

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**



**TERS SARKAÇ
(INVERTED PENDULUM)**

TASARIM PROJESİ

Yasin SÖNMEZ

2015-2016 GÜZ DÖNEMİ

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**TERS SARKAÇ
(INVERTED PENDULUM)**

TASARIM PROJESİ

Yasin SÖNMEZ

Bu projenin teslim edilmesi ve sunulması tarafımda uygundur.

Danışman : Yar. Doç. Dr. Tuğrul ÇAVDAR

2015-2016 GÜZ DÖNEMİ



IEEE Etik Kuralları IEEE Code of Ethics



Mesleğime karşı şahsi sorumluluğumu kabul ederek, hizmet ettiğim toplumlara ve üyelerine en yüksek etik ve mesleki davranışta bulunmaya söz verdiğimi ve aşağıdaki etik kurallarını kabul ettiğimi ifade ederim:

1. Kamu güvenliği, sağlığı ve refahı ile uyumlu kararlar vermenin sorumluluğunu kabul etmek ve kamu veya çevreyi tehdit edebilecek faktörleri derhal açıklamak;
2. Mümkün olabilecek çıkar çatışması, ister gerçekten var olması isterse sadece algı olması, durumlarından kaçınmak. Çıkar çatışması olması durumunda, etkilenen taraflara durumu bildirmek;
3. Mevcut verilere dayalı tahminlerde ve fikir beyan etmelerde gerçekçi ve dürüst olmak;
4. Her türlü rüşveti reddetmek;
5. Mütenasip uygulamalarını ve muhtemel sonuçlarını gözeterek teknoloji anlayışını geliştirmek;
6. Teknik yeterliliklerimizi sürdürmek ve geliştirmek, yeterli eğitim veya tecrübe olması veya işin zorluk sınırları ifade edilmesi durumunda ancak başkaları için teknolojik sorumlulukları üstlenmek;
7. Teknik bir çalışma hakkında yansız bir eleştiri için uğraşmak, eleştiriye kabul etmek ve eleştiriye yapmak; hatları kabul etmek ve düzeltmek; diğer katkı sunanların emeklerini ifade etmek;
8. Bütün kişilere adilane davranmak; ırk, din, cinsiyet, yaş, milliyet, cinsi tercih, cinsiyet kimliği veya cinsiyet ifadesi üzerinden ayrımcılık yapma durumuna girişmemek;
9. Yanlış veya kötü amaçlı eylemler sonucu kimsenin yaralanması, mülklerinin zarar görmesi, itibarlarının veya istihdamlarının zedelenmesi durumlarının oluşmasından kaçınmak;
10. Meslektaşlara ve yardımcı personele mesleki gelişimlerinde yardımcı olmak ve onları desteklemek.

IEEE Yönetim Kurulu tarafından Ağustos 1990'da onaylanmıştır.

ÖNSÖZ

2012-13 döneminde başladığımız bu maceranın sonlarına yaklaştığımız bu günlerde bu maceranın taçlandırmasını projelerle yapıyoruz. Bu maceraya atıldığım ilk günden bu yana hayatımın birçok alanında güzel değişiklikler yaşadım. Sonuç olarak tamamladığım bu projede bana çok şey kattı.

Bu bölüme başladığım zaman tek felsefem vardı. Bu alanda ne yapıyorsan ondan bir ders çıkarmam gerektiğiydi. Bu felsefe ışığında dört sene boyunca yolumu aydınlatmaya çalıştım. Bazen tökezledim. Ben tökezlediğimde yanımda olan arkadaşlarıma teşekkür ediyorum. Bu konuda aileme ayrıca çok teşekkür ediyorum. Onlar her zaman yanımdaydılar.

Bu projede bana danışmanlık yapan ve yol gösteren Yar. Doç. Dr. Tuğrul ÇAVDAR' a çok teşekkür ediyorum.

Sonuç olarak bu meslekte ilerlemek için ortaya bir şeyler koymamız gerekiyor. Bunu başardığımızda duyduğumuz haz bizi daha da cesaretlendiriyor ve işimize daha sıkı sarılmamızı sağlıyor. Bence;

“Yapabileceklerin hayal edebildiğin kadar gerçektir.”

Yasin SÖNMEZ
Trabzon 2015

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
IEEE ETİK KURALLARI	II
ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	V
KISALTMALAR	VI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Proje Bileşenleri	2
1.3. Mikrodenetleyici	2
1.4. Arduino	3
1.5. Canon PIXMA IP1300 Printer	4
1.6. DC Motor	4
1.7. L298N Motor Sürücü Entegresi	5
1.8. Potansiyometre	6
1.9. Adaptör ve Regülatör	6
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	6
2.1. Literatür Araştırması	6
2.2. Ters Sarkaç Sistemi	7
2.3. Donanım Tasarımı	10
2.4. Algoritma Tasarımı	10
2.5. Yazılım Tasarımı	11
3. SONUÇLAR	12
4. ÖNERİLER	12
5. KAYNAKLAR	13
STANDARTLAR ve KISITLAR FORMU	13

ÖZET

Hayatımızda bir şeyleri kontrol etmek her zaman isteklerimiz arasında ilk sıralarda yer almıştır. Bu duruma bilimsel olarak yaklaştığımızda dengeli kontrol teknolojilerinin insan hayatında önemli bir yeri olduğu çok aşikâr. Basitçe örnekler verecek olursak; güdümlü füze sistemleri, insan görünümlü robotlar yani statik dengede duramayan tüm robotlar bunlardan birkaçıdır.

