



T.C.

**KARABÜK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**İKİ TKERLEKLİ DENGE ROBOTU
(TWO-WHEEL BALANCE ROBOT)**

BİTİRME TEZİ

Hazırlayanlar

Şeyma ŞENTÜRK 2014010226008

Zeynep FINDIK 2014010226048

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Gökhan GÖKOĞLU

KARABÜK-2019

KABUL VE ONAY

KABUL VE ONAY

Şeyma ŞENTÜRK ve Zeynep FINDIK tarafından hazırlanan “İki Tekerlekli Denge Robotu” başlıklı bu tezin Lisans Bitirme Tezi olarak uygun olduğunu onaylıyorum.

21.05.2019

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Gökhan GÖKOĞLU



Bu çalışma , jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında Lisans Bitirme Tezi olarak kabul edilmiştir. 21.05.2019

Tez Jürisi

Başkan:

Prof. Dr. Gökhan GÖKOĞLU

Üye:

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ÇAYIROĞLU

Üye:

Dr. Öğr. Üyesi Cihan UNRAK



KBÜ Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Mezuniyet Komisyonu ve Bölüm Başkanlığı bu tezi Lisans Bitirme Tezi olarak onaylamıştır./...../.....

Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇAYIROĞLU

Mekatronik Müh. Bölüm Bşk.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bizden yardımlarını esirgemeyen, bize yol gösteren, fikirlerini paylaşan tez danışmanımız Sayın Prof. Dr. Gökhan GÖKOĞLU'na, bugünlere gelmemizde büyük emeği olan tüm saygıdeğer bölüm hocalarımıza ve her zaman yanımızda olan, maddi ve manevi desteklerini bizden esirgemeyen ailelerimize teşekkürlerimizi sunarız.

Şeyma ŞENTÜRK

Zeynep FİNDİK

İÇİNDEKİLER

| İÇİNDEKİLER | Sayfa |
|--|-------|
| KABUL VE ONAY | |
| ÖNSÖZ | II |
| ÖZET | V |
| ABSTRACT | VI |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | VII |
| TABLO LİSTESİ | VIII |
| GİRİŞ | 1 |
| BÖLÜM 1. DENGEDE ROBOTUNUN ÖNEMİ | 4 |
| 1.1 İki Tekerlekli Robotlar | 5 |
| 1.2 Kaynak Araştırması | 7 |
| 1.3 Sistemin Modellenmesi | 15 |
| 1.4 Linear Quadratic Regulator (LQR) Kontrol | 19 |
| BÖLÜM 2. DENGEDE DURABİLEN ROBOTLARIN KONTROL METODLARI | |
| 2.1. Doğrusallaştırma | 20 |
| 2.2. Lajobi Lineer Sadeliği | 21 |
| 2.3. PID Denetim Yöntemi | 22 |
| 2.4. PID Kontrol Ayarları | 25 |

BÖLÜM 3 GYRO SENSÖRÜ

| | |
|--|----|
| 3.1. Acceloremeter (İvmeölçer) | 27 |
| 3.2 Gyroscope | 33 |
| 3.3 IMU (Inertial Measurement Unit) | 37 |

BÖLÜM 4. PROJEDE KULLANILAN MALZEMELER

| | |
|---|----|
| 4.1. 6V 250 Rpm Motor Tekerlek Seti | 41 |
| 4.2. MPU6050 6 Eksen İvme Ölçer Gyro Sensör gy-521 | 42 |
| 4.3. L298N Motor Sürücü Kartı | 44 |
| 4.4. Arduino UNO R3 | 45 |
| 4.4.1 Güç | 48 |
| 4.4.2. Giriş ve çıkışlar | 49 |
| 4.4.3. Haberleşme | 50 |
| 4.5. Potansiyometre | 51 |

BÖLÜM 5. SONUÇ

BÖLÜM 6. ÖNERİLER

| | |
|-------------------|----|
| KAYNAKÇA | 54 |
| ÖZGEÇMİŞ 1 | 56 |
| ÖZGEÇMİŞ 2 | 57 |

ÖZET

Bu tez iki tekerlekli bir robotu açılı geribeslemesi kullanarak dengede tutma problemi üzerine yoğunlaşmıştır. Sarkaç açısının hesaplanması için ivme ölçer ve cirooskop sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörlerden gelen veriler, titreşim sonucu oluşan paraziti yok etmek için Kalman filtresi kullanılarak işlenmiş ve temiz, parazitsiz bir sinyal elde edilmiştir. PID kontrolörü, robotu dengede tutmak için, filtre edilmiş açılı geribeslemesi üzerinde kullanılmıştır. Robot'un hesaplamaları ve kontrolü, motorları sürmek için sensör sinyallerini işleyen ve lojik sinyalleri üreten bir mikrodenetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Prototip olarak kullanılan tasarım Solidworks'de hazırlanmıştır. Bütün parçalar üç boyutlu olarak çizilmiş ve simülasyonlarda kullanılan sarkaç ve tekerlerin kütle ve atalet momentleri gibi parametrelerinin elde edilebilmesi için bu parçalara malzeme ataması yapılmıştır. Sistemde kullanılacak olan PID kontrolör parametrelerini tespit edebilmek için, bütün kapalı-çevrim sistemin blok diyagramının hazırlanmasında Simulink kullanılmıştır. Bu amaçla sistemin matematiksel eşitlikleri çıkartılmış ve bu eşitlikler Simulink'de denge robotu sistem bloğu olarak uygulanmıştır. Ayrıca PID kontrolör, PWM pulse oluşturucusu ve Kalman filtresi blokları da gerçek sisteme mümkün olduğunca yakın bir platform oluşturmak için simülasyona eklenmiştir. Simülasyon modeli hazırlandıktan sonra, Simulink'deki tasarım optimizasyon aracı kullanılarak denge robotu'nun kontrolü için uygun çözümü veren PID parametreleri bulunmuştur. Son olarak, elde edilen PID parametreleri tasarlanan prototip'de denenmiş ve robot'un sarkaç açısı simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması için kayıt edilmiştir.

ABSTRACT

This thesis is concentrated on the problem of balancing a two wheeled robot using the angle feedback. To calculate the pendulum angle, accelerometer and gyroscope sensors are used. The readings received from these sensors are processed using Kalman filtering to eliminate the noise caused by vibration and a clean noiseless signal is obtained. Then PID controller is used on the filtered angle feedback to balance the robot. Calculations and the control of the robot are performed using a microcontroller, which processes sensor signals and generates logic signals to drive the motors of the robot. The design used as a prototype is prepared in Solidworks. All parts are drawn in 3D and materials are assigned to these parts to obtain parameters like mass and inertia values of the pendulum and the wheels that are used in simulations. In order to determine the PID controller parameters to be used in the system, Simulink is used to prepare the block diagram of the whole closed-loop system. For this purpose, mathematical equations of the system are obtained and these equations are implemented in Simulink as balancing robot system block. Also, other system parts like PID controller, PWM pulse generator and Kalman filtering blocks are added into simulation to construct a platform as close as possible to real system. After the simulation model is prepared, design optimization tool in Simulink is used to find PID parameters which give a feasible solution for the control of the balancing robot. Finally, obtained PID parameters are experimented in the prototype design and the angle of the robot is logged and compared with the simulation results.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Segway

Şekil 2. Ters sarkaç modeli

Şekil 3. İki tekerlekli robot (Chiu ve Peng, 2006)

Şekil 4. İki tekerlekli taşıyıcı (Choi ve Oh, 2008)

Şekil 5. Sistemin fiziksel modeli

Şekil 6. Sistemin yandan ve üstten görünüşü

Şekil 7. PID ile sistem kontrol diyagramı

Şekil 8. Bir eksenli ters sarkaç sistemi üzerinde PID denetleyici uygulaması

Şekil 9. PID kapalı çevrim denetimi sistemi

Şekil 10. Jiroskop

Şekil 11. Denge robotu

Şekil 12. 6V 250 Rpm motor ve tekerlek seti

Şekil 13. MPU6050 6 eksen ivme ve gyro sensörü gy-521 ve çalışma prensibi

Şekil 14. L298N Motor sürücü kartı

Şekil 15. Arduino UNO R3

Şekil 16. 10K Potansiyometre

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Sisteme ait parametreler

Tablo 2. PID denetleyici kazançları ve etkileri

GİRİŞ

Robotun Tarihçesi

Robot sözcüğünü ilk olarak çekoslovak yazar Karel Capek Rossum's "Universal Robots" adlı oyununda kullanmıştır.

Çekoslovakça'da "robota" sözcüğü "zorla çalıştırılan işçi" demektir. Fakat genel bir tanımla robot, ottonom veya önce programlanmış elektronik cihazlar olarak tanımlamak mümkündür.Robotlar bilgisayar kontrolünün yanı sıra uzaktan kumanda ile de kontrol edilebilir.Robotlar günümüzde büyük bir tarihsel gelişime uğramışlardır. İnsanların ilk ürettikleri robotlar; eğlence amacı ile üretilmişti.

İç mekanizmasından çok dış görünüşü ile ilgileniliyordu.Birden fazla görev istenemiyordu yeni bir görev için yeniden tasarlanması gerekiyordu. Üzerinde herhangi bir sensör yer almıyordu.Günümüzde ise robotlar insanların ihtiyaçlarının büyük bir kısmını karşılayacak hâle gelmiştir.Şuanda en büyük kullanım alanını endüstriyel sanayi oluşturmaktadır. Zamanla insanların robotlara karşı öngörü ile yaklaşmasıyla Isaac Asimov robotların amacının insanlara hizmet olduğunu belirterek, robot yasası adı altında bilgi yayımlar.

Üç maddeden oluşan bu yasa şu şekildedir;

- 1.Bir robot bir insana zarar veremez ya da kayıtsız kalarak bir insanın zarar görmesine neden olamaz.
2. Birinci yasayla çatışmamak koşuluyla, bir robot insanlar tarafından verilen emirlere uymak zorundadır.
3. Birinci ve ikinci yasayla çatışmamak koşuluyla bir robot kendi varlığını korumalıdır.

Zamanla robotların gelişimini şu şekilde sıralayabiliriz;

*1930'lu yıllarda uçak tasarımcıları uçaklar için otomatik pilotu tasarladılar. Bunlara Avrupada robot pilot deniliyordu. Aynı dönemde ilk olarak spreyci boyayla duvarları boyayan endüstriyel robotlar yapıldı. Bu makineler verilen bir görevi yerine getirebilmek için önce bir alıştırma ve eğitim evresinden geçiyorlar, bu evrede yaptıkları hareketlerin bilgilerini kaydediyorlar ve daha sonra bu kaydı kullanarak hareketleri tekrar ediyorlardı.

*1940'larda Westinghouse yatay düzlemde bağımsız olarak tümüyle hareket eden iki robot yarattı. "Electro" adlı robot, dans ediyor, 10 a kadar sayıyor, sigara içiyor ve yeni Westinghouse ürünlerini tanıtıyordu. Arkadaşı robot köpek de yanında yürüyor, arka bacakları üzerine kalkıyor ve havlıyordu. Hiçbir insan müdahalesi olmadan, çevresindekileri algılayıp tepki vermek üzere programlanabilen ilk robot.

Yapay zeka laboratuvarlarında algılama ve görme ile ilgili teorileri test edebilmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu tip çalışmalardan biri de 1940'lı yıllarda Shannon geliştirdiği labirent çözebilen bir faredir. Bu fare basit bir öğrenme algoritması ile çalışıyordu.

*1953 yılında Grey Walter, robot bir kaplumbağa geliştirdi. Oval şekilli bu kaplumbağanın hareket etmesi ve yön değiştirmesi iki motorla sağlanıyordu.

*Kaplumbağa, ufak noktasal ışık kaynaklarının yerleştirildiği karanlık bir odada ışık dedektörleri ile ışığı algılayıp, ışık şiddetine bağlı olarak ışık kaynağına doğru yöneliyor veya ışık kaynağından uzaklaşıyordu. Kaplumbağa aynı zamanda enerjisi azalınca priz bulup kendisini şarj edebiliyordu.

*1953'te Japon firması Seiko, farklı tipdeki bir çok saat parçasının montajını yapan minyatür bir robot geliştirdi.

- *1965 yılında “DENDRAL” isimli ilk uzman sistem yazılım geliştirildi.
- *1976 yılında Viking 1 ve Viking 2 uzay araçlarında robot kolar kullanıldı.1998: Robot oyuncak FURBY piyasaya çıktı.
- *1999 yılında Sonyi yeni oyuncak ve ev hayvanı Aibo’yu piyasaya sürdü.
- *2000 yılında Honda, yeni humanoid robotu Asimo’yu dünyaya tanıttı.
- *2004 yılında Robotik sektörü sadece Kuzey Amerikada 1.06 milyar dolarlık iş hacmine ulaştı.
- *2008 yılında Nasanın Phoenix robotu, Marsta başarılı bir şekilde araştırmaları yönetiyor.
- *2008 yılından sonrada robotlar gelişimini sürdürdü ve sürdürmeye devam ediyor.

BÖLÜM 1

DENGE ROBOTUNUN ÖNEMİ

Denge robotu bir ya da iki tekerleğe sahip yer ile temas halinde olan ve gövde açısının kontrolü için çeşitli kontrol metotlarının uygulanmasına izin veren bir robot türüdür . Denge robotu kararsız ve doğrusal olmayan yapısıyla birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve birçok bilim adamı bu alanda çeşitli araştırmalar yapmıştır. Bilim insanları için denge robotunun araştırılması farklı kontrol yöntemlerini test etmek ve doğrusal olmayan kompleks bir sistemde nasıl davrandığını görmek için iyi bir deneme ortamı sağlamıştır. Bu ilgi çekici özelliğinin yanı sıra insan hareketlerinin sınırlı olduğu dar alanlarda, eğimli düzlemlerde, kişisel taşıma aracı olarak kullanılmaları bu robotları daha cazip hale getirmektedir.

