



TERS SARKAÇ SİSTEMİNDE ARAÇ REFERANS DEĞİŞKENLİ DENETİM

Yunus SERT

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak – 2017

TERS SARKAÇ SİSTEMİNDE ARAÇ REFERANS DEĞİŞKENLİ DENETİM

Yunus SERT

Dumlupınar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca

Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ayhan GÜN

Ocak – 2017

KABUL VE ONAY SAYFASI

Yunus SERT'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı TERS SARKAÇ SİSTEMİNDE ARAÇ REFERANS DEĞİŞKENLİ DENETİM başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

31/01/2017

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ayhan GÜN (danışman)

Üye : Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Burhanettin DURMUŞ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan GÖÇMEZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının %1 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Yrd. Doç. Dr. Ayhan GÜN

İmza

Yunus SERT

İmza

TERS SARKAÇ SİSTEMİNDE ARAÇ REFERANS DEĞİŞKENLİ DENETİM

Yunus SERT

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2017

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ayhan GÜN

ÖZET

Bu çalışmada tek giriş ve iki çıkışlı bir ters sarkaç sistemi tasarlanmış, gerçekleştirilmiş ve denetlenmiştir. Sistem başlangıcında aşağı denge noktasında olan sarkaç önce salınımlarla yukarı denge noktasına kaldırılmış, sonra hem sarkaç açısı, hem de araç konumu PID algoritması ile denetlenerek sistem kararlı hale getirilmiştir. PID denetleyicinin oransal, integral ve türev sabitleri fiziksel sistem üzerinde gerçekleştirilen testlerle sarkaç ve araç için sezgisel olarak belirlenmiş ve tatminkâr sonuçlar elde edilmiştir. Sarkaç ve aracın kararlı hal hataları kabul edilebilir seviyede olmakla birlikte, sistemin bozucu etkilere karşı tepki performansı da oldukça yüksektir. Denetim esnasında pistin tamamının kullanılabilmesi için aracın konum referansının değişken olması tercih edilmiştir. Böylece araç pist üzerindeki arzu edilen bir noktaya sistemin kararlı hali bozulmaksızın taşınabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Lineer Olmayan Sistemler, PID Denetleyici, SIMO, Ters Sarkaç

CONTROL OF INVERTED PENDULUM SYSTEM WITH VARIABLE CART REFERENCE

Yunus SERT

Electrical and Electronics Engineering, M.S. Thesis, 2017

Thesis Supervisor: Asst. Prof. Ayhan GUN

SUMMARY

In this study, a single-input and two-output inverted pendulum system was designed, implemented and controlled. At the startup of the system, the pendulum, which is at the downright equilibrium point was first lifted up to the upright equilibrium point by swing-up, and then the system was stabilized by PID algorithm which controls both the pendulum angle and the cart position. Proportional, integral and derivative constants of the PID controller are heuristically determined for the pendulum and the cart by tests performed on the physical system and satisfactory results are obtained. While the steady state errors of the pendulum and the cart are at acceptable levels, disturbance rejection performance of the system is also quite high. In order to use the entire track during the control, position reference of the cart is preferred to be variable. Thus, the cart can be moved to a desired point on the track without disrupting the steady state of the system.

Keywords: Inverted Pendulum, Nonlinear Systems, PID Controller, SIMO

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinden bugüne dek bilgi birikimi ve fikirleriyle bana yol gösteren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ayhan GÜN'e, çalışmalarım boyunca tecrübeleriyle bana destek olan Yrd. Doç. Dr. Kadir VARDAR'a, karşılaştığım problemlerin çözümü için çok kez imdadıma koşan Arş. Gör. Fırat AYDEMİR'e, karşılık beklemeksizin yardım teklifleriyle yükümü hafifleten tüm arkadaşlarıma ve hayatım boyunca verdikleri her türlü destek için sevgili aileme saygı, sevgi ve teşekkürü bir borç bilir, minnetlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. SİSTEMİN MEKANİK DONANIM YAPISI	6
2.1. Sarkaç ve Sarkaç Enkoderi.....	6
2.2. Araç ve Pist	8
2.3. Motor.....	11
2.4. Sınır Anahtarları.....	12
3. SİSTEMİN ELEKTRONİK DONANIM YAPISI	14
3.1. Motor.....	14
3.2. Sarkaç ve Motor Enkoderleri	14
3.3. Motor Sürücü	16
3.4. Sayısal İşaret İşleyici	19
3.5. Elektronik Donanım Elemanları Arasındaki Bağlantılar	20
3.5.1. Sistemin giriş ve çıkışlarının gerilim seviyeleri.....	21
3.5.2. Sarkaç ve araç enkoderlerinin denetleyici ile bağlantısı	21
3.5.3. Sınır anahtarlarının denetleyici ile bağlantısı.....	23
3.5.4. Motor sürücünün denetleyici ile bağlantısı	23
3.5.5. Ara kart	25
4. ENKODER BİLGİLERİNİN OKUNMASI VE PWM İŞARETLERİNİN ÜRETİLMESİ ...	28
4.1. Enkoder Bilgilerinin Okunması ve Birim Dönüşümleri	28
4.1.1. Sarkaç enkoder bilgilerinin okunarak açı birimine dönüştürülmesi	28
4.1.2. Araç enkoder bilgilerinin okunarak uzunluk birimine dönüştürülmesi	29
4.2. PWM İşaretlerinin Üretilmesi	31

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5. TERS SARKAÇ SİSTEMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	38
5.1. Sarkacın Serbest Düşme Hareketi	38
5.2. Sarkaç Salınımının Araç Konumuna Etkisi	39
5.3. Pistteki Sürtünme Kuvvetinin Araç Hızına Etkisi.....	40
5.4. Motor Ataleti.....	42
6. TERS SARKAÇ SİSTEMİNİN DENETİMİ.....	44
6.1. Enkoder Referanslarının Ayarlanması	44
6.1.1. Sarkaç enkoder referansının ayarlanması	44
6.1.2. Araç enkoder referansının ayarlanması.....	46
6.2. Sarkacın Yukarı Denge Noktasına Kaldırılması	49
6.3. Sistemin Yukarı Denge Konumundaki Denetimi.....	56
6.3.1. Sarkaç ve araç hatalarının hesaplanması.....	56
6.3.2. PID denetim	58
6.3.2.1. P terimi	58
6.3.2.2. I terimi	59
6.3.2.3. D terimi.....	60
6.3.3. PID denetimin ters sarkaç sistemine uygulanması.....	61
6.3.3.1. Örneklem Periyodunun Belirlenmesi.....	62
6.3.3.2. Sarkacın P denetimi	63
6.3.3.3. Sarkaç ve aracın P denetimi.....	65
6.3.3.4. Sarkaç ve aracın PD denetimi.....	66
6.3.3.5. Sarkaç ve aracın PID denetimi	67
6.3.3.6. Aracın konum referansının değiştirilmesi	68
7. SONUÇLAR	72
KAYNAKLAR DİZİNİ	75