Denge robotikte büyük sorunlardan biridir. Bunun için dengeleme algoritmaları ve çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları; YSA, bulanık mantık, LQR vb. gibi yöntemlerdir. Bu yöntemler sistemin dengede kalabilmesi için karar verme problemini çözerler. Bunların yanında verilen karara göre uygulanan kuvvet ile motorda oluşan salınımı engellemek için PID kullanılır. PID ile sistem istenilen denge konumuna daha kolay yerleşebiliyor.

Ters sarkaç sistemi karasız denge yapısına sahip bir sistemdir. Bu sistemi dengede tutmak için bir kontrolöre ihtiyacımız var. Kullanılan kontrolör yukarıda bahsedilen yöntemlerden biri olabilir ya da kendi geliştirdiğiniz algoritmayı kullanabiliriz. Biz bu projede yukarıda bahsedilen yöntemlerden YSA' yı denedik. Fakat kullandığımız donanım kontrolörün performansını kötü yönde etkiledi. Biz de bu yöntemden vazgeçerek kendi algoritmamızı geliştirip sisteme uyguladık.

Sonuç olarak robotlarda denge probleminin, literatürde de en çok irdelendiği ters sarkaç sistemi üzerinden bir çözüm getirmeye çalıştık.

KISALTMALAR

ADC	Analog – Dijital Converter
PWM	Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
Gr	Gram
Kg	Kilogram
PID	Proportional Integral Derivative
V	Volt
A	Amper
Cm	Santimetre
M	Metre
µC	Mikro Kontrolör
MCU	Mikro Controller Unit
YSA	Yapay Sinir Ağları
Ms	Milisaniye
LQR	Linear – Quadratic Regulator
Kb	Kilobayt
MHz	Megahertz
IDE	Integrated Development Environment
GNU	GNU's Not Unix
GPL	General Public License

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ters sarkaç sistemi, kontrol teorisinde denetim sistemlerinin üzerinde deneyler yapılan, özellikle eğitim amaçlı kullanılan popüler sistemler arasındadır. Doğrusal olmayan modeli, kararlı ve kararsız denge noktaları ve yetersiz uyarım yapısı yeni yöntemlerin testi sırasında dinamik bir zenginlik sağlamaktadır.

Ters sarkaç sistemlerinin roket, uçak, robot kolu, yürüyen robot gibi başka sistemler için alt model oluşturmaktadır. Bu durum araştırma amaçlı tercih edilmesinin önemli nedenlerinden biridir. Bu uygulamalarda, fiziksel sistemin modellenmesi, modelin test edilmesi, belli çalışma noktaları etrafında doğrusal yaklaşımın bulunması, sistemin yapısal kısıtları ve denetim girdileri ile ilgili kısıtların belirlenmesi gibi konuların görsel olarak yorumlanabilir olması yüksek olan ters sarkaç sistemi üzerinde daha kolay anlaşılabilir olması nedeniyle kontrol sistemlerinde çokça tercih edilen bir sistemdir.

Literatürde çeşitli ters sarkaç sistemleri bulunmaktadır. Hareketli arabaya bağlı tek çubuklu sistemler, hareketli arabaya bağlı çift çubuklu sistemler, dönel tek kollu sistemler, yatayda sepete bağlı tek kollu sistemler bazılarıdır. En yaygın olanı yatayda tek doğrultuda hareketi kısıtlanmış sepete bağlı tek sarkaçlı sistemlerdir.

Gerçeklenen projede yapılan ters sarkaç türü, hareketi yatayla kısıtlandırılmış bir sepet üzerindeki sarkaç oldu.

Bu sistemde sepet olarak Canon PIXMA IP 1300 yazıcının kartuş yatağı, sarkaç olarak yazıcının parçalarından elde edilen düz bir demir parçası, sepetin hareketi için yazıcıda kartuşun hareketini sağlayan motor ve kayış sistemi kullanıldı.

Mikrodenetleyici olarak Arduino UNO kullanıldı. DC motoru sürmek için L298N motor sürücü entegresi kullanıldı. Sarkaçta oluşan açığı algılamak için basit bir encoder olan potansiyometre kullanıldı. Güç kaynağı projede önemli sorunlardan biriydi. Güç kaynağı olarak yazıcının regülatörü kullanıldı. Fakat yapılan denemeler sonucunda regülatörün çıkış gerilimi üzerinde belirtilenden daha az olduğu anlaşıldı. Bu durumu ortadan kaldırmak için ek olarak voltaj ayarlı adaptör kullanıldı.

Genel olarak projenin donanım tasarımının ardından yazılım tasarımına geçildi. Yazılım tasarımında kullanılacak yöntem için literatür araştırılması yapıldı. Literatür araştırmasının ardından yazılım tasarımı için izlenilecek yol haritası çizildi. Bu yol haritasına göre tasarım gerçekleştirildi.

1.2. Proje Bileşenleri

Gerçeklenen tasarım projesinin bileşenlerinden bahsedecek olursak. Projede sarkacı taşıyan sepet olarak Canon PIXMA IP1300 yazıcının kartuş taşıma sistemini kullandık. Sarkaç olarak yine yazıcıdan elde ettiğimiz doğrusal demir parçasını kullandık. Mikrodenetleyici olarak Arduino UNO, sepetin hareketi için yazıcının kartuş yatağını hareket ettiren yazıcının kendi DC motoru (QK1-1265), motoru sürmek için L298N entegresi, güç kaynağı olarak yazıcının regülatörü ve ek olarak maksimum 12 volt gerilim üretebilen ayarlanabilir adaptör kullanıldı. En önemli bileşenlerden sarkacın açısının ölçümü için potansiyometre kullanıldı.