Denge robotunun yere yatmadan dikey pozisyonda doğrultulması için gövde açısının dengelenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda tekerleklerin pozisyonu aynı noktada kalmalı ve robot öne, arkaya, sağa, sola hareket edebilmelidir. Denge robotu ters sarkaç sisteminin geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Son yıllarda ters sarkaç sistemi insansı robotlar, robotik tekerlekli sandalyeler ve kişisel taşıma sistemleri için ileri geri hareket eden yürüyüş şekilleri tasarımı gibi çeşitli problemlerin çözümü için kullanılmaktadır . Ters sarkaç sistemi kontrol edilmesi zor olan sistemlerden biridir. Sistem doğrusal olmamakla birlikte kararsız bir sistemdir. Sistemi dengelemek için farklı yaklaşımlar uygulanabilir. Sarkacı dikey pozisyonda dengelemek için sarkaç açısı farklı yöntemler ile hesaplanırken, gürültü sinyallerini yok etmek için de çeşitli filtreler ve farklı kontrol teorileri kullanılmaktadır.

1.1 İki Tekerlekli Robotlar

İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotlar 2000'li yılların başlarında literatüre girmiş ve son yıllarda gelişerek popülerliğini artırmıştır. Doğrusal olmayan yapısı nedeniyle yaygın kontrol teorilerinden olan, ters sarkaç modeli temelinde geliştirilen birçok robotik çalışmayla akademik çevrelerin ilgi odağı olmuştur. Akademik çalışmaların başarılı sonuçlar vermesi; iki tekerlekli, elektrik ile çalışan, kendi kendini dengeleyebilen kişisel ulaşım araçlarının üretilmesinin önünü açmış.(Şekil 1.) Bu araçlar; yüksek manevra kabiliyetleri, sıfır dönüş yarıçapları ve hızlı tepki cevabına sahip olmaları nedeniyle güvenli ve etkin bir ulaşım sağlayabilmektedirler.



Şekil 1.Segway

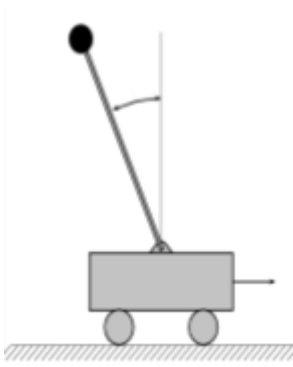
İki tekerlekli kendi kendini dengeleyebilen sistemler robotik mobil platformlar ve elektrikli taşıyıcılar/ araçlar olarak iki başlıkta incelenebilir. Matematiksel model elde etmek için genellikle Lagrange metodu veya Newton Yasası kullanılmıştır. Sistemin kontrolü için çoğunlukla PID ve LQR kontrolcöleri kullanılmıştır. Sistemin denge kontrolünün yanı sıra, konum kontrolünün de sağlanması gerekmektedir. Bu sebeple birden fazla durum değişkenini birlikte kontrol edebilen LQR kontrolcü, PID kontrolcüye kıyasla bu sistemde daha iyi performans göstermiştir . Bulanık mantık ve yapay sinir ağı tabanlı kontrolcü çalışmaları da mevcuttur.

Tek tekerlekli ya da top robotlar gibi iki tekerlekli robotlar da diğer tip robotlara oranla denge problemi yaşarlar. Bunun sebebi dengede kalabilmek için harekete devam etme gereklilikleridir. İki tekerli robotlarda robotun ağırlık merkezinin dingilin altında olması gerekmektedir. Bunu başarmak için genellikle batarya gibi ağır parçalar, gövdenin alt kısmına yerleştirilir.

İki tekerlekli robotlar, tekerlekleri birbirlerine paralel ya da arkalı önlü dizilmiş olabilir. İki tekerlekli robotlar dengede durmak için hareketlerine devam etmek zorundadırlar. Aracın düşme yönüne doğru dönüş hareketi yapması dengesini yeniden kazanmasını sağlar. Sağ ve sol tekerleri bulunan bir robotun dengede durmak için en az iki sensöre ihtiyacı vardır. Bunlardan biri tilt açısını ölçmek için bir sensör ve diğeri robotun pozisyonunu öğrenmek için motor enkoderleridir.

1.2.Kaynak Araştırması

İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemler, kontrol teorisinin temel bir konusu olan ‘Ters Sarkaç’ kontrolü tabanlı geliştirilerek iki binli yılların başlarında literatüre girmiş ve son on yılda gelişerek popülerliğini artırmıştır. Bu sebeple iki tekerlekli robotik sistemlerin incelenmesinde ters sarkaç sistemi ve kontrolü önemli yer tutmaktadır. Ters sarkaç (Inverted Pendulum); yatay yönde doğrusal hareket yapabilen bir araba üzerine, dairesel hareket edebilecek şekilde mesnetli bir çubuktan (sarkaçtan) oluşan fiziksel bir sistemdir (Şekil 2.1.).



Şekil 2. Ters sarkaç modeli

İki tekerlekli robotik sistemlerin temelini oluşturan ve kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ters sarkaç sistemi literatürde geniş yer tutmaktadır. Ters sarkaç modeli ve kontrol teorisi, iki tekerlekli robotik sistemlerin tasarımının ve kontrolünün geliştirilmesinde ilham kaynağı olmuştur. Ters sarkaç ile ilgili literatürdeki temel çalışmalardan öne çıkanlar kısaca şöyledir. Ji Lei ve Kin (1997) çalışmalarında, ters sarkaç sisteminde sarkacın ters, evrik duruma getirilmesi ve dengelenmesi için geliştirdikleri bulanık mantık denetleyicisinin benzetim sonuçlarını sunmuşlardır.

Bugeja (2003) çalışmasında, sarkacın yükseltilmesi için sistem enerjisinin de dikkate alındığı geri beslemeli doğrusallaştırma tekniğini ve sarkacın dengelenmesi için ise durum geri besleme yöntemlerini inceleyerek melez bir yaklaşım kullanmıştır.

Nundrakwang ve ark. (2005) çalışmalarında, sarkacın yükseltilmesi için PD konum kontrolcüsünü ve dengelenmesi için ise durum geri besleme yöntemlerini kullanmışlardır. Muskinja ve Tovornik (2006) çalışmalarında, tek çubuklu arabalı ters sarkaç sistemi üzerinde bulanık mantık ve enerji tabanlı kontrol yöntemlerini sarkacın yükseltilmesi için uygulamışlardır. Uyarlamalı-durum kontrolcü yapısını ise sarkacın dengelenmesi için önermişlerdir. Benzetim ve deneysel sonuçlarında, bulanık denetçinin enerji tabanlı kontrolcüye göre avantajları olduğunu gözlemlemişlerdir. Literatürdeki çalışmaları dikkate alarak, Ters Sarkaç sistemlerini fiziksel yapısı ve uygulanan kontrol yöntemleri açısından iki grupta incelemek mümkündür.

Yapısal açıdan ters sarkaç sistemleri;

Tek çubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri (Muskinja ve Tovornik, 2006) Çift çubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri (Zhong, 2001) Tek ve çift çubuklu dönel ters sarkaç sistemleri (Krishen, 2006) Kuvvetin, çubuğun ucuna bağlı olan bir tekerin dönmesi sonucu elde edilerek uygulandığı sarkaç sistemleri (Spong, 2001) Gezgin ters sarkaç sistemleri (iki tekerlekli robotik sistemler) (Grasser, 2002).

Uygulanan kontrol yöntemleri açıdan ters sarkaç sistemleri;

PID ve durum geri besleme gibi doğrusal yöntemler (Nundrakwang, 2005) Enerji tabanlı kontrol yapan yöntemler (Aström, 2000) Bulanık mantık tabanlı kontrol yapan yöntemler (Ji Lei ve Kin, 1997) Yapay sinir ağları ile kontrol yapan yöntemler (Bugeja, 2003).

Bir gezgin ters sarkaç modeli olan iki tekerlekli mobil sistemler alanında yapılan ilk çalışma; 2001 yılında Dean Kamen tarafından icat edilen, SEGWAY HT adlı iki tekerlekli bireysel ulaşım aracıdır. Bu araç bu alanda yapılan çalışmalara öncülük etmiştir.

İki tekerlekli kendi kendini dengeleyebilen robotik sistemler literatürde; robotik mobil platformlar (Şekil 2.1.) ve daha büyük boyuttaki iki tekerlekli robotik elektrikli taşıyıcılar/araçlar (Şekil 2.2.) olarak iki başlıkta incelenebilir.



Şekil 3. İki tekerlekli robot (Chiu ve Peng, 2006)



Şekil 4. İki tekerlekli taşıyıcı (Choi ve Oh, 2008)

Grasser (2002), Ooi (2003), Ho (2005), Grep (2009) çalışmalarında küçük boyutlardaki robotik mobil platformlar kullanmıştır. Salerno ve Angeles (2004), Lin (2007), Morrell ve Field (2007), Tsai (2008), Nawawi (2008), Becker (2008), Zhou (2008) ise çalışmalarında daha büyük boyuttaki robotik mobil platform tercih etmişlerdir.

Tirmant (2002), Burkert (2004), Zhou (2008), Gocmen (2011) 'ın taşıyıcı araç formunda çalışmaları mevcuttur. Taşıyıcı araçlarda hız ve yön kontrolü yarı otomatiktir; şase ve çubuktan (handlebar) oluşan bir aracın üzerindeki sürücü, öne/geriye/sağa/sola eğilerek aracı yönlendirebilmektedir. Solis (2009), Butler (2008), Hu (2007), Li (2007), Pannil (2008), Hu (2010) robotik mobil platform çalışmalarında kişisel bir bilgisayardan (PC) gönderilen ve bir bluetooth modülü veya radyo alıcısı üzerinden algılanan komutlar ile uzaktan kullanıcı kontrollü kumanda yöntemi kullanmışlardır.

Gans ve Hutchinson (2006), Searock (2004) yaptığı çalışmalarda, bünyesindeki bir kamera sayesinde çevreyi algılayabilen ve tamamen otomatik yol planı yapabilen sistemler geliştirmişlerdir. Sasaki (2005), Jean ve Wang (2009), Lin (2009), Goher ve Tokhi (2010) SEGWAY’i referans alarak, mevcut sistemin maliyetini ve toplam ağırlığını azaltmaya yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu tür araçları daha kolay taşınabilir ve daha yaygın kullanılabilir hale getirmeyi hedeflemişlerdir Taşıyıcı araçların kullanım amacı bireysel ulaşım ile sınırlıdır. Ancak robotik sistemler kullanım alanı ve kullanım amacı oldukça geniştir. Vallius ve Röning (2007) bir telekonferans aracı olarak kullanılan Telepresence’ı geliştirmişlerdir. Searock (2004)’un futbol oynayan robot şeklinde uygulaması literatürde yer almaktadır. Butler ve Bright (2008) ise robotik sistemlerini yük taşıma amaçlı dizayn etmişlerdir. Bu tür iki tekerlekli robotik sistemlerin, gerekli bileşenlerin eklenmesiyle, hibrit sisteme dönüştürülmesi örnekleri vardır. Jeong ve Takahashi (2007), Acar (2008) kol ve/ya gövde ekleyerek iki tekerlekli insansı hibrit robot geliştirmişlerdir. İki tekerlekli sistemlerin yanı sıra; Huang (2010) tek teker üzerinde, Kumaga ve Ochiai (2009) bir küre üzerinde kendi kendini dengeleyen sistemlerle çalışmışlardır. Kontrolcü tasarımı için sistemin matematiksel modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Matematiksel model oluşturmak amaçlı çoğunlukla Lagrange metodu kullanılmıştır. Chi (2005), Acar (2008) ‘ın çalışmaları Lagrange metodu ile modellemeye, Nawawi (2008), Becker (2008)’ın çalışmaları ise Newton Yasası ile modellemeye örnek verilebilir. Matematiksel model için gerekli olan atalet momenti parametresini Burkert (2004) ve Zhou (2008) teorik olarak, Chi (2005) deneysel olarak belirlemişlerdir.

Ho (2005), Nawawi (2008) çalışmalarında sistemin durumunu; hareket yönündeki doğrusal yer değiştirme ve doğrusal hız, eğim açısı ve açısal oranı değişkenleri cinsinden tanımlamışlardır. Aström (2000), Tsai (2008), Lin (2009) ise eğim açısındaki ve açısal orandaki sapmayı dikkate almışlardır. Sistemin en kritik bölümü kontrolcü tasarımıdır. Kendi kendini dengede tutabilme kararlılığını kontrolcü sağlamaktadır. Sistem doğrusal olmamasına rağmen, doğrusal hale getirildikten sonra daha az karmaşık ve daha ucuz doğrusal denetleyiciler kullanılabilir. Çalışmalar çoğunlukla sistemin kendi kendini dengede tutabilmesi (oto-kontrol) yönündedir.

Ancak Goher ve Tokhi (2010) çalışmalarında, oto-kontrolün yanı sıra ‘tracking kontrol’ amaçlı kontrolcü de geliştirmişlerdir. Temel amaç, sistemin eğitim açısını kararlı duruma getirerek dengeyi sağlamaktır.

Bu sebeple, gerekli veriler sensörlerden elde edilmelidir. Gövdenin açısını ve açısız oranını ölçmek üzere, ivmeölçer(accelerometer) ve jiroskop (gyroscopes) kullanılmıştır. Birçok çalışmada bu sensörler beraber kullanılmıştır. Li (2007), Sasaki (2005) bu iki sensörü beraber, Grepl (2009) yalnız ivmeölçeri, Jeong ve Takahashi (2007) yalnız jiroskopu kullanmışlardır. Genellikle ivmeölçer gürültülü veri verir ve jiroskop verilerinde sapmalara neden olur. Bu nedenle Butler ve Bright (2008) çalışmalarında, daha doğru veri elde etmek için, bu iki sensörü bütünleyici bir filtre ile birleştirmişlerdir. Grasser (2002) kalman filtresini, eğimölçer ve jiroskop birleştirmesi işleminde kullanmıştır. Takita (2009), Hu (2007), Solis (2009), Grepl (2009), Zhou (2008) çalışmalarında işlemleri, ucuz ve kolay programlanabilir olması sebebiyle, gömülü mikro denetleyiciler tarafından gerçekleştirmişlerdir. Genellikle Mikrochip ve Atmel markalı mikro işlemciler tercih edilmiştir. Tsai (2008), Nawawi (2008) Dijital Sinyal İşleme (DSP) yöntemiyle gerçek zamanlı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, Li (2007) tek board bilgisayar (PC104) ile Matlab kodları kullanarak gerçek zamanlı bir çalışma yapmıştır. Nagarajan (2009) çalışmasında, ivmeölçer ve jiroskop içeren, filtre edilmiş veri veren Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU) kullanmıştır. Choi ve Oh (2008), Olis (2009) sistemin doğrusal yer değiştirmesini ve doğrusal hızını ölçmek için ise enkoder kullanmışlardır.

