

T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİFT EKSENLİ TERS SARKAÇ TASARIMI VE

KONTROLÜ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Makine Mühendisi Mustafa ARDA

1098107110

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hilmi KUŞÇU

EDİRNE

2012

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİFT EKSENLİ TERS SARKAÇ TASARIMI VE
KONTROLÜ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Makine Mühendisi Mustafa ARDA

Bu tez / / 2012 tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından Kabul Edilmiştir.

(imza)

Yrd. Doç. Dr.
Hilmi KUŞÇU
(Danışman)

(imza)

Prof. Dr. –Ing.
Ahmet CAN
(Jüri Üyesi)

(imza)

Yrd. Doç. Dr.
Aydın CARUS
(Jüri Üyesi)

Yüksek Lisans Tezi

Çift Eksenli Ters Sarkaç Tasarımı ve Kontrolü Üzerine Bir Araştırma

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada iki eksenli ters sarkaç sisteminin Simulink'te modellenmesinin yapılması ve daha sonra fiziki ters sarkaç sistemi oluşturularak modelin test edilmesi amaçlanmıştır. İki eksenli ters sarkaç sistemi modellenirken iki ayrı alt sisteme ayrılmış, böylece problemin basitleştirilmesi hedeflenmiştir. Kontrol sistemi olarak PID (Proportional-Integral-Derivative) denetleyici kullanılmıştır. Çalışmada sadece sarkaç açısının kontrolü yapılarak sarkacın dik konumda kalması amaçlanmıştır. Sarkaç konumu kontrol edilmemektedir. Simülasyon sonuçları grafikler halinde gösterilerek hazırlanan modelin düzgün bir şekilde çalıştığı belirlenmiştir.

Yıl : 2012

Sayfa Sayısı : 57

Anahtar Kelimeler : Ters sarkaç, İki Boyutlu, PID Denetleyici, Simulink

Master Thesis

A Study About Design and Control of the Two Axis Inverted Pendulum System

Trakya University Institute of Naturel Sciences

Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

This study purpose firstly, two dimesional inverted pendulum modeling in Simulink and after that compose the two dimensional inverted pendulum mechanism and test the model in the two dimensional inverted pendulum system. While modeling, two dimensional inverted pendulum system seperated two sub-system so, control problem of the two dimensional inverted pendulum system simplify in this way. PID controller implent to the two dimensional inverted pendulum system and PID can control only the pendulum angle not position. Simulation results shown in graphics and as a result two dimensional inverted pendulum system determined works properly.

Year : 2012

Number of Pages : 57

Keywords : Inverted Pendulum, Two Dimensional, PID Controller, Simulink

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının baŐından sonuna kadar emeği geçen, teknik bilgi ve tecrubesini benden esirgemeyen ve bana yol gosteren saygıdeğer hocam ve danıŐmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Hilmi KUŞÇU' ya tım katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca Yüksek Lisans öğrenimim boyunca ilgi ve desteğini hiç esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. –Ing. Ahmet CAN 'a teşekkür ederim.

Bu tez çalıŐmasındaki malzeme teminini sağlayan ve 2011/159 no'lu "İki Eksenli Ters Sarkacın Modellenmesi" projesi ile destekleyen Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri(TÜBAP) Birimi'ne teşekkür ederim.

Bunun yanında yoğun zamanlarımda anlayıŐlı davranan tım iÇ arkadaşlarıma ve aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLO VE ŞEKİL LİSTESİ	viii
SİMGE LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE METOD	15
3.1. Problem Tanımı	15
3.2. Bir Eksenli Ters Sarkaç Sisteminin Modellenmesi	16
3.3. P, PI, PD ve PID Denetleyiciler	20
3.3.1. P Denetleyici.....	20
3.3.2. PI Denetleyici	21
3.3.3. PD Denetleyici.....	23
3.3.4. PID Denetleyici	25
3.4. Bir Eksenli Ters Sarkaç Sistemine PID Denetleyicinin Uygulanması.....	27
3.5. Bir Eksenli Modelin İki Eksene Uyarlanması	27
3.6. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Fiziki Mekanizması.....	29
3.6.1. X ve Y Eksenleri Hareketli Mekanizmaları.....	30
3.6.2. Joystick Potansiyometre	31

3.2.3. Doğru Akım (DC) Motorları	32
3.2.4. Motor Sürücü Devreleri	37
3.2.5. Güç Kaynağı	38
3.2.6. Veri Toplama Kartı (DAQ Card).....	40
3.2.7. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Modeli ile Mekanizmasının Birleştirilmesi	42
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	45
EKLER.....	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	57

TABLO VE ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Ayakta Duran İnsan Modeli.....	2
Şekil 2.1. Larcombe'nin Matematiksel Modelini Çıkardığı Çoklu Parçalı Ters Sarkaç Sistemi.....	4
Şekil 2.2. Yi ve Yubazaki'nin Geliştirdiği Bulanık Denetleyici Blok Diyagramı	5
Şekil 2.3. Sánchez vd.'nin Geliştirdiği İnternet Arayüzü.....	6
Şekil 2.4. Yazıcı ve Karamancıoğlu'nun Geliştirdiği Ters Sarkaç Sisteminin Geri Besleme Altında Blok Diyagramı	7
Şekil 2.5. Ghanbari ve Farrokhi'nin İki Eksenli Ters Sarkaç Modeli	7
Şekil 2.6. Jung vd.'nin Oluşturduğu İki Eksenli Ters Sarkaç Düzenegi.....	8
Şekil 2.7. Wai vd.'nin Oluşturduğu İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Modeli	9
Şekil 2.8. Kumar vd.'nin Geliştirdiği Bulanık Mantık Destekli PID Denetleyici Kontrol Diyagramı.....	10
Şekil 2.9. Lu vd.'nin Oluşturduğu Ters Sarkaç Sisteminin Şematik Gösterimi	10
Şekil 2.10. Huang vd.'nin Çalıştığı İki Tekerlekli Ters Sarkaç Sistemi	11
Şekil 2.11. Chiu vd.'nin Tasarımını Yaptıkları Denetleyicinin Blok Diyagramı	12
Şekil 2.12. Chiu vd.'nin Oluşturduğu İki Tekerlekli Ters Sarkaç Sistemi Düzenegi	13
Şekil 2.13. Hirata vd.'nin Oluşturduğu Dönel Tip Ters Sarkaç Sistemi	14
Şekil 3.1. Ters Sarkaç Sisteminin Serbest Cisim Diyagramı	16
Şekil 3.2. Araba ve Ters Sarkacın Serbest Cisim Diyagramları	17
Şekil 3.3. Ters Sarkaç Sisteminin Simulink'te Oluşturulan Hareket Denklemi	19
Tablo 3.1. Modelde Yer Alan Bazı Sabit Değerlerin Ölçümle Bulunan Değerleri	19
Şekil 3.4. Oransal Eylem Faktörü	21
Şekil 3.5. PI Denetleyicinin Sıçrama Cevabı	22
Şekil 3.6. PD Denetleyicinin Sıçrama Cevabı	24
Şekil 3.7. PD Denetleyicinin Kalkış Cevabı	24
Şekil 3.8. PID Denetleyicinin PD ve PI Denetleyicilerle Karşılaştırılması	27
Şekil 3.9. Bir Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Kontrol Diyagramı	27
Şekil 3.10. İki Eksenli Ters Sarkaç	28

Şekil 3.11. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Modeli	28
Şekil 3.12. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi	29
Şekil 3.13. Hareketli Mekanizmaların Yakından Görünüşü	30
Şekil 3.14a. Joystick Potansiyometre Üstten Görünüşü.....	31
Şekil 3.14b. Joystick Potansiyometre Alttan Görünüşü.....	31
Şekil 3.15. Joystick Potansiyometrenin Bacak Bağlantısı	32
Şekil 3.16. Doğru Akım (DC) Motorlarında Manyetik Alan Yönü.....	33
Şekil 3.17. Doğru Akım Motorlarında Dairesel Hareketin Oluşumu	34
Şekil 3.18. Doğru Akım(DC) Motorda Tork Oluşumu.....	35
Şekil 3.19. PWM Sinyali Yapısı	36
Şekil 3.20. Değişik Duty Cycle'lara Sahip PWM Sinyalleri.....	37
Şekil 3.21. LMD18200 DC Motor Sürücü Devresi	38
Şekil 3.22. Düzenekte kullanılan ATX Güç Kaynağı.....	39
Şekil 3.23. Güç Kaynağından Çıkan Kabloların Taşıdığı Gerilimler	40
Şekil 3.24. NI USB-6211 Veri Toplama Kartı.....	41
Şekil 3.25. NI USB-6211 Giriş-Çıkış Portları	41
Tablo 3.2. NI USB-6211 Veri Toplama Kartı Teknik Özellikleri.....	42
Şekil 3.26. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Genel Yapısı	43
Şekil 3.27. Mekanizma Kontrol Bloğu İç Yapısı.....	43
Şekil 3.28. Hız ve Yön Sinyalinin Üretildiği Bloğun Yapısı.....	44
Şekil 4.1. X Ekseni Alt Sistemi İçin PID Katsayıları	45
Şekil 4.2. X Ekseni Alt Sistemi PID Denetleyici Referans Yol Basamak Cevabı.....	46
Şekil 4.3. X Ekseni Alt Sistemi PID Denetleyici Performansı Basamak Cevabı	46
Şekil 4.4. X Ekseni Alt Sistemi PID Giriş Bozucu Etkisi Basamak Cevabı.....	47
Şekil 4.5. X Ekseni Alt Sistemi PID Çıkış Bozucu Etkisi Basamak Cevabı	47
Şekil 4.6. Y Ekseni Alt Sistemi İçin PID Katsayıları	48
Şekil 4.7. Y Ekseni Alt Sistemi PID Denetleyici Referans Yol Basamak Cevabı.....	48
Şekil 4.8. Y Ekseni Alt Sistemi PID Denetleyici Performansı Basamak Cevabı	49
Şekil 4.9. Y Ekseni Alt Sistemi PID Giriş Bozucu Etkisi Basamak Cevabı.....	49
LMD18200 Entegresi Fonksiyonel Blok Diyagramı	52
LMD18200 Entegresi Bacak Yapısı	52
LMD18200 Entegresi Bazı Teknik Özellikleri	53

SİMGE LİSTESİ

b	sürtünme katsayısı
e	kontrol farkı
e_b	zıt elektromotor gerilimi
f	frekans
i_a	armatür akımı
I	atalet momenti
I_a	uyarma akımı
K_D	türevsel eylem faktörü
K_I	integral eylem faktörü
K_M	orantı katsayısı
K_P	oransal eylem faktörü
l	sarkaç boyu
m_p	sarkaç kütlesi
m_c	araba kütlesi
R_a	endüvi devresi direnci
t	zaman
T_D	diferansiyel eylem zamanı
T_n	integral eylem zamanı
T_m	motor momenti
T_t	ölü zaman
T_u	gecikme zamanı
T_v	türevsel eylem zamanı
U	gerilim
U_d	sabit durum hatası
U_i	giriş gerilimi, kontrol farkı
U_w	ayar değer gerilimi
U_x	gerçek değer gerilimi, kontrol değişkeni
U_y	değişken gerilimi
U_y	sıçrama anında değişken gerilimi
V_{cc}	kare dalga tepe noktası gerilim değeri
V_{ss}	kare dalga çukur noktası gerilim değeri
V_I	integralin çıkışı değişkeninin değişme hızı, kalkış hızı, besleme hızı
W_m	motor milinin açısal hızı
Φ	manyetik alan akısı
θ	açı

BÖLÜM 1

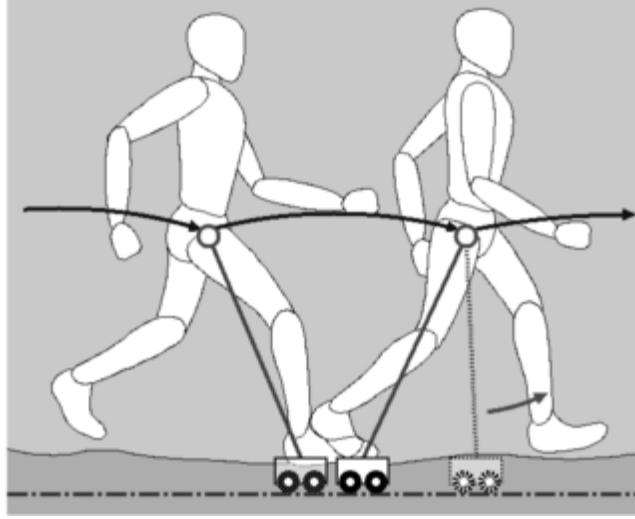
GİRİŞ

Küçük bir çocukken işaret parmağımızda veya avcumuzun içinde bir sopayı dengelemeye çalıştığımızı hatırlayalım. Çubuğu dik konumda dengede tutmak için elimizi sürekli doğru pozisyona getirmeye çalışırız. Ters sarkaç problemi de temelde aynı problemdir. Tıpkı bu çubuk gibi ters sarkaç sistemi de doğal olarak dengesiz bir sistemdir. Sistemi dikey konumda uygun bir şekilde tutabilmek için kuvvet oldukça dikkatli uygulanmalıdır. Bunun için de uygun bir kontrol teorisi gerekmektedir. Ters sarkaç sistemi birçok kontrol teorisini test etmek ve karşılaştırmak için oldukça uygun bir alandır.

Ters sarkaç kontrol mühendisliğinin klasik problemlerinden biridir. Bir araba üzerindeki çubuğun dengelenmesi doğrusal olmayan ve dengesiz bir kontrol problemidir. Buradaki amaç, ters sarkacı istenilen konumda ve dik olarak çabuk ve doğru bir şekilde kontrol etmektir.

Ters sarkacın kontrolü, bir roket veya füze kalkışının ilk aşamalarındaki uçuş simülasyonunda karşılaşılan probleme benzemektedir.

Ters sarkaç sistemi, robot kollarındaki kontrol sistemleri ile benzerlik göstermektedir. Robot kolda meydana gelen basıncın merkezi, ağırlık merkezinin altında yer alırsa robot kol sistemi dengesizleşir ve ters sarkaç sisteminin dinamiklerine benzer bir davranış sergiler.



Şekil 1.1. Ayakta Duran İnsan Modeli

İnsanlar için ayakta dururken dengelerini sağlamaları günlük yaşamlarında oldukça önemli bir yer teşkil eder. Merkezi sinir sistemi, sürekli olarak vücudun duruşunu kontrol altında tutar ve değişim yaşandığında kasları harekete geçirerek dengenin bozulmamasını sağlar. Ters sarkaç sistemi, insanın ayakta durma pozisyonunu oldukça iyi açıklayan ve modelleyen bir sistemdir.

Ters sarkaç sistemi kontrol mühendisliği alanında kontrol edilmesi en zor sistemlerden biridir. Kontrol mühendisliği alanındaki öneminden dolayı modelini anlayabilmek, PID denetleyici yasalarına göre doğrusal karşılaştırmalı analizini yapabilmek oldukça önemlidir.

Ters sarkaç sisteminin seçilme sebepleri;

- Laboratuvar kullanımı için kolay ulaşılabilir bir sistem olması (çoğunlukla akademik çevre)
- Aslında doğrusal olmayan bir sistem olmasına rağmen, geniş bir aralık için doğrusalmış gibi davranması çok hataya mahal vermemektedir.

Bu problem rijid bir çubuk yerine esnek bir çubuk kullanıldığında daha da karmaşık hale gelir. Ters sarkaç kontrolünün karmaşıklığı ve zorluğu çubuğun esnek olmasıyla daha da artar. Bu problem kontrol mühendisleri için bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir [Mirza, 2000].

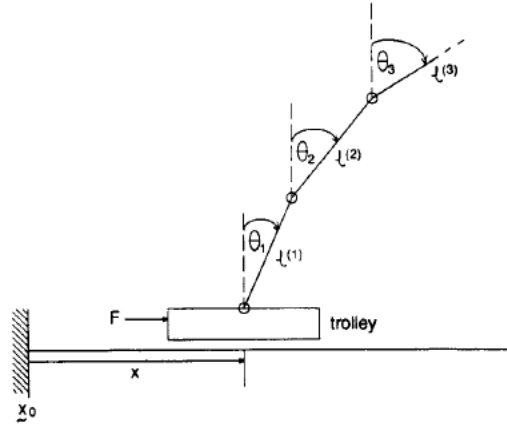
BÖLÜM 2

KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ters Sarkaç sistemi, son 20 yılda kontrol mühendisliğinin oldukça yoğunlaştığı konulardan biri olmuştur. Problemin doğrusal ve dengeli olmayışı, bu alanda birçok kontrol teorisinin denenmesini olanaklı hale getirmektedir. Özellikle son yıllarda bulanık mantık ve sinir ağları ile geliştirilen kontrol algoritmaları öne çıkmaktadır.

Bu çalışma hazırlanırken yararlanılan kaynaklar, yayımlandıkları tarih sırasına göre aşağıda bahsedilmiştir.

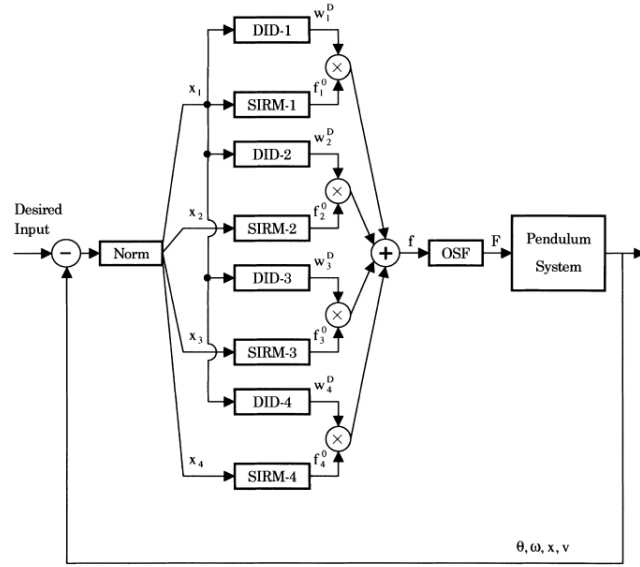
“On the Control of a Two Dimensional Multi-Link Inverted Pendulum: Co-ordinate System Suitability for Dynamic Formulation” isimli çalışmada çoklu parçalı ters sarkaç sisteminin dinamik hareket denklemlerini çıkarmış ve sistemin matematik modelini oluşturmuştur [Larcombe, 1991].