1.3. Mikrodenetleyici

Genel olarak tanımlarsak kısaca tümleşik devredir diyebiliriz. Mikrodenetleyiciler MCU ve μC olarak da adlandırılır. Bu tümleşik devreyi oluşturan genel elemanlar;

- Merkezi İşlem Birimi
- RAM (Hafıza)
- Kristal Osilatör
- Zamanlayıcılar (Timers)
- Seri ve Analog Giriş Çıkışlar
- Programlanabilir Hafıza (NOR Flash, OTP ROM)

Bu elemanlar birleşerek bir mikrodenetleyiciyi oluştururlar. Hafızaları ve giriş-çıkışları kısıtlı miktarda olmalarına rağmen tek başlarına ya da diğer donanım elemanlarıyla ortak çalışabilirler. Uygulamanın gerekliliğine göre fonksiyonları gerçekleştirebilirler. Bünyesinde barındırdığı analog-dijital çeviriciler ile veri toplayıp işleyebilirler. Küçük yapıları itibarı ile gömülü sistemlerde çokça tercih edilirler.

Ayrıca mikrodenetleyicilerin sıradan işlemcilere karşı bazı avantajları vardır. Bu avantajları ile günümüzde birçok uygulama alanında çokça tercih edilirler. Mikroişlemcilere nazaran avantajları;

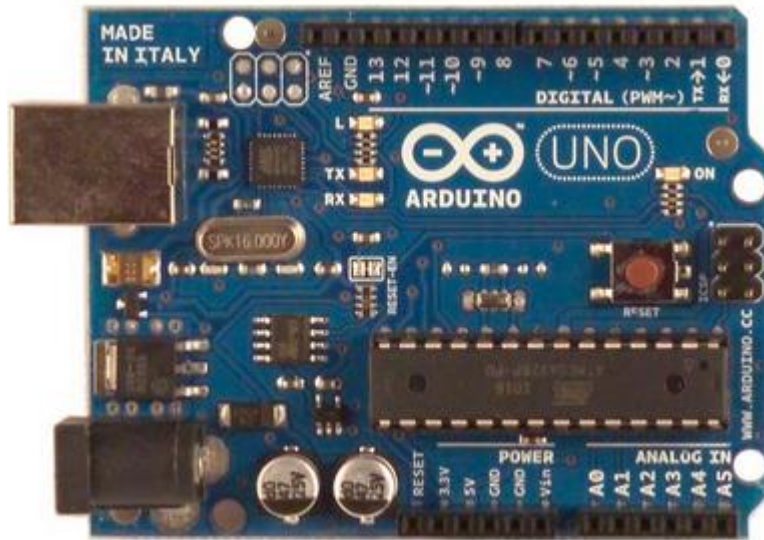
- Küçük boyutları
- Düşük güç tüketimleri
- Düşük maliyet
- Yüksek performans
- Kullanım alanı çeşitliliği

Günümüzde entegre üretimi yapan birçok firma (Intel, Atmel, Michrochip, National Semiconductror, Texas Instruments, vb.) mikrodnetleyici üretmektedir. Mikro denetleyiciler birbirlerinden sahip oldukları üniteler (ADC, PWM, Zamanlayıcı, SPI, vb.), giriş/çıkış bacak sayıları, çalışma hızları, veri ve program yolu genişliği, bellek kullanım şekilleri açılarından farklılıklar arz etmektedirler.

1.4. Arduino

Arduino bir G/Ç kartı ve Processing/Wiring dilinin bir uygulamasını içeren geliştirme ortamından oluşan bir fiziksel programlama platformudur. Arduino tek başına çalışan interaktif nesnel geliştirilmek için kullanılacağı gibi bilgisayar üzerinde çalışan yazılımlara da (Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data, SuperCollider gibi) bağlanabilir. Ayrıca arduino açık kaynak kodlu bir proje olduğundan kartın donanım tasarımı mevcuttur. Bu durum kendi kartımızı imal etmemize olanak sağlar. Arduino kartları bir ATMEL AVR mikrodnetleyici, programlama ve diğer devre elemanlarına bağlantı için gerekli yan elemanlardan oluşur. Yazılım olarak Arduino IDE kod editörü ve derleyici olarak görev yapan aynı zamanda derlenen programı karta yükleyebilen her platforma çalışabilen Java programlama dili ile geliştirilmiş bir uygulamadır. Arduino' ya program yazarken kullanılan dile basitleştirilmiş C++ diyebiliriz.

Bu projede aşağıdaki şekilde de görülen Arduino UNO kullandık.



Şekil 1.4.a. [1]

Arduino UNO özellikleri [1];

- Mikrodenetleyici: ATmega328
- Çalışma gerilimi: +5V DC
- G/Ç pinleri: 14 tane (6 tanesi PWM çıkışı)
- Analog giriş pinleri: 6 tane
- Flash hafıza: 32KB (0.5KB Bootloader için kullanılır.)
- SRAM: 2KB
- EEPROM: 1KB
- Saat frekansı: 16MHz