EKLER

1. Motor Sürücünün Teknik Özellikleri
2. Motor Sürücünün Elektriksel Bağlantı Şeması
3. TMS320F28335 eQEP Modülü Blok Diyagramı
4. TMS320F28335 eQEP Modülünde Bulunan Kaydediciler
5. TMS320F28335 ePWM Modülü Blok Diyagramı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Sarkaç.....	6
2.2 Sarkaç enkoderi.....	7
2.3 Sarkaç ile enkoderin bağlantısında kullanılan teflon parça.....	7
2.4 Sarkaç ve enkoder bağlantısı.....	7
2.5 Araç pisti.....	8
2.6 Araç.....	9
2.7 Araç, pist ve kayış bağlantısı	9
2.8 Sarkaç ve enkoderi araca bağlayan parça.....	10
2.9 Sarkaç ve enkoderin araçla bağlantısı	10
2.10 Üç fazlı fırçasız DC servo motor	11
2.11 Motoru yüzeye bağlayan parça	11
2.12 Motorun yüzey ve pistle bağlantısı	12
2.13 Motor tarafındaki sınır anahtarının açık pozisyonu	13
2.14 Motor tarafındaki sınır anahtarının kapalı pozisyonu	13
3.1 Enkoder kanal işaretleri.....	15
3.2 Enkoder işaret dizilerinin sayımı	15
3.3 Motor sürücünün genel görünümü ve kullanılan bağlantılar	17
3.4 Sürücünün motor ile olan bağlantıları	17
3.5 Çalışmada kullanılan analog ve lojik sürücü girişleri	18
3.6 TMS320F28335 Experimenter Kit	19
3.7 Denetim kartında kullanılan pinler ve kullanım amaçları	20
3.8 Lojik seviye dönüştürücü devre şeması	22
3.9 Sınır anahtarlarının denetleyici üzerindeki bağlantıları	23
3.10 Denetleyici ile motor sürücü bağlantısı için kurulan devrenin şeması.....	25
3.11 Ara kartın tasarımı ve konnektör tanımları	26
3.12 Denetleyicinin tüm elektronik donanım ile bağlantısı	26
3.13 Tüm sistemin genel görünümü	27
4.1 Sarkaç yönüne göre enkoder işaret sayıları ve açılış karşılıkları	29
4.2 Motor enkoderinin 1 m’de ürettiği işaret sayısının ölçümü	30
4.3 Sürücünün M4-8, M4-10 ve M4-12 girişleri arasındaki bağlantının devre şeması.....	32
4.4 PWM işaretinin optokuplör ile analog referans girişine uygulanması	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sayfa

4.5	Bazı görev çevrimleri için PWM işaret şekilleri ve sağladıkları ortalama gerilimler	34
5.1	Pozitif yönde serbest düşen sarkacın salınımları.....	38
5.2	Negatif yönde serbest düşen sarkacın salınımları	39
5.3	Sarkaç salınımları ve araç konumu	40
5.4	Motor pistten ayrı iken varsayımsal araç konumu ve hızı.....	41
5.5	Motor piste bağlı iken araç konumu ve hızı	41
5.6	Motorun eylemsizlik testinde ölçülen araç konum ve hızları.....	43
6.1	Sistem başlangıcında salınım yapmakta olan sarkacın açılı referansının düzeltilmesi	46
6.2	Konum referanslarının ayarlanması sırasındaki araç konum grafikleri	47
6.3	Sistemin P2 prosesinin sonuna kadar olan akış diyagramı	48
6.4	Serbest düşme sırasındaki sarkaç açılı ve hızları	49
6.5	Serbest düşme sırasında 0-10 sn. arasındaki sarkaç açılı ve hızları	50
6.6	Sarkaç yukarı denge noktasına kaldırılırken açılı bölgelerine göre araç yönleri.....	50
6.7	Sarkacın aşağı denge noktasından geçiş yönüne göre aracın hareket yönleri	51
6.8	%3 görev çevrimindeki sarkaç açısı, sarkaç hızı ve araç konumu	52
6.9	%1 görev çevrimindeki sarkaç açısı, sarkaç hızı ve araç konumu	53
6.10	Değişken görev çevrimindeki sarkaç açısı, sarkaç hızı ve araç konumu	54
6.11	P3 prosesinin akış diyagramı	55
6.12	Sarkaç ve araç hatalarının hesaplanması.....	57
6.13	Sisteme uygulanan PID denetimin blok gösterimi	62
6.14	Sarkacın P denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu.....	64
6.15	Sistemin P denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu.....	65
6.16	Sistemin PD denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu	66
6.17	Sistemin PID denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu.....	68
6.18	Sistemin değişken araç referanslı PID denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu.....	69
6.19	P4 prosesinin akış diyagramı	71
7.1	Ters sarkaç denetim sistemi	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Çalışmada kullanılan DC servo motorun etiket değerleri	14
3.2 Sistemin giriş ve çıkışlarının gerilim seviyeleri	21
3.3 Denetleyici çıkış pinleri ve motor sürücü tarafındaki bağlantıları	24
4.1 Denetleyici ve motor sürücü tarafındaki PWM ortalama gerilimleri.....	35
4.2 Motor piste bağlı iken farklı görev çevrimlerindeki araç hızları.....	36
4.3 Motor pistten ayrı iken farklı görev çevrimlerindeki varsayımsal araç hızları	36
6.1 Denetim değişkeninin işaretine göre motora yön veren denetleyici çıkışları.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
θ	Sarkaç açısı
x	Araç konumu
E_S	Sarkaç hatası
E_A	Araç hatası
k_S	Sarkaç enkoder katsayısı
k_A	Araç enkoder katsayısı
K_{p_S}	Sarkaç oransal sabiti
K_{p_A}	Araç oransal sabiti
K_{i_S}	Sarkaç integral sabiti
K_{i_A}	Araç integral sabiti
K_{d_S}	Sarkaç türev sabiti
K_{d_A}	Araç türev sabiti
T_s	Örnekleme periyodu
u_{p_S}	Sarkacın oransal denetim değişkeni
u_{p_A}	Aracın oransal denetim değişkeni
u_{p_T}	Toplam oransal denetim değişkeni
u_{i_S}	Sarkacın integral denetim değişkeni
u_{i_A}	Aracın integral denetim değişkeni
u_{i_T}	Toplam integral denetim değişkeni
u_{d_S}	Sarkacın türev denetim değişkeni
u_{d_A}	Aracın türev denetim değişkeni
u_{d_T}	Toplam türev denetim değişkeni
u_{pid_T}	Toplam oransal-integral-türev denetim değişkeni

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
PID	Proportional-integral-derivative
DC	Direct current
ANFIS	Adaptive neuro-fuzzy inference system
LQR	Linear-quadratic regulator
PLC	Programmable logic controller
SIMO	Single input, multiple output
PWM	Pulse-width modulation
ePWM	Enhanced pulse-width modulator
GPIO	General purpose input/output
eQEP	Enhanced quadrature encoder pulse
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

1 GİRİŞ

Ters sarkaç, kontrol teorisinde klasik bir problemdir ve kontrol algoritmalarının (PID denetleyicileri, yapay sinir ağları, bulanık mantık, genetik algoritmalar, vb.) testi için yaygın olarak kullanılır. Kontrol mühendisliği alanında oldukça ilgi gören bu kararsız sistemden türetilen teknolojinin sağladığı avantajlar ve geniş uygulama alanı dünya çapında birçok araştırmacıya ilham kaynağı olmuştur.