Şekil 2.1. Larcombe'nin Matematiksel Modelini Çıkardığı Çoklu Parçalı Ters Sarkaç Sistemi

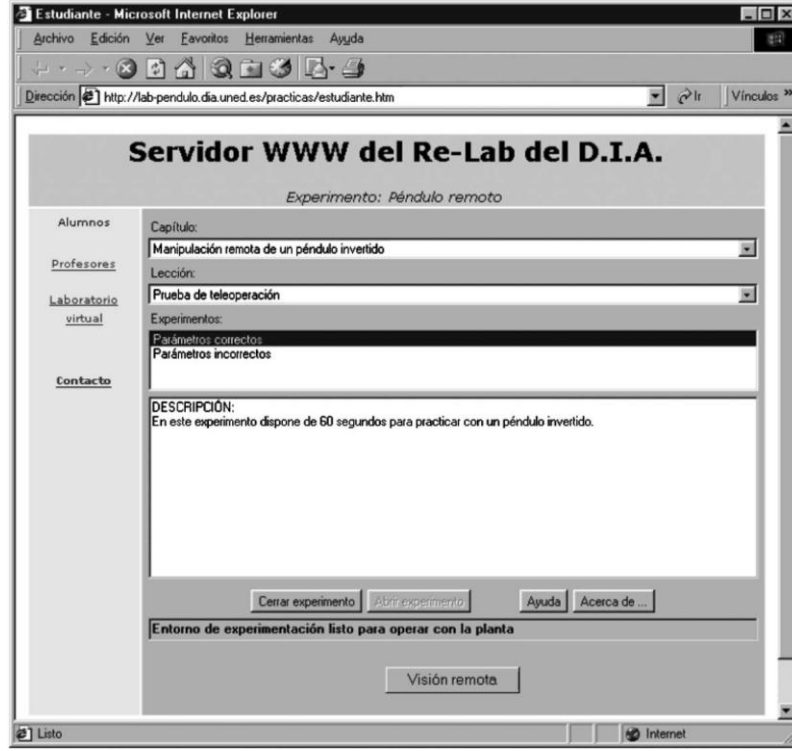
“On control of a base-excited inverted pendulum using neural networks” isimli çalışmalarında dönel ters sarkacın konum ve açı kontrolü sinir ağı temelli bir denetleyici tarafından kontrol edilmektedir [Wu vd., 2000].

“Stabilization fuzzy control of inverted pendulum systems” isimli çalışmalarında ters sarkaç sistemlerinin açı ve konum bilgisini dengeleyebilecek bulanık kontrol sistemini geliştirmiştir [Yi ve Yubazaki, 2000].



Şekil 2.2. Yi ve Yubazaki'nin Geliştirdiği Bulanık Denetleyici Blok Diyagramı

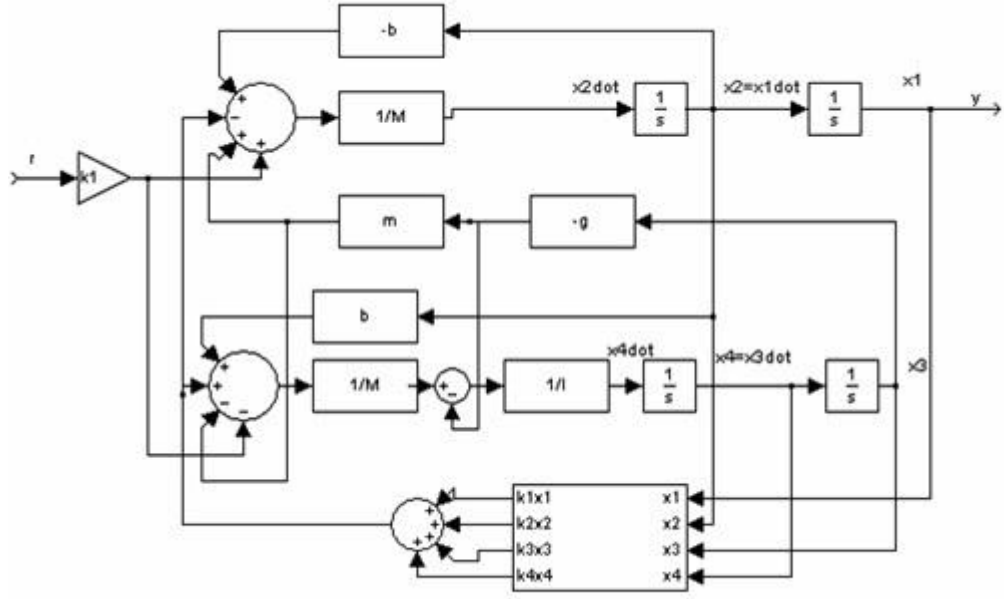
“A Java/Matlab-Based Environment for Remote Control System Laboratories: Illustrated With an Inverted Pendulum” isimli çalışmalarında 24 saat internet ağı üzerinden uzaktan kumanda edilebilen ters sarkaç sistemi geliştirmişlerdir [Sánchez vd. Ağustos 2004].



Şekil 2.3. Sánchez vd.'nin Geliştirdiği İnternet Arayüzü

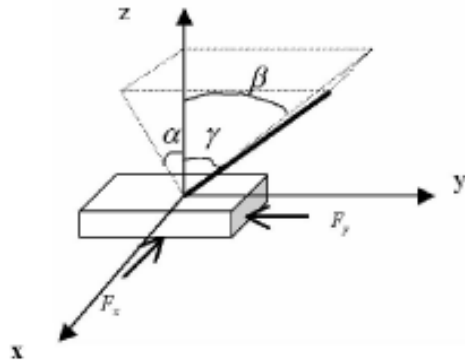
“Ters Sarkacın Nonlinear Kontrolü” isimli çalışmalarında ters sarkaç sisteminin açk konum değişkenini kontrol etmek amaçlanmıştır. Geri besleme ile doğrusallaştırma yöntemi farklı bir tarzda kullanılarak problemin çözümine çalışılmıştır [Özbey ve Uzal, 2006].

“Doğrusal Kuadratik Kontrol Altındaki Ters Sarkaç Sisteminin Gürbüzlk İncelenmesi” isimli çalışmalarında doğrusal-kuadratik kontrol yönteminin ters sarkaç sistemi parametre değişimlerine karşı gürbüzlk analizini yapmışlardır [Yazıcı ve Karamancıoğlu, 2006].



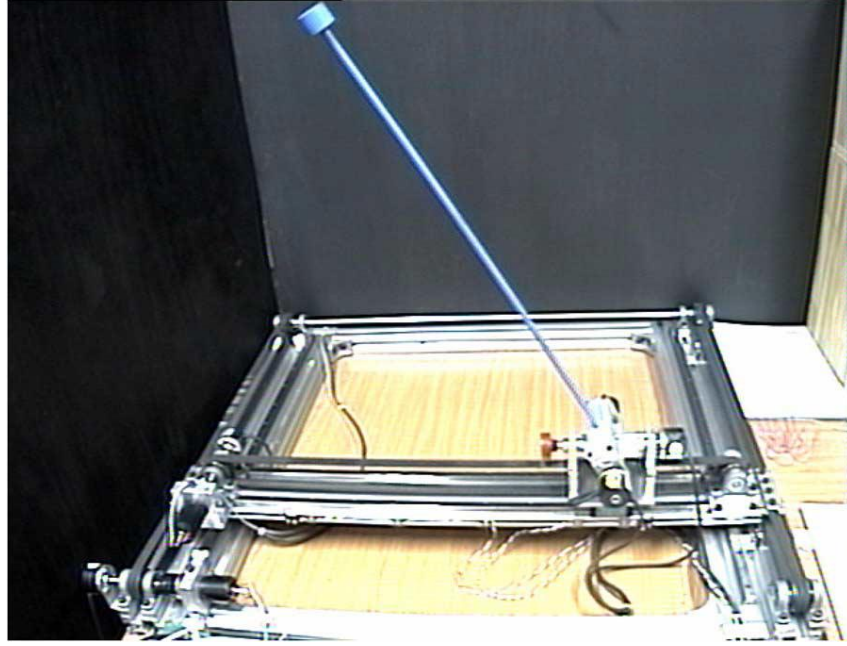
Şekil 2.4. Yazıcı ve Karamancıoğlu'nun Geliştirdiği Ters Sarkaç Sisteminin Geri Besleme Altında Blok Diyagramı

“Decentralized Neuro-Fuzzy Controller Design Using Decoupled Sliding-Mode Structure for two-Dimensiona Inverted Pendulum” isimli çalışmalarında iki eksenli ters sarkaç kontrolü ile ilgili yeni bir yaklaşım getirmişlerdir. Öncelikle iki eksenli ters sarkaç sistemini merkezi olmayan kontrol teorisi yardımıyla iki ayrı alt sisteme ayırmışlardır. Daha sonra her bir alt sistemi kayar-kip yöntemi ile denetlemek için ayrıştırma yöntemi kullanarak iki yüzeye ayırmışlardır. Kayar-Kip denetleyicileri de iki adet bulanık sinir ağlarının öğrenmesinde kullanılmaktadır [Ghanbari ve Farrokhi, 2006].



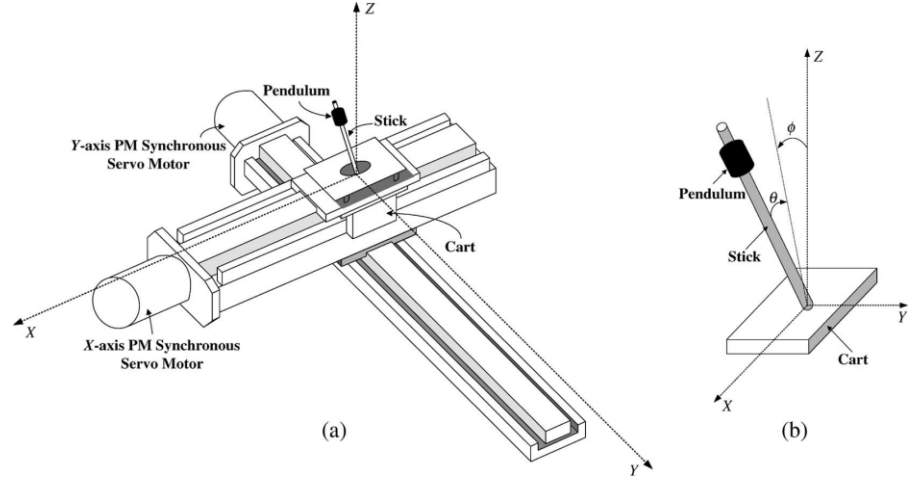
Şekil 2.5. Ghanbari ve Farrokhi'nin İki Eksenli Ters Sarkaç Modeli

“Neural Network Control for Position Tracking of a Two-Axis Inverted Pendulum System: Experimental Studies” isimli çalışmalarında iki eksenli ters sarkaç sistemine dağıtılmış sinir ağı kontrol yöntemi uygulanmıştır. Her bir eksen ayrılmış kontrol yapısına göre iki ayrı sinir ağı kontrolörü tarafından denetlenmektedir. Sinir ağı denetleyicileri sadece sarkacın açısını değil, ayrıca sarkacı taşıyan arabanın konumunu da denetlemektedir [Jung vd., 2007].



Şekil 2.6. Jung vd.’nin Oluşturduğu İki Eksenli Ters Sarkaç Düzeneği

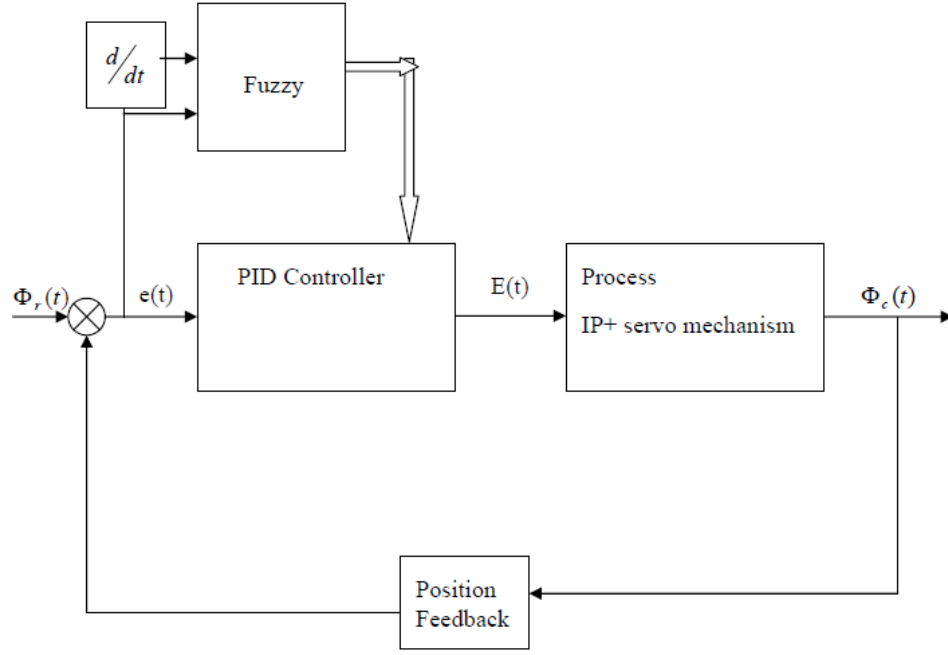
“Cascade Direct Adaptive Fuzzy Control Design for a Nonlinear Two-Axis Inverted-Pendulum Servomechanism” isimli çalışmalarında iki eksenli ters sarkaç mekanizmasını basamaklandırılmış doğrudan uyarlamalı bulanık kontrol yöntemi ile denetlemiştir [Wai vd., 2008].



Şekil 2.7. Wai vd.'nin Oluşturduğu İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Modeli

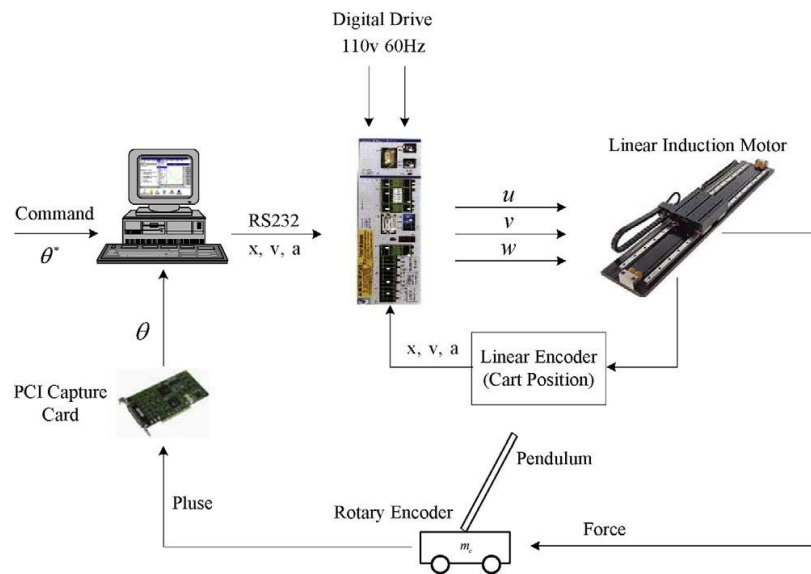
“Gömülü Sistemlerde Gerçek Zamanlı Sistem Uygulamalar” isimli çalışmalarında mikro işlemci destekli gerçek zamanlı sistemler ile yapılan ters sarkaç uygulamasını gerçekleştirmişlerdir [Özcan vd. , 2010].

“Novel Method to Balance Inverted Pendulum by Angle Sensing Using Fuzzy Logic Supervised PID Controller” isimli çalışmalarında ters sarkaç sistemi kontrolünde yeni bir yaklaşım olarak açı sensörü kullanmışlar ve ters sarkacın dengelenmesinde bulanık mantık destekli PID denetleyici kullanmışlardır [Kumar vd., 2011].



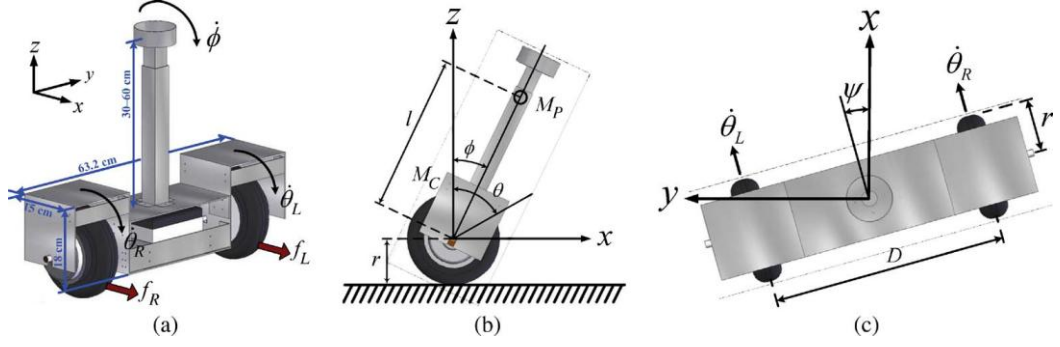
Şekil 2.8. Kumar vd.'nin Geliştirdiği Bulanık Mantık Destekli PID Denetleyici Kontrol Diyagramı

“Adaptive self-constructing fuzzy neural network controller for hardware implementation of an inverted pendulum system” isimli çalışmalarında dönel kodlayıcı ve kendine kendine uygulanabilir bulanık sinir ağları denetleyicisi kullanmışlardır [Lu vd., 2011].



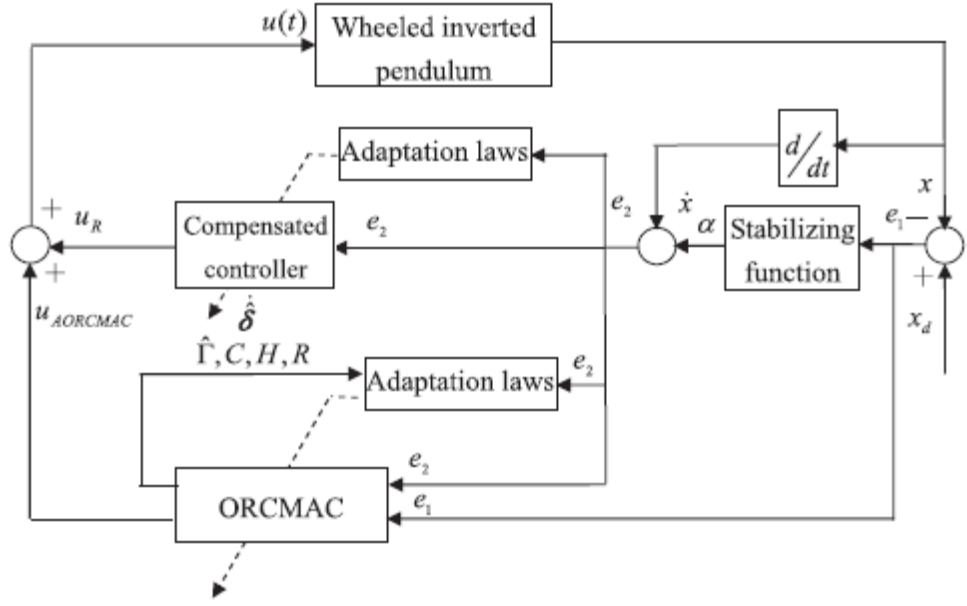
Şekil 2.9. Lu vd.'nin Oluşturduğu Ters Sarkaç Sisteminin Şematik Gösterimi

“Design and Implementation of Fuzzy Control on a Two-Wheel Inverted Pendulum” isimli çalışmalarında iki tekerlekli ters sarkaç sisteminin bulanık kontrol yöntemi ile denetlemiştir [Huang vd., 2011].



