



**OTOMATİK YÖNLENDİRMELİ BİR
ARACIN GERÇEK ZAMANLI YÖRÜNGE
KONTROLÜNÜN KAYAN KIPLI KONTROLÇÜ
İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Mehmet Rasim YILDIRIM

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet DUMLU**

2018

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OTOMATİK YÖNLENDİRMELİ BİR ARACIN
GERÇEK ZAMANLI YÖRÜNGE KONTROLÜNÜN
KAYAN KIPLI KONTROLÇÜ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Mehmet Rasim YILDIRIM

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet DUMLU

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2018

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

OTOMATİK YÖNLENDİRMELİ BİR ARACIN
GERÇEK ZAMANLI YÖRÜNGE KONTROLÜNÜN
KAYAN KIPLI KONTROLCÜ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet DUMLU danışmanlığında, Mehmet Rasim YILDIRIM tarafından hazırlanan bu çalışma 25 / 09 / 2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği / Oy çokluğu ile (.../...) ile kabul edilmiştir.**

Başkan	:	İmza	:
Üye	:	İmza	:
Üye	:	İmza	:
Üye	:	İmza	:
Üye	:	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

25 / 09 / 2018

İmzası

Mehmet Rasim YILDIRIM

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OTOMATİK YÖNLENDİRMELİ BİR ARACIN GERÇEK ZAMANLI YÖRÜNGE KONTROLÜNÜN KAYAN KIPLI KONTROLCÜ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Mehmet Rasim YILDIRIM

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet DUMLU

Bu tez çalışmasında; otomatik yönlendirmeli bir aracın tasarımı ve analizi yapılarak belirlenen bir yörüngeyi takibinin denetimi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle tasarlanan aracın kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sayesinde araca Kartezyen koordinatlarda bir yörünge tanımlandığında bu yörüngeyi gerçekleştirebilmesi için gerekli olan araç tekerlek hız değişimleri belirlenebilmiştir. Aracın kinematik analizinin gerçekleştirilmesinin ardından sistemin dinamik analizli Lagrangian tekniğinden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm analizlerin yapılmasından sonra otomatik yönlendirmeli bir elektrikselsel aracın tasarımı yapılmıştır. Sistemin gerçek zamanlı yörünge izleme performansını artırabilmek için farklı tipte kontrol teknikleri uygulanmıştır. İlk olarak sistemin gerçek zamanlı yörünge izleme kontrolü PID kontrolü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ardından sistemin yörünge izleme performansını artırabilmek için sistemin matematiksel modelinin göz önüne alındığı kayan kipli kontrol yönteminden yararlanılmıştır. Yapılan gerçek zamanlı kontrol deneylerinin sonuçlarından elde edilen verilere göre sistem için yapılan analizlerin doğruluğu kanıtlanmış olup özellikle kayan kipli kontrol yönteminin kullanılması ile sistemin yörünge takip kontrolü güçlendirmiştir.

2018, 37 sayfa

Anahtar Kelimeler: PID Kontrol, Robot Kontrol, Kayan Kipli Kontrolcü, Yörünge Kontrol

ABSTRACT

MS. Thesis

REAL-TIME IMPLEMENTATION OF SLIDING MODE CONTROL TECHNIQUE FOR TRAJECTORY TRACKING CONTROL OF MOBILE ROBOT

Mehmet Rasim YILDIRIM

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ahmet DUMLU

In this study, real-time trajectory tracking control of an autonomous mobile robot, actuated by two DC motors, has been designed, analyzed and studied. Two different control approaches such as model based sliding mode (SMC) and the classical proportional–integral–derivative (PID) control have been employed to increase the tracking performance of the mobile robot. Firstly, kinematic and dynamic analysis of the system have been obtained and then this dynamic model has been used for proposed sliding mode controller in order to increase trajectory tracking performance of the system. The experimental outcomes strongly verified that the proposed controller gives a quite well trajectory tracking response and smaller magnitude overshoot compared with the classical PID controller.

2018, 37 page

Keywords: PID control, Robot control, Sliding mode control, Trajectory control.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın planlanması ve yürütülmesinde teşvik, tavsiye ve yardımlarını eksik etmeyen saygıdeğer hocam Sayın. Dr. Öğr. Üyesi Ahmet DURLU'ya teşekkürlerimi sunarım.Yüksek Lisans öğrenciliğim boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen doktora jüri üyelerine, Erzurum Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyeleri'ne, Atatürk Üniversitesi Elektrik Elektronik Bölümü teknisyeni Sayın Mustafa Yıldırım Bey'e teşekkürü bir borç bilirim.

Mehmet Rasim YILDIRIM

Eylül 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM	7
3.1. OYA'nın Kinematik Analizi	7
3.2. OYA'nın Kısıtlama fonksiyonlarının Belirlenmesi	9
3.3. OYA'nın Dinamik Analizi	10
3.4. OYA'nın Tasarımı.....	13
3.5. OYA'nın Yörünge Kontrolü için Yararlanılan Kontrol Yöntemleri.....	20
3.5.1 Klasik PID kontrol yöntemi	20
3.5.2 Kayan kipli kontrol yöntemi	22
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	25
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	35
KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	37

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
L	Motorlar arası mesafenin yarısı
R	Tekerlek Yarıçapı
G	OYA'nın ağırlık merkezi
ϕ	Aracın yönelim açısı
r(t)	Referans değeri veya istenilen değer
y(t)	ölçülen değer
e(t)	hata değeri
u(t)	kontrol değişkeni
θ_r	Sağ tekerleğin yönelim açısı
θ_l	Sol tekerleğin yönelim açısı
q_d	SMC için ulaşılmak istenilen referans değer
q	SMC için sistem çıktı büyüklüğü
λ	değeri sabit katsayılı pozitif bir matristir

Kısaltmalar

OYA	Otomatik Yönlendirmeli Araç
AGV	Automated Guided Vehicle
KKK	Kayan Kipli Kontrolcü
SMC	Sliding Mode Controller
P	Proportional Controller
I	Integrative Controller
D	Derivative Controller
PID	Proportional Integrativ Derivative Controller
Hz	Hertz

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 OYA Örnekleri	2
Şekil 3.1 Otomatik yönlendirmeli aracın üstten görünüşü	7
Şekil 3.2 Araç tekerleğinin çizgisel hız gösterimi.....	9
Şekil 3.3 OYA'nın genel görünüşü.....	13
Şekil 3.4 OYA'nın alttan görünüşü:	13
Şekil 3.5 OYA'nın çeşitli yönlerden görünüşü	14
Şekil 3.6 Veri iletişim kartı.....	14
Şekil 3.7 OYA'nın tekerleklerine bağlı motorlar	16
Şekil 3.8 MD03 Motor sürücüsü özellikleri.....	17
Şekil 3.9 OYA Bataryası	17
Şekil 3.10 Güç kartı.....	18
Şekil 3.11 Güç dağıtım kartı şeması	18
Şekil 3.12 Güç kartı baskı devre şeması	19
Şekil 3.13 PID Kontrol blok diyagramı	20
Şekil 3.14 Kayan kipli kontrolcü blok diyagramı	24
Şekil 4.1 Matlab Simulink' te Hazırlanan Kontrol Yazılımı	25
Şekil 4.2 Sekiz şeklinde yörünge için sağ ve sol tekerleğin yapması gereken açısal hız değişimleri	27
Şekil 4.3 Sekiz şeklinde yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri	28
Şekil 4.4 Sekiz şeklinde yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri	30
Şekil 4.5 Tanımlanan yörüngeye göre sağ ve sol tekerleğin yapması gereken açısal hız değişimleri	31
Şekil 4.6 OYA'nın tanımlanan yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri	32
Şekil 4.7 OYA'nın tanımlanan yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri	34

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Data iletişim kartı özellikleri.	15
Çizelge 3.2 Motor özellikleri	16
Çizelge 3.3 OYA bataryası özellikleri	18
Çizelge 3.4 PID Kontrolcülerin özellikleri	21



1. GİRİŞ

Teknolojinin hızla geliştiği 21. yüzyılda robotlar her geçen gün önemini daha da arttırarak hayatımıza ve özellikle de iş hayatımıza girmeye başlamışlardır. İnsandan daha az hata yapması, daha efektif çalışması, daha hızlı üretim sağlaması sebebiyle her geçen gün üretimde daha fazla tercih edilir hale gelmişlerdir. Elektro-mekanik olarak gelişmeye fazlasıyla müsait olduklarından literatürde bir çok araştırmacı robotların farklı tasarımları veya optimum yörünge kontrolü gibi alanlarda farklı çalışmalar yapmaktadır.

Genelde endüstri alanında kullanılan, insanlar için tehlike arz edebilecek işleri üstlenen, sadece programlanarak insansız bir şekilde hareket edebilen robot çeşitlerine literatürde otomatik yönlendirmeli araç (OYA) adı verilmektedir. Bu tip robotlar son dönemlerde fabrikalarda sıkça malzeme taşıma, istifleme ve nakliyat alanında kullanılmaktadırlar. OYA'lar diğer malzeme taşıma sistemlerine göre daha düşük maliyetli olmaları, kendine özel bir hareket yolu veya raylı bir sisteme ihtiyaç duymamaları, az yer kaplamaları, rotalarının düşük maliyetler ile değiştirilip tekrar kullanılabilmeleri gibi özellikleri ile bazı avantajları ile tercih sebebidirler. OYA'lar otomobil fabrikalarında parça taşıma, malzeme depolarında malzeme nakliyatını sağlama gibi işlerde aktif olarak kullanılmaktadırlar. Örneğin Toyota otomobil fabrikalarında kullanılan OYA'lar yıllık 1 milyon \$ üzerinde tasarruf sağlamakta, fabrika içinde insanlar tarafından kat edilen yolu 1574 kilometre azaltmakta, her nakliye turunda insana göre 35 saniye daha az sürede turunu tamamlayarak iş süresine katkı sağlamaktadırlar.

Genellikle, OYA'lar üzerindeki başlıca araştırma konuları olarak, mekanik tasarım, sistem dinamiği ve yörünge izleme kontrolü gibi konular ön plana çıkmaktadır. Endüstride ağır yükleri taşımak, çekmek, kaldırmak ve transfer etmek için kullanılan farklı tipte tasarlanmış otomatik yönlendirmeli araçlara ait görseller Şekil1-1'de verilmiştir.

1. GİRİŞ



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil-1.1 OYA Örnekleri

(a) Ağır Yükleri Taşımak için Kullanılan OYA. (b) Yükü Çekmek için Kullanılan OYA.
(c)Yük Kaldırma ve İstifleme için Kullanılan OYA. (d) Hafif Yüklerin Transferi için Kullanılan OYA.

Şekil-1.1’ de gösterilen her bir OYA’nın söz konusu ürünleri belirli bir başlangıç konumdan önceden belirlenmiş hedef konuma en hızlı ve en doğru bir şekilde götürebilmesi için en iyi doğrulukta yörünge kontrollerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. OYA’lar tekerlerindeki yuvarlanma kısıtlamalarından dolayı holonomik olmayan bir sistem yapısına sahiptir. Bu kısıtlamalar, holonomik olmayan sistemlerin kinematik ve dinamik analizlerini, holonomik olanlardan daha zor hale getirmektedir. Literatürde, gerçek zamanlı uygulamalarda, her ne kadar kinematik ve dinamik

1. GİRİŞ

denklemleri birlikte hesaba katmak hassas bir yörünge kontrolü için önemli bir faktör olsa da, literatürdeki çalışmaların sayısı bu konuda yetersizdir. Otomatik yönlendirmeli araçlar üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu tip sistemlerin kontrolünde genellikle sistemin sadece kinematik denklemlerinin dikkate alındığı çalışmalar bulunmaktadır.

Sistemde bulunan parametrelerden, modellemeden ve dış etkenlerden kaynaklanan belirsizliklerinden dolayı, ağır yük taşıma ve yüksek hız gerektiği zaman, sistemin kinematik denklemlerin yanında dinamiklerinde göz önünde bulundurulması hassas bir yörünge kontrolü için çok önemli faktördür. Bu gibi durumlar göz önüne alındığında, sistemi etkin bir şekilde çalıştırılması için büyük bir verimlilik ve güvenilirlikte bir denetleyici tasarlamak oldukça önemlidir. Bu tasarlanan denetleyicinin, sistemdeki bilinmeyen yükler ve doğrusal olmayan sistemlerin modellenmemiş ve/veya modellenememiş dinamikleri için sağlam ve değişken bir yapıda olması beklenir. Bu belirtilen durumların üstesinden gelebilmek için kayan kipli kontrol yöntemi (SMC), pek çok doğrusal olmayan sistemin performansını ve bozulmalara karşı sağlamlığını arttırmak için kullanılmıştır. Ayrıca bu kontrolcü, sistemin yörünge takip hassasiyetini arttırmak, daha basit sistem modellemesi yapabilmek ve sistemin istikrarının korunması sorununu ortadan kaldırmak için sistem yeteneğini geliştiren sistematik bir yaklaşım içinde kullanılır. Bunlara ek olarak, kararsızlıkların modellenmesi için sistem performansını da arttıran bir kontrol yapısına sahiptir. Belirtilen kayan kipli kontrolcünün karakteristik özelliğinden dolayı, birçok araştırmacı sistemlerindeki kontrol sorunun üstesinden gelebilmek ve sistemin bilinmeyen etkilere karşı güvenilirliğini arttırmak için bu yöntemi kullanmıştır.