Gündelik yaşamda ve insan yapımı ürünlerde birçok örneği sıklıkla karşımıza çıkan ters sarkaç problemine verilebilecek ilk ve en büyük örneğin insan vücudu olduğu rahatlıkla söylenebilir. Çünkü ayakta duran bir insan, başlı başına bir ters sarkaç örneğidir. Yürürken, koşarken, hatta ayakta sabit dururken dahi ağırlık merkezi sürekli değişen insan vücudunun dengesini koruyabilmesi, sahip olduğu iç kulak, beyincik gibi denge organları sayesinde mümkündür. İnsan vücudunun uzaydaki konum ve pozisyonunu algılayan bu organlar denge sisteminin sensörleri, beyin ise bu organlardan alınan sensör bilgilerini işleyerek çıkış üreten denetleyicisi gibidir denilebilir.

İnsanların gündelik hayatını kolaylaştıran bazı iki tekerli modern motorlu araçlar, insanlı veya insansız uçak, helikopter gibi hava araçları, roket ve füzelerin güdümlenme sistemleri ve insansız robot gibi örneklerin kullanım alanları her ne kadar birbirinden apayrı olsa da hepsinin denge sistemlerinin temelinde ters sarkaç probleminin yattığı söylenebilir.

Ters sarkaç kararsız denge durumunda ve doğrusal olmayan bir sistem olduğu için ciddi çalışmalar gerektirmektedir. Kontrol sistemleri üzerine çalışan araştırmacılar tarafından yıllar yılı büyük ilgi görmüştür. Yapılan çalışmaların genelinde bir pivot noktası etrafında 360° dönebilen bir sarkacın açı denetimi yapılmış iken, kimi çalışmalarda pivot noktası sabit, kimisinde hareketlidir. Pivot noktasının sabit olduğu çalışmalarda sadece sarkacın açı denetimi yapılmış, pivotun hareketli olduğu çalışmalarda ise sarkaca bir de araç bağlanarak sistemin serbestlik derecesi ikiye çıkarılmış, sarkaç açısına ek olarak araç konumu da denetlenmiştir. Buna ek olarak, sarkaca bir, hatta iki eklem daha eklenerek serbestlik derecesinin üç veya daha fazla seviyeye çıkarıldığı sistemler üzerine çalışmalar mevcuttur. Yakın geçmişte ters sarkaç probleminin çözümüne dair literatürde yer bulan çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Lozano ve arkadaşları (2000) sarkacı tepe denge noktasına kaldırırken, altındaki aracın yer değiştirmesini sıfıra götüren bir denetim sistemi tasarımı ortaya koymuşlardır. Önerdikleri denetim stratejisi, sistemin toplam enerjisinin kontrolüne dayanmaktadır. Yapılan çalışmada sistemin toplam enerjisini kullanan bir Lyapunov fonksiyonu elde edilmiş ve aracın hareketi

LaSalle'in değişmezlik ilkesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde ettikleri denetim sistemini gerçek bir sarkaç sisteminde test ederek uygulamalarda kullanılabileceğini göstermişlerdir (Lozano vd., 2000).

Huang ve Huang (2000) yaptıkları çalışmada gri teori analizini kullanarak ters sarkaç problemini zözmeyi amaçlamışlardır. Bilinmeyen kısmi yapıları, parametreleri ya da karakteristikleri olan sistemlere gri sistemler denir. Gri teori de bu tip sistemlerin ya da doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılabilir. Bu sebeple Huang ve Huang çalışmalarında ters sarkaç sistemi için gri teoriyi kullanmışlardır. Kestirim işlemi için 5 adet başlangıç açısal konum bilgisi girilerek tasarlanan gri kestirim yöntemi ile yaptıkları deneyde sistemin denge performansı ve harici etkilere tepki verme performansı yüksektir (Huang ve Huang, 2000).

Kajita ve arkadaşları (2001) iki ayaklı bir robotun hareketinin keyfi tanımlanan bir düzlemde denetimi için üç boyutlu ters sarkaç problemini ele almışlardır. Çalışmada robot yürüyüş denetimi için üç boyutlu lineer ters sarkaç modunu (3D Linear Inverted Pendulum Mode) önermişler ve simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. İnsansı robotun yürüme hareketi dinamik bir simülatörde analiz edilmiş ve bir çember üzerinde kararlı bir yürüyüş hareketi elde edilmiştir (Kajita vd., 2001).

Grasser ve arkadaşları (2002) alışmalarında ters sarkaç probleminin çözümü ile JOE adını verdikleri iki tekerlekli bir araç üretmişlerdir. DC motorlarla kontrol edilen eşeksenli iki tekerlekten oluşan araç mobil bir ters sarkaç örneğidir. Araç harici bozucu etkiler karşısında başarılı bir ters sarkaç performansı göstermiştir (Grasser vd., 2002).

Sugihara ve arkadaşları (2002) ortaya koydukları çalışmada insansı robotların hareketleri için gerçek zamanlı bir hareket üreteci önermişlerdir. alışmalarında ters sarkacın dinamiklerini kullanarak gerçek zamanlı uygulamalar için hesaplama sürelerini düşürmüşlerdir. Bilgisayar ortamında yaptıkları simülasyonlarla çalışmanın performansını incelemişler ve kullanışlılığını göstermişlerdir (Sugihara vd., 2002).

Pathak ve arkadaşları (2005) tekerlekli bir ters sarkacın dinamik modelini geri besleme lineerliği ve denetlenebilirlik açısından incelemişlerdir. Öncelikle motorların momentini giriş değeri olarak alan bir dinamik model türetilmiş ve önceki çalışmalarda önerilen modellerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada iki yeni denetim mekanizması tasarlanmıştır. İlki aracın yönünü ve hızını izlerken sarkacın dikey açısını belirlenen aralıkta kontrol eden iki seviyeli hız denetleyicisidir. İkincisi ise aracın konumunu belirlenen sınırlar arasında kontrol eden iki seviyeli

denetleyicidir. Araştırmacılar tarafından gerçek veriler kullanılarak modelin simülasyonu gerçekleştirilmiş ve başarısı gösterilmiştir (Pathak vd., 2005).

Gün (2007) ortaya koyduğu tez çalışmasında doğrusal olmayan yetersiz uyarımlı ters sarkaç donanımını tasarlamış ve pratik uygulamasında ters sarkaç denetimini gerçekleştirmiştir. Çalışmada uyarlamalı sinir bulanık çıkarım sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System - ANFIS) ve oransal-integral-türev (Proportional-Integral-Derivative - PID) denetim algoritmaları, tek giriş ile iki çıkışın denetimi için kullanılmıştır. Başarıyla çalışan sistemin sonuçları grafiksel olarak yorumlanmış ve deney çalışması video görseli olarak sunulmuştur (Gün, 2007).