Şekil 2.10. Huang vd.’nin Çalıştığı İki Tekerlekli Ters Sarkaç Sistemi

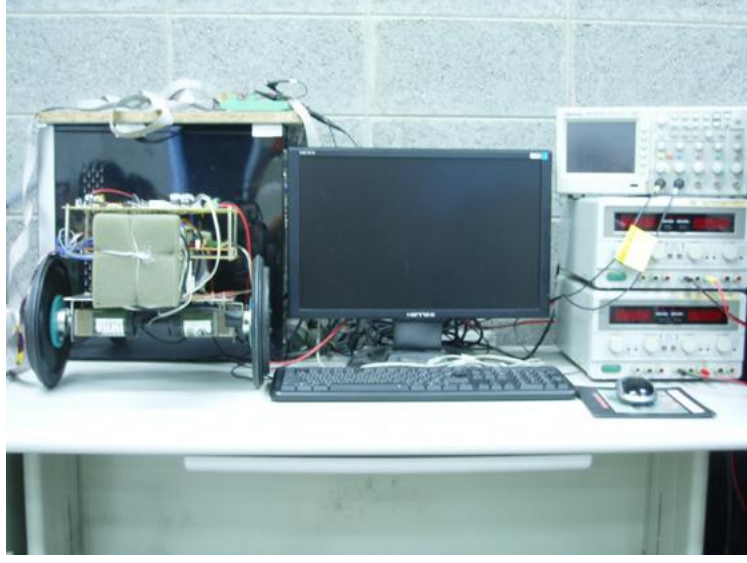
“Intelligent backstepping control for wheeled inverted pendulum” isimli çalışmalarında tekerlekli ters sarkaç sistemini basit hesaplama, iyi genelleme ve hızlı öğrenme özelliği olan AORCMA (adaptive output recurrent cerebellar-model-articulation-Controller) denetleyicisinin tasarımını yapmışlardır [Chiu vd., 2011].



Şekil 2.11. Chiu vd.'nin Tasarımını Yaptıkları Denetleyicinin Blok Diyagramı

“Modeling of an inverted pendulum based on fuzzy clustering techniques” isimli çalışmalarında modellenmiş ters sarkaç kontrolünde çeşitli bulanık kümeleme teknikleri kullanmışlar ve en başarılı performansı Gustafson–Kessel bulanık kümeleme tekniğinin verdiğini göstermişlerdir [Sivaraman ve Arulselvi, 2011].

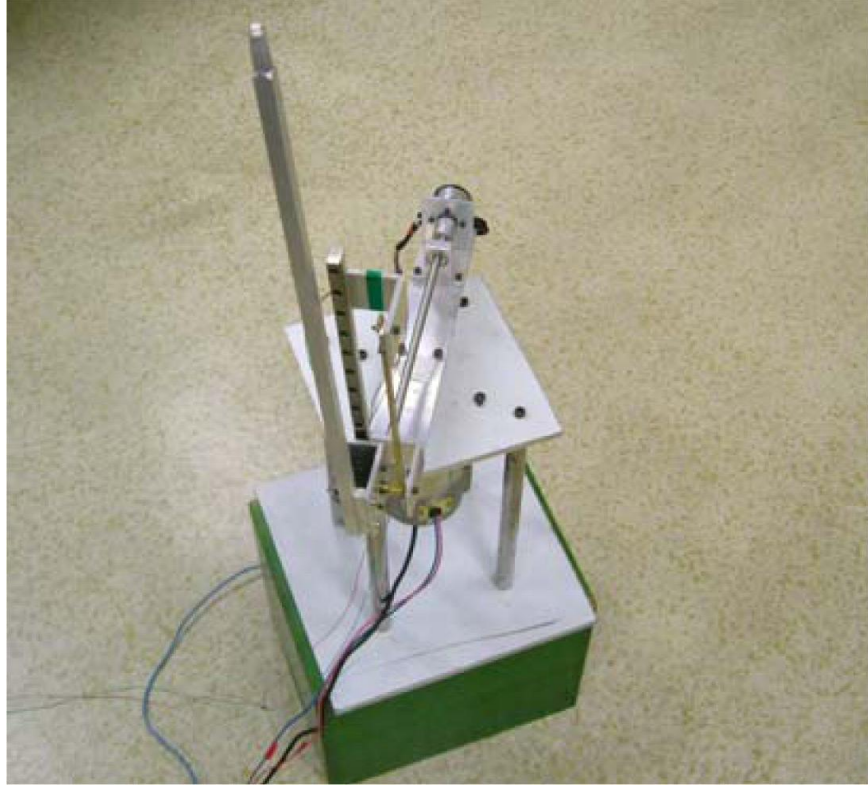
“Real-time control of a wheeled inverted pendulum based on an intelligent model free controller” isimli çalışmalarında tekerlekli ters sarkaç sisteminin konum ve açı değişkenlerini kontrol eden AORCMA (adaptive output recurrent cerebellar-model-articulation-Controller) yöntemini deneysel olarak uygulamışlardır [Chiu vd., 2011].



Şekil 2.12. Chiu vd.'nin Oluşturduğu İki Tekerlekli Ters Sarkaç Sistemi Düzenegi

“Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers” isimli çalışmasında ters sarkaç sisteminin denetlenmesinde kullanılan PID Denetleyicilerin birden fazla sayıda kullanılmasını araştırmıştır. PID katsayılarının belirlenmesiyle ilgili oldukça gerçekçi veriler elde etmiştir [Wang, 2011].

“VSS Robust Adaptive Control Including a Self-Tuning Controller for a Rotary Inverted Pendulum” isimli çalışmasında parametreleri bilinmeyen bir dönel ters sarkaç sisteminin değişken yapılı, kendini ayarlayabilen, uyarlanabilir bir kontrol sistemi ile kontrolünü incelemiştir [Hırata vd., 2011].



Şekil 2.13. Hirata vd.'nin Oluşturduğu Dönel Tip Ters Sarkaç Sistemi

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOD

3.1. Problem Tanımı

Ters sarkaç sistemi çubuğun ucunda kütle bulunduran sarkaç sistemidir. Genellikle araba ve direk olarak adlandırılan tipinde çubuk bir ucundan arabaya bağlanır ve yatay doğrultuda hareket eder. Normal sarkaçlar bir noktadan asıldıklarında aşağı yönde dengeye gelirler. Ancak ters sarkaç dengesiz bir sistemdir ve dikey konumda dengede kalması için bir geri besleme sisteminin parçası olarak arabaya kuvvet uygulamak gerekir.

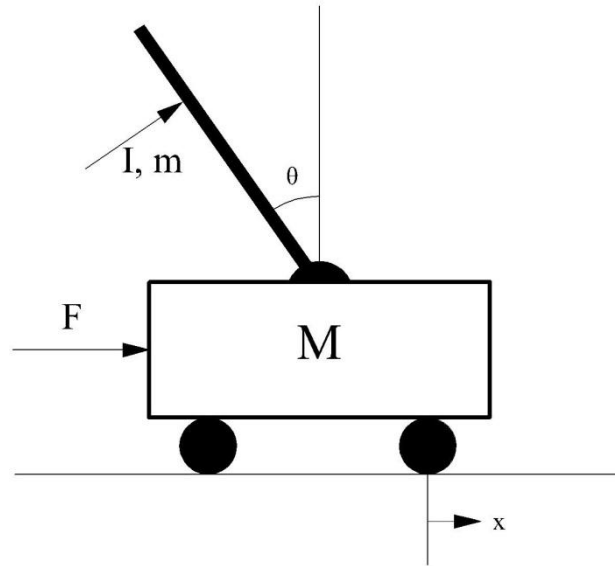
İki eksenli ters sarkaç sisteminde ise bilinmeyen ve kontrol edilmesi gereken parametre sayısı iki katına çıkar. İki eksenli ters sarkaç sisteminin kontrolünü başarabilmek için aşağıdaki adımları izlenecektir:

- İki eksenli ters sarkaç sistemi iki alt sisteme ayrılacak ve her bir sistem ayrı ayrı değerlendirilecektir.
- Bir eksenli ters sarkaç sistemi için matematiksel model hazırlanacak ve sistemin hareket denklemi çıkarılacaktır.
- Bir eksenli ters sarkaç sistemini kontrol etmek için sisteme PID denetleyici eklenecektir.
- Ayrı ayrı oluşturulan iki alt sistem birleştirilerek iki eksenli ters sarkaç sistemi modeli oluşturulacaktır.

- İki eksenli ters sarkaç sistemi fiziki modele uygulanarak çıkan sonuçlar değerlendirilecektir.

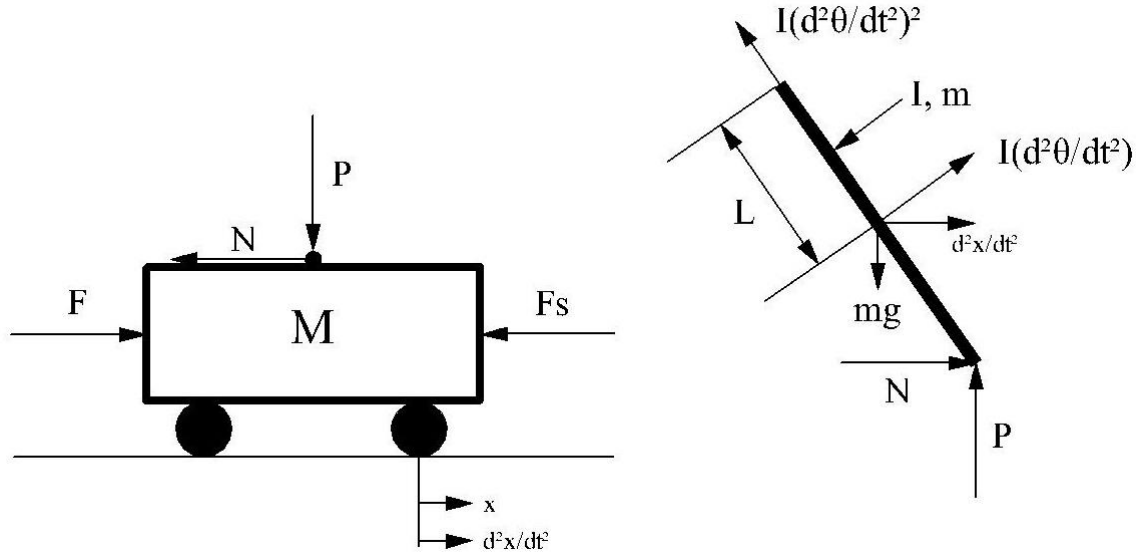
3.2. Bir Eksenli Ters Sarkaç Sisteminin Modellenmesi

Şekil 3.1’de bir boyutlu ters sarkaç sisteminin serbest cisim diyagramı görülmektedir. Sistem bu haliyle oldukça basit gözükmesine rağmen sistemin hareket denklemini ortaya çıkarmak zordur. Çünkü Şekil 3.1’ye göre aynı anda iki hareket meydana gelmektedir: Sarkacın yaptığı açısal hareket ve sarkacı taşıyan arabanın yaptığı doğrusal hareket. Sistemin genel hareket denklemini bulabilmek için Şekil 3.1’deki serbest cisim diyagramını ters sarkaç ve araba için olmak üzere iki ayrı serbest cisim diyagramına ayırılmalıdır.



Şekil 3.1. Ters Sarkaç Sisteminin Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.2’de araba ve sarkaç için serbest cisim diyagramları ayrı olarak gösterilmiştir. Sarkaca ve arabaya etki eden kuvvetler bu şekilde tamamıyla görülmektedir.



Şekil 3.2. Araba ve Ters Sarkacın Serbest Cisim Diyagramları

Şekil 3.2'teki serbest cisim diyagramına göre arabaya yatay doğrultuda etki eden kuvvetler toplandığında Denklem (3.1) elde edilir.

$$F = M\ddot{x} + b\dot{x} + N \quad (3.1)$$

Şekil 3.2'deki serbest cisim diyagramına göre arabaya dikey doğrultuda etki eden kuvvetler toplandığında hareket denklemini elde etmek için işe yarar bilgi elde edilemez. Ancak ters sarkaç serbest cisim diyagramına göre yatay doğrultudaki kuvvetleri toplandığında N tepki kuvveti Denklem (3.2) ile elde edilir.

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (3.2)$$

Denklem (3.2) ile elde edilen N tepki kuvvetini, Denklem (3.1) de yerine koyarsak ters sarkaç sisteminin birinci hareket denklemini Denklem (3.3) ile elde edilir.

$$F = (M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (3.3)$$

Ters sarkaç serbest cisim diyagramına göre dikey doğrultudaki kuvvetler toplandığında Denklem (3.4) elde edilir.

$$P \sin \theta + N \cos \theta - mg \sin \theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x} \cos \theta \quad (3.4)$$

Ters sarkacın arabaya temas ettiği noktaya göre moment alındığı takdirde Denklem (3.5) elde edilir ve N ve P kuvvetlerinden kurtulmuş olunur.

$$-Pl \sin \theta - Nl \cos \theta = I\ddot{\theta} \quad (3.5)$$

Denklem (3.4) ve Denklem (3.5) birleştirildiğinde ters sarkaç sisteminin ikinci hareket denklemi elde edilir.

$$-ml\ddot{x} \cos \theta = (I + ml^2)\ddot{\theta} - mgl \sin \theta \quad (3.6)$$

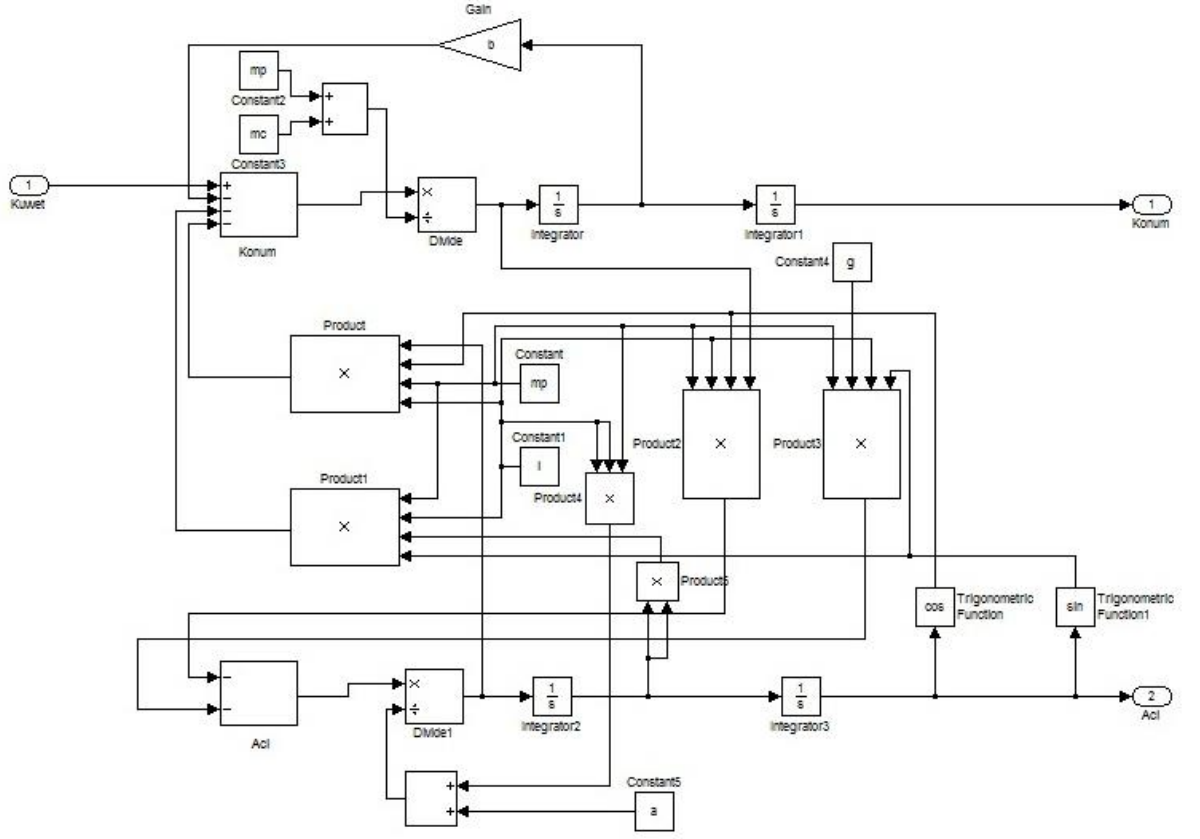
Ters sarkaç sisteminin hareket denklemini bulmak için Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) tekrar düzenlenirse Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) bulunur.

$$\ddot{x} = \frac{F + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta}{(M+m)} \quad (3.7)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-ml\ddot{x} \cos \theta - mgl \sin \theta}{(I+ml^2)} \quad (3.8)$$

Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'in her ikisi de doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerdir. Her iki denklemi de çözebilmek için doğrusallaştırma işlemi yapılması gerekmektedir. Ancak Simulink'de doğrusallaştırma yapmaya gerek yoktur. Simulink her iki diferansiyel denklemi de çözebilmektedir.

Şekil (3.3)'de Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'in Simulink'de oluşturulmuş diyagramı görülmektedir. Görüldüğü gibi sisteme giriş yapan değişken, bozucu etki yapan kuvvet olup, sistemden çıkış yapan değişken ters sarkacın açısı ve konum bilgisidir.



Şekil 3.3. Ters Sarkaç Sisteminin Simulink'te Oluşturulan Hareket Denklemine Ait Blok Diyagramı

Sistemin hareket denkleminde yer alan bazı sabit değerler mevcuttur. Bu sabit değerler Tablo 3.1'de belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Modelde Yer Alan Bazı Sabit Değerlerin Ölçümle Bulunan Değerleri

Ölçülen Sabit Değer	Simge	Ölçülen Değer	Birimi
Sarkaç Kütle	mp	0,01423	kg
Sarkaç Boyu	l	0,2	m
Araba Kütle (X Eksen)	mc _x	0,06962	kg
Araba Kütle (Y Eksen)	mc _y	0,97822	kg

Sarkaç kütlesi ve X ve Y eksenlerinde hareket eden arabaların kütleleri hassas terazi ile dolaylı olarak ölçülmüştür. Hassas terazi önce ağırlıkları ölçer daha sonra bu değerleri yerçekimi ivmesi olan $9,81 \text{ m/s}^2$ değerine bölerek kütle değerini gösterir.