Kayan kipli kontrol tekniğinin bu özelliğinden dolayı, bu tez çalışmasında, bir otomatik yönlendirmeli aracın gerçek zamanlı yörünge kontrolü için araç dinamiğinin göz önünde bulundurulduğu kayan kipli kontrol yönteminden yararlanılmıştır. Öncelikle, tasarlanan sistemin pozisyon analizi için sisteme ait tüm kinematik denklemler elde edilmiştir. Böylece araca belirli hedef yörünge verildiğinde sistemin bu hedef yörüngeyi gerçekleştirebilmesi için araç tekerleklerinin açılma hız değişkenleri belirlenebilmiştir. İkinci olarak, sistemin tam dinamik modeli Lagrangian tekniğinden yararlanılarak yapılmıştır. Tasarlanan OYA'nın yörünge izleme performansını

1. GİRİŞ

artırabilmek için ise sistemin tam dinamik modelinin göz önüne alındığı kayan kipli kontrol yönteminden faydalanılmıştır. Bu kontrol tekniğinde klasik PID kontrol tekniğinden farklı olarak, kontrol edilecek olan sistemin dinamik denklemleri belirli bir kural çerçevesinde yeniden oluşturulup, sistemin hareketi esnasında gerekli olan uygun kontrol işaretleri üretilebilmektedir. Bu sayede sistemlerin konum ve hız hatalarını en aza indirgenebilmektedir. Sistemin gerçek zamanlı yörünge izleme kontrol deneylerinde elde edilen sonuçlara göre, sisteme ait tam ve doğru bir dinamik modelin belirlenmesi ve bu modelin özellikle kayan kipli kontrol yönteminde kullanılması ile sistemin yörünge kontrol performansının klasik PID kontrole göre daha iyi sonuçlar elde edilmesine imkân sağlamıştır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürde birçok araştırmacı OYA'ların yörünge kontrolü için yapmış oldukları benzetim çalışmalarında, sadece araç kinematiğinin göz önünde bulundurulduğu farklı tipte kapalı çevrim kontrol algoritmalar geliştirmişlerdir. Shunget al. (1983), bir OYA'nın hız kontrolü için yapmış oldukları benzetim çalışmasında geri beslemeli kontrol algoritmasından yararlanırken, Johnson and Aylor (1986), hız kontrolü için arıza toleranslı kontrol algoritmasından faydalanmışlardır. Yapılan bu benzetim çalışmalarında, tasarlanan hız denetleyicilerinin OYA'yı çeşitli yol koşullarında kullanılmasına elverişli hale getirdiğini göstermekle beraber gerçek çevre koşullarında önerilen denetleyicilerin performanslarının nasıl davranacağı söz konusu çalışmalarda rapor edilmemiştir. Bir diğer benzetim çalışması ise Li et al. (2016) tarafından gerçekleştirilmiş ve yapmış oldukları çalışmada bir otomatik yönlendirmeli aracın yörünge kontrolünde bulanık PID kontrolcü yöntemi yararlanmışlardır. Mercan (2010) yılında hazırladığı tez çalışmasında, iki adet motora bağlı tekerlek ve önde bir adet sarhoş tekerlekle hazırladığı model ile yol hesabı yaparak otomatik bir şekilde ilerleyen bir robotun simülasyonunu ve tasarımını hazırlayarak literatürle paylaşmıştır. Hoshino et al (2007) yaptıkları çalışmada hibrit bir OYA (hem dikey hem de yatay hareket edebilen) tasarlamışlar ve literatür ile paylaşmışlardır. Diğer bir çalışmada Gomes et al (2016) RGB kamera kılavuzlu bir OYA'yı PID kontrolcü ile kontrol etmeye çalışmışlar ve sonuçlarını literatür ile paylaşmışlardır. Kiraz (2014) hazırladığı tezinde çizgi izleyen bir OYA'nın görüntü işleme yardımı ile gideceği hedefi en kısa hangi yolu kat ederek gideceğini hesaplayan bir yazılım ve robot tasarlamıştır. Şimşir (2015) hazırladığı tezinde bir OYA'nın sadece başlangıç ve bitiş noktalarını belirleyerek otomatik olarak bir yükü taşıması ve bu esnada OYA'nın hesaplayacağı rotanın en kısa ve verimli olması üzerine çalışmalar yapmıştır.

OYA'ların yörünge kontrolü için tasarlanan kontrol algoritmalarıyla ilgili olarak diğer bir önemli husus ise araçların değişken çevre koşullarında ve yük kapasitelerinde seyir izlemesinden dolayı ortaya çıkan istenmeyen bozucu etkilere veya parametre değişikliklerine karşı nasıl cevap verebildikleridir. Örneğin aracın üzerine binen yüke bağlı olarak tahrik motorlarına düşen yük ataleti 6 kata varan varyasyonlarda değişmektedir. Benzer şekilde aracın hareket ettiği zemine, bir rampadan inmesine veya

çıkmasına bağlı olarak tahrik motorlarına düşen yük ataleti farklı değerler almaktadır (Ding and Cooper 2005). Bu nedenle sistem için tasarlanacak kontrol algoritmasının bahsi geçen istenmeyen durumlara karşı gürbüz bir yapıda olması beklenmektedir.

Literatürde birçok araştırmacı tasarladıkları OYA'ların yörünge kontrolü için yine sadece araç kinematığının göz önünde bulundurulduğu farklı tipte gürbüz kontrol algoritmaları geliştirmişlerdir. Saadatzi et al. (2011), tasarladıkları OYA'nın yörünge kontrolü için genetik algoritma yönteminden yararlanırken, Boquete et al. (1999), yapay sinir ağlarıyla optimize edilmiş PID kontrol yönteminden faydalanmışlardır. Kung et al. (2011) yapmış oldukları çalışmada ise bulanık mantık kontrol yönteminden yararlanmışlardır. Ancak yapılan bu çalışmaların hiçbirinde sistem dinamiği göz önünde bulundurulmamış ve kullanılan kontrol algoritmalarının işlem yükünün fazla olması nedeniyle sistem cevaplarında oldukça fazla gecikme yaşanmıştır. Fan et al. (2012) yaptıkları çalışmada bulanık mantık ile PID kontrolcü kullanarak, lazer ile yolunu tayin eden bir OYA'nın hatalarını en aza indirmeyi amaçlamış ve başarılı olmuşlardır. Diğer bir çalışmada ise, benzer kontrol yöntemi kullanarak OYA'ların engellerde kaçmak için hesaplaması gereken en iyi hız değerlerini söz konusu kontrolcü ile hesaplamışlardır (Fan et al, 2012) .

OYA'ların tam dinamik modelinden yararlanılmadan sadece tahrik motorların modellenmesiyle gerçekleştirilen çalışmalarda ise Nguyen et al. (2011), çok değişkenli kayan kipli kontrol stratejisinden yararlanılırken, Cruz et al. (2011), Lyapunov kararlılık analizi tabanlı adaptif kontrol yönteminden faydalanmışlardır. Diğer bir çalışmada ise, Fujii and Wada, (2005), kullanıcıdan kaynaklı hataları azaltmak için geliştirmiş oldukları kontrolcüde sistem tanımlama tekniklerinden yararlanmışlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Aracın kinematik analizini gerçekleştirebilmek için, ilk olarak Şekil 3.1' de gösterildiği gibi iki koordinat sistemi tanımlanmaktadır. Bunlardan ilki $\{X_l, Y_l\}$ ile tanımlanan küresel koordinat sistemi, diğeri ise araca yerleştirilmiş ve $\{X_r, Y_r\}$ ile tanımlanan araca ait koordinat sistemidir. Araç koordinat sisteminin orijini iki tekerleğin tam ortasına denk gelen P_0 noktasıdır. Sağ ve sol tekerleğin açısal konumları sırasıyla θ_r ve θ_l ile ifade edilmektedir. İki tekerlek arasındaki uzaklık $2L$ ve tekerleklerin yarıçapı ise R ile ifade edilmektedir. Ayrıca ϕ değeri, aracın küresel koordinat sistemine göre yönelim açısını temsil etmektedir. Aracın kendi koordinat sistemine göre doğrusal hızı, denklem 3.1, ile açısal hızı ise denklem 3.2 ile belirlenmektedir.

$$v = \frac{v_r + v_l}{2} = R \frac{(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l)}{2} \quad (3.1)$$

$$\dot{\phi} = \frac{v_r - v_l}{2L} = R \frac{(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)}{2L} \quad (3.2)$$

Denklem 3.1 ve 3.2' de tanımlanan v_r ve v_l değerleri araç tekerleklerinin çizgisel hızını ifade etmektedir. Araç koordinat sisteminde tanımlı herhangi bir noktanın konumu, küresel koordinat sistemine göre tanımlanmak istendiğinde denklem 3.3' den yararlanılmaktadır.

$$X^I = R(\phi)X^r \quad (3.3)$$

Denklem 3.3 de ifade edilen $R(\phi)$ değeri ortogonal dönüşüm matrisi olup denklem 3.4 ile ifade edilmektedir.

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Denklem 3.1, 3.2 ve 3.4' den yararlanılarak aracın küresel koordinat sistemine göre doğrusal ve açısal hızları denklem 1.5 ile belirlenebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos(\phi) & \frac{R}{2} \cos(\phi) \\ \frac{R}{2} \sin(\phi) & \frac{R}{2} \sin(\phi) \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

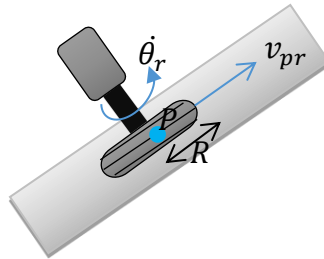
3.2. Oya'nın Kısıtlama Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Söz konusu OYA'nın küresel koordinat sistemine göre konum ve yönelimini belirleyebilmek için ihtiyaç duyulan parametre sayısı, yani serbestlik derecesi 3 (üç) tür. Fakat aracın hareketi için kontrol edilebilecek parametre sayısı iki (2) dir. Bu kinematik kısıtlamadan dolayı söz konusu araç holonomik olmayan sistemler sınıfına girmektedir. θ_r , θ_l nin genelleştirilmiş koordinat ve x_1 , x_2 nin fazlalık koordinatlar olarak seçilmesiyle, genelleştirilmiş koordinatlara ilişkin iki temel holonomik olmayan kısıtlama fonksiyonu aşağıda tanımlanan iki durumdan yararlanılarak elde edilebilmektedir.

Bunlardan birincisi, otomatik yönlendirmeli aracın kendi eksenine göre yana doğru hareket edememesidir. Bir başka ifadeyle aracın kendi koordinat sistemine göre, P_o merkez noktasının hızı Y_r eksenine boyunca sıfır olmaktadır ($\dot{Y}_r = 0$). Bu durumda ortogonal dönüşüm matrisi $R(\phi)$ kullanılarak, birinci holonomik olmayan kısıtlama fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

$$\dot{x}_1 \cos(\phi) - \dot{x}_2 \sin(\phi) = 0 \quad (3.6)$$

İkinci durum ise, araçta bulunan iki sürüş tekerleğinin Şekil 3.2'de gösterildiği gibi çizgisel hızlarının sadece bir yönde olmasıyla ilgilidir.



Şekil 3.2 : Araç tekerleğinin çizgisel hız gösterimi.

Araç tekerleklerinin çizgisel hızları denklem 3.7 ile tanımlanmaktadır.

$$v_{p_r} = R\dot{\theta}_r, v_{p_l} = R\dot{\theta}_l \quad (3.7)$$

Bu durumda ortogonal dönüşüm matrisi $R(\phi)$ kullanılarak, ikinci holonomik olmayan kısıtlama fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

$$\dot{x}_1 \cos(\phi) + \dot{x}_2 \sin(\phi) = cL(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l) \quad (3.8)$$

Denklem 3.8' de tanımlanan c değeri $R/2L$ ' ye eşittir. Böylece matris formda iki temel holonomik olmayan kısıtlama fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (3.9)$$

Denklem 3.9' da tanımlanan q ve $A(q)$ değerleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \theta_r \\ \theta_l \end{bmatrix}, A(q) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ -\cos(\phi) & -\sin(\phi) & cL & cL \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.3.Oya'nın Dinamik Analizi

Bu bölümde kinematik kısıtlamalarından dolayı aracın tam dinamik modellemesi Lagrange çarpanları yaklaşımı kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Lagrange çarpanları yaklaşımı ile yapılan dinamik analizlerde denklem 3.11' de yazılan eşitlik kullanılmaktadır (Greenwood 1987, Pasin 1994, Baruh 1999, Crespo 2003).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i - a_{1i}\lambda_1 - a_{2i}\lambda_2 \quad i = 1 \dots 4 \quad (3.11)$$

Denklem 3.11' de ifade edilen Q_i, i inci genelleştirilmiş harici kuvveti, λ_1 ve λ_2 Lagrangian çarpanlarını, L Lagrangian fonksiyonunu, a_{1i} ve a_{2i} ise kısıtlama fonksiyonlarından elde edilen çarpanları temsil etmektedir.

Otomatik yönlendirmeli aracın iki tekerleğiyle birlikte toplam kinetik enerjisi denklem 3.12' de yazılan eşitlikle belirlenmektedir.

$$K = \frac{1}{2}(m_c + 2m_w)(\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2) + m_c cL(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)(\dot{x}_2 \cos(\phi) - \dot{x}_1 \sin(\phi)) + \frac{1}{2}I_w(\dot{\theta}_r^2 + \dot{\theta}_l^2) + \frac{1}{2}(I_c + 2m_w L^2 + 2I_m)c^2(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)^2 \quad (3.12)$$

Burada, m_c Otomatik yönlendirmeli aracın sabit platformuna ait kütesini, m_w her bir tekerleğin motorlarıyla birlikte temsil edilen kütesini, I_c Otomatik yönlendirmeli aracın sabit platformunun eylemsizlik momentini, I_w ve I_m ise, her bir tekerleğin motorlarıyla birlikte ifade edilen eksenlere göre eylemsizlik momentini ifade etmektedir.

