



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NESNE TAKİBİ YAPAN DENGELİ ROBOT TASARIMI

YUNUS ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2018

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NESNE TAKİBİ YAPAN DENGE ROBOT TASARIMI

YUNUS ÇELİK

Bu tez,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2018

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Yunus ÇELİK tarafından hazırlanan “NESNE TAKİBİ YAPAN DENGELİ ROBOT TASARIMI” adlı bu tez, jürimiz tarafından 19/06/2018 tarihinde oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mahit GÜNEŞ (DANIŞMAN)
Elektrik-Elektronik Müh.
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doc. Dr. Mustafa ŞEKKELİ (ÜYE)
Elektrik-Elektronik Müh.
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kadir SABANCI (ÜYE)
Elektrik-Elektronik Müh.
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa ŞEKKELİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Yunus ÇELİK

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

NESNE TAKİBİ YAPAN DENGE ROBOT TASARIMI (YÜKSEK LİSANS TEZİ)

YUNUS ÇELİK

ÖZET

Gerçek zamanlı çalışan robotlar günümüzde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu robotlar endüstride imalat aşamasından hastanelerde teşhis ve tedavi araçlarına kadar geniş bir kullanım alanıyla insanlığa hizmet etmektedirler. Robotların istenilen göreve uygun olarak tasarlanabilmeleri ve verilen görevleri yüksek derecede doğrulukla yapmaları onları gün geçtikçe daha popüler hale getirmektedir.

Bu tez çalışmasında ters sarkacın benzeri mantıkla çalışan ve iki tekerlek üzerinde dengede duran bir robot tasarımı yapılmıştır. Ayrıca üzerine entegre edilmiş bir mesafe sensörü yardımı ile nesne takibi yapılmıştır. Tasarlanan robot iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda gerekli ivme sensöründen alınan işaretlerin filtrelenmesi ile daha kaliteli ve az titreşimli bir işaret elde etmek hedeflenmiştir. Bu filtreleme işlemi için Kalman filtreleme metodu kullanılmıştır. İkinci kısımda ise Kalman filtresinin çıktıları yorumlanarak iki adet Doğru Akım (DA) motorun kontrolü PID kontrol tekniği ile yapılmıştır. Robot kontrolü için birçok kontrol metodu kullanılabilir ancak gerçek zamanlı çalışan sistemlere kolay uygulanması ve basit yapısından dolayı PID kontrol tercih edilmiştir.

Bu robotun tasarlanması sırasında Kalman Filtresi, PID Kontrol ve Ters Sarkaç çalışma mantığı hakkında teorik ve pratik kazanımlar elde edilmiştir. Bunlara ek olarak ivme ve mesafe sensörleri Arduino programlama yardımıyla efektif bir şekilde kullanılmışlardır. Ek donanımlar kullanılarak daha fonksiyonlu bir robot tasarımı yapılabilir ve bu robotun spesifik görevlerde rol alması sağlanabilir.

Anahtar Kelimeler: Denge Robotu, Kalman Filtresi, PID Kontrol

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Haziran / 2018

Danışman: Prof. Dr. Mahit GÜNEŞ

Sayfa sayısı: 70

**DESIGNING AN OBJECT TRACKER SELF BALANCING ROBOT
(M.Sc. THESIS)**

YUNUS ÇELİK

ABSTRACT

Real time robots are widely used in these days. These robots serve humanity in a wide range of applications from industrial manufacturing to diagnosis and treatment tools in hospitals. The fact that the robots can be designed according to the desired purposes, and high accuracy in the implementation of tasks makes them more popular day by day.

In this thesis study, a two wheeled balance robot which has similar working principle with inverted pendulum was designed. In addition, object tracking was managed with a integrated distance sensor. The designed robot consists of two parts. In the first part, it is aimed to obtain a signal with better quality and less vibration by filtering acceleration sensor data. The Kalman Filter method was performed in this filtering process. In the second part, the outputs of the Kalman filter are interpreted and the control of two DC motors is performed by the PID control technique. Many control methods can be used for robot control, but PID control is preferred because of its easy implementation and simple structure in real-time systems.

During the design of this robot, the theoretical and practical gains on Kalman Filter, PID Control and Inverted Pendulum operation logic have been obtained. In addition, acceleration and distance sensors have been used effectively with Arduino programming. By using additional sensors, a more functional robot design can be managed and this robot can take a part in specific tasks.

Key words: Balance Robot, Kalman Filter, PID Control

University of Kahramanmaraş Sütçü İmam

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric-Electronic Engineering, June / 2018

Supervisor: Prof. Dr. Mahit GÜNEŞ

Page Numbers: 70

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőması sűresince engin bilgi ve tecrűbelerinden faydalandıđım ve alıőmamın her aőamasında sađladıđı bilimsel katkılardan dolayı Prof. Dr. Mahit GŪNEŐ'e ve her fırsatta bilgi ve birikimlerinden yararlandıđım tűm bűlűm hocalarıma, tűm çalıőmalarım sűresince deđerli gűrűő ve fikirlerini benimle paylaőan ve bana her konuda destek olan araőtırma gűrevlisi arkadaőlarıma teőekkűr ederim.

Son olarak, bu gűnlere gelmemde her tűrlű maddi ve manevi desteklerini gűrdűđűm aileme sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Önceki Çalışmalar	3
2. MEKATRONİK SİSTEM	10
2.1. Mekanik Sistem	10
2.1.1. Robot gövdesi	10
2.1.2. Tekerlekler	10
2.2. Elektriksel Sistem	11
2.2.1. Mikrodenetleyici kart	11
2.2.2. Doğru akım motorları	12
2.2.3. Doğru akım motor sürücüsü	13
2.2.4. Jiroskop ve akselerometre sensörü	15
2.2.5. Mesafe sensörü	17
2.3. Yazılım	18
2.3.1. Mikrokontrolör kart programlama	19
2.4. Haberleşme	20
2.4.1. PWM	20
2.4.2. I2C Haberleşme protokolü	22
3. MATEMATİK MODEL	24
3.1. Doğru Akım Motoru Matematiksel Modeli	24
4. KONTROL SİSTEMLERİ	27
4.1. Temel Kavram ve Tanımlar	31
4.2. Kontrol Sistem Türleri	31
4.2.1. Açık çevrim kontrol sistemleri	32
4.2.2. Kapalı çevrim kontrol sistemleri	32
4.3. Kontrol Sistem Tasarımı ve Analizi	33

Sayfa No

4.4. Kararlılık	34
4.5. Kontrolör Türleri.....	35
4.5.1. Oransal kontrolör	35
4.5.2. İntegral kontrolör	35
4.5.3. Türev kontrolör	36
4.5.4. PD kontrolör	36
4.5.5. PI kontrolör	37
4.5.6. PID kontrolör	38
4.6. Filtreleme	39
4.6.1. Tümlayıcı filtre	40
4.6.2. Hareketli ortalamalar filtresi	42
4.6.3. Kalman filtresi	44
5. DEVRE TASARIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	48
5.1. DA Motor Modeli ve Hız Kontrolü	48
5.2. Filtre Performanslarının İncelenmesi	50
5.3. Mekanik Devre Tasarımı	52
5.4. Elektriksel Devre Tasarımı	54
5.5. Deneysel Çalışmalar	56
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. N Bot tasarımı.....	3
Şekil 1.2. Üzerinde ağırlık bulunan denge robotu	4
Şekil 1.3. Segway insan taşıyan denge robotu	4
Şekil 1.4. NXTway-GS Robotu ön yüzü	5
Şekil 1.5. Denge robotu tasarımı.....	6
Şekil 1.6. Chalmers binek robot tasarımı.....	7
Şekil 1.7. Lego aksanlı denge robot tasarımı	8
Şekil 1.8. Edgar insan taşıyan denge robot tasarımı	9
Şekil 2.1. Robot gövdesi ölçüleri	10
Şekil 2.2. Robot tekerlek görseli	11
Şekil 2.3. Arduino UNO pin yüzü	11
Şekil 2.4. Doğru akım motoru	13
Şekil 2.5. L298N Motor sürücü devresi	14
Şekil 2.6. Motor sürücüsü devre şeması	14
Şekil 2.7. MPU6050 sensör arkalı önlü görüntüsü	16
Şekil 2.8. MPU6050 eksenleri	17
Şekil 2.9. Mesafe sensörü çalışma prensibi	18
Şekil 2.10. Mesafe sensörü üretilen ve toplanan dalga şekilleri	18
Şekil 2.11. Arduino programlama Arayüzü.....	19
Şekil 2.12. Görev döngüsüne bağlı değişen PWM işaretleri	21
Şekil 2.13. Simulink ortamında PWM üreten blok şema.....	22
Şekil 2.14. I ² C Haberleşme örnek bağlantı şeması	22
Şekil 2.15. I ² C Haberleşme bilgi gönderme grafiği	23
Şekil 3.1. DC Motor modeli.....	24

Sayfa No

Şekil 4.1. LKR Kontrol blok şeması	27
Şekil 4.2. Bulanık mantık iç yapısı	28
Şekil 4.3. Bulanık mantık kontrol blok şeması	29
Şekil 4.4. Kontrol mekanizması blok diyagramı	30
Şekil 4.5. Açık çevrim kontrol sistemi	32
Şekil 4.6. Kapalı çevrim kontrol sistemi	33
Şekil 4.7. Bir sistemin geçici ve kalıcı durum cevapları.....	33
Şekil 4.8. Kontrol sisteminin fiziksel parametreleri	34
Şekil 4.9. P Kontrolörün sistem üzerine etkisi.....	35
Şekil 4.10. I Kontrolörün sistem üzerine etkisi.....	36
Şekil 4.11. PD Kontrolör blok bağlantı şeması	36
Şekil 4.12. PD Kontrolörün sistem üzerine etkisi	37
Şekil 4.13. PI Kontrolör blok bağlantı şeması	37
Şekil 4.14. PI Kontrolörün sistem üzerine etkisi	38
Şekil 4.15. PID Kontrolör blok bağlantı şeması	39
Şekil 4.16. Tümlayıcı filtre blok şeması	40
Şekil 4.17. IMU Sensörün tümlayıcı filtre blok şeması	41
Şekil 4.18. Akselerometre ve tümlayıcı filtre çıkış işaretleri.....	41
Şekil 4.19. Hareketli ortalamalar filtresi çalışma prensibi.....	42
Şekil 4.20. Akselerometre ve hareketli ortalamalar filtresi çıkış işaretleri.....	43
Şekil 4.21. Akselerometre ve hareketli ortalamalar filtresi çıkış işaretleri (yakın)	43
Şekil 4.22. Kalman filtresi çalışma yapısı	45
Şekil 4.23. Akselerometre ve kalman filtresi çıkış işaretleri	46
Şekil 4.24. Kalman filtresi yazılım algoritması	47
Şekil 5.1. Doğru akım motoru simulink modeli	49

Sayfa No

Şekil 5.2. Doğru akım motoru hız kontrolü Simulink model	49
Şekil 5.3. Doğru akım motor hız kontrolü çıkış işareti.....	50
Şekil 5.4. Kalman filtresi ve tümleyici filtre çıkış işaretlerinin karşılaştırılması	51
Şekil 5.5. Kalman filtresi ve hareketli ortalamalar filtresi çıkış işaretlerinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 5.6. Kalman filtresi ve hareketli ortalamalar filtresi çıkış işaretlerinin karşılaştırılması.....	52
Şekil 5.7. Robot gövdesi alt kısım solidworks çizimi.....	53
Şekil 5.8. Robot gövdesi üst kısım solidworks çizimi	53
Şekil 5.9. Robot yan görünüm	53
Şekil 5.10. Robot üst görünüm	54
Şekil 5.11. Robotun donanımlarının elektriksel bağlantı şeması.....	55
Şekil 5.12. Mesafe sensörü set değeri ilişkisi	55
Şekil 5.13. Denge Sistemi blok diyagramı.....	56
Şekil 5.14. Devrilen robot açılı grafiği.....	57
Şekil 5.15. Devrilen robot PWM grafiği.....	57
Şekil 5.16. Oransal sabit (P) açılı grafiği	58
Şekil 5.17. Oransal sabit (P) PWM grafiği	58
Şekil 5.18. Oransal ve integral sabit (PI) açılı grafiği.....	59
Şekil 5.19. Oransal ve integral sabit (PI) PWM grafiği.....	59
Şekil 5.20. PID açılı grafiği.....	60
Şekil 5.21. PID PWM grafiği.....	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Doğru akım motoru teknik özellikleri.....	13
Çizelge 2.2. Motor sürücüsü doğruluk tablosu	15
Çizelge 2.3. Mpu6050 sensör pin özellikleri	16
Çizelge 2.4. Arduino bacak özellikleri.....	19
Çizelge 2.5. Görev döngüleri ve kod karşılıkları	21
Çizelge 3.1. Motor parametreleri	26
Çizelge 4.1. PID parametrelerin sistem üzerindeki fiziksel etkileri.....	34
Çizelge 5.1. Motor parametreleri	48
Çizelge 5.2. Kullanılan parametre değerleri	50
Çizelge 6.1. Denge kontrolü için kullanılan PID parametreleri.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

g	: Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
R_a	: Motor direnci (Ω)
L_a	: Motor endüktansı (H)
V	: Armatür gerilimi (V)
I_a	: Armatür akımı (A)
T_m	: Motor torku (N.m)
K_T	: Motor tork Sabiti (N.m/A)
J_m	: Motor atalet momenti (kgm^2)
K_b	: Zıt emk sabiti (V.s/rad)
B_m	: Viskos sürtünme katsayısı (N.m.s/rad)
N	: Çevrim oranı
m	: Tekerlek ağırlığı (g)
ω	: Açısal hız (rad/s)
θ	: Açısal konum (rad)
DA	: Doğru akım
RPM	: Dönüş hızı
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
GND	: Toprak hattı
SCL	: Zaman sayma hattı
SDA	: Bilgi gönderme hattı
P	: Oransal kontrol sabiti
I	: İntegral kontrol Sabiti
D	: Türev kontrol sabiti
LKR	: Lineer kuadratik regülatör
X_k	: Mevcut durum vektörü
Z_k	: Ölçüm sonucu

K_k	: Kalman kazancı
r(t)	: Giriş değeri
e(t)	: Hata değeri
u(t)	: Çıkış değeri
IN	: Giriş
OUT	: Çıkış
HIGH	: 5V
LOW	: 0V

1.GİRİŞ

Son teknolojik gelişmeler sayesinde sinyal işleme çok kısa sürede başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Gelişmiş bilgisayarlar ve işlemcilerin kullanılması işlem sürecini kısaltıp başarılı sonuçların alınmasında önemli rol oynamaktadır. İşaret işleme ve görüntü işleme metotlarının gelişmesi sonucunda insanların yaşamlarını kolaylaştırmak amacıyla birçok gerçek zamanlı çalışan robot tasarlanmıştır. Büyük bir çoğunluğu sensör destekli olan bu robotlar günlük hayatlarımızda yerlerini almaya başlamışlardır. Bu robotlar insanların taşınmasını amacıyla, fabrikalarda üretim amacıyla ya da günlük hayatımızda işlerimizi kolaylaştırmak amaçlı olarak birçok alanda kendine uygulama alanı bulmuştur. İşaret işleyen ve içerilerindeki karar verme mekanizması ile verilen görevleri yerine getiren robotlar mevcuttur. Bu görevlerin yerine getirilmesi için işaret işleme teknikleri büyük önem arz etmektedir. Endüstride kullanılan cihazlardan, hastanelerde kullanılan medikal cihazlara kadar işaret işlemenin çok geniş bir uygulama alanı vardır. İnsansız hava araçları ve sürücüyü ihtiyaç duymadan belirli bir rota çizerek hareket eden araçlar günümüzde görüntü işleme ve işaret işleme teknikleri ve teknolojik gelişmelerin birer ürünü olarak kullanılmaktadırlar. Askeri alanda sarp sistemler ve diğer savunma sistemleri 'de ayrıca görüntü işleme ve işaret işleme metotları yardımıyla yapılmaktadır (Arvidson,2012; Azizi,2017). Bu sistemler kamera açısına veya radar alanına giren nesneyi komuta merkezinin onayı ile imha etme yeteneğine sahiptirler. Bu tür sistemlere sahip ülkelerin gerek prestij gerekse ekonomik olarak diğer ülkelere daha avantajlı olduğunu söylemek mümkündür (Acar, 2008; Akyol, 2012; Balasubramanian, 2011 ve Bature, 2014).

Denge robotu çalışma mantığı ise günümüzde insanların kullandığı iki tekerlekli Hoverboard ve iki tekerlekli Scooterlarda kullanılmaktadır. Burada ivme sensöründen alınan açı bilgileri sayesinde motorlar aksanı denge pozisyonunda tutacak şekilde dönerler. Bu dönme sonucunda denge anını yakalamak hedeflenir. Denge robotlarının çalışma mantıkları aynı olsada farklı tasarımlar ile marketlerde yerini almıştır. İnsan taşıma amacı ile de tasarlanan bu robotlar elle tutularak sürülen Segway-Scooter türü ya da sadece ayaklarla denge sağlayan Hoverboard türü olarak sınıflandırılabilirler. Bu çalışmada da işaret işleme yaparak ivme sensörü çıktıları yorumlanmıştır. Bu yorumlama sonucunda motor sürücüsüne yön ve hız bilgileri aktarılmıştır. Bu bilgiler sayesinde motorlar çalıştırılarak denge noktasına erişmek hedeflenmiştir. Robot düzeneğinin ön tarafa doğru eğilmesi sonucu tekerler öne doğru dönmeye başlar ve robot denge konumunu yakalamaya

çalışır (Maddukuri, 2015). Bu konumu yakalamaya çalışırken düzenek öne doğru bir hareket yapar (Azizi, 2017). Taşıma amacıyla kullanılan Hoverboard türündeki robotların çalışma mantığı bu şekilde ifade edilebilir. Segway türünün çalışma mantığı biraz daha farklıdır. Bu türde sürücü tarafından kullanılan bir direksiyon mevcuttur. Bu direksiyon klasik araç direksiyonlarından farklıdır. Birçok sensörü içerisinde barındıran bu yapı sürücünün hangi tarafa doğru hareket etmesi gerektiğini tespit edebilir. Mekanik düzenek her zaman denge konumunda bulunuyor ve gelen komutlara göre belirli bir hızda öne veya arkaya hareket edebiliyor. Sağa sola dönüşlerde ise dönülmek istenen yöne bağlı olarak bir tekerlek diğerinden biraz daha hızlı dönerek bu işlem başarılı bir şekilde gerçekleştirilir (Chi, 2005; Chiu, 2006 ve Lin, 2009).

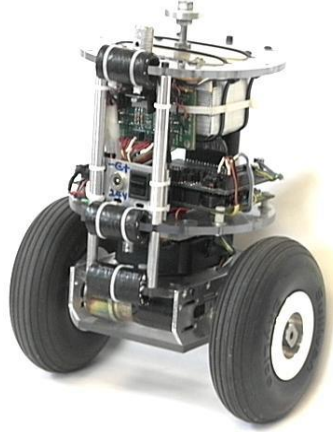
Denge robotları lineer olmayan bir yapıya sahip olduklarından dolayı modellenmesi ve kontrol metotlarının başarısının ölçülmesi konusunda çalışmalara sıklıkla konu olmaktadır (Spong,2001). Kullanılan ivme sensörleri altı eksenli olduklarından dolayı karmaşık bir yapıya sahiptirler (Huang, 2010; Jean, 2009). Ayrıca hassas yapılarından dolayı bu sensörler gürültülü işaretler üretmektedirler. Bu üretilen işaretlerle başarılı bir kontrolün yapılması pek mümkün değildir. Bu yüzden Kalman filtresi yardımıyla bu gürültülü işaretler daha durağan işaretlere dönüştürülürler. Denge robotu kontrolü için bu filtrelemede tek başına yeterli olmayabilir. Basit if-else komutu yardımıyla denge sağlanamayabilir. Bu yüzden robota PID kontrol metodu uygulanmış ve daha başarılı bir kontrol sağlanmıştır. PI-PD ve PID kontrol yapıları ayrı ayrı uygulanarak en optimal sonuçlar alınmıştır. Bu sonuçlar grafikler yardımı ile desteklenip yorumlanmıştır. Bu robotlar bulunduğu yerde etrafında dönebilme ve istenilen açığa eğile bilme kabiliyetlerinden dolayı diğer robotların yapamadığı bazı işlemleri yapabilmektedirler. Bu duruma örnek olarak engebeli alanlarda 4 tekerlekli araçların rahat hareket edememeleri örnek verilebilir (Lin, 2007). Denge robotları ise üzerlerinde bulunan açı sensörleri yardımı ile engebeli arazilerde dahi daha başarılı bir şekilde hareket edebilmektedirler. Taşıma aracı olarak da kullanılan bu robotlar yurt dışı markalar tarafından üretilip ülkemize yüksek fiyatlar karşılığında ithal edilmektedirler. Bu durum bu tezde bir konsantrasyon aracı olarak kullanılmış ve tasarlanan bu prototipin başarısı incelendikten sonra gerçek büyüklüğündeki bir taşıma aracı yapılması planlanmaktadır. Bu tez çalışmasında edinilen PID kontrol, Kalman filtreleme gibi teorik ve motor, sensör kullanımı gibi pratik kazanımlar, hedeflenen gerçek boyuttaki cihazın yerlisinin yapılması konusunda yeterli olacağı düşünülmektedir (Bature, 2014; Bugeja,2003; Sundin, 2012).

1.1 Önceki Çalışmalar

Denge robotu çalışma mantığı ve dinamiği bu alanda yapılan çalışmalara bakılarak incelenerek gerekli malzemeler ve yazılımlar tedarik edilmiştir. İki tekerlek üzerinde denge duran robot lineer olmayan bir yapıya sahip olduğundan dolayı araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu sistem ayrıca kontrol teorisinin nasıl çalıştığını ve ne gibi parametrelerin düzenlenmesi gerektiği hakkında bilgi verici ve öğretici bir yapıya sahiptir. 4 tekerlekli araçlara göre daha küçük ve basit olmalarından dolayı ulaşım amaçlı kullanımları mevcuttur (Enginoğlu, 2012).

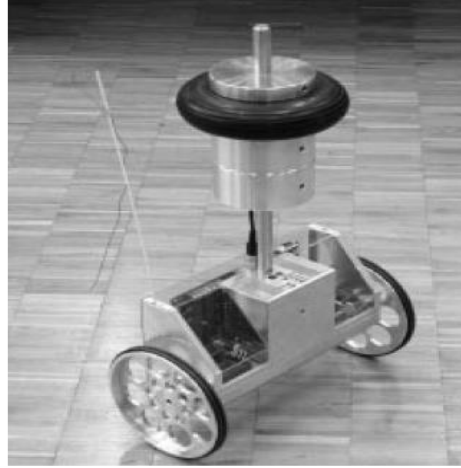
Robotu dengede tutmak için birçok yöntem kullanılabilir. Sistem basit olsa dahi robotu dikey pozisyonda denge tutmak için birçok açı hesabı yöntemi mevcuttur. İvme sensörü verileri gürültülere sahip olduğundan dolayı bu gürültülerin kalman filtresi gibi başarılı filtreler yardımıyla bastırılması daha iyi sonuçların alınmasında yardımcı olacaktır (Karla, Dipesh & Stol, 2007).

N BOT adında bir denge robotu geliştiren David P. Anderson denge sağlamak için jiroskop ve ivme ölçeri beraber kullanmıştır. Sensörlerden gelen verileri filtrelemek için ise Kalman filtresi kullanmıştır. Açı ve pozisyon bilgilerini beraber kullandığından sistem daha başarılı bir şekilde dengede kalmaktadır (Anderson, 2010).



Şekil 1.1. N Bot tasarımı (Anderson,2010)

Bir başka çalışmada ise araştırmacılar Şekil 1.2'deki denge robotunu tasarlamışlar. Bu robotun üzerine bir ağırlık koyarak sanki üzerinde bir sürücü varmış gibi davranmasını sağlamışlar ve bu koşullar altında jiroskop kullanarak denge sağlamaya çalışmışlardır (Grasser, D'Arrigo, Colombi & Rufer, 2002).



Şekil 1.2. Üzerinde ağırlık bulunan denge robotu (Grasser, 2002)

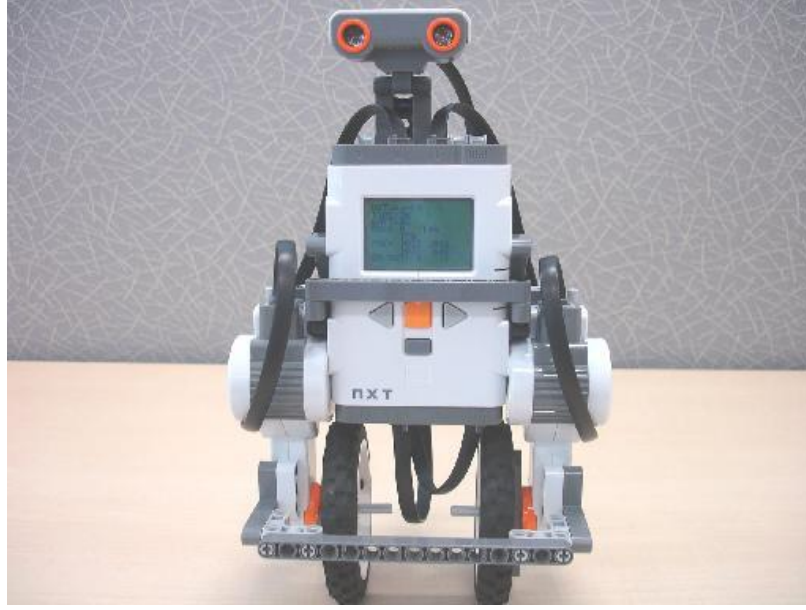
Bir diğer çalışmada ise Segway adı verilen ticari bir denge robotu tasarlanmış ve piyasaya sürülmüştür. Dean Kamen tarafından 2001 yılında tasarlanmış ve insan taşımayı hedefleyen bu robotun tasarımı Şekil 1.3’de görülmektedir. İnsanların duracağı bir bölüme sahiptir ve 5 tane jiroskop bulunmaktadır. Bunların 3 tanesi aktif olarak kullanılmakta diğer iki tanesi yedek olarak bulundurulmaktadır. Saatte 20 km/h hıza ulaşabilen bu tasarımın gezi, golf ve kargo amaçlı farklı çeşitleri bulunmaktadır.



Şekil 1.3. Segway insan taşıyan denge robotu (Segway, 2001)

Denge robotu kontrolü için kontrol metotlarının kullanılmadığı ve açığa göre motorların sürüldüğü çalışmalarda literatürde bulunmaktadır. Kalra isimli araştırmacı ise 2007 yılında denge robotunun üzerine koyduğu ekstra bir motor ile gerekli denge torkunu sağlamayı amaçlamıştır. Bu robotun dengesi için Lineer Kuadratik Regülatör kullanmıştır (Burkert, 2004). Çalışmanın sonunda üzerine koyduğu reaksiyon motoru adını verdiği tasarımda daha az enerji harcadığını söylemiştir (Kalra, 2007).

Gyroboy ise 2016 yılında Rusya’da bir ekip tarafından geliştirilen lego aksanlı denge robotudur. Robotun tasarımı ve kontrolü Matlab Simulink ortamında yapılmıştır. Kontrol aşamasında Lineer Kuadratik Regülatör kontrol yöntemi kullanılmıştır. Aynı şekilde NXTway-GS adlı robot uygulamalı olarak yapılmıştır. Bu tez çalışmasında matematiksel model ve Matlab modeli oluşturulurken NXTway-GS adlı robottan çokça faydalanılmıştır. Bu robotun görseli Şekil 1.4’ de gösterilmiştir (Yamamoto, 2013).