Sarkaç boyu ise sarkacın kütle merkezinin sarkacın arabaya bağlandığı noktaya olan uzaklığıdır. Sarkaç olarak sadece çubuk kullanıldığı için sarkaç boyu olarak çubuk boyunun yarısı olan 20 cm alınmıştır. Çubuk boyu da cetvel yardımıyla ölçülmüştür.

X ve Y eksenleri için toplam sürtünme katsayısı ise $0,1 \text{ N/(m/s)}$ ve $0,2 \text{ N/(m/s)}$ olarak hıza bağlı kabul edilmiştir.

Son olarak, kontrol sistemini oluşturabilmek için sisteme PID denetleyicinin eklenmesi gerekir. Buradaki amaç sarkacın dik konumda kalması olduğu için hareket denkleminde hesaplanan θ (teta) açısının 0 olması gerekir. Ancak öncelikle PID denetleyici ve bileşenleri hakkında bilgi verilecektir.

3.3. P, PI, PD ve PID Denetleyiciler

3.3.1. P Denetleyici

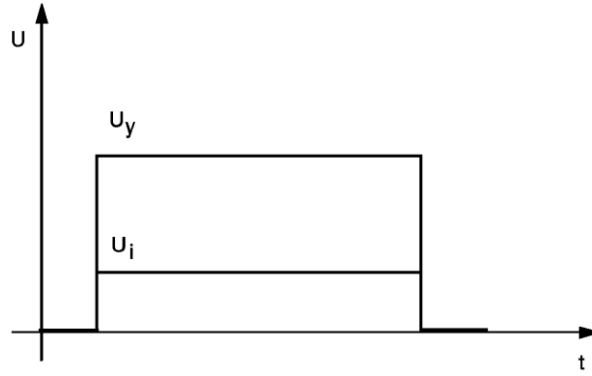
P denetleyici veya diğer adıyla oransal denetleyici, diğer denetleyiciler gibi karşılaştırıcıdan gelen kontrol farkı sinyalini alır. Denetleyicinin görevi, kontrol farkını olabildiğince çabuk 0 yapmaktır. Bu ölçüt denetleyicinin belli görevler için kullanılabilirliğini belirler. P denetleyici, adından da anlaşılacağı gibi giriş sinyaline oransal tepki verir. Giriş sinyali uygulandığı takdirde ayar sinyali sadece çıkışta görülür. Bu nedenle çıkışta değişen veriyi elde edebilmek için girişte kontrol farkının dahil olması gerekir. P denetleyici, oransal davranışa sahip sistemlerde kullanılamaz çünkü bu sistemlerin kontrol değişkenini korumak için ayar sinyaline ihtiyaç vardır. P denetleyici sadece büyük yükseltmelerde kullanılabilir ve mutlaka kontrol farkı mevcuttur. Ayrıca kontrol devresinde büyük yükseltmeler olduğunda salınım eğilimi de artar [Arda, (2011)].

P denetleyicinin kullanım alanları; NC makinelerindeki konum kontrolü, doldurma durum kontrolü, ... vb. Bu kontrol sistemleri I davranışına sahiptirler. Çıkış

değişkenleri, örnek olarak kesici takımı taşıyan kısım, girişteki değişen veri 0 olsa dahi korunur. Çünkü kontrole giren kontrol farkı da 0'dır.

P kontrol, sıçrama cevabından bulunan oransal eylem faktörü (K_P) parametresine sahiptir [Arda, (2011)].

$K_P = U_y / U_i$ şeklinde ifade edilir.



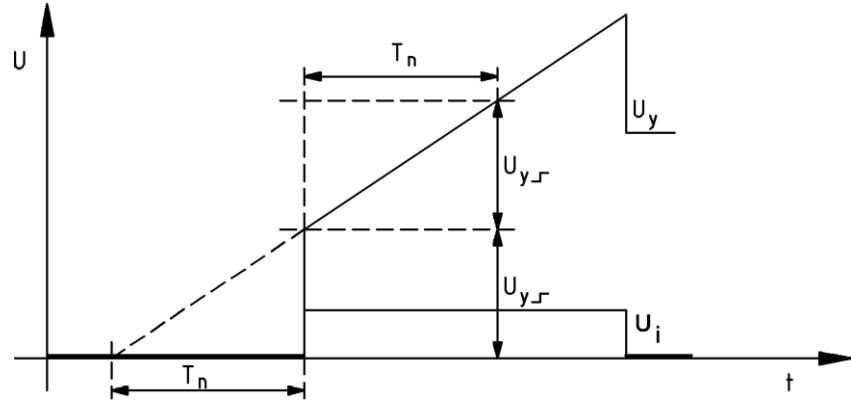
Şekil 3.4. Oransal Eylem Faktörü

3.3.2. PI Denetleyici

Kontrol devresi elemanının integral davranışı, koruma davranışı veya hafıza olarak da tanımlanabilir. Örnek olarak; bir fiçidaki su seviyesi zaman içinde ne kadar su eklenip çıkarıldığını hatırlar. Her yağmurda fiçidaki su seviyesi artar. Yağmur sona erdiğinde fiçidaki su seviyesi 0'a düşmez. Besleme sürücülerindeki işlem de benzerdir. Motorun son kademesine giren gerilim atımı taşıyıcıyı belirli bir konuma götürür ve gerilim kaybolduktan sonra da konum korunur. Son kademeyi kontrol eden denetleyicinin kontrol değişkeni olan konum değerini sabit tutmak için çıkış gerilimini sağlaması gerekmez. Sadece konum ayar değerinden saptığı sürece değişken sağlaması gerekir.

Hız kontrol sistemindeki ilişki ise tamamen farklıdır. Burada değişken aynı zamanda motor son kademesinin giriş gerilimidir ve kontrol değişkeni motor hızıdır. Sistemin genel oransal davranışı dolayısıyla hız sadece değişken sabit olduğu zaman sabit olur. Değişken 0 olduğunda hız da 0'a düşer. Sistemin hafızası yoktur.

Bu tür kontrol sistemlerinde gerçek değer aynı zamanda ayar değeridir. Yani burada kontrol farkı bulunmamaktadır. Denetleyicideki hafıza fonksiyonu sistemin girişindeki değişkenin korunması açısından gereklidir. Bu PI (Proportional-Integral) denetleyici ile başarılmıştır. Şekil 3.5’de PI denetleyicinin sıçrama cevabının nasıl yorumlandığı gösterilmektedir [Arda, (2011)].



Şekil 3.5. PI Denetleyicinin Sıçrama Cevabı

Oransal eylem faktörü sıçrama anında; $K_P = U_y / U_i$

Oransal hassaslık, giriş geriliminin sıçramasıyla birlikte çıkış geriliminin yüksek eğimli sıçrama yapmasına sebep olur. Bu nedenle başlangıçta çok hızlı tepki verir. Daha sonra I elemanından dolayı çıkış gerilimi kalkış hızıyla doğrusal olarak artar.

Kalkış hızı; $v_I = \Delta U_y / \Delta t$

İntegral eylem faktörü çıkış geriliminin ne kadar çabuk değişebileceğini belirler.

İntegral eylem faktörü $K_I = \text{çıkış geriliminin kalkış hızı} / \text{giriş gerilimi}$.

$K_I = v_I / U_i$

İntegral eylem faktörü aynı zamanda sıklıkla integral kazancı olarak da adlandırılır. Daha da büyüdüğünde kontrol çıkış gerilimi daha da hızlı kalkış yapar ve böylece denetleyici daha doğru tepki verir.

K_I ve K_P 'yi birbirine bağlayan değişken ise integral eylem zamanı T_n 'dir. PI denetleyicinin, giriş gerilimi sıçradığında P oransal tarafından hemen üretilen gibi I oransal ile birlikte çıkışta aynı gerilim salınımını yaratmak için integral eylem zamanına ihtiyacı vardır. Grafikselleştirme Şekil 3.5'de gösterilmiştir. İntegral eylem zamanı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{İntegral eylem zamanı: } T_n = K_P / K_I$$

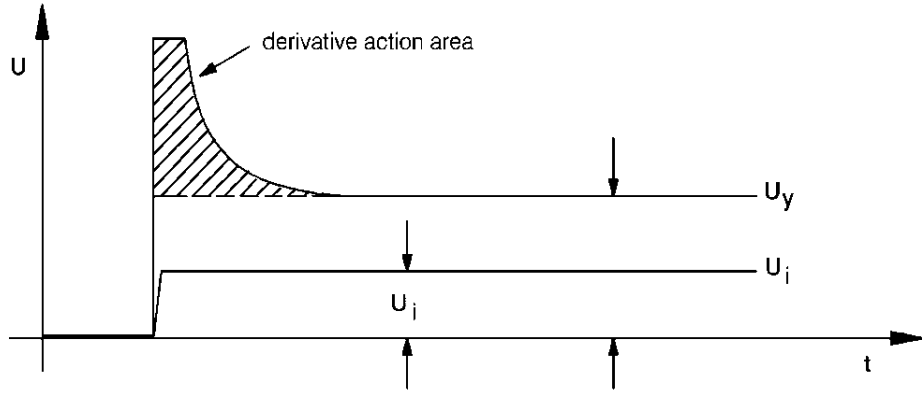
Kısa integral eylem zamanının PI kontroller için anlamı; integral eylem faktörü oransal eylem faktörüne göre büyüktür [Arda, (2011)].

3.3.3. PD Denetleyici

P denetleyici sadece giriş gerilimi olduğunda çıkış gerilimi üretir. Eğer giriş gerilimi 0'a düşerse çıkış gerilimi de 0 olur. PI denetleyici, giriş gerilimi var olduğu sürece çıkış gerilimini artırır. Çok küçük giriş gerilimlerinde bile çıkış gerilimi artmaya devam eder. Ancak giriş gerilimi 0 olduğunda artış durur. PI denetleyici oldukça doğru sonuçlar verir ancak görece yavaştır ve değere ulaşması için zamana ihtiyaç vardır. Durağan bir sistem kontrol edilecekse, örnek olarak ısıtma, denetleyici ilk olarak oransal üzerinden tepki vermelidir. Böylece sistemin ilk ataletini karşılayabilir. Daha sonra PD (Proportional-Derivative) veya PID denetleyiciler kullanılır.

PD denetleyicide, çıkış geriliminin genliği sadece giriş geriliminin değerine değil değişme hızına da bağlıdır. PD denetleyici girişindeki kontrol farkının çok küçük değişimlerde bile görece yüksek çıkış gerilimleri üretilir. Sistemin ilk ataletini denetleyici ile D oranının ne derece karşılayabildiği, sıçrama cevabındaki türevsel eylem alanı tarafından belirlenir. Türevsel eylem alanı, kalkış cevabındaki sıçrama genliğinde bulunabilir. PD denetleyici türevsel eylem alanı sayesinde bu genliğe sadece P denetleyiciye göre daha önce ulaşır. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 parametrelerin nasıl belirlendiğini gösterir [Arda, (2011)].

PD denetleyicinin sıçrama cevabı:

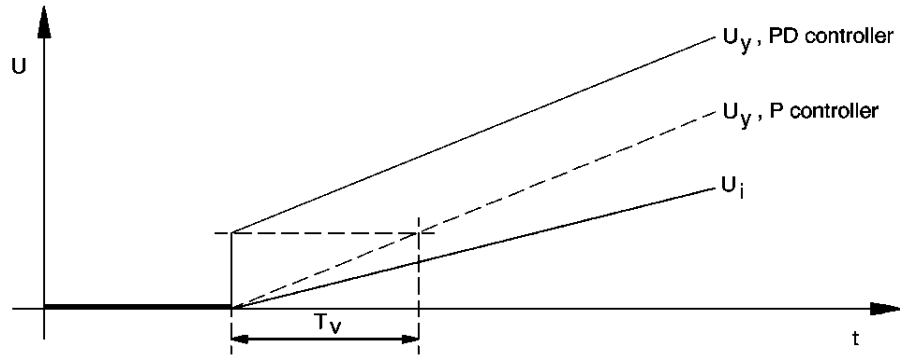


Şekil 3.6. PD Denetleyicinin Sıçrama Cevabı

Oransal eylem faktörü K_P : Oransal eylem faktörü sabit durum şartlarındaki iki gerilimin yardımıyla bulunur. $K_P = U_y / U_i$

D oran parametrelerini aşırı yüklemeye gidene kadar sıçrama cevabından belirlemek zordur. Türevsel eylem alanının büyüklüğü, değişik ayarlar için denetleyicinin karşılaştırılabilmesini mümkün kılar.

PD denetleyicinin kalkış cevabı:



Şekil 3.7. PD Denetleyicinin Kalkış Cevabı

Diferansiyel eylem faktörü K_D : Diferansiyel eylem faktörü çıkış gerilimi ile giriş geriliminin değişim hızı değerleri yardımıyla belirlenir.

Diferansiyel eylem faktörü $K_D = \text{Çıkış gerilimi} / \text{Giriş geriliminin değişme hızı}$

Türevsel eylem zamanı $T_v = \text{Türevsel eylem zamanı}$, oransal eylem faktörü ve diferansiyel eylem faktörü arasında bağıntı oluşturur.

$$T_v = K_D / K_P$$

Küçük türevsel eylem zamanı ve dolayısıyla küçük türevsel eylem alanı denetleyicinin oransal kısmının etkisi D kısmından daha büyüktür.

Denetleyici ile birlikte D kısmı türevsel eylem alanına göre sadece P denetleyiciden daha hızlıdır. Grafikselleştirme kalkış cevabı tarafından sağlanır [Arda, (2011)].

3.3.4. PID Denetleyici

PID (Proportional-Integral-Derivative) günümüzde çok kullanılan bir kontrol yöntemidir. Endüstrideki uygulamaların %75'inde uygulanmaktadır. Çok geniş bir uygulama alanının olmasına rağmen PID uygulamaları için standart bir tanımlama yoktur. Karl Astrom'a göre PID algoritması aşağıdaki gibidir:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.9)$$

Burada $u(t)$ kontrol değişkeni, $e(t)$ toplama noktası $y(t)$ çıkıştan ölçülen değerle aynıdır. K , T_i , T_d PID parametreleridir. Yukarıdaki formül biraz daha basite indirgenebilir:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) \quad (3.10)$$

P : Oransal

I : Integral

D : Türevsel

PID denetleyicinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad (3.11)$$

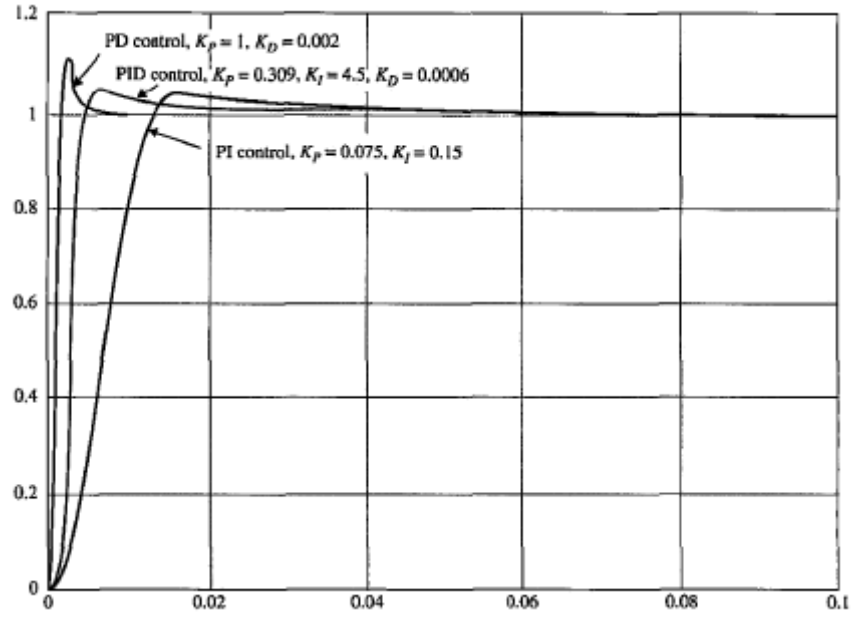
K_P = Oransal kazanç

K_I = Integral kazancı

K_D = Türevsel kazanç

D bölümü, girişteki küçük değişikliklere bile denetleyicinin en hızlı şekilde karşılık vermesini sağlar. P bölümü, sinyalin yükseltgenmesiyle ilgilenir ve I bölümü de denetleyicinin kontrol farkı bırakmadan düzgün bir şekilde çalışmasını sağlar. Üç elemanın da bir arada olduğu denetleyicide sıçrama cevabı veya kalkış cevabını belirlemek zor olur. Oransal denetleyicilerin (K_P), yükselme zamanını azaltmada etkisi vardır ve azaltır, ama asla tamamen yok etmez (kararlı durum hatası). Integral denetleyicinin (K_I) kararlı hal hatasının çıkarılmasında etkisi vardır ancak bu geçici tepkinin daha kötü olmasına sebep olabilir [Kuşçu, (2012)].

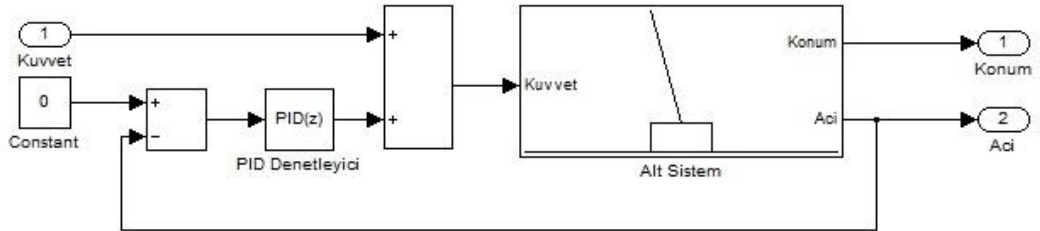
Aynı kontrol problemi için PI, PD ve PID denetleyicileri ayrı ayrı kullanılmış ve etkileri Şekil 3.8'de gösterilmiştir. PID denetleyici, PD denetleyicinin ileri aşma etkisini azaltmış ve PI denetleyiciden daha çabuk cevap vererek ayar değerine daha hızlı ulaşmıştır. Şekil 3.8'den PID denetleyicinin PI ve PD denetleyicilere göre avantajları görülmektedir [Kuo, (2009)].