Otomatik yönlendirmeli aracın potansiyel enerjisinin olmadığı kabulüyle, sistemin hareket denklemleri denklem 3.13-3.16 da yazıldığı gibi elde edilmektedir.

$$(m_c + 2m_w)\ddot{x}_1 - m_c d(\ddot{\phi} \sin\phi + \dot{\phi}^2 \cos\phi) = \lambda_1 \sin\phi + \lambda_2 \cos\phi \quad (3.13)$$

$$(m_c + 2m_w)\ddot{x}_2 + m_c d(\ddot{\phi} \cos\phi - \dot{\phi}^2 \sin\phi) = -\lambda_1 \cos\phi + \lambda_2 \sin\phi \quad (3.14)$$

$$m_c c d(\ddot{x}_2 \cos\phi - \ddot{x}_1 \sin\phi) + ((I_c + 2m_w L^2 + 2I_m)c^2 + I_w)\ddot{\theta}_r - (I_c + 2m_w L^2 + 2I_m)c^2 \ddot{\theta}_l = \tau_1 - cL\lambda_2 \quad (3.15)$$

$$-m_c c d(\ddot{x}_2 \cos\phi - \ddot{x}_1 \sin\phi) - (I_c + 2m_w L^2 + 2I_m)c^2 \ddot{\theta}_r - (I_c + 2m_w L^2 + 2I_m)c^2 \ddot{\theta}_l = \tau_2 - cL\lambda_2 \quad (3.16)$$

Böylece otomatik yönlendirmeli aracın motorları tarafından uygulanan torklara (τ_1, τ_2) bağlı olarak standart formda yazılmış hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = E(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (3.17)$$

Burada;

$$\begin{aligned}
 &M(q) \\
 &= \begin{bmatrix} m_c + 2m_w & 0 & -m_c c d \sin\phi & m_c c d \sin\phi \\ 0 & m_c + 2m_w & m_c c d \cos\phi & -m_c c d \cos\phi \\ -m_c c d \sin\phi & m_c c d \cos\phi & (I_c + 2m_w L^2 + 2I_m)c^2 + I_w & -(I_c + 2m_w L^2 + 2I_m)c^2 \\ m_c c d \sin\phi & -m_c c d \cos\phi & -(I_c + 2m_w L^2 + 2I_m)c^2 & (I_c + 2m_w L^2 + 2I_m)c^2 + I_w \end{bmatrix} \\
 &C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} m_c d \dot{\phi}^2 \cos\phi \\ -m_c d \dot{\phi}^2 \sin\phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad E(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

Bununla birlikte, denklem 3.17 ile ifade edilen hareket denkleminin, doğrusal olmayan kontrol tekniklerinde kullanılabilmesi için daha kompakt bir formda yazılması gerekmektedir. Bir başka deyişle denklem 3.17' de ifade edilen $A^T(q)\lambda$ teriminin, denklemden elimine edilmesi gerekmektedir. Bunun için denklem 3.17' nin her iki tarafı denklem 3.19 ile ifade edilen 4×2 boyutundaki $S(q)$ matrisinin transpozuyla çarpılması gerekmektedir.

$$S(q) = \begin{bmatrix} cL \cos\phi & cL \cos\phi \\ cL \sin\phi & cL \sin\phi \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Bu çarpımın gerçekleştirilmesiyle OYA'nın yeni hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$S^T(q)M(q)\ddot{q} + S^T(q)C(q, \dot{q}) = \tau \quad (3.20)$$

Daha standart formda denklem 3.20, denklem 3.21 ile tanımlanabilir.

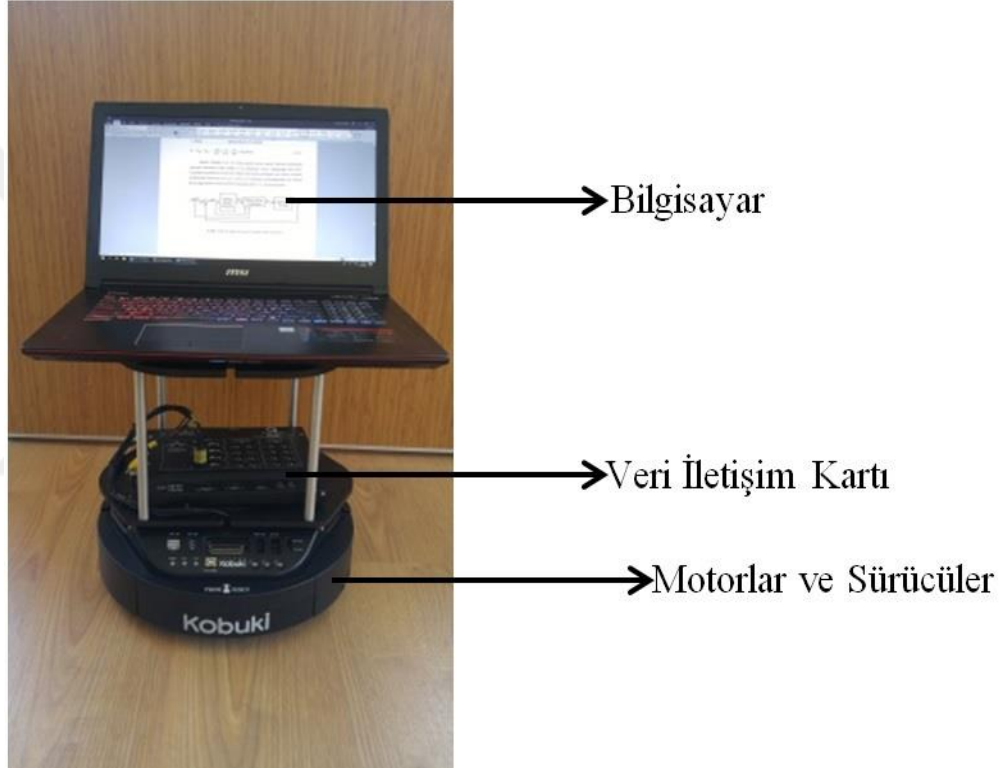
$$\tau = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + \tau_d \quad (3.21)$$

Burada $M(q)$ sistemin kütle matrisini, $N(q, \dot{q})$ merkezkaç, coriolis vb. terimleri, τ_d sürtünme gibi bozucu etkileri, q aracın sağ ve sol tekerinin açısal hızlarını ve son olarak τ ise motor çıkış torklarını ifade etmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

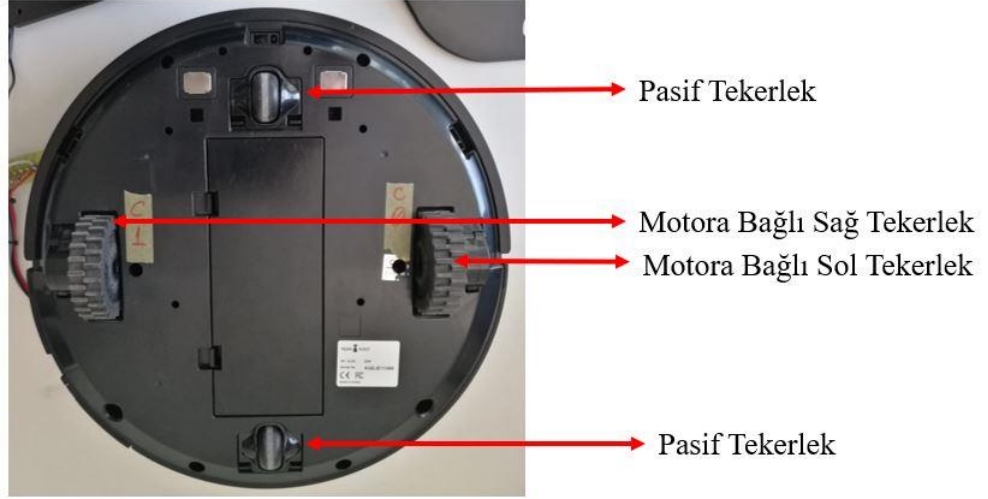
3.4.OYA'nın Tasarımı

Otomatik yönlendirmeli araç için yapılan matematiksel analizlerin ardından aracın Şekil 3.3' de gösterilen bir prototipi tasarlanmıştır. Prototip tasarım için TurleBot firması tarafından üretilen KOBUKI isimli insansız aracın sadece dış kasasından ve motorlarından yararlanılmıştır. TurleBot firmasının kullanmış olduğu kontrol kartı, sürücüler, sensörler ve yazılım yerine bu çalışmada özgün bir tasarım gerçekleştirilmiştir.

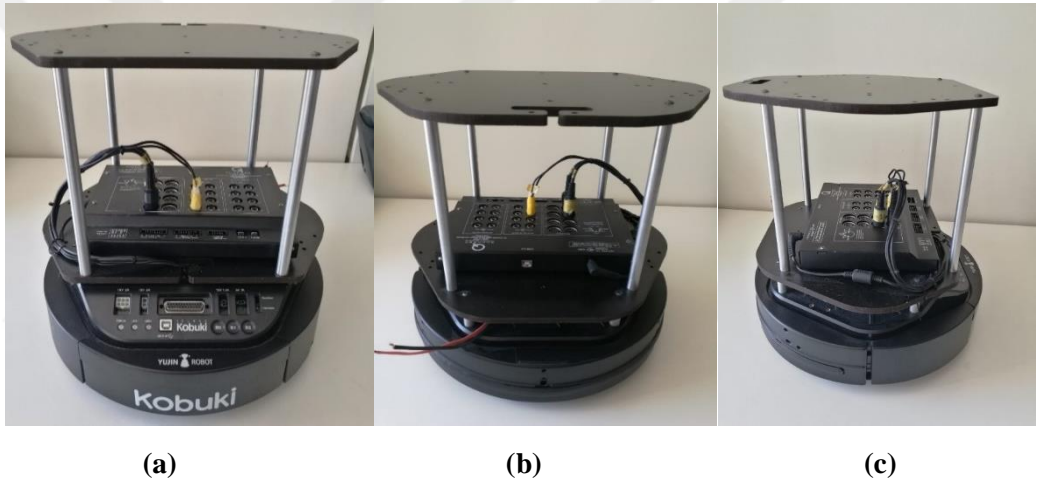


Şekil 3.3 OYA'nın Genel Görünüşü.

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5' de gösterildiği üzere OYA'da önde ve arkada birer tane olmak üzere iki tane pasif tekerlek bulunmaktadır. Sağ ve sol taraflarında ise araca hareket kabiliyeti kazandıracak olan iki bağımsız DC motora bağlı tekerlekler bulunmaktadır.



Şekil 3.4 OYA'nın Alttan Görünüşü.



Şekil 3.5 OYA'nın çeşitli yönlerden görünüşü. (a) OYA'nın önden görünüşü. (b) OYA'nın arkadan görünüşü. (c) OYA'nın yandan görünüşü.

Tasarlanan sistemin kontrolü TurleBot firmasının geliştirdiği kontrol kartı ve yazılım kullanılmadan Matlab Simulink programlama ortamında hazırlanmış olan yeni bir kullanıcı ara yüz programı ve yeni bir veri iletişim kartı (DAQ) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Quanser firmasının geliştirmiş olduğu Q8 USB veri iletişim kartı Şekil 3.6' da gösterildiği gibi kendine özgü olarak encoder girişlerine ve analog giriş-çıkış portlarına sahiptir. Söz konusu veri iletişim kartına ait genel özellikler Çizelge 3.1 de sıralanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM



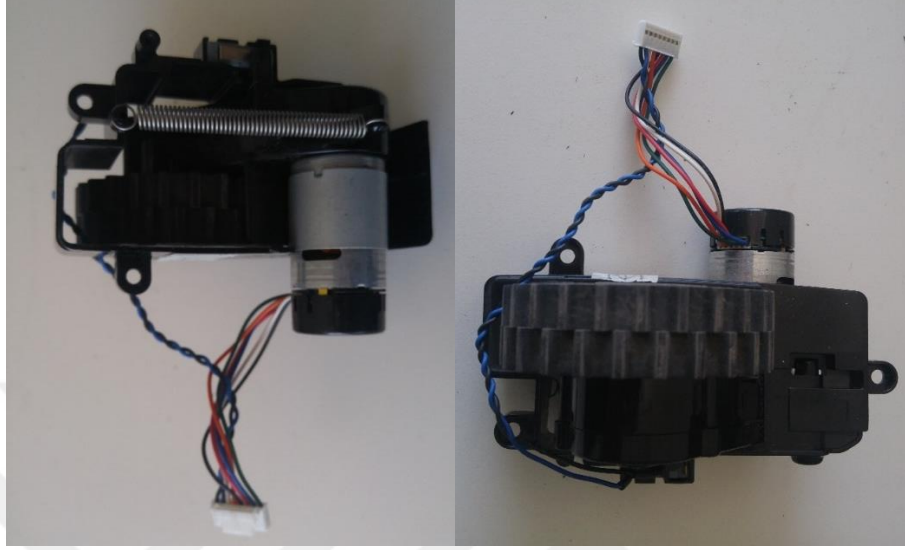
Şekil 3.6 : Veri iletişim kartı.

Çizelge 3.1 : Data iletişim kartı özellikleri.

Kart Boyutları	22.8 cm x 16.8 cm x 3.4 cm
Analog Girişler	
Kanal Sayısı :	8
Çözünürlük :	16-bit
Giriş Aralığı :	$\pm 5V, \pm 10 V$
Giriş Empedansı :	1 M Ω
Analog Çıkışlar	
Kanal Sayısı :	8
Çözünürlük :	16-bit
Çıkış aralığı :	$\pm 10.8 V, \pm 10 V$ $\pm 5 V, 10.8 V$ 10 V, 5 V
DC Çıkış Empedansı :	0.5 Ω
Dijital Girişler	
Dijital I/O Sayısı :	8
Giriş En düşük/En yüksek:	1.5 V / 3.5 V
Dijital Çıkışlar	
Dijital I/O Sayısı :	8
Çıkış En düşük/En yüksek:	0.55 V / 4.50 V
Max. Sürücü Akımı :	± 32 mA
Encoder Girişleri	
Encoder Giriş Sayısı :	8
Giriş En düşük/En yüksek:	1.5 V / 3.5 V
PWM Çıkışları	
PWM Çıkış sayısı :	8 ²
Çıkış En düşük/En yüksek:	0.55 V / 4.50 V
Min. Frekans :	23.7309 Hz
Max. Frekans :	49.766 MHz
Bir Çözünürlüğü :	16 bits ³

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tasarlanan araç için Şekil 3.7’ de gösterilen ve KOBUKI robotu üzerinde bulunan motorlar kullanılmıştır. Bu motorların elektriksel ve mekaniksel özellikleri Çizelge 3.2 sunulmuştur.



Şekil 3.7 : OYA'nın tekerleklerine bağlı motorları.

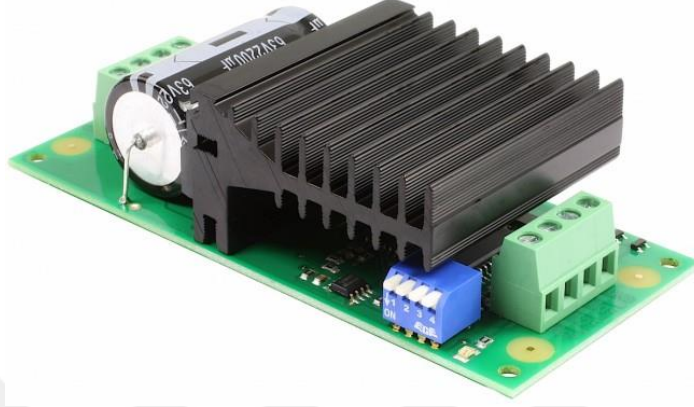
Çizelge 3.2 : Motor özellikleri.