1.5. Canon PIXMA IP1300 Printer

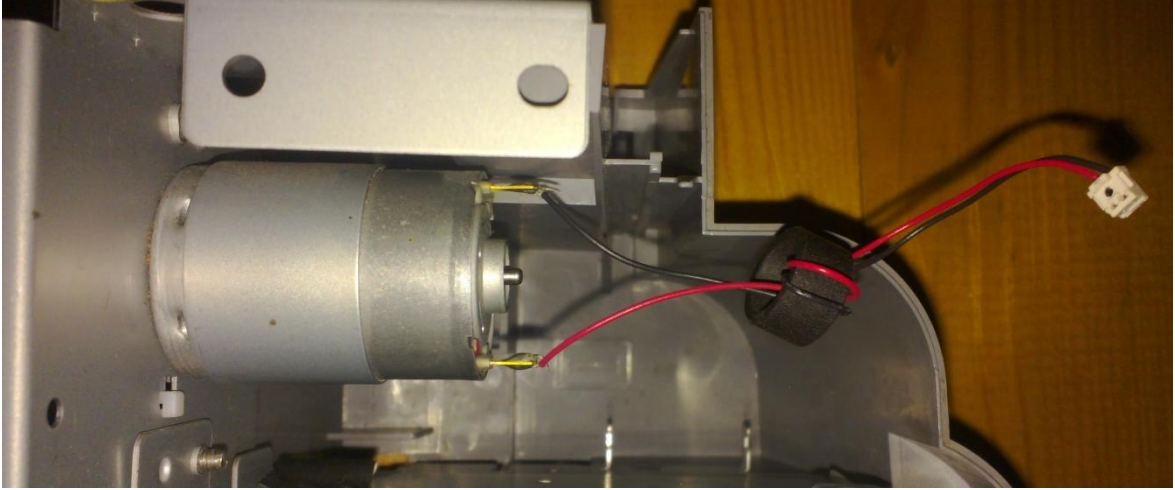
Projede kilit noktada bulunan bileşenlerden biri olan yazıcı projenin donanımsal tasarımında sağladığı kolaylık ve maliyetin azalmasında oynadığı rol önemli oldu. Projenin ana bileşenlerinden olan sepet, sarkaç, DC motor, güç kaynağı yazıcının parçalarından elde edildi. Sepet olarak yazıcının kartuş yatağı, sarkaç olarak yazıcının parçalarından yazıcıda önceden kâğıdın hareketini sağlayan dişlilere bağlı 34 cm' lik demir parçası, sepetin hareketini sağlamak için DC motor ve yazıcının kartuş yatağı doğrudan kullanıldı. Güç kaynağı olarak önceden yazıcının mikrodenetleyici kartına bağlı olan regülatör kullanıldı. Sonuç olarak projede yazıcının kullanılması donanım tasarımı açısından büyük kolaylık sağladı. Tüm bunların yanında maliyete iyi anlamda etkisi oldu.

1.6. DC Motor

Projemizde DC motor olarak yazıcının kartuş yatağını hareket ettiren DC motor kullanıldı. DC motorlar robotikte en sık tercih edilen motor türüdür. Bu motorlar boyut, şekil ve güç bakımından çeşitli olmaları sık tercih sebeplerindedir. Ayrıca ucuz ve küçük olmaları da tercih sebebi olarak gösterilebilir. DC motorlar bir sistemde doğrudan ya da dişli ile birlikte kullanılabilir.

Genel özellikleri;

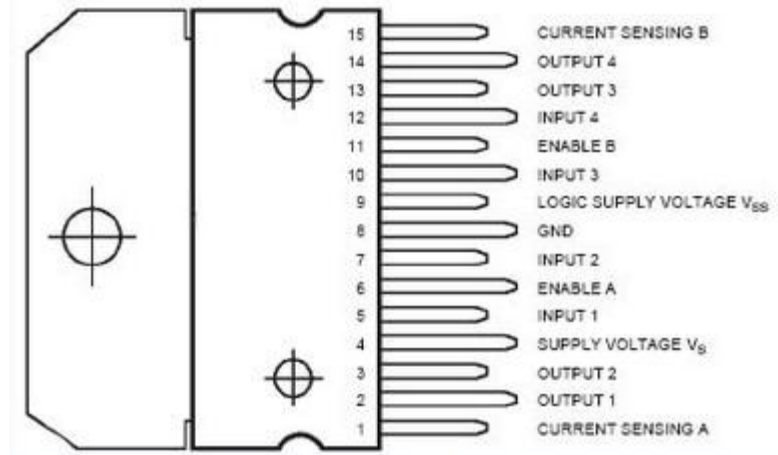
DC motorlarda yönlendirme akımın yönünün değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Hız motora gelen voltaj ve yüke bağlıdır. Motorun yükü arttığında hız düşebilir. Bunu engellemek için voltajı yüke göre seçmek gerekir. Seçilen voltaja uygun motoru seçmek de önem arz eder. Projede kullanılan motor Şekil 1.6.a. da görülmektedir.



Şekil 1.6.a.

1.7. L298N Motor Sürücü Entegresi

L298N entegresi diğer motor sürücüleri (L293D, L293B) akım ve gerilimde yetersiz kaldığı durumlarda kullanılan 15 bacaklı bir motor sürücü entegresidir. L298N entegresinin maksimum 46V gerilim, 2A akım sınırı vardır. Bu projede regülatör ve adaptör ile beslenen sistem için ~19V gerilim kullanıyoruz. L298N motor sürücü entegresi bünyesinde 2 adet *H Köprüsü* bulundurur. Bunun anlamı L298N birbirinden bağımsız olarak iki motoru çift yönlü olarak sürebilir. L298N ve bacak bağlantıları;



Şekil 1.7.a.[3]

L298N entegresinin bu projede kullanılırken tek eksik noktası ısınma problemi oldu. Üzerinden geçen yüksek voltaj ve akım değeri ısınmasına sebep olduğunda uzun süre kullanımlarda soğutucu elemana ihtiyaç olduğu görüldü.