Gezer (2011) çalışmasında ters sarkaç problemi için kayan kip ve bulanık mantık denetimi kullanmıştır. Araştırmacı tasarladığı denetim sisteminin uygulamasını, LabVIEW yazılımı üzerinde simülasyon ve deney çalışmaları ile yapmıştır (Gezer, 2011).

Arda (2012) iki eksenli ters sarkaç sisteminin modellenmesi ve modelin test edilmesi üzerine bir çalışma yürütmüştür. Çalışmasında PID denetleyici kullanmış, hedef olarak sadece sarkaç açısının denetimini yaparak dik konumda tutulmasını amaçlamıştır. Sistemin modellenmesi MATLAB Simulink üzerinde gerçekleştirilmiş ve model fiziki ortamda test edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları grafiklerle yorumlanmış ve düzeneğin deneyi yapılarak sistemin başarılı şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir (Arda, 2012).

Sharif (2013) tez çalışmasında doğrusal olmayan ters sarkaç sistemi için kayan kipli denetim kullanmayı tercih etmiştir. Araştırmacı çalışmasında Ackerman formülü ve lineer matris eşitliği kullanarak kayan kipli denetimi tasarlamış ve sistemin yukarı salınımı ve kararlılığı bu denetim ile sağlanmıştır (Sharif, 2013).

Huang ve arkadaşları (2013) yetersiz uyarımlı mekanik sistemler üzerine yaptıkları çalışmada iki tekerlekli bir ters sarkaç problemini incelemişlerdir. Yetersiz uyarımlı mekanik sistemin dinamik modeli Lagrange denklemi kullanılarak elde edilmiştir. Dinamik modele dayanarak ve kayan kipli denetim kullanılarak aracın hız ve fren sistemi kontrol edilmiştir. Tüm denetim algoritmaları MATLAB yardımı ile test edilmiş ve araç deneyleri ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve deney sonuçları sistemin etkili çalıştığını göstermiştir (Huang vd., 2013).

Gani ve arkadaşları (2014) ters sarkaç sistemi için bulanık mantık esaslı bir denetim algoritması önermişlerdir. Araştırmacılar denetim simülasyonlarını MATLAB Simulink aracılığı ile gerçekleştirmişler ve sistemin 25. saniyede dengeye geldiğini gözlemlemişlerdir (Gani vd., 2014).

Elibol (2015) tez çalışmasında enerji tabanlı denetim yöntemi kullanarak bir ters sarkacın aşağı denge noktasından yukarı denge noktasına çıkarılması ve dengede tutulması problemini incelemiştir. Sarkacı yukarı denge noktasına çıkarmak için enerji tabanlı denetim yöntemi kullanılmakta ve sarkaç yukarı denge noktasına yaklaştığında ise doğrusal karesel düzenleyici (LQR) ile dengeleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Sistem deneysel olarak test edilmiş ve tasarlanan algoritmanın problemin çözümünde başarıya ulaştığı görülmüştür (Elibol, 2015).

Ertuğrul (2015) ortaya koyduğu tez çalışmasında doğrusal olmayan ters sarkaç probleminin çözümüne Programlanabilir Mantıksal Denetleyici (Programmable Logic Controller – PLC) ile ulaşmayı amaçlamıştır. Sarkaç yukarı denge noktasına ulaştıktan sonra açı ve pozisyon denetimi PID denetleyici ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada dışarıdan uygulanan bozucu etkilere karşı sistemin kararlı bir biçimde çalıştığı gözlemlenmiştir (Ertuğrul, 2015).

Kharola ve arkadaşları (2016) çalışmalarında ters sarkaç problemine daha farklı bir açıdan yaklaşmış ve sistemin eğimli bir yüzeyde denetimini amaçlamışlardır. Önerilen sistemin denetimi PID ve bulanık mantık denetleyicilerle gerçekleştirilmiş ve MATLAB Simulink ortamında simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar yardımı ile sunulmuş ve önerilen sistemin başarısı gösterilmiştir (Kharola vd., 2016).

Literatürde yer alan çalışmalar göstermektedir ki, yetersiz uyarımlı doğrusal olmayan sistemlerin analizinde ters sarkaç sistemi önemli bir örnektir. Sistemin denetimi için bir çok algoritma önerilmiş ve hem simülasyon ortamında, hem de deneysel düzeneklerde performansları incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, tek giriş ve iki çıkışlı (SIMO), serbestlik derecesi iki olan bir ters sarkaç denetim sistemi tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin girişi sarkacı yatay ekseninde taşıyan araç hızı, çıkışları ise araç hareketleri ile değişime uğrayan sarkaç açısı ve araç konumu olmaktadır. 2 metre uzunluğundaki pist üzerinde gerçekleşen araç hareketleri piste bağlı bir DC motor ile sağlanmakta, sarkaç açısı ve araç konumu ise artımsal enkoderler ile ölçülmektedir. Çalışmada kullanılan sayısal işaret işleyici enkoderlerden alınan açı ve konum bilgilerini işleyerek mevcut hatayı hesaplamaktadır. Hesaplanan hataları düzelterek sistemi kararlı hale getiren araç hızı da sayısal işaret işleyici tarafından üretilen PWM (darbe genişlik modülasyonu) işaretleri ile belirlenmektedir. Sistemde kullanılan PID denetleyici aracın hangi açı ve konum hatalarına karşılık hangi hızda ve hangi yönde hareket etmesi gerektiğini hesaplamakta, böylece sistemin her iki çıkışı da aynı anda denetlenmektedir.

Teze konu olan ters sarkaç sistemi üzerinde yapılan tüm çalışma, sistemi oluşturan donanım elemanlarının seçiminden sistemin denetimine kadar kapsamlı olarak ele alınmıştır. 2. ve 3. bölümler sistemde kullanılan tüm mekanik ve elektronik donanım ile donanımlar arası bağlantıların tanıtımına ayrılmış, 4. bölümde ise denetim giriş ve çıkışlarının elde ediliş şekli anlatılmıştır. Mekanik ve elektronik donanım yapısı hazır hale gelen sistem üzerinde yapılan deneysel testler ve alınan ölçümler 5. bölümde verilmiş, 6. bölümde de sistemin başlangıç anından yukarı denge konumundaki denetimine kadar tüm çalışma şekli algoritma ve ölçümlerle zenginleştirilerek detaylıca açıklanmıştır.