Motor Üreticisi	Standard Motor
Motor Modeli	RP385-ST-2060
Yüksüzken çekilen akım	210 mA
Yüksüz Hız	9960 rpm \pm 15%
Yükde anma akımı	750 mA
Yükde Anma hızı	8800 rpm \pm 15%
Armatür Direnci	1.5506 Ω at 25°C
Armatür endüktansı	1.51 mH
Tork Sabiti(Kt)	10.913 mN·m/A
Hız Sabiti(Kv)	830 rpm/V

Bu tez çalışmasında tasarlanan sistemde kullanılan motorlarının sürülmesinde Şekil 3.8’ de gösterilen MD03 model motor sürücü devresi kullanılmıştır. Sürücü üzerinde bulunan pinler değiştirilerek farklı modlarda çalıştırılması sağlanmaktadır.

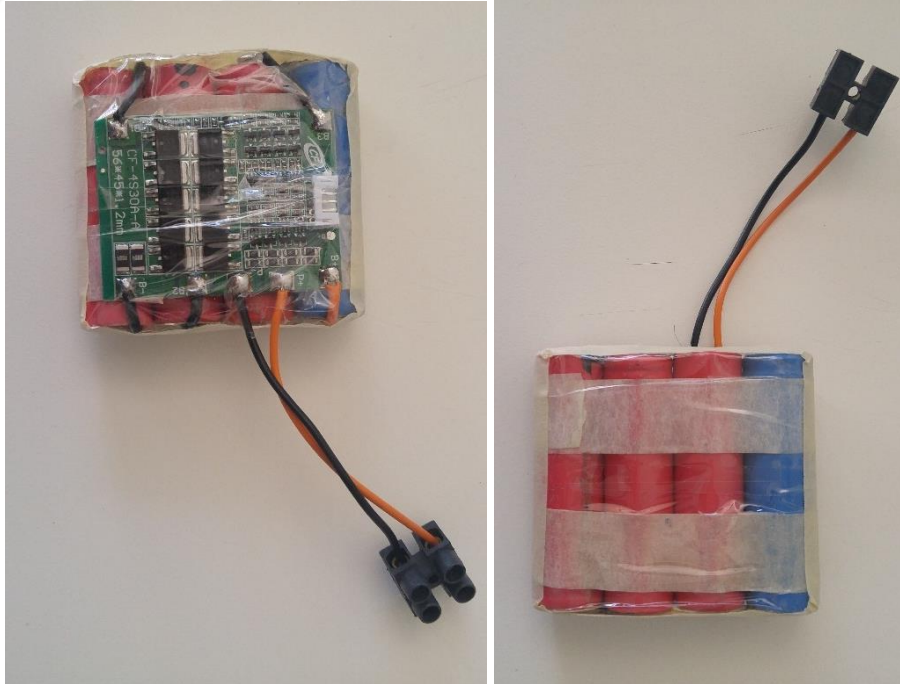
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bunlardan analog 0V, 2.5V ,5V modunda olup sürücüye 0V verildiğinde motor ters yönde dönerken, 2,5 V verildiğinde durmaktadır ve 5V verildiğinde tam güçte dönmeye başlamaktadır. Diğer mod ise 0V,5V modu olup sürücüye 0V verildiği zaman motor durmakta 5V verildiği zaman tam güçte çalışmaktadır. Bu tez çalışmasında sürücü devrenin 0V, 2.5V ,5V modu kullanılmıştır



Şekil 3.8. MD03 motor sürücüsü.

Tasarlanan aracın enerji ihtiyacı için Şekil 3.9’ da gösterilen batarya kullanılmıştır. Bataryaya ait özellikler çizelge 3.3’ de verilmiştir.



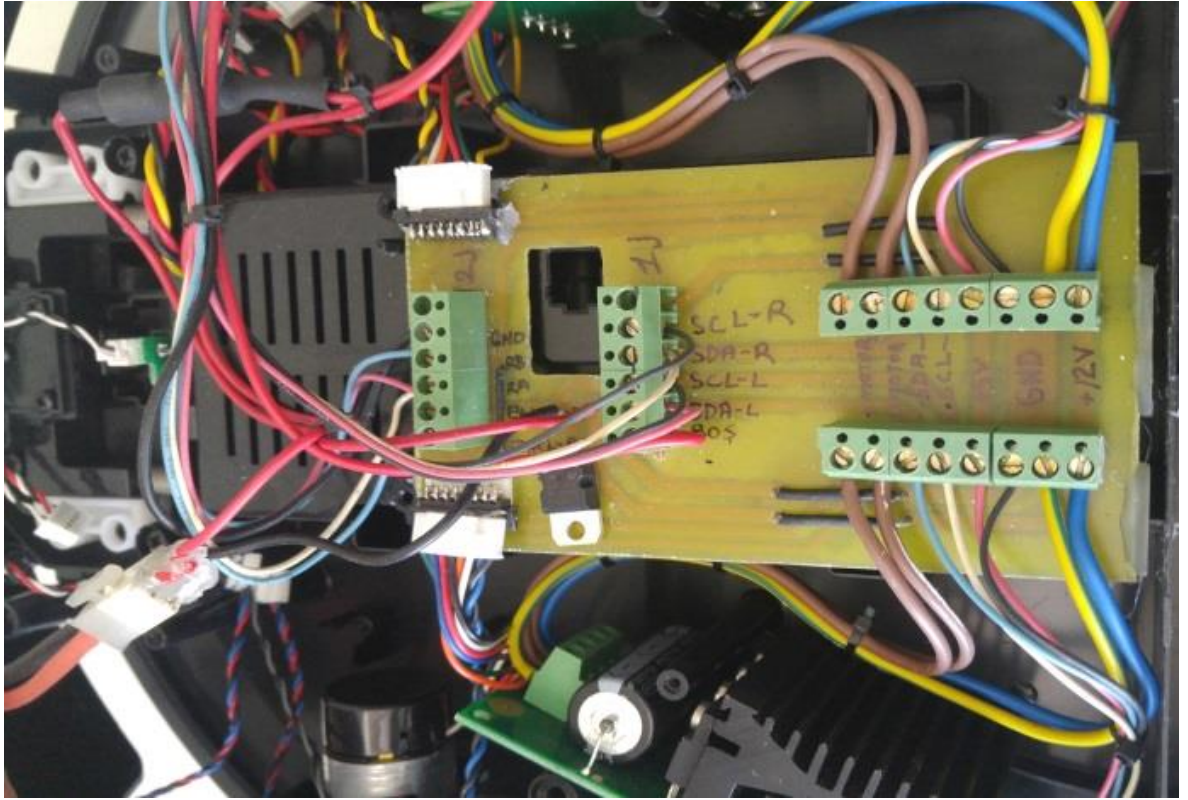
Şekil 3.9 : OYA Bataryası.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.3 : OYA bataryası özellikleri.

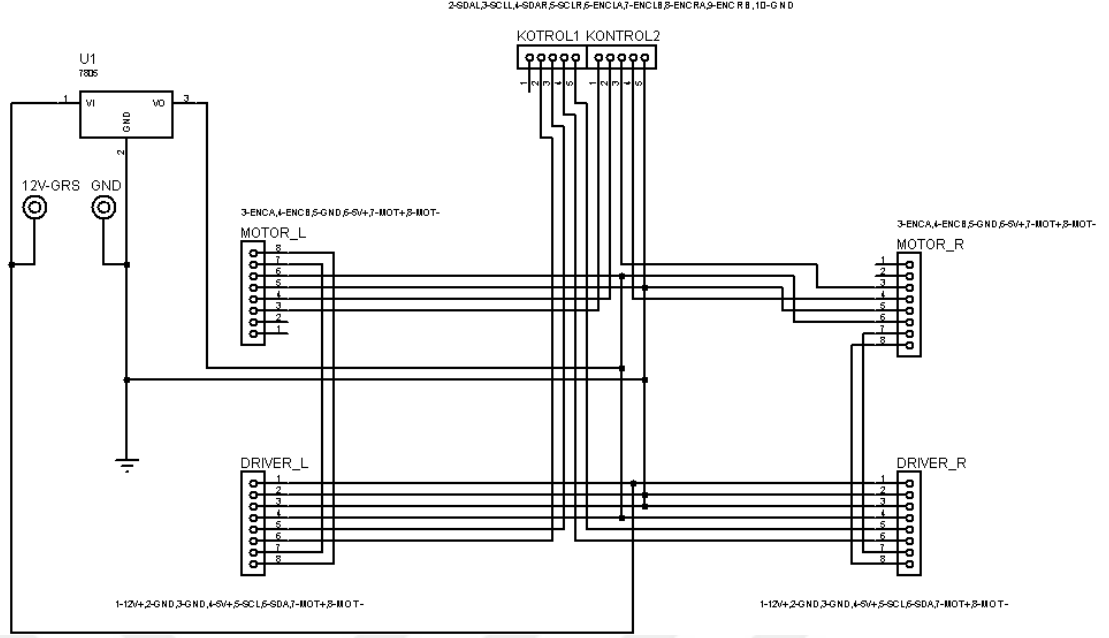
Batarya Gerilimi	16.8V
Yapıldığı Madde	Li - ion
Hücre Sayısı	4
Saatlik Akım	2200mAh

Bu tez çalışması kapsamında söz konusu motorlara bağlı encoderlerin, sürücülerin ve veri iletişim kartının ihtiyaç duyacakları farklı gerilim değerlerinin üretilebilmesi için Şekil 3.10' da gösterildiği gibi bir güç dağıtım kartı tasarlanmıştır. Tasarlan bu kart sayesinde ihtiyaç duyulacak olan farklı eşik değerlerindeki gerilimler üretilebilmiştir. Söz konusu karta ait devre şeması ve baskı devre şeması sırasıyla Şekil 3.11'de ve Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

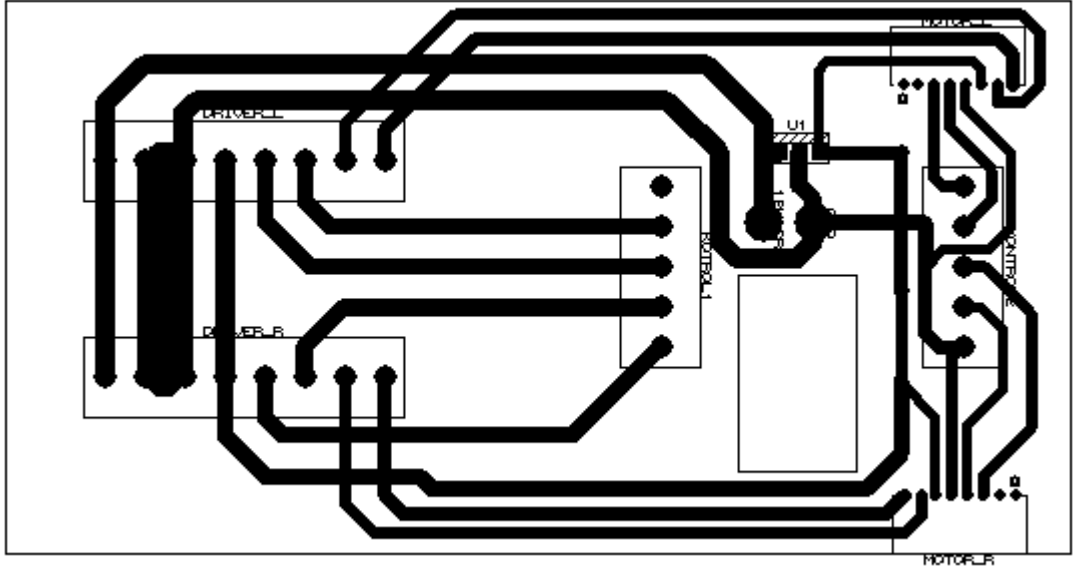


Şekil 3.10 : Güç Kartı.

3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.11 : Motor Sürücüsü ve Encoder İçin Güç Dağıtım Kartı.



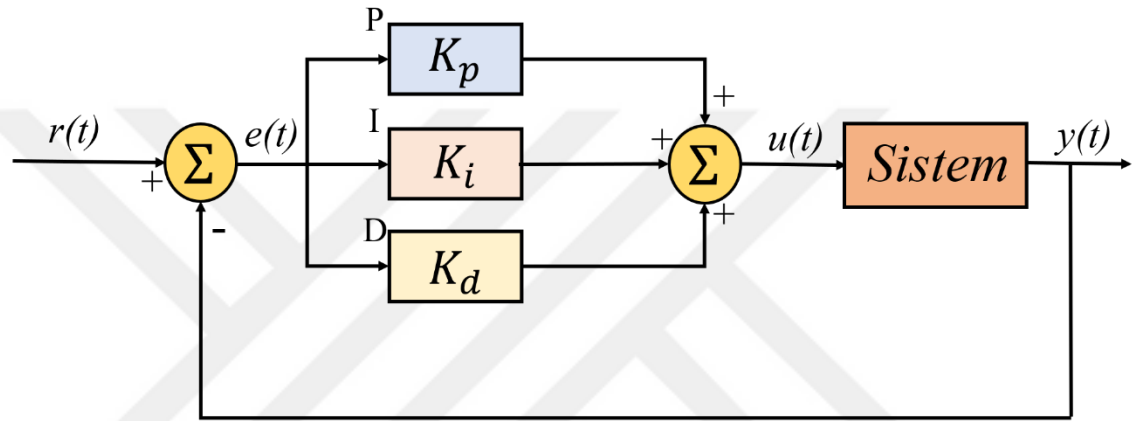
Şekil 3.12 : Güç dağıtım kartı baskı devre şeması.

3.5. OYA' nın Yörünge Kontrolü için Yararlanılan Kontrol Yöntemleri

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan OYA' nın yörünge kontrolü için klasik PID kontrol yönteminden ve sistem modelinin temel alındığı kayan kipli kontrol yönteminden yararlanılmıştır.

3.5.1. Klasik PID kontrol yöntemi

PID kontrolcü üç farklı kontrolcüden P (oransal), I (integral) ve D (türevsel) meydana gelen, kapalı çevrim otomatik kontrol mekanizmasıdır. Temel olarak Şekil 3.13’ de gösterildiği gibi giriş ile çıkışın farkı alınarak hata değişkeni $e(t)$ ’nin en aza indirgenmesi mantığına dayanmaktadır. PID kontrolcü özellikle endüstriyel alanda sıkça tercih edilmektedir. Sürekli kontrol gerektiren her alanda sıkça kullanılmaktadır.



$r(t)$: referans değeri veya istenilen değer
 $y(t)$: ölçülen değer

$e(t)$: hata değeri
 $u(t)$: kontrol değişkeni

Şekil 3.13 PID Kontrol blok diyagramı.