1.8. Potansiyometre

Dışarıdan fiziksel müdahalelerle değeri değışebilen dirençlerdir. Kısaca ayarlı direnç denilebilir. Potansiyometreler devrelerde akımı sınırlamak ya da gerilim bölmek için kullanılırlar. Bu projede potansiyometre tamamen farklı bir amaçla kullanıldı. Potansiyometrenin dönme hareketi kullanılarak dirençte oluşan değışimler yazılımsal olarak yapılan dönüşümler ile açı değeriine dönüştürülerek kullanıldı.



Şekil 1.8.a.

1.9. Adaptör ve Regülatör

Şebeke gerilimindeki yükselme, düşme ve tüm dengesizlikleri önleyip, gerilimde düzenleme yapan cihazlara regülatör (düzenleyici) denir. Dengesizlikleri önlemesi ile kullanıldığı cihaza bir nevi koruma sağlar.

Adaptör (Uyarlaç) ise AC akımı küçük değerlerde DC akıma dönüştüren cihazdır. Bu projede ikinci bir güç kaynağına ihtiyaç duymamızın nedeni yazıcıdan elde ettiğimiz regülatörün ürettiği gerilimin motorun hızı için yetersiz kalmasıydı. Bu sebeple ek güç kaynağı olarak voltaj ayarlı adaptör kullandık.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Literatür Araştırması

Bir işe başlandığında gidilecek yola ışık tutması için ilk olarak yapılacak iş hakkında bilgi edinmek yolun yarılanması anlamına gelir. Bu çıkarımdan hareketle konu hakkında literatürde de çokça bahsedilmesinden yararlanarak bir araştırma yapıldı. Bu araştırma sistemin karar mekanizmasında kullanacağı yöntem ve sistemin modellenmesi hakkında oldu. Karar mekanizması için literatürde adı geçen yöntemler;

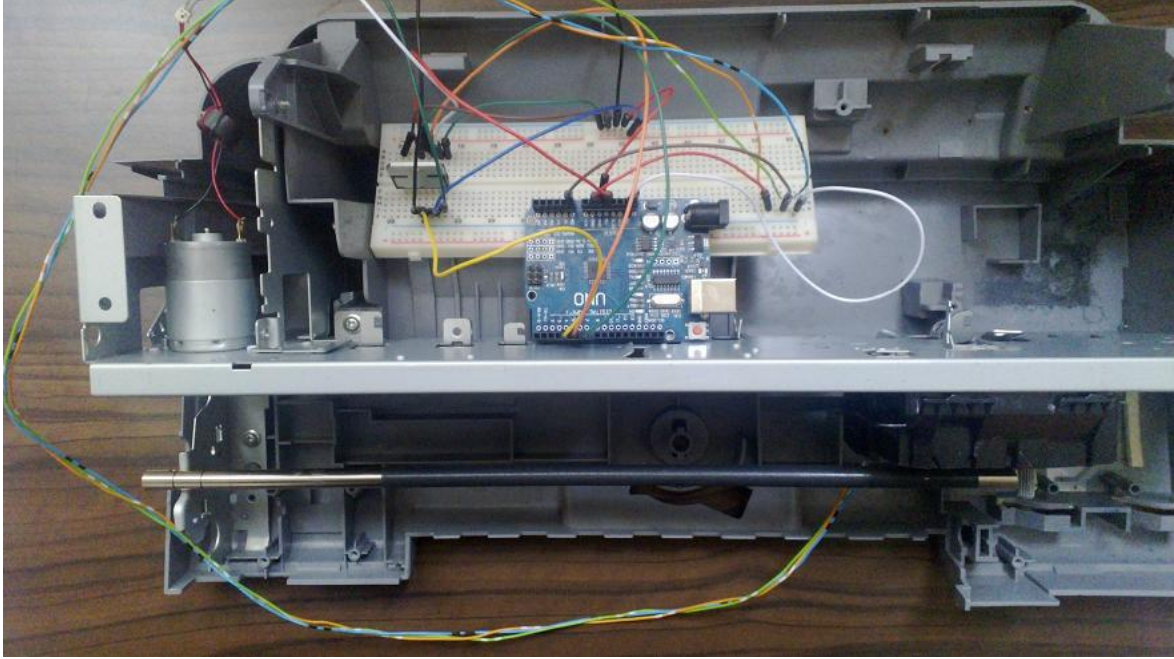
- YSA
- PID Kontrol
- Bulanık mantık
- Genetik algoritması
- LQR

Projede kontrolcü olarak ilk amacımız YSA kullanmaktı. YSA kullanılarak gerçekleştirilen kontrolcüde modellenen sistem sonucunda dört girişin değerlerinin sınırlandırılarak oluşan durum sayısı 162 olarak hesaplandı. Bunun anlamı eğitim için en az 162 örnek gerekli olması ve karar için minimum 162 durum ortaya çıkmasıydı. Kontrolcünün koşacağı sistemin bu durumlar arasında karar verirken geçen zaman esnasında sistemde oluşacak hızlı değişimlerle sarkaç dikey konuma getirilememiş olacaktı. Tüm bu sebeplerin ışığında farklı bir kontrolcü algoritması gerçekleştirildi.

2.2. Ters Sarkaç Sistemi

Geçmişten günümüze araştırmacıların ilgisini çeken ters sarkaç problemi kanonik ve doğrusal olmayan yapısı ile kontrol teorileri ve uygulamaları için son derece popüler bir konu olmuştur.

Sepetli ters sarkaç sistemi (şekil 2.2.a.) temelde M kütleli bir sepet ve sepet üzerinde serbest, dönebilir durumda bağlanmış m kütleli ve l boyundaki bir sarkaçtan oluşur.