Ünlütürk ve ark. (2013) oluşturdukları küçük boyutlu iki tekerlekli robotik bir sistemin kontrolünü, PID kontrolcü ile deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Hız ve ivme değerlerini, üç eksenle veri verebilen Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU)’dan elde ederek, kalman filtresi ile filtre etmişlerdir. Bu sistem için birçok doğrusal kontrol algoritması ve kontrolcü tasarımı çalışılmıştır. Bu sistemde daha başarılı sonuçlar vermesi nedeniyle genellikle LQR kontrolcü kullanılmış. Chee (2006), Li (2007), Becker (2008), Goher ve Tokhi (2010) PID kontrolcü; Solis (2009) PD kontrolcü; Salerno ve Angeles (2004), Chi (2005), Grepl (2009), Takita (2009) LQR kontrolcü tasarımı gerçekleştirmişlerdir.

İki tekerlekli robot kontrolü üzerine, Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control–MPC) çalışmaları, güncel bir kontrol yaklaşımıdır. Nakpong ve Yamamoto (2012) iki tekerlekli bir robot üzerinde, kablosuz bağlantı ile online veri alış verişi sağlayarak, Model Öngörülü Kontrol uygulamışlardır.

Azimi ve ark. (2013), Grasser 'in 2002 yılında tasarladığı mobil ters sarkaç (JOE) çalışmasını referans alarak, bozucu giriş altındaki sisteme Model Öngörülü Kontrol tasarımı gerçekleştirmişlerdir.

Hu (2007), Butler ve Bright (2008) Matlab/Simulink ortamında sistemin benzetim çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Grepl (2009) sistemin dinamik olarak modellenmesinde Matlab'ın SimMechanics arabirimini kullanmıştır. Wei ve Yangmin (2013) Segway'i referans alarak tasarladıkları iki tekerli taşıyıcı bir aracın kontrolü için klasik kontrol yöntemleri olan LQR kontrolcü ve PID kontrolcü tasarlamışlar, Matlab/Simulink yazılımıyla simülasyon çalışmaları yaparak kontrolcülerini karşılaştırmışlardır. İki tekerlekli robotik sistemler üzerine yapılan güncel çalışmalarda, sistemin fiziksel modeli ve hareket kontrolü üzerine farklı yaklaşımlar mevcuttur. Rahman ve ark.(2013), çift çubuklu arabalı ters sarkaç sistemini referans göstererek, iki tekerlekli robotik sitem modelini geliştirmek amacıyla üzerine bir sarkaç daha eklemiş ve sistemin serbestlik derecesini artırmıştır. Sistemin hareket kontrolünün gerçekleştirildiği çalışmalarda genellikle düz bir yol profili seçilirken; Huei ve Hashimoto (2012) çalışmalarında robotun basamaklı bir profilde hareket kontrolünü, Jian-Xin ve ark. (2014) robotun eğimli bir yüzeyde hareket kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Yang ve ark. 2014 yılında, sistemin hareket ve denge kontrolü için Yapay Sinir Ağı (Neural Network) tabanlı kontrolcü geliştirmişlerdir.

Jamil ve ark. (2014) sistemin kinematik modelini geliştirmeye yönelik; Cong ve ark. (2013) sistemin matematiksel modelindeki hataları azaltmaya yönelik çalışmalarıyla sistemin denge kontrolünü iyileştirmeyi hedeflemişlerdir.

Bu tez kapsamında incelenen iki tekerlekli robotik sistemlerin Bulanık Mantık kontrolü, yörünge takibi ve optimizasyon uygulamaları ile ilgili literatürdeki öne çıkan çalışmalar kısaca şöyledir: İki tekerlekli robotik sistemler için Bulanık Mantık Kontrolcü (Fuzzy Logic Controller) uygulamaları arasında; Tirmant (2002), Saifizul (2006), Hladek (2007), Wu Wei (2010), Junfeng Wu (2011), Chia-Hong Chen (2011), Qian Hao (2011) çalışmaları literatürde öne çıkmaktadır.

Shi (2004), iki tekerlekli robot üzerinde akıllı bir bulanık kontrol tekniği uygulamıştır. Maravall (2005), sarkacın başlangıçta kararsız noktada dengede olduğu ters sarkaç sistemine PD ve Bulanık Mantık Kontrolcülerini içeren hibrit (melez) bir kontrol sistemi tasarlamıştır.

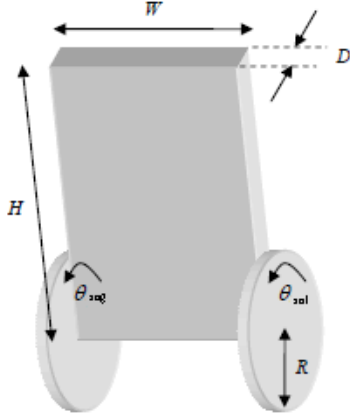
Bu çalışmayı Saifizul (2006) geliştirerek Matlab/ANFİS ortamında yapay sinir tabanlı yeni bir bulanık mantık kontrolcü tasarlayarak sarkacın kararlı denge noktasından kararsız denge noktasına yükselmesini ve bu noktada kontrolünü sağlamıştır. Hladek (2007), futbol oynayan robot için bulanık tabanlı uzman bir sistem tasarlamış ve uygulamıştır. Astudillo (2006), mobil robot için tork ve hareket kontrolünü de içeren bulanık mantık tabanlı bir yörünge takip kontrolcüsü geliştirmiştir. Yan-Hou ve ark. (2013) iki tekerlekli bir aracın denge kontrolü için ayrı ayrı Bulanık Mantık Tabanlı kontrolcü ve PID kontrolcü tasarlayarak, kontrolcülerin birbirlerine göre performanslarını değerlendirmişleridir. İki tekerlekli robotik sistemler üzerine yapılan bulanık mantık çalışmalarında, tüm durum değişkenleri sadece bulanık mantık kontrolcü ile kontrol edilmemiştir. Junfeng Wu ve Wanying Zhang (2011) yaptığı çalışmada sistemin Newton metoduyla hareket denklemlerini elde ederek, sistemin kontrolü için Fuzzy-PID kontrolcü tasarlamışlardır. Sistemin konum kontrolü için bulanık kontrolcü, denge kontrolü için ise PID kontrolcü tasarlayarak, uygulamışlardır. 2012 yılındaki çalışmalarında ise Fuzzy-PD kontrolcü tasarımı gerçekleştirerek, bu tür sistemler için bulanık mantık tabanlı kontrol uygulamaların araştırmaya değer olduğunu belirtmişlerdir.

Pelter (2012) tez çalışmasında, iki tekerlekli robotik bir sistemin dinamik parametrelerini ve matematiksel modelini geniş kapsamlı incelemiştir. Sistemin denge kontrolünün yanı sıra, yörünge takip kontrolünü de gerçekleştirmiştir.

Xiaogang ve ark. (2012) çalışmalarında, sistemin kinematik parametrelerini gerçek zamanlı ölçülen konum hata değerine göre kalibre ederek, yörünge takip kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Goher ve Tokhi (2010) 'nin iki tekerlekli robotik bir sistemin kontrolü üzerine genetik algoritma tabanlı optimizasyon çalışması bulunmaktadır. 2011 yılındaki çalışmalarında ise sistemin konum ve denge kontrolünü için PD ve Bulanık Mantık kontrolcileri uygulamışlardır. PD ve Bulanık Mantık kontrolcülerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Literatürde, İki tekerlekli robotik sistemler üzerine Bulanık Mantık Kontrolcü tabanlı çalışmaların yaygınlaştığını ancak yörünge takibi çalışmalarının ve özellikle sürü tabanlı optimizasyon uygulamalarının oldukça az ve güncel bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

1.2. Sistemin Modellenmesi

İki tekerlekli kendi kendini dengeleyebilen robotun fiziksel modeli Şekil 5’de görülmektedir. Tablo 1’de sistemin fiziksel parametreleri ve DC motor parametreleri verilmiştir.

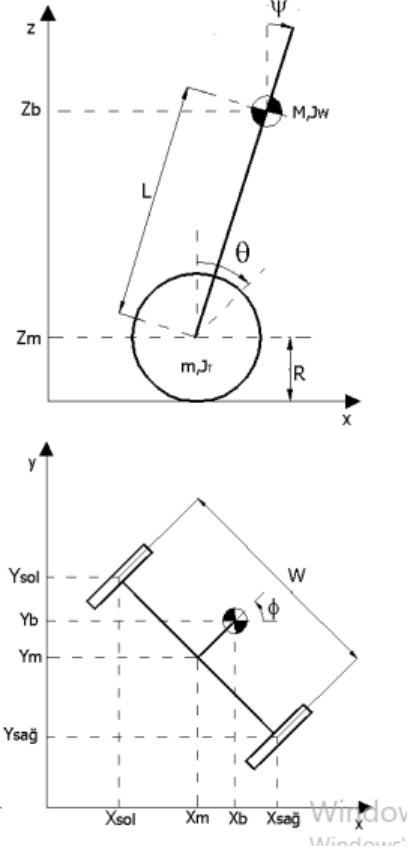


Şekil 5. Sistemin fiziksel modeli

Tablo 1. Sisteme ait parametreler

| Sembolü-Değeri | Açıklama-Birimi |
|------------------------------|--|
| $g = 9.81$ | Yer çekimi sabiti [m/sn ²] |
| $m = 0.03$ | Tekerlek ağırlığı [kg] |
| $R = 0.04$ | Tekerlek yarıçapı [m] |
| $J_T = mR^2 / 2$ | Tekerlek atalet momenti [kgm ²] |
| $M = 0.6$ | Toplam ağırlık [kg] |
| $W = 0.14$ | Model genişlik [m] |
| $D = 0.04$ | Model derinlik [m] |
| $H = 0.144$ | Model boy [m] |
| $L = H/2$ | Teker ile gövde merkezi arası mesafe [m] |
| $J_\psi = ML^2 / 3$ | Yunuslama atalet momenti [kgm ²] |
| $J_\phi = M(W^2 + D^2) / 12$ | Dönüş atalet momenti [kgm ²] |
| $J_m = 0.00001$ | Dc motor atalet momenti [kgm ²] |
| $n = 1$ | Çevrim oranı |
| $R_m = 6.69$ | DC Motor direnci [ohm] |
| $K_b = 0.468$ | DC Motor EMF sabiti [V.sn / rad] |
| $K_t = 0.317$ | DC Motor tork sabiti [Nm/A] |
| $f_m = 0.0022$ | Gövde ile DC motor arasındaki sürt. kats. |
| $f_w = 0$ | Tekerlek ile zemin arasındaki sürt. kats. |

Sistemin yandan ve üstten görünüşü Şekil 6’da sunulmuş, sistemin durum değişkenleri ve koordinatları belirtilmiştir. Sistemin, doğrusal ve dairesel hareket yapabilecek şekilde, hareket denklemleri belirtilerek matematiksel modeli verilmiştir.



Şekil 6. Sistemin yandan ve üstten görünüşü

Şekil 6’da görülen koordinat sisteminde ;

θ ; Sol ve sağ teker açılarının ortalaması,

ψ ; Denge açısı (yunuslama/pitch),

ϕ ; Dönüş açısı (yaw)’dır. (Başlangıçta 45°)

Sisteme ait açılar ve koordinatlar;

$$(\theta, \phi) = \left[\frac{1}{2}(\theta_{sol} + \theta_{sağ}), \frac{R}{W}(\theta_{sol} - \theta_{sağ}) \right] \quad (1)$$

$$(x_m, y_m, z_m) = \left[\int \dot{x}_m dt, \int \dot{y}_m dt, R \right] \quad (2)$$

$$(\dot{x}_m, \dot{y}_m) = (R \dot{\theta} \cos \phi, R \dot{\theta} \sin \phi) \quad (3)$$

$$(x_{sol}, y_{sol}, z_{sol}) = \left[x_m - \frac{W}{2} \sin \phi, y_m + \frac{W}{2} \cos \phi, z_m \right] \quad (4)$$

$$(x_{sağ}, y_{sağ}, z_{sağ}) = \left[x_m + \frac{W}{2} \sin \phi, y_m - \frac{W}{2} \cos \phi, z_m \right] \quad (5)$$

$$(x_b, y_b, z_b) = [x_m + L \sin \psi \cos \phi, y_m + L \cos \psi \sin \phi, z_m + L \cos \psi] \quad (6)$$

Sisteme ait kinetik (T_1, T_2) ve potansiyel (U) enerjiler aşağıdaki gibidir.

$$T_1 = \frac{1}{2} m \left[(\dot{x}_{sol})^2 + (\dot{y}_{sol})^2 + (\dot{z}_{sol})^2 \right] + \frac{1}{2} m \left[(\dot{x}_{sağ})^2 + (\dot{y}_{sağ})^2 + (\dot{z}_{sağ})^2 \right] + \frac{1}{2} m \left[(\dot{x}_b)^2 + (\dot{y}_b)^2 + (\dot{z}_b)^2 \right] \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} J_T (\dot{\theta}_{sol})^2 + \frac{1}{2} J_T (\dot{\theta}_{sağ})^2 + \frac{1}{2} J_\psi (\dot{\psi})^2 + \frac{1}{2} J_\phi (\dot{\phi})^2 + \frac{1}{2} n^2 J_m (\dot{\theta}_{sol} - \dot{\psi})^2 + \frac{1}{2} n^2 J_m (\dot{\theta}_{sağ} - \dot{\psi})^2 \quad (8)$$

$$U = mgz_{sol} + mgz_{sağ} + mgz_b \quad (9)$$

T_1 ; Sistemin doğrusal (ileri-geri) hareketinin kinetik enerjisi (7), T_2 ; Sistemin dairesel (sağa/sola dönüş) hareketinin kinetik enerjisi (8), U ; Sistemin potansiyel enerjisidir (9). L ; Sisteme ait Lagrange değişkeni, q ; genelleştirilmiş koordinat, F ; genelleştirilmiş kuvvetler olmak üzere çözülmüştür (10).

$$q = [\theta \ \psi \ \phi], F = [F_\theta \ F_\psi \ F_\phi], L = T_1 + T_2 - U \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F$$

Genelleştirilmiş kuvvetler, DC motor voltajına bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_{\theta} = \alpha(v_{sol} + v_{sağ}) - 2(\beta + f_w)\dot{\theta} + 2\beta\dot{\psi} \quad (11)$$

$$F_{\psi} = -\alpha(v_{sol} + v_{sağ}) + 2\beta\dot{\theta} - 2\beta\dot{\psi} \quad (12)$$

$$F_{\phi} = \frac{W}{2R}\alpha(v_{sol} - v_{sağ}) - \frac{W^2}{2R^2}(\beta + f_w)\dot{\phi} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{nK_t}{R_m}, \quad \beta = \frac{nK_t K_b}{R_m} + f_m \quad (14)$$

$\psi \cong 0 \Rightarrow \sin \psi \cong \psi, \cos \psi \cong 1, \dot{\psi} \cong 0$ kabulleri yapılarak elde edilen sisteme ait doğrusal hareket denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$F_{\theta} = \left[(2m + M)R^2 + 2J_T + 2n^2 J_m \right] \ddot{\theta} + (MLR - 2n^2 J_m) \ddot{\psi} \quad (15)$$

$$F_{\psi} = (MLR - 2n^2 J_m) \ddot{\theta} + (ML^2 + J_{\psi} + 2n^2 J_m) \ddot{\psi} - MgL\psi \quad (16)$$

$$F_{\phi} = \left[\frac{1}{2}mW^2 + J_{\phi} + \frac{W^2}{2R^2}(J_T + n^2 J_m) \right] \ddot{\phi} \quad (17)$$

Sistemin durum uzay modeli;

$$x_1 = \left[\theta \quad \psi \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi} \right]^T \quad (18)$$

$$x_2 = \left[\phi \quad \dot{\phi} \right]^T \quad (19)$$

$$u = \left[v_{sol} \quad v_{sağ} \right]^T \quad (20)$$

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u \quad (21)$$

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u$$

olarak tanımlanmıştır.