P, parametresi (K_p) oransal kazanç parametresi olup, $e(t)$ ’nin belirli bir kazanç değeri ile çarpımı kadar tepki göstermektedir. Eğer hata büyük ve pozitif bir değer ise kontrol çıkışı da büyük bir pozitif değer olacaktır. Oransal kontrolcünde hata değeri azaldıkça daha düşük kontrol tepkisi göstereceğinden referansa yavaş bir yaklaşım sergilemektedir. Hata küçüldükçe kontrol etkisi de orantılı olarak zayıflayacak ve sistem referansa asla tam oturmayacaktır. Oransal kontrolcünün sistemin yükselme zamanını kısaltır, ofset değerini azaltır fakat aşım değerinin artmasına sebep olmaktadır.

I, parametresi (K_i) integral kazanç parametresi olup sistem çalışmaya başladığı andan itibaren üretilen bütün anlardaki hataları toplar ve bunu bir kazanç değeri ile çarpar. Kontrolcü çıkışını sürekli artırıp azaltarak hata değerini ve ofset değerini

sıfırlamaya çalışır. Hatayı sıfırlama süresi hatanın büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Hata ne kadar büyükse integral parametresi o kadar hızlı hatayı sıfırlamaya çalışır, hata ne kadar az ise o kadar yavaş hatayı sıfırlamaya çalışır.

D, parametresi (K_p) türev kazanç parametresi olup çıktısının hesaplandığı andan bir sonraki değerin ne olacağına ilişkin bir değer üretmektedir. Bir başka deyişle sisteme bir öngörü kazandırma özelliğine sahiptir. Türev etkisinden dolayı gürültüden çok fazla etkilenir. Hata değişim ivmesi ne kadar fazla olursa o kadar hızlı cevap verir.

Yukarıda bahsedilen kontrol parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri çizelge 3.4 de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : PID Kontrolcülerin özellikleri.

K_C	Yükselme Zamanı	En Büyük Aşım	Yerleşme Zamanı	Sürekli Hal Hatası
K_p	Azalır	Artar	Değişmez	Azalır
K_I	Azalır	Artar	Artar	Ortadan Kaldırır
K_D	Değişmez	Azalır	Azalır	Değişmez

Söz konusu kontrol parametreleri kendi aralarında bir kural çerçevesinde birleştirilerek sırasıyla, orantı (P), orantı-integral (PI), orantı-türev (PD) ve orantı-integral-türev (PID) kontrolcülerini olarak kullanılabilirler.

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan PID kontrol tekniğinin matematiksel formülü denklem 3.22' de yazıldığı gibidir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^k e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.22)$$

3.5.2. Kayan kipli kontrol yöntemi

Kayan kipli kontrol yöntemi, değişken yapıli kontrol olarak adlandırılan bir yöntem olup sistemdeki belirsizliklere ve bozucu etkilere karşı gürbüz bir yapıya sahiptir. Kayan kipli kontrol yönteminde kullanılan kontrol işareti iki bileşenden

oluşmaktadır. Bunlardan ilki, hata değerlerini en az indirmek için kullanılan eşdeğer kontrol bileşenidir. İkincisi bileşen ise sistemi, bilinmeyen belirsizliklerden kaynaklanan bozucu etkilere karşı duyarlı hale getirebilen anahtarlamalı kontrol bileşenidir.

Bilindiği üzere, bütün kontrol yöntemlerindeki amaç, arzu edilen giriş büyüklüğü (q_d) ile sistem çıktı büyüklüğü (q) arasındaki farkı temsil eden ve denklem 3.23 ile tanımlanan izleme hata fonksiyonunu (e) en az indirmektir.

$$e = [q_d - q] \quad (3.23)$$

Kayan kipli kontrol yönteminde bu hata fonksiyonunu en aza indirgeyebilmek için öncelikle denklem 3.24' de ile gösterilen bir s kayma yüzey fonksiyonu tanımlanmalıdır.

$$s = \lambda e + \dot{e} \quad (3.24)$$

Denklem 3.24'de, tanımlanan λ değeri sabit katsayılı pozitif bir matristir. Eğer bir yolla hata fonksiyonu, bu fonksiyonun birinci türevi ve λ değerlerine bağlı olarak, kayma yüzey fonksiyonunu ve onun n inci dereceden türevlerini sıfıra yakınsatabilir ise kayan kipli kontrol yönteminin ilk evresi olan eşdeğer kontrol fonksiyonu doğru bir şekilde tanımlanabilmektedir (Utkin, 1977). Bunun için, denklem 3.24' ün zamana göre türevi alınarak kayma yüzey fonksiyonunun birinci türevi denklem 3.25' deki gibi elde edilir.

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} \quad (3.25)$$

Denklem 3.23' de tanımlanan hata fonksiyonunun ikinci türevi alınıp, denklem 3.25' de yerine yazılır ise kayma yüzey fonksiyonunun birinci türevi farklı bir gösterimle denklem 3.26 ile tanımlanabilir.

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + (\ddot{q}_d - \ddot{q}) \quad (3.26)$$

Denklem 3.21 ile ifade edilen OYA'nın hareket denkleminin, kayan kipli kontrolün yönteminde kullanılabilmesi için denklemde yer alan q çıkış değişkenlerinin yalnız bırakılması gerekmektedir. Bunu için sistemin dinamik modellenmesinde elde edilen denklem 3.21'in her iki tarafı $M(q)^{-1}$ ile çarpılırsa, \ddot{q} aşağıda verilen denklem 3.27'deki gibi ifade edilir;

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}, t) + g(q, t)u(t) + \xi(t, u(t)) \quad (3.27)$$

Denklem 3.27'de, $f(q, \dot{q}, t) = -M(q)^{-1}N(q, \dot{q})$, $g(q, t) = M(q)^{-1}$, $u(t) = \tau$ ve $u(t) = \tau$ ve $\xi(t, u(t))$ sistemin sınırlı belirsizliklerini ifade etmektedir.

Denklem 3.27' de tanımlanan \ddot{q} fonksiyonu, denklem 3.26' de yerine yazılır ise kayma yüzey fonksiyonunun birinci türevi denklem 3.28 ile yenilen tanımlanabilir.

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + \ddot{q}_d - f(q) - g(q)u \quad (3.28)$$

Elde edilen bu denklem, sıfıra eşitlenip ($\dot{s}(t) = 0$), bu ifadeden u kontrol fonksiyonu denklemden çekilir ise eşdeğer kontrol fonksiyonu denklem 3.29' daki gibi elde edilebilir.

$$u_{eq} = \frac{-f(q)}{g(q)} + \frac{\lambda \dot{e}}{g(q)} + \frac{\ddot{q}_d}{g(q)} \quad (3.29)$$

Yukarıda belirtildiği üzere, sınırlanmış fakat bilinmeyen belirsizliklerin etkisi, sistemin yörünge kontrollünde istenmeyen durumlara neden olabilmektedir. Bu istenmeyen bozucu etkileri en aza indirgeyebilmek için tanımlanan eşdeğer kontrol fonksiyonuna ek olarak denklem 3.30' da ifade edilen bir anahtarlamalı kontrol fonksiyonunun, (u_{sc}) kontrol işaretine eklenmesi gerekmektedir.

$$u_{sc} = k_x \text{sgn}(s) \quad (3.30)$$

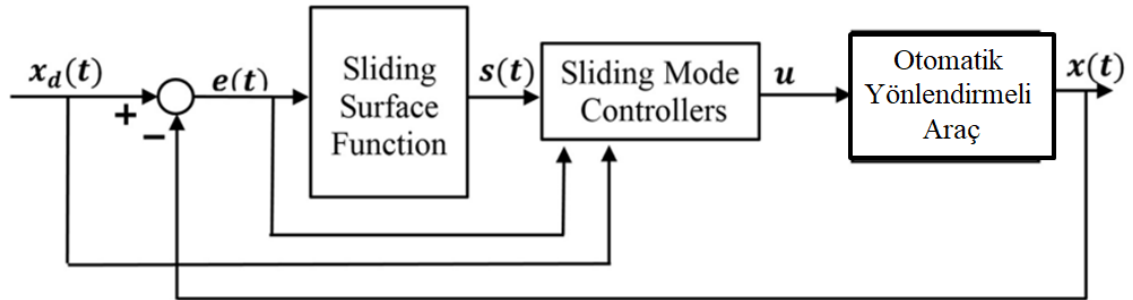
Denklem 3.30' da tanımlanan k_x değeri anahtarlamalı kazanç matrisi olarak adlandırılır. Denklemde yer alan $\text{sgn}(s)$ fonksiyonunun matematiksel ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$sgn(s) = \begin{cases} 1 \rightarrow s > 0 \\ 0 \rightarrow s = 0 \\ -1 \rightarrow s < 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

Böylece, sistem için toplam geri beslemeli kayan kipli kontrol fonksiyonu (u) aşağıda belirtilen şekilde yazılabilmektedir.

$$u = u_{eq} + u_{sc} = \frac{-f(q)}{g(q)} + \frac{\lambda e}{g(q)} + \frac{\ddot{q}_d}{g(q)} + k_x sgn(s) \quad (3.32)$$

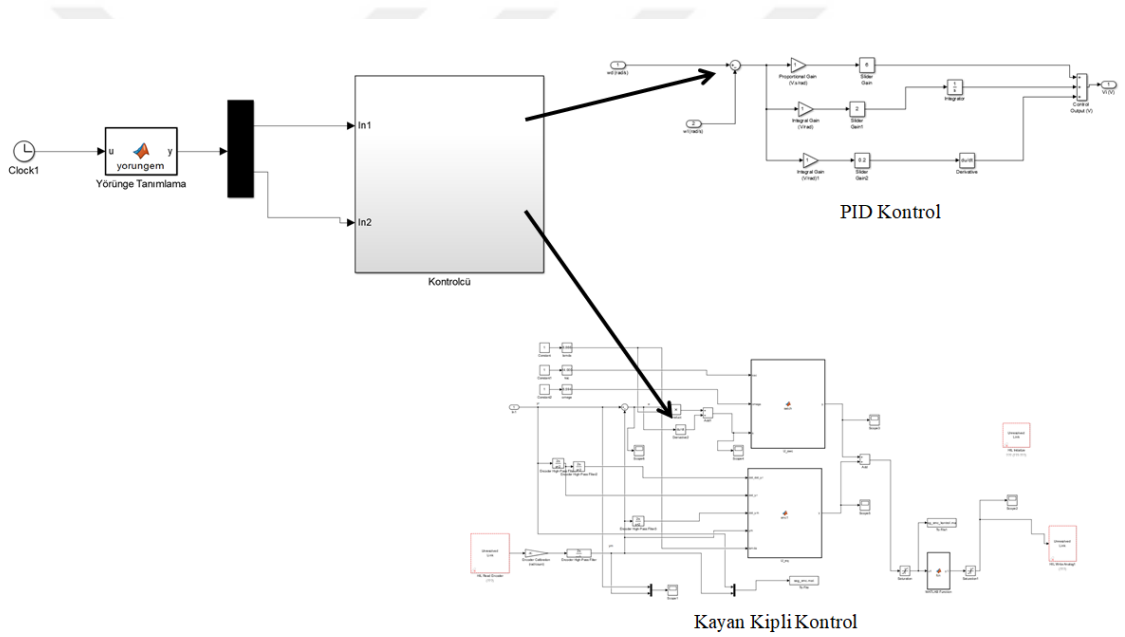
Pratikte, denklem 3.32' de verilen kontrol işareti, yüksek frekanslı anahtarlama nedeniyle salınımlara neden olabilir ve bu salınımlara “çatırtı” (chattering) etkisi denir. Uygulama sırasında bu istenmeyen etkinin üstesinden gelebilmek için, yüksek frekanslı anahtarlama fonksiyonu için sgn , yerine sat fonksiyonu kullanılmaktadır. Söz konusu kayan kipli kontrol yönteminin blok diyagramı Şekil 3.14' de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Kayan Kipli Kontrolcü kontrol blok diyagramı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında tasarlanan OYA'nın gerçek zamanlı yörünge kontrolü için materyal ve yöntem bölümünde bahsedilen klasik PID kontrol ve kayan kipli kontrol yönteminden yararlanılmıştır. Şekil 4.1' de gösterilen ve Matlab simulink yazılımında hazırlanan kontrol algoritmaları kullanılarak söz konusu kontrol teknikleri bilgisayar ortamında derlenmiş ve veri iletişim kartı aracılığıyla aracın yörünge kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kontrolcü parametreleri ise en iyi sonucu sağlayacak şekilde PID kontrol için $K_p = 6$, $K_i = 2$, $K_d = 0,2$ ve kayan kipli kontrol için $\lambda = 48,8664$ ve $k_x = 214$ olarak belirlenmiştir.

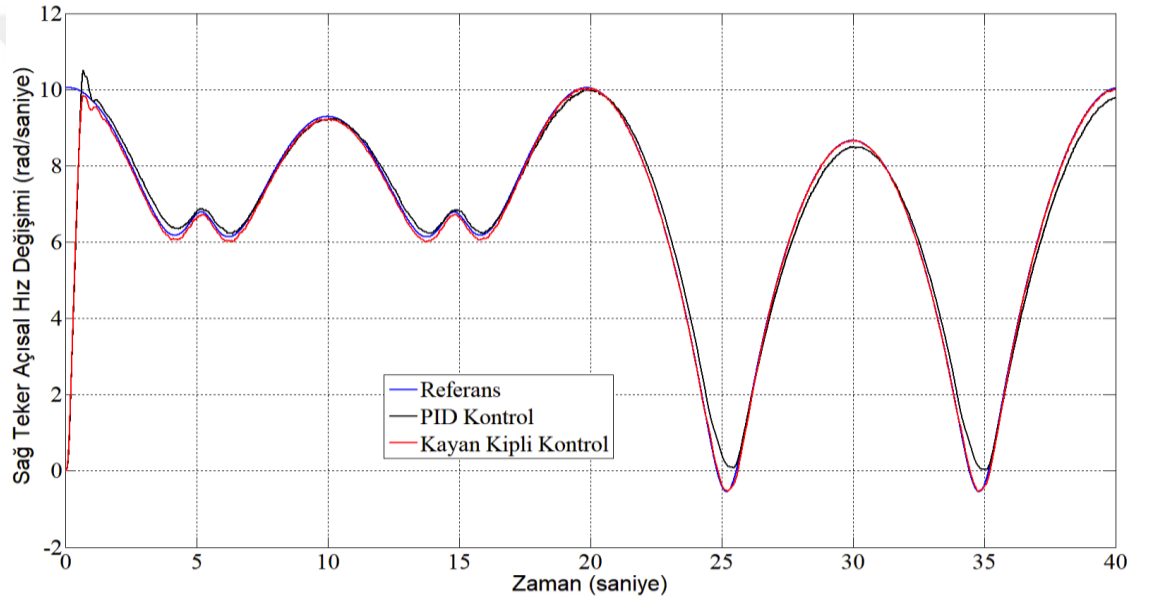


Şekil 4.1 Matlab Simulink' te hazırlanan kontrol yazılımı.