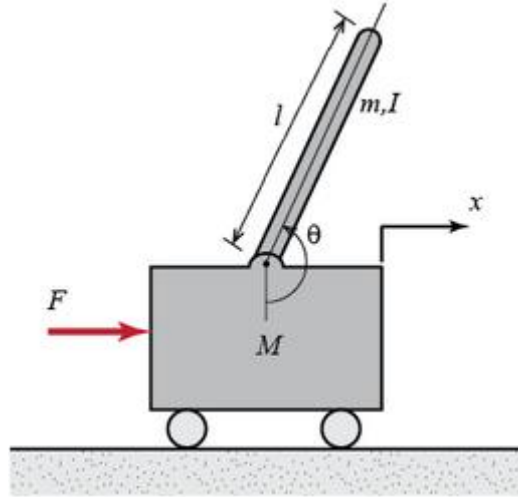


Şekil 2.2.a.

Sistemde sarkacın iki denge noktası vardır. Bunların ilki sarkacın dikeyle yaptığı açının (α) sıfır (şekil 2.2.b.) olduğu diğeri ise açının π olduğu kararlı denge noktasıdır. Bu projemizde sepeti taşıyan elemanın (yazıcı) yapısı gereği tek kararlı denge noktasına sahip olduğumuz anlamına geliyordu. Sarkaç açısının yazıcının yapısı gereği π olamamasıydı.



Şekil 2.2.b.

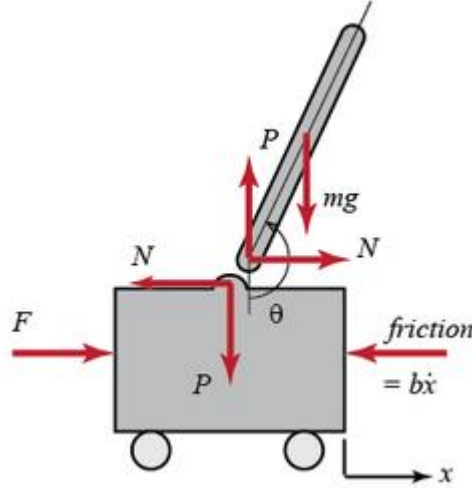


Şekil 2.2.c.

Şekil 2.2.c. da görüldüğü gibi sisteme etki eden kuvvetler ve değişkenler verilmiştir. Burada değişkenler ve sabitler;

- M : Sepetin kütlesi (35gr)

- m : Sarkacın kütlesi (115gr)
- l : Sarkaç uzunluğu (34cm)
- I : Açısal momentum ($0,013 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$)
- θ : Sarkaç açısı
- x : Sepetin aldığı yol
- F : Sepete uygulanan eden kuvvet



Şekil 2.2.d.

Yukarıda verilen sabitler ve Şekil 2.2.c. da gösterilen kuvvetler ile Newton' un hareket kanunları kullanılarak sepetin yatayda yaptığı hareket ve sarkacın yataydaki kuvvet analizi denklemleri;

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + N = F \quad (1)$$

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (2)$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (3)$$

$$P \sin \theta + N \cos \theta - mg \sin \theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x} \cos \theta \quad (4)$$

$$-Pl \sin \theta - Nl \cos \theta = I\ddot{\theta} \quad (5)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl \sin \theta = -ml\ddot{x} \cos \theta \quad (6)$$

Yukarıda (1) numaralı denklem ile sepete yatayda etki eden kuvvetlerin toplamını elde edildi. Daha sonra (2) numaralı denklem ile sepet-sarkaç bağlantısındaki yatay tepki kuvvetini (N) elde edip (1) numaralı denklemde yerine yazarak (3) numaralı denklemi elde edildi. (4) numaralı denklem ile sistemin dikeydeki kuvvetlerinin eşitliğinden elde edildi.

(4) numaralı denklemin düzenlenmiş hali olarak (5) numaralı denklem elde edildi. Sonuç olarak sistemin hareketine ait (3) ve (6) numaralı denklemler elde edildi.

(3) ve (6) numaralı denklemler için küçük açı değişimlerine bağlı aşağıdaki (7), (8) ve (9) numaralı eşitliklerdeki kabuller sonucu;

$$\cos \theta = \cos(\pi + \phi) \approx -1 \quad (7)$$

$$\sin \theta = \sin(\pi + \phi) \approx -\phi \quad (8)$$

$$\dot{\theta}^2 = \dot{\phi}^2 \approx 0 \quad (9)$$

Sistemin hareket (10) ve (11) numaralı hareket denklemleri elde edildi. (11) numaralı denklemdeki u kuvvet anlamındadır.

$$(I + ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = ml\ddot{x} \quad (10)$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\phi} = u \quad (11)$$

(11) numaralı denklemde sürtünme ve sepetin aldığı yol göz ardı edildiğinde kuvvetin açısal ivmeye, sarkaç uzunluğuna ve sarkaç kütesine bağlı olduğu görülür. Ayrıca denklemde bu değerlerin negatif geldiği de görülmektedir. Buradan yapılabilecek yorum kuvvet sarkacın düştüğü yöne ters yönde uygulanmalıdır.