Şekil 3.8. PID Denetleyicinin PD ve PI Denetleyicilerle Karşılaştırılması

3.4. Bir Eksenli Ters Sarkaç Sistemine PID Denetleyicinin Uygulanması

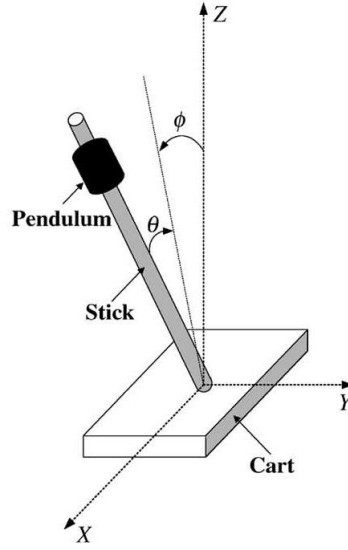
PID denetleyici, bir eksenli ters sarkaç sistemine sistemin matematiksel modelinin yer aldığı bloktan önce eklenmiştir. Bir eksenli ters sarkaç sisteminin kontrol diyagramı Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9. Bir Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Kontrol Diyagramı

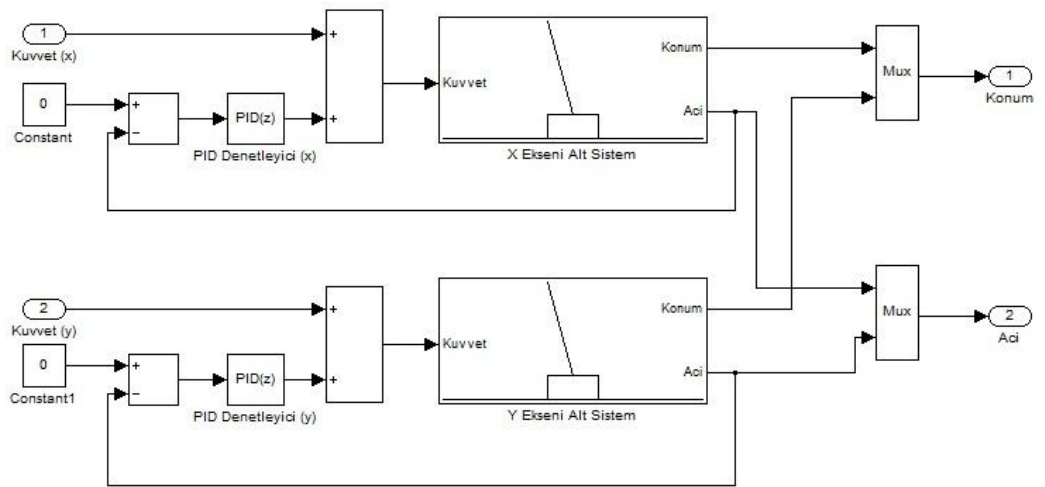
3.5. Bir Eksenli Modelin İki Eksene Uyarlanması

İki eksenli ters sarkaç, Şekil 3.10’da görülmektedir. Ters sarkaç sistemi X ve Y eksenli doğrultusunda hareket edebilmektedir.



Şekil 3.10. İki Eksenli Ters Sarkaç

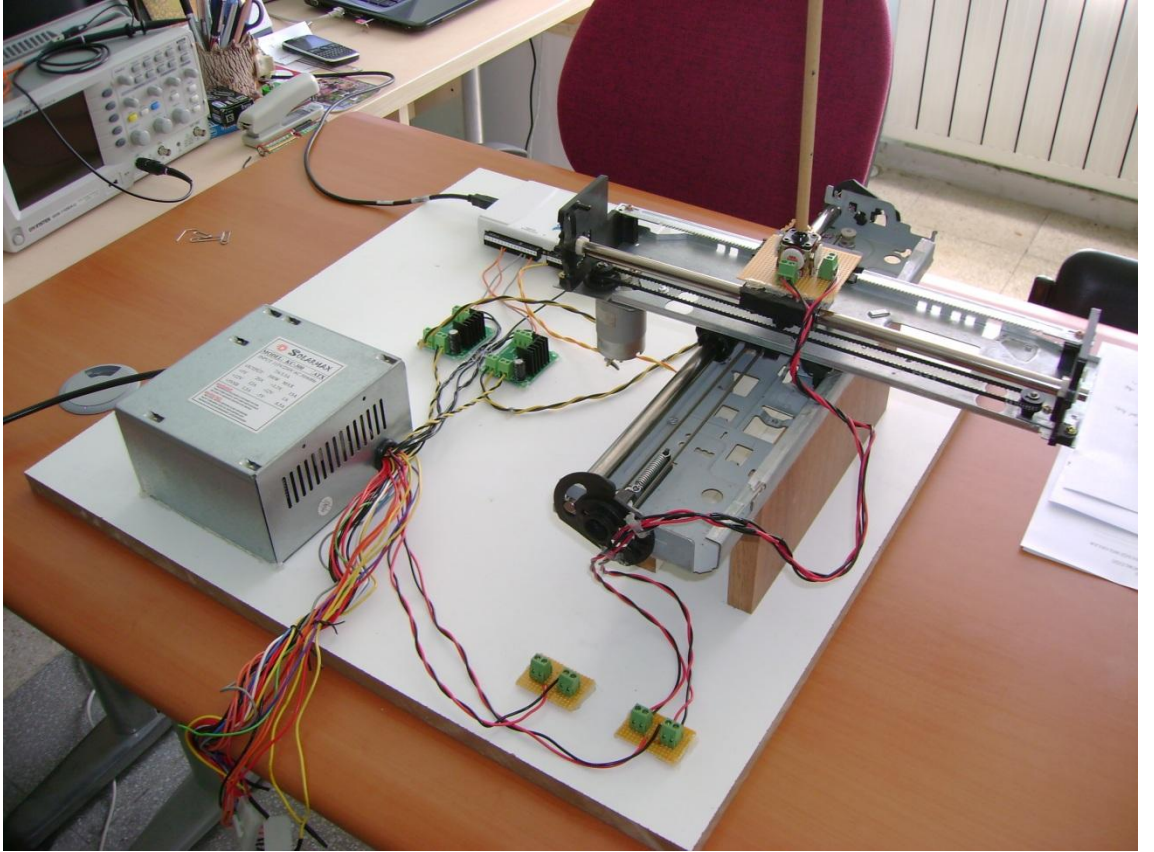
Bir eksenli ters sarkaç sistemini iki eksene uyarlarlarken bazı kabuller yapmak gerekmektedir. İki eksenli ters sarkaç sistemi, X ve Y eksenli alt sistemleri olarak iki parçaya ayrılacağı belirtilmiştir. Simulink'te X ve Y alt sistemleri olarak iki tane alt sistem oluşturulduktan sonra bu alt sistemlerin içine Şekil 3.9'da gösterilen bir eksenli ters sarkaç sistemi modeli yerleştirilir. Ayrıca sistemin denge konumunu bozan kuvveti de X ve Y eksenlerindeki bileşenleri olarak ikiye ayırmak gerekmektedir. Şekil 3.11'de iki eksenli ters sarkaç sisteminin Simulink'te oluşturulan modeli görülmektedir.



Şekil 3.11. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Modeli

3.6. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Fiziki Mekanizması

Bu bölümde iki eksenli ters sarkaç sisteminin fiziki modelinin yapım aşamalarından bahsedilecektir. Bir önceki bölümde modellenmesi yapılmış olan sistem oluşturulan bu sistemde test edilmiştir. Şekil 3.12’de oluşturulmuş olan sistemin genel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.12. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi

Şekil 3.12’de görüldüğü üzere sistemi oluşturan elemanlar şu şekildedir:

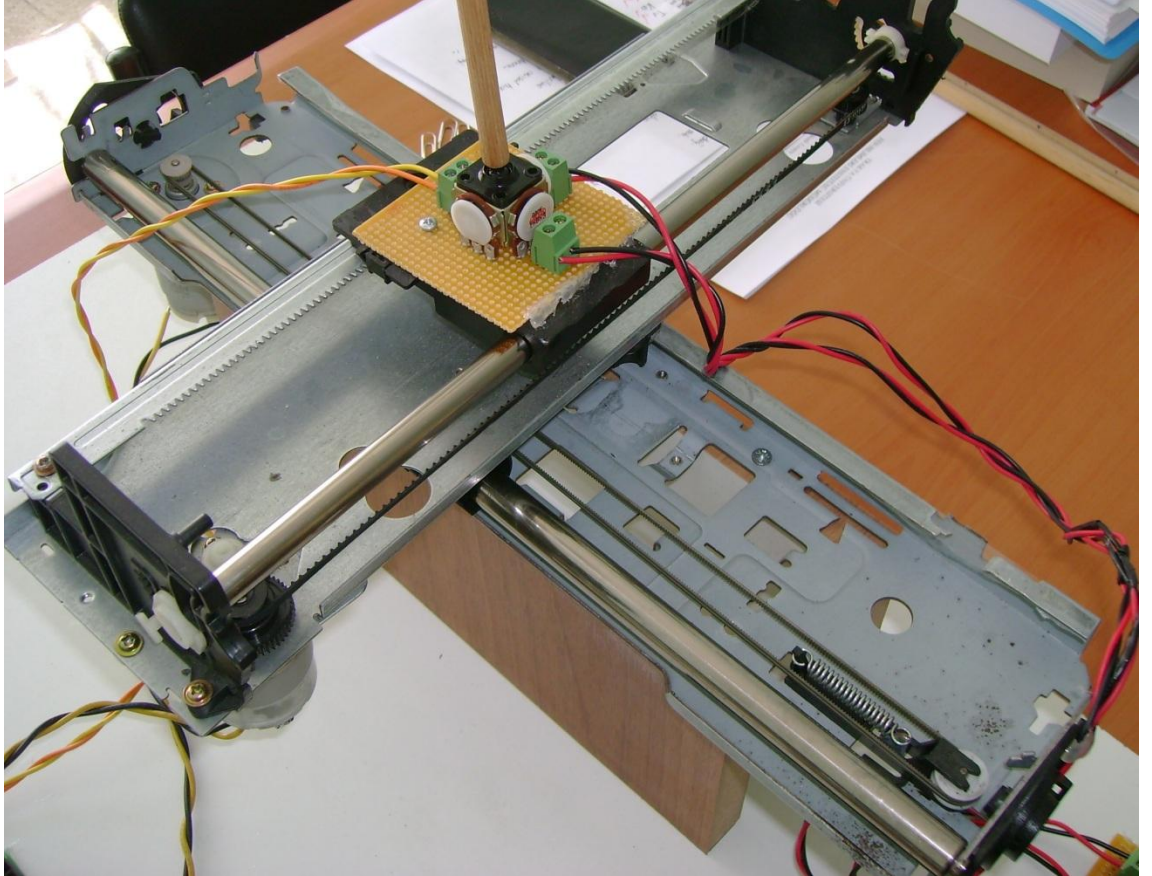
- X ve Y Eksenleri Hareketli Mekanizmaları
- Joystick Potansiyometre
- Doğru Akım(DC) Motorları
- Motor Sürücü Devreleri
- Güç Kaynağı

- Veri Toplam Kartı (DAQ Card)

Şimdi sırasıyla bu elemanlar hakkında detaylı bilgi verilecektir.

3.6.1. X ve Y Eksenleri Hareketli Mekanizmaları

Şekil 3.12’de görüleceği üzere X ve Y eksenlerinde hareket edebilen mekanizmalar kullanılmayan yazıcılardan elde edilmiştir. Temel olarak yazıcıların içinde mürekkep püskürtme işini yapan yazıcı kafaları ve bu kafaları hareket ettiren dişli-kayış mekanizmaları ve doğru akım (DC) motorları kullanılmıştır. Joystick potansiyometrenin hemen altında yer alan eksen X eksenine kabul edilmiş ve onun altında yer alan ve X eksenine dik olan eksen ise Y eksenine kabul edilmiştir. Şekil 3.13’de hareketli mekanizmaların daha yakından görüntüleri verilmiştir.



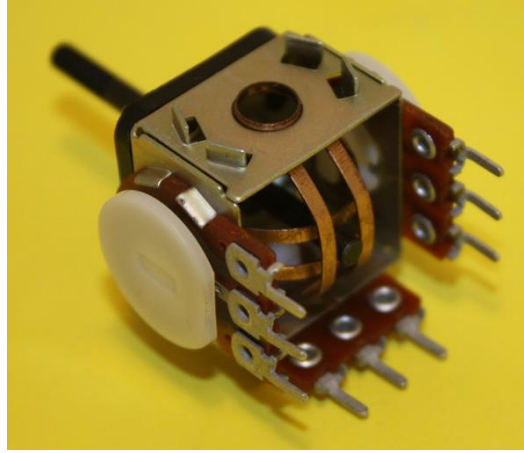
Şekil 3.13. Hareketli Mekanizmaların Yakından Görünüşü

3.6.2. Joystick Potansiyometre

Şekil 3.12’de ters sarkacın mekanizmaya bağlandığı noktada görülmektedir. Ayrıntılı görünümü Şekil 3.13’de gösterilmiştir.

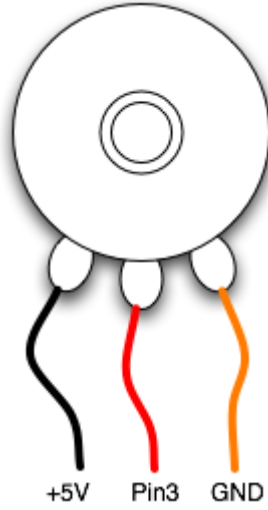


Şekil 3.14a. Joystick Potansiyometre Üstten Görünüşü



Şekil 3.14b. Joystick Potansiyometre Alttan Görünüşü

Sistemde kullanılan her bir potansiyometre (üçünden sadece ikisi kullanılmıştır) 1000 Ohm’luk dirence sahiptir. Şekil 3.15’deki gibi soldaki bacağa +5V, sağdakine ise 0V(GND) uygulandığında potansiyometrenin konumuna göre orta bacaktan 0-5 V değerleri arasında bir değer okunur.



Şekil 3.15. Joystick Potansiyometrenin Bacak Bağlantısı

Potansiyometreye uygulanan 5 Volt'luk gerilim Şekil 3.22'de gösterilen güç kaynağından temin edilmiştir. Orta bacadan okunan gerilim değeri ise Veri Toplama Kartı tarafından okunmaktadır. Daha detaylı bilgiler ilerleyen kısımlarda verilmiştir.

3.2.3. Doğru Akım (DC) Motorları

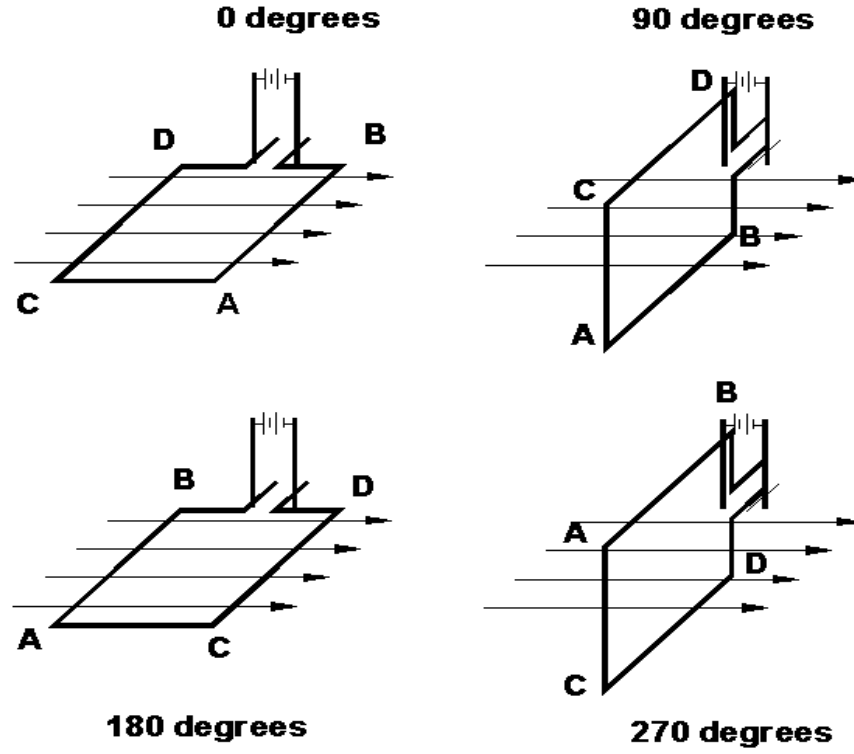
DC Motorlar robotik uygulamalarında ve endüstriyel alanda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Ucuz ve küçüktürler. Genel olarak 1.5V ile 100V arasında çalışabilirler. 6V, 12V ve 24V motorlar çok yaygın olarak bulunmaktadır. Birkaç bin RPM den on binlerce RPM e kadar çalıştırılabilirler. 12V ve daha küçük motorlar yapısına göre birkaç yüz mili amperden birkaç ampere kadar akım çekebilirler.

DC motorların genel özellikleri:

- Yüksek hız
- Düşük tork
- Ters yönde kullanım
- Sürekli hareket olarak sıralanabilir.

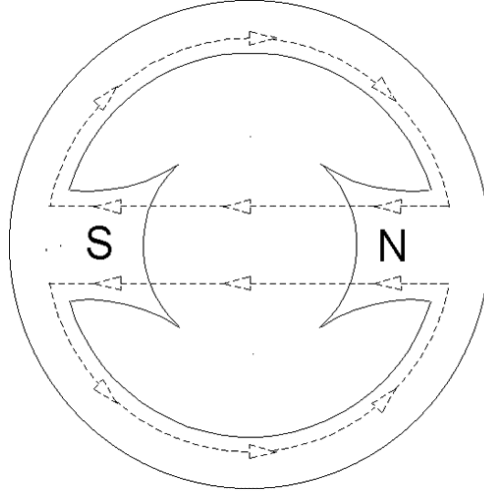
Mantık olarak bobin üzerinden geçen akımın sonucunda oluşan manyetik alan sayesinde oluşturduğu kutuplaşmayı ileri ve geri yönlü olarak kullanarak yani zıt

kutupların çekmesi ya da aynı kutupların birbirini itmesi prensibinin dairesel harekete dönüştürülmesini temel alınan en basit yapıdır. Diğer motorların tamamı bu mantık üzerine kurulmuştur.



Şekil 3.16. Doğru Akım (DC) Motorlarında Manyetik Alan Yönü

Şekil 3.16'da akımın yönünün ve iletkenin şeklinin manyetik alanı ya da kuvvet yönünü nasıl etkilediği görülmektedir. Aşağıda ise bu hareketin dairesel harekete dönüştürülmesi görülür.



Şekil 3.17. Doğru Akım Motorlarında Dairesel Hareketin Oluşumu

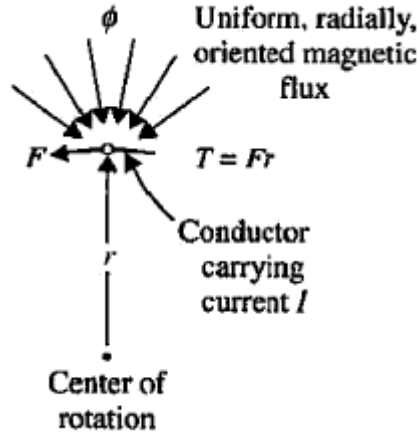
Mıknatıs mantığında oluşan N-S kutuplaşması kullanılarak N kutbu tarafına S kutbu gelecek ya da S kutbu tarafında N kutbu gelecek şekilde akımın yönü değiştirilerek hareket ivmesi kazandırılmaktadır.