1.3 Linear Quadratic Regulator (LQR) Kontrol

İkinci Dereceden Doğrusal Düzenleyici, Lineer Quadratic Regulator (LQR) en uygun kontrol girdisini hesaplamak için performans indeksi ve durum değişkenlerini kullanarak yapılan hesaplamalarla tasarlanan bir kontrol yöntemidir. Hesaplamalar yapılmadan önce sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olduğundan emin olunmalıdır (Anderson, 1898). Bir optimal kontrol problemi, performans kriteri veya amaç fonksiyonunu en aza indiren optimum bir kontrolün bulunmasıdır. LQR kontrol, optimal kontrol sistemleri olarak sınıflandırılmış tasarımlardır. Tasarımın amacı istenilen çalışma performansını sağlayacak pratik bileşenler ile bir sistemi gerçekleştirmektir. İstenilen performans zaman alanı, performans indisleri açısından ifade edilebilir. Örneğin, bir basamak giriş için maksimum aşım ve yükselme zamanı, zaman alanı indisleridir (Oral, 2010).

LQR, $\dot{x} = Ax + Bu$ şeklinde ifade edilen bir sisteme $u = Fx$ formunda, durum geri beslemeli denetimi amacı ile tasarlanır. "F" in değeri geçici durum cevabı ile denetim başarısı arasındaki dengeyi kurmaya dayanır. Optimal Kontrol yaklaşımında bu denge durumu performans indeksi veya amaç fonksiyonu ile tanımlanır ve bu indeksi minimize edecek $u = Fx$ aranır. Performans indeksinin genel hali,

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \text{ şeklindedir.}$$

Burada, Q simetrik, yarı kesin pozitif ve R simetrik, kesin pozitif matrislerdir. Performans indeksi J'yi minimize edecek $u(t) = Fx(t)$ 'nin bulunması için sistem koşullarının ve J'nin durumlarının net ifade edilmesi ayrıca düzenleyicisi tasarlanan sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olması gereklidir. Q ve R pozitif, reel ve hermisyen matrislerdir. R matrisi Q 'dan daha büyük seçilirse, sistem küçük bir eforla durum vektörü sıfıra yaklaşır fakat sistemin cevap süresi uzar. Eğer R matrisi Q 'dan küçük olursa, sistem daha büyük bir efor harcayarak, daha hızlı cevaba ulaşacaktır. İşte bu iki durum arasında denge LQR tasarımındaki esastır. Öte yandan, R ve Q değerleri büyüdükçe hata azalır ve sistem hızlanır (Anderson-1898).

BÖLÜM 2

2. Dengede Durabilen Robotların Kontrol Metodları

İki tekerlekli robotların kontrolünün ilk ve temel amacı robotun dengede kalmasını sağlamak ve devrilmesini önlemektir. Diğer bir amacı belli bir hız ve yörünge takip etmektir. IMU bir Kalman filtresi normalde zamanla ileri hızı ve doğrudan açısız rotasyonu yanı sıra eğim açısını verir. Eğim açısı doğruluğu öncelikle jiroskoplara bağlıdır. Sensör etkisi, gürültü ve ivme arasında bir denge vardır. Ayrıca eğim olmadan bir ivme tahmin etmek mümkündür, ara açısız ivme olarak gerçekleştirilebilmektedir.

2.1 Doğrusallaştırma

İki tekerlekli robotlar, genellikle bazı doğrusal değişkenler tarafından kontrol edilir. Jacobi lineer sadeliği kullanılır. İki tekerlekli robot sistemi küçük eğim açıları için oldukça doğrusaldır.

2.2 Jacobi lineer sadeliği

Lineer denklem sistemlerinin çözümünde denklem sistemi oldukça büyük ise matris işlemleri kullanılarak yok etme metodlarının kullanılması yapılan temel aritmetik işlemlerim çokluğundan dolayı tercih edilmemektedirler. Bu durumda iterasyon yöntemleri tercih edilmektedir. Yöntemde çözümlere bir başlangıç tahmininde bulunulur ve denklemlerde yerine konularak yeni tahmin değerleri bulunur. İşlemler bir birini takip eden yaklaşık değerler arasında mutlak fark çok küçük oluncaya kadar devam etmektedir.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = b_n$$

Bu yöntem aynı zamanda eş zamanlı olarak yer değiştirme yöntemi olarak bilinmektedir. Basit ve anlaşılabilir olması açısından yukarıdaki denklemde $n = 3$ alalım, yani üç bilinmeyenli üç denklem sistemini ele alalım.

Bu denklem sistemi $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = b_1$

$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = b_2$

$a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = b_3$

Burada, a_{11} , a_{22} ve a_{33} katsayıları ilgili denklemlerin en büyük katsayıları olduğunu varsayıyoruz, bu varsayım yöntemin çözülebilirlik yada yakınsama şartıdır. Yani;

$$|a_{11}| > |a_{12}| + |a_{13}|$$

$$|a_{22}| > |a_{21}| + |a_{23}|$$

$$|a_{33}| > |a_{31}| + |a_{32}|$$

Jacobi iterasyon yöntemi, yukarıdaki denklemde verilen koşullar yerine getirildiği durumunda geçerlidir. Bu denklem sistemini

$$x_1^{(n+1)} = \frac{1}{a_{11}} \left(b_1 - a_{12}x_2^{(n)} - a_{13}x_3^{(n)} \right)$$

$$x_2^{(n+1)} = \frac{1}{a_{22}} \left(b_2 - a_{21}x_1^{(n)} - a_{23}x_3^{(n)} \right)$$

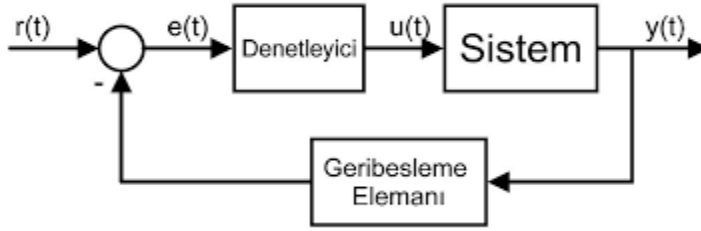
$$x_3^{(n+1)} = \frac{1}{a_{33}} \left(b_3 - a_{31}x_1^{(n)} - a_{32}x_2^{(n)} \right)$$

şeklinde yazabiliriz. Burada üstel (n) gösterimi n. ci iterasyondaki değerini belirtmektedir. Üstün (0) olması durumu x_i lerin başlangıçyaki değerini ifade etmektedir. Yukarıdaki iterasyon şemasını ($N \times N$) lik bir sisteme genelleştirirsek;

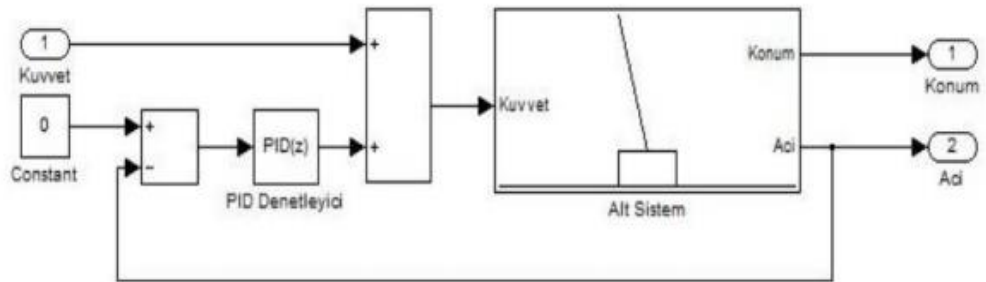
$$x_i^{(n+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left\{ b_i - \left(\sum_{j=1}^{j=i-1} a_{ij}x_j^{(n)} + \sum_{j=i+1}^N a_{ij}x_j^{(n)} \right) \right\}, \quad i = 1, \dots, N$$

2.3 PID Denetim Yöntemi

PID denetleyicisi oransal, türevsel ve integral yöntemlerinin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Ayrıca PID denetleyicisi 3 modlu denetleyici olarak da ifade edilmektedir. İntegral bileşeni büyük yük değişimlerinin meydana getirdiği oransal ofseti azaltmak veya sıfırlamak için kullanılırken türevsel bileşeni ise genellikle salınımları azaltarak hata sinyalini daha önceden tahmin etmek için kullanılır. Türev bileşeni ise genellikle aniden değişen yüklerin olduğu sistemlerde tercih edilerek PID denetleyici diğer denetleyicilerin yetersiz kaldığı hata oranının belirli seviyeleri aştığı hızlı ve büyük yük değişimlerinin olduğu sistemlerde kullanımı tercih edilmektedir. Şekil 7’de PID ile sistem kontrol diyagramı görülmektedir. Şekil 8’de ters sarkaç sistemi üzerinde PID denetleyicisi uygulaması görülmektedir.



Şekil 7. PID ile sistem kontrol diyagramı

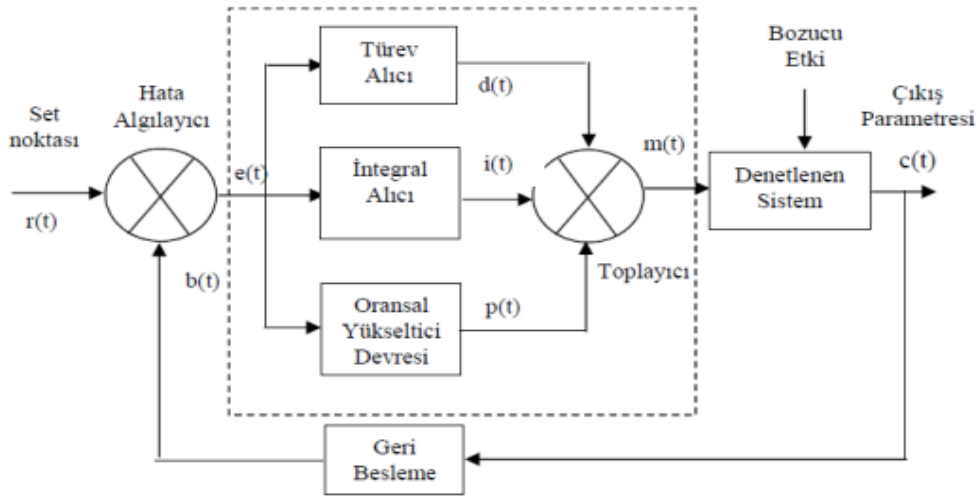


Şekil 8. Bir eksenli ters sarkaç sistemi üzerinde PID denetleyicisi uygulaması

PID algoritmasını;

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(T) \quad (3.1)$$

Şeklinde ifade edebiliriz. Denklemdaki $u(t)$ kontrol değişkenidir. Şekil 9’da PID kapalı çevrim denetim sistemi görülmektedir.



Şekil 9. PID kapalı çevrim denetimi sistemi

PID denetleyici sisteminde giriş değeri ile ölçülen değer arasında oluşan fark sinyalinin türevi ve integrali hesaplanarak hata sinyali elde edilir. Hata sinyali oransal denetleyiciden geçerek toplama devresinde türev, integral ve oransal sinyal ile dengeleme gerilimi toplanır. Böylece dengeleme gerilimi referans alınarak düzeltme yapılır. Türev yöntemi alt aşım ve üst aşım değerlerini daha az bir seviyeye indirirken integral yöntemi de kalıcı durum hatasını yok etmektedir. Türevsel yöntem daha yüksek kazanç değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır.

PID denetim sisteminin denklemleri aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilmektedir.

$$d(t) = K_d \frac{de(t)}{d(t)} \quad (3.2)$$

$$i(t) = K_i \int_0^t e(t) d(t) \quad (3.3)$$

$$p(t) = K_p e(t) \quad (3.4)$$

K_p : Oransal Kazanç

K_i : İntegral Kazancı

K_d : Türevsel Kazanç

Transfer Fonksiyonu ;

TF: $\frac{Kds^2 + Kps + Ki}{s}$ şeklindedir.

Sistemde oransal kontrolör (K_p) yükselme zamanını azaltmak için kullanılmaktadır. Değeri azaltır ama sıfırlayamaz (kalıcı durum hatası). İntegral kontrolörü (K_i) kararlı durum hatası üzerinde etkili iken fakat daha kötüye gitmesine de yol açabilir.

2.4 PID Kontrol Ayarı

PID denetleyiciyi oluşturan oransal, integral, türev kazançlarının sistem üzerinde farklı etkileri mevcuttur. Oransal denetleyici yükselme zamanının azalması üzerinde etki gösterirken kalıcı durum hatasının sıfırlanması üzerinde etkili değildir. İntegral denetleyici kalıcı durum hatasını sıfırlayabilir iken ancak geçici hataların daha da kötü olmasına da yol açabilmektedir. Türev denetleyici ise sistemin kararlılığını arttırarak alt ve üst aşım değerlerini azaltıp geçici hataların daha iyiye gitmesine yardımcı olmaktadır.