2.3. Donanım Tasarımı

Yapılmak istenilen ters sarkaç sisteminde toplanan bilgiler ışığında donanım tasarımı yapıldı. Donanım tasarımı yapılırken 2.2. *Ters Sarkaç Sistemi* başlığında elde edilen denklemlerden çıkarılan yorumlar sonucunda sepetin sürtünmesi göz ardı edileceğinden donanım seçimi bu durum göz önüne alınarak yapıldı. Ayrıca sepetin konumunun kontrolü yapılmadı. Burada sepet sonsuz bir doğru üzerinde hareket ediyor gibi davranıldı. Kararların verileceği mikrodenetleyici olarak Arduino UNO kullanıldı. Motoru sürmek için L298N entegresi seçildi. Bu entegrenin seçilmesinde yüksek voltaj ve akımlara dayanabilir olmasının rolü büyüktü. Sarkaçta oluşan açının ölçümü potansiyometre ile yapıldı. Sistem de kullanılan diğer elemanlar Canon PIXMA IP1300 yazıcının parçalarından elde edildi. Sarkaç olarak yazıcıdan çıkan demir parçası kullanıldı. Sarkacı taşıyacak olan sepet yazıcının kartuş yatağı oldu. Bu yatağı hareket ettiren motora müdahale edilmeden kullanıldı. Güç kaynağı sistemin en önemli parçalarından biri oldu. Yazıcıdan elde edilen regülatörün çıkış gerilimi sistemi beslemeye yetmediği için maksimum 12V çıkış verebilen ayarlı bir adaptör ile sisteme gerilim kaynağı takviyesi yapıldı.

2.4. Algoritma Tasarımı

Sistemde ilk olarak YSA ile denemeler yapıldı. 2.2. *Ters Sarkaç Sistemi* başlığında elde edilen denklemler ile YSA sistemi için eğitim yapıldı. Eğitim sırasında dört giriş için aralık sınırlandırmaları sonucunda 162 durum elde edildi. Bunun anlamı karar sırasında çıkışta 162 farklı durum elde edilebilir olmasıydı. Sistem kararı Arduino üzerinde vereceği için işlem yükü artacak ve karar gecikecekti. Ayrıca durum sayısının fazla olması Arduino

açısından istenmeyen bir durum oldu. Tüm bu durumlar sonucunda bu kontrolörden vazgeçildi.

Sistem için araştırılan alternatif kontrolörler yerine PID' nin çıkışının yorumlanması ile bir algoritma geliştirildi. Bu algoritmanın işleyişi sarkaç açısının +/- 5 derece arası dışında PID' nin ürettiği çıkışın +/- 255 arasına sınırlandırarak bu değerlerin sepeti hareketini sağlayan motora PWM ile gönderilip sürülmesiydi. Burada PID çıkışı hesaplanırken PID' ye sarkacın kararlı olduğu açı değeri (0 derece) ayarlandı. PID çıkışı hesaplanırken kullanılan hata değeri istenilen açıdan o anki oluşan açının çıkarılmasıyla oluşturuldu. PID çıkışı 100ms aralıklarla sürekli hesaplanarak sistemin kararlı yapısı korunmaya çalışıldı.

2.5. Yazılım Tasarımı

Yazılım tasarımı yapılırken algoritmanın önceden tasarlanmış olması işi kolaylaştırdı. Yazılım Arduino da koşacağı için kod yazma ortamı Arduino IDE oldu. Arduino IDE ile C++ a benzer kısaca basitleştirilmiş yapıda olan programlama dili ile tasarlanan algoritma koda döküldü.

PID hesabı için *GNU GPLv3* lisanslı PID Kütüphanesi[2] kullanıldı. Bu kütüphane GPL lisanslı olduğundan kaynak kodu açık bir şekilde dağıtılmakta ve GPL lisansı kütüphanede kendimize göre değişiklik yapmamıza olanak sağlıyor. PID' nin hesaplandığı bu kütüphanede çeşitli fonksiyonlar bulunmakta. Bu fonksiyonlar PID hesabı için genel ayarlamaları yapmakta.

Yazılım tasarımında kullanılan algoritma sırasıyla;

- Arduino pin ve çıktı için değişkenlerinin ayarlamaları
- PID değişken ayarlamaları
- Motor yön değişken ayarlamaları
- PID nesnesi ve başlangıç ayarlamaları
- Motor başlangıç konumu, PID mod ve PID çıktı limit ayarlamaları
- Potansiyometreden analog verinin okunması ve istenilen açı aralığına dönüşümü
- Açının PID girişine hata olarak verilmesi ve PID çıktısının hesaplanması
- Hesaplanan PID çıkışının sarkacın yatma yönüne göre düzenlenip motora sınırlanan aralıkta (0-255) PWM girişi olarak verilmesi
- Motor hareketi ardından yeni hataya göre PID modunun ayarlanması ve motorun durumunun ayarı

Yukarıda bahsedilen algoritmanın son aşamasının ardından döngü ile potansiyometreden verinin tekrar okunduğu duruma dönülerek işlem sürdürülür. Burada algoritmanın bir kere dönmesi 100ms sürmekte. Bu sayede kararlı yapının yakalanması kolaylaşmaktadır.

3. SONUÇLAR

Projede sonuç olarak düşük maliyet ile kontrol sistemlerinde temel niteliğindeki bir probleme çözüm aranıldı. Bu sistem için kontrol mühendisliğinde sunulan çözümler daha yakından incelendi. Bu çözümlerin birbirlerine olan güçlü ve zayıf yanları gözlemlendi.

Kullanılacak sisteme göre kontrolör seçiminin önemine değinildi. Bu sistemlerde gözlemlenen önemli sorunlar için çözümler üretilmeye çalışıldı. Bu sistemlerin robotik ve diğer bilim dalları ile olan ilişkisi görüldü.

Bir sistemi kararlı yapıda tutmak için literatürde kabul görmüş çözüm yöntemleriyle karşılaşıldı ve bu yöntemlerin önemi anlaşıldı. Yapılan sistem kontrol sistemlerinin temel problemini basit bir şekilde ortaya koyması bunun üzerine yapılan araştırmaların çokluğu ile anlaşıldı.

