- Borenstein, J. ve Feng, L. (1996). Gyrodometry: a new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* içinde (C. 1, ss. 423–428). IEEE.
- Borenstein, Johann ve Feng, L. (1995). UMBmark: a benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots. *Mobile Robots X* (C. 2591).
- Dudek ve Jenkin. (t.y.). *CS W4733 NOTES - Differential Drive Robots*.
- Gönüllü, M. K. (2013). *Development Of A Mobile Robot Platform To Be Used In Mobile Robot Research. Middle East Technical University*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hajdu, S., Brassai, S. T. ve Szekely, I. (2017). Complementary filter based sensor fusion on FPGA platforms. *Proceedings - 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2017 and 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP 2017* içinde .
- Kozłowski, K. ve Pazderski, D. (2004). Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot: From theory to practice. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 14(4).
- Kumar, U. D., Nisha, M. ve Mathivanan, N. (2018). Tracking of a PID Driven Differential Drive Mobile Robot. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, 8(27), 3690–3704.
- Li, Y. (2007). Li, Y. and Ang, K.H. and Chong, G.C.Y. (2006) PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(November), 32–41.

- Mandow, A., Martínez, J. L., Morales, J., Blanco, J. L., García-Cerezo, A. ve González, J. (2007). Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile robots. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*
- Martínez, J. L., Mandow, A., Morales, J., Pedraza, S. ve García-Cerezo, A. (2005). Approximating kinematics for tracked mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, 24(10).
- Olson, E. (2004). *A Primer on Odometry and Motor Control*.
- Orman, K., Basci, A. ve Derdiyok, A. (2016). Speed and direction angle control of four wheel drive skid-steered mobile robot by using fractional Order PI controller. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 22(5).
- Shahrokhi, M. ve Zomoroddi, A. (2014). Comparison of PID Controller Tuning Methods.
- Shamma, J. S. ve Athans, M. (1991). Gain scheduling: Potential hazards and possible remedies. *Proceedings of the American Control Conference*.
- Soffar, H. (2019, 3 Mart). Wheeled robots types, uses, advantages and disadvantages.
- Wang, T., Wu, Y., Liang, J., Han, C., Chen, J. ve Zhao, Q. (2015). Analysis and experimental kinematics of a skid-steering wheeled robot based on a laser scanner sensor. *Sensors (Switzerland)*, 15(5).
- Yi, J., Wang, H., Zhang, J., Song, D., Jayasuriya, S. ve Liu, J. (2009). Kinematic modeling and analysis of skid-steered mobile robots with applications to low-cost inertial-measurement-unit-based motion estimation. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(5).
- Asahi Kasei Microdevices Corp 2022, Principle and advantages of magnetic encoder
ErişimAdresi:<https://www.akm.com/eu/en/products/rotation-angle-sensor/tutorial/magnetic-encoder/> Erişim Tarihi: Mayıs 2022
- Samanci, B. (2011). Accelerometer, Gyroscope, IMU nedir? Erişim Adresi:
<http://www.barissamanci.net/Makale/26/accelerometer-gyroscope-imu-nedir/> Erişim Tarihi: Mayıs 2022
- Motion Control Online Marketin Team. (2019). Erişim Adresi:
<https://www.automate.org/blogs/benefits-of-dc-motors-and-why-they-re-great-for-robotics> Erişim Tarihi: Mayıs 2022

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : ALİ ERKAM IŞIK

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : 2018, KTO Karatay Üniversitesi

Yüksek Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller : *İngilizce*

Bilimsel Faaliyetleri : -

İŞ DENEYİMİ

Stajlar : 2017, Araştırma Geliştirme Stajyeri, BİTES Savunma

2017, Araştırma Geliştirme Stajyeri, Byrokon Elektronik

Projeler : -

Çalıştığı Kurumlar : 2019, Mekatronik Mühendisi, KTO Karatay Üniversitesi Akıllı Teknolojiler Merkezi

Tarih: 19 Temmuz 2022