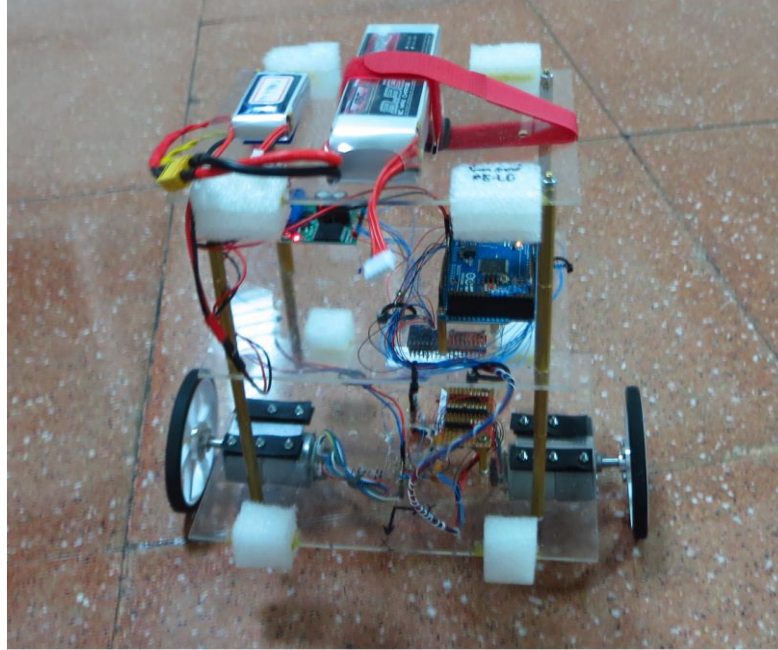
Şekil 1.4. NXTway-GS robotu ön yüzü

Bir diğer çalışmada Nasir ve arkadaşları doğrusal davranışları olmayan bu yapıya iki farklı kontrol yöntemi uygulamışlardır. Bu kontrol yöntemlerinden birincisi bulanık mantık ile kontroldür. Bu kontrol yönteminde Nasir ve arkadaşları bir kural tabanı oluşturmuşlardır ve simülasyon ortamında bulanık mantık kontrolü yapmışlardır. İkinci kontrol yöntemi olarak PID kullanmışlardır. İki yöntemde kontrolü ile ilgili gerekli bilgileri grafikler ile desteklemişlerdir. Çalışmanın sonunda bulanık mantık kontrolün PID kontrole göre daha üstün bir başarı gördüğünü belirtmişlerdir. PID kontrolün aşırı salınım konusunda yetersiz kaldığı ve bulanık mantık kontrolün tepki süresinin iyi bir denge için yetersiz olduğu sonuçlarına varılmıştır (Nasir, 2011).

Bir başka çalışmada Fu Kao ve arkadaşları dengede dururken görüntü işleyen bir robot tasarlamışlardır. Bu robotun içerisinde iki farklı mikrodenetleyici kart kullanılmıştır. Arduino ile gerekli denge işlemleri yapılırken. Raspberry Pi mikrodenetleyici kart yardımı ile görüntü işleme yaparak ev işlerinde kullanılması planlanan bu robotu tasarlamışlardır.

Fu Kao ve arkadaşları gerçek zamanlı çalışan sistemlerde mikrodenetleyici kartların bilgisayar ve dijital sinyal işlemcilerine göre daha başarılı olduklarını savunmuşlardır (Kao, 2017).

2013 yılında Juang ve arkadaşları tarafından bu tezde yapılan robota benzer elemanları kullanılarak bir denge robotu tasarlanmıştır. Şekil 1.5' de robotun görseli sunulmuştur. 2 tane jiroskop kullanılarak gürültüler tümleyici (complementary) filtre yardımı bastırılmıştır. Bu tür filtreler Kalman filtrelerine göre daha basit mantıkta çalışmaktadır. Ortalama alma mantığı ile çalışan bu filtreler Kalman filtrelerine göre zayıf kalmaktadır ancak basit yapısı nedeni ile tercih edilmektedir. Bu çalışmada dinamik model oluşturulup LQR yöntemi ve PI, PD, PID kontrol metotları sırasıyla başarımları incelenmiştir. Çalışmada PI ve PD kontrolör yöntemleri ile başarılı bir denge kontrolünün sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca daha başarılı bir denge sağlanabilmesi için ağırlık merkezinin yeri, daha iyi bir matematiksel modelin oluşturulması, sensörlerin daha başarılı çalışması için kullanılan filtrenin geliştirilmesi gibi tavsiyelerde bulunmuşlardır (Juang, 2013).



Şekil 1.5. Denge robotu tasarımı

Bir diğer çalışmada Chalmers adı verilen bir taşıma robotu İsveç'te tasarlanmıştır. Bu çok fonksiyonlu robotta LQ mikrodenetleyici kullanılmıştır ve birçok teste tabi tutulmuştur. GPRS ve hız göstergesi eklenerek profesyonel bir robot tasarımı yapılmıştır. Üzerinde bulunan batarya yardımı ile 12 km mesafeye kadar sorunsuz bir şekilde gidebilmekte ve 100 kilograama kadar taşıma yapabilmektedir. Maksimum hızı 20,7 km/s

olan bu araç düşük pil uyarısı vererek kolayca şarj edilebilmektedir. Şekil 1.6' da robotun görseli sunulmuştur (Sundin, 2012).



Şekil 1.6. Chalmers binek robot tasarımı (Sundin, 2012)

Nanyang Üniversitesinde çalışan Elvin isimli geliştirici kendi imkanları ile normal fiyatının yarı fiyatına bir Segway taşıma robotu tasarlamıştır. Bu robotun kontrolü için PD kontrolör kullanmıştır. Basit bir tasarıma sahip olan bu taşıma robotu çok profesyonel bir şekilde tasarlanmıştır.

Bir diğer çalışmada Frans isimli araştırmacı scooter tarzında bir robot tasarımı yapmıştır ve bu çalışmayla ilgili yayınlar yapmıştır. Frans kullandığı sensörleri ve motorları benzerleri ile karşılaştırarak dikkatli bir şekilde donanımlarını seçmiştir. Kontrolör olarak PI kontrolör kullanmış ve bu işlemi Arduino mikrodenetleyici yardımı ile yapmıştır. Üzerine binen kişinin scooter tutacağına verdiği açıya göre hızlanıp yavaşlayan bu tasarım 20 dakikaya kadar çalışabilmektedir. Üzerine monta ettiği bir ekran yardımı ile anlık olarak açı takibi, hız takibi ve kalan bataryayı görebilmektedir. Kullandığı doğru akım motorlarından beklediği performansı alamayan Frans 3 fazlı hub motor kullanılmasını tavsiye etmiştir (Rosencrantz, 2016).

Ayça isimli geliştirici simülasyon ortamında bir denge robotu tasarımı yapmıştır. Bu çalışmada denge robotu kontrolü simülasyon ortamında tasarlanan xPC yardımı ile

yapılmıştır. Robotun matematiksel modeli üzerinden yapılan bu işlem başarılı sonuçlar vermiştir (Gocmen, 2011).

Sung isimli araştırmacı denge robotunun üzerinde birçok kontrol metodunu karşılaştırarak başarımını incelemeye yönelik bir çalışma yapmıştır. Şekil 1.7’de robotun görseli sunulmuştur. Bu çalışmada PID, LKR ve Kayma Kipli Kontrol yöntemlerini karşılaştırmıştır. Lagrangian yöntemi ile robotu modellemiştir ve Simulink ortamında deneyler yapmıştır. Ayrıca Lego yardımı ile gerçek zamanlı çalışan bir robot tasarımı yapmıştır. Sung, PID kontrol ile sadece robot vücudunun açđ kontrolü yapıldđđını ama LKR ve Kayma Kipli Kontrol kontrol ile hem vücudun hem de tekerleklerin açđ kontrolünün yapıldđđını savunmuştur (Sung, 2015).



Şekil 1.7. Lego aksanlı denge robot tasarımı

PID kontrol yönteminde parametrelerin ayarlanması için Gupta ve arkadaşlarının yaptığı çalışma büyük fayda sağlamaktadır. Bu tez çalışmasına benzer yöntemler ve donanımlar kullanan Gubta, PID parametrelerini değişkenleri değiştirme yöntemi ile ayarlamıştır. Öncelikle I ve D değerlerini 0 olarak ayarlayıp P değerini ortalama bir değerde tutmuştur. P değerinin fazla olması yumuşak bir denge için olumsuz etki oluşturmakla beraber P değerinin çok küçük olması tekerleklerin yeterli güçte dönmesine engel olup dengeyi sağlayamayacaktır. P değerinin ayarlanmasından sonra I değerinin dikkatli bir şekilde yükseltilmesi ile birkaç saniyelikte olsa bir dengenin sađlanacađđı savunulmuştur. Son olarak D değerinin ayarlanması ile robotun daha az titreşimli bir şekilde dengede duracađđı savunulmuştur (Ooi, 2003).

EDGAR isimli taşıma amacıyla tasarlanan bir başka binilebilir denge robotu ise birkaç farklı model olarak tasarlanmıştır. Matlab ortamında sanal gerçeklik araç çubuğu yardımı ile sanal ortamda modellendikten sonra yapım aşamasına geçilmiştir. Kontrolü PD denetleyici ile yapılan EDGAR çok iyi bir şekilde modellenip, güçlü bir kontrol sağlandığı için çok başarılı bir şekilde çalışıp markette kendisine yer bulmuştur. Yukarıda belirtilen çalışmaların benzeri metotları deneyerek en optimal yöntemi kullanan ve donanım seçiminde de aynı hassaslığı gösteren tasarımcılar gerçek zamanlı çalışan başarılı bir robot ortaya çıkarmışlardır.

Sinyal işleme, görüntü işleme teknikleri kontrol teorisi ile birleştirilerek birçok cihaz ve robot tasarlanmıştır (Takita, 2009). Bu tasarlanan cihazlar başta hobi ve insan taşıma amacıyla tasarlansa dahi, endüstri ve insan yaşamının kolaylaştırılması amacıyla birçok alanda insanlığa hizmet etmektedirler. Teknolojinin gelişmesi ve modern kontrol yöntemlerinin uygulanması durumunda mevcut sistemler daha da geliştirilebilir. Bu çalışmada eski çalışmalardan öğrenilen metotlar ve işaret işleme teknikleri kullanılmıştır. Şekil 1.8’de robotun görseli sunulmuştur (Rosencrantz,2016; Searock, 2004).



Şekil 1.8. Edgar insan taşıyan denge robot tasarımı

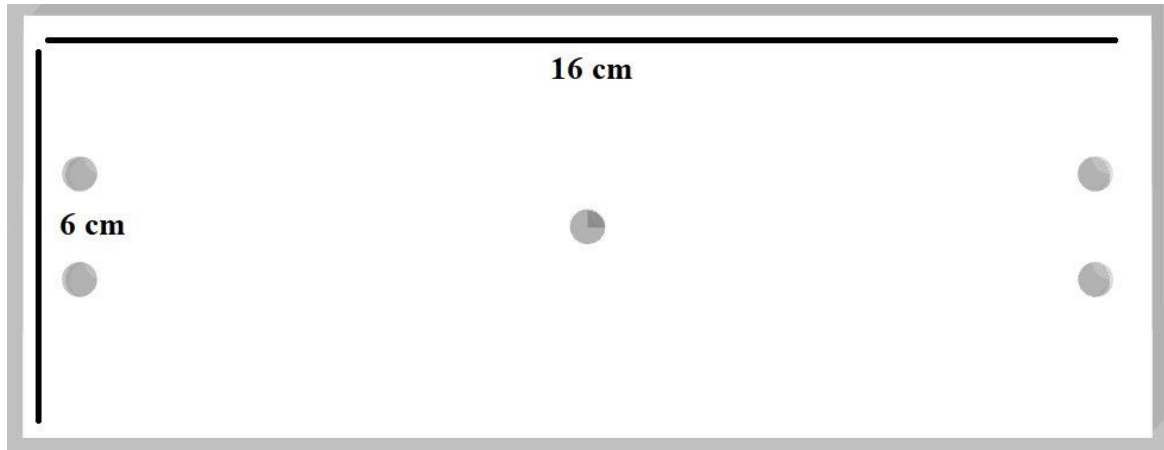
2. MEKATRONİK SİSTEM

2.1. Mekanik Sistem

Robotun mekanik aksanı iyi bir dengenin sağlanabilmesi için önemlidir. Homojen dağılıma sahip bir gövde de tekerlekler üzerine binen yük miktarları da yaklaşık olarak birbirlerine yakın olmalıdır (Gonzalez, 2017). Gövde üzerine sabitlenecek elektronik donanımlarında simetrik bir şekilde yerleştirilmesi dengenin daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesine yardımcı olacaktır (Lopes,2017). Mekanik sistem önce simülasyon ortamında tasarlanarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. SOLIDWORKS programı yardımıyla çizilen düzenek 3 boyutlu yazıcı yardımı ile plaka şeklindeki gövde oluşturulmuştur.

2.1.1 Robot gövdesi

Robot gövdesi mekanik aksandaki en önemli kısımdır ve dengenin sağlanmasında büyük önem taşımaktadır. Homojen yapıda olan bu plaka aynı zamanda üzerinde elektronik sensör ve kartları taşıırken alt tarafında 2 adet motor taşımaktadır. Bu yüzden yeteri kadar kalın ve kartların sabitlenebileceği kadar geniş olmalıdır. Bilgisayar ortamında tasarlanan ve 3 boyutlu yazıcı yardımı ile basılan plaka 19 cm-9 cm-1 cm ebatlarından oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Robot gövdesi ölçüleri

2.1.2 Tekerlekler

Mekanik sistemin bir diğer elemanı olan tekerlekler motorların miline bağlanarak motorların dönüşleri ile harekete başlarlar. Tekerlekler 4 cm çapa sahiptirler. Tekerlekler de aynı zamanda simülasyon ortamında oluşturulmuştur ancak 3 boyutlu yazıcı ile basılmamışlardır. Lego tekerlekleri temin edilerek motor millerine montajlanmıştır.

Burada montaj yapılırken mile sabitlenen tekerlerin çok iyi bir şekilde sabitlenmesi gerekmektedir. Bunun için ayrıyeten silikon kullanılmıştır.



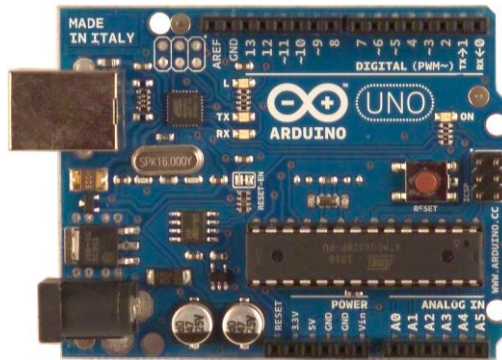
Şekil 2.2. Robot tekerlek görseli

2.2. Elektriksel Sistem

Bu bölümde robotun donanımları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu donanımlar mikrodenetleyici kart, motorlar, sensörler ve motor sürücüsü olarak sıralanabilir.

2.2.1 Mikrodenetleyici kart

Arduino Uno mikrodenetleyici kartı ATmega328 mikro kontrolöre sahip açık kaynaklı elektronik bir prototiptir. Kolay kullanımı ve birçok platformla uyumlu olmasından dolayı çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. USB girişinin olmasından dolayı mikrodenetleyici program atmak ve aynı zamanda besleme vermek mümkündür.



Şekil 2.3. Arduino UNO pin yüzü

ATmega328 Mikrokontrolör kartı C dilinde programlanabilir. Arduino ya yüklenen program tek başına çalışabilir veya MATLAB yeni sürümleriyle eş zamanlı olarak çalışabilir. Kart basımı, kart dizaynı ve kristal gibi yüklerden kullanıcıyı kurtararak daha kolay bir programlama fırsatı sunmaktadır. Arduino denetleyici kartlarını ön plana çıkaran en önemli özelliklerinden bir tanesi de kütüphanesinin fazla olması ve her geçen gün geliştirilmesidir. Yeni eklenen kütüphanelerin tanıtılması aşamasında da büyük kolaylıklar sağlar. Arduino ile uyumlu çalışan birçok sensör mevcuttur bunlar başlıca Bluetooth, Wireless, Motor Sürücüleri ve Ethernet olarak sıralanabilir. Çalışmanın görüntü işleme ve denge robotu aşamasında bu kart kullanılmıştır. Arduino Uno Mikrokontrolör kartı 14 tane dijital giriş çıkış I/O bacaklarına sahiptir. Bunların 6 tanesi PWM sinyal girişleri için uygundur ve bu girişler kart üzerinde işaretlenmiştir. Ayrıca kontrolör 6 tane analog girişe sahiptir. Kontrolör 32KB kalıcı hafızaya ve 10 bitlik analog dijital dönüştürücüyü içerisinde barındırır. Kart 16Mhz kristal osilatör ve sabit 3.3V, 5V ve GND çıkışlarına sahiptir. Kartın çalışması için gerilim değerleri 6-20 V ile sınırlandırılmıştır. Arduino IDE yazılımını internetten ücretsiz bir şekilde indirmek mümkündür. Yapılacak projeye göre birçok Arduino modeli mevcuttur bunlar başlıca Uno, Mega, Pro ve Leonardo olarak sınıflandırılabilir.

2.2.2 Doğru akım motorları

Doğru akım motorları giriş kısmına uygulanan elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elemanlar olarak tanımlanabilirler. İç yapısında alan kutupları, armatür, endüvi, komütatör, mil ve fırçadan oluşurlar. Armatür gerilimi sonucu endüvi de oluşan akım sonucu dönme işlemi sağlanır. Projede kullanılan doğru akım motorlarının seçimi büyük önem arz etmektedir. Motorların PWM sinyallerine verdiği RPM (Revolutions per minute) tepkilerin aynı ve istenen değerde olması gerekmektedir aksi halde dengenin sağlanması zorlaşır. Şekil 2.4' de DC motor resmi görülmektedir. Bu motorların redüktörlü seçilmesi daha iyi bir denge için kolaylık sağlayacaktır. Projede 25 mm 12V 500 rpm değerlerine sahip iki tane doğru akım motoru kullanılmıştır. Motora ait bazı etiket değerleri kullanım kılavuzundan tablo oluşturulmuştur. Çizelge 2.1'deki değerler motorun yüksüz durumdaki belirli gerilim değerlerine aittir.

Çizelge 2.1. Doğru akım motoru teknik özellikleri

Çalışma gerilimi	12 V
Hız	500 rpm
Boşta Çektiği Akım	40 mA
Ağırlık	84 gr

Motorun maksimum hızı ve tepki süresi önemlidir. Denge robotu denge noktasından hızlı bir şekilde uzaklaştığında tekrar eski haline gelebilmesi için motorun ani bir tepki vermesi gerekmektedir. Eğer motorun hızı yeterli olmazsa tekrar denge sağlanamayabilir.

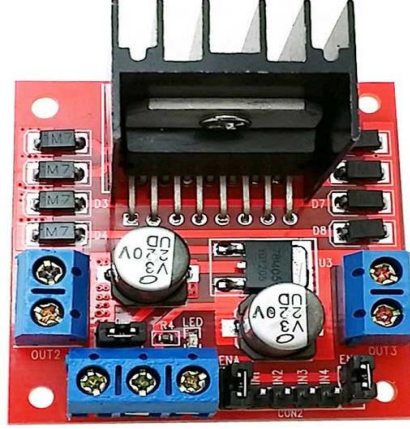


Şekil 2.4. Doğru akım motoru

2.2.3 Doğru akım motor sürücüsü

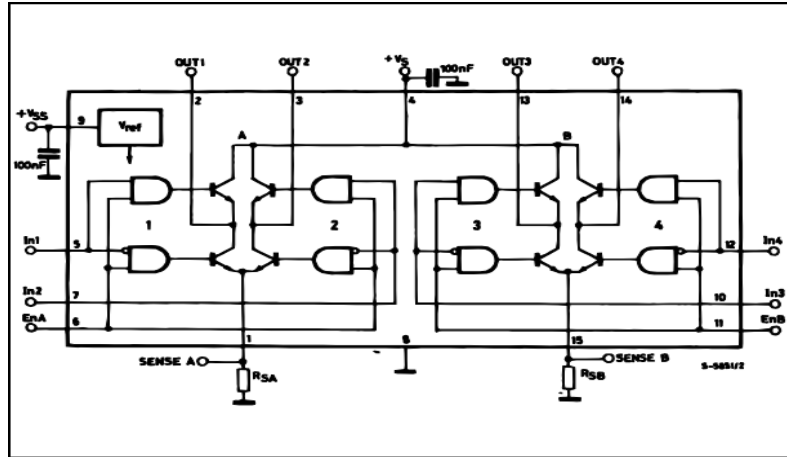
Sistemin dengesinden sorumlu doğru akım motorlarını sürmek için L298N model motor sürücüsü kullanılmıştır. Motorların sürülmesi için 12 V besleme yapılmıştır. Yaklaşık olarak 4-5 A civarlarında akım çekmektedir. Motor sürücüsü kullanılmasının sebebi kontrolör kartının bacaklarının 40 mA kadar akım akıtabilmesidir. Yüksek hızlarda bu akım yetmeyeceğinden dolayı motor sürücü devresi kullanılmalıdır. Piyasada birçok motor sürücü devresi mevcuttur. L293D motor sürücü entegresi soğutma olanağı ve kolay kullanımından dolayı tercih edilmiştir. Motor sürücüsü kontrolör kartının dijital bacaklarına bağlanmıştır. Motorun girişleri motor sürücüsüne, motor sürücüsün giriş çıkış ve PWM pinleri kontrolöre bağlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus motor sürücüsünün toprağının kontrolör toprağıyla aynı noktada olmasıdır aksi halde sistem sağlıklı bir şekilde çalışmamaktadır. PWM sinyallerine göre motorun dönme hızı kontrol edilebilmektedir. Motor sürücüsünün bazı özellikleri aşağıda verilmiştir ve bu bilgiler kullanım kılavuzundan alınmıştır. Motor sürücüsündeki çıkışların 4 tanesi motorları

sürmek için kullanılır. Giriş olarak 5 V, 12 V ve GND besleme pinleri bulunmaktadır. ENA, ENB, N1, N2, N3, N4 girişleri ise mikroişlemci ile bağlantılıdır.



Şekil 2.5. L298N motor sürücü devresi

N1, N2, N3, N4 girişleri HIGH ve LOW olacak şekilde dönüş yönünü belirlemek için kullanılır. N1 ve N2 girişleri 1.motorun yönünü belirlemede ENA girişi ise hızını kontrol etmemizi sağlar. Aynı şekilde N3 ve N4 girişleri ikinci motorun dönüş yönünü ENB ise 2.motorun hızını kontrol etmemizi sağlar. ENA, ENB, N1, N2, N3, N4 girişleri lojik girişlerdir. Motor sürücüsü 43x43 mm boyutundadır. Motor sürücüsünün blok diyagramı aşağıda Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2.6. Motor sürücüsü devre şeması

Motor sürücüsünün girişlerine uygulanan lojik değerlere göre motorun hangi yönde döneceğini veya dönüp dönmeyeceğini gösteren tablo aşağıda verilmiştir. Tablodan da anlaşılacağı üzere motor girişlerinin aynı olması yani HIGH-HIGH veya LOW-LOW durumlarında motor sürülemez. Denge durumu için motor dönüş yönleri önemlidir.

Motorlar denge robotunun y ekseninin düşüş gösterdiği yöne doğru hareket etmeli başka bir deyişle devrilen tarafa doğru hareket etmelidirler. Aksi yönde hareket ettikleri takdirde dengenin bozulma hızı artış gösterecektir.

Çizelge 2.2. Motor sürücüsü doğruluk tablosu

N1	N2	ENA	ENB	OUT1	OUT2	Durum
1	1	1	X	0 V	X	Besleme Girişi Keser
1	0	1	X	5 V	X	Saat Yönü
0	1	1	X	5 V	X	Saat Yönü Ters
0	0	1	X	0 V	X	Toprak Keser
N3	N4	ENA	ENB	OUT1	OUT2	Durum
1	1	X	1	X	0 V	Besleme Girişi Keser
1	0	X	1	X	5 V	Saat Yönü
0	1	X	1	X	5 V	Saat Yönü Ters
0	0	X	1	X	0 V	Toprak Keser

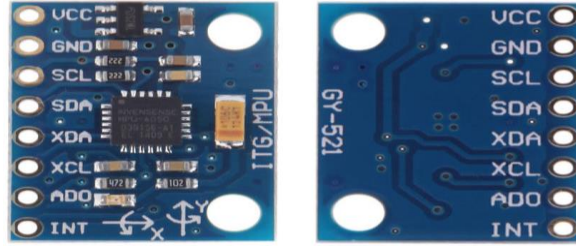
Yukarıdaki tabloyu yorumladığımızda 1. Motorun saat yönünde hareket etmesi isteniyorsa N1 ve N2 girişlerinin sırasıyla lojik1 ve lojik 0 olması gerekmektedir. Saat tersi yönünde hareket etmesi isteniyorsa girişlerin sırasıyla lojik 0 ve lojik 1 olması gerekmektedir. 2. Motorun saat yönünde hareket etmesi isteniyorsa N3 ve N4 girişlerinin sırasıyla lojik1 ve lojik 0 olması gerekmektedir. Saat tersi yönünde hareket etmesi isteniyorsa girişlerin sırasıyla lojik 0 ve lojik 1 olması gerekmektedir. Motor sürücünün bazı önemli teknik özellikleri ise sürücünün 46 V gerilime kadar dayanabilmesi, düşük doyum noktasına sahip olması, toplamda 4A akıma kadar akıtabilmesi ve yüksek sıcaklık değerlerinde çalışabilmesi özellikleri sıralanabilir.

2.2.4 Jiroskop ve akselerometre sensörler

Denge robotunun en önemli bölümü olan ivme sensörü, bulunduğu platformun açısal durumu ile ilgili sayısal bilgileri okur ve anlamlandırır. Jiroskop sensör ve ivme ölçer iki farklı sensördür ve bunların beraber kullanılması daha iyi bir denge için gereklidir. Bu sensörler ayrı ayrı kullanıldıklarında ikisi içinde hatalar kaçınılmaz olmaktadır. Bu tezde MPU6050 6 eksen ivme sensörü kullanılmıştır ve bu sensör akselerometre ve jiroskop sensörlerini tek bir üniteye birleştirmektedir. Bu sensör gerçek değerler vermekle beraber gürültüye karşı çok hassastır ve çıktılarının filtrelenmesi büyük

önem arz etmektedir. İvme ölçerler motor titremeleri gibi hassas olduklarından doğru bir açıyla platforma iyice sabitlenmelidirler. Aksi takdirde gerçek sonuçların okunması zorlaşmaktadır. Çoğu zaman bu filtreleme işlemi için kalman filtresi kullanılmaktadır. Jiroskop sensörü akselerometre kadar gürültüden etkilenmemektedir ancak jiroskopların açısal hızı hesaplarırken kayma problemi vardır. Yukarıda bahsedildiği üzere bu iki sensörü eş zamanlı çalıştırmak mümkün olup daha başarılı sonuçların alınması da mümkündür.

MPU ailesi 6 ve 9 eksen olarak çoğalmaktadır ve MPU6050 6 eksenli MPU9150 ise 9 eksenlidir. Jiroskop 3 eksende açısal hızı belirlerken akselerometre ise açısal ivmeyi belirler. Bu uygulama için tek bir eksen yeterli olacaktır çünkü dikkat etmemiz gereken tek eksen y eksenidir. Aşağıdaki şekil 2.7’de MPU6050 sensörü arkadan ve önden gösterilmiştir.