Denetleyicilerin kazanç değerleri ve sistem üzerindeki etkileri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. PID denetleyici kazançları ve etkileri

| Kontrolör | Kazanç | Yükselme Zamanı | Aşım | Oturma Zamanı | Kalıcı Durum Hatası |
|------------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------|----------------------------|
| Oransal | K_p | Azaltır | Arttırır | Biraz arttırır | Azaltır |
| İntegral | K_i | Biraz azaltır | Arttırır | Arttırır | Yok eder |
| Türev | K_d | Biraz değiştirir | Azaltır | Azaltır | Çok az etkiler |

Tablo 2. incelendiği zaman kapalı çevrim kontrol sisteminde önemli olan dört farklı değişkenle karşılaşılmaktadır. Yükselme zamanı, sisteme ilk anda verilen enerjiden set değerinin %90’ı civarındaki değerlere gelinceye kadar geçmesi gereken süredir. Oransal kontrol kazanç arttırıldığı zaman bu süre azalırken, integral kazancı ve türev kazancının bu süre üzerindeki etkisi oldukça azdır. Oransal ve integral kazançları set değerinin üstünde ve altında kalan aşım değerini arttırırken, türev kazancı bu aşımı azaltabilir. Oturma zamanı set değeri çevresinde oluşan osilasyonların göz ardı edilebilecek bir seviyeye inmesi için gerekli olan süredir. Oransal ve integral kazançları oturma zamanını arttırıcı şekilde etki ederken türev kazancı oturma zamanını azaltır. Burada istenilen durum oturma zamanının azaltılmasıdır. Oransal kazanç arttırıldığı zaman kalıcı durum hatasını azaltır ancak yok edemez. İntegral kazancı kalıcı durum hatasını sıfırlayabilir. Fakat türev kazancının bir etkisi yoktur.

PID parametrelerinin ayarlanması kapalı çevrim sistemlerinin işleyişi açısından çok önemlidir. Bu parametreler deneysel yöntemlerle ayarlanabildiği gibi farklı matematiksel metotlarla da hesaplanıp ayarlanabilir. Bir PID devresi deneysel yöntemle oluşturulduğunda aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir.

İlk olarak K_p kazancının değeri ayarlanır. K_i ve K_d kazançlarının değerleri sıfır iken çıkış hatasının azaltılması için K_p kazancı sıfırdan başlayarak adım adım artırılır ve set değerine yakın bir noktadaki kalıcı durum hatasına kadar arttırılmaya devam ettirilir.

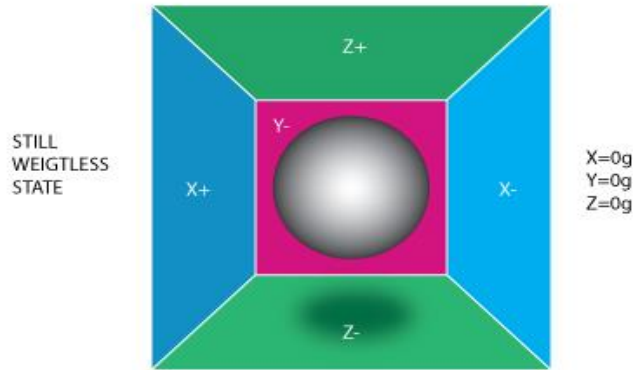
İkinci olarak da K_p ve K_i kazancı değiştirilmeden kazancı aşım değerini kabul edilebilir bir seviyeye düşürene kadar arttırılarak kalıcı durum etrafında kontrol edilen değişkenin yaptığı salınımlar incelenir ve en düşük seviyedeki salınımda K_d kazancının değerinin ayarlanması bırakılır. K_d ve K_p kazancı değerleri ile çıkışta kalıcı durum hatası bulunduğundan K_i değeri kalıcı durum hatası yok edilinceye kadar arttırılır.

BÖLÜM 3

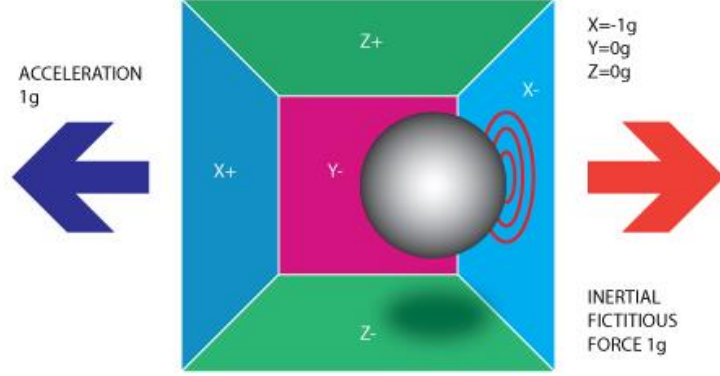
3.1 Accelerometer (İvmeölçer)

Accelerometerlar üzerlerine düşen statik(yerçekimi) veya dinamik (aniden hızlanma veya durma) ivmeyi ölçmektedirler. Sensörden aldığımız değer m/s^2 veya yer çekimi (g-Force) türünden ifade edilebilir. Uygulamalarda genelde yerçekimi türünden ifade edilmektedir. Eğer uzayda veya herhangi bir çekim alanının kapsamında değilseniz sensör üzerine $1g$ lik bir yerçekimi kuvveti etki etmektedir. Buda hepimizin bildiği gibi yaklaşık olarak $9.8m/s^2$ dir ve dünyadaki bulunduğunuz noktaya göre değişiklik göstermektedir. Sensör sürekli olarak yer çekimi etkisi altında kaldığından eğim ölçer (örneğin yeni nesil akıllı cep telefonlarında kullanılmaktadır ve siz telefonu dikey veya yatay konuma getirdiğinizde telefonun ekranı hareketinize göre değişmektedir) veya hareket algılayıcı (nintendo wii gibi ürünlerde elinizi salladığınızda oyundaki karakterlerde benzeri bir hareket yapar) olarak kullanılabilir. Ölçü skalası olarak $\pm 1g, \pm 2g, \pm 4g \dots$ gibi değerler ile ifade edilmektedir ve bir, iki ve üç eksende ölçüm yapabilen türleri vardır. Şimdi bu sensörlerin nasıl çalıştığına bakalım.

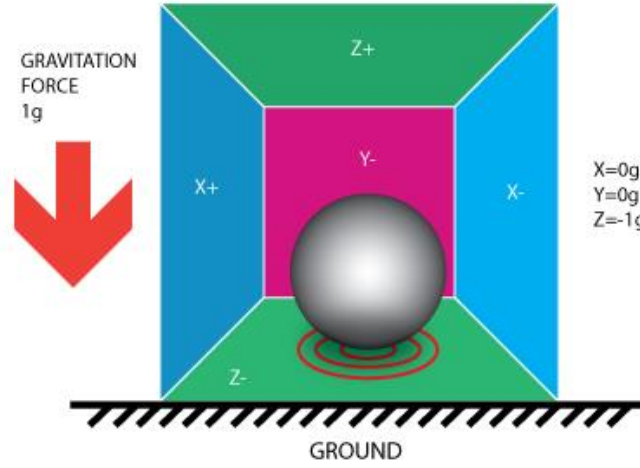
Şimdi uzayda olduğunuzu düşünün. Herhangi bir çekim etkisi yok ve ağırlığınız 0 dır. Önünüzde de aşağıdaki şekildeki gibi bir kutu, kutunun ortasında bir küre olduğunu hayal edin. Herhangi bir çekim etkisi olmadığından küre herhangi bir yüzeye temas etmeden hareketsiz bir şekilde durmaktadır. Kürenin hareketini görebilmek için kutunun $+Y$ yönünde kalan yüzeyinde kesip atalım.



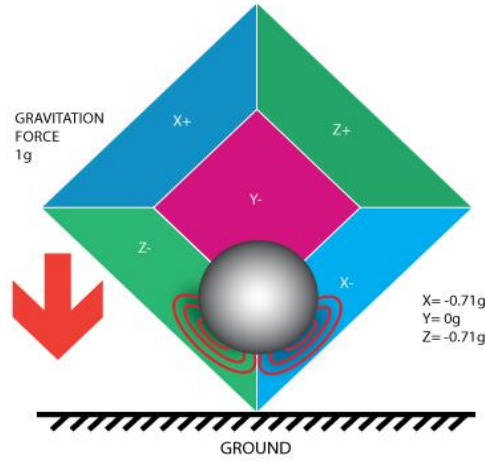
Kutuyu elinizde tutup +X yönünde 1 g kuvveti ile hızlandırdığımızda küre kutunun -X yüzeyine eylemsizlikten dolayı 1 g lik bir kuvvet uygulayacaktır.



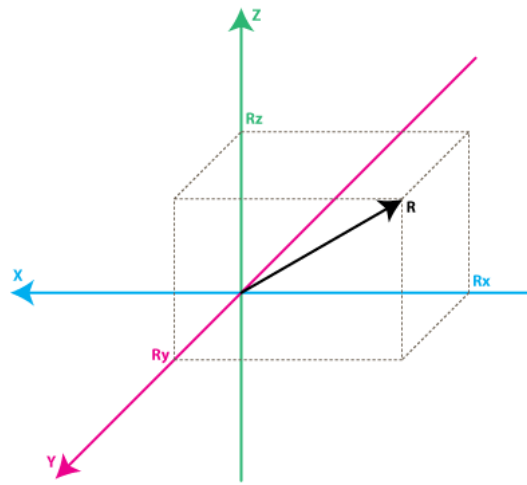
Şimdi kutumuzu alıp dünyaya dönelim. Kutuyu yere koyduğumuzda dünyamızın 1 g lik yer çekimi kuvvetinden dolayı küre -Z yüzeyine 1 g kuvvet uygular.



İvmeölçerlerde benzer bir şekilde çalışmaktadır. Yüzeyleri basınca (piezoelektrik olabilir) veya manyetik alana tepki verecek şekilde yapılmaktadır ve ivmeölçerde bu tepkiyi ölçerek bize bir değer vermektedir. Sensörün yer yüzü ile yaptığı açı değiştiğinde sensörün eksenlerine uygulanan kuvvette değişecektir ve bizde yeni değerleri okuyarak yeryüzü ile yaptığımız açıyı trigonometri yardımıyla hesaplarız. Örneğin kutumuzu 45 derece sağa doğru çevirdiğimizi düşünelim. Bu durumda kürenin $-X$ ve $-Z$ yüzeylerine kök içinde $\frac{1}{2}$ lik bir kuvvet uygulanır oda $0,707g$ ye eşittir.



Şimdi kutu modelinden koordinat sistemi modeline geçelim ve aşağıdaki şekli inceleyelim.



Burada R vektörü ivmeölçerimiz üzerine düşen kuvvet vektörü olsun. Bu kuvvet yukarıda anlattığımız gibi yerçekimi veya sensörün hareketi sonucu yerçekimi kuvveti ile eylemsizlik kuvvetinin bileşkesi olabilir. R vektörünün 3 bileşeni vardır ve $R=[R_x,R_y,R_z]$ olarak ifade edilmektedir. Pisagor teoreminden R vektörünü bu bileşenlerden aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz.

$$R^2=R_x^2+R_y^2+R_z^2$$

R_x , R_y ve R_z bileşenlerini bildiğimiz takdirde yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi trigonometrik fonksiyonlar yardımı ile R vektörünün X ve Y eksenleri ile yaptığı açıları hesaplayıp sensörümüzün yeryüzüne göre konumunu bulabiliriz. R vektörünün bileşenlerindeki bize ivme ölçer g kuvveti türünden vermektedir. Şimdi bir örnek yapıp konuyu anlayalım.

Analog sensör kullandığımızı, besleme gerilimimizin 3V3 olduğunu ve 10 bitlik bir ADC kullandığımızı varsayalım. Accelerometerdan ADC yardımı ile aşağıdaki binary değerleri okuduğumuzu varsayalım. Bu değerler ile işlem yapabilmek için g türünden ifade edebilmemiz gerekmektedir. Bunun içinde ADC den okuduğumuz değerleri voltaj türünden ifade etmeli ve kullandığımız sensörün datasheetinden faydalanarak bu voltaj değerlerini g kuvveti türünden ifade etmemiz gerekmektedir. Böylece elde ettiğimiz değerleri trigonometrik fonksiyonlar ile açığa çevirebiliriz.

$$AdcR_x=586$$

$$AdcR_y=630$$

$$AdcR_z = 561$$

Bu değerler ham binary değerlerdir ve volt türünden ifade edebilmek için LSB başına düşen gerilim miktarı ile çarpmamız gerekmektedir. Besleme 3V3 olduğundan ve 10bit ADC kullandığımızdan yukarıdaki değerleri $3.3V/ 2^{10}$ ile çarparsak volt değerlerini elde ederiz.

$$\text{VoltsRx} = 586 * 3.3\text{V} / 1023 = \sim 1.89\text{V}$$

$$\text{VoltsRy} = 630 * 3.3\text{V} / 1023 = \sim 2.03\text{V}$$

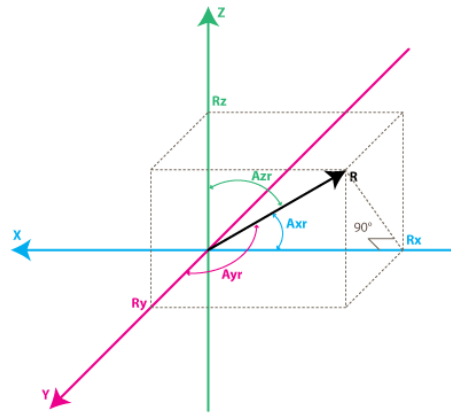
$$\text{VoltsRz} = 561 * 3.3\text{V} / 1023 = \sim 1.81\text{V}$$

Bu değerleride g türünde ifade etmemiz gerekmektedir. Her ivmeölçerin 0g de vermiş olduğu bir gerilim değeri vardır ve Zero-G değeri olarak isimlendirilmektedir. Bu değer genelde $V_{dd}/2$ dir (bizim örneğimizde $3.3/2=1.65\text{V}$. Kullandığımız sensörün datasheetinden bakabilirsiniz. Yukarıdaki voltaj değerlerinden bu değeri çıkartıp sensörün hassasiyeti ile çarparsak hangi eksenine ne kadar kuvvet uygulandığını bulabiliriz. Sensör hassasiyetide 0.4785V/g olsun. O halde tam denkleminiz aşağıdaki gibi olur ve yukarıdaki değerleri denkleminde yerine koyarsak eksenlere uygulanan kuvvetleri bulabiliriz.