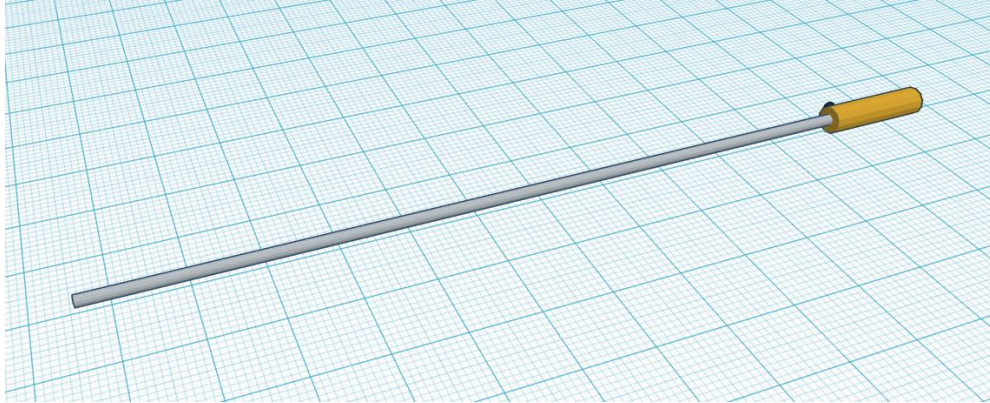


2 SİSTEMİN MEKANİK DONANIM YAPISI

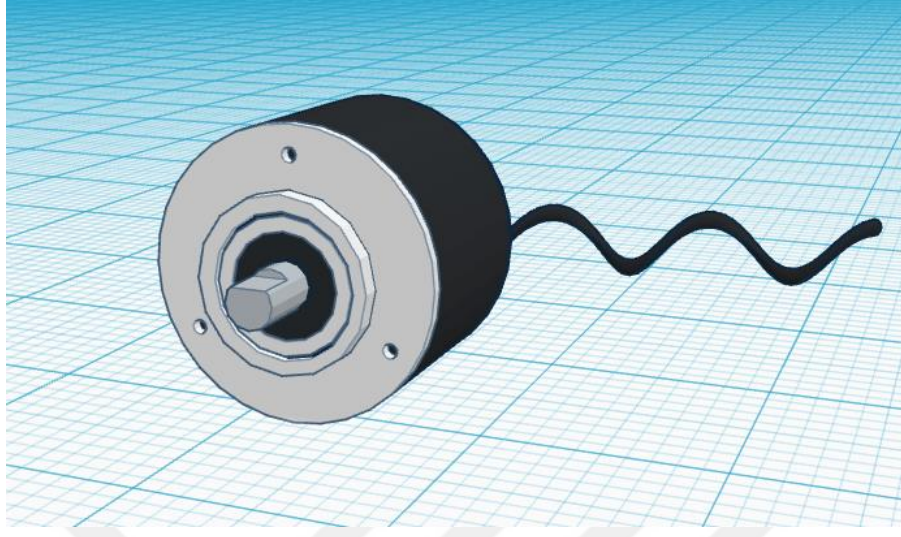
Ters sarkaç probleminin fiziksel olarak gerçekleştirilmesinde kullanılan mekanik malzeme ve elemanlar, sistemin verimli çalışmasına, deneysel çalışmalara olanak tanınmasına, farklı kontrol yöntem ve algoritmalarının uygulanabilmesine ve sürtünme, aşınma, oksitlenme gibi sistemi olumsuz etkileyebilen fiziksel faktörlere asgari düzeyde maruz kalmasına olanak tanıyacak şekilde seçilmiştir. Bu bölümde mekanik elemanlar fiziksel sistemin gerçek ölçülerine uygun şekilde bilgisayar ortamında modellenerek alt başlıklarda tanıtılmış ve gerekli bilgiler verilmiştir.

2.1 Sarkaç ve Sarkaç Enkoderi

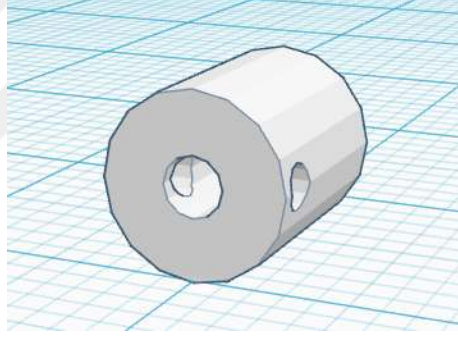
Sistemde açı denetimi gerçekleştirilen 200 g ağırlığında ve 50 cm uzunluğundaki sarkaç Şekil 2.1’de, sarkaç açısının ölçümü için kullanılan enkoder Şekil 2.2’de, sarkacın enkoder miline bağlantısı için kullanılan teflon parça Şekil 2.3’te ve tüm bunların bağlantısı yapılmış hali Şekil 2.4’te verilmiştir.



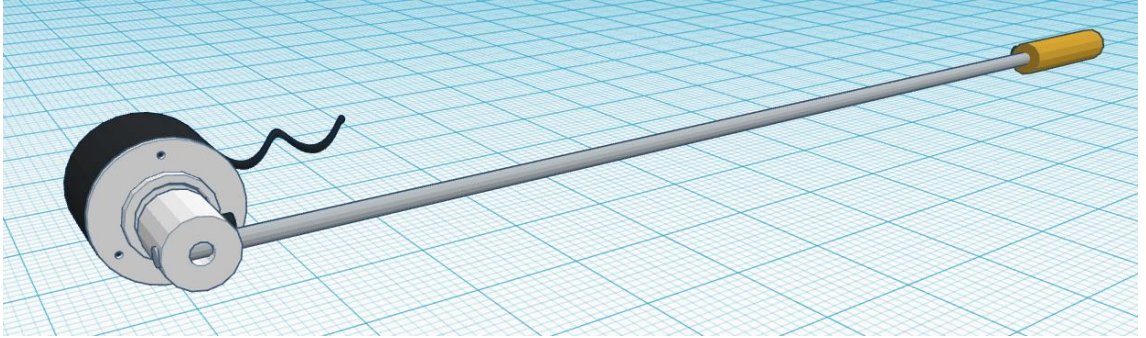
Şekil 2.1 Sarkaç



Şekil 2.2 Sarkaç enkoderi



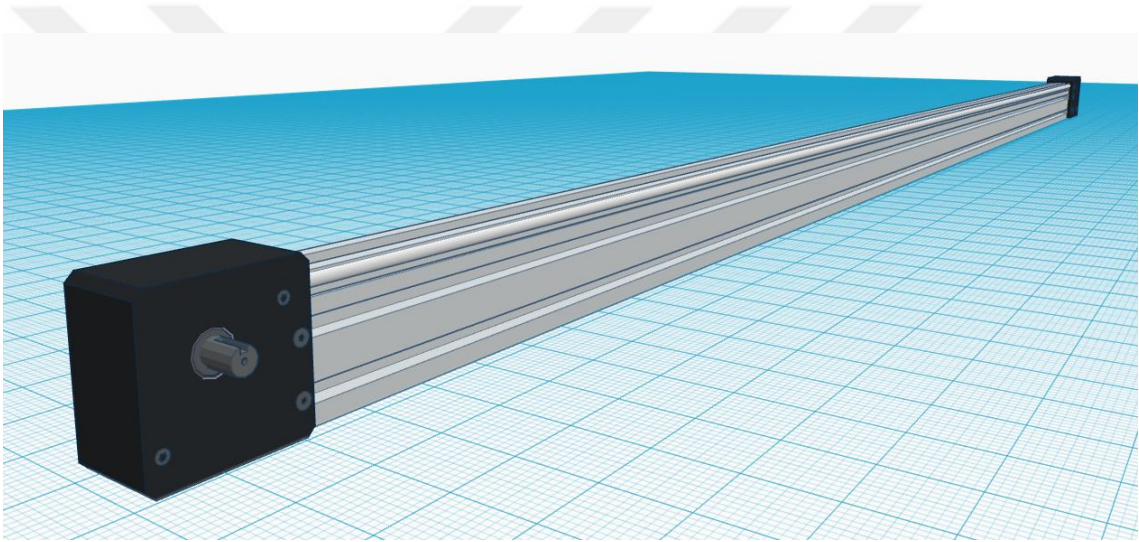
Şekil 2.3 Sarkaç ile enkoderin bağlantısında kullanılan teflon parça