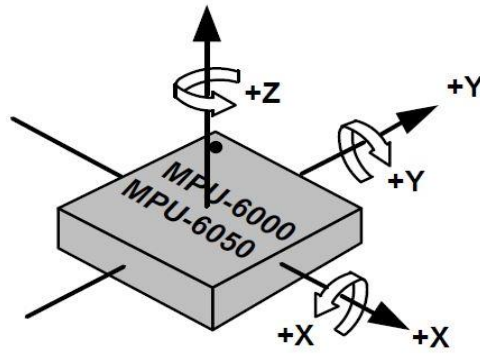
Şekil 2.7. MPU6050 sensör arkalı önlü görüntüsü

Aşağıdaki Şekil 2.8’ de eksenlerin yönleri ve dönüş yönleri x, y ve z eksenleri için gösterilmiştir. İşlemci ile haberleşmesi 400 kHz de I2C protokolü ile sağlanır ve 16 bitlik bir hassasiyete sahiptir. MPU6050 hem yavaş hem de hızlı hareketleri algılayabilmektedir. MPU6050 6 eksen ivme sensörünün teknik özellikleri ve pinleri aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir. Bu değerler MPU6050 kullanım kılavuzundan alınmıştır.

Çizelge 2.3. MPU6050 sensör pin özellikleri

PINLER	Özellikler
VDD	2.375 V- 3.46 V değerleri arasında çalışan besleme girişidir.
VLOGIC	1.71 V – VDD değerleri arasında işlem yapar.
GND	Toprak ucu.
SCL	Veri aktarımı için kullanılır ve aktarılan verinin senkronizasyonundan sorumlu birimdir.
SDA	Veri aktarımı için kullanılır ve aktarımın kullandığı hattır.
XDA	I2C seri datasıdır. Dışardaki sensörlere bağlanmak için kullanılır.
XCL	I2C seri clock. Dışardaki sensörlere bağlanmak için kullanılır.
INT	Uyarılan dijital çıkıştır.

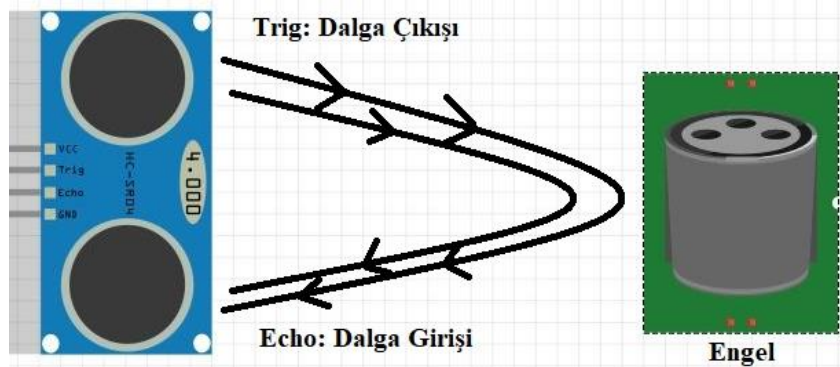
MPU6050 6 eksenli ivme sensörü dışarıya 6 çıkış değeri verebilmektedir. Bu 6 değerın 3 tanesi jiroskop diğer 3 tanesi ise akselerometre değeriğleridir. Akselerometreler piezoelektrik etkisi mantığıyla çalışır. İçerisindeki küçük bir topun olduğu bir kutu hayal edelim. Bu kutunun duvarları piezoelektriksel kristallerden meydana gelsin. Topun bu kristallere değmesi halinde ise küçük akımlar meydana gelecektir. Kutuyu bir tarafa eğdiğimiz zaman eğimden dolayı topta o yönde hareket edecektir. Kutunun hangi duvarında küçük akımlar oluşuyorsa eğimin o yönde olduğu anlaşılacaktır. Akselerometrenin alışma mantığı bu şekilde ifade edilebilir (Pedley, 2013).



şekil 2.8. MPU6050 eksenleri

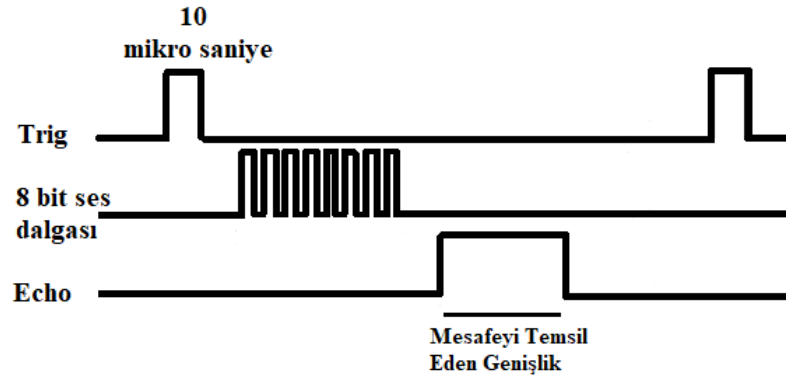
2.2.5 Mesafe sensörü

Mesafe sensörleri ultrason yani ses ötesi dalga yayarak bu dalganın geri yansımaya yapana kadar havada geçirdiği süre ve ultrason hızını kullanarak mesafe hesabı yapan sensörlerdir. 40.000 Hz. düzeylerinde ultrason üreten bu sensörler oldukça hassas yapıdadırlar. 4 tane bacadan oluşan bu sensörün besleme ve toprak pinleri dışında ‘Trig’ (Trigger) ve ‘Echo’ bacakları mevcuttur. ‘Trig’ bacağının bağlı olduğu kısımdan ultrason dalga yayılımı yapılır ve ‘Echo’ bacağının bağlı olduğu kısımdan ise geri toplama işlemleri yapılır. Robot tasarımıında kullanılan mesafe sensörü HC-SR04 modelidir.



şekil 2.9. Mesafe sensörü çalışma prensibi

Ultrason dalgası oluşturmak için Trig değerini 10 mikro saniye düzeylerinde tutmak gerekir. Bunun sonucunda 8 adet (cycle sonic burst) ses dalga patlaması oluşturulur. Fiziksel bir örnekle açıklamak gerekirse: 10 cm uzaklıkta bir nesne olduğunu varsayalım. Ses hızı normal bir ortamda yaklaşık olarak 340m/s ya da 0.034 cm/mikro saniye seviyesindedir. Gidip dönen ses dalgasının ne kadar gittiğini hesaplamak için $yol=hız \times zaman$ formülü kullanılabilir.



Şekil 2.10. Mesafe sensörü üretilen ve toplanan dalga şekilleri

2.3. Yazılım

Birçok sistem artık sadece mekanik aksandan meydana gelmemektedir. Mekanik aksanın daha efektif ve tasarruflu kullanılabilmesi için bir yazılımla desteklenmesi gerekir. Günümüzde kullanılan modern cihazlara bakıldığında her aşamada yazılım görmemiz mümkündür. Java, C, C#, Arduino gibi birçok programlama dili mevcuttur. İstenilen işlev bütün dillerle yapılabilir. Önemli olan algoritma mantığını oturtmaktır. Bu çalışmada ivme sensör verilerinin okunması, filtrelenmesi ve PID kontrolün uygulanması aşamalarında Arduino IDE dili kullanılmıştır (Grasser, 2002). Önceki çalışmalar kısmında birçok çalışmada farklı mikroişlemciler ve farklı programlama dilleri ile denge robotlarının tasarlandığı görülmüştür.

2.3.1 Mikrokontrolör kartı programlama

Arduino kart programlanması için internetten indirilen ücretsiz yazılımın kullanılması gerekmektedir. Yazılım üzerinde derleme ve gönder işlemleri için butonlar konuşlandırılmıştır. Aşağıdaki Şekil 2.11' de örnek olarak bir yazılım görülmektedir.

```

balance_leo_2_wheel | Arduino 1.8.5 Hourly Build 2017/08/28 06:33
File Edit Sketch Tools Help

balance_leo_2_wheel | I2Cdev.cpp | I2Cdev.h | MPU6050.cpp | MPU6050.h | MPU6050_6Axis_MotionAp

#include <Wire.h>
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"

#define LED 13
#define PWM_L 10
#define PWM_R 11
#define DIR_L1 6
#define DIR_L2 12
#define DIR_R1 8
#define DIR_R2 9
#define SPD_INT_L 3//1
#define SPD_PUL_L 4
#define SPD_INT_R 4//7
#define SPD_PUL_R 5
#define MPU_INT 2//0
#define K_AGL_AD A0
#define K_AGL_DOT_AD A1
#define K_POS_AD A2
#define K_POS_DOT_AD A3

MPU6050 mpu; // ADO low = 0x68

// MPU control/status vars
bool dmpReady = false; // set true if DMP init was successful
uint8_t mpuIntStatus; // holds actual interrupt status byte from MPU
uint8_t devStatus; // return status after each device operation (0 = success, !0 = error)
uint16_t packetSize; // expected DMP packet size (default is 42 bytes)
uint16_t fifoCount; // count of all bytes currently in FIFO

```

Şekil 2.11. Arduino programlama arayüzü

Arduino UNO kartında bulunan bacaklar ‘pinMode’, ‘digitalRead’ ve ‘digitalWrite’ komutları ile aktif hale gelmektedirler. Bu bacaklar 5V çıkış gerilimlerine sahiptirler ve 40 mA değerine kadar akım akıtabilirler. Bu bacakların dışında özel kullanım pinleri mevcuttur ve bunlar Çizelge 2.4’ gösterilmektedir.

Çizelge 2.4. Arduino pin özellikleri

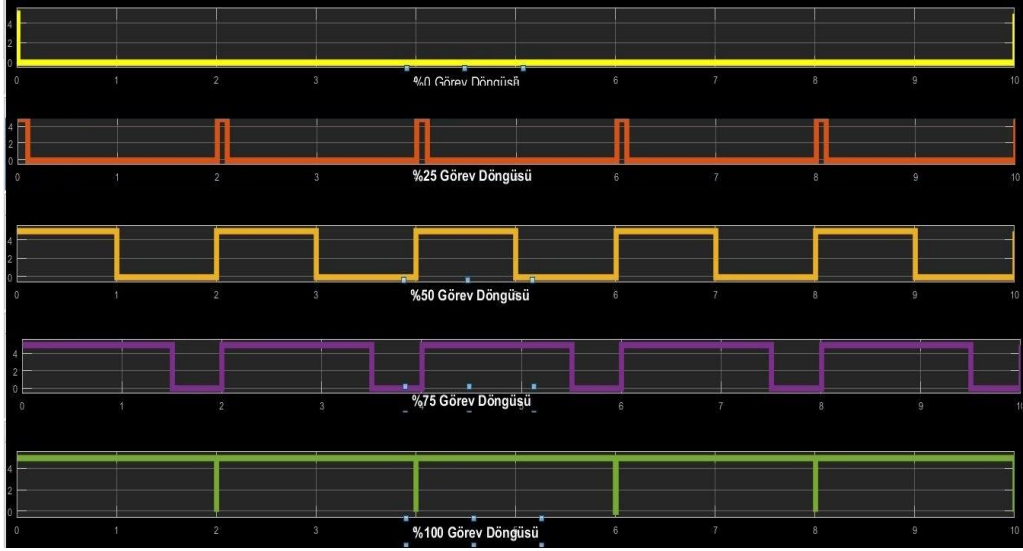
Pin Adı	Pin Özelliği
Seri İletişim	Bu bacaklar 0, RX ve TX bacaklarıdır. Seri iletişim amacıyla kullanılabilirler.
PWM	AnalogWrite komutuyla PWM (Pulse Width Modulation) çıkış sağlarlar ve bu bacaklar kart üzerinde belirtilmiştir.
Harici Kesici	Harici kesim için kullanılırlar.
SPI	10(SS),11(MOSI) gibi SPI (Serial Peripheral Interface) iletişimini sağlamak için kullanılırlar.
LED	Kart üzerindeki LED ile bağlantılı bacakdır ve 1-0’a göre LED yanıp söner.
Reset	Kart üzerinde bulunan reset butonu ile ya da reset bacağına lojik 0 uygulanarak kart sıfırlanabilir.

2.4. Haberleşme

Kurulan robot düzeneğinde iki tane haberleşme şekli ön plana çıkmaktadır. Bunlardan birincisi PWM (Pulse Width Modulation) işaret işleme ve işaret aktarma gibi işlevleri olan ve bu projede motorları kontrol etmek için kullandığımız bir yöntemdir. İkinci olarak I²C haberleşme protokolü ise mikrodenetleyicilerin kendileri ile veya sensörler arasında haberleşmesini sağlayan bir haberleşme protokolüdür. Arduino ile sensörlerin haberleşmesinde kullanılır.

2.4.1. PWM

Bataryalar sabit denebilecek düzeyde DC gerilim veren elemanlar olarak tanımlanırlar. Motorları sürmek için girişe uygulanan voltaj değerlerini kontrol etmemiz gerekmektedir. Bu yöntem yardımı ile işaretlerin aktarım için uygun hale dönüştürülmesi amaçlanır. Arduino tarafından desteklendiği için ve düşük güç kayıplarına sahip olduğu için PWM (Pulse Width Modulation) Sinyal Genişlik Modülasyonu kullanılmıştır. Bataryadan alınan güç mikrodenetleyici ve motor sürücü elemanı tarafından kontrol edilerek istenen düzeyde çıkış sağlanır ve motorlar sürülür. Bu kontrol ise anahtarlama yöntemi denilen ve anahtarın açık kapalı kalma sürelerine bağlı olarak yapılır. Anahtarlamanın hızlı yapılması PWM ile aktarılan işaretlerin gücü o kadar artar. Anahtarlamanın yavaş yapılması aktarılan işaretlerin gücünü azaltır. Bu işlem ise (Duty Cycle) denilen görev döngüsü kavramı ile açıklanabilir. Yapılan işlemin periyodunu temsil eden görev döngüsü kavramı düşük seviyelerde olduğu zaman aktarılan güç düşük miktarda olur. Arduino bünyesinde kullanılan PWM tekniği sayesinde dijital sonuçlardan analog işaretler elde edilebilir (Hu, 2007). Ayrıca kare dalga üretimi de yapılabilmektedir. Arduino içinde bulunan 'analogWrite' komutu yardımı ile görev döngüsünün (Duty Cycle) miktarı belirlenebiliyor.



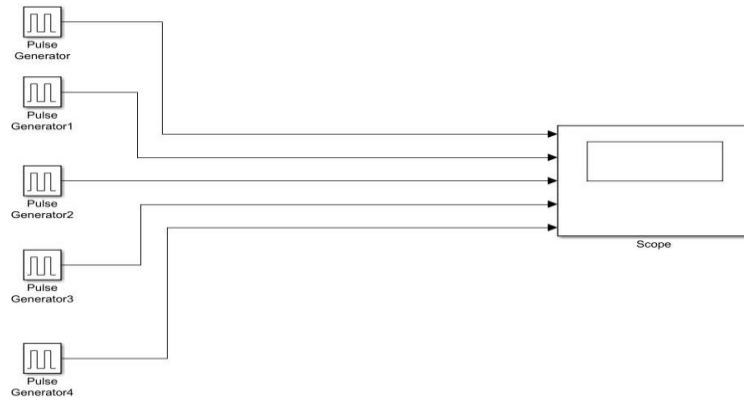
Şekil 2.12. Görev döngüsüne bağlı değişen PWM işaretleri

Yukarıdaki şekilden de görüleceği üzere %0, %25, %50, %75 ve %100 görev döngüleri için farklı güçlere sahip PWM işaretleri oluşturulmuştur. Bu güçlerin yazılım olarak karşılığı aşağıdaki tabloda mevcuttur.

Çizelge 2.5. Görev döngüleri ve kod karşılıkları

Görev Dönüsü	Kod Karşılığı
0	analogWrite(0)
25	analogWrite(64)
50	analogWrite(127)
75	analogWrite(191)
100	analogWrite(255)

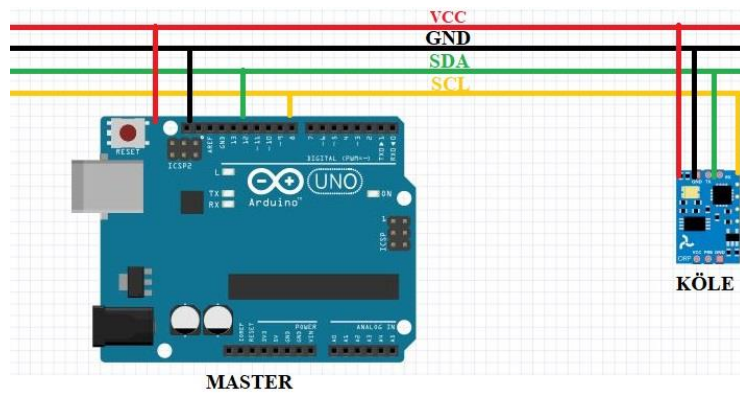
Simulink ortamında PWM kullanılması için darbe üreticileri kullanılabilir. Bu darbe üreticilerinde genlik, periyod, darbe genişliği gibi parametreler ayarlanarak PWM işaretler üretilebilir. Aşağıdaki Simulink modeli PWM işaret üretimi için kullanılmıştır.



Şekil 2.13. Simulink ortamında PWM üreten blok şema

2.4.2. I²C Haberleşme protokolü

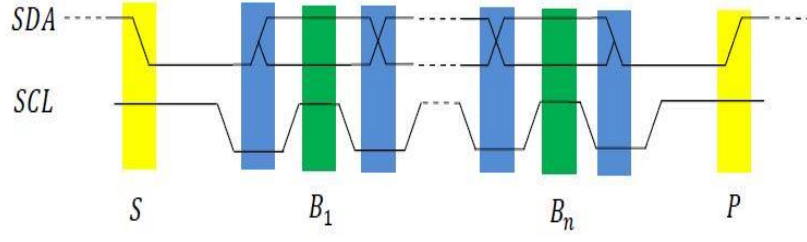
I²C açılımı (inter-integrated circuit) olan bir seri haberleşme protokolüdür. İki kablolu ara yüz olarak da bilinen bu protokol topraklama hattı dışında iki hatta ihtiyaç duyar. Bu hatlar SDA ve SCL olarak isimlendirilir. I²C haberleşmenin sağlanması için sistemde bir tane master cihazı ve en az bir tane slave (köle) bulunması gerekmektedir. Master cihazı hangi köle cihaza veri aktarılacağına karar verir. Master ve köle cihazların beslemeleri aynı hat üzerinde olmak zorunda değildir ancak topraklama noktaları aynı hat üzerinde olmalıdır.



Şekil 2.14. I²C haberleşme örnek bağlantı şeması

Veri aktarımı için kullanılan SDA (Serial Data Line) ve SCL (Serial Clock) hatları farklı amaçlar için tasarlanmıştır. SDA hattı çift yönlü olarak veri aktarımı sağlamaya yararırken SCL hattı saat sinyali üreterek veri akışını düzenler. Arduino 7 bit adresleme yi 100kHz hıza kadar yapabilmektedir. Master cihazı zamanı ve adresi slave cihaza dağıtmakla görevlidir ve slave de zaman ve adresi almakla görevlidir. Slave den bir veri alınması için master slave'e ağ üzerinden bir adres gönderir ve slave bu adresi dinler. Eğer ağda gönderilen adresi alan bir slave cihaz varsa bu cihaz onaylandı diye bir geri bildirim gönderir. Sonrasında master cihaz hangi bilgiyi ve kaç tane bit okuyacağını bildirir. MPU6050 sensörü için 6 eksen bilgisi okunmaktadır. Okunan her bit bilgisinden sonra master bilginin doğru okunduğu hakkında onay gönderir. Masterın durdurma bilgisini göndermesi ile veri akışı durur. Bir bilginin nasıl gönderildiği aşağıdaki zaman akışı ile açıklanabilir. Önce master başlangıç bitini gönderir ve bu aşamada SDA HIGH, SCL LOW konumundadır. Sonra SDA mavi olan transfer bitini ayarlar ve bu aşamada SCL LOW konumundadır. Yeşil olan alındı bitinden sonra SCL tekrar HIGH konumuna gelir.

Transfer işlemi bitince durdurma biti olan sarı renkteki P gönderilir ve bu durumda SDA ve SCL HIGH konumdadır.

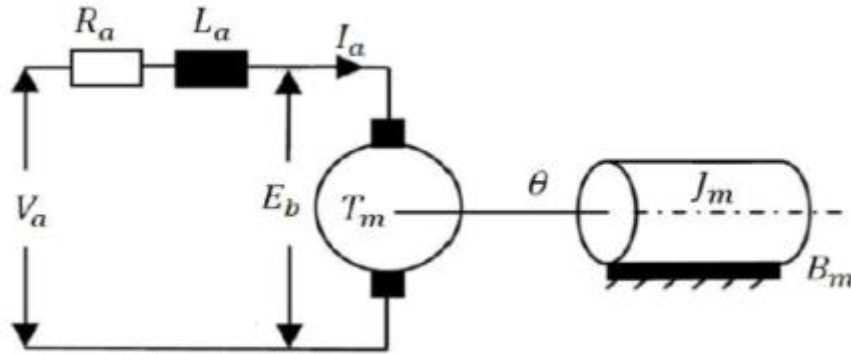


Şekil 2.15. I²C haberleşme bilgi gönderme grafiği

3. MATEMATİK MODEL

3.1. Doğru Akım Motoru Matematiksel Model

Denge robotunda iki tane birbirine eş doğru akım motoru bulunmaktadır. Dengenin başarılı bir şekilde sağlanabilmesi için motorların performansları çok önemlidir. Çalışmamızda iki tane motor kullansak da birbirlerine eş olduklarından dolayı bir tane motor varmış gibi düşünebiliriz (Enginoğlu, 2012). Doğru akım motorunun fiziksel modeli Şekil 2.1’de verilmiştir (Yaraş, 2014; Hu,2010).



Şekil 3.1. DC motor modeli (Yaraş, 2014)

Va armatür gerilimi motorun armatür terminallerine uygulandığında Ia armatür akımı şeklindeki gibi akar. Devrede motorun iç yapısından kaynaklı bir direnç R ve bir bobin L bulunmaktadır. Motorun armatüründe akan Ia akımı sonucunda statorun manyetik alanı ile etkileşime geçen bir manyetik alan oluşturur. Sonuç olarak da bir tork oluşur. Bu tork armatür akımıyla lineer bağlantılı bir şekilde azalır artar. DA motorun çalışmasını ifade eden matematiksel denklemler aşağıdaki gibidir. Devreye Kirchoff gerilim yasası uygulandığında Va gerilimi (Altun, 2017),

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E_b(t) \quad (3.1)$$

Zıt elektromotor kuvveti (EMK) ise denklem (3.2) deki gibi ifade edilir.

$$E_b(t) = K_b \omega(t) \quad (3.2)$$

Tork dengesi ise (3.3) ve (3.4) numaralı denklemlerde ifade edilir,

$$T_m(t) = K_t I_a(t) \quad (3.3)$$

$$T_m(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \omega(t) + T_{yük} \quad (3.4)$$

‘ θ ’ konumunun zamana göre türevi ‘ ω ’ açısal hızını verecek olup denklem (3.5) teki gibi yazılabilir.

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3.5)$$

(3.1) ve (3.2) denklemleri düzenleyerek denklem (3.6) ve denklem (3.7) deki gibi elde ederiz.

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + K_b \omega(t) \quad (3.6)$$

$$K_t I_a(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \omega(t) + T_{yük} \quad (3.7)$$

Motorun kontrolü için zaman domainde ya da s domainde gerçekleştirebiliriz. Tercih edeceğimiz form “s” domaini ise denklem (3.6) ve denklem (3.7) numaralı eşitliğin Laplace dönüşümlerini alırız ve “s” domainde denklem (3.8) ve denklem (3.9) şeklinde ifade ederiz.

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + sL_a I_a(s) + K_b \omega(s) \quad (3.8)$$

$$K_t I_a(s) = sJ_m \omega(s) + B_m \omega(s) + T_{yük} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9) daki I_a ifadesi diğer bileşenler türünden aşağıdaki gibi elde edilip denklem (3.8)'de yerine yazılırsa,

$$I_a(s) = \frac{sJ_m \omega(s) + B_m \omega(s) + T_{yük}}{K_t} \quad (3.10)$$

İfadesinde yükün olmadığı varsayılırsa,

$$V_a(s) = w(s) \frac{[s^2 L_a J_m(s) + s(R_a J_m(s) + L_a B_m) + (R_a B_m + K_b K_t)]}{K_t} \quad (3.11)$$

Burada literatürdeki bazı çalışmalarda B_m viskoz sürtünme katsayısını sıfır alan çalışmaların da var olduğunu söyleyebiliriz. Denklem (3.11) de rotor şaft hızı ile uygulanan armatür gerilimi arasındaki bağıntı transfer fonksiyonu olarak elde ederiz ve denklem (3.12) de olduğu gibi düzenleriz.

$$\frac{w(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{[s^2 L_a J_m(s) + s(R_a J_m(s) + L_a B_m) + (R_a B_m + K_b K_t)]} \quad (3.12)$$

Burada denklem (3.5)'e dönecek olursak açısal konumun türevi açısal hızı vermekteydi. Bu bilgidan faydalanarak konum ve hız arasındaki “s” domain bağıntısını denklem (3.13) teki gibi ilişkilendirebiliriz.

$$\omega(s) = s\theta(s) \quad (3.13)$$

Daha sonra denklem (3.13) ü denklem (3.12) de yerine yazdığımızda açısal konum ve armatür gerilimi arasındaki bağıntıyı denklem (3.14) te olduğu gibi elde ederiz.

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{s^3 L_a J_m(s) + s^2 (R_a J_m(s) + L_a B_m) + s(R_a B_m + K_b K_t)} \quad (3.14)$$

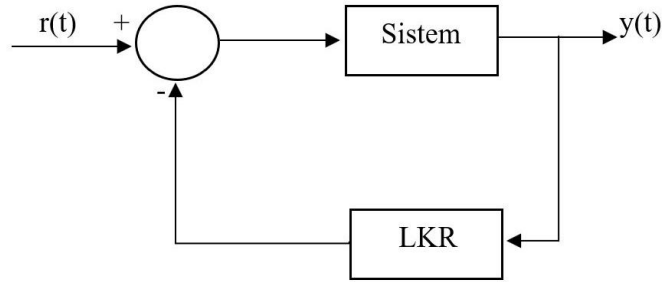
Çizelge 3.1. Motor parametreleri

Parametreler	Sembol	Birim
❖ Armatür Voltajı	V	Volt
❖ Armatür akımı	I _a	Amper
❖ Armatür direnci	R _a	Ohm
❖ Armatür endüktansı	H	Henry
❖ Açısal hız	ω	Rad/s
❖ Açısal konum	θ	Rad
❖ Motor torku	T _m	N.m
❖ Tork sabiti	K _t	N.m/A
❖ Rotor eylemsizliği	J _m	Kg.m ²
❖ Zıt EMK sabiti	K _b	V.s/rad
❖ Viskoz sürtünme katsayısı	B _m	N.m.s/rad

4. KONTROL SİSTEMLERİ

Günümüzden kullanılan birçok sistemin içerisinde kontrol sistemleri bulunmaktadır. Birden fazla parametre sonucu bir çıkış işaretini kontrol etmek amacıyla kullanılan bu sistemlere birçok örnek verilebilir. Evlerdeki çamaşır makinaları, buzdolapları, endüstrideki otomasyon sistemleri ya da askeri alandaki radar sistemleri içerlerinde kontrol mekanizmasını bulundurlar. Modernleşme ile beraber insanlar otomatik sistemleri tercih etmektedirler. Bu otomatik sistemlerin temelini ise kontrol teorisi oluşturmaktadır (Jian, 2014 ve Kadis, 2010). Kontrol teorisi mühendislik ve mühendislik dışı alanlarda da kullanılmaktadır. Örneğin kontrol teorisinin bir parçası olan optimizasyon ekonomide ya da ulaşım planlanmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Nawawi, 2008 ve Salarno, 2004). Başka bir alandan örnek vermek gerekir ise yine kontrolün bir uzantısı olan tahmin mekanizmaları borsa gibi çok önemli alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Wu, 2010 ve Yan, 2013). Bu tez çalışmasındaki denge robotunun istenen açıyı yakalayabilmesi için modern ve geleneksel kontrol yöntemleri kullanılabilir. Lineer Kuadratik Regülatör, Bulanık Mantık Kontrol ve PID kontrol ön plana çıkanlardır (Akyol, 2012; Sasaki, 2005; Tsai, 2008). Bu başlık altında bu üç metodun başarımları eski çalışmalara bakılarak değerlendirilmiştir.