$$R_x = (\text{AdcRx} * V_{\text{ref}} / 1023 - V_{\text{zeroG}}) / \text{Sensitivity} = (586 * 3.3\text{V} / 1023 - 1.65\text{V}) / 0.4785\text{V/g} = \sim 0.5\text{g}$$

$$R_y = (\text{AdcRy} * V_{\text{ref}} / 1023 - V_{\text{zeroG}}) / \text{Sensitivity} = (630 * 3.3\text{V} / 1023 - 1.65\text{V}) / 0.4785\text{V/g} = \sim 0.79\text{g}$$

$$R_z = (\text{AdcRz} * V_{\text{ref}} / 1023 - V_{\text{zeroG}}) / \text{Sensitivity} = (561 * 3.3\text{V} / 1023 - 1.65\text{V}) / 0.4785\text{V/g} = \sim 0.33\text{g}$$



Şimdi yukarıdaki şekilde gösterilen R vektörünün X ve Y eksenleri ile yaptığı açıları hesaplayalım. Şekilde görülen A_{xr} açısının cosinüsü bize R_x/R değerini vermektedir. R_x ve R değerleri bilindiğine göre arccosinüs ile A_{xr} açısını elde edebiliriz. Benzer şekilde A_{yr} açısını hesaplayabiliriz. R vektörünüde yukarıdaki birinci eşitlikten hesaplayıp aşağıdaki arccos fonksiyonlarına değerleri koyduğumuzda istediğimiz açıları almış oluruz.

$$\cos(A_{xr})=R_x/R, A_{xr}=\arccos(R_x/R)$$

$$\cos(A_{yr})=R_y/R, A_{yr}=\arccos(R_y/R)$$

$$\cos(A_{zr}) = R_z / R , A_{zr} = \arccos(R_z/R)$$

3.2 Gyroscopes

Jiroskop olarak bilinen alet ilk olarak 1817'de J. Bohnenberger tarafından icat edilmiştir ve jiroskop adı 1852'de Dünya'nın dönüş hareketini incelemek üzere yaptığı deneyler sırasında J. Foucault tarafından verilmiştir. Bir jiroskop presesyon ve nutasyon olarak bilinen hareketleri de içine alan çeşitli hareketler yapar.

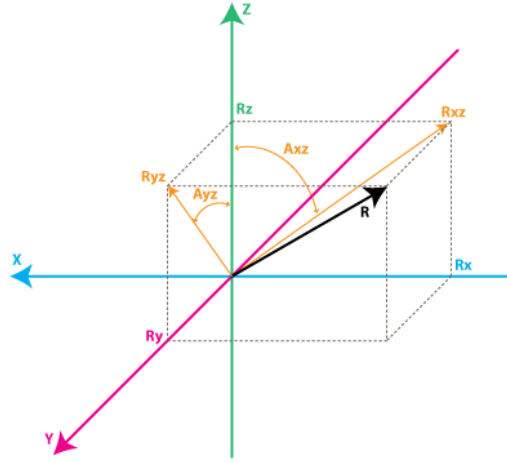


Şeki 10. Jiroskop

Bugün, jiroskop denilen cihaz teknolojide birçok alanda kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ve cihazlardaki teknolojik özelliklerin hızla artması bu tip aygıtlarında gelişerek, teknolojik aygıtlara penetre olmasını hızlandırdı. Artık herkesin 7 den 70 e elinden düşürmediği telefonlarımız, tabletler, uydu sistemleri, uçak ve birçok alanda kullanımı mevcuttur. Gemilerin hareketini kontrol için kullanıldığı gibi silah yörüngesi kontrolünde güdümlü füzeler vb. ve yön tayininde de kendisinden faydalanılır.

Gyroscopelar basitçe bir tekerleğin eksenini etrafında hızlıca döndürülmesi sonucu ortaya çıkarlar. Tekerleğin etrafındaki çembere dik açıyla kenetlenmiş başka bir çember ve bu çemberlere dik açıyla tutturulmuş başka bir çember jiroskobu modeller. Jiroskobun öne çıkan iki özelliği vardır. Yatay ekseninde dönmekte olan bir jiroskopa yatay eksen doğrultusunda bir kuvvet uyguladığımızda yatay eksen etrafında dönmek yerine eksen etrafında dönmeye başlar. Diğer bir özelliği ise jiroskopun dönmeye başladığı eksenin jiroskobun durduğu yüzey ne açıyla oynatılırsa oynatılsın jiroskobun dönüş eksenini sabit kalır. Bu özelliğinden dolayı uyduların sürekli olarak dünyaya dönük kalması, uçaklarda ve çeşitli araçlarda yapay ufuk oluşturulması ve otopilot gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Piyasada entegre devre olarak satılan modelleri rahatlıkla bulunmaktadırlar. İvmeölçerlerde olduğu gibi bir, iki veya üç ekseninde ölçüm yapabilen modelleri vardır ve saniyedeki dönüş hızını ölçümüne göre değerlendirilmektedirler. Bu hızların üzerindeki dönüşler sonucu sensör çıkışları anlamsız olabilmektedir. Uygulamanızda kullanacağınız sensörü bu özellikler ve hassasiyetine bakarak alabilirsiniz. Şimdi IMU başlığında ivme ölçer ve gyroyu beraber kullanacağımızdan tekrar ivme ölçer konusunda kullandığımız koordinat sistemlerine dönelim ve sensörlerin bu modele göre nasıl kullanılabilabileceğine bakalım.



İki eksen (X,Y) gyro kullandığımızı düşünerek devam edelim. Buradaki R vektörünün XZ uzayındaki izdüşümü Rxz, YZ uzayındaki izdüşümü ise Ryz vektörü ile ifade edilmektedir. Bu vektörleri pisagor teoreminden ;

$$R_{xz}^2 = R_x^2 + R_z^2$$

$$R_{yz}^2 = R_y^2 + R_z^2 \quad \text{olarak hesaplayabiliriz.}$$

Vektörlerin Z eksenini ile yapmış olduğu açılar ise Axz ve Ayz dir. Sistemi Y eksenini etrafında döndürdüğümüzde Axy açısı, X eksenini etrafında döndürdüğümüzde ise Ayz açısı değişecektir. Gyroscope un dönüş hızını ölçtüğünü söylemiştik. Dönüş hızını zaman ile çarparsak dönüş açısını elde etmiş oluruz. t0 anındaki açımızın Axz0 olduğunu ve t1 anındaki açımızın ise Axz1 olduğunu düşünelim. O halde dönüş açımız

$$(Axz1 - Axz0) = Rate_{Axz} * (t1 - t0) \text{ ile ifade edilir.}$$

Sensörden alacağımız değerleri dönüş hızına çevirmek içinse aşağıdaki formülleri kullanabiliriz.

$$Rate_{Axz} = (AdcGyroXZ * V_{ref} / 1023 - V_{zeroRate}) / Sensitivity$$

$$Rate_{Ayz} = (AdcGyroYZ * V_{ref} / 1023 - V_{zeroRate}) / Sensitivity$$

Yine analog sensör kullandığımızı, 3v3 ile çalıştığımızı ve 10bit adc ile örnekleme yaptığımızı düşünelim. Sensörlerin hareketsiz durumda sabit olarak vermiş olduğu bir gerilim vardır ve VzeroRate olarak isimlendirilir. Bu gerilimi binary değerden elde ettiğimiz gerilimden çıkartmamız gerekmektedir.Örneğimiz için 1.23V olduğunu düşünelim. Sensör hassasiyetimiz ise volt başına 0.002 deg/s olsun. Bu değerleri kullanacağımız sensörün datasheetinden elde edebilirsiniz. gyroX ten 571 gyroY den 323 binary değerini okuduğumuzu düşünelim. Tüm bu değerleri yerine koyduğumuzda dönüş hızlarını aşağıdaki gibi buluruz.

$$\text{RateAxz}=(571*3.3\text{V}/1023-1.23\text{V})/(0.002\text{V}/\text{deg}/\text{s})\sim 306\text{deg}/\text{s}$$

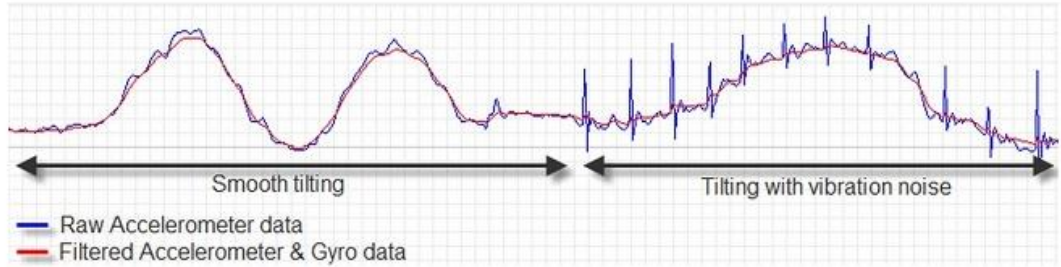
$$\text{RateAyz} = (323 * 3.3\text{V} / 1023 - 1.23\text{V}) / (0.002\text{V}/\text{deg}/\text{s}) =\sim -94 \text{ deg}/\text{s}$$

Elde ettiğimiz değerler görüldüğü gibi açısal hızlardır. Bu değerleride iki örnekleme arasında geçen süre ile çarparsak dönüş açımızı elde ederiz. Örneğin 1ms de örnekleme yaptığımızı farz edersek X için dönüş açısı 0.306 derece, Y için dönüş açısı -0.094 derece olacaktır.

3.3 IMU (Inertial Measurement Unit)

Gyroscope ve accelerometer tek başlarına bize yeterince ve güvenli bilgi vermezler. Bu yüzden bu iki sensörü birleştirerek yönelim, hız, pozisyon gibi bilgileri tek bir uniteden alabiliriz. Bu uniteye IMU (Inertial Measurement Unit) denilmektedir. Serbestlik derecesi DOF (Degrees of Freedom) ile ifade edilmektedirler. Örneğin 2 eksen gyro ve 3 eksen ivmeölçeriniz varsa 5DOF IMU elde etmiş olursunuz.

Gyro ve accelerometer bias drift adı verilen bir kayma yaparlar ve bundan dolayı hassas açı ölçümünde tek başlarına kullanılamazlar. Ayrıca accelerometerlar kuvvete karşı çok duyarlı olduğundan en ufak titreşimlerde çok yüksek gürültüler oluşturmaktadırlar. Gyroların bu kuvvetlerden etkilenmediğini söylemiştik. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi gyrolar ivmeölçer çıkışlarını filitreleyerek daha doğru bir ölçüm yapmamızı sağlarlar.



Filtreleme için çeşitli algoritmalar bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılanlarından birtanesi kalman filitresidir. Sistemin bir önceki çıkışları ile yeni ölçümlerinden yeni çıkışları tahmin edecek şekilde çalışmaktadır.

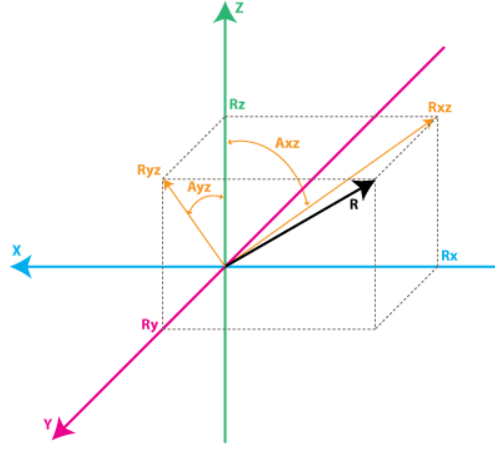
Başlamak için accelerometer ve gyro koordinat sistemlerini birleştirmemiz gerekmektedir. Bunun için accelerometer koordinat sistemini referans olarak seçmeli ve sensörlerin XZ ile YZ düzlemlerini karşılaştırmamız gerekmektedir. Bu işlemleri yaptıktan sonra ivmeölçer verilerini filitemiz için direk giriş olarak kullanacağız. Be verilerin aşağıdaki formül ile hesaplandığını hatırlayalım.

$$\begin{aligned} R_{xAcc} &= (AdcRx * Vref / 1023 - VzeroG) / Sensitivity \\ R_{yAcc} &= (AdcRy * Vref / 1023 - VzeroG) / Sensitivity \\ R_{zAcc} &= (AdcRz * Vref / 1023 - VzeroG) / Sensitivity \end{aligned}$$

İvmelenme (hızlanma, yavaşlama) gibi durumlarda sensör üzerine etkiyen kuvvet 1g den büyük veya küçük olabilmektedir. İşlem yapabilmek için önce R vektörünü normalize etmemiz gerekmektedir. Bunun için aşağıdaki işlemleri kullanabiliriz. Bunlar R vektörünün her zaman 1g ye eşit olmasını sağlayacaktır.

$$\begin{aligned} |R_{acc}| &= \sqrt{R_{xAcc}^2 + R_{yAcc}^2 + R_{zAcc}^2} \\ R_{acc}(\text{normalized}) &= [R_{xAcc}/|R_{acc}|, R_{yAcc}/|R_{acc}|, R_{zAcc}/|R_{acc}|] \end{aligned}$$

Şimdi filtre çıkışından tahmin edilen $R_{est} = [R_{xEst}, R_{yEst}, R_{zEst}]$ vektörümüz olsun. Yapacağımız iş accelerometer çıkışlarını okuyup gyro çıkışları ile gerçekten bir dönüş hareketi yapıyor muyuz diye karşılaştırmaktır. Bunun için t_0 anında $R_{est}(0) = R_{acc}(0)$ vektörlerini birbirine eşitlememiz gerekmektedir. Daha sonra T aralıkları ile düzenli örnekler alıp yeni örnek ile önceki çıkışları işleme sokmamız gerekmektedir. Hesaplamalara gyro ile başlayalım ve vektörünü $R_{gyro} = [R_{xGyro}, R_{yGyro}, R_{zGyro}]$ olarak ifade edelim.