3.2.3.1. Doğru Akım Motorlarının Temel Çalışma Prensibi

Doğru akım motoru temelde elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren bir dönüştürücüdür. Motor milinde oluşan moment alan akısı ve armatür akımıyla doğrudan orantılıdır. Şekil 3.18’de görüldüğü gibi akım ileten bir iletken akısı ϕ olan manyetik bir alanda dönüş eksenine r mesafede bulunmaktadır. Üretilen moment ile ϕ ve i_a akımı arasındaki ilişki

$$T_m = K_m \phi i_a \quad (3.12)$$

olarak verilir; burada T_m [N.m] motor momenti, ϕ [W_b = V.s] manyetik akı, i_a [A] armatür akım ve K_m bir orantı katsayısıdır.



Şekil 3.18. Doğru Akım(DC) Motorda Tork Oluşumu

Şekil 3.18'deki düzende üretilen momentten başka, manyetik alanda hareket eden iletkenin uçlarında da bir gerilim oluşur. Bu akımın akışına karşılık gelen ve milin açısal hızıyla orantılı gerilime zıt elektromotor kuvvet adı verilir. Zıt elektromotor kuvvet ile milin açısal hızı arasında

$$e_b = K_m \phi \omega_m \quad (3.13)$$

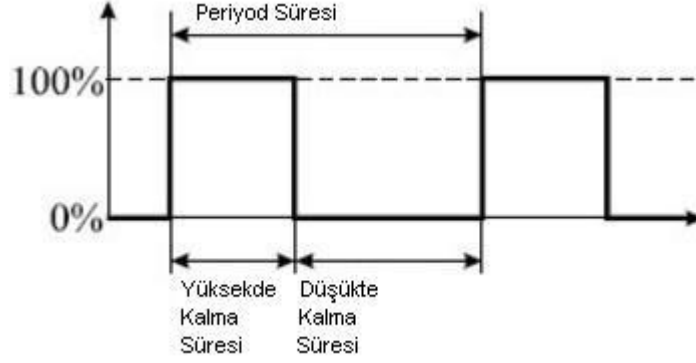
ilişkisi geçerlidir. Burada e_b [V] zıt elektromotor gerilimi ve ω_m [rad/s] motor milinin açısal hızıdır. (3.12) ve (3.13) denklemleri doğru akım motorunun temel işlevini tanımlar.

3.2.3.2. Doğru Akım Motorlarında Hız Kontrolü

Doğru akım motorları, değişken kolay hız değiştirme özelliklerine sahip olduğundan hızın kontrol edilmesi istenen yerlerde kullanılırlar. Yüksek yol alma momenti sağladığından, hız kontrolü geniş aralıklarda yapılır. Hız kontrolü alternatif akım motorlarına göre daha kolay ve daha ucuzdur. DC motorun hızı aşağıdaki yöntemlerle ayarlanabilir:

- Endüvi devresi direncini (R_a) değiştirerek
- Uyarma akımını (I_a) değiştirerek
- Ward-Leonard sistemi ile
- Yarıiletkenler kullanılarak
- PWM (Pulse Width Modulation - Darbe Genişlik Modülasyonu) ile

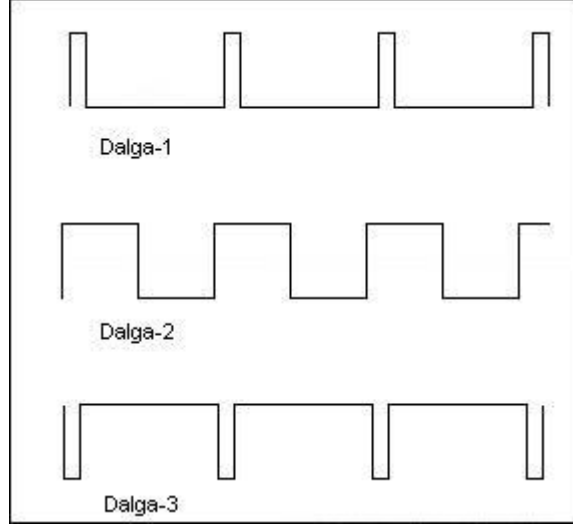
Bu çalışmada doğru akım (DC) motorlarının hız kontrolü PWM yöntemi ile yapılmıştır. PWM (Pulse Width Modulation), üretilen darbelerin (pulse) genişliklerinin kontrol edilerek veya değiştirilerek üretilmek istenen analog değer elde edilmesidir. Şekil 3.18’de bir PWM dalgasının yapısı görülmektedir.



Şekil 3.19. PWM Sinyali Yapısı

Görüldüğü gibi dalga yapısı bir kare dalgaya benzemektedir. Dalganın tepe noktasındaki değeri V_{cc} , çukurdaki değeri ise V_{ss} olsun. Elimizde V_{ss} ve V_{cc} değerlerinde iki gerilim vardır ve genellikle PWM sinyali dijital sinyal olduğu için $V_{ss}=0$ ve $V_{cc}=5$ voltur. Bu dalganın V_{cc} de ve V_{ss} kalma süresinin oranını değiştirilerek V_{cc} ile V_{ss} arasındaki tüm gerilimler elde edilebilir.

Elde edilmek istenen gerilimin nasıl hesaplanacağı konusunda Duty Cycle (Görev Zamanı) terimiyle karşılaşılır. 5V’da kalma süresinin PWM dalgasının periyoduna oranı olarak hesaplanır. Mesela, duty cycle’in 50% olduğu durumda V_{cc} ’nin uygulanma süresinin periyoda oranı 1/2’dir. Başka bir deyişle V_{cc} ’nin uygulanma süresi V_{ss} ’nin uygulanma süresine eşittir. Şekil 3.19’da değişik duty cycle oranına sahip PWM dalgalar görülmektedir.



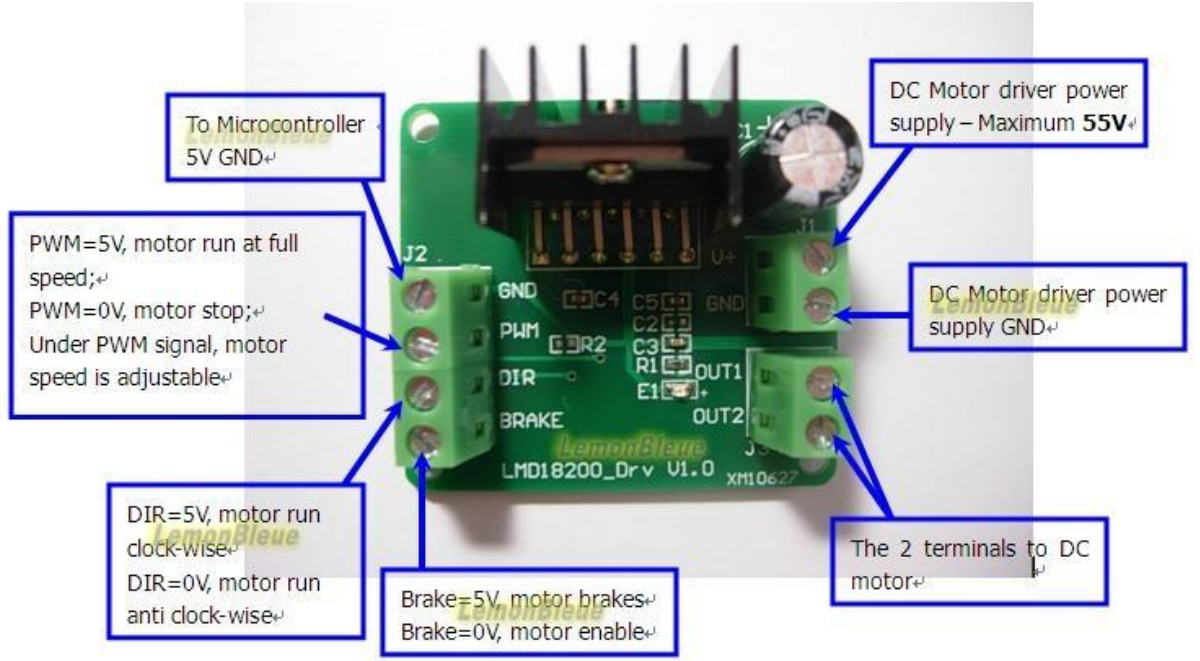
Şekil 3.20. Değişik Duty Cycle'lara Sahip PWM Sinyalleri

Elde edilecek gerilim ile duty cycle arasında bir doğru orantı vardır. Gerilimin değeri V_{cc} gerilimi ile duty cycle'ın çarpımı ile hesaplanır.

3.2.4. Motor Sürücü Devreleri

Mikrodenetleyicilerin veya Veri Toplama Kartlarının çıkışları DC motorları veya step motorları direkt olarak kontrol etmek için yetersiz olduğundan motor sürücü devreler kullanılır. Motor sürücü devreler ile mikrodenetleyicilerin veya veri toplama kartlarının çıkışlarından alınan dijital sinyaller yükseltilerek motorların kontrolü sağlanır. Motor sürücü devreler transistörler kullanılarak H köprüsü ve benzeri şekillerde hazırlanabilir. Ancak genellikle kolaylık açısından motor sürücü entegre devreler tercih edilmektedir. Motor sürücü entegre seçiminde temel özellik entegrenin kullanım voltajı ve akım sınırı gibi özellikleridir.

İki eksenli ters sarkaç sisteminde motor sürücü olarak LMD18200 entegresinin kullanıldığı sürücü devre kullanılmıştır. Şekil 3.20'de sürücü devresinin şekli görülmektedir.



Şekil 3.21. LMD18200 DC Motor Sürücü Devresi

LMD18200 entegresi en yüksek 55V ve 3A değerine kadar motor besleyebilmektedir. DC motor sürücülerde yaygın olarak kullanılan L293 ve L298 entegrelerine göre oldukça üstündür. Bu çalışmada da önce L293 ve L298 entegreleri kullanılmış ancak istenen verim alınamamıştır. Yapılan uygulamada 12V'luk DC motorlar kullanıldığı için entegre beslemesi de 12V olarak yapılmıştır. PWM portuna ise Darbe Genişlik Modülasyonu(PWM) sinyali gönderilerek DC Motorun hız kontrolü yapılabilmektedir. DIR portuna ise yön bilgisi girilmektedir ve 5V'luk sinyal gönderildiğinde saat yönünde, 0V'luk sinyal gönderildiğinde saat yönünün tersine olarak DC motoru döndürmektedir. LMD18200 entegresi ile ilgili daha detaylı bilgi ve bacak yapısı EK-1'de verilmiştir.

3.2.5. Güç Kaynağı

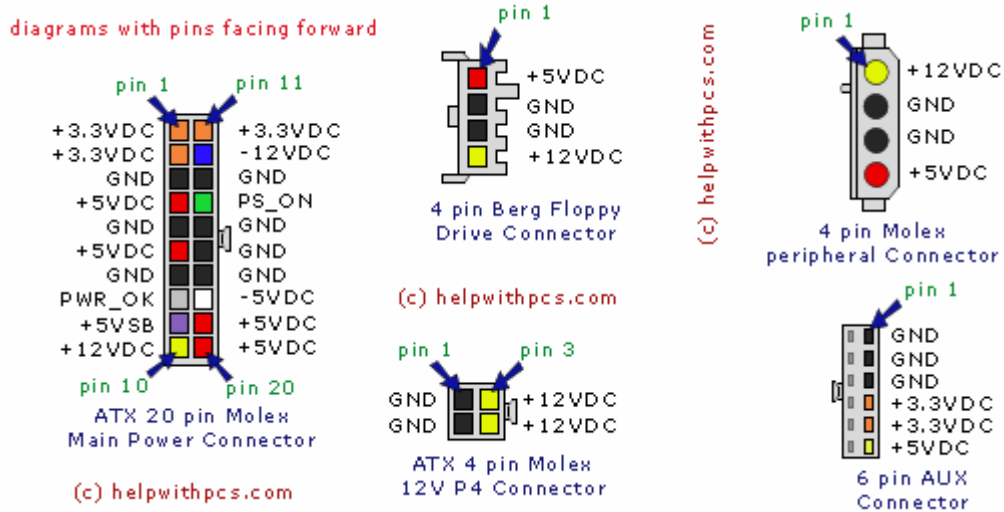
İki eksenli ters sarkaç sistemine gerekli gücü sağlamak için bilgisayar kasalarında kullanılan ATX güç kaynağı kullanılması düşünülmüştür. Bu amaçla

kullanılmayan masaüstü bilgisayarların birinden 300W güce sahip olan bir güç kaynağı sökülmiş ve kullanılmıştır. Şekil 3.21’de kullanılan güç kaynağı görülmektedir.



Şekil 3.22. Düzenekte kullanılan ATX Güç Kaynağı

Şekil 3.22’de ise güç kaynağından çıkan kabloların taşıdıkları gerilim değerleri gösterilmiştir. Normalde güç kaynağı bilgisayar kasasında anakarta bağlı olarak çalıştığı için harici olarak alınıp fişe takıldığında çalışmaz. Şekil 3.22’de görülen yeşil renkli “PS_ON” kablosu ile herhangi bir siyah kabloyu(GND) kısa devre yapıldığında güç kaynağı artık çalışır konumdadır.



Şekil 3.23. Güç Kaynağından Çıkan Kabloların Taşıdığı Gerilimler

3.2.6. Veri Toplama Kartı (DAQ Card)

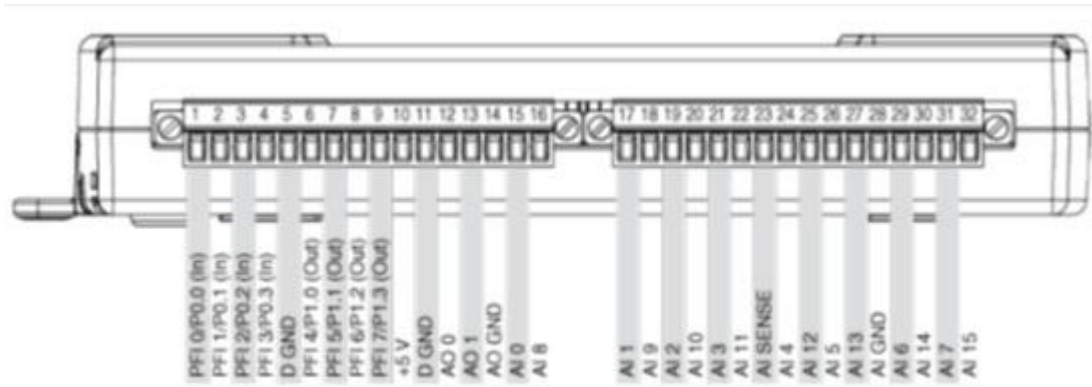
Modellemesi yapılan iki eksenli ters sarkaç sistemi ile oluşturulan fiziki düzenek arasında bağlantının sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla NI USB-6211 veri toplama kartı kullanılmıştır. Daha önceden de bahsedilen, potansiyometrenin orta bacağından okunan gerilim değeri, modelleme kısmında sisteme giriş değişkeni olarak alınan kuvveti temsil etmektedir. Yine aynı şekilde motor sürücü devresindeki PWM ve DIR portlarına hız ve yön sinyallerini Veri Toplama Kartı göndermektedir. Şekil 3.23’de NI USB-6211 veri toplama kartı görülmektedir.



Şekil 3.24. NI USB-6211 Veri Toplama Kartı

Böylece iki eksenli ters sarkaca dışarıdan yapılan bozucu etki potansiyometre tarafından gerilim sinyaline dönüştürülerek veri toplama kartı aracılığıyla Simulink programına iletilmekte ve modelde işlendikten sonra veri toplama kartı aracılığıyla motor sürücü devresine hız ve yön sinyalini göndererek sarkacın dik konumda kalmasını sağlanmaktadır. Veri toplama kartının buradaki rolü iki eksenli ters sarkaç düzeneği ile bilgisayar arasında iletişim ara yüzü oluşturmaktır.

Şekil 3.24'de NI USB-6211 veri toplama kartının giriş ve çıkış portları gösterilmiştir.



Şekil 3.25. NI USB-6211 Giriş-Çıkış Portları

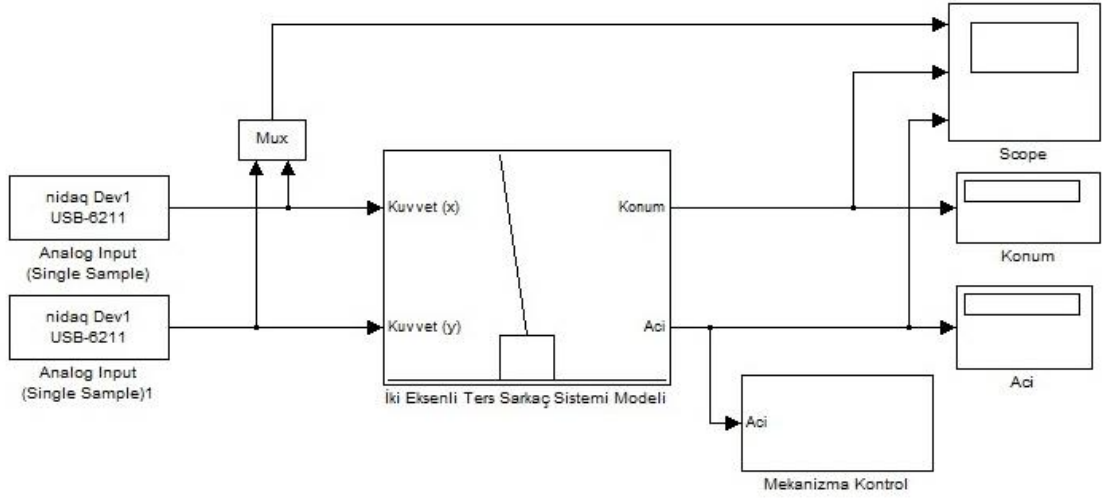
NI USB-6211 veri toplama kartı ile ilgili bazı teknik bilgiler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. NI USB-6211 Veri Toplama Kartı Teknik Özellikleri

NI USB-6211	
Analog Giriş Sayısı	16
Çözünürlük (bit)	16
Maximum Örnekleme Sayısı (kS/s)	250
Analog Çıkış Sayısı	2
Çözünürlük (bit)	16
Maximum Örnekleme Sayısı (kS/s)	250
Dijital Giriş/Çıkış Sayısı	4DG / 4DÇ
Sayıcı / Zamanlayıcı Sayısı	2
Çözünürlük (bit)	32

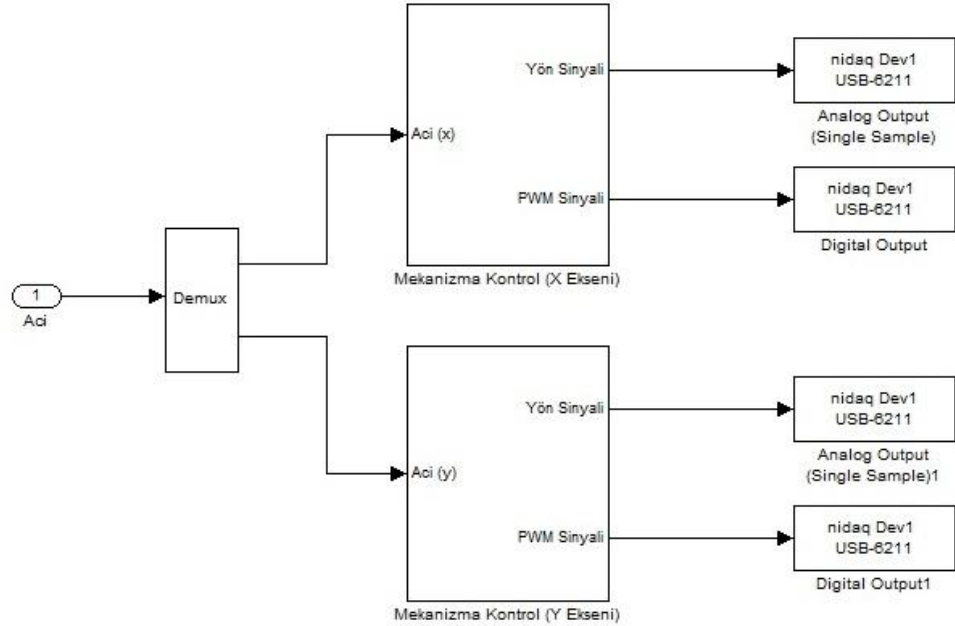
3.2.7. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Modeli ile Mekanizmasının Birleştirilmesi

İki eksenli ters sarkaç sistemi modeli ile mekanizması arasında veri toplama kartının yardımıyla oluşan bir bağlantı olduğu daha önceden bahsedilmişti. Veri toplama kartı, potansiyometreden gerilim değerini okuyup modelde işleme sokup, çıkan veriyle DC motor sürücü devresine hız ve yön bilgisini göndermesi gerekiyordu. Belirtilenler doğrultusunda Şekil 3.11’de gösterilmiş olan iki eksenli ters sarkaç sistemi modelini tekrar bir alt sistem içine aldıktan sonra gerekli eklemeler yapılarak Şekil 3.25’deki yapı elde edilir.