LKR, geri beslemeli bir yapıya sahip olan optimal bir kontrol tekniğidir. Kontrolörün bir sisteme nasıl uygulanacağı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Keçecioğlu, 2013).



Şekil 4.1. LKR kontrol blok şeması

LKR ile kontrol yapılması için sistemin durum uzay formundaki matematiksel modelinin bilinmesi gerekmektedir. Optimal bir LKR, kontrolör kazancını sistemin modeline bakarak hesaplar. LKR kontrolörün birinci amacı maliyet fonksiyonunun (Cost Function) en düşük değeri almasını sağlamaktır. Aşağıdaki eşitlikte bir sistemin genel durum denklemlerinin gösterimi verilmiştir. Bu denklemdeki A durum matrisini, B giriş matrisini, C çıkış matrisini ve D ileri yön matrisi temsil eder. Giriş vektörü ise u ile

gösterilir (Anderson, 1989; Muratoğlu, 2014). Durum vektörü ve çıkış vektörleri sırasıyla x ve y ile simgelenir (Abbasnejad,2014).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Yukarıdaki durum denklemlerinden sonra maliyet fonksiyonunun hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$J = \int_0^{\infty} (x^* Qx + u^* Ru) dt \quad (4.2)$$

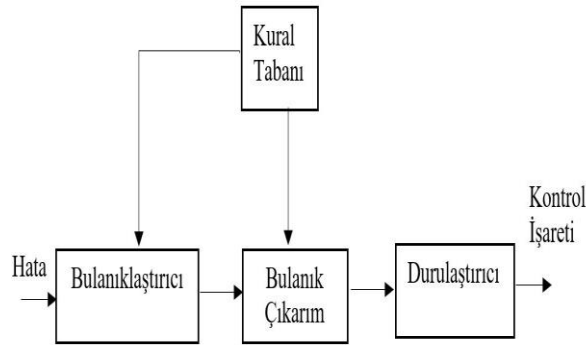
Burada Q ve R kontrolör tasarımında kullanıcı tarafından belirlenen parametrelerdir. Q pozitif tanımlı simetrik bir matristir, R ise tek giriş tek çıkış bir sistem olduğundan pozitif bir sabit sayıdır. Gerekli değerler hesaplandıktan sonra sistemin maliyet fonksiyonunu minimize edecek kontrolör tasarımı yapılır. Öncelikle P matrisi Ricatti denklemi çözümü yardımı ile bulunur.

$$A^T P + PA + PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4.3)$$

K kazancının hesaplanması aşağıdaki eşitlikte P değeri yerine yazılır.

$$K = R^{-1}B^T P \quad (4.4)$$

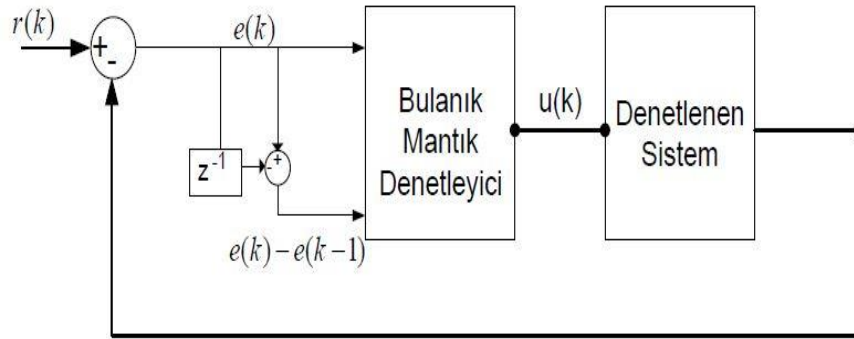
Bir diğer modern kontrol yöntemi olan BMK ise kural tabanlı bir kontrol yöntemidir. Bu kontrol yöntemi LKR yöntemi aksine sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymaz. Bulanık Mantık Kontrolör tasarımında 4 tane temel aşama vardır. Bu aşamalar üyelik fonksiyonlarının tipinin belirlenmesi. Kural tabanının oluşturulması. Çıkarım mekanizmasının oluşturulması ve durulaştırma aşamalarıdır.



Şekil 4.2. Bulanık mantık iç yapısı

Bulanıklaştırma aşamasında giriş değerleri dilsel olarak en az, az, orta, çok gibi sınıflandırılır (Altaş, 1999). Sonrasında üyelik fonksiyonları oluşturulur. Yaygın olarak üçgen, gauss ve yamuk üyelik fonksiyonları amaca yönelik kullanılır. Kural tabanı

aşamasında ise giriş ve çıkış arasındaki ilişkiler bu aşamada belirlenir. Kural tablosunu oluşturulurken uzman kişinin tecrübesi büyük önem arz etmektedir. Örnek vermek gerekirse bir sistemdeki hata e ile hata değişimi de ile ifade edilsin. Çıkış işareti e ve de ifadelerinin değerlerine göre şekillendirilir. ‘ e ’ az ve ‘ de ’ az ise çıkış işareti ‘ u ’ az olur gibi. Kural tablosunun hazırlanmasında gösterilen hassasiyet çıkış işaretinin başarısını doğrudan etkiler. Bu noktada daha önce sistem hakkındaki bilgi, simülasyon çalışmaları ve simetri anlayışı göz önüne alınarak başarılı sonuçlar verecek bir tablo hazırlanır. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer bölüm kural tabanlarının birbirleri ile çelişmemesidir (Xiaoxing, 2013). Çıkarım aşaması bulanık kontrolün en önemli noktasıdır. Bu aşamada giriş değişkenlerini ve kural tablosunu göz önüne alarak mantıklı çıkarımlar yapılır. Bu aşamada kullanılan Mamdani, Sugeno gibi önemli çıkarım yöntemleri kullanılabilir (Ji, 1997; Junfeng, 2011; Junfeng, 2012; Mamdani, 1975; Mamdani, 1976). Son olarak durulaştırma biriminde çıkarım aşamasının sonucunda ortaya çıkan bulanık kontrol işaretinin sayısal bir değere dönüştürülmesi işlemi yapılır (Mamdani, 1974). Aşağıdaki şekilde Bulanık Mantık Denetim Sisteminin blok şeması verilmiştir (Kao, 2017; Namazov, 2010; Nasir, 2011).

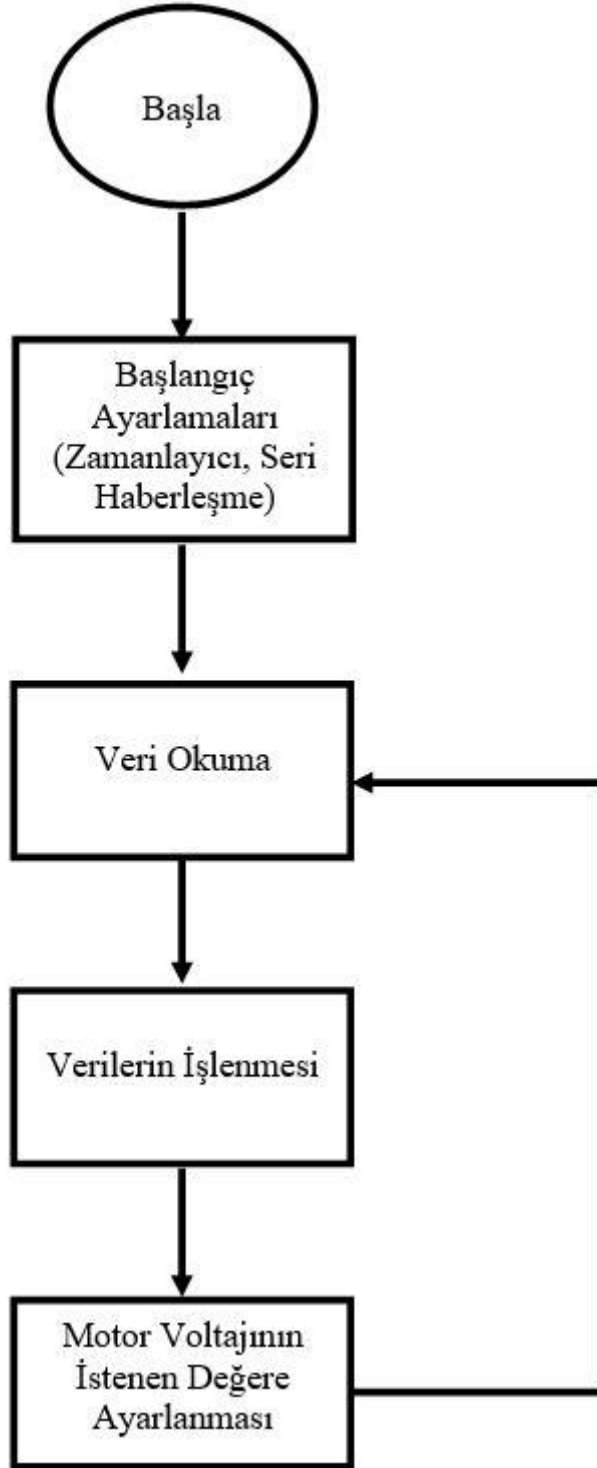


Şekil 4.3. Bulanık mantık kontrol blok şeması (Gani, 2014)

Yukarıda belirtilen modern kontrol yöntemleri kontrol aşamasında farklı fiziksel parametreler üzerinde birbirlerine üstünlük sağlarlar. Denge robotu üzerinde bu yöntemlerin ayrı ayrı uygulanması sonucunu bir yayına dönüştüren (Bature, 2014) çalışması sonucunda yükselme süresi ve yerleşme süresi parametreleri için en iyi sonucu Bulanık Mantık kontrolün verdiği saptanmıştır (Chia-Hong, 2011; Chih, 2010). PID ve LKR kontrollerin yükselme süresinde hemen hemen aynı sonuçlar verdiği, yerleşme süresinde ise LKR kontrolün daha iyi olduğu saptanmıştır. Diğer bir yönden dengenin sağlanması için en çok akımı Bulanık Kontrol yönteminin çektiği saptanmıştır. Bu çalışmada gerçek zamanlı sistemlere kolay uygulanabilir olması ve matematiksel modele

İhtiyaç duymamasından dolayı PID kontrol kullanılarak denge sağlanmıştır. Sonraki bölümlerde PID kontrol detaylı bir şekilde açıklanmıştır (Cong, 2013).

Aşağıdaki şekilde denge robotu kontrol mekanizmasını anlatan bir blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.4. Kontrol mekanizması Akış Diyagramı

4.1. Temel Kavram ve Tanımlar

Kontrol sistemlerinin daha iyi anlaşılması için bazı terimlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu terimler sistem, giriş, çıkış, referans, hata ve bozucu giriş olarak sıralanabilir. Giriş bir kontrol sisteminin bir cevap üretebilmesi için referans dışında uygulanan işarettir. Çıkış ise giriş işaretlerine göre sistemin ürettiği çıkış işaretidir. Referans bir kontrol sisteminin istenen çıkış değeridir. Bozucu girişler çoğu zaman ortamın doğal koşullarından kaynaklı sistemin dengesini bozan işaretlerdir. Hata ise daha çok kapalı çevrim sistemlerde bulunan ve çıkış işareti ile referans değeri arasındaki farkı temsil eder. Sistem bir ya da daha fazla girişi olan ve bu girişlerle bağlantılı bir çıkışı olan eleman topluluğu olarak adlandırılabilir. Kontrol sistemlerinde bir sistemin giriş ve çıkışı arasındaki matematiksel eşitlik oluşturulur. Bu eşitlik lineer bir yapıya sahip ise kontrol sistemi lineer kontrol sistemi olarak adlandırılır. Eğer bu eşitlik lineer değil ise kontrol sistemi lineer olmayan kontrol sistemi olarak isimlendirilir. İyi bir kontrol sistemi yüksek doğrulukta, hassas, gürültüsüz ve kararlı olmalıdır. Burada doğruluk normal şartlarda sistemden istenen çıkışın gerçek çıkışla olan yakınlığını ifade etmektedir. Bu durumun iyileştirilmesi için geri besleme kullanmak gerekir. Kontrol sistemlerinin parametreleri dış etkenlere bağlı olarak sürekli değişebilmektedir. Dış etkenlerden çok etkilenmeyecek daha sağlam bir kontrol yapılması hedeflenir. Gürültüler ise giriş kısmındaki istenmeyen işaretler olarak adlandırılabilirler. Birçok kontrol sistemi içerisinde sensörleri bulundurur (Chee, 2006). Gerçek zamanlı çalışan birçok sensör doğal yapısından ve çevre etkenlerinden etkilenerek gürültülü işaretler oluştururlar. İyi bir kontrol sistemi bu gürültüleri bastırmalı ve daha başarılı bir kontrol yapmalıdır. Kararlılık ise kontrol sistemlerindeki en önemli parametrelerdendir. Belirli sınırlara sahip girişlere göre belirli bir sınırdaki çıkış üreten sistemlere kararlı sistemler denir. Bir kontrol sistemi hızlı ve etkin bir şekilde çalışmalıdır. Kontrol sistemlerindeki geçici ve kalıcı durumlar iyi bir şekilde analiz edilmeli ve geçici durumların süresi kısaltılmalıdır.

Kullanım amacına göre birçok kontrol sistemi mevcuttur ve bu sistemler çıkış işaretini kontrol etmeyi hedefler. Bir kontrol sistemi çıkışta sıcaklık, basınç, açı, konum, akım ya da gerilim işaretini kontrol edebilir.

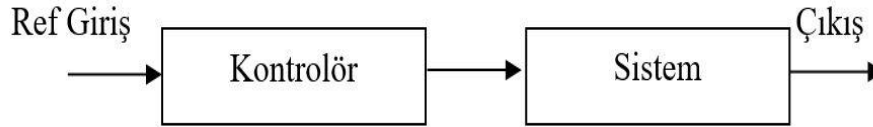
4.2. Kontrol Sistem Türleri

Geri beslemeli olup olmamasına göre kontrol sistemleri iki sınıfa ayrılabilir. Bunlar açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol sistemleridir. Bu sistemlere örnek olarak elektrikli ocak düşünülebilir. Bir litre sütü açık çevrim kontrollü bir ocakla kaynatmayı hedeflersek kaynama işlemi başladıktan sonra ocak kapanana kadar taşma olsa dahi ocak

çalışacaktır (Goher, 2010). Kapalı çevrim sistemlerde ise herhangi bir taşmanın algılanması durumunda giriş işareti kontrol edilerek ocak kendiliğinden kapanacaktır. Açık çevrim ve kapalı çevrim arasındaki farklar bu örnekle kolayca açıklanabilir (Butler, 2008; Castro, 2012; Goher, 2011).

4.2.1. Açık çevrim kontrol sistemleri

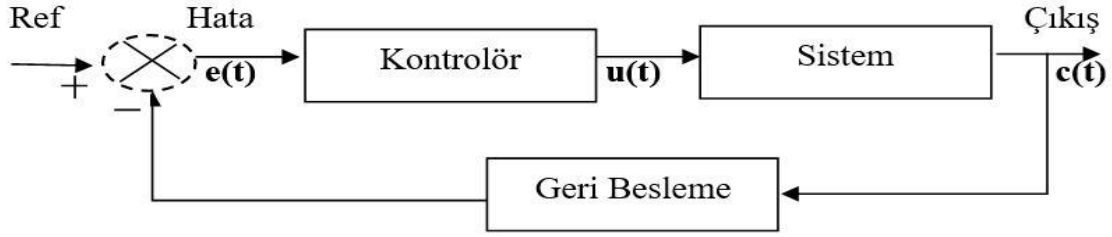
Çıkış işaretinin giriş işareti üzerine bir etkisi olmayan sistemlere açık çevrim kontrol sistemler denir. Bu sistemler basit yapılı olmakla beraber bazı eksik yönleri bulunmaktadır. Bu sistemlere saç kurutma makinası, kahve makinası, kurutma makinası gibi örnekler verilebilir. Bu sistemler incelendiğinde giriş işareti her zaman sabit olup çıkıştan bağımsızdır. Kahve makinası ve kurutma makinaları ayarlanan zaman süresince çalışıp çıkış işaretinden bağımsızdırlar. Bu tür kontrol sistemleri basit yapılı, ucuz, kararlı sistemler olarak da tanımlanabilir. Diğer yandan güvenilir olmayan ve çıkıştaki bir değişimden bağımsız çalışmaları kullanım alanlarını kısıtlı tutmaktadır. Aşağıdaki şekil açık çevrim kontrol sisteminin blok şemasını göstermektedir.



Şekil 4.5. Açık çevrim kontrol sistemi

4.2.2. Kapalı çevrim kontrol sistemleri

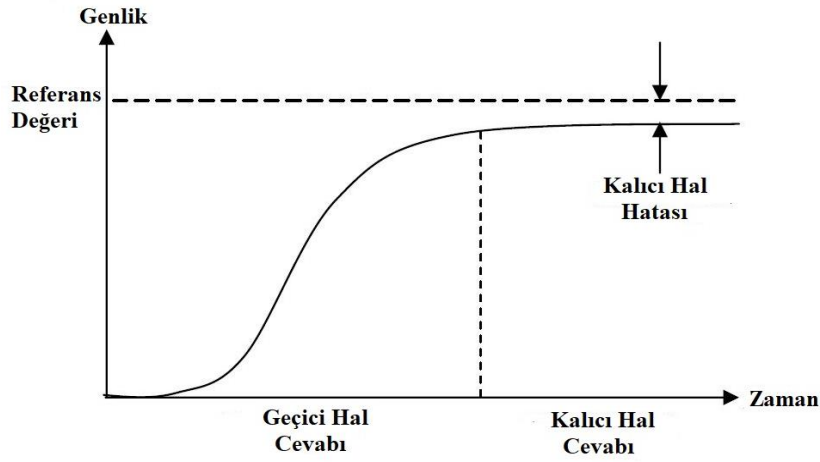
Giriş işaretinin çıkış işareti tarafından ayarlandığı sistemlere kapalı çevrim kontrol sistemi denir. Açık çevrim kontrol sisteminden tek farkı geri beslemesi olan kapalı çevrim kontrol sistemleri açık çevrim kontrol sistemlerine göre daha sağlıklı sonuçlar çıkartırlar. Bu sisteme örnek olarak klimalar verilebilir. Mekân sıcaklığına göre soğutma yapan klimalar çıkış işareti olan mekân sıcaklığından etkilenirler. Kapalı çevrim kontrol sistemleri lineer olmayan sistemlerde dahi daha başarılı sonuçlar verirler. Bozucu etkilerden etkilense dahi kendisini koruyabilir. Sistem hassaslığı ayarlanabilir. Diğer yandan açık çevrim kontrol sistemlerine göre daha pahalıdırlar. Tasarımları daha karmaşıktır. Kararlılığı sağlayabilmek en büyük sorundur. Aşağıdaki görselde kapalı çevrim kontrol sistemi blok şeması gösterilmiştir (Bugeja, 2003).



Şekil 4.6. Kapalı çevrim kontrol sistemi

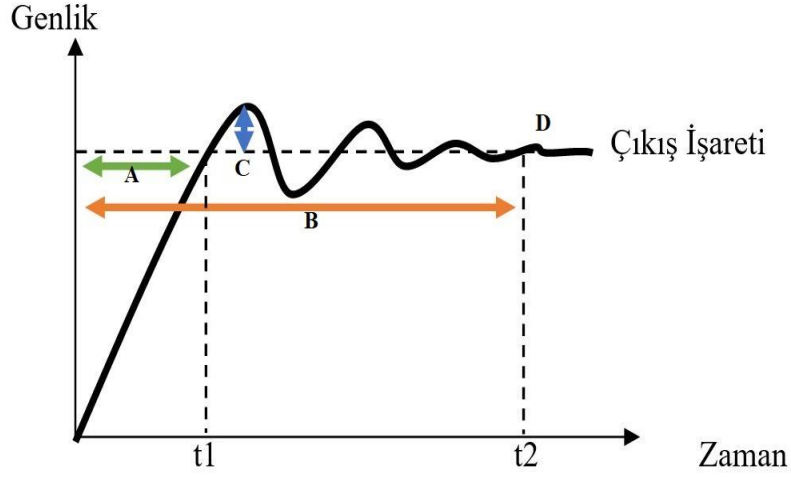
4.3 Kontrol Sistemi Tasarımı ve Analizi

Kontrol sistemlerinde amaç $e(t)$ olarak sembolize edilen hatanın minimuma indirgenmesidir. Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere hata çıkış işareti ile referans giriş arasındaki fark olarak isimlendirilmektedir. Bu durumda sistemde geçici hal cevabı ve kalıcı hal cevabı incelenmelidir (Gani, 2016; Gocmen, 2011).



Şekil 4.7. Bir Sistemin geçici ve kalıcı durum cevapları

Geçici hal cevabı sistemin çalışma noktasından başlayarak çıkış işaretinin sabit bir değere gelmesine kadar olan süreci temsil etmektedir. Sürekli hal cevabı ise sabitlenen çıkış işaretinin referans değere olan yakınlığını temsil eden süreçtir. Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere burada en dikkat edilmesi gereken noktalardan bir tanesi kalıcı hal hatasıdır. Bu hatanın istenilenden fazlası olması durumunda yani referans değeri yakalayamaması durumunda başarılı bir kontrol yapıldığının söylenmesi mümkün değildir. Kararlı hal hatasının sıfırlanabilmesi için sisteme bazı eklemeler yapılmalıdır. Bu eklemeler P, I ve D olarak isimlendirilen kontrol parametreleridir. Burada P (Propotional) oransal kontrol, I (Integrator) integral kontrol, D (Derivative) türevsel kontrolü ifade eder.



Şekil 4.8. Kontrol sisteminin fiziksel parametreleri

Yukarıdaki çıkış sinyali bir kontrol sisteminin başarımının incelenmesi için birçok parametreyi içerisinde bulundurur. Bu parametreler A: Yükselme Süresi, B: Yerleşme Süresi, C: Aşım ve D: Kalıcı Durum Hatasıdır. Yükselme süresinin ve yerleşme süresinin kısa olması iyi bir kontrol sisteminde aranan bir durumdur. Maksimum aşım değerinin de çok fazla olmaması istenmektedir. Aşağıdaki tabloda PID parametrelerinin sistemin fiziksel parametreleri üzerindeki etkileri gösterilmiştir. K_p ve K_I değerlerinin artırılması yükselme süresini olumlu etkilerken maksimum aşımı olumsuz etkilemektedir. K_I değerinin artırılması yerleşme süresini artırırken, K_p nin artırılması kalıcı durum hatasını azaltır. K_d ise maksimum aşımı ve yerleşme süresini azaltır.

Çizelge 4.1. PID parametrelerin sistem üzerindeki fiziksel etkileri

Artan Parametreler	Yükselme Süresi	Maksimum Aşım	Yerleşme Süresi	Kalıcı Durum Hatası
K_p	Azalır	Artar	Küçük Etki	Azalır
K_I	Azalır	Artar	Artar	Büyük Etki
K_D	Küçük Etki	Azalır	Azalır	Küçük Etki

4.4. Kararlılık

Kararlılık literatür de bir sistemin sınırlı girişe karşı sınırlı çıkış vermesi olarak yer almaktadır. Kontrol sistemlerinin en temel özelliklerinden birisi olan kararlılık olmazsa sistemin geçici ve kalıcı durumlarını incelemeye gerek yoktur. Bu kavramlar kararlı bir kontrol sistemi için geçerlidir. Matematiksel olarak bir sistemin kalıcı hal durumu referans değere yaklaşıyor ise sistem kararlıdır denilebilir. Kararlılığın incelenmesinde sistemin transfer fonksiyonuna bakılır. Transfer fonksiyonunun tüm kutuplarının sol yarı düzlemde

olması durumunda sistem kararlıdır. Aksi durumda sistem marjinal kararlı ya da kararsız olabilir. Kararlılık analizi için Routh-Hurwitz yöntemi de yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.5. Kontrolör Türleri

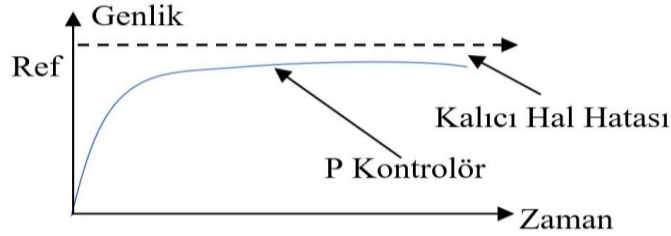
Bu bölümde farklı türdeki kontrolör türleri ve onların kombinasyonları sonucu oluşan kontrolörler ve bu kontrolörlerin fiziksel etkileri açıklanmıştır.

4.5.1. Oransal (P) kontrolör

Oransal kontrolörleri kullanmanın birinci amacı kalıcı durum hatalarını indirmektir. K_P oransal kazancı arttıkça, kalıcı durum hatası azalır. K_P değerinin azalması durumunda kalıcı durum hatasını hiçbir zaman yok edemez. Ayrıca yükselme zamanına da olumlu etkide bulunur. Kontrol işareti sabit kazançlı bir yükselteç olarak düşünülebilir. $X_{(t)}$ Oransal kontrolörün çıkışını temsil eder. Oransal kontrolün çıkışı kontrolör girişindeki hata değerinin bir katsayı ile çarpılması sonucu elde edilir.

$$X_{(t)} = K_P e_{(t)} \quad (4.5)$$

Aşağıdaki grafikte kontrolör çıkışının davranışı gösterilmektedir. Oransal kontrolörde her zaman bir kalıcı hata oluşur ve bu hata büyüklüğü sistemden sisteme göre farklılık gösterir.