Yapılan proje sırasında donanımsal sorunlarla karşılaşıldı ve bu sorunlara çözümler getirilmeye çalışıldı. Bu çözümlerin maliyeti ve performansı göz önünde bulunduruldu. Proje karşılaşılan yazılımsal sorunlar için algoritma geliştirildi. Bu algoritmanın kullanılacak donanıma göre seçilmesine özen gösterildi. Ayrıca sistemin kararsız yapısını kararlı hale getirmek için uygulanan yöntemlerin kullanılan donanımla uyumuna dikkat edildi.

4. ÖNERİLER

Bu proje incelenen ters sarkaç sistemi temel alınarak kararsız sistemlere kararlılık kazandırılabilir. Bu problemin literatürdeki popülerliği kullanılarak çözümün uygulanacağı alan genişletilebilir.

Sadece fiziksel bir sistem için değil birçok farklı alanda bu çözüm yöntemleri uygulanabilir. Burada sistemin matematiksel modelini sağlam temeller altına aldığımızda üretilen sonuçların pozitifliği gözlemlenebilir.

Bu sistemin bir problemin temelini oluşturması kullanılarak kontrol sistemleri derslerinde eğitim aracı olarak kullanılabilir. Bu sayede sistemlerin temel felsefesi anlaşılır hale getirilebilir.

Kullanılan yöntemler birleştirilerek sistemde bir yöntemin açığını bir diğer yöntemle kapatılması sağlanabilir. Burada sistemin hızı ve yöntemlerin birbirine uyumu önem arz edebilir.

Güç harcayan bir sistemin kendisini kararlı durumda tutmak için harcadığı enerji azaltılabilir. Bu sayede sistemde tasarruf edilebilir.

Bu alanda geliştirilecek algoritmalar bu sistem kullanılarak test edilebilir. Test edilen algoritmalar arasında gürbüzlük testleri uygulanabilir. Bu sayede algoritmaların kullanılacak sisteme göre en iyisinin seçimi sağlanabilir.

5. KAYNAKLAR

Robotiksistem.com [1]
 github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library/ [2]
 robotiksistem.com/motor_surucu_entegreler.html [3]

STANDARTLAR ve KISITLAR FORMU

Projenin hazırlanmasında uyulan standart ve kısıtlarla ilgili olarak, aşağıdaki soruları cevaplayınız.

1. Projenizin tasarım boyutu nedir? (Yeni bir proje midir? Var olan bir projenin tekrarı mıdır? Bir projenin parçası mıdır? Sizin tasarımınız proje toplamının yüzde olarak ne kadarını oluşturmaktadır?)

Proje daha önceden literatürde çokça test edilmiş bir projedir. Burada yapılan proje de tasarımımız projenin %80' nını oluşturmaktadır.

2. Projenizde bir mühendislik problemini kendiniz formüle edip, çözdünüz mü? Açıklayınız.

Proje kararsız bir sistemin kararlılık analizi olarak gösterilebilir. Burada kullanılan fiziksel yasalar ve matematiksel yöntemler ile sistemin modeli oluşturulup çözüm getirilmeye çalışıldı.

3. Önceki derslerde edindiğiniz hangi bilgi ve becerileri kullandınız?

Matematiksel modelin oluşturulmasında diferansiyel denklem çözme yöntemleri, fiziksel sistemi oluşturmada fiziksel yasalar, robotikte denetleyiciler, algoritmalar, elektronik elemanlar, programlama vb. gibi beceriler kullanıldı.

4. Kullandığınız veya dikkate aldığınız mühendislik standartları nelerdir? (Proje konunuzla ilgili olarak kullandığınız ve kullanılması gereken standartları burada kod ve isimleri ile sıralayınız).

Lisanslanmış ürünler ve açık kaynak kodlu elemanlar.

5. Kullandığınız veya dikkate aldığınız gerçekçi kısıtlar nelerdir? Lütfen boşlukları uygun yanıtlarla doldurunuz.

a) Ekonomi

Proje esnasında maliyeti düşürmek adına elimizde var olan kullanılmayan elemanların kullanılması sağlandı. Maliyetin düşürülmesi amaçlanırken projenin amaçlarından uzaklaşmamasına dikkat edildi. Bu sayede maliyeti azaltmak amaçlandı.

b) Çevre sorunları:

Yapılan projenin çevreye olumsuz bir etkisi olmamaktadır.

c) Sürdürülebilirlik:

Yapılan proje genel olarak bir sistemin temellerini açıklamak için kullanılan bir sistemdir. Sürdürülebilirlik adına bu sistem kullanılarak geliştirilen algoritmaların sürdürülebilirliğinden söz edilebilir.

d) Üretilebilirlik:

Projenin üretiminin ancak başka bir sisteme ek olarak fayda sağlanmasıyla gerçekleşebilir. Gerçeklenen proje deneysel bir projedir.

e) Etik:

Projenin deneysel olması etik açısından problem teşkil etmemektedir.

f) Sağlık:

Projenin sağlığa zararlı ya da yararlı bir etkisi olmamaktadır. Geliştirme sırasında elektronik ekipmanların kullanımı ile alakalı sağlıksal problemler oluşabilir.

g) Güvenlik:

Projede gerçekleştirilen elektronik ekipmanların kullanımı sırasında güvenlik problemleri yaşanabilir. Bu konuda dikkat edilmelidir.

h) Sosyal ve politik sorunlar:

Projenin sosyal ya da politik sorunlara bir teması yoktur.