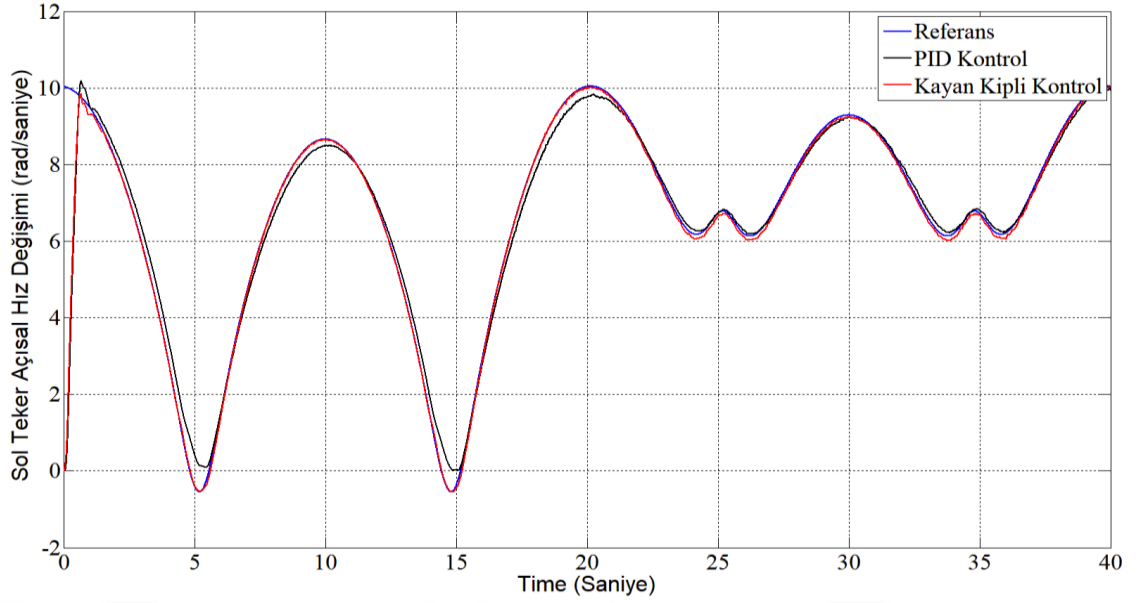
Kayan kipli kontrol yönteminin klasik PID denetleyicisine göre daha iyi performans gösterebileceğini kanıtlayabilmek için tasarlanan OYA' ya iki farklı yörünge tanımlanmıştır. Bu yörüngelerden ilki matematiksel ifadesi denklem 4.1 ile verilen ve yarıçapı $R = 1$ metre olan sekiz şeklinde bir yörüngedir. Tanımlanan bu yörünge matematiksel olarak trigonometrik fonksiyonlar içerdiğinden dolayı, aracın bu yörüngeyi izleyebilmesi için aracın sağ ve sol tekerleklerinin ani değişen açısal hız değişimlerine ayak uydurması gerekmektedir.

$$xr = R * \sin\left(2 * \frac{\pi}{20} * t\right), yr = R * \sin\left(\frac{\pi}{20} * t\right) \quad (4.1)$$

Bölüm 3' de elde edilen kinematik denklemler kullanılarak, OYA'nın tanımlanan bu yörüngeyi izleyebilmesi için sağ ve sol tekerleği tarafından gerçekleştirilmesi gereken açısal hız değişimleri ve bu değişimlere karşı PID denetleyicisi ve önerilen kayan kipli kontrol tarafından gösterilen performanslar Şekil 4.2' de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



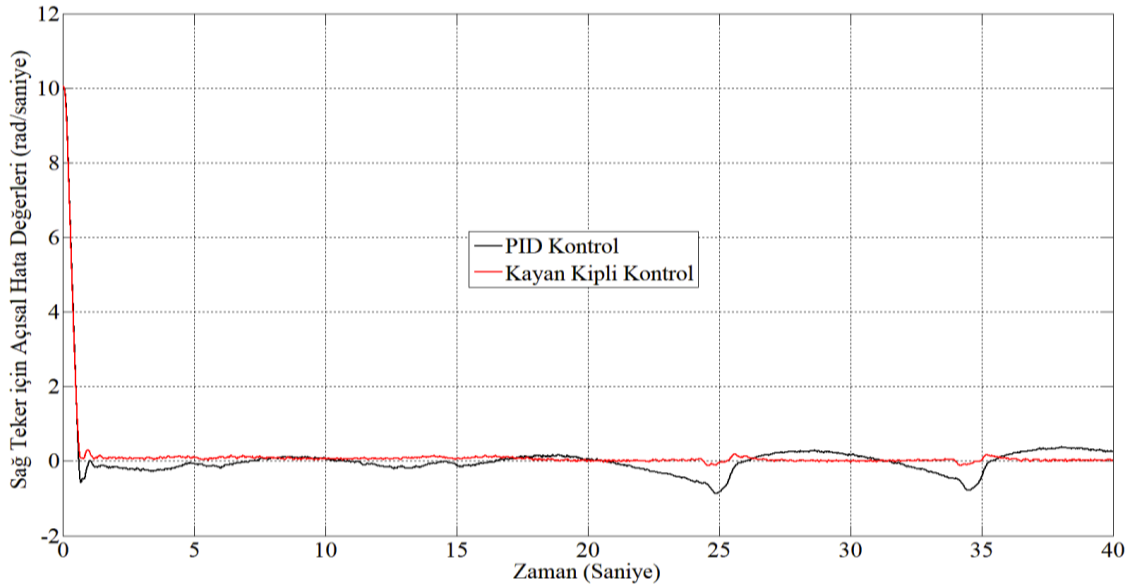
(a)



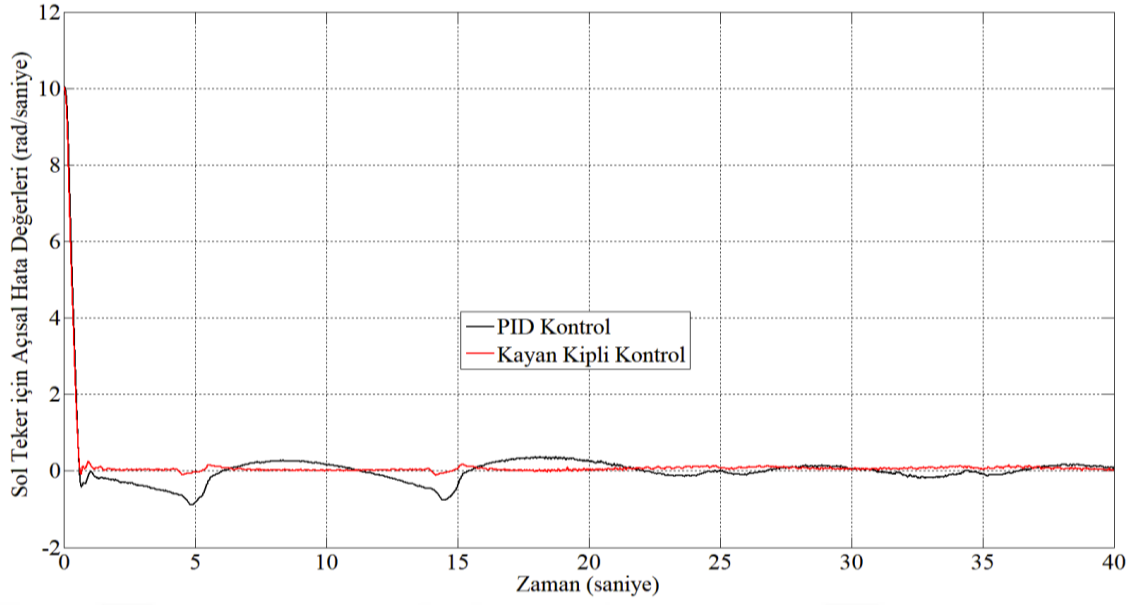
(b)

Şekil 4.2 Sekiz şeklindeki yörünge için sağ ve sol tekerleğin yapması gereken açısal hız değişimleri (a) Sağ tekerlek (b) Sol tekerlek

Kontrolcülerin performanslarına göre OYA'nın tanımlanan yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri ve motorlar için üretilen kontrolcü işaret değişimleri ise sırasıyla Şekil 4.3' de ve Şekil 4.4' de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

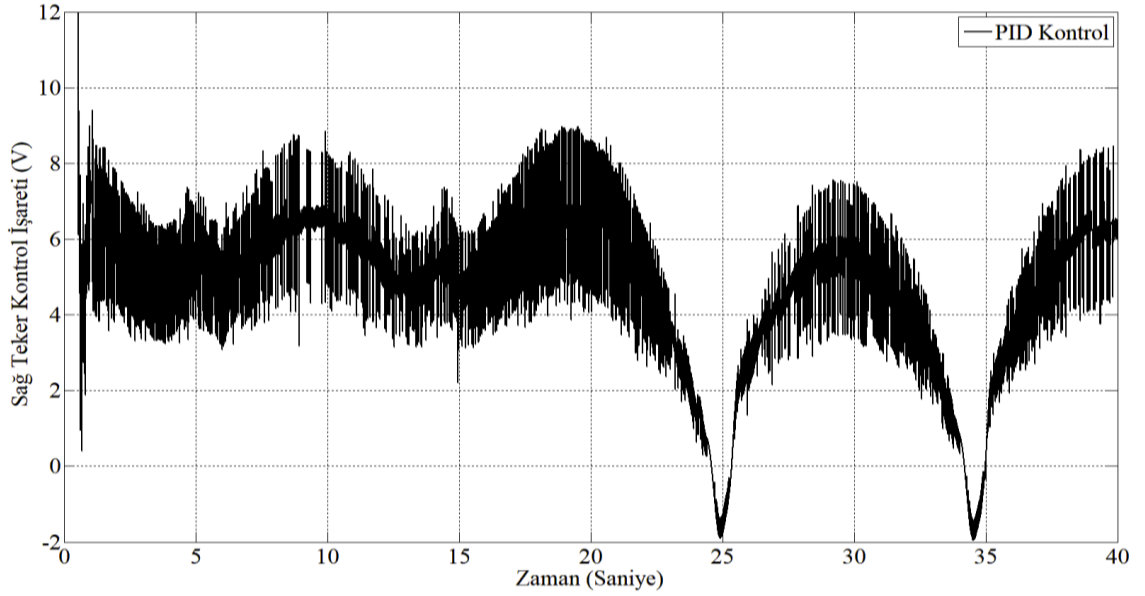


(a)



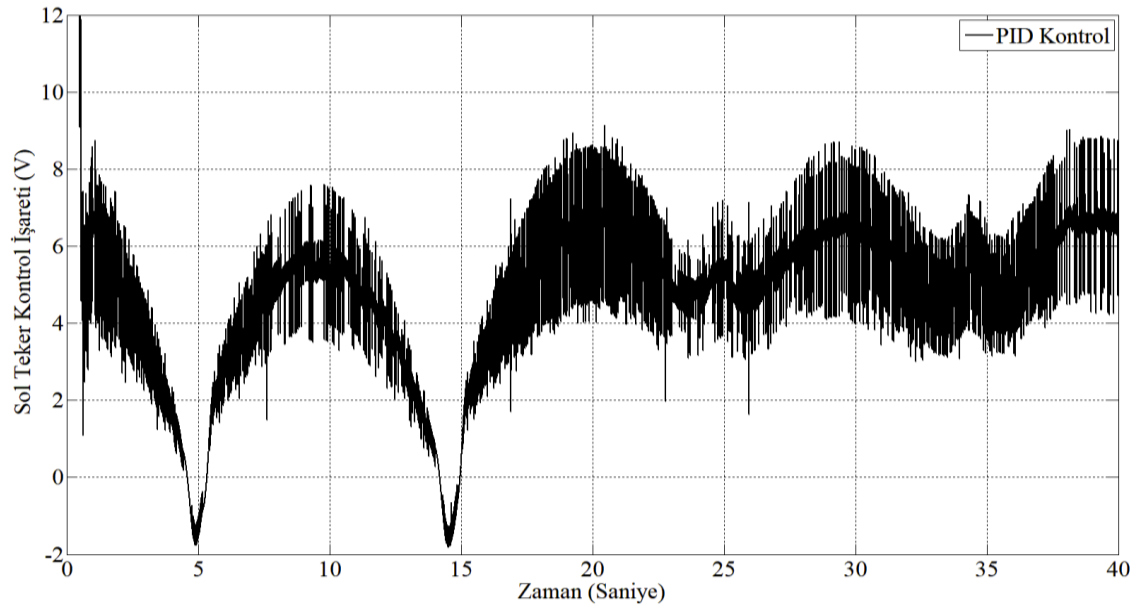
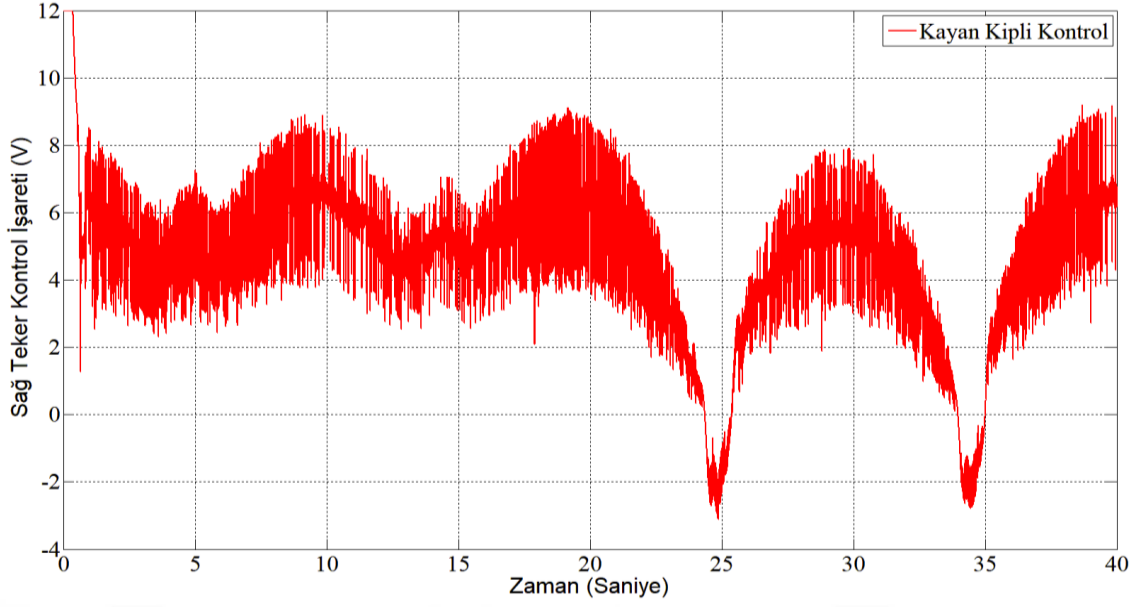
(b)