Şekil 2.4 Sarkaç ve enkoder bağlantısı

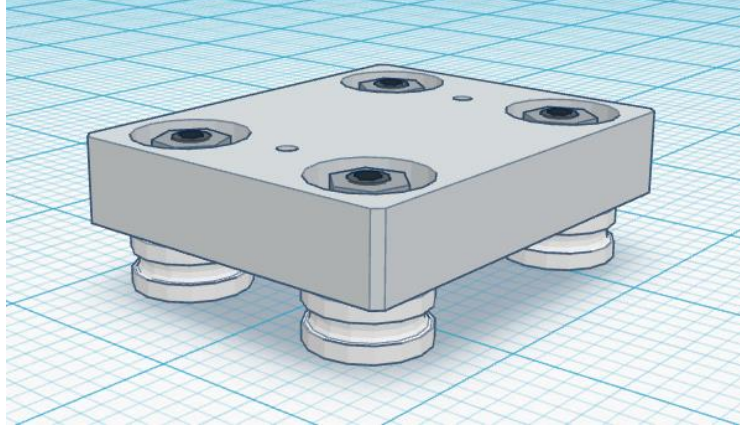
2.2 Araç ve Pist

Ters sarkaç sisteminin denetiminde sarkaç, sarkaç enkoderi ve bağlı bulundukları araç, toplam hatanın pozitif veya negatif olması durumuna göre yatay düzlemde sağa veya sola hareket etmelidir. Elektrik enerjisini sistemin ihtiyaç duyduğu hareket enerjisine çeviren motorun saat yönünde ve saat yönünün tersindeki dairesel hareketinin doğrusal harekete dönüştürülerek araca uygulanabilmesi için motor miline bağlı doğrusal bir piste ihtiyaç vardır. Bu ihtiyaç doğrultusunda sistem için Şekil 2.5'te görülen modele uygun, 2 metre uzunluğunda, çelik raylı, alüminyum alaşımlı bir pist kullanılmıştır. Seçilen pist uzunluğu araca geniş bir hareket aralığı sunarak sistemin denetiminde büyük oranda esneklik sağlamaktadır.



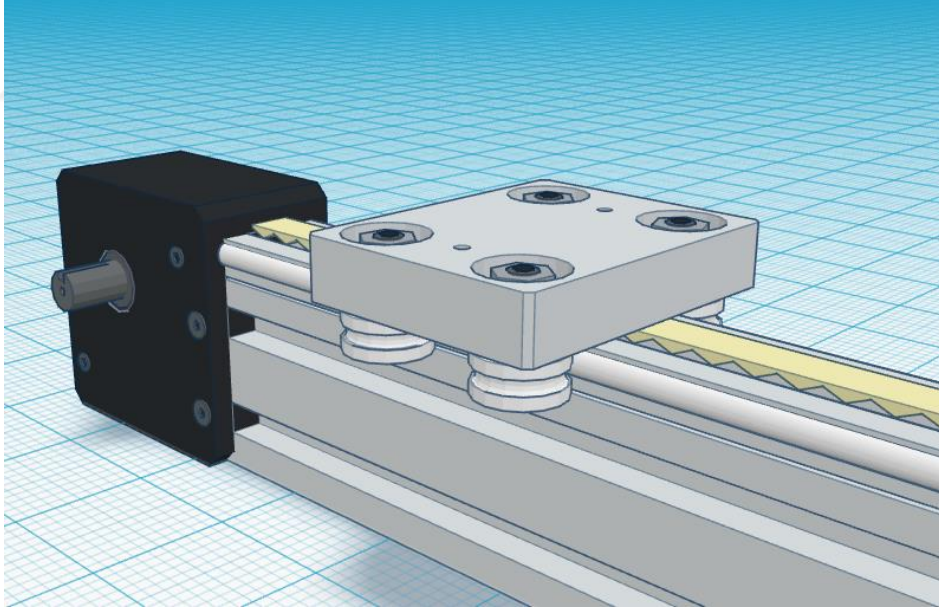
Şekil 2.5 Araç pisti

Fiziksel sistem ideal olmadığı için araç ile pist ile arasındaki sürtünme kuvveti asla sıfır olmasa dahi, araç hareketine karşı koyacak sürtünmenin mümkün mertebe azaltılması ve pistin her yerinde eşit olması, aynı zamanda da aracın sadece sağ veya sol yöne hareket etmesi istenmiştir. Buna göre araç piste göre dikey ekseninde sabit, yatay ekseninde ise serbest olmalı, ancak aracı piste dikey ekseninde sabitleyen bağlantının yatay eksenindeki olumsuz etkileri de olabildiğince azaltılmalıdır. Bu bilgiler doğrultusunda sistemde kullanılan araç tasarımı Şekil 2.6'daki gibi olup, pistin her iki yanında bulunan çelik raylara karşılık gelen 4 adet bilyeli ve oluklu rulman tekere sahip, alüminyum alaşımlı bir platformdan oluşmaktadır.



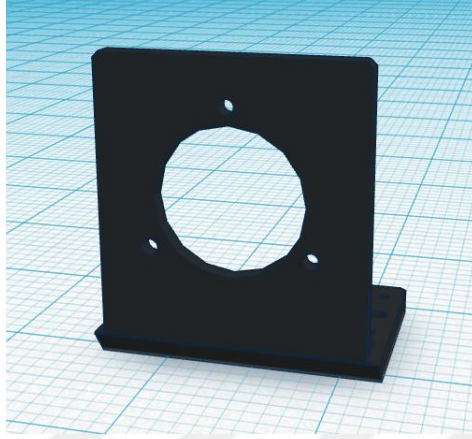
Şekil 2.6 Araç

Pist milinden araca güç aktarımı için milin dairesel hareketi pist başındaki mile bağlı kasnak ile pist sonundaki kasnak arasına bağlanan ve pist üzerindeki oluğa yerleşen kayış ile doğrusal harekete dönüştürülmüş, bu kayış da Şekil 2.7'deki gibi araca bağlanmıştır.