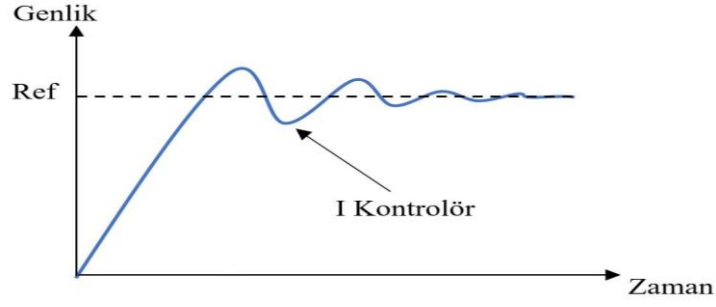


Şekil 4.9. P kontrolörün sistem üzerine etkisi

4.5.2. İntegral (I) kontrolör

İntegral kontrolör sistemin tipini bir artırarak kararlı hal hatasını yok eder. Ancak sistem cevabı yavaşlar ve dalgalanmalar artar. Ayrıca K_I artar ise aşımalar oluşur ve yerleşme süreside artar. $X_{(t)}$ İntegral kontrolörün çıkışını temsil eder. Aşağıdaki şekil integral kontrolör çıkışının davranışını göstermektedir.

$$X_{(t)} = K_I \int_0^t e_{(t)} dt = \frac{K_I}{s} \quad (4.6)$$



Şekil 4.10. I kontrolörün sistem üzerine etkisi

4.5.3. Türev (D) kontrolör

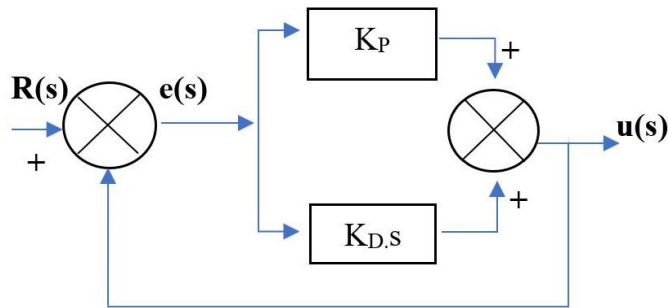
Türev kontrolör tek başlarına kullanılamazlar çünkü türev kontrolörler hatayı giderecek işaret üretemezler. Bu kontrolör diğer kontrolörler ile beraber kullanıldıkları zaman aşımı azaltırlar, dalgalanmayı azaltırlar ve gürültüye karşı daha duyarlı hareket ederler. K_D türevsel kazancı ve $X(t)$ türev kontrolün çıkışını ifade etmektedir.

$$X(t) = K_D \frac{d}{dt} e(t) = K_D \cdot s \quad (4.7)$$

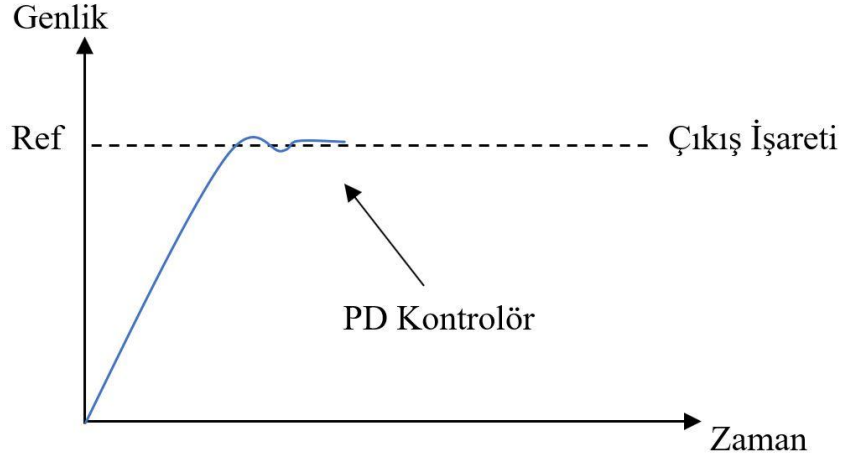
4.5.4. PD kontrolör

Sistem kararlılığına olumlu etkiden bulunan bu kontrolör tipi aynı zamanda kalıcı durum hatasını da sıfırlamaktadır. Buradaki türev etkeni sisteme sönüm katarak kararsız sistemleri kararlı hale getirebilir. Diğer yandan bu türev etkeni bazı gürültüleri de kuvvetlendirebilir. Bu yüzden salınımlı bir çıkış sağlayabilir. PD kontrolör sistemdeki sönümü artırıp maksimum aşımı azaltır, yükselme zamanı ve yerleşme zamanını olumlu etkiler (Nundrakwang, 2005). Devre tasarımında kondansatörlere ihtiyaç duyabilir. Aşağıdaki şekilde K_P ve K_D elemanlarının PD kontrolöründeki blok bağlantısı gösterilmiştir. S düzleminde kontrolör ifadesi;

$$G_C = K_P + K_D s \quad (4.8)$$



Şekil 4.11. PD kontrolör blok bağlantı şeması

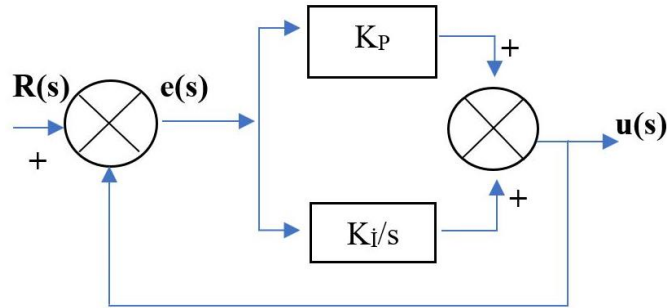


Şekil 4.12. PD kontrolörün sistem üzerine etkisi

4.5.5. PI kontrolör

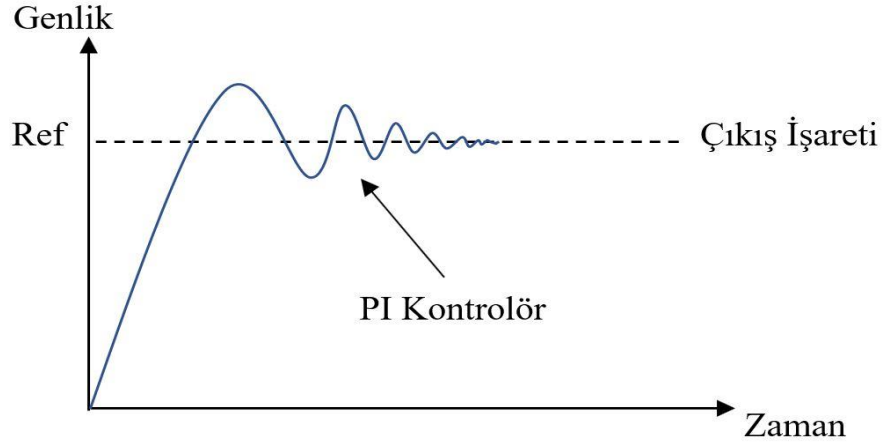
PI kontrolün sağladığı en büyük avantajlardan bir tanesi kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmasıdır. Ayrıca P kontrolörü sayesinde sistemin geçici hal cevabı iyileştirilir. P ve I kontrolörlerin yükselme zamanı ve aşım fiziksel parametrelerine aynı etkide bulduklarından dolayı ikisinin de yüksek değerler alması çoğu zaman sağlıklı sonuç vermemektedir. Sistemdeki bozucu girişler sıklıkla kararlılığı etkiliyorsa sadece oransal kontrolör bu durumu düzeltmeye yetmez. Bu durumlarda I kontrolörü ile beraber kullanılabilirler.

$$G_C = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (4.9)$$



Şekil 4.13. PI kontrolör blok bağlantı şeması

Yukarıdaki fiziksel etkiler aşağıdaki şekilden görülebilir. Optimal bir PI kontrolör sonucu sistemdeki sönümler düzelir, aşım azalır, yükselme zamanı artar.



Şekil 4.14. PI kontrolörün sistem üzerine etkisi

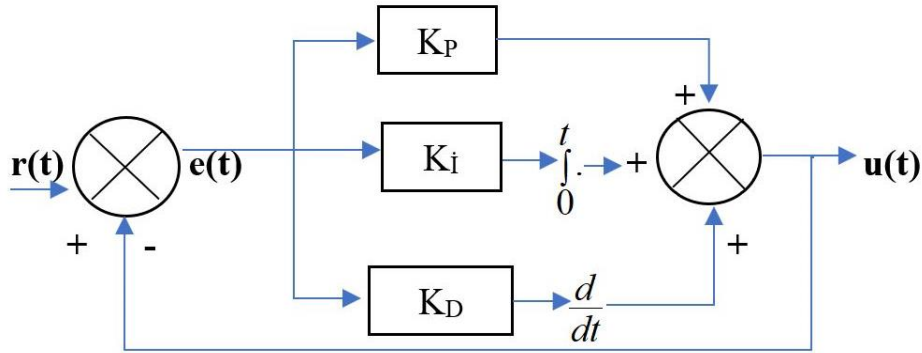
4.5.6. PID kontrolör

İki tekerlekli denge robotunun başarılı bir şekilde dengede durabilmesi için kontrol metotlarından birisinin uygulanması büyük önem arz etmektedir. Denge robotunun kontrolü için birçok geleneksel ve modern kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Ancak uygulanacak olan kontrol metodu efektif ve aynı zamanda düşük maliyetli olmalıdır (Junoh, 2015). Başarılı bir kontrol yapılabilmesi için sistemin modeli ve açılış bilgisini gönderen sensörden verilerin nasıl alındığı bilinmelidir. Denge robotunun tasarımında açılış ve konum kontrolü ön plana çıkmaktadır. Kontrol teknikleri sistemlerin doğrusal ve doğrusal olmayışlarına göre farklılık gösterebilir (Cahyono, 2013). Doğrusal kontrol metodu istenen noktaya göre sistemi modeller ve bu yöntem denge robotunun kontrolü için yeterli bir yöntemdir. Diğer bir yandan doğrusal olmayan kontrol organı gerçek olmayan bir sistem modeli kullanır. Otonom bir şekilde dengede duran bu robotun kontrolü doğrusal kontrol metodu olan PID kontrol metodu ile yapılmıştır. Bu metottaki oransal sabit P, entegrasyon sabit I ve türevsel sabit D çok tanınan 3 sabittir. PID kontrol özellikle endüstride en yaygın kontrol metotlarından bir tanesidir. Basit yapısı olması sebebi ile birçok gelişmiş kontrol mekanizmasının temelini oluşturmaktadır. PID kontrolör ilk olarak mekanik kontrol organı olarak kullanılmıştır ve bir pnömomatik sistem kontrolünde görev almıştır. Mekanik ortamda başarısını kanıtladıktan sonra elektrik ve elektronik alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır (Choi, 2008; Vallius, 2007). Ev ısıtma sistemlerinden ev aletlerine kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Günümüzde PID kontrol sadece yazılım aracılığı ile dahi yapılabilmektedir. Yukarıda belirtildiği üzere 3 kontrolörün birleşiminden oluşan PID kontrolör yapısının matematiksel ifadesi (Miranda, 2010);

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d}{dx} e(t) \quad (4.10)$$

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (4.11)$$

PID kontrolör yapısı PI ve PD kontrolörlerinin sağladığı avantajları birleştirerek daha iyi bir kontrolör tasarlamamızda bize yardımcı olmaktadır. Sistemimizi hem daha kararlı kılıp hem de yükselme zamanını azaltarak optimal çıkış işareti almamızı kolaylaştırır. Burada dikkat edilmesi gereken noktalardan bir tanesi PID parametrelerinin hesaplanmasıdır. Bu hesaplamada en yaygın olarak kullanılan metotların başında Ziegler-Nichols metodu gelmektedir. Açık çevrim ve kapalı çevrim için ayrı formülleri vardır. Bu tezde kapalı çevrim bir sistem olduğundan dolayı kapalı çevrim sistemler için inceleme yapılacaktır (Coşkun, 2007; Unluturk, 2013).



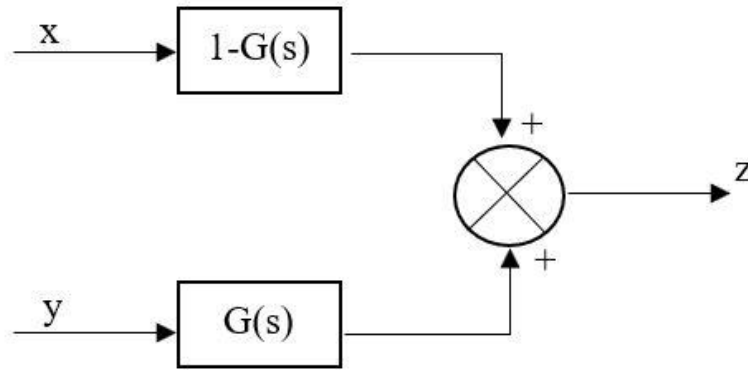
Şekil 4.15. PID kontrolör blok bağlantı şeması

4.6. Filtreleme

Filtreleme işlemi en basit haliyle bir gürültülü işaretlerin gürültüden arındırılması olarak tanımlanabilir. Bu işaret bir ses işareti, görüntü işareti, sensör işareti olabilir. Gürültülü işaretlerle çalışmak çoğu zaman bize zorluklar çıkartacak ve istenilen süreci işletemeyeceğiz. Kontrol teorisi günümüzde çok yaygın bir şekilde kullanılmakta ve işaret filtrelemede kontrolün bir parçası olarak görülmektedir. Filtreleme işlemi için birçok farklı teknik ve algoritma mevcuttur. Bunlar alçak geçiren filtre, yüksek geçiren filtre ya da daha farklı yapıdaki filtreleme şeklinde olabilir. Bu bölümde tümleyici (Complementary) filtre, Hareketli Ortalamalar Metodu (Moving Average) ve tezde kullanılan Kalman filtresi açıklanmıştır. Bu filtrelerin başarımı bir akselerometre sensörü üzerinde incelenmiştir. Sonuçlar grafikler yardımı ile yorumlanmıştır. Kalman filtresinin diğer filtrelere karşı olan üstünlükleri tartışılmıştır (Ding, 2012).

4.6.1. Tümleyici filtre

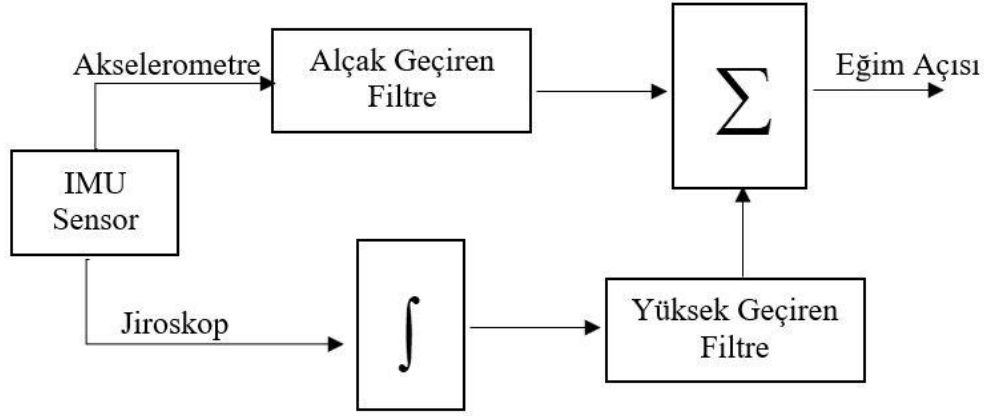
Tümleyici (Complementary) filtre basit yapısı ve kolay uygulanabilir olması ile ön plana çıkan bir filtreleme yöntemidir. Birbirini tamamlayan basit iki filtreden oluşan bu yapı hassas durumlarda sağlıklı sonuçlar veremeyebilir. Alçak geçiren ve yüksek geçiren filtrelerin eş zamanlı olarak kullanılmasından elde edilen bir filtreleme şeklidir. Alçak geçiren filtre yüksek frekansa sahip akselerometredeki titreşimleri filtrelemek için kullanılırken yüksek geçiren filtre düşük frekanslara sahip jiroskop işaretlerini filtreler. Aşağıdaki şekilde de görüldüğü üzere tümleyici filtredeki en dikkat edilmesi gereken kısım iki filtrenin kazançları toplamının 1 olmasıdır.



şekil 4.16. Tümleyici filtre blok şeması

Akselerometre girişi olan alçak geçiren filtrenin transfer fonksiyonu $\frac{1}{1+Ts}$ ve Jiroskop girişi olan yüksek geçiren filtrenin transfer fonksiyonu $\frac{Ts}{1+Ts}$ olarak verilebilir. Burada x akselerometre girişi ve y/s jiroskop girişinin entegrasyonu olarak kabul edilirse toplam çıkışı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Toplam = \frac{x}{1+Ts} + \left[\frac{Ts}{s(1+Ts)} + \frac{1}{s} \right] * y \quad (4.12)$$

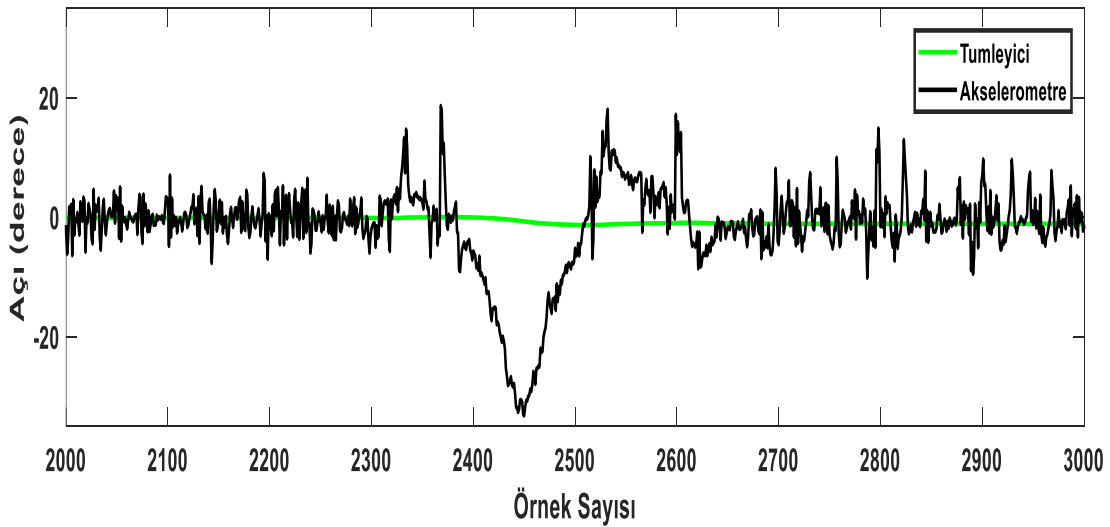


Şekil 4.17. IMU sensörün tümleyici filtre blok şeması

Birçok uygulamada kazançlar 0.98 ve 0.02 olacak şekilde seçilmiştir. Ancak bu değerler filtre tasarımında en doğru sonuç için ayarlanabilir. Filtre tasarımında aşağıdaki eşitlikten faydalanmıştır.

$$açı = a * (açı + gyrData * dt) + (1 - a) * (accData) \quad (4.13)$$

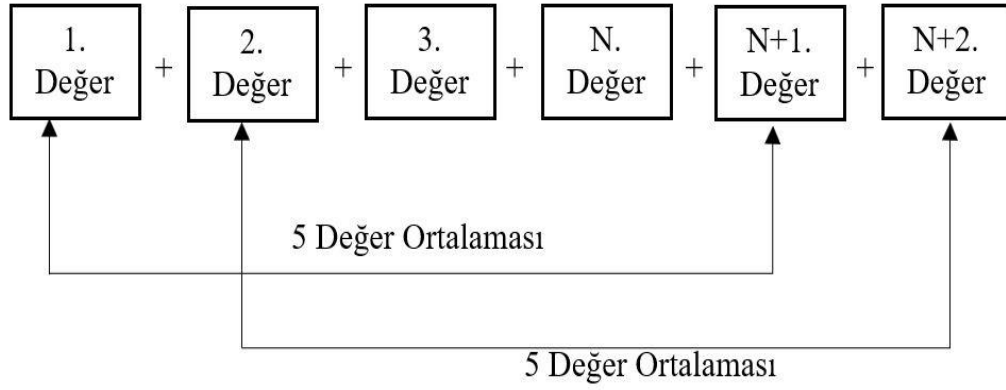
Burada gyrData jiroskop bilgisini ve accData akselerometre bilgisini temsil etmektedir. Yukarıdaki eşitlik yardımı ile yazılan kodun sonsuz bir döngüye sahip olması gerekmektedir çünkü her tekrarda yeni açı değerleri elde edilmektedir. Sonra filtre akselerometredeki değerlerin makul bir açı bilgisi mi yoksa gürültü olduğunu kontrol eder. Eğer değer çok küçük veya çok büyük ise o değeri gürültü olarak kabul eder. Aşağıdaki grafik tümleyici filtrelemenin başarımını göstermektedir. Görüldüğü üzere çok yüksek değerlerdeki ve çok alçak değerlerdeki sensör verilerini görmezden gelerek gerçek sensör işareti elde edilmiştir.



Şekil 4.18. Akselerometre ve tümleyici filtre çıkış işaretleri

4.6.2. Hareketli ortalamalar filtresi

Hareketli Ortalamalar Filtreleme (Moving Average) basit yapısı ve kolay programlanabilir olması nedeni ile çok yaygın kullanılan bir filtreleme metodudur. Yapısı itibarı ile basit bir alçak geçiren FIR (Finite Impulse Response) filtre olarak değerlendirilebilir ve frekans düzleminde düşük performans, zaman düzleminde iyi bir performans gösterir. Değerlerin ortalamasını alan (Averaging) yöntemine benzer bir yapıya sahiptir. Ortalama alma yönteminde ilk veriden son veriye kadar ortalama alınır ancak hareketli ortalamalar yönteminde yeni değerler alındıkça eski değerler ortalamaya dahil edilmezler. Buda geleneksel ortalama alma yöntemine göre daha başarılı sonuçlar vermektedir. Ani değişimlere karşı yetersiz olan bir filtreleme türüdür. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere 5 değer ortalaması alınmaktadır. Ortalamaya katılan yeni her bir değer için ortalamaya katılan en eski değeri devre dışı bırakır.



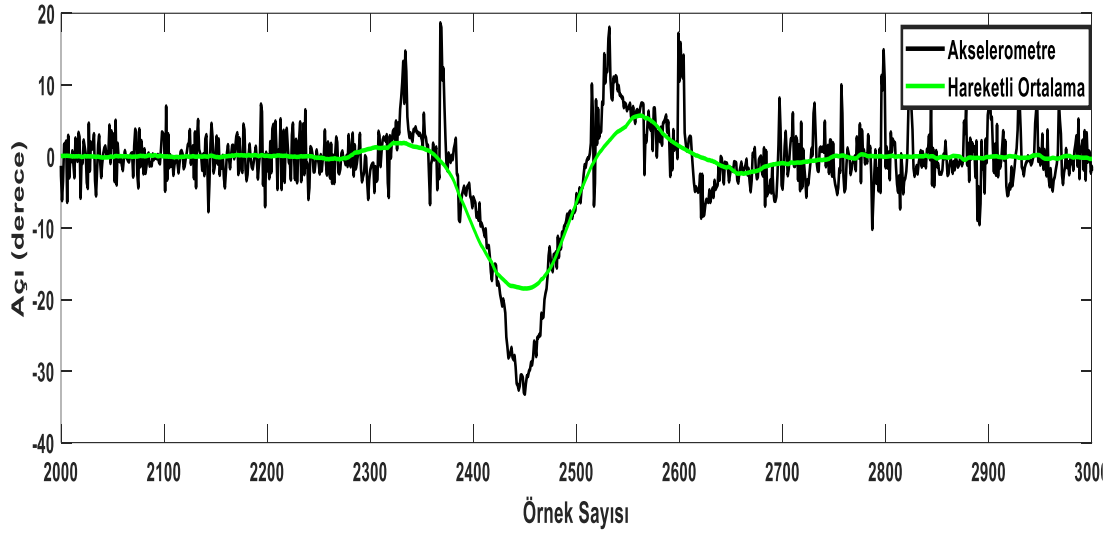
Şekil 4.19. Hareketli ortalamalar filtresi çalışma prensibi

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i+j] \quad (4.14)$$

$$y[44] = \frac{x[42] + x[43] + x[44] + x[45] + x[46]}{5} \quad (4.15)$$

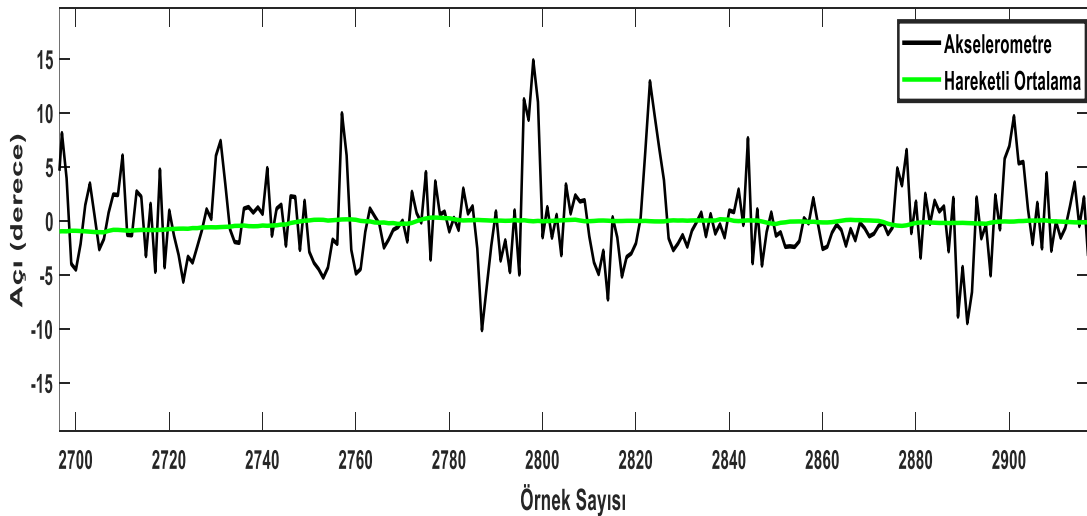
Yukarıdaki eşitlikte y çıkış işareti, x giriş işareti ve M ortalamaya katılan değer sayısını ifade etmektedir. Filtrenin hassaslığı hesaba katılan örnek sayısı (M) ile orantılıdır. M sayısının yüksek olması durumunda daha sade bir çıkış elde edilir ancak bu durum ani değişen değerlerin çıkışa yansıtılması konusunda yetersiz kalmaktadır. Sensör tarafından okunan bir değerın gürültü olup olmadığını anlamak için o değerın devamlılığına bakarız. Eğer gelen sonraki değerlerde aynı büyüklükte ise bu durum ortalamayı hızlıca etkileyerek çıkışı değiştirecektir. Diğer bir yandan bu okunan değer sadece bir ya da 2 örnek için

geçerli ise ortalamaya fazla bir etki yaratmayacağından dolayı çıkış işareti gürültüden fazla etkilenmeyecektir. Aşağıdaki grafikte görüldüğü üzere ani bir değişimi yakalaması için biraz zaman geçmesi gerekmektedir. Ayrıca 35 derecelik açı sapmasına kadar yeşil renkte olan hareketli ortalama filtresi çıktısı aşırı derecede doğrultulmuştur ve hassas değişimlere tepkisiz kalmıştır. Bunun sebebi ortalamaya fazla değer katılmasıdır. Bu durum Şekil 4.20 deki hareketli ortalama filtre çıktısında daha net görülmektedir.



Şekil 4.20. Akselerometre ve hareketli ortalamalar filtresi çıkış işaretleri

Burada çok titreşimli olan akselerometre işaretlerinin 100 tanesi ile oluşturulan hareketli ortalama çıkış işareti yeşil renkte gösterilmiştir. Görüldüğü üzere titreşimli akselerometre işaretinden çok daha düzgün ve kaliteli bir işaret oluşturulmuştur.