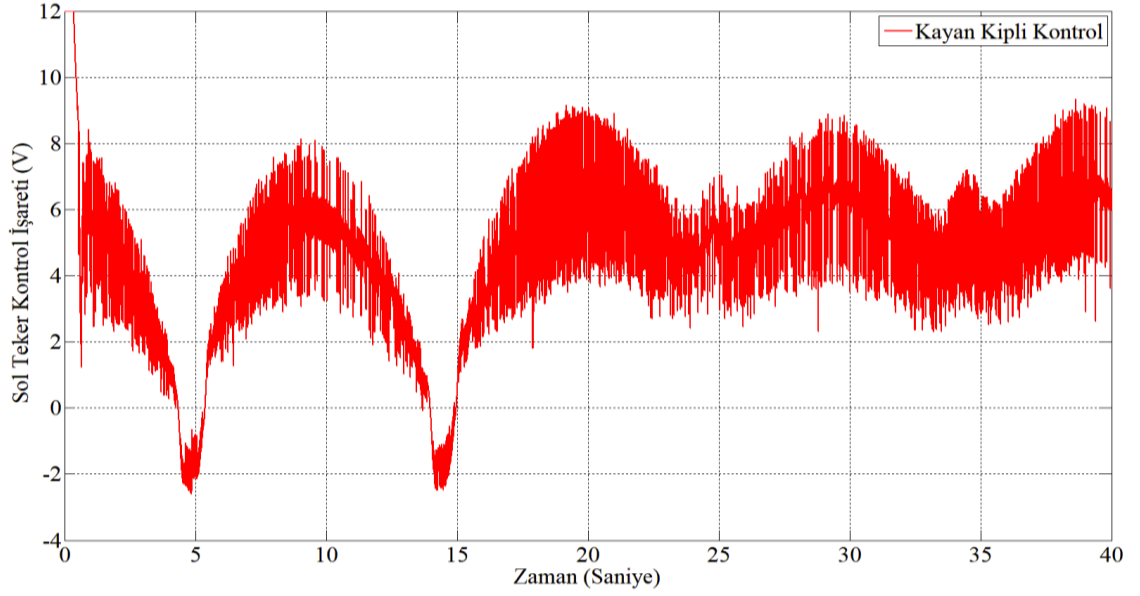
Şekil 4.3 Sekiz şekline yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri (a) Sağ tekerlek (b) Sol tekerlek.



(a)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA





(d)

Şekil 4.4 Sekiz şeklide yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri

(a) Sağ tekerlek PID (b) Sağ tekerlek Kayan Kipli Kontrol

(c) Sol tekerlek PID (d) Sol tekerlek Kayan Kipli Kontrol

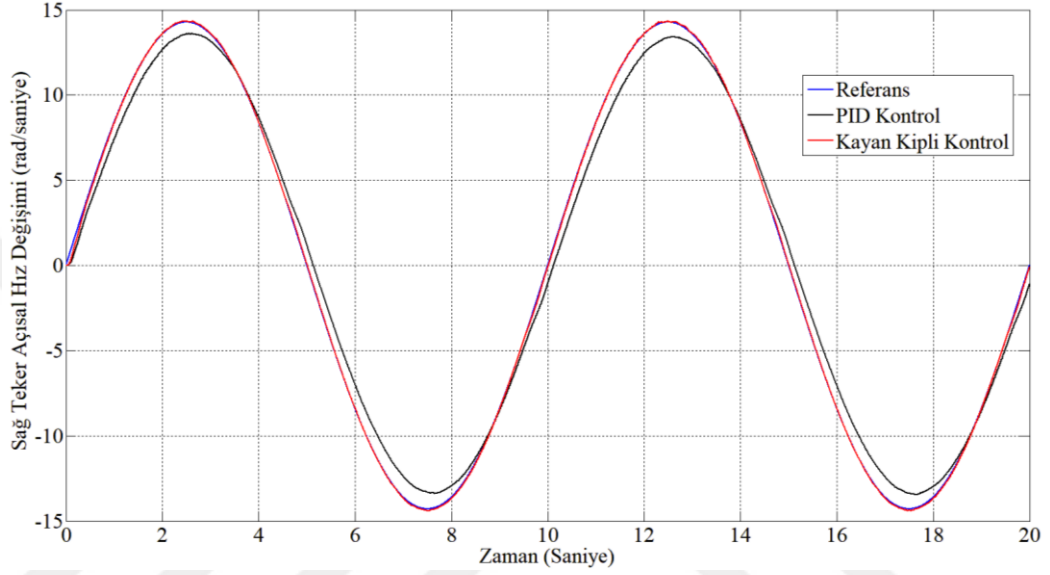
Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’ de görülen hata değerleri incelendiğinde OYA’nın yörünge kontrolü için PID denetleyici kullanılması durumunda OYA’nın tanımlanan örnek yörüngeleri yüksek sapma hatalarıyla takip edebildiği görülmektedir. PID denetleyicisinin kazanç parametreleri en uygun değerde seçilmesine rağmen sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hataları OYA’ nın tanımlanan yörüngeden istenmeyen derecede sapma yapmasına neden olmaktadır. Grafikten hesaplanabileceği üzere PID kontrol kullanılması durumunda %5.86’ lık bir aşım oluşurken kayan kipli kontrol kullanılması durumunda aşım değeri %0.77’dir. Yörünge kontrolü için PID kontrol yöntemi yerine kayan kipli kontrol yöntemi kullanılması durumunda kullanılması durumunda sistemin yörünge kontrol performansının artırıldığı görülmektedir.

Tasarlanan OYA için tanımlanan ikinci yörünge ise aracın gövde ve açısal hızlarıyla ilgilidir. Matematiksel ifadesi denklem 4.2 de gösterildiği gibi söz konusu OYA’ ya gövde hızı olarak bir sinüzoidal değişim fonksiyonu verilmiş açısal hız ise tanımlanmamıştır.

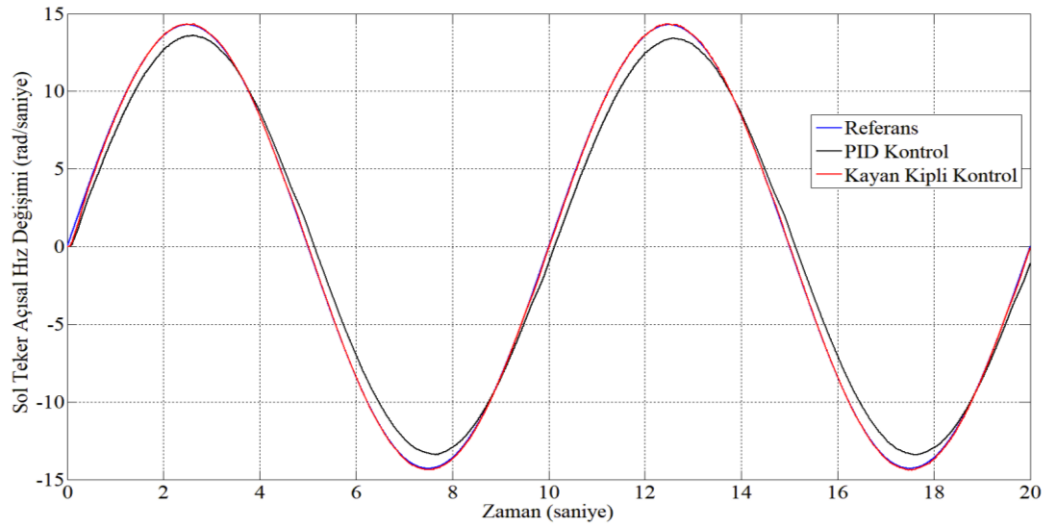
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

$$Wc = 0, Vc = 0.5 * \sin(2 * \pi * (1/10) * t) \quad (4.2)$$

Benzer şekilde elde edilen kinematik denklemler kullanılarak, OYA'nın tanımlanan bu yörüngeyi izleyebilmesi için sağ ve sol tekerleği tarafından gerçekleştirilmesi gereken açısal hız değişimleri ve bu değişimlere karşı PID denetleyicisi ve önerilen kayan kipli kontrol tarafından gösterilen performanslar Şekil 4.5' de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



(a)

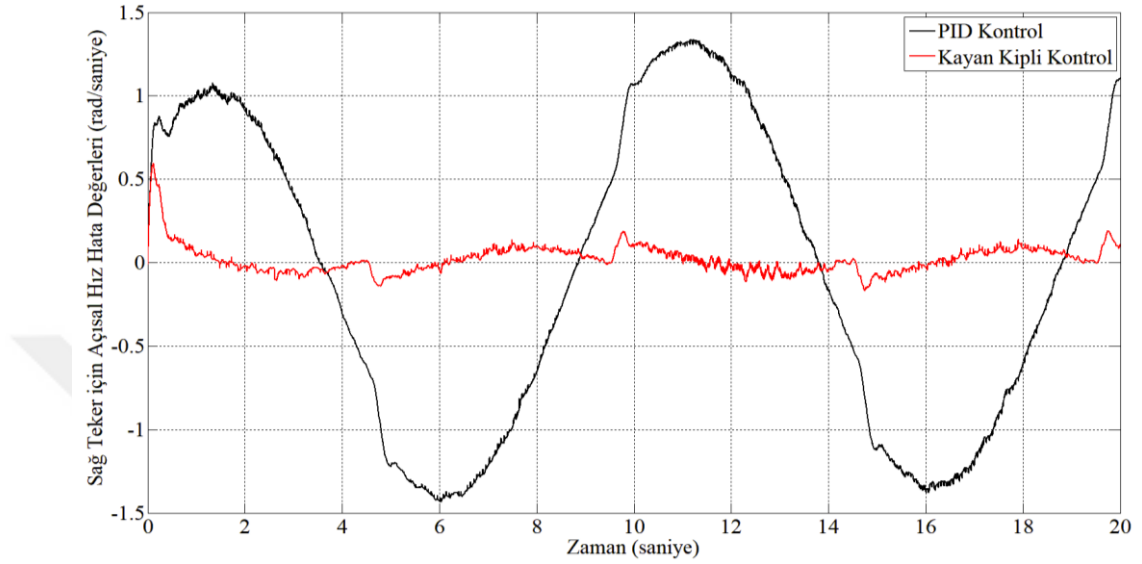


(b)

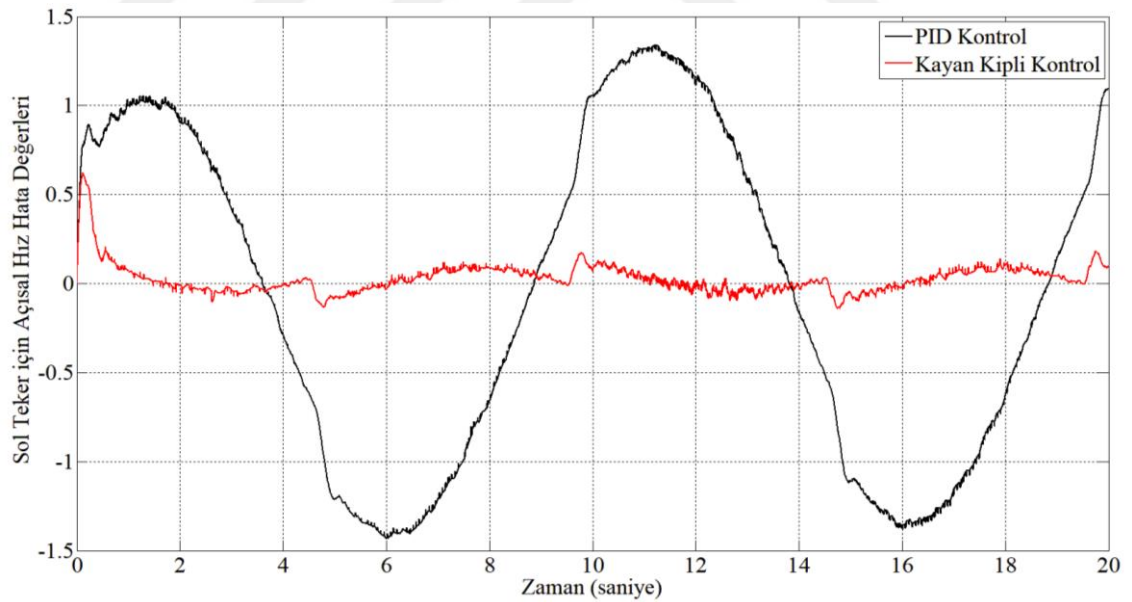
Şekil 4.6 OYA' nın tanımlanan yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri (a) Sağ tekerlek (b) Sol tekerlek.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Kontrolcülerin performanslarına göre OYA' nın tanımlanan yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri ve motorlar için üretilen kontrolcü işaret değişimleri ise sırasıyla Şekil 4.6' de ve Şekil 4.7' de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