Şekilde görülen Axz açısını $\tan(Axz) = Rx/Rz \Rightarrow Axz = \text{atan2}(Rx, Rz)$ ile hesaplarız. Burada atan2 fonksiyonu bize açı değerini $-\pi$ ile π aralığında verecektir. $Rx_{Est}(n-1)$, ve $Rz_{Est}(n-1)$ değerlerini bildiğimiz için bir önceki Axz açısı olan $Axz(n-1)$ şöyle hesaplayabiliriz.

$$Axz(n-1) = \text{atan2}(Rx_{Est}(n-1) , Rz_{Est}(n-1))$$

Gyro Axz açısının değişim hızını ölçtüğünden yeni Axz açısını $Axz(n) = Axz(n-1) + \text{RateAxz}(n) * T$ şeklinde hesaplayabiliriz. İfade kolaylığı açısından $|R_{gyro}| = 1$ $x = Rx_{Gyro}$, $y = Ry_{Gyro}$, $z = Rz_{Gyro}$ yazalım.

$x = x / 1 = x / \text{SQRT}(x^2 + y^2 + z^2)$ eşitliğinde payı ve paydayı $\text{SQRT}(x^2 + z^2)$ e bölelim. Yeni sonucumuz

$x = (x / \text{SQRT}(x^2 + z^2)) / \text{SQRT}((x^2 + y^2 + z^2) / (x^2 + z^2))$ şeklinde olacaktır. $x / \text{SQRT}(x^2 + z^2) = \sin(Axz)$ olduğundan

$x = \sin(Axz) / \text{SQRT}(1 + y^2 / (x^2 + z^2))$ yazabiliriz. Şimdi kökün içindeki pay ve paydayı z^2 ile çarpalım.

$x = \sin(Axz) / \text{SQRT}(1 + y^2 * z^2 / (z^2 * (x^2 + z^2)))$ elde ederiz. $z / \text{SQRT}(x^2 + z^2) = \cos(Axz)$ ve $y / z = \tan(Ayz)$ olduğundan

$$R_{xGyro} = \sin(A_{xz}(n)) / \sqrt{1 + \cos(A_{xz}(n))^2 \tan(A_{yz}(n))^2}$$

$R_{yGyro} = \sin(A_{yz}(n)) / \sqrt{1 + \cos(A_{yz}(n))^2 \tan(A_{xz}(n))^2}$ şeklinde elde ederiz.
gyroZ ise

$R_{zGyro} = \text{Sign}(R_{zGyro}) * \sqrt{1 - R_{xGyro}^2 - R_{yGyro}^2}$ şeklindedir. Burada $R_{zGyro} \geq 0$ olduğunda $\text{Sign}(R_{zGyro}) = 1$, ve $R_{zGyro} < 0$ olduğunda $\text{Sign}(R_{zGyro}) = -1$ olur. Ayrıca Rz Axz ve Ayz açılarını hesaplamada kullanıldığından 0 a yaklaştığında istenmeyen sonuçlar elde edilebilir. Bu durumda bir önceki çıkışları yeni gyro ölçümü olarak alabiliriz. Şimdi elimizde Racc ve Rest(n-1) vektöründen elde ettiğimiz Rgyro vektörleri olduğuna göre Rest(n) vektörünü hesaplayalım. Bunun için ağırlıklı ortalama alacağız.

$$\text{Rest}(n) = (R_{acc} * w_1 + R_{gyro} * w_2) / (w_1 + w_2)$$

Formülde pay ve paydayı w_1 ile bölüp $w_2/w_1 = w_{Gyro}$ yazarsak

$\text{Rest}(n) = (R_{acc} + R_{gyro} * w_{Gyro}) / (1 + w_{Gyro})$ denklemini elde ederiz. Burada w_{Gyro} accelerometa oranla gyroya ne kadar güvenebileceğimizi belirtmektedir. Starlino 5-20 arası değerlerin deneysel olarak iyi sonuç verdiğini yazmış. Rest vektörünü de normalize ederek açı hesaplamasında kullanabiliriz.

$$R = \sqrt{R_{xEst}(n)^2 + R_{yEst}(n)^2 + R_{zEst}(n)^2}$$

$$R_{xEst}(n) = R_{xEst}(n) / R$$

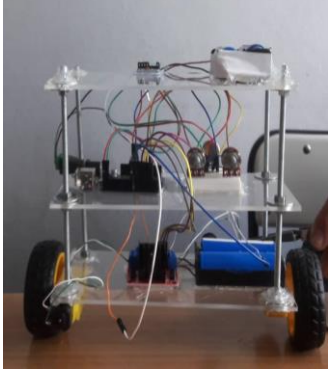
$$R_{yEst}(n) = R_{yEst}(n) / R$$

$$R_{zEst}(n) = R_{zEst}(n) / R$$

Yukarıdaki algoritmada w_{Gyro} değeri sabit bir değerdir fakat Kalman filtresinde bu değer accelerometer gürültüsü analiz edilerek yeniden hesaplanmaktadır. Kalman filtresi sistemin sürekli değişen girişlerini izleyerek bir sonraki çıkışın en iyi değerini tahmin etmektedir. Görüntü işlemeden, yönelim, hareket takibi gibi bir çok alanda kullanılmaktadır.

BÖLÜM 4

4. Projede Kullanılan Malzemeler



Şekil 11. Denge robotu

4.1 6V 250 Rpm Motor ve Tekerlek Seti

Plastik redüktörlü motor ve tekerlek seti basit uygulamalarda kullanabileceğiniz bir üründür. Motorda iki ayrı noktadan mil çıkışı olduğu için sağ ve sol kullanımlarda rahatlıkla kullanılabilir.

Özellikler

- **Çalışma Voltajı:** 3-6 V
- **Hız:** 250 Rpm
- **Ağırlık:** 29 gr.

Teker Ölçüleri

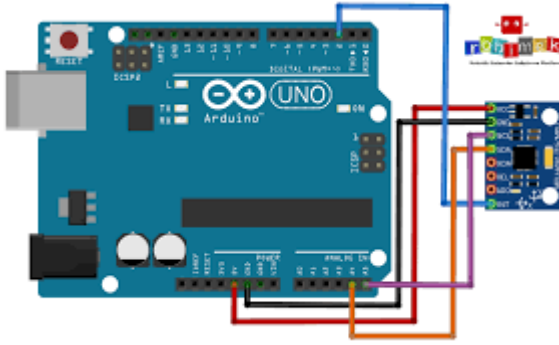
- **Çapı:** 65mm
- **Kalınlık:** 30 mm
- **Ağırlık:** 45 gr.



Şekil 12. 6V 250 Rpm motor ve tekerlek seti

4.2 MPU6050 6 Eksen İvme ve Gyro Sensörü gy-521

MPU-6050 çeşitli hobi, multicopter ve robotik projelerinde sıklıkla kullanılan üzerinde 3 eksenli bir gyro ve 3 eksenli bir açısal ivme ölçer bulunduran 6 eksenli bir IMU sensör kartıdır. Kart üzerinde voltaj regülatörü bulunduğundan 3 ile 5 V arası bir besleme voltajı ile çalıştırılabilir. İvme ölçer ve gyro çıkışlarının her ikisi de ayrı kanallardan I²C çıkışı vermektedir. Her eksende 16 bitlik bir çözünürlükle çıkış verebilmektedir. Pinler arası boşluk standart olarak ayarlandığı için breadboard veya farklı devre kartlarında rahatlıkla kullanılabilir.



Şekil 13. MPU6050 6 eksen ivme ve gyro sensörü gy-521 ve çalışma prensibi

Özellikler

- İvme ölçer ve gyro çıkışlarının her ikisi de ayrı kanallardan I²C çıkışı vermektedir.
- Her eksende 16 bitlik bir çözünürlükle çıkış verebilmektedir.
- Pinler arası boşluk standart olarak ayarlandığı için breadboard veya farklı devre kartlarında rahatlıkla kullanılabilir.

Kullanımı

- Kart üzerinde voltaj regülatörü bulunduğundan 3 ile 5 V arası bir besleme voltajı ile çalıştırılabilir.
- Kart I2C protokolünü desteklediğinden üzerindeki pinler standart I2C pinleridir ve arduionun standart I2C pinlerine takılmalıdır.

Teknik Özellikleri

- **Çalışma gerilimi:** 3V - 5V,
- **Gyro ölçüm aralığı:** + 250 500 1000 2000 ° / s,
- **Açısal ivme ölçer ölçüm aralığı:** $\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16$ g,
- **İletişim:** Standart I²C.

4.3 L298N Motor Sürücü Kartı

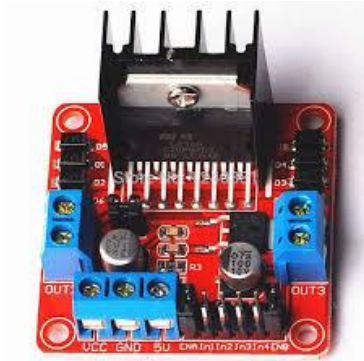
Kart üzerinde 1 adet L298N motor sürücü entegresi mevcuttur. Kanal başına 2A'e kadar akım verebilmektedir. Motor voltajı 6-15V arası kullanılabilir. Besleme gerilimi 5V ise kart üzerindeki Vcc-5V jumpere kısa devre yapılarak kullanılmaktadır. Kartın kullanılmayan tüm pinleri kart üzerindeki 4'lü konnektörlere çevrilerek genel kullanım için bırakılmıştır.

Özellikler

- 2 adet DC motorun bağımsız kontrolü
- 1 adet step motorun bağımsız kontrolü
- Her bir kanaldan sürekli 2A'e kadar verebilmektedir.

Ürün Boyutları: 68x55x30mm

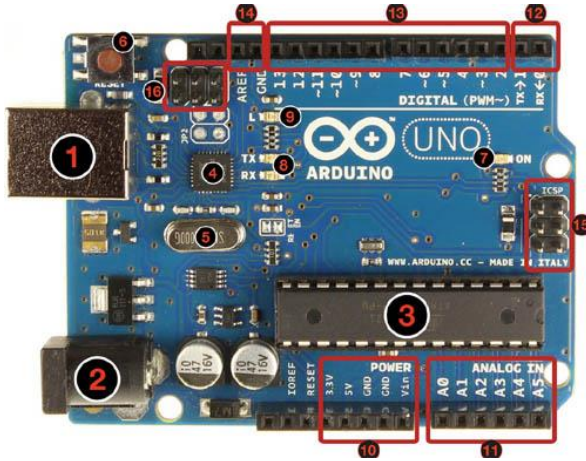
Ağırlık: 37g



Şekil 14. L298N Motor sürücü kartı

4.4 Arduino UNO R3

Arduino bir G/Ç kartı ve Processing/Wiring dilinin bir uygulamasını içeren geliştirme ortamından oluşan bir fiziksel programlama platformudur. Arduino kartlarının donanımında bir adet Atmel AVR mikrodenetleyici (ATmega328, ATmega2560, ATmega32u4 gibi) ve programlama ve diğer devrelere bağlantı için gerekli yan elemanlar bulunur. Her Arduino kartında en azından bir 5 voltluk regüle entegresi ve bir 16MHz kristal osilatör (bazılarında seramik rezonatör) vardır. Arduino kartlarında programlama için harici bir programlayıcıya ihtiyaç duyulmaz, çünkü karttaki mikrodenetleyiciye önceden bir bootloader programı yazılıdır. Arduino Uno ATmega328 mikrodenetleyici içeren bir Arduino kartıdır. Arduino 'nun en yaygın kullanılan kartı olduğu söylenebilir. Arduino Uno 'nun ilk modelinden sonra Arduino Uno R2, Arduino Uno SMD ve son olarak Arduino Uno R3 çıkmıştır. Arduino 'nun kardeş markası Genuino Uno kartı ile tamamen aynı özelliklere sahiptir. Arduino Uno 'nun 14 tane dijital giriş / çıkış pini vardır. Bunlardan 6 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir. Ayrıca 6 adet analog girişi, bir adet 16 MHz kristal osilatörü, USB bağlantısı, power jakı (2.1mm), ICSP başlığı ve reset butonu bulunmaktadır. Arduino Uno bir mikrodenetleyiciyi desteklemek için gerekli bileşenlerin hepsini içerir. Arduino Uno 'yu bir bilgisayara bağlayarak, bir adaptör ile ya da pil ile çalıştırabilirsiniz. Aşağıdaki resimde Arduino Uno R3 'ün kısımları gösterilmektedir.



Şekil 15. Arduino UNO R3

- 1 : USB jakı
- 2 : Power jakı (7-12 V DC)
- 3 : Mikrodenetleyici ATmega328
- 4 : Haberleşme çipi
- 5 : 16 MHz kristal
- 6 : Reset butonu
- 7 : Power ledi
- 8 : TX / NX ledleri
- 9 : Led
- 10 : Power pinleri
- 11 : Analog girişler
- 12 : TX / RX pinleri
- 13 : Dijital giriş / çıkış pinleri (yanında ~ işareti olan pinler PWM çıkışı olarak kullanılabilir.)
- 14 : Ground ve AREF pinleri
- 15 : ATmega328 için ICSP
- 16 : USB arayüzü için ICSP

Arduino UNO Teknik Özellikleri:

- Mikrodenetleyici : ATmega328
- Çalışma gerilimi : +5 V DC
- Tavsiye edilen besleme gerilimi : 7 - 12 V DC
- Besleme gerilimi limitleri : 6 - 20 V
- Dijital giriş / çıkış pinleri : 14 tane (6 tanesi PWM çıkışını destekler)
- Analog giriş pinleri : 6 tane
- Giriş / çıkış pini başına düşen DC akım : 40 mA
- 3,3 V pini için akım : 50 mA
- Flash hafıza : 32 KB (0.5 KB bootloader için kullanılır)
- SRAM : 2 KB
- EEPROM : 1 KB
- Saat frekansı : 16 MHz

4.4.1 Güç

Arduino Uno bir USB kablosu ile bilgisayar bağlanarak çalıştırılabilir ya da harici bir güç kaynağından beslenebilir. Harici güç kaynağı bir AC-DC adaptör ya da bir pil/batarya olabilir. Adaptörün 2.1 mm jaklı ucunun merkezi pozitif olmalıdır ve Arduino Uno 'nun power girişine takılmalıdır. Pil veya bataryanın uçları ise power konnektörünün GND ve Vin pinlerine bağlanmalıdır.