Şekil 4.21. Akselerometre ve hareketli ortalamalar filtresi çıkış işaretleri (yakın)

4.6.3. Kalman filtresi

Kalman filtresi 1960'lı yıllarda Rudolf E.Kalman tarafından hava araçlarına rehberlik etmesi amacıyla tasarlanmıştır. Durumların tahmininde ve sensörlerin gürültülü çıkışlarının filtrelenmesinde etkin bir şekilde kullanılır. Günümüzde çok geniş bir uygulama alanına sahip Kalman filtresi ekonomide, işaret temizlemede, sistem durum analizinde, nesne takibinde, ses işaretlerinin iyileştirilmesinde ve takip cihazlarında kullanılır. Kalman filtresi sayesinde geçmişteki verileri kullanarak mevcut durum hakkında tahminler yapabiliriz (Fakharian, 2011 ve Nakpong, 2012). Bu sistemin kullanılabilmesi için sistemin doğrusal bir yapısının olması gerekir. Algoritma, gürültülü veriler üzerinde özyinelemeli gerçek zamanlı çalışarak hataları, en az-kareler eğriye sığdırma yöntemi ile filtre eder ve sistemin fiziksel karakteristiklerinin modellenmesi ile üretilen gelecek durumun matematiksel tahminine göre optimize eder (Çayıröğlu, 2012 ve Fakharian, 2011). Karmaşık denklemlere sahip Kalman filtresindeki durum matrisleri göz önüne alınmadığı zaman basit yapıdaki aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\hat{x}_k = K_k \cdot Z_k + (1 - K_k) \cdot \hat{x}_{k-1} \quad (4.16)$$

Eşitlikteki \hat{x}_k mevcut durumu, Z_k ölçüm sonucunu, \hat{x}_{k-1} ise önceki durumu temsil eder. Bu eşitliğe bakıldığında zaman bilinmeyen tek parametre kalman kazancıdır (K_k). Aşağıdaki eşitlikteki k indisleri ayrık zaman aralıkları olarak kabul edilebilir. Buradaki kalman kazancını 0,5 olarak kabul edersek elimizdeki eşitlik ortalama bulan bir fonksiyona dönüşür. Kalman filtresi çok daha güçlü bir yöntemdir ve her yeni döngüde kendini günceller. Doğrusal bir sistemin matematiksel olarak kalman filtresine uydurulması için aşağıdaki eşitlikler kullanılır. Sistem modelini Kalman filtresi eşitliklerine uydurduktan sonra başlangıç parametrelerini hesaplamak gerekir.

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.17)$$

$$Z_k = Hx_k + v_k \quad (4.18)$$

Bu eşitlikte k örnekleme zamanını, A durum matrisini B kontrol matrisini H ölçüm durumunu u ise bilinen giriş değerini temsil eder. Eşitlikteki \hat{x}_k mevcut durum vektörünü, w_k ve v_k ise sırasıyla süreci ve ölçüm gürültüsünü temsil eder. Sensör analizinde ise ölçümler Z_k ile temsil edilir. Birinci denklemde bir \hat{x}_k değeri, önceki değer, kontrol işareti (u_k) ve önceki işlem gürültüsünün doğrusal kombinasyonu ile elde edilir. İkinci

denklemden ise herhangi bir ölçüm değeri Z_k işaretinin değeri olan \hat{x}_k ve ölçüm gürültüsü olan v_k değerinin doğrusal kombinasyonlarından oluşur. Kalman filtresi eşitlikleri 2 ye ayrılabilir. Bunlar tahmin ve düzeltmedir. Aşağıdaki eşitlikler kullanılarak Bu denklemler tahmin sürecindeki denklemlerdir.

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (4.19)$$

$$\hat{P}_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (4.20)$$

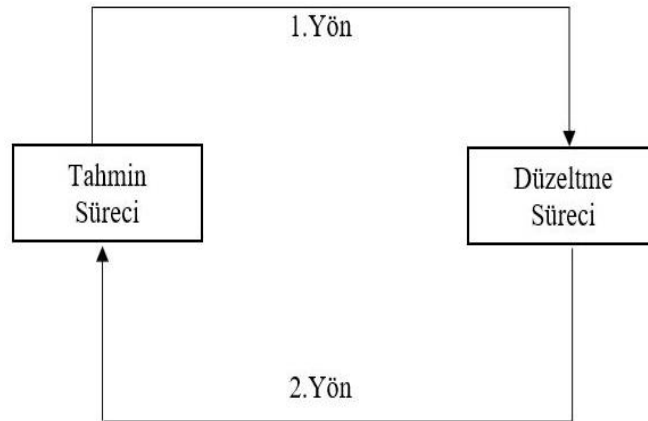
Aşağıdaki denklemler ise düzeltme süreci denklemleridir ve tahmin sürecindeki değerleri girdi olarak kabul eder.

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (4.21)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4.22)$$

$$P_k = (1 - K_k H) P_k^- \quad (4.23)$$

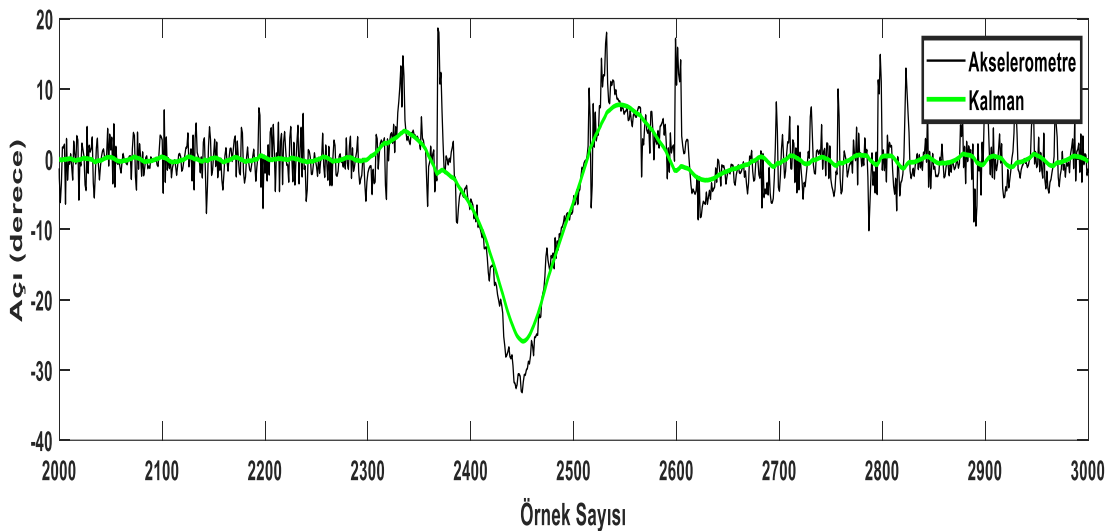
İlk adımda modelleme yapıldığından dolayı A, B ve H matrisleri bilinmektedir P_k ise hata kovaryansını temsil etmektedir. Çoğu zaman bu değerler sabit bir sayı olarak alınırlar. Bu kısımda zor olan yer R ve Q matrislerinin değerlerinin bulunmasıdır. Bu değerlerinde yaklaşık olarak belirlenmesinden sonra dögüsel olarak hesaplamalara başlanabilir (Çayıroğlu, 2012).



Şekil 4.22. Kalman filtresi çalışma yapısı

Yukarıdaki şekilde gösterilen döngü kalman filtresinin nasıl çalıştığını anlamasında büyük önem arz etmektedir. Yukarıda tahmin sürecinde verilen denklemler sayesinde hesaplanan değerler düzeltme sürecinde girdi olarak kabul edilir (1.yön) ve mevcut durumdaki \hat{x}_k değeri tahmin edilir. Başlangıç değerleri ise tahmin sürecine girdi

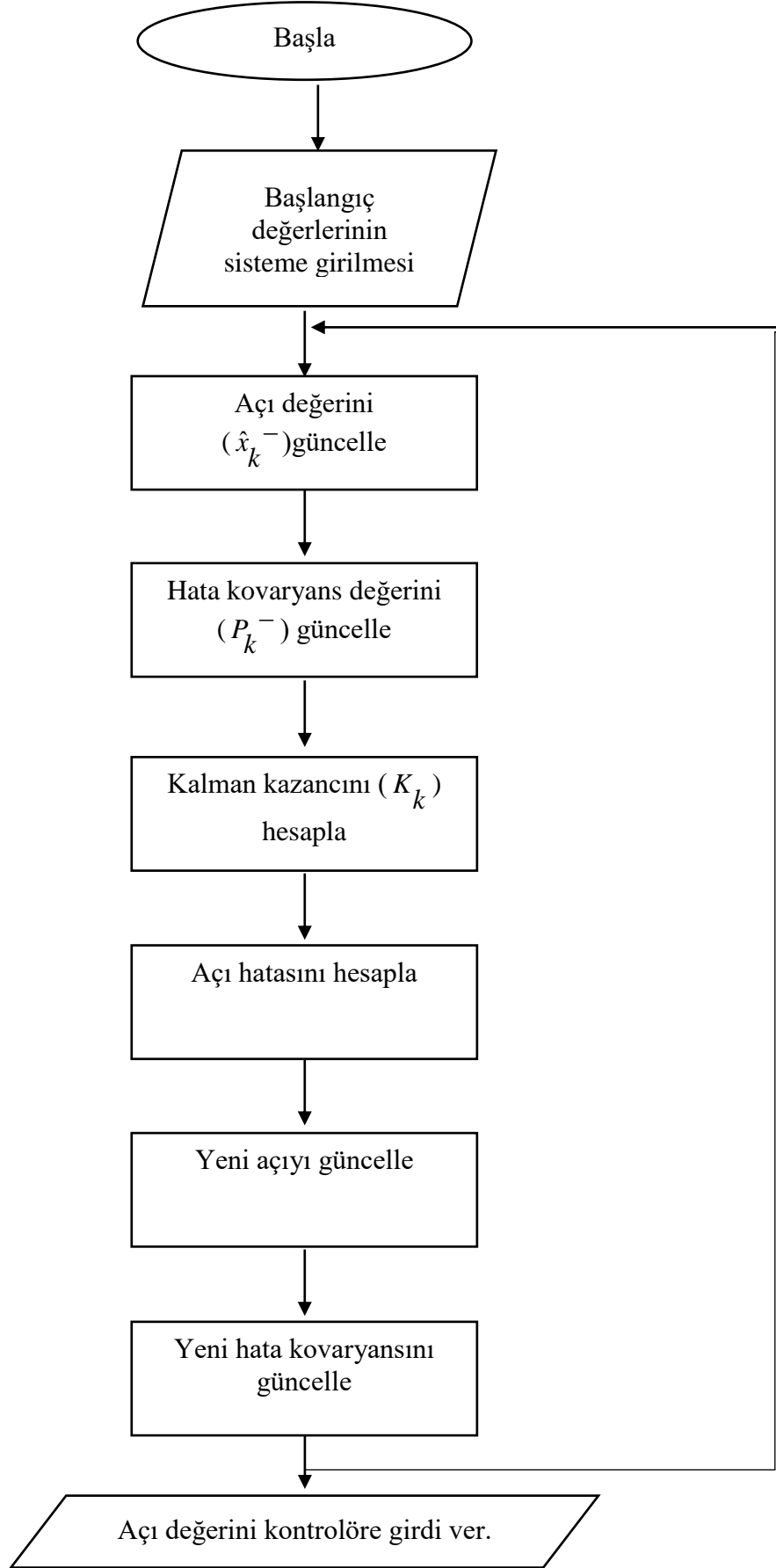
olarak verilir (2.yön) (Prasetio, 2015). Basit bir açı tahmin algoritması düşünüldüğünde ilk önce başlangıç şartları belirlenerek tahmin sürecindeki denklemlerden \hat{x}_k^- ve P_k^- değerleri hesaplanır. Bu hesaplamada A ve H değerleri 1 ve u_k değeri 0 olarak kabul edilir çünkü sistemde bir kontrol işareti yoktur. Bu durum sonucunda $\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1}$ ve $\hat{P}_k = P_{k-1}$ olur. Başlangıçtaki açı değerimizi 0 alıp P_k^- değerini de 1 olarak kabul edersek bu parametreleri güncelleme kısmında kullanabiliriz. P_k^- değerinin sıfır alınması ortamda hiç hata olmadığını gösterir ve hesaplamalar hatadan bağımsız yapılıır. Bu parametrelerden faydalanarak K_k hesaplanır ve sonra Kalman kazancıda kullanılarak \hat{x}_k değeri hesaplanır. Döngü sayısının artması durumunda daha sağlıklı sonuçlar elde edilir. Aşağıdaki grafik kalman kazancının titreşimli bir akselerometre üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 4.23. Akselerometre ve kalman filtresi çıkış işaretleri

Yukarıdaki grafikten görüldüğü üzere çok titreşime sahip sensör işareti filtrelendikten sonra daha az titreşime sahip düzgün bir işarete dönüşmüştür. Filtrelenmemiş bir işaret ile denge robotunun kontrolünün sağlanması çok zor bir görevdir ancak filtrelenen işaret sayesinde kontrol daha basit bir hal almıştır.

Kalman filtresinde kullanılan eşitlikler yazılım sayesinde hızlı bir şekilde hesaplanarak gerçek zamanlı bir çıkış işareti elde edilir. Bu hesaplama için kullanılan algoritma aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Kalman filtresi yazılım algoritması

5. DEVRE TASARIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Doğru Akım Motor Modeli ve Hız Kontrolü

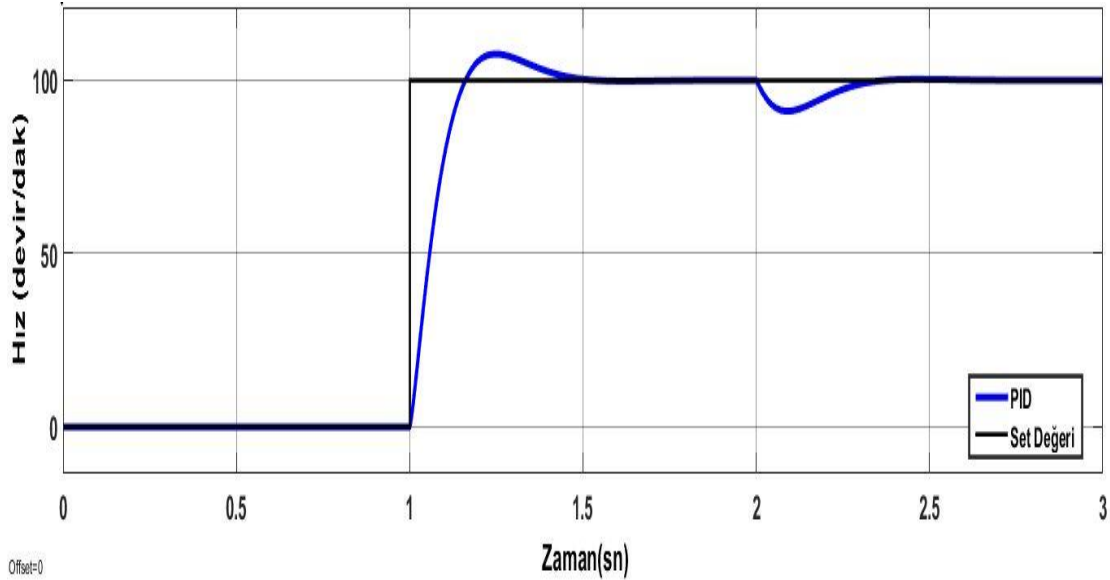
Doğru akım motorları denge robotunun olmazsa olmaz parçalarından bir tanesidir. Denge robotu çalışma mantığı yüzeysel olarak akselerometreden gelen açı bilgilerini kullanarak motorların hız kontrolünü yapmak şeklinde açıklanabilir. Bu motorların modellenmesi ve Simulink ortamında test edilmesi uygulama aşamasına geçmeden önce büyük kolaylıklar sağlar (Wei, 2013). Diğer bir yandan bu motorun modellenmesi için motor direncinin, armatür endüktansının, elektromotor kuvveti sabitinin ve motor sürtünme katsayılarının bilinmesi gerekir. Gerçek zamanlı çalışan bir motorda bu parametrelerin ölçülmesi bazı testlere tabi tutularak yapılmaktadır. Robotta kullanılan motorların parametreleri tam olarak bilinmediğinden dolayı bu bölümde farklı parametrelere sahip bir DC motorun modellenmesi ve hız kontrolü yapılmıştır. Bu motor parametreleri (Namazov, 2010) çalışmasından alınmıştır. Bu çalışmada motorların konum kontrolü ile ilgili çalışmalar yapıldığından dolayı hız kontrolünün yapılması bir tekrar teşkil etmemektedir. Aşağıdaki şekilde bir DA motorun bölüm 3.1 de verilen matematiksel ifadelerden yararlanılarak Simulink ortamında modeli oluşturulmuştur. Bu modelin (Namazov, 2010) çalışmasından alınan değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.1. Motor parametreleri

Parametre Adı	Parametre Değeri	Parametre Birimi
R_a -Armatür direnci	11.2	Ω
L_a -Armatür endüktansı	0.1215	H
J_m -Rotor ataleti	0.02215	kgm^2
B_m -Viskos sürtünme katsayısı	0.002953	Nms / rad
K_b -Ters elektromotor kuvveti	1.28	Vs / rad
K_T - Tork sabiti	0.5	Nm / A

Çizelge 5.2. Kullanılan parametre değerleri

Parametreler	Parametre Değeri
K_P	0.02087
K_I	0.2596
K_D	0.0001077
N	1528

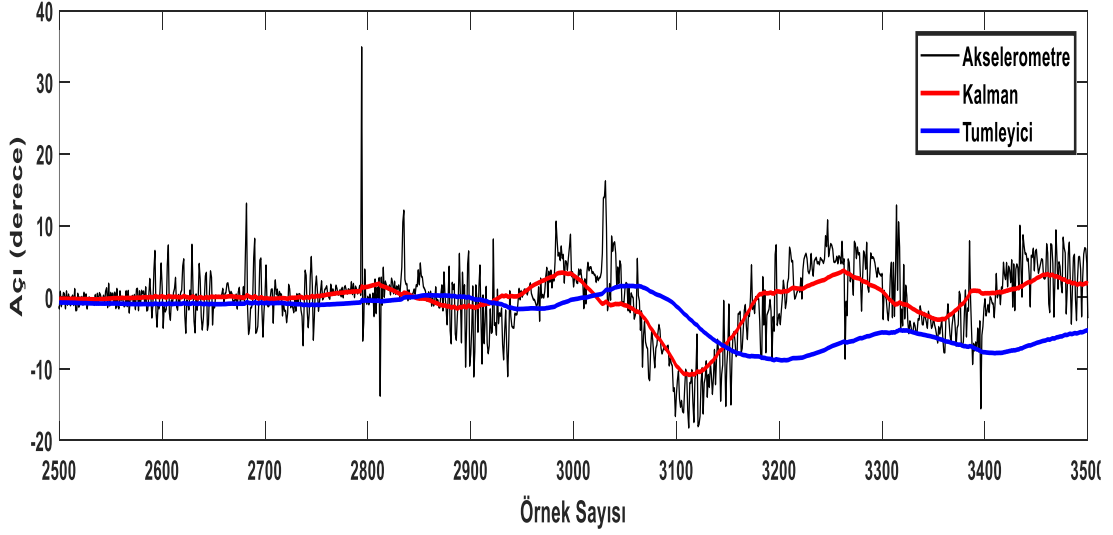


Şekil 5.3. Doğru akım motor hız kontrolü çıkışı grafiği

Bu simülasyon çalışmasında bir doğru akım motorunun matematiksel modeli oluşturularak PID kontrol yardımı ile istenen set değeri yakalanmaya çalışılmıştır.

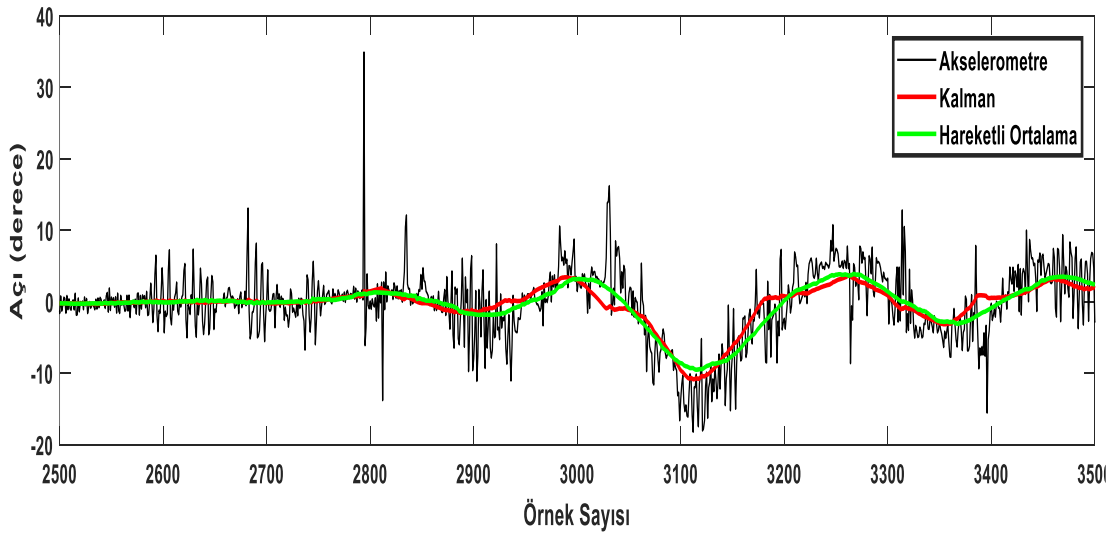
5.2. Filtre Performanslarının İncelenmesi

Bu bölümde filtreleme başlığı altında bahsedilen Tümlayıcı Filtre, Hareketli Ortalamalar Filtresi ve Kalman Filtresinin performans değerlendirmeleri grafikler yardımı ile yapılmıştır. Filtrelerin performansları ikili kombinasyonlar yardımı ile nedenleri ile birlikte açıklanmıştır. Kalman filtresinin diğer filtrelere karşı daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Öncelikle Tümlayıcı Filtre ve Kalman Filtresini karşılaştıralım. Tümlayıcı filtre ani tepkilere karşı iyi bir yanıt veremeyen bir filtredir. Bu durumu aşağıdaki şekilden görebiliriz. Kalman Filtresi ise çok iyi bir performansla Akselerometre işaretlerini takip etmiştir. 15 derecelere kadar eğilen robot için Kalman Filtresi çıktılarını kullanarak rahatlıkla denge sağlanabilirken, Tümlayıcı Filtre çıktıları ile dengeni sağlanması mümkün değildir.



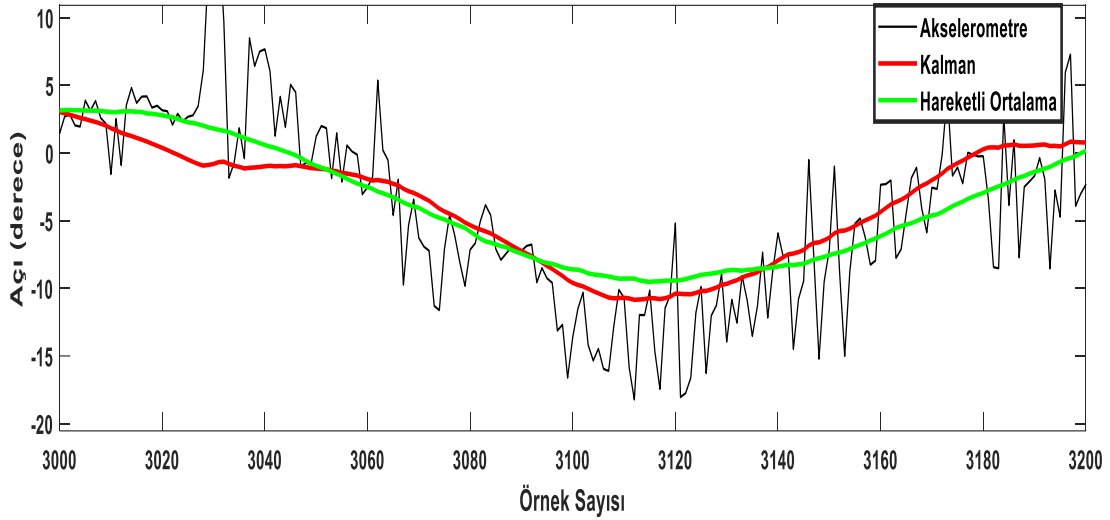
Şekil 5.4. Kalman filtresi ve tümleyici filtre çıkış işaretlerinin karşılaştırılması

Bir diğer filtre karşılaştırmasında ise Tümleyici Filtreye göre daha başarılı sonuçlar veren Hareketli Ortalamalar Filtresi ile Kalman Filtresinin performansları incelenmiştir. İnceleme sonunda Kalman Filtresinin daha az titreşim ve kaymaya sahip olmasından dolayı diğer filtreye üstünlük kurduğu görülmüştür. Kalman filtresine oranla daha titreşimli sonuçlar vere Hareketli Ortalamalar Filtresi çıktısı ile yapılan kontrolde devrenin yerleşme süresinin çok fazla olduğu görülmüştür. Bu istenmeyen bir durum olduğundan dolayı kontrol işlemi Kalman Filtresinin çıktılarını ile başarılı bir şekilde sağlanmıştır.



Şekil 5.5. Kalman filtresi ve hareketli ortalamalar filtresi çıkış işaretlerinin karşılaştırılması

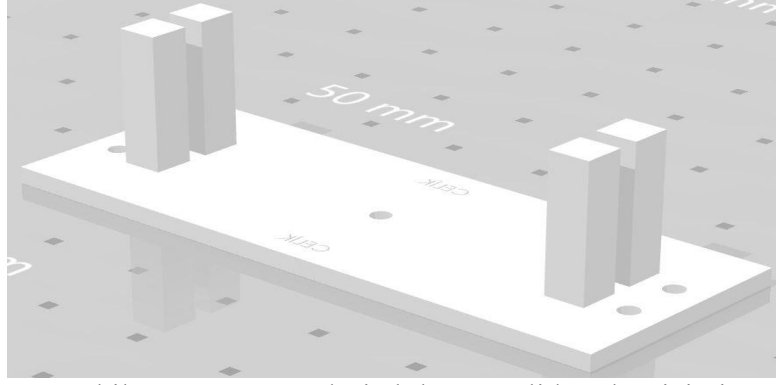
Yukarıdaki grafiğe biraz daha yakından bakıldığında Hareketli Ortalama filtre çıktısının biraz daha titreşimli ve bazı ani işaret değişimlerine duyarsız kaldığı net bir şekilde görülür.



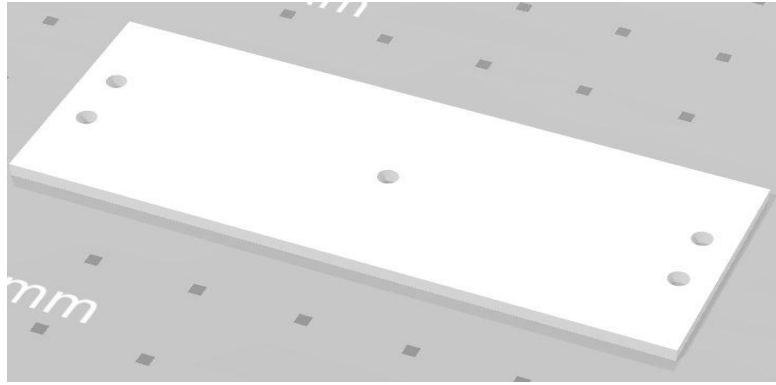
Şekil 5.6. Kalman filtresi ve hareketli ortalamalar filtre çıkış işaretlerinin karşılaştırılması

5.3. Mekanik Tasarım

Üzerinde çalışılan projenin denge robotu olması sebebi ile robot düzeneği büyük önem arz etmektedir. Robot gövdesinin homojen bir yapıya sahip olması ve üzerine yerleştirilen kartların ve sensörlerin robot gövdesinin ağırlık merkezini robot gövdesi içerisinde tutacak şekilde konumlandırılması büyük önem arz etmektedir. Mekanik tasarım için 3 boyutlu yazıcı yardımı ile ölçüleri 16 cm genişliğinde, 6 cm boyunda ve 0,5 cm kalınlıkta iki plaka ve 1 cm² tabana sahip 4 cm uzunluğundaki 4 tane kolon kullanılmıştır. İki katlı bir yapıya sahip olan robot düzeneği iki ayrı parçadan oluşturulmuştur. Bu parçalar aşağıdaki şekillerde ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu parçaların birbirine yapıştırılması silikon yardımı ile yapılmıştır. SOLİDWORKS üzerinden tasarlanan parçalar 3 boyutlu yazıcı yardımı ile oluşturulmuştur. Gövdeye sabitlenen motorlara tekerlekler bağlanarak basit bir robot düzeneği oluşturulmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise gövde üzerine yerleştirilecek diğer elemanların simetrik bir şekilde yerleştirilerek dengenin sağlanmasına yardımcı olmaktır. Bu kısımda piller karşılıklı olarak simetrik bir şekilde yerleştirilmiştir (Li, 2007). Arduino kartı ile motor sürücü kartları da simetrik olacak şekilde yan yana konumlandırılmıştır.