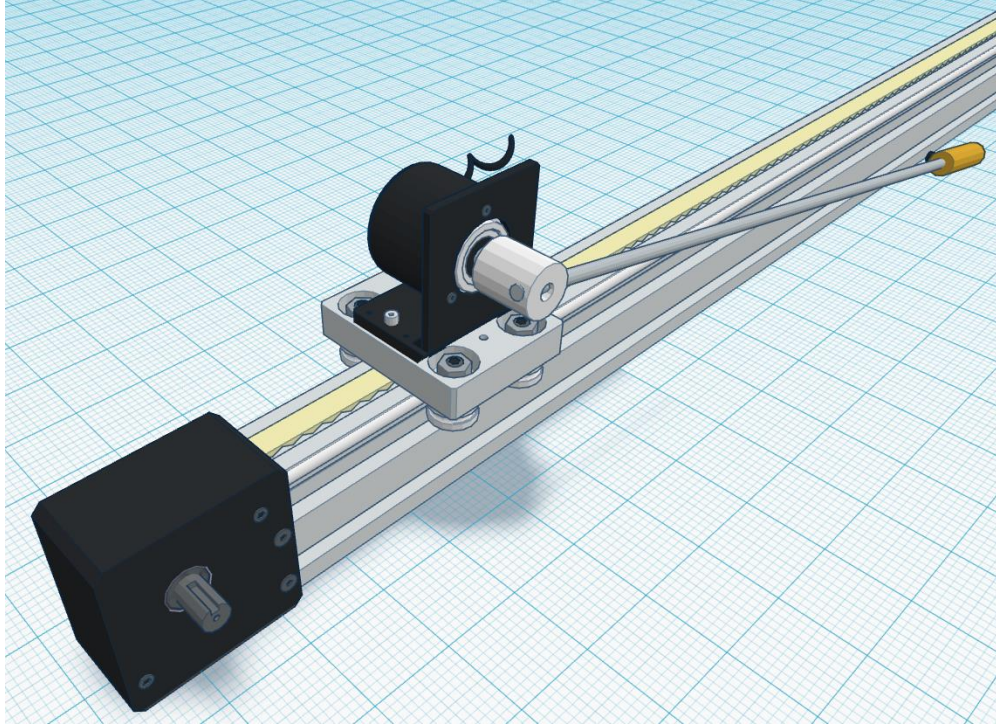


Şekil 2.7 Araç, pist ve kayış bağlantısı

Sarkaç ve sarkaç enkoderi araca Şekil 2.8’de grlen parça ile Şekil 2.9’daki gibi bağlanmıştır.



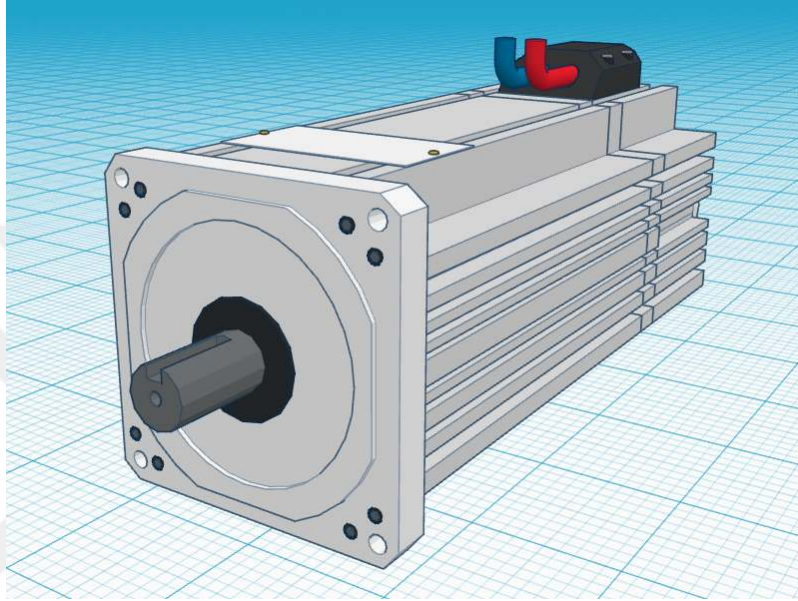
Şekil 2.8 Sarkaç ve enkoderi araca bağlayan parça



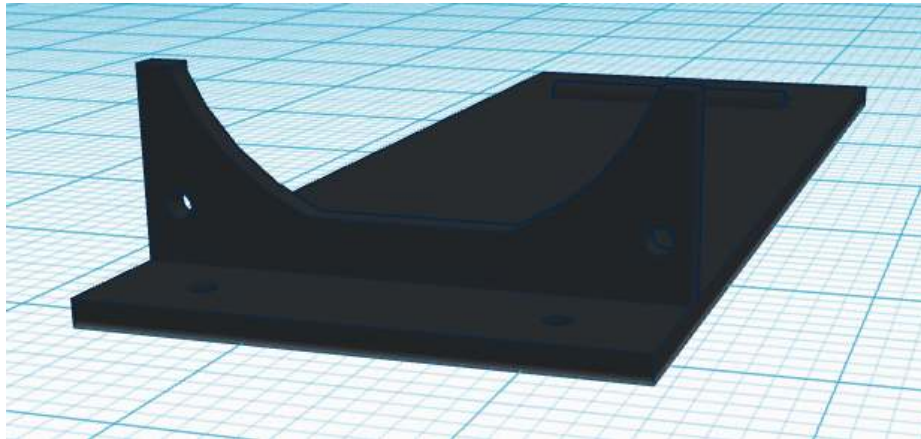
Şekil 2.9 Sarkaç ve enkoderin araçla bağlantısı

2.3 Motor

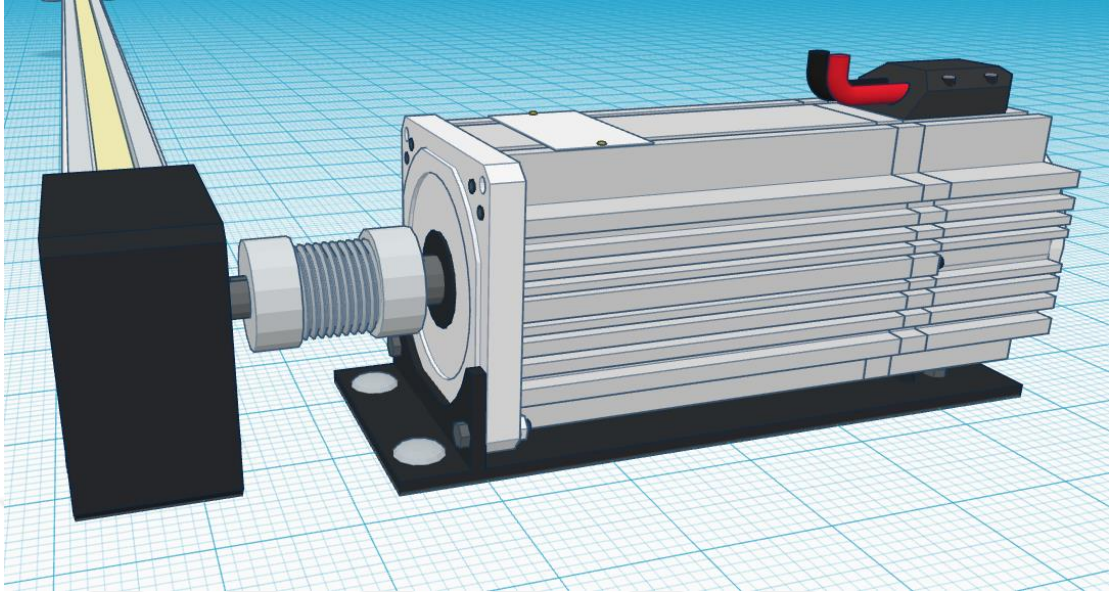
Ters sarkaç denetim sisteminin girişi olan araç hareketini sağlamak üzere piste bağlanan motor Şekil 2.10’da görölen üç fazlı fırçasız DC servo motordur. Motor yüzeye Şekil 2.11’de görölen parça ile, piste ise bir kaplinle Şekil 2.12’deki gibi bağlanmıştır.