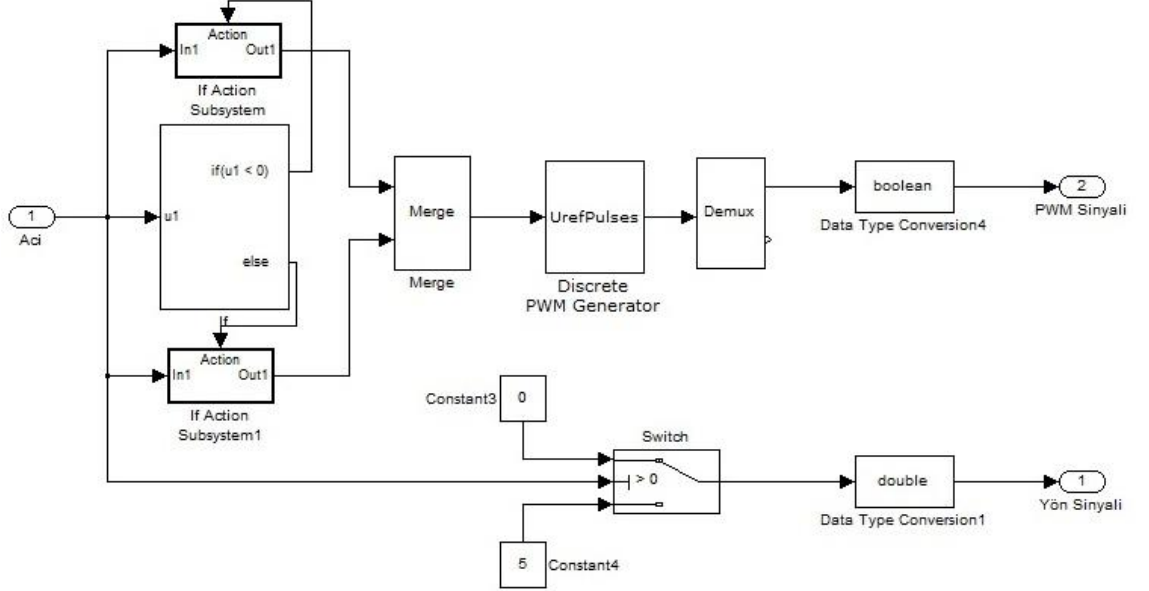
Şekil 3.26. İki Eksenli Ters Sarkaç Sistemi Genel Yapısı

Şekil 3.26’de görüldüğü üzere iki eksenli ters sarkaç sistemi modeli bloğunda X ve Y eksenleri için olan kuvvet değişkeni girişleri NI USB-6211 veri toplama kartının iki tane analog sinyal girişine bağlanmıştır. Buradan okunan veriler potansiyometreden okunan gerilim değerleridir. İki eksenli ters sarkaç sistemi modeli bloğunun açılı çıkışı “Mekanizma Kontrol” isimli yeni bir bloğa giriş yapmıştır. Şekil 3.27’de mekanizma kontrol bloğunun iç yapısı görülmektedir.



Şekil 3.27. Mekanizma Kontrol Bloğu İç Yapısı

Şekil 3.26’da görüldüğü üzere mekanizma kontrol bloğuna gelen açı değerine göre hız ve yön sinyali üretilmektedir. Bu sinyalin üretildiği bloğun yapısı Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



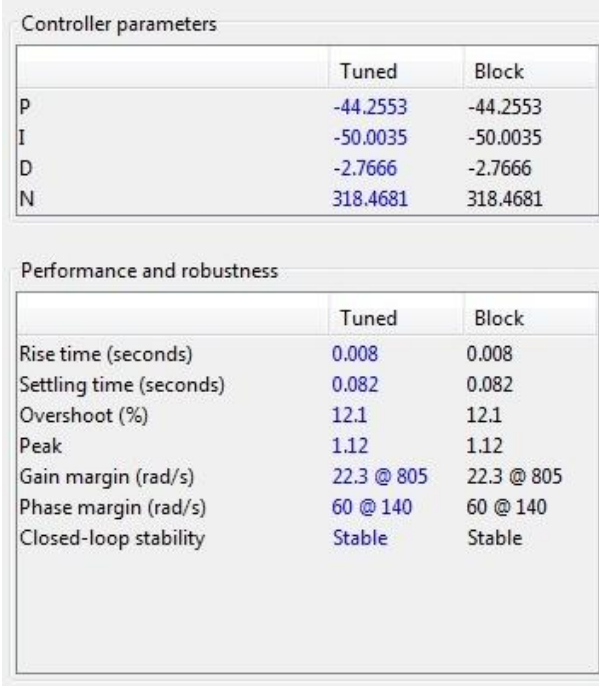
Şekil 3.28. Hız ve Yön Sinyalinin Üretildiği Bloğun Yapısı

İki eksenli ters sarkaç modeli ile mekanizması birleştirildikten sonra artık sistem çalıştırılmaya hazır duruma gelmiştir. Simülasyon, 10s gibi bir süre için çalıştırıldıktan sonra ilk sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları “Sonuçlar ve Tartışma” bölümünde değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İki eksenli ters sarkaç sistemi modelini ve mekanizmasının istenilen şekilde çalışabilmesi için PID denetleyici katsayılarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Normalde en uygun PID denetleyici katsayıları değişik optimizasyon yöntemlerine göre yapılmaktadır. Ancak Simulink’te bu işlem için mevcut olan “PID Tuner” bloğu vardır. Şekil 3.28’de X eksenli alt sistemi için bulunan optimum değerler görülmektedir.



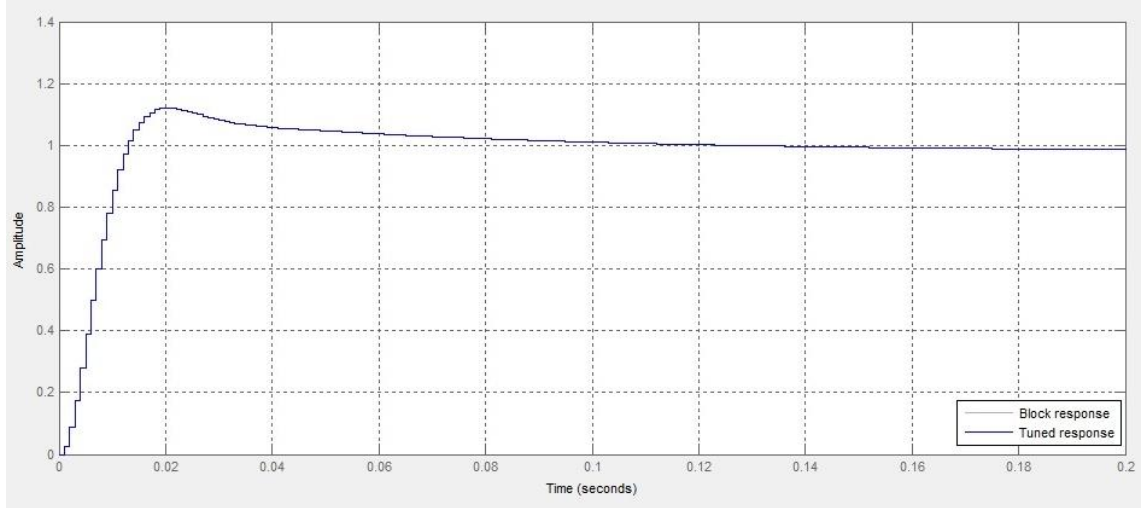
The image shows a screenshot of the PID Tuner results window in Simulink. It contains two tables. The first table, titled 'Controller parameters', lists the tuned and block values for P, I, D, and N gains. The second table, titled 'Performance and robustness', lists various performance metrics such as rise time, settling time, overshoot, peak, gain margin, phase margin, and closed-loop stability for both the tuned and block configurations.

Controller parameters		
	Tuned	Block
P	-44.2553	-44.2553
I	-50.0035	-50.0035
D	-2.7666	-2.7666
N	318.4681	318.4681

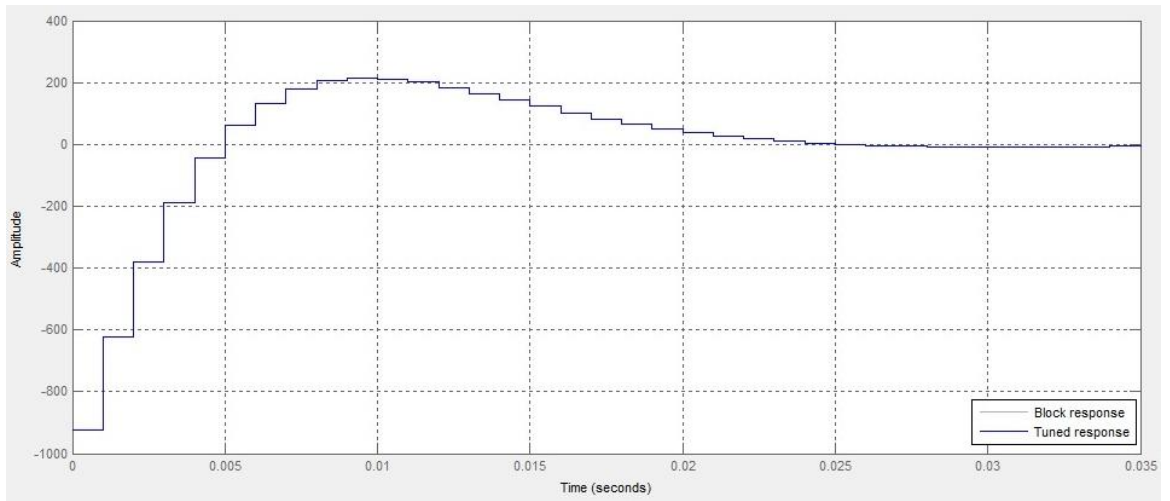
Performance and robustness		
	Tuned	Block
Rise time (seconds)	0.008	0.008
Settling time (seconds)	0.082	0.082
Overshoot (%)	12.1	12.1
Peak	1.12	1.12
Gain margin (rad/s)	22.3 @ 805	22.3 @ 805
Phase margin (rad/s)	60 @ 140	60 @ 140
Closed-loop stability	Stable	Stable

Şekil 4.1. X Eksenli Alt Sistemi İçin PID Katsayıları

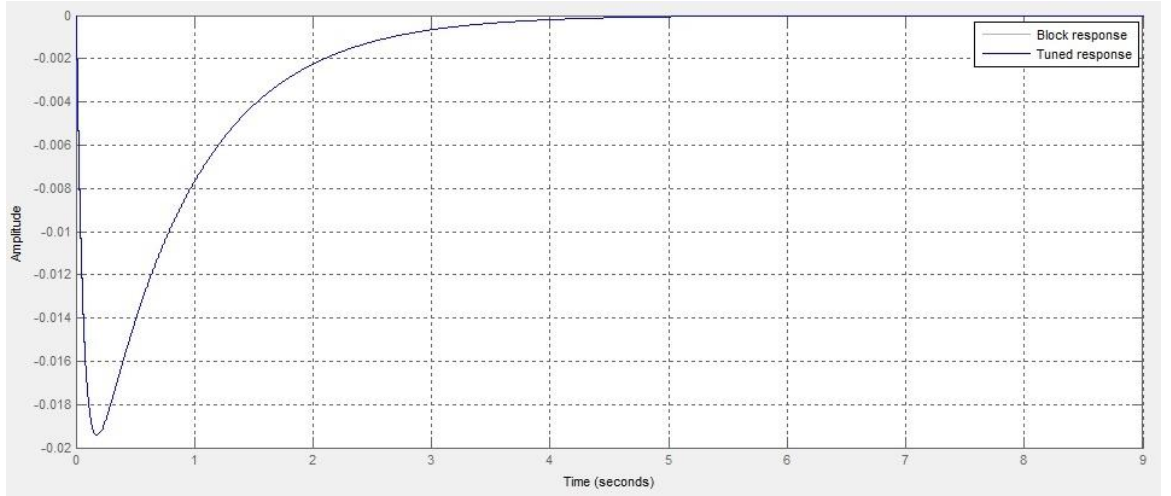
Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi X eksenli alt sistemi 0.082 s'de denge konumuna oturmakta ve %12,1 ileri aşma gerçekleşmektedir. Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te X eksenli alt sistemi denetleyicisinin gösterdiği performans görülmektedir.



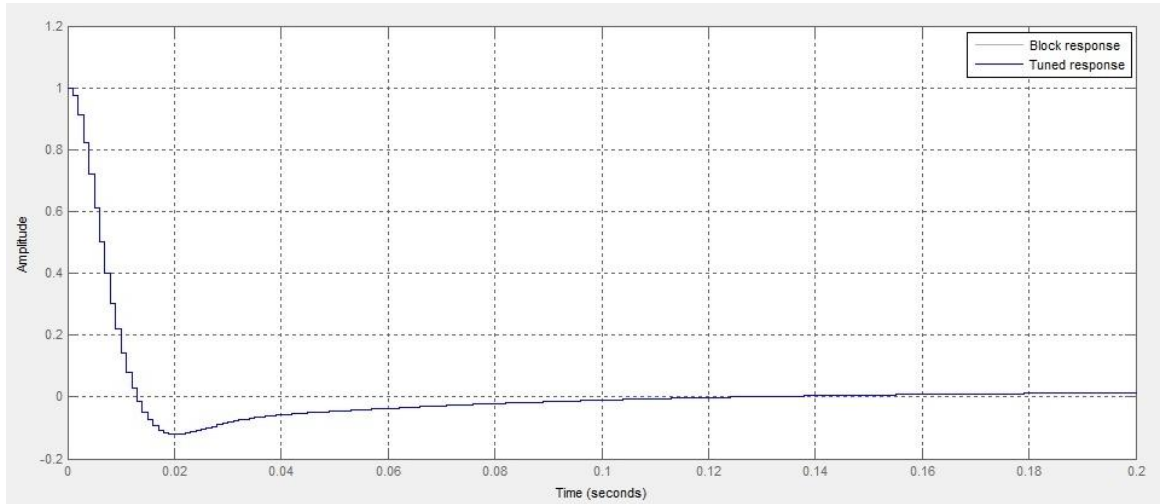
Şekil 4.2. X Eksenli Alt Sistemi PID Denetleyici Referans Yol Basamak Cevabı



Şekil 4.3. X Eksenli Alt Sistemi PID Denetleyici Performansı Basamak Cevabı



Şekil 4.4. X Ekseni Alt Sistemi PID Giriş Bozucu Etkisi Basamak Cevabı



Şekil 4.5. X Ekseni Alt Sistemi PID Çıkış Bozucu Etkisi Basamak Cevabı

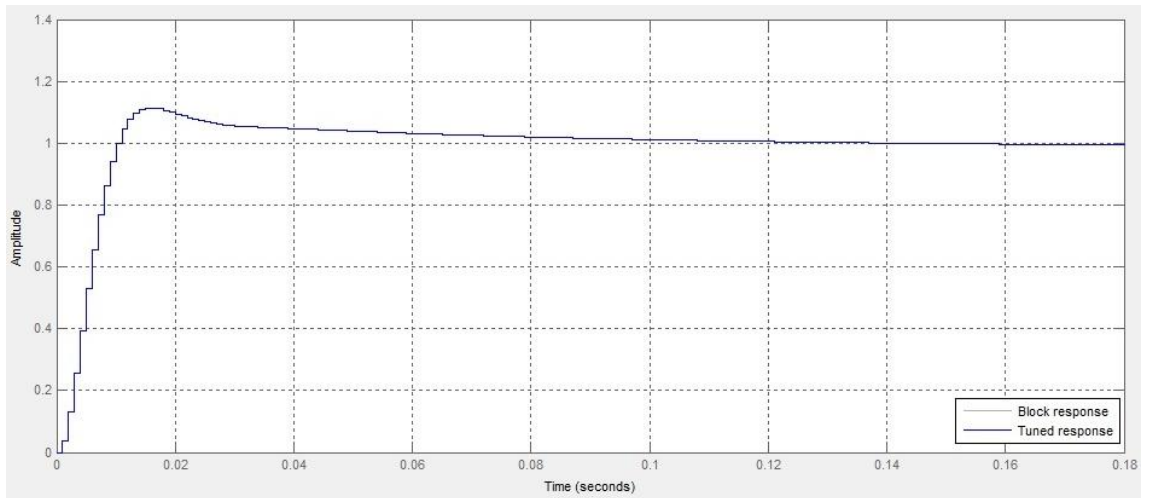
Aynı şekilde Y eksenine alt sistemi için de PID Denetleyicinin optimum değerlerinin belirlenmesi gerekir. X eksenine alt sistemi için uygulanan işlemin aynısı uygulandıktan sonra Şekil 4.6'da belirtilen katsayı değerleri bulunur.