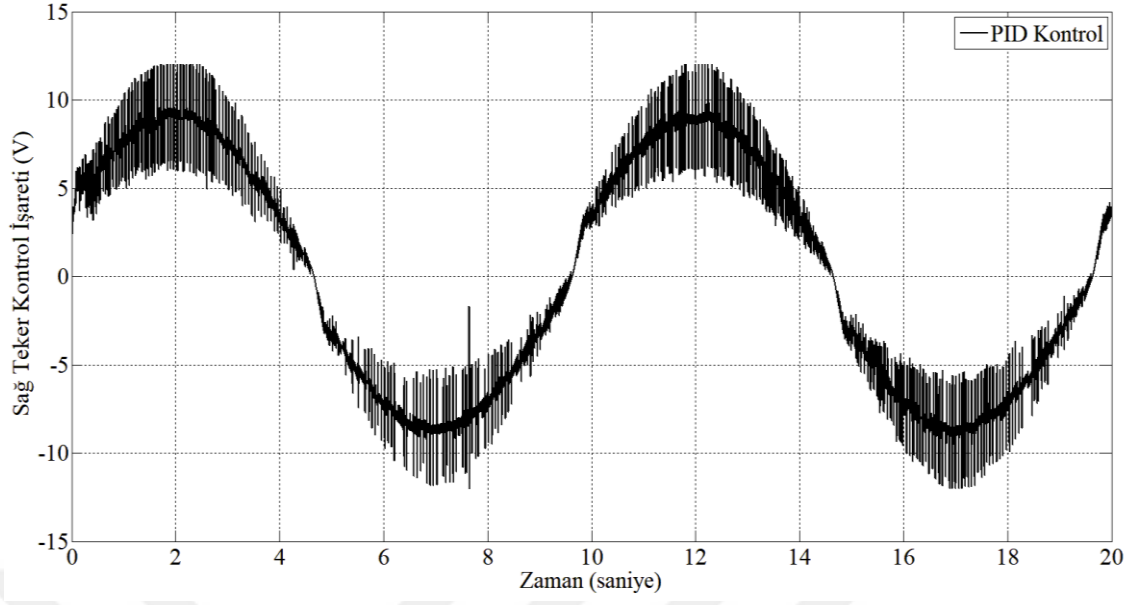
(a)



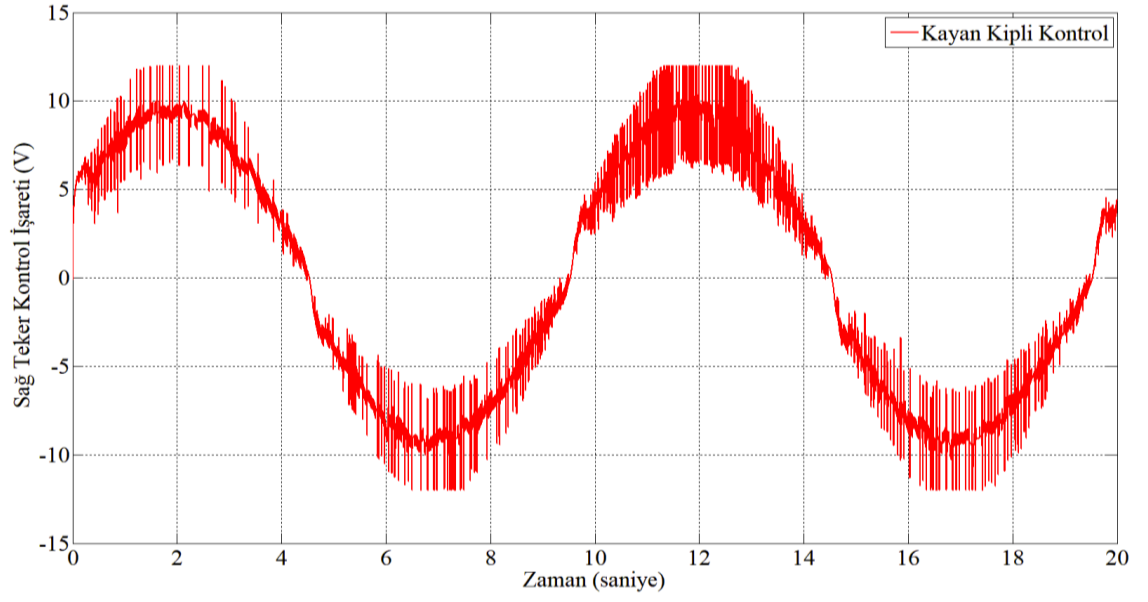
(b)

Şekil 4.6 OYA' nın tanımlanan yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri (a) Sağ tekerlek (b) Sol tekerlek.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

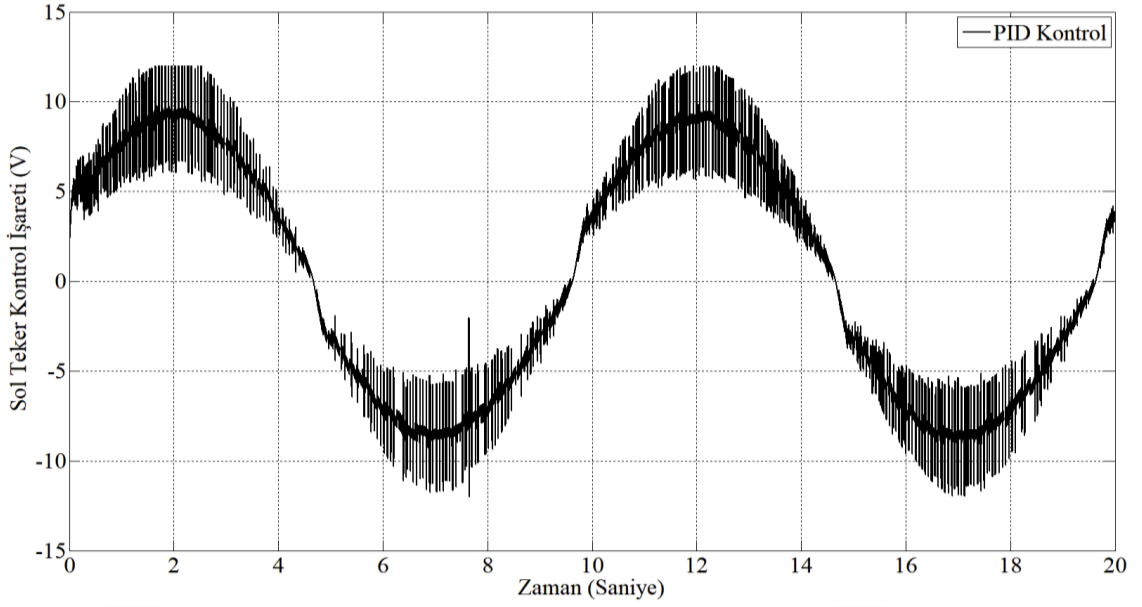


(a)

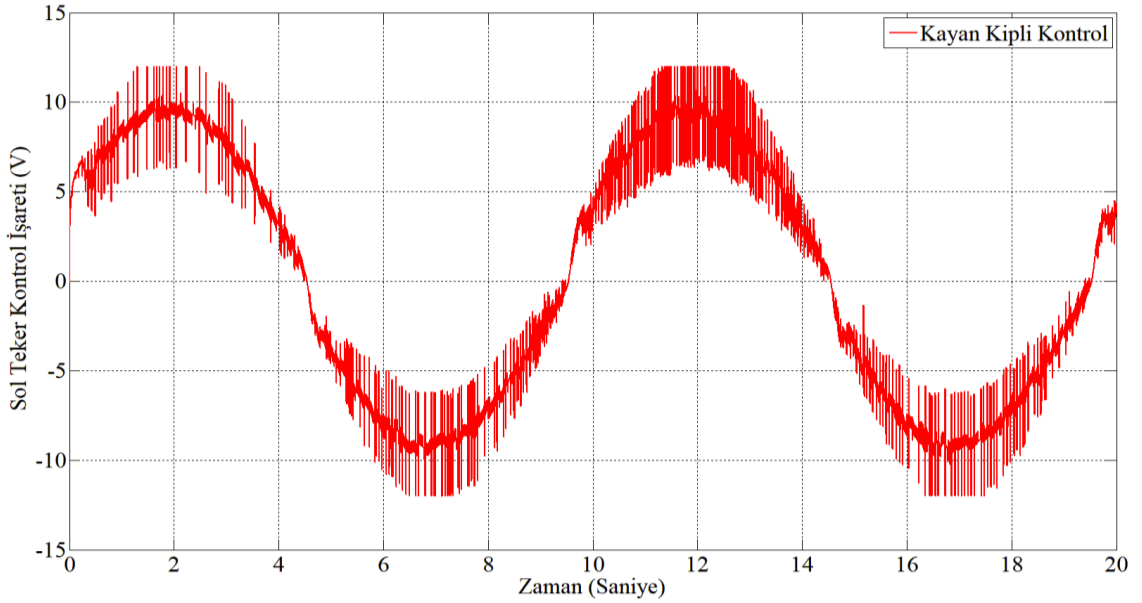


(b)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



(c)



(d)

Şekil 4.7 OYA' nın tanımlanan yörüngeyi izlemesi esnasında sağ ve sol tekerleklerde meydana gelen açısal hız hata değişimleri (a) Sağ tekerlek PID (b) Sağ tekerlek Kayan Kipli Kontrol (c) Sol tekerlek PID (d) Sol tekerlek Kayan Kipli Kontrol

Benzer şekilde gövde hızına bir sinüzoidal yörünge tanımlanması durumunda Şekil 4.5 ve Şekil 4.6' da görülen hata değerleri incelendiğinde OYA'nın yörünge kontrolü için PID denetleyici kullanılması durumunda OYA'nın tanımlanan örnek yörüngeleri yüksek sapma hatalarıyla takip edemediği görülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında üç serbestlik derecesine sahip bir otomatik yönlendirmeli aracın tüm matematiksel analizleri yapılmış olup tasarlanan sistemin yörünge takip kontrol performansını güçlendirmeye yönelik farklı kontrol yöntemlerinden yararlanılmaya çalışılmıştır. Öncelikle, tasarlanacak olan OYA'nın modeli temel alınarak sistem kontrolü için gerekli olan tüm kinematik ve dinamik analizler yapılmıştır. Ardından OYA'nın tasarımı başarıyla tamamlanmıştır.

Sistemin gerçek zamanlı yörünge kontrolü için iki farklı kontrol yönteminde yararlanılmıştır. Birinci yöntemde, sistem dinamikleri dikkate alınmadan bir PID denetleyicisi kullanılmıştır. İkinci yöntemde ise sistemin dinamik modellemesi tam olarak dikkate alınmış ve kayan kipli kontrol tekniği kullanılmıştır. Sistemin gerçek zamanlı yörünge izleme kontrol deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, sistemin dinamik modelini dikkate almadan yapılan klasik PID kontrolcüsü uygulanabilirlik yönünden kolay olsa da kontrol performansı yönünden oldukça zayıf kalmıştır. Fakat sisteme ait tam ve doğru bir dinamik modeli belirlenmesi ve özellikle bu modelin kayan kipli kontrol yönteminde kullanılması durumunda, sistemin yörünge kontrol performansının güçlendirdiği görülmektedir. Yapılan gerçek zamanlı kontrol deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sistem için yapılan matematiksel analizlerin doğru olduğu kanıtlanmış ve özellikle kayan kipli kontrol yönteminin kullanılması ile sistemin yörünge takip kontrolü güçlendirmiştir.

Bu tez çalışmasıyla elde edilen sisteme ait doğru dinamik modelin ortaya koyulması sistem yörünge takip performansını daha da güçlendirebilecek olan farklı kontrol yöntemlerinin uygulanması olarak sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Boquete, L., García, R., Barea R., Mazo, M. 1999. Neural Control of the Movements of a Wheelchair. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 25(3), 213-226.
- Cruz, C.D., Bastos L.T.F., Carelli, R. 2011. Adaptive motion control law of a robotic wheelchair. *Control Engineering Practice*, (19), 113-125.
- Ding D., Cooper, R.A. 2005. Electric powered wheelchairs. *IEEE Control Systems*, 25(2), 22-34.
- Fan, K., Yang Q., Li, P., Yan, W., On the design of AGV obstacle avoidance system based on fuzzy-PID dual-mode controller. 2012. *IEEE Conference on Control, Systems & Industrial Informatics*, 23-26 Sept. 2012. Bandung, Indonesia
- Fujii F., Wada, K. 2005. Analysis on the manual control characteristics of the human pilot during the operation of the powered wheelchair, *Advanced Robotics*, 19(2), 121-139.
- Gomes, M.V., Bassora L.A., Morandin O. Vivaldini K.C.T., 2016. PID control applied on a line-follower AGV using a RGB camera, 2016 *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1-4 Nov. 2016, Rio de Janeiro, Brazil
- Hoshino, S., Ota J, Shinozaki A., Hashimoto H.. 2007. Hybrid Design Methodology and Cost-Effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems- *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*(4,3), 360 – 372
- Hoshino S., Jun Ota , Akiko Shinozaki. 2007. Hybrid Design Methodology and Cost-Effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems Tokyo Inst. of Technol , Kanagawa
- Johnson, B.W., Aylor, J.H. 1986. Reliability&Safety Analysis of a FaultTolerant Controller. *IEEE Transactions on Reliability*, 35(4), 355-362.
- Kiraz, A.H., 2014. Görüntü İşleme Tabanlı İnsansız Mobil Araç Konumlandırma Sistemi. Kayseri, Türkiye
- Kung, Y.S., Huang, P.H., Su, F.C., Chen, T.S. 2011. Realization of an FPGAbased Motion control system for electric standing wheelchairs. *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, Langkawi, 47-52.
- Li X., Luo C., Xu Y. Key Laboratory of Measurement and Control of CSE (School of Automation, Southeast University), Ministry of Education, Nanjing
- Mercan, E., 2010. Otomatik Yönlendirmeli Araç Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Kontrolü. Erzurum, Türkiye.
- Nguyen, T.N., Su, S.W., Nguyen, H.T. 2011. Robust Neuro-Sliding Mode Multivariable Control Strategy for Powered Wheelchairs, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 19(1), 105- 111.
- Saadatzi, M.N., Poshtan, J., Saadatzi, M.H. 2011. Optimal multivariable two-degree-of-freedom control of electric wheelchair using non-dominated sorting genetic algorithm-II. *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, Denver Colorado, 376-381.
- Shung, J.B., Tomizuka, M.M., Auslander, D.M., Stout, G.G. 1983. Feedback Control and Simulation of a Wheelchair. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 105(2), 96-100.
- Şimşir, E., 2015. Çoklu Otomatik Kılavuzlu Araçlar ile Rota Planlarının Tasarımı ve Geliştirilmesi. Afyon, Türkiye

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Mehmet Rasim YILDIRIM
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 08.10.1991 / ERZURUM
Medeni Hali : Bekar
Telefon : +905383969066
e-mail : mehmetrasimyildirim@gmail.com

Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2018
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2014
Lise	Erzurum Merkez Anadolu Lisesi	2009

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Türk Telekom A.Ş. / 2015 - ...

Yayınlar (SCI, SCI-Expanded) (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)*

Hakemli Dergiler (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)

Ulusal Kongre Sunum (Sunum tarihleri dikkate alınmalıdır)

Uluslararası Kongre Sunum (Sunum tarihleri dikkate alınmalıdır)

*Tezle ilgili varsa yayın eklenerek belirtilmelidir.