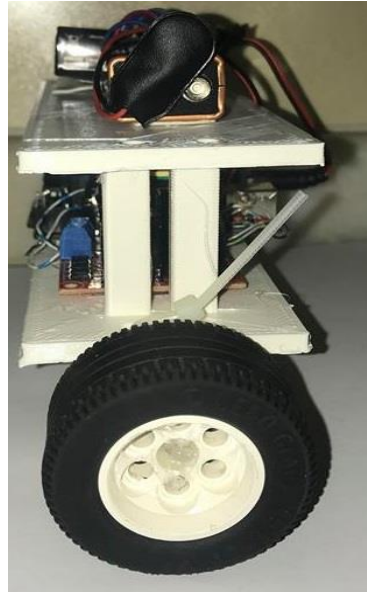


Şekil 5.7 Robot gövdesi alt kısım solidworks çizimi



Şekil 5.8. Robot gövdesi üst kısım solidworks çizimi

Yukarıdaki plakaların birleştirilmesi sonucu robot gövde kısmı ortaya çıkarılmıştır. Gövde ye motorların ve donanımların sabitlenmesi sonucu asıl robotun inşası tamamlanmıştır.



Şekil 5.9. Robot yan görünüm

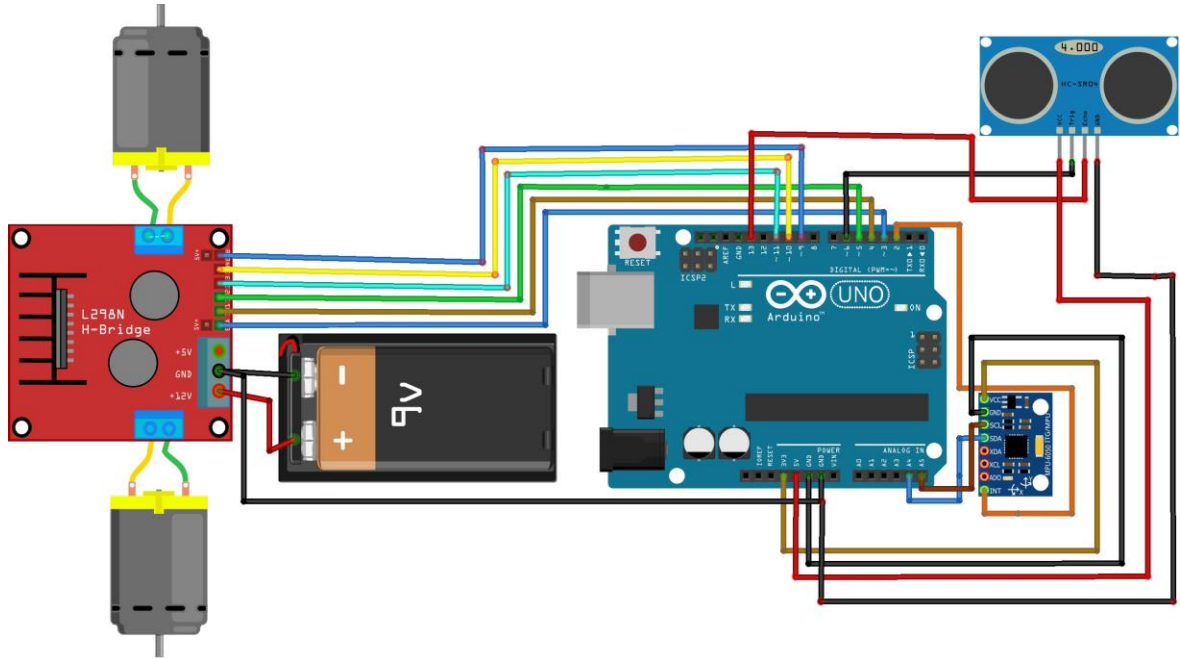


Şekil 5.10. Robot üst görünüm

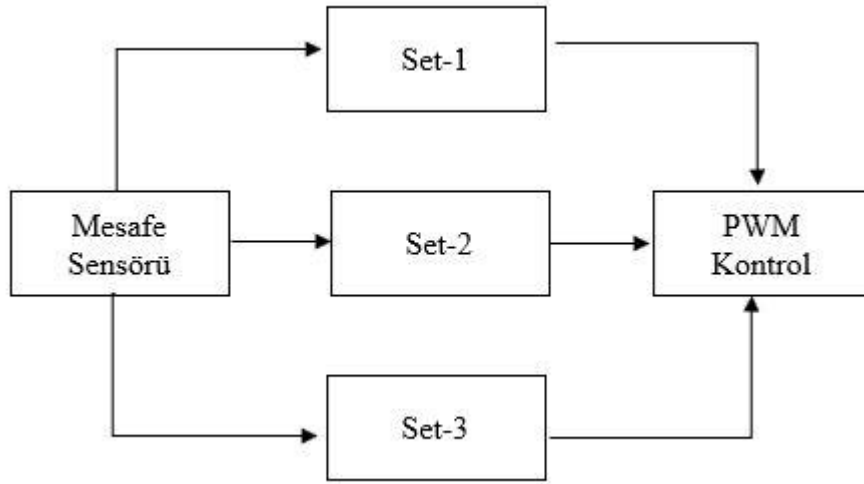
5.4. Elektriksel Tasarım

Şekilde görülen tasarım robotun elektriksel bağlantılarına aittir. Bu tasarım için FRITZING isimli elektrik devre tasarım programı kullanılmıştır. Besleme kabloları kırmızı renkte ve topraklama kablolarının siyah renkte kullanılmasına özen gösterilmiştir. Tasarımda 9 Voltluk 1 adet pil, 2 adet DC motor, 1 adet motor sürücü devresi, 1 adet MPU6050 ivme sensörü, 1 adet mesafe sensörü ve bir adet Arduino Uno işlemci kartı kullanılmıştır. Tasarımın sağlıklı olarak çalışabilmesi için kullanılan sensör ve mikroişlemci kartının topraklamaları ortak olmalıdır. Motorların giriş uçları motor sürücüsünün 1 ve 2 numaralı çıkışlarından alınmıştır. Motor sürücüsünün girişleri ENA, IN1, IN2, ENB, IN3, IN4, 12V ve GND uçlarıdır. Besleme ve toprak uçları direkt pilden alınmıştır. Buradaki ENA ve ENB uçları motorların PWM işaret uçlarıdır. IN1, IN2, IN3, IN4 ise motorların besleme uçlarıdır ve motor dönüş yönüne göre HIGH, LOW olarak seçilmektedirler. Bahsedilen devre elemanları dışında robot gövdesinde iki tane sensör bulunmaktadır. Birinci sensör açı ve ivme sensörüdür. Anlık olarak açı ölçümü yapıp dijital işarete dönüştürmeye yarar. Bu sensör robotun gövdesine sabitlenmiştir ve gövdenin açısı hakkında bize bilgi vermektedir. İkinci sensörümüz ise mesafe sensörüdür. Bu sensör 200 cm'ye kadar cisim algılayarak ne kadar uzakta olduğu hakkında anlık olarak bilgi verir. Bu sensörün kullanım amacı robotun önüne çıkan engeli haber vermesidir. Sağlıklı bir denge ve takip sağlanabilmesi için bütün donanım elemanlarının sağlıklı ve sorunsuz çalışması gerekmektedir. Elektriksel tasarımda kullanılan dişi ve erkek kablolar uzunlukları ile doğru orantılı olacak şekilde gürültü oluşturmaktadırlar. Bu gürültüler

sağlıklı bir denge ve takip için problem oluşturmaktadırlar. Açık sensörünün hali hazırda fazla gürültü oluşturması Kalman filtreleme yardımı ile çözülmüştür ancak kablolardan kaynaklı oluşan gürültüler için baskı devrenin oluşturulması gerekmektedir. Baskı devrenin oluşturulması sonrası robot üzerinde kullanılan kablo miktarı en aza indirgenerek olması muhtemel gürültülerinde önüne geçilmiş olacaktır.



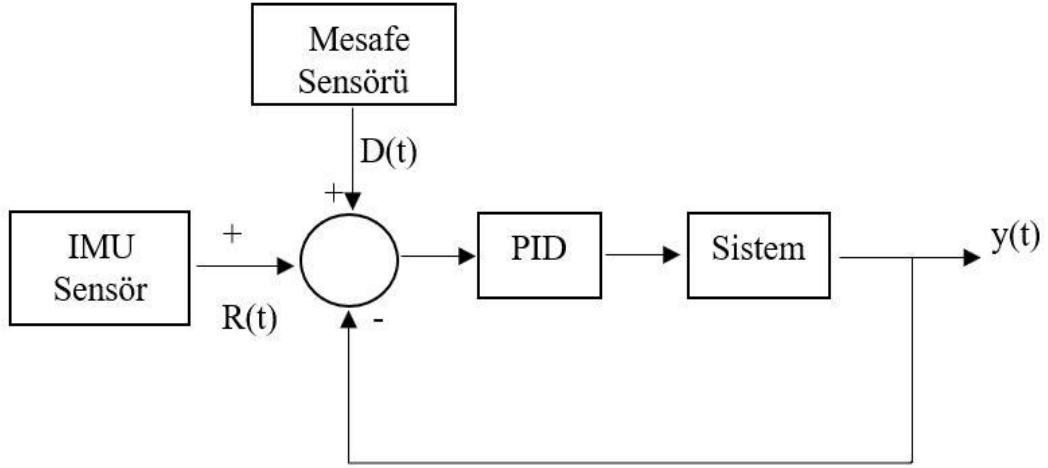
Şekil 5.11. Robotun donanımlarının elektriksel bağlantı şeması



Şekil 5.12. Mesafe sensörü set değeri ilişkisi

Şekil 5.12' de verilen blok diyagram robotun cisme olan uzaklığına bağlı olarak 3 farklı set değeri ayarlar. Robotun cisme yaklaşması için Set-1 değeri 3 derece olarak seçilir ve robot ileri yönde hareket eder. Robotun cisimden uzaklaşması için Set-3 değeri -3

olarak seçilir ve robot geriye doğru bir hareket yapar. Robotun konumunu koruması için Set-2 değeri 0 olarak seçilir ve robot dengesini korur.



Şekil 5.13. Denge sistemi kontrol blok diyagramı

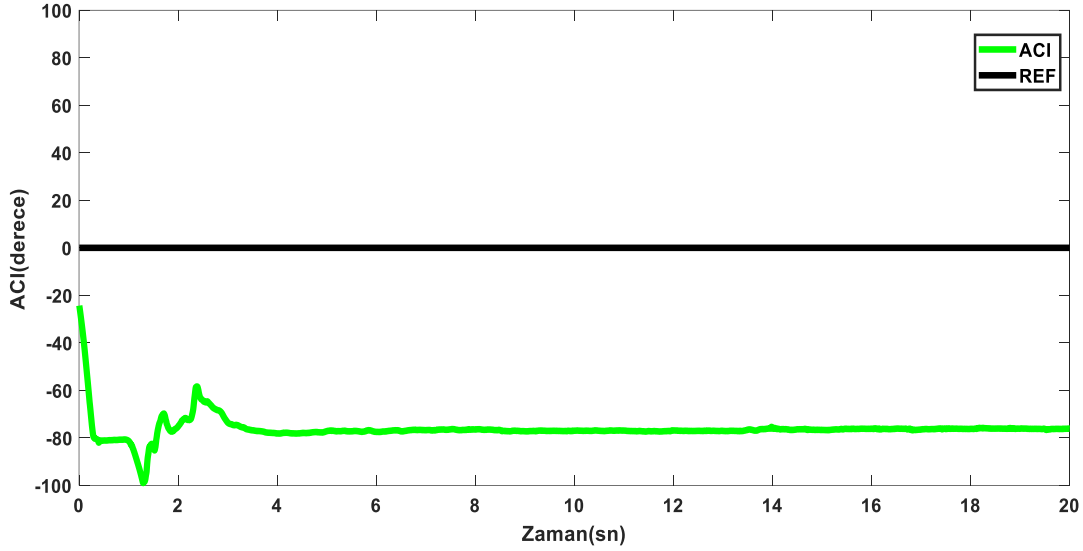
Şekil 5.13’ de verilen kapalı çevrim blok diyagram sistemin donanımlarının veri akış yönünü göstermektedir. IMU sensörü gerekli açı bilgisini aktarırken mesafe sensörü set değeri seçiminde kullanılır. Ayrıca PID kontrolör yardımı ile sistem kontrol edilir. Bu işlemlerin ardından gerekli PWM değerleri motor sürücüsü aracılığı ile motorlara aktarılır ve denge sağlanır.

5.5. Deneysel Çalışmalar

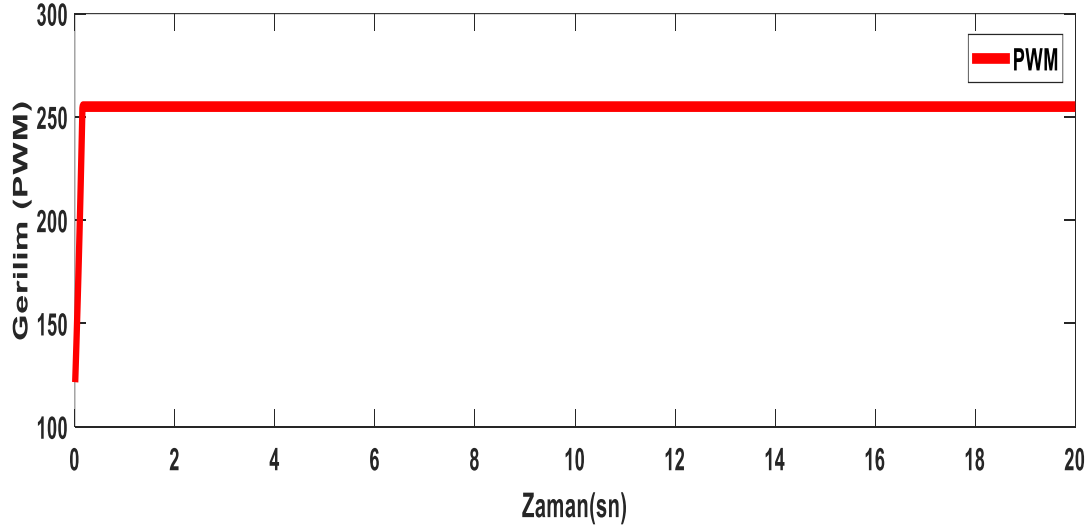
Robotun dengede kalması için gerekli PID parametreleri deneme yanılma yolu ile bulunmuştur. İlk deneyimizde robot 20 saniye süresince çalıştırılmış ve 10. Saniye bir kuvvete maruz kalmıştır. Bu kuvvet sonucu sarsılan robotun tekrardan denge konumuna gelene kadar geçen süredeki açı ve PWM değerlerinin nasıl değiştikleri grafikler yardımı ile gösterilmiştir. Doğru değerlerin bulunabilmesi için önce sadece oransal kontrolör kullanılarak referans değeri yakalanmaya çalışılmıştır.

İlk durumda robota küçük bir oransal kazanç ($K_P=5$) sağlanmıştır. Diğer PID parametreleri sıfır olarak alınmıştır. Bu durumda robot dengeyi sağlayacak PWM değerini üretemeyerek ve yükselme süresinin gerekenden uzun olması sebebi ile robot devrilmiştir. Devrildikten sonra tekerleklerin yerle bağlantısı kesilmiştir. Sensör değerinin yüksek olması sebebi ile motorların PWM değerleri de oldukça yüksektir. Ancak yükselme süresinin çok uzun olması ve robotun devrilmesine engel olamamıştır. Aşağıdaki şekilde

robotun devrildiği ve açı sensörünün 80 derece civarlarında sabitlendiği görülmektedir. 100 derece civarlarında oluşan açı sapması ise devrilmenin etkisi ile sensör de oluşan anlık bir durumdur. Bu durum sonucunda oluşan açı grafiği Şekil 5.14’de PWM grafiği ise Şekil 5.15’ de verilmiştir.



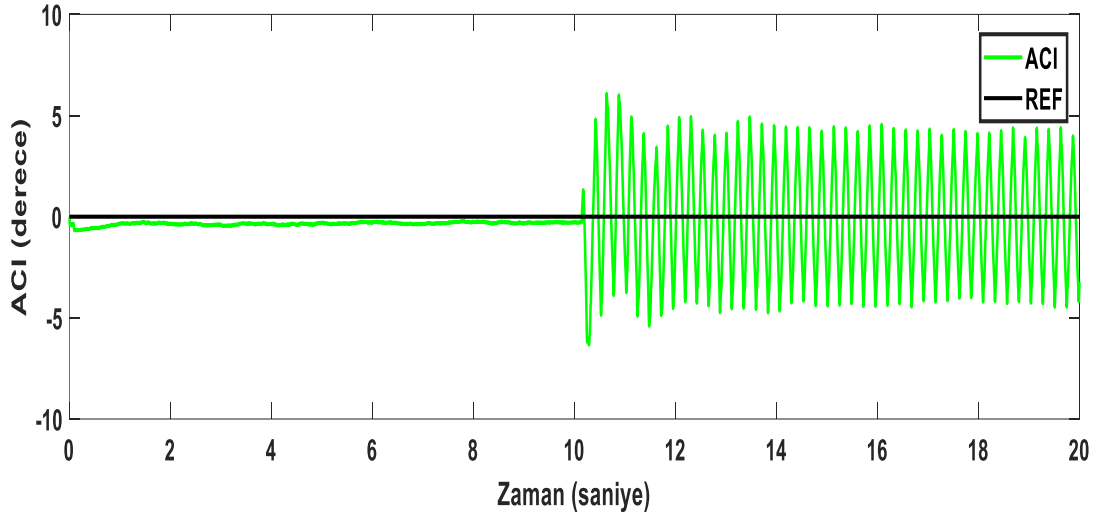
Şekil 5.14. Devrilen robot açı grafiği



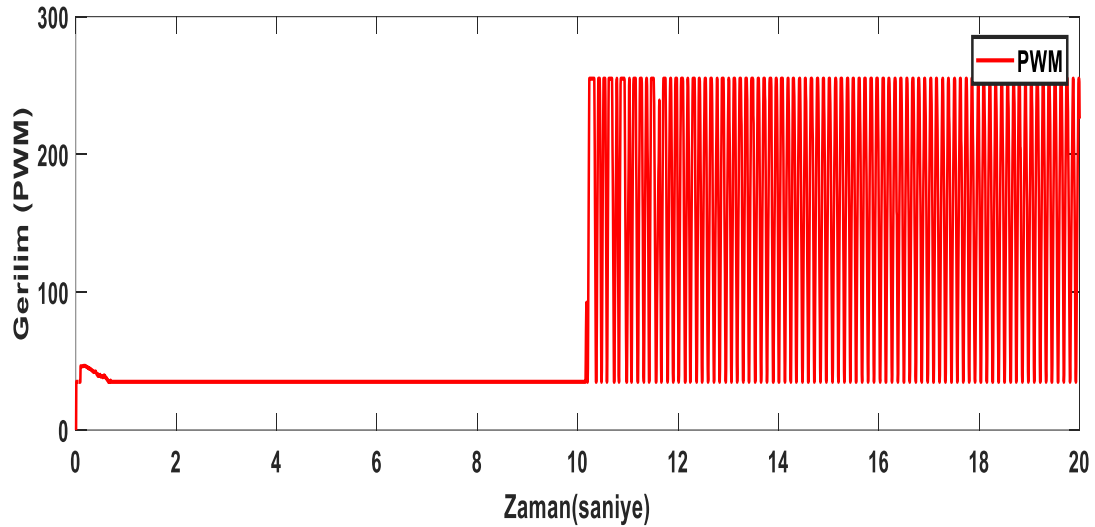
Şekil 5.15. Devrilen robot PWM grafiği

Bir önceki deneyde yükselme süresinin fazla olması ve düşüşe karşı robot motorlarının tepkisinin geç olması devrilme ile sonuçlanmıştı. Bu deneyde ise oransal kazanç ($K_P=70$) değerine ayarlanmıştır. Bu ayarlama sonucunda hareketine denge halinde başlayan robot dengesini 10. saniyeye kadar korumuştur. 10. saniyede bir kuvvete maruz kalan robot seri aşımına başlamıştır. Bu durum Çizelge 4.1. de verilen fiziksel değişimler ile uyumaktadır. K_P değerinin artırılması yükselme süresini olumlu etkilerken,

titreşimlere sebebiyet vermiştir. Ayrıca sistemde bir kalıcı durum hatası oluşmuştur. Bu durum Şekil 5.16’ da gözlemlenmektedir. Şekil 5.17’ de ise PWM grafiği bulunmaktadır. Bu grafik incelendiğinde robotun dengeye gelebilmek için yüksek bir güç harcansa da denge açısının yakalanamadığı görülmüştür.



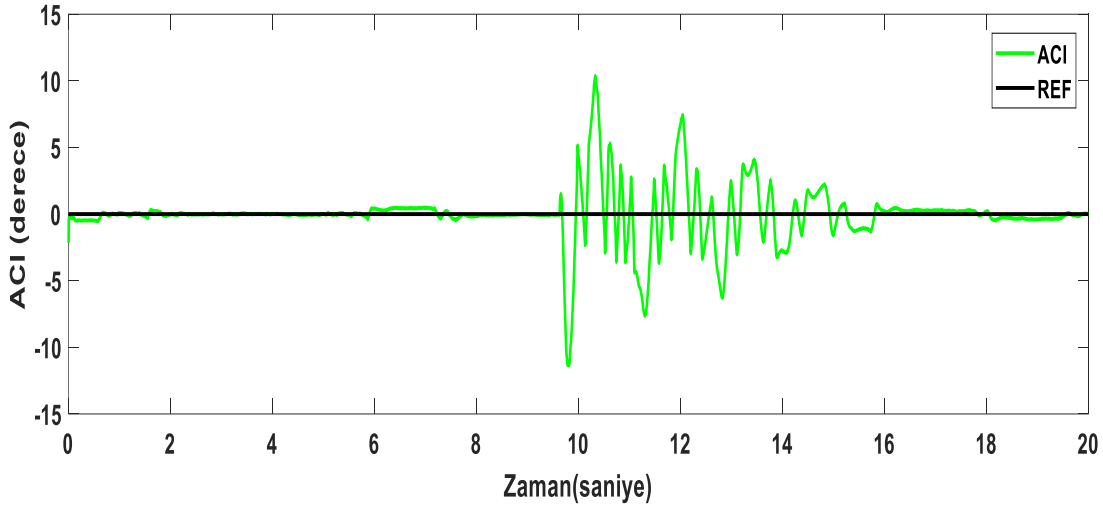
Şekil 5.16. Oransal sabit (P) aç grafiği



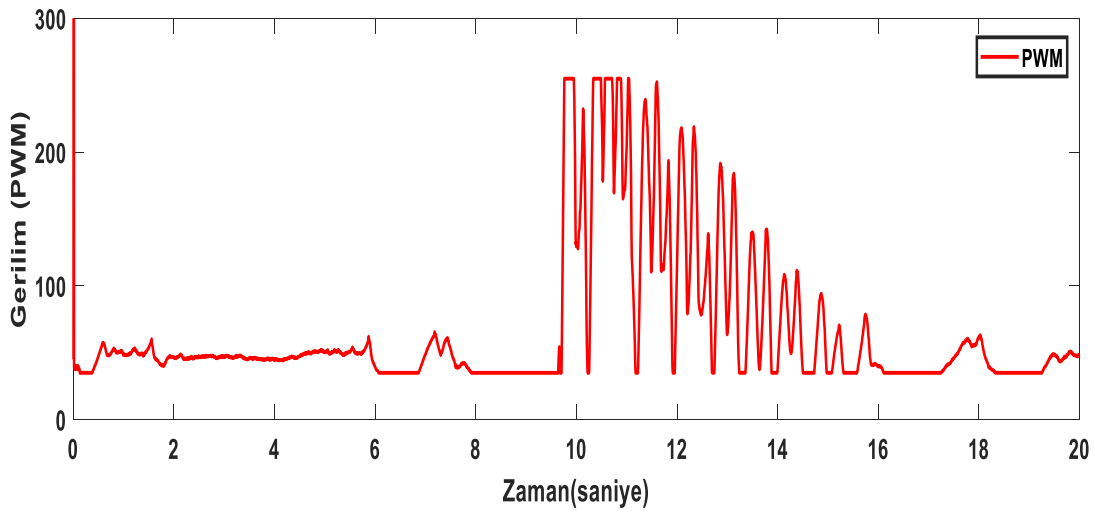
Şekil 5.17. Oransal sabit (P) PWM grafiği

Oransal sabitin tek başına kullanıldığı durumda yükselme süresinin olumlu etkilendiği ve aşımaların olumsuz etkilendiği görülmüştür. Ayrıca sistemde belirli bir kalıcı durum hatası da gözlemlenmiştir. Bu durumun iyileştirilmesi için oransal sabite ek olarak integral sabiti kullanılmıştır. ($K_P=70$, $K_I= 3$) Çizelge 4.1. incelendiğinde integral sabitinin artırılması yükselme süresini ve kalıcı durum hatasını olumlu etkilerken sistemin yerleşme süresi ve aşımalarına olumsuz etkiye bulunur. Bu durum aşağıdaki şekilde açık bir şekilde görülmektedir. 10. saniyeye kadar denge açısını koruyan robot 10. saniyede bir kuvvete

maruz kalmıştır. Bu kuvvet sonucunda 10 derecelik bir maksimum aşımına ulaşmıştır ve 18. saniyede denge sağlanmıştır. Yerleşme süresi 8 saniye kadar sürmüştür ve maksimum aşım 10 derecedir. Şekil 5.19’ da bu durum sonucu motorlara verilen PWM değerleri gösterilmiştir. PI kontrolör kullanılması P kontrolör kullanılmasına karşı aşım, yerleşme süresi ve kalıcı durum hatalarını yok etme gibi birçok üstünlük göstermiştir.