Controller parameters		
	Tuned	Block
P	-711.8035	-711.8035
I	-982.775	-982.775
D	-47.2248	-47.2248
N	384.6026	384.6026

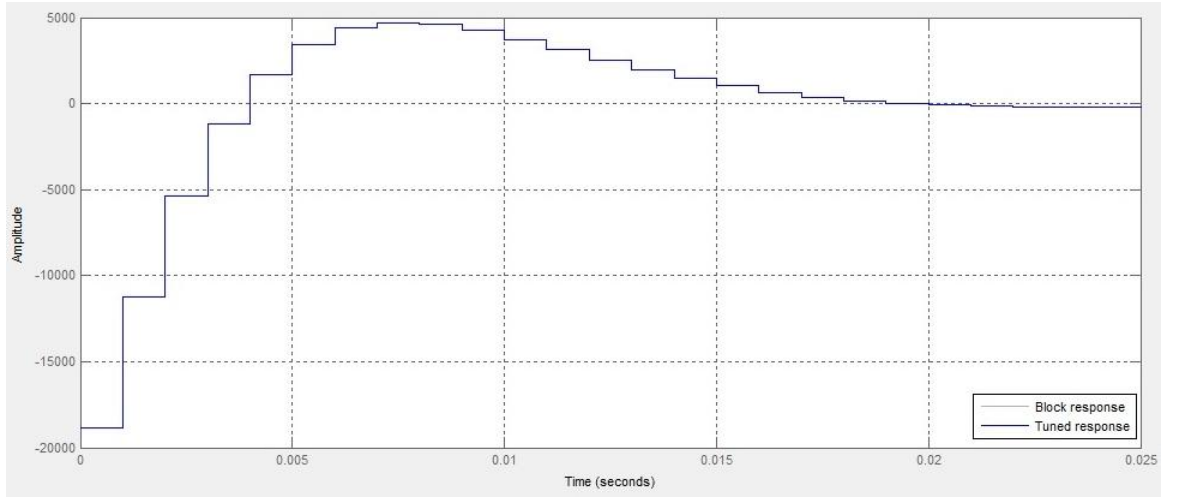
Performance and robustness		
	Tuned	Block
Rise time (seconds)	0.007	0.007
Settling time (seconds)	0.081	0.081
Overshoot (%)	11.4	11.4
Peak	1.11	1.11
Gain margin (rad/s)	20.4 @ 893	20.4 @ 893
Phase margin (rad/s)	60 @ 175	60 @ 175
Closed-loop stability	Stable	Stable

Şekil 4.6. Y Eksenli Alt Sistemi İçin PID Katsayıları

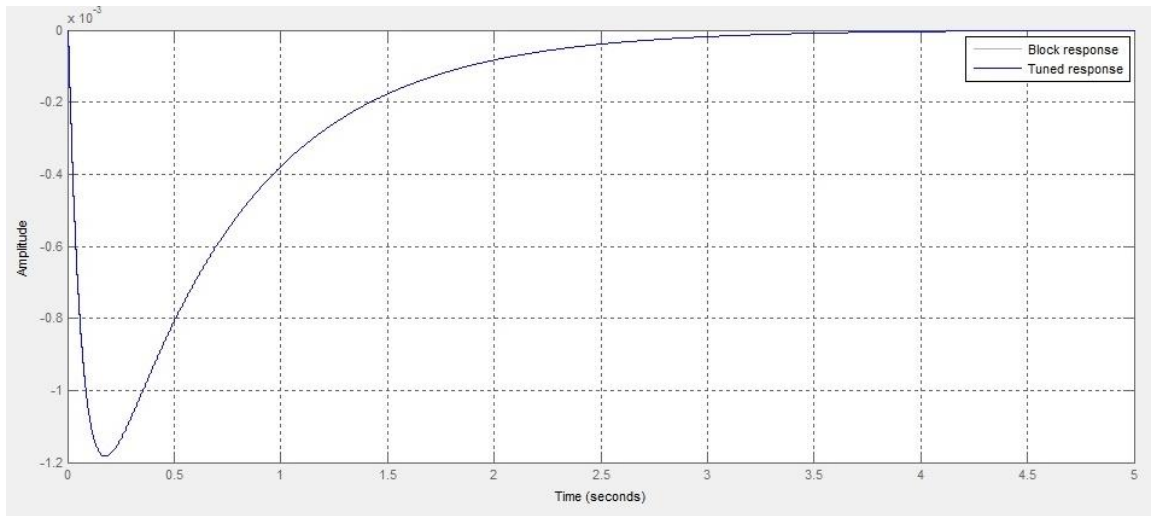
Şekil 4.6'dan da görüldüğü gibi Y eksenli alt sistemi 0.081 s'de denge konumuna oturmakta ve %11,4 ileri aşma gerçekleşmektedir. Şekil 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10'te Y eksenli alt sistemi denetleyicisinin gösterdiği performans görülmektedir.



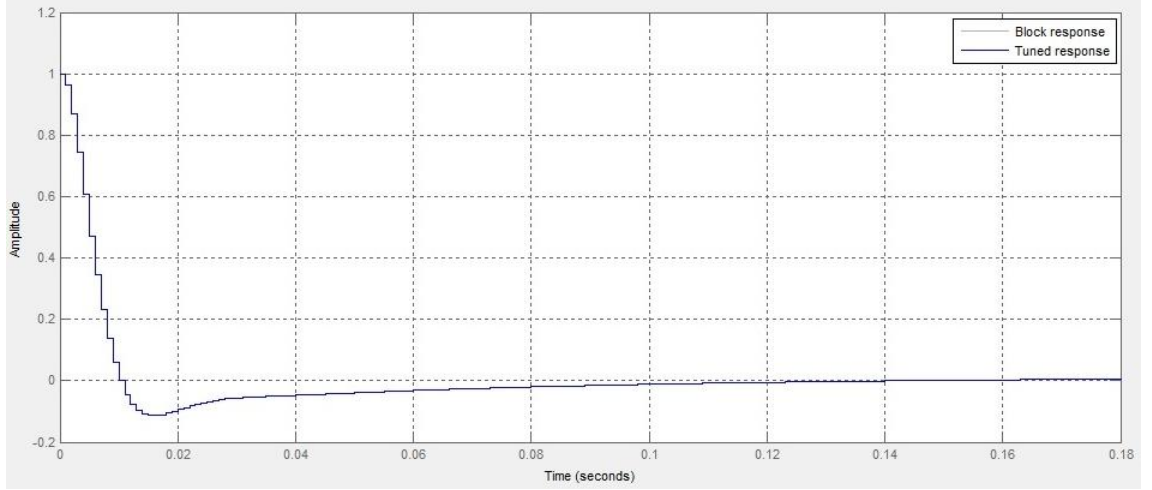
Şekil 4.7. Y Eksenli Alt Sistemi PID Denetleyici Referans Yol Basamak Cevabı



Şekil 4.8. Y Ekseni Alt Sistemi PID Denetleyici Performansı Basamak Cevabı



Şekil 4.9. Y Ekseni Alt Sistemi PID Giriş Bozucu Etkisi Basamak Cevabı



Şekil 4.10. Y Eksenli Alt Sistemi PID Çıkış Bozucu Etkisi Basamak Cevabı

Şekillerden de anlaşılacağı üzere hem X eksenli alt sistemdeki denetleyici, hem de Y eksenli alt sistemdeki denetleyici oldukça kısa sürelerde denge konumuna gelmektedir.

PID denetleyici katsayılarını değiştirerek denetleyici performansının değişimi görülebilir. Bu durumla ilgili bazı çalışmalar da yapılmıştır [Arda ve Kuşçu, (2012)].

Bahsedilen veriler simülasyon için geçerli olan verilerdir. İki eksenli ters sarkaç mekanizması ise grafiklerde görülen performansı gösterememiştir. Sistem küçük bozucu etkilerde kendini dengelemeye çalışmakta ancak büyük bozucu etkilerle karşılaştığında kendini toparlayamamaktadır. İki eksenli ters sarkaç mekanizmasının düzgün olarak çalışmamasının tahmini sebepleri aşağıda belirtilmiştir.

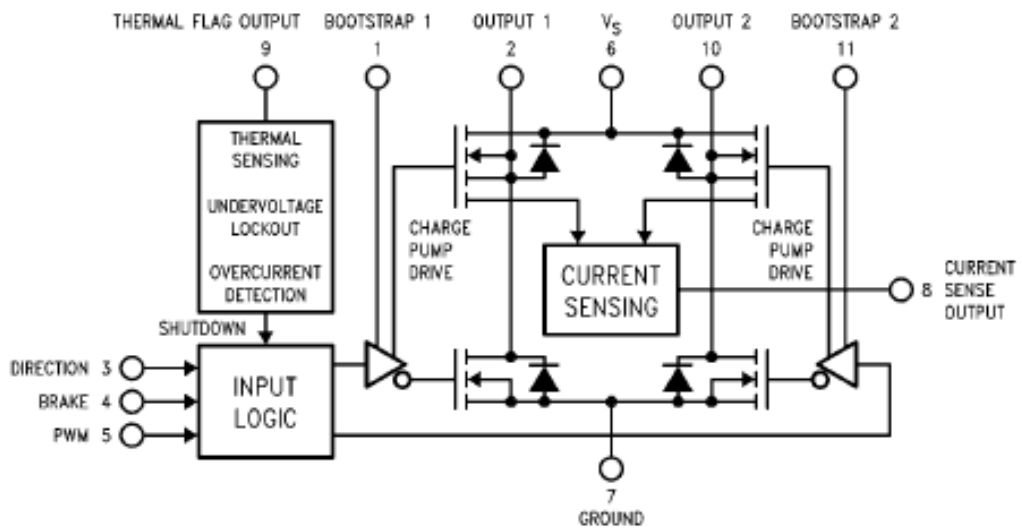
- Hareket eden mekanizmalar eski yazıcılardan sökülerek temin edildiklerinden dinamik davranış karakteristikleri tam olarak bilinmemektedir.
- Her iki eksenli hareket eden mekanizmaların hareket serbestisi olan mesafeler görece kısadır.
- Bozucu kuvvet etkisinin sarkaç açısına olan etkisini ölçmede kullanılan potansiyometre yeteri kadar hassas değerler vermemekte ve iç yapısında belirgin miktarda sürtünme kayıpları barındırmaktadır.

- İki eksenli ters sarkaç sistemi modeli alt sistemleri oldukça fazla sayıda bloklar içermektedir. Blok sayısının ve işleme giren değişken sayısının artması modelin bozucu etkiye cevap verme süresini uzatabilir ve sistemde gecikmeler yaşanmasına sebep olabilir. İki eksenli ters sarkaç sistemi modeli daha da basitleştirilerek işlemci yükü hafifletildiğinde belki bu sorunun önüne geçilebilir.

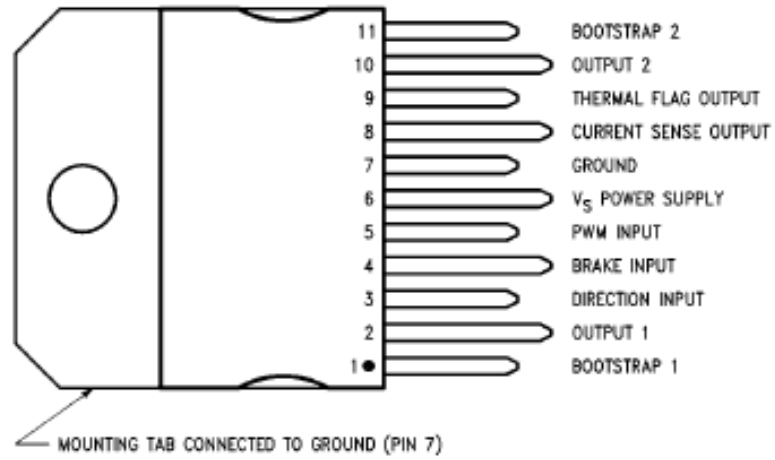
Sonuç olarak, iki eksenli ters sarkaç sistemi modelinden düzgün ve kararlı sonuçlar elde edilmiş fakat mekanizmadan aynı performans alınamamıştır. Bunun yanında bu çalışma sadece sarkacı dik konumda tutmaya, yani sarkaç açısını 0 derecede tutmaya çalışmaktadır. Buna ek olarak, bu çalışmayı ilerletme amacıyla, sarkaç konumunu da kontrol eden bir PID kontrol algoritması veya tüm kontrol algoritmasından ayrı bir denetleme sistemi geliştirilebilir.

EKLER

EK -1 : LMD18200 Entegresi Teknik Verileri



LMD18200 Entegresi Fonksiyonel Blok Diyagramı



LMD18200 Entegresi Bacak Yapısı

Absolute Maximum Ratings *(Note 1)*

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Total Supply Voltage (V_S , Pin 6)	60V
Voltage at Pins 3, 4, 5, 8 and 9	12V
Voltage at Bootstrap Pins (Pins 1 and 11)	$V_{OUT} + 16V$
Peak Output Current (200 ms)	6A
Continuous Output Current <i>(Note 2)</i>	3A

Power Dissipation <i>(Note 3)</i>	25W
Power Dissipation ($T_A = 25^\circ\text{C}$, Free Air)	3W
Junction Temperature, $T_{J(max)}$	150°C
ESD Susceptibility <i>(Note 4)</i>	1500V
Storage Temperature, T_{STG}	-40°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	300°C

Operating Ratings *(Note 1)*

Junction Temperature, T_J	-40°C to +125°C
V_S Supply Voltage	+12V to +55V

LMD18200 Entegresi Bazı Teknik Özellikleri

KAYNAKLAR

1. Arda, M., Kuşçu, H., “Modeling of the Two Dimensional Inverted Pendulum in MATLAB/Simulink”, 5th International Mechanical Engineering Forum, Prague, (2012).
2. Arda, M., “PID Kontrolün Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Semineri, Edirne, (2011).
3. Chiu, C., Peng, Y., Lin, Y., “Intelligent backstepping control for wheeled inverted pendulum”, Expert Systems with Applications, Sayı 38, Sayfa 3364–3371, (2011).
4. Chiu, C., Lin, Y., Lin, C., “Real-time control of a wheeled inverted pendulum based on an intelligent model free controller”, Mechatronics, Sayı 21, Sayfa 523-533, (2011).
5. Ghanbari, A., Farrokhi, M., “Decentralized Neuro-Fuzzy Controller Design Using Decoupled Sliding-Mode Structure for Two-Dimensional Inverted Pendulum”, Engineering of Intelligent Systems International Conference, (2006).
6. Hirata, H., Takabe, T., Anabuki, M., Ouchi, S., “VSS Robust Adaptive Control Including a Self-Tuning Controller for a Rotary Inverted Pendulum”, Electronics and Communications in Japan, Cilt 94, Sayı 6, (2011).
7. Huang, C., Wang, W., Chiu, C. , “Design and Implementation of Fuzzy Control on a Two-Wheel Inverted Pendulum”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Cilt 58, Sayı 7, Sayfa 2988-3001, (2011).

8. Jung, S., Cho, H., Hsia, T. C., “Neural Network Control for Position Tracking of a Two-Axis Inverted Pendulum System: Experimental Studies”, IEEE Transactions on Neural Networks, Cilt 18, Sayı 4, Sayfa 1042-1048, (2007).
9. Kumar, S., Agarwal, A. K., Gupta, A., Tripathi, H., Kulshrestha, P. M., “A Novel Method to Balance Inverted Pendulum by Angle Sensing Using Fuzzy Logic Supervised PID Controller”, Sensors & Transducers Journal, Cilt 126, Sayı 3, Sayfa 92-100, (2011).
10. Kuo, B., “Otomatik Kontrol Sistemleri”, Literatür Yayıncılık, İstanbul, (2009).
11. Kuşçu, H., “Otomatik Kontrol Ders Notları”, Edirne, (2012).
12. Larcombe, P.J., “On the Control of a Two Dimensional Multi-Link Inverted Pendulum: Co-ordinate System Suitability for Dynamic Formulation”, Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control, (1991).
13. Lu, H.; Chang, M., Tsai, C., “Adaptive self-constructing fuzzy neural network controller for hardware implementation of an inverted pendulum system”, Applied Soft Computing, Sayı 11, Sayfa 3962–3975, (2011).
14. Mirza, A., Hussain, S., “Robust Controller for Nonlinear & Unstable System: Inverted Pendulum”, AMSE Journal of Control & Design Simulation, Cilt 55, Sayı 3, Sayfa 49-60, (2000).
15. Özbey, A., Uzal, E., “Ters Sarkacın Nonlineer Kontrolü”, TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi, (2006).
16. Özcan, A. T., Çalışkan, Ç, Tansu, F., Yurtseven, S., İrfanoğlu, B., “Gömülü Sistemlerde Gerçek Zamanlı Sistem Uygulamaları”, Mekatronik Mühendisliği Öğrenci Kongresi, (2010).

17. Sánchez, J., Dormido, S., Pastor, R., Morilla F., “A Java/Matlab-Based Environment for Remote Control System Laboratories: Illustrated With an Inverted Pendulum”, IEEE Transactions on Education, Cilt 47, Sayı 3, Sayfa 321-329, (2004).
18. Sivaraman, E., Arulselvi, S., “Modeling of an inverted pendulum based on fuzzy clustering techniques”, Expert Systems with Applications, Sayı 38, Sayfa 13942–13949, (2011).
19. Wai, R., Kuo, M., Lee, J., “Cascade Direct Adaptive Fuzzy Control Design for a Nonlinear Two-Axis Inverted-Pendulum Servomechanism”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics, Cilt 38, Sayı 2, Sayfa 439-454, (2008).
20. Wang, J., “Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers”, Simulation Modelling Practice and Theory, Sayı 19, Sayfa 440-449, (2011).
21. Wu Q., Sepehri N., He, S., “On control of a base-excited inverted pendulum using neural networks”, Journal of the Franklin Institute, Sayı 337, Sayfa 267-286, (2000).
22. Yazıcı, A., Karamancıoğlu, A., “Doğrusal Kuadratik Kontrol Altındaki Ters Sarkaç Sisteminin Gürbüzlük İncelenmesi”, D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı, Sayfa 75-86, (2006).
23. Yi, J., Yubazaki, N., “Stabilization fuzzy control of inverted pendulum systems”, Artificial Intelligence in Engineering, Sayı 14, Sayfa 153-163, (2000).
24. <http://ieee.itu.edu.tr/lab/dcmotor.pdf>
25. http://www.robotiksystem.com/motor_surucu_entegreler.html
26. <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/pend/invpen.html>

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Zonguldak'ta doğdu. İlköğretimini Zonguldak'ta tamamladı. 2001 yılında girdiği Zonguldak Fen Lisesi'nden 2004 yılında mezun oldu. Aynı yıl girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılı Ekim Ayı'ndan itibaren Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı'ndan Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.