- **VIN** : Arduino Uno kartına harici bir güç kaynağı bağlandığında kullanılan voltaj girişidir.
- **5V** : Bu pin Arduino kartındaki regülatörden 5 V çıkış sağlar. Kart DC power yakından (2 numaralı kısım) 7-12 V adaptör ile, USB yakından (1 numaralı kısım) 5 V ile ya da **VIN** pininden 7-12 V ile beslenebilir. **5V** ve **3.3V** pininden voltaj beslemesi regülatörü bertaraf eder ve karta zarar verir.
- **3.3V** : Arduino kart üzerindeki regülatörden sağlanan 3,3V çıkışıdır. Maksimum 50 mA dir.
- **GND** : Toprak pinidir.
- **IOREF** : Arduino kartlar üzerindeki bu pin, mikrodenetleyicinin çalıştığı voltaj referansını sağlar. Uygun yapılandırılmış bir shield IOREF pin voltajını okuyabilir ve uygun güç kaynaklarını seçebilir ya da 3.3 V ve 5 V ile çalışmak için çıkışlarında gerilim dönüştürücülerini etkinleştirebilir.

4.4.2 Giriş ve Çıkışlar:

Arduino Uno 'da bulunan 14 tane dijital giriş / çıkış pininin tamamı, pinMode(), digitalWrite() ve digitalRead() fonksiyonları ile giriş ya da çıkış olarak kullanılabilir. Bu pinler 5 V ile çalışır. Her pin maksimum 40 mA çekebilir ya da sağlayabilir ve 20-50 KOhm dahili pull - up dirençleri vardır. Ayrıca bazı pinlerin özel fonksiyonları vardır:

- **Serial 0 (RX) ve 1 (TX) :** Bu pinler TTL seri data almak (receive - RX) ve yaymak (transmit-TX) içindir.
- **Harici kesmeler (2 ve 3) :** Bu pinler bir kesmeyi tetiklemek için kullanılabilir.
- **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, ve 11 :** Bu pinler analogWrite () fonksiyonu ile 8-bit PWM sinyali sağlar.
- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK) :** Bu pinler SPI kütüphanesi ile SPI haberleşme sağlar.
- **LED 13 :** Dijital pin 13 e bağlı bir led dir. Pinin değeri High olduğunda yanar, Low olduğunda söner.

Arduino Uno 'nun A0 dan A5 e kadar etiketlenmiş 6 adet analog girişi bulunur, her biri 10 bitlik çözünürlük destekler. Varsayılan ayarlarda topraktan 5 V a kadar ölçerler. Ancak, AREF pini ve analogReference() fonksiyonu kullanılarak üst limit ayarlanabilir.

- **TWI :** A4 ya da SDA pini ve A5 ya da SCL pini Wire kütüphanesini kullanarak TWI haberleşmesini destekler.
- **AREF :** Analog girişler için referans voltajıdır. analogReference() fonksiyonu ile kullanılır.
- **RESET :** Mikrodenetleyiciyi resetlemek içindir. Genellikle shield üzerine reset butonu eklemek için kullanılır.

4.4.3 Haberleşme:

Arduino Uno bir bilgisayar ile, başka bir Arduino ile ya da diğer mikrodenetleyiciler ile haberleşme için çeşitli imkanlar sunar. ATmega328 mikrodenetleyici, RX ve TX pinlerinden erişilebilen UART TTL (5V) seri haberleşmeyi destekler. Kart üzerindeki bir ATmega16U2 seri haberleşmeyi USB üzerinden kanalize eder ve bilgisayardaki yazılıma sanal bir com portu olarak görünür. 16U2 standart USB com sürücülerini kullanır ve harici sürücü gerektirmez. Ancak, Windows 'ta bir .inf dosyası gereklidir. Kart üzerindeki RX ve TX ledleri USB den seri çipe ve USB den bilgisayara veri giderken yanıp söner. SoftwareSerial kütüphanesi Arduino Uno'nun digital pinlerinden herhangibiri üzerinden ser ihaberleşmeye imkan sağlar.Ayrıca ATmega328 I2C (TWI) ve SPI haberleşmelerini de destekler.

4.5 Potansiyometre



Şekil 16. 10K potansiyometre

Potansiyometre, dışardan fiziksel müdahalelerle değeri değiştirilen dirençlerdir. Potansiyometrelerin daha güçlü daha yüksek akım değerine sahip olana reosta denir. Potansiyometreler daha çok karbon veya karbon içerikli direnç elemanlarından yapılıdır. Reosta ise krom-nikel direnç tellerinden yapılıdır. Potansiyometre devrelerde akımı sınırlandırmak ya da gerilimi bölmek amacıyla kullanılır.

Potansiyometre (ayarlı direnç) bir reosta çeşididir. Potansiyometre en basit anlamı ile bir tür sürgülü dirençtir. Potansiyometre belli bir elektromotor kuvveti (EMK) sayesinde, belli olmaya bir pilin elektromotor kuvvet (EMK)' sını tayin etmekte, direnç ve akımların ölçülmesinde kullanılır.

Potansiyometre genel olarak üç bacaklı olmaktadır. Bu bacakların ikisi iç yapısında sabit fakat üçüncü bacak ise iç yapısında hareketli bir yapıya sabittir. İşte bu hareketli yapı sayesinde sabit diğer iki baccaktan sürekli değişen bir voltaj çıkışı alabilmek mümkün hale gelmektedir. Ayarlı orta uç direnç üzerinde gezinir. Direnç değerinin değiştirilmesi yoluyla gerilim bölme, başka bir ifadeyle de çıkış gerilimini ayarlar.

BÖLÜM 5

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında iki tekerlekli bir denge robotu üzerinde çalışılmıştır. Sarkacın dikey pozisyonda olmadığı, salınımlar yaptığı ve tekerlek hareketinin hızla değiştiği grafiğin sonsuza gittiği görülmüş olup sarkacı dikey pozisyonda dengesini sağlamak ve tekerlek hareketini belirli bir aralıkta tutmak için PID kontrol eklenmiştir. PID Tuner seçeneği ile PID parametreleri ayarlanarak sisteme uygulanmıştır. PID kontrolör ters sarkaç ve denge robotu üzerinde başarılı bir performans göstermiştir. Sarkacın dikey pozisyonda dengesinin kontrolünü gerçekleştirmiştir. PID parametre ayarı değiştirilerek incelenecek olursa dikey pozisyonunu koruyacağı fakat yapacağı salınımlar ve sistemin titreşiminin artacağı görülür. Farklı PID değerleri ile de kararsız denge noktasındaki ($\theta=180^\circ$) denge sağlanabilmektedir. PID kontrolörü sisteme uygulanmadan önce tekerlek ve sarkaç hareketinin sonsuza doğru gittiği görülmüştür. PID kontrolü sonrasında tekerlek belirli bir aralıkta kalması sağlanmış ve sarkaç ise dikey pozisyonda dengesini koruyabilmektedir. Sistemde bir kontrolörle analiz yapılacaksa dinamik modellerin yerine kullanılabilmesi için başarılıdır. Ters sarkaç sistemi üzerinde birçok kontrol yönteminin denenmesi için uygun bir sistemdir. Bu çalışma da sadece PID kontrol ve etkileri incelenmiştir. SimMechanics arabirimi de kullanılarak farklı kontrol yöntemlerinin de performans analizleri araştırılabilir. Farklı kontrol yöntemleri ile konum kontrolü yapılabilir ya da eksen sayısı artırılarak inceleme yapılabilir.

BÖLÜM 6

6. ÖNERİLER

Bu sistem için biz PID Algoritma kullandık fakat, yapay sinir ağları kullanılarak daha etkili bir sistem oluşturulabilirdi. Yapay sinir ağlarından kısaca bahsetmek gerekirse; YSA; birbiriyle akson bağlantılarıyla haberleşen nöron (sinir hücresi) birimlerinin oluşturduğu gerçek sinir sistemlerinin soyut olarak simule edilmiş özel bir halidir. YSA, kendi kendini örgütleyebilmesi ve adaptif yapısı nedeniyle, geleneksel paralel işleme tekniklerinden kullanım kolaylığı ve hataları tolere edebilme yönleriyle ayrılmaktadır. Sinir ağlarının temel modeli ilk olarak 1943 yılında McCulloch ve Pitts tarafından, sinir sistemi aktivitesinin bilgisayar bilimi yaklaşımıyla modellenmesiyle gerçekleştirilmiştir. McCulloch ve Pitts'in modeline göre "nöron" ikili sayısal sisteme sahip bir cihazdır ve herbir nöronun kendi eşik değerine sahip olması nedeniyle, basit eşik mantığına (threshold logic) göre çalışmaktadır. D. O. Hebb, 1947'de yayınlanan "Davranışın Örgütlenmesi" (Organisation of Behavior) isimli çalışmasında; nöronların, kendi kendini örgütleyebilmeleri özellikleri sayesinde uygun biçimde birbirleriyle bağlantılar oluşturduklarını; nöronların ve aralarındaki bağlantıların, canlının öğrenme sürecine bağlı olarak sürekli bir biçimde değiştiğini yada yenilediğini ileri sürmüştür. YSA' nın hesaplama ve bilgi işleme gücünü, paralel dağılmış yapısından, öğrenebilme ve genelleme yeteneğinden aldığı söylenebilir. Genelleme, eğitim ya da öğrenme sürecinde karşılaşılmayan girişler için de YSA' nın uygun tepkileri üretmesi olarak tanımlanır. Bu üstün özellikleri, YSA' nın karmaşık problemleri çözebilme yeteneğini gösterir. Robot denge sisteminde ise YSA kullanırken Yapay sinir ağına girdi olarak robotun konumu, hızı ve ivmesi verilebilir ve hata ile geri beslemeli bir ağ oluşturulabilir. Bu sayede daha kararlı ve şartlara göre öğrenebilen bir robot elde edilebilir. Ayrıca bir diğer konu ise donanımla ilgili. Biz donanımı farklı parçalar bularak ve onları elimizde şekillendirerek yapmaya çalıştık. Bunun yerine 3D yazıcı kullanarak tam dengeli bir şasi yapabiliydik. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi, bir çok farklı malzemeyi kullanarak üç boyut modeli katmanlarına ayırıp, tasarlanan modeli gerçek bir ürün olarak ortaya çıkarır.

KAYNAKÇA

- [1] Grasser F., D'arrigo A., Colombi S. and Rufer A., "Joe: A Mobile, Inverted Pendulum", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, pp. 107-114,2002.
- [2] Li J., Gao X., Huang Q., Du Q. and Duan X., "Mechanical Design and Dynamic Modelling of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot", 2007, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp. 1614 Jinan, China, August 18, 2007.
- [3] Zhou W., 2008, "Platform for Ergonomic Steering Methods Investigation of "Segway-Style" Balancing Scooters", M.Sc. Thesis, Waikato, New Zealand.
- [4] Gocmen A., 2011, Design Of Two Wheeled Electric Vehicle, M.Sc Thesis, Atılım University, Mechatronic Engineering, Ankara.
- [5] Chi G., Hausbach J. and Hunter B., "Segbot", Senior Design Project, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 2005.
- [6] Nawawi S.W., Ahmad M. N. and Osman J. H. S., "Real-Time Control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot", World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 39, pp. 214-220, 2008.
- [7] Wei A. and Yangmin L., "Simulation and Control of a Twowheeled Self-balancing Robot", Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) Shenzhen, China, 456 – 461, 2013.
- [8] Chiu C. H., Peng Y. F., "Design and Implement of the SelfDynamic Controller for Two-Wheel Transporter", 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada, July 16-21, pp: 480-3, 2006.
- [9] Yamamoto Y., NXTway-GS Model-Based Design-Control of selfbalancing two-wheeled robot, built with LEGO Mindstorms NXT. Cybernet Systems Company, Ltd., 2008.

- [10] Pham D.T., Koç E., Ghanbarzadeh A., Otri S., Rahim S., Zaidi M., The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems, 2nd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 454-461, 2006
- [11] M.-a., Jiao, L.-f., Qiao, J.-f., & Ruan, X.-g. (2008). Balance control of robot with CMAC based Q-learning. In Chinese control and decision conference, 2008. CCDC 2008 (pp. 2668–2672).
- [12] C., Li, F., Wang, S., Dai, F., Bai, Y., Gao, X., et al. (2010). Dynamic adaptive equilibrium control for a self-stabilizing robot. In IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO), 2010 (pp. 609–614).
- [13] C., 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.2008.
- [14] B. D. O., Moore, J. B., 1989, Optimal Control – Linear Quadratic Methods, Prentice Hall, ISBN: 0 – 13 – 638651 – 2.
- [15] M.M., Koofigar, H.R., 2013, Model Predictive Control for a Two Wheeled Self Balancing Robot, Proceeding of the 2013 RSIISMInternational Conference on Robotics and Mechatronics, February 13-15, 2013, Tehran, Iran, 152 – 157.

ÖZGEÇMİŞ 1

Şeyma ŞENTÜRK 1996'da İstanbul'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Atakent Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2014 yılında Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü'ne yerleşti. Şuanda da bu bölümde eğitimini sürdürmektedir. Mekatronik mühendisliğinin, otomasyon ve tasarım alanları ile ilgilenmektedir. İş disiplinine sahip, verilen görevi zamanında yerine getiren, sosyal yönü kuvvetli, iletişim becerilerinde iyi bir kişiliğe sahiptir. Orta seviyede İngilizce bilmektedir.

İletişim:

E-posta: seymasntrk96@hotmail.com

Tel: 0541 201 7994

Adres: Cemil Meriç Mahallesi Ahmet Cevdet Paşa Caddesi Uygun Sokak No:14/1

İSTANBUL/ÜMRANİYE

ÖZGEÇMİŞ 2

Zeynep FINDIK 1996'da Sakarya'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Hendek Atike Hanım Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2014 yılında Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü'ne girdi. Şuanda da bu bölümde eğitimini sürdürmektedir. Mekatronik mühendisliğinin, tasarım alanı ile ilgilenmektedir. İş disiplinine sahip, verilen görevi zamanında yerine getiren, sosyal yönü kuvvetli, iletişim becerilerinde iyi bir kişiliğe sahiptir. Orta seviyede İngilizce bilmektedir.

İletişim:

E-posta: zeynepfindik96@hotmail.com

Tel: 0539 858 2370

Adres: Başpınar Mahallesi Remzi Efendi Caddesi No:11/3

SAKARYA/HENDEK