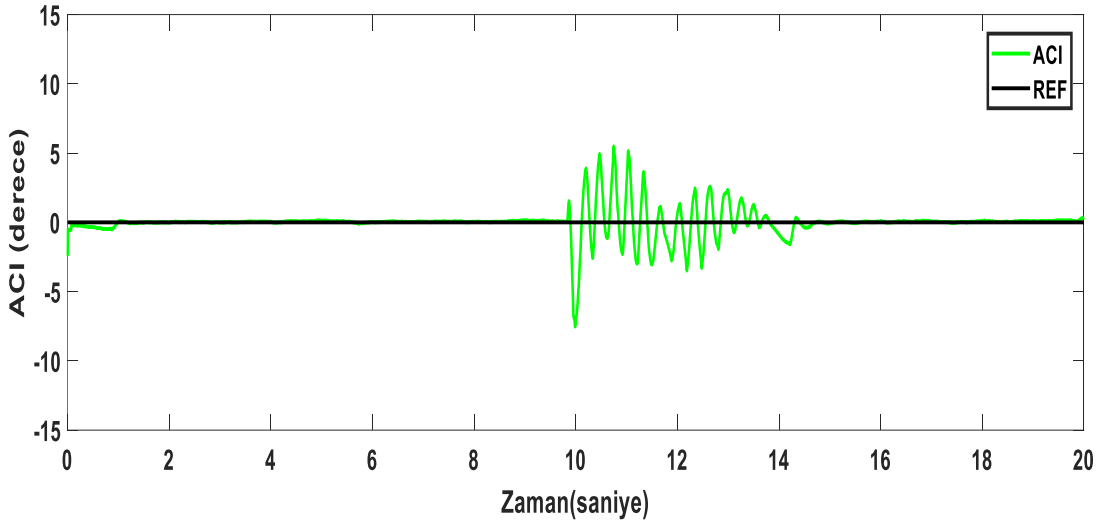
Şekil 5.18. Oransal ve integral sabit (PI) açığı grafiği



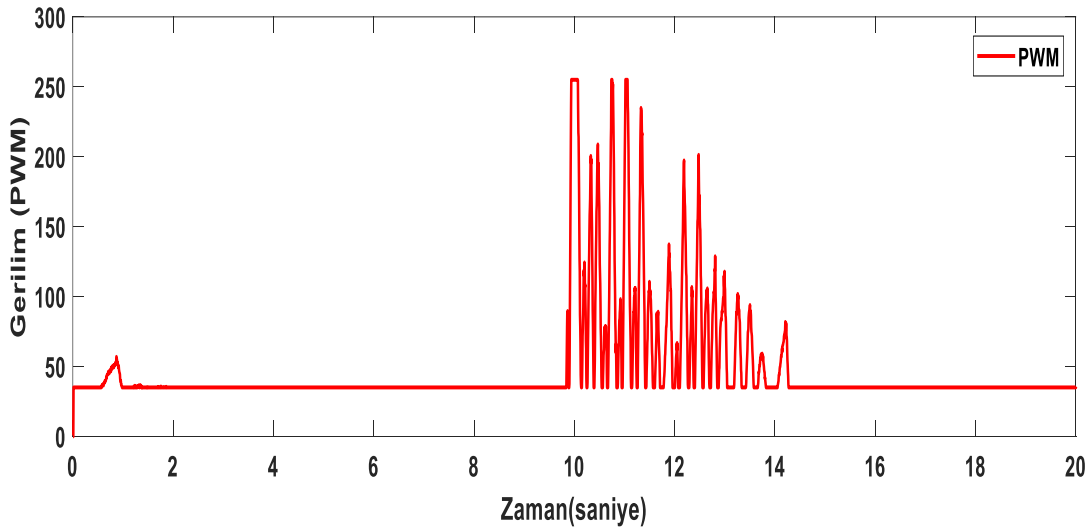
Şekil 5.19. Oransal ve integral sabit (PI) PWM grafiği

Bu kısımda ise sistemin fiziksel parametrelerinin iyileştirilmesi açısından oransal ve integral sabitlerine ek olarak türev sabiti (K_D) de sisteme ilave edilmiştir. Çizelge 4.1. incelendiğinde türev sabitinin sistemdeki aşımları azalttığı ve yerleşme süresini olumlu etkilediği görülmektedir. Yine 10.saniyeye kadar denge açısını koruyan robota 10.saniyede bir kuvvet uygulanmış ve robotun dengesi bozulmuştur. Bu durum sonucunda robot bir önceki deneye göre daha olumlu sonuçlar vermiştir. Şekil 5.20’de sistemdeki aşımların genliklerinin 10’dan 5’e düştüğü ve yerleşme süresinin 18’den 16 ya düştüğü

gözlemlenmiştir. Şekil 5.21’ de bulunan PWM grafiğinde de diğer deneylere göre daha az enerji harcadığı görülmektedir. PID parametrelerinin her birinin ayrı ayrı olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bu son deneyde üç parametrenin de olumlu yönlerinin bir kombinasyonu yapılarak yükselme süresi, aşım, yerleşme süresi ve kalıcı durum hataları iyileştirilmiştir.



Şekil 5.20. PID açığı grafiği



Şekil 5.21. PID PWM grafiği

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında iki tekerlek üzerinde kendini otonom bir şekilde dengeleyen ve üzerine monte edilen bir mesafe sensörü yardımı ile nesne takibi yapan robot tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde önceki kaynaklardan çokça yararlanılarak malzeme seçimi ve yöntem seçimleri yapılmıştır. Motorun mekanik aksamı önceden belirlenen ölçüler dahilinde bilgisayar ortamında tasarım programı yardımı ile oluşturulmuş ve üç boyutlu yazıcı kullanılarak basılmıştır. Bu mekanik tasarım sürecinde önce gövde plaka alanı $19 \times 9 \text{ cm}^2$ olan bir aksan oluşturulup deneysel çalışmaları yapılmıştır. Bu gövdenin eninin 9 cm ve tekerlek çapının 4 cm olması sebebi ile robotun devre açısının 40 derece olduğu gözlemlenmiştir. Bu açı değeri tekrar dengenin sağlanması için az bulunup yeni bir tasarıma geçilmiştir. Yeni tasarımda robotun boyu 16 cm eni ise 6 cm olacak şekilde ayarlanarak devrilme açısı 80 dereceye çıkarılmıştır ayrıca robot gövde kalınlığı da azaltılarak daha hafif bir robot tasarımı yapılmıştır. Bu açı değeri robot bir kuvvete maruz kalsa dahi tekrar dengenin sağlanabilmesi için yeterlidir. Mekanik tasarım donanımların simetrik bir şekilde gövdeye sabitlenmesi sonucunda tamamlanmıştır. Elektriksel olarak motorlar, motor sürücüsü, mikrodenetleyici kart ve sensörlerin bağlantısı tamamlanmıştır. Bu aşamalardan sonra robotun programlama aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada IMU sensörünün çok gürültülü çalıştığı gerçeği ile karşılaşılıp, gürültülerin bastırılması için bir filtreye ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır. Literatür çalışmalarında kullanılan tümleyici filtre, hareketli ortalamalar filtresi ve Kalman filtresi başarımları simülasyonlar ve gerçek zamanlı testler yardımı ile gerçekleştirilmiş ve en sağlıklı sonuçların Kalman filtresi tarafından üretildiği görülmüştür. Başarılı bir açı işareti elde ettikten sonra robotun denge kontrolü aşamasına geçilmiştir. Bu süreçte yine literatür çalışmalarına bakılarak PID, LKR ve Bulanık mantık kontroller karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar dikkate alınarak diğer yöntemlere göre biraz daha ilkel olsa da kolay uygulanabilir olması sebebi ile PID kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Robotun PID katsayıları deneme yanılma yöntemi ile ayarlanmıştır.

Çizelge 6.1. Denge kontrolü için kullanılan PID parametreleri

Parametreler	Parametre Değeri
K_P	70
K_I	3
K_D	50

Bu süreçte önce yeterli bir yükselme zamanının sağlanması ve referans değerini yakalayacak bir işaretin üretilebilmesi için oransal sabit ayarlanmıştır. Oransal sabitin tek başına yeterli olmadığı ve aşımara sebep olduğu görülünce sisteme integral sabiti eklenmiş ve durum iyileştirilmiştir. Son olarak sistemin yerleşme süresini daha da iyileştirmek ve aşımları azaltmak amacı ile sisteme türev sabiti de dahil edilmiştir. İşaret filtreleme ve kontrol aşamaları tamamlandıktan sonra sisteme mesafe sensörü eklenerek 20 cm kadar yakın bir cisim algıladığında cisme doğru ilerleyen ve 10 cm kadar yaklaştığı zaman duran bir tasarım sağlanmıştır. Bütün bu çalışmaların sonucunda başarılı bir şekilde kendini dengeleyebilen bir robot tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu tasarımda deneysel sonuçlara bakılarak daha iyi bir denge robotu tasarımı yapılabilmesi için mekanik tasarımın büyük önem arz ettiği görülmüştür. Robotun eninin teker çapı kadar küçük olması durumu devrilme açısını artırarak denge açısının yakalanması konusunda daha fazla açı ve zaman kazandırır. Buna ek olarak robot ağırlığının mümkün olduğunca az olması sistemin yerleşme süresini olumlu etkilediği görülmüştür. Daha ağır tasarımlar için daha güçlü motorların tercih edilmesi dengenin daha kolay bir şekilde sağlanmasını sağlayacaktır. Bu tezde ileri ve geri giderek mesafe sensörünün algıladığı cisim takip edilmiştir. İleriki çalışmalarda bu tasarımda tekerleklerin dönüş hızında bir fark oluşturularak sağa ve sola dönen bir robot tasarımı yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abbasnejad, E., & Harifi, A. Design of a Sliding Mode Controller for Two-Wheeled Balancing Robot. *LQR*, 11, 7.
- Acar, C., 2008, A Robust Control of Two-Wheeled Mobile Manipulator with Underactuated Joint by Nonlinear Backstepping Method, M.Sc. Thesis, Keio University Graduate School of Science and Technology School of Integrated Design Engineering, Japan.
- Altun, M., Çelik, Y., Güneş, M., 2017. Investigation of The Success of Particle Swarm Optimization Based PID, Classic PID and Fuzzy Type Inspection Methods in Speed Control of DC Motor. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 158-167.
- Akyol, S., Alataş, B., 2012, Güncel Sürü Zekâsı Optimizasyon Algoritmaları, *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Dergisi* 1 , 36-50.
- Altaş, H., 1999, Bulanık Mantık:Bulanık Denetim, Enerji, *Elektromekanik-3e*, Eylül, Sayı 64, Sayfalar:76-81, Bilesim Yayıncılık A.Ş., İstanbul.
- Anderson, B. D. O., Moore, J. B., 1989, Optimal Control – Linear Quadratic Methods, Prentice Hall, ISBN: 0 – 13 – 638651 – 2.
- Arvidsson, M., & Karlsson, J., 2012. Design, construction and verification of a self-balancing vehicle.
- Azizi, A., Nourisola, H., Sadeghi-Emamgholi, A., & Naderisafa, F., 2017. Adaptive PSO-LS-wavelet H_{∞} control for two-wheeled self-balancing scooter. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(5), 2126-2137.
- Balasubramanian, S., & Lathiff, M. N., 2011. Self balancing robot.
- Bature, A. A., Buyamin, S., Ahmad, M. N., & Muhammad, M., 2014. A comparison of controllers for balancing two wheeled inverted pendulum robot. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 14(3), 62-68.
- Bugeja, M., 2003, Non-Linear Swing-Up and Stabilizing Control of an Inverted Pendulum System, EUROCON Ljubljana, Slovenia.
- Burkert, M., Groll, T., Lai, T., McCoy, T. and Smith, D., 2004, Segway Design Project, Project Report, Grand Valley State University The Padnos School of Engineering, USA.
- Butler, L. J. and Bright, G., 2008, Feedback Control of a Self-balancing Materials Handling Robot, 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, 17–20 December 2008, pp. 274-278, Hanoi, Vietnam.
- Cahyono, B. N., & Setiyono, B., 2013. Self-Balancing Scooter Menggunakan Metode Kendali Proporsional Integral Derivatif. *TRANSMISI*, 15(4), 164-169.

- Castro, A., 2012. Modeling and dynamic analysis of a two-wheeled inverted-pendulum. Georgia Institute of Technology.
- Chee, Y. O. and Abidin, M. S. Z., 2006, Design and Development of Two Wheeled Autonomous Balancing Robot, Student Conference on Research and Development, June 27-28 2006, pp. 169-172, Shah Alam, Selangor, Malaysia.
- Chi, G., Hausbach, J. and Hunter, B., 2005, Segbot, Senior Design Project, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Chia-Hong, Chen, Jean, J.-H., Dao-Xiang, Xu, 2011, Application of fuzzy control for self-balancing two-wheel vehicle, *Machine Learning and Cybernetics*.
- Chih, Hui C.; Chun, Chieh C., 2010, Wheeled inverted pendulum control based on model-free fuzzy control strategy, SICE Annual Conference.
- Chiu, C. H. and Peng, Y. F., 2006, "Design and Implement of the Self-Dynamic Controller for Two-Wheel Transporter", 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, July 16-21 2006, pp. 480-483, Vancouver, BC, Canada.
- Coşkun, İ., & Terzioğlu, H., 2007. Hız Performans Eğrisi Kullanılarak Kazanç (PID) Parametrelerinin Belirlenmesi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 6(3), 180-205.
- Choi, D. and Oh, J. H., 2008, Human-friendly Motion Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Reduced-order Disturbance Observer, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 19-23 2008, pp. 2521-2526, Pasadena, CA, USA.
- Cong, H. N., Kien, N., V. and Du, H., D., 2013, Applying order reduction model algorithm for balancing control problems of two-wheeled mobile robot, 8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Melbourne, VIC, 1302 – 1307.
- Cornman, A., & Mei, D. Extended Kalman Filtering. In: Stanford University.
- Çayıroğlu, İ., 2012. Kalman Filtresi ve Programlama.
- Ding, Y., Gafford, J., & Kunio, M., 2012. Modeling, Simulation and Fabrication of a Balancing Robot. Harvard University, Massachusetts Institute of Technology, 151.
- Enginoğlu, O., 2012. Design and control of balancing robot. DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Fakharian, A., Gustafsson, T., & Mehrfam, M., 2011. Adaptive Kalman filtering based navigation: An IMU/GPS integration approach. Paper presented at the Networking, Sensing and Control (ICNSC).
- Gani, A., Kılıç, E., Keçecioglu, Ö. F., Açıkgoz, H., & Şekkeli, M., 2016. Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Karışım Tankinin Seviye Ve Sicaklik Denetimi İçin PID Ve Bulanik Mantik Denetleyici Tasarimi. *Engineer & the Machinery Magazine*(675).
- Gocmen, A., 2011. Design of two wheeled electric vehicle. PhD diss., Atılım University.

- Goher, K. M. and Tokhi, M. O., 2010, Development, Modeling and Control of a Novel Design of Two-Wheeled Machines, *Cyber Journals Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Robotics and Control (JSRC)*, December Edition.
- Goher, K.M., and Tokhi, M.O., 2010, Modeling and Control of a Two Wheeled Machine:A Genetic Algorithm-Based Optimization, *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Robotics and Control (JSRC)*, December Edition.
- Goher, K.M., and Tokhi, M.O., 2011, Dynamic modeling and control of a two wheeled Robotic vehicle with a virtual payload, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, No. 3, March 2011.
- Gonzalez, C., Alvarado, I., & La Peña, D. M., 2017. Low cost two-wheels self-balancing robot for control education. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 9174-9179.
- Grasser, F., Arrigo, A., Colombi, S., Rufer, A.C., 2002, "JOE: a mobile, inverted pendulum", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 49, Issue 1, Feb 2002 Page(s):107 – 114.
- Hellman, H., & Sunnerman, H., 2015. Two-Wheeled Self-Balancing Robot: Design and control based on the concept of an inverted pendulum.
- Ho, K. C. R., 2005, Balancing Wheeled Robot, Research Project, University of Southern Queensland, Australia.
- Hu, J. S., Tsai, M. C., Hu, F. R. and Hori, Y., 2010, Robust Control For Coaxial Two-Wheeled Electric Vehicle, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 172-180.
- Hu, T., Zhang, H., Dai, X., Xai, X., Liu, R. and Qiu, B., 2007, Design and Implementation of Self-Balancing Coaxial Two Wheel Robot Based on HSIC, *Proceeding of SPIE*, Volume 6794, 6794H-1-9.
- Huang, C. N., 2010, The Development of Self-Balancing Controller for One-Wheeled Vehicles, *Scientific Research Journals of Engineering*, pp.212-219.
- Jean, J.-H., & Wang, C.-K., 2009. Design and implementation of a balancing controller for two-wheeled vehicles using a cost-effective MCU. Paper presented at the Machine Learning and Cybernetics, 2009 International Conference on.
- Jeong, S. and Takahashi, T., 2007, Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Inverted Mobile, Standing, and Sitting Motions, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct 29 - Nov 2 2007, pp. 1932-1937, San Diego, CA, USA.
- Ji, C.W., Lei, F., Kin, K., 1997, Fuzzy logic controller for an inverted pendulum system, *ICIPS'97, 1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems*, Volume 1, pp. 185 - 189.

- Jian-Xin Xu, Tong Heng Lee, 2014, Design and Implementation of Integral Sliding- Mode Control on an Underactuated Two-Wheeled Mobile Robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 7.
- Junfeng, W., Wanying, Z., 2011, Design of Fuzzy Logic Controller for Two-wheeled Self-balancing Robot, The 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST), 1266 – 1270.
- Junfeng, W., Wanying, Z., and Shengda, W., 2012, A Two-Wheeled Self-Balancing Robot with the Fuzzy PD Control Method, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering* Volume, Article ID 469491.
- Junfeng, W., Wanying, Z., 2011, Design of fuzzy logic controller for two-wheeled selfbalancing robot, Strategic Technology (IFOST).
- Juang, H.-S., & Lurrr, K.-Y., 2013. Design and control of a two-wheel self-balancing robot using the arduino microcontroller board. Paper presented at the Control and Automation (ICCA), 2013 10th IEEE International Conference on.
- Junoh, S. A., 2015. Two-wheeled balancing robot controller designed using PID. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia,
- Kadis, A., Caldecott, D., Edwards, A., Jerbic, M., Madigan, R., Haynes, M., Prime, Z., 2010. Modelling, simulation and control of an electric unicycle. Paper presented at the Australasian Conference on Robotics & Automation.
- Kao, W.-F., Hsu, C.-F., & Lee, T.-T., 2017. Intelligent control for a dynamically stable two-wheel mobile manipulator. Paper presented at the Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (IFSA-SCIS), 2017 Joint 17th World Congress of International.
- Kececioglu, F., Şekkelı, M., Gunes, M., 2013. Lineer Kuadratik Regülatör (LKR) ile Hidrolik Türbinin Optimal Kontrolü, Türkiye Otomatik Kontrol Sempozyumu (TOK2013), Malatya, Türkiye.
- Li, J., Gao, X., Huang, Q., Du, Q. and Duan, X., 2007, Mechanical Design and Dynamic Modeling of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, August 18 – 21 2007, pp. 1614-1619, Jinan, China.
- Lin, S.C., Tsai, C.C and Huang, H.C., 2009, Nonlinear Adaptive Sliding-Mode Control Design for Two-Wheeled Human Transportation Vehicle, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 2009, pp.1965-1970, San Antonio, TX, USA.
- Lin, S.C., Tsai, C.C. and Lou, W.L., 2007, Adaptive Neural Network Control of a Selfbalancing Two-wheeled Scooter, The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Nov. 2007, pp. 868-873, Taipei, Taiwan.

- Lopes, T. C., Sikora, C. G., Molina, R. G., Schibelbain, D., Rodrigues, L. C. A., & Magatão, L., 2017. Balancing a robotic spot welding manufacturing line: An industrial case study. *European Journal of Operational Research*, 263(3), 1033-1048.
- Maddukuri, S. P. K., & Srikanth, B., 2015. Design and Fabrication of I-Cycle. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 3(5), 359-364.
- Mamdani, E.H. and Assilian, S., 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *Int. J. Man-Machine Studies* 7, pp. 1-13.
- Mamdani, E.H., 1976, Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers, *Int. J. Man-Machine Studies*, 8, pp.669-678.
- Mamdani, E.H., 1974, Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, *Proc. Iee*, Vol.121, No.12, December 1974, pp. 1585-1588.
- Miranda, J. L. C. (2010). Application of Kalman Filtering and PID Control for Direct Inverted Pendulum Control.
- Muratoğlu, Y., & Alkaya, A., 2014. Kalman Filtresi ile LQR ve PI Denetleyicilerin DC Motor Sistemine Uygulanması LQR and PI Controller with Kalman Filter Applied to DC Motor System.
- Namazov, M., & Basturk, O., 2010. DC motor position control using fuzzy proportional-derivative controllers with different defuzzification methods.
- Nasir, A. N. K., Ahmad, M. A., Ghazali, R., & Pakheri, N. S., 2011. Performance comparison between fuzzy logic controller (FLC) and PID controller for a highly nonlinear two-wheels balancing robot. Paper presented at the Informatics and Computational Intelligence (ICI), 2011 First International Conference on.
- Nakpong, N., Yamamoto, S., 2012, Just-In-Time Predictive Control for a Two-Wheeled Robot, 2012 Tenth International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 95 – 98.
- Nawawi, S.W., Ahmad ,M.N. and Osman, J.H.S., 2008, Real-Time Control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Issue 39, pp. 214-220.
- Nundrakwang, S., Benjanarasuth, T., Ngamwiwit, J., Komine, N., 2005, Hybrid PD - Servo State Feedback Control Algorithm for Swing up Inverted Pendulum System, ICCAS2005, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea.
- Ooi, R. C., 2003. Balancing a two-wheeled autonomous robot. University of Western Australia, 3.
- Pedley, M., 2013. Tilt sensing using a three-axis accelerometer. Freescale semiconductor application note, 1.
- Prasetio, B. H., 2015. Ensemble Kalman filter and PID controller implementation on self balancing robot. Paper presented at the Electronics Symposium (IES).

- Rosencrantz, F., 2016. Self-balancing scooter: How to construct a Self-balancing scooter.
- Salerno, A. and J., Angeles, 2004, The Control of Semi- Autonomous Two-Wheeled Robots Undergoing Large Pay load-Variations, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2004, pp. 1740- 1745, New Orleans, LA.
- Sasaki, M., Yanagihara, N., Matsumoto, O. and Komoriya, K., 2005, Steering Control of the Personal Riding-type Wheeled Mobile Platform (PMP), 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1697.
- Searock, J., Browning, B. and Veloso, M., 2004, Turning Segways into Robust Human-Scale Dynamically Balanced Soccer Robots, In Proceedings of the Eighth RoboCup International Symposium, July, 2004.
- Spong, M.W., Corke, P., Lozano, R., 2001, Nonlinear control of the inertia wheel pendulum, *Automatica*, 37, 2001, 1845-1851.
- Sundin, C., & Thorstenson, F., 2012. Autonomous balancing robot: Design and construction of a balancing robot. In: Master of Science Thesis. Chalmers University Of Technology. Goteborg, Sweden.
- Sung, H.-C., 2015. Balancing Robot Control and Implementation.
- Şen, M. A., 2014. İki tekerlekli robot için bulanık mantık tabanlı kontrolcü tasarımı ve arı algoritması kullanarak optimizasyonu. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Takita, Y., Date, H. and Shimazu, H., 2009, Competition of Two-wheel Inverted Pendulum Type Robot Vehicle on MCR Course, The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 11-15 2009, St. Louis, USA.
- Tsai, C.C., Chan, C.K. and Fan, Y.H., 2008, Planned Navigation of a Self-balancing Autonomous Service Robot, IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts, Aug. 23-25 2008, Taipei, Taiwan.
- Unluturk, A., Aydogdu, O., Guner, U., 2013, Design and PID control of two wheeled autonomous balance robot, 2013 International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), Ankara, Turkey, 260 – 264.
- Vallius, T. and Röning, J., 2007, Embedded Object Concept: Case Balancing Two-Wheeled Robot, Proceedings of the SPIE, Vol. 6764.
- Wei A. and Yangmin L., 2013, Simulation and Control of a Two-wheeled Selfbalancing Robot, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) Shenzhen, China, 456 – 461.
- Wu, W., Ma, X., Wang, J., 2010, Intelligent control in two-wheel self-balanced robot Computer, 2010 International Conference on Mechatronics Control and Electronic Engineering (CMCE), 470 – 473.

- Xiaoxing, G., Xiaoxia, L., & Han, C., 2013. The Research on the Design and Fuzzy Control of Single Wheel Intelligent Self-balancing Scooter. *Sensors & Transducers*, 161(12), 638.
- Yamamoto, Y., 2008, NXTway-GS Model-Based Design-Control of self-balancing two-wheeled robot, built with LEGO Mindstorms NXT. Cybernet Systems Company, Ltd.
- Yan-Hou, W., Yu-Sheng, L., Yih-Guang, L., 2013, Design and implementation of the balance of two-wheeled robots, 2013 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems, May 31 – June 2, Tainan, Taiwan, 130 – 134.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Yunus ÇELİK
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 06.06.1993. Malatya
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (344) 280 16 38
e-posta : celikyunus506@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	KSÜ /Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü	2018
Lisans	İnönü/ Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü	2015
Lise	Malatya Fatih Lisesi	2011

İş Denevimi

Yıl	Yer	Görev
2016-2018	KSÜ	Araştırma Görevlisi
2018-	KMÜ	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Akademik Çalışmalarım

A. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Kabul Edilen Bildiriler

- 1. Celik, Y.,** Pektas, Ö., 2016. Filter Design To Filter EMG Signals Using Fast Block Least Mean Square, 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016) 3-5 Nov 2016 Antalya, Turkey.
- 2. Celik, Y.,** Tekin, M., Gunes, M., 2017. Noise Reduction Of EMG Signals Using Wavelet Transform, The International Conference on Engineering Technology and Innovation (ICETI2017), March 22-26, Sarajevo, Bosnia Herzegovina.
- 3. Celik, Y.,** Altun, M., Gunes, M., 2017. Color Based Moving Object Tracking with An Active Camera Using Motion Information, International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP17), September 16-17, Malatya, Turkey.

4. **Celik, Y.**, Altun, M., Gunes, M., 2017. A Novel Webcam Aided Mouse Design for Disabled, 4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN-2017) 4-8 October 2017, Antalya, Turkey.
5. **Celik, Y.**, Altun, M., Gunes, M., 2017. An Autonomous System That Shoots Moving Object with A Laser, 4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN-2017) 4-8 October 2017, Antalya, Turkey.
6. Altun, M., **Celik, Y.**, Gunes, M., 2017. Investigation of The Success of PID And Fuzzy Type Inspection Methods in Speed Control of Shunt Excited Dc Motor, 2 nd International Energy & Engineering Conference 12-13 October 2017, Gaziantep, Turkey.
7. **Celik, Y.**, Tekin, M., Şekkeli, M., Gunes, M., 2018. Tracking Algorithm for Suitcase That Follows Its Owner Autonomously. 2018 2nd European Conference on Design, Modeling and Optimization (ECDMO 2018), Krakow, Poland.
8. **Celik, Y.**, Aslan, M., Gunes, M., Sabancı, K., 2018. IoT Based Real Time Occupancy Rate Calculator Using SSIM and PSNR, International Congress on Engineering and Life Science' which will be held on Kastamonu, Turkey.
9. **Celik, Y.**, Aslan, M., Gunes, M., Sabancı, K., 2018. IoT Based Real Time People Counter System Using Face Detection, International Congress on Engineering and Life Science' which will be held on Kastamonu, Turkey.

B.Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. **Celik, Y.**, Gunes, M., 2017. Comparison of Least Mean Square and Wavelet Transform Methods for Filtering EMG Signals. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, (1), 58- 63.
2. **Celik, Y.**, Altun, M., Gunes, M., 2017. Mouse Design Using Image Processing for Disabled. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 49- 55.
3. Altun, M., **Çelik, Y.**, Güneş, M., 2017. Investigation of The Success of Particle Swarm Optimization Based PID, Classic PID and Fuzzy Type Inspection Methods in Speed Control of DC Motor. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 158-167.
4. **Celik, Y.**, Gunes, M., 2017. Designing an Object Tracker Self-Balancing Robot. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*