Şekil 2.10 Üç fazlı fırçasız DC servo motor



Şekil 2.11 Motoru yüzeye bağlayan parça

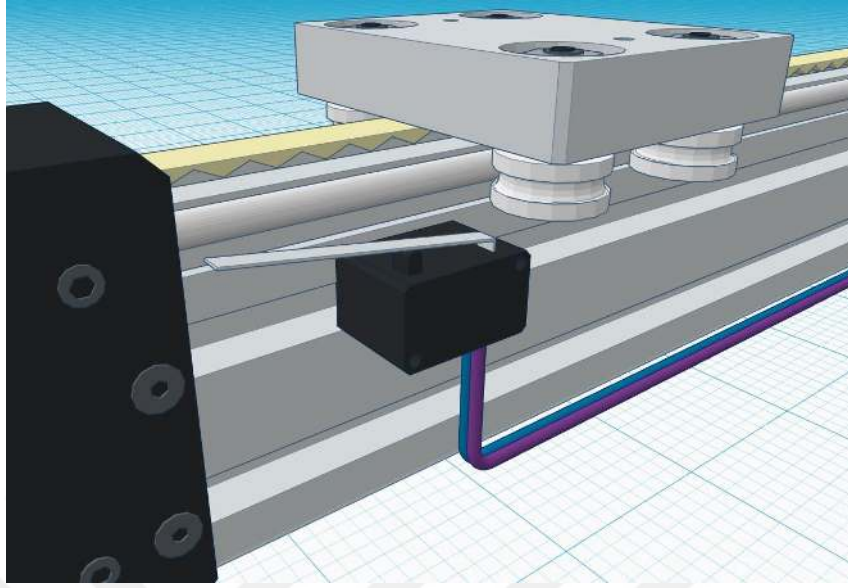


Şekil 2.12 Motorun yüzey ve pistle bağlantısı

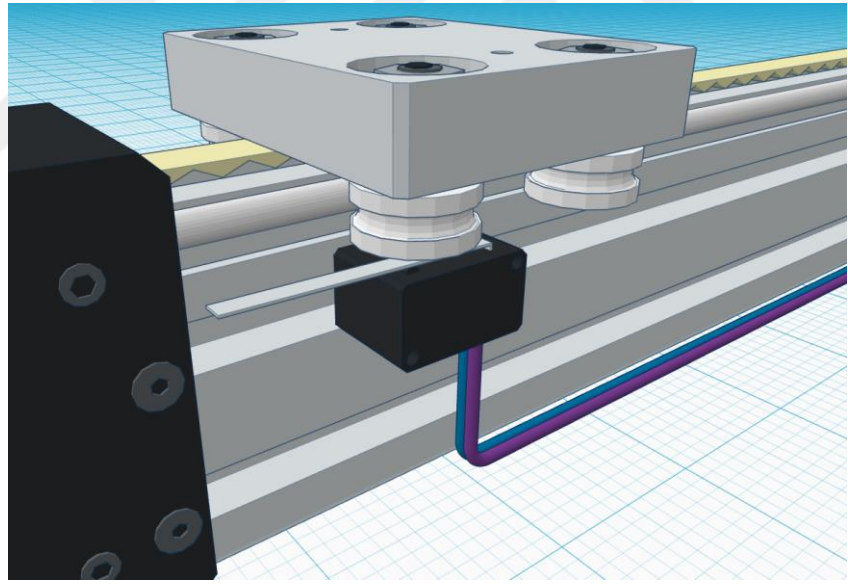
2.4 Sınır Anahtarları

Aracın pist üzerindeki konumunun yazılımsal olarak belirlenmesinde ihtiyaç duyulan referans noktalarının pist uçlarında olması uygun görülmüştür. Pistin her iki ucuna da yerleştirilen sınır anahtarları başlangıçtaki konumu yazılımsal olarak bilinmeyen aracın pist başında veya sonunda olduğu anda kapanarak gereken referansı sağlamakta, aracın o andan sonraki hareketlerinde pistin hangi noktasında olduğu bilgisi elde edilebilmektedir. Motor tarafındaki sınır anahtarının piste bağlantısı ve araca göre açık ve kapalı pozisyonları Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'teki gibidir.

Pist uçlarına sınır anahtarlarının bağlanmasıyla aracın pist üzerinde kullanabileceği yolun uzunluğu 200 cm'den 186 cm'ye düşmüştür. Aracın pist uçlarına çarpmaması için herhangi bir sınır anahtarını kapattığı anda durması, istendiği takdirde durduktan sonra diğer yöne dönmesi sağlanabilir. Bu durumda sınır anahtarlarının araç konumu belirlemenin yanı sıra güvenlik amaçlı da kullanılabileceği söylenebilir. Fakat araç konumunun belirlenmesi, güvenliğin araç konumuna sınır konularak da sağlanabilmesine imkân tanır. Yani araç sınır anahtarları kapandığında değil, pistin belirlenen bir bölümünün dışına çıktığında durabilir veya yön değiştirebilir. Tüm bunlar ele alınarak sistem başlangıcında bir sınır anahtarı ile konumu belirlenen aracın bir daha asla anahtarlara kadar gitmemesi, sistemin devamında da anahtarların araç konum denetiminde referans değiştirme fonksiyonunu üstlenmesi tercih edilmiştir.



Şekil 2.13 Motor tarafındaki sınır anahtarının açık pozisyonu



Şekil 2.14 Motor tarafındaki sınır anahtarının kapalı pozisyonu

3 SİSTEMİN ELEKTRONİK DONANIM YAPISI

İkinci bölümde mekanik donanım yapısı hakkında bilgi verilen ters sarkaç sisteminin elektronik donanımı bu bölümde tanıtılmış, elektronik elemanların çalışma prensipleri ve teknik özellikleri hakkında bilgi verilmiş, yapılan bağlantılar açıklanmış ve ikinci bölümdeki gibi gerçek sisteme uygun şekilde bilgisayar ortamında modellenerek sunulmuştur.

3.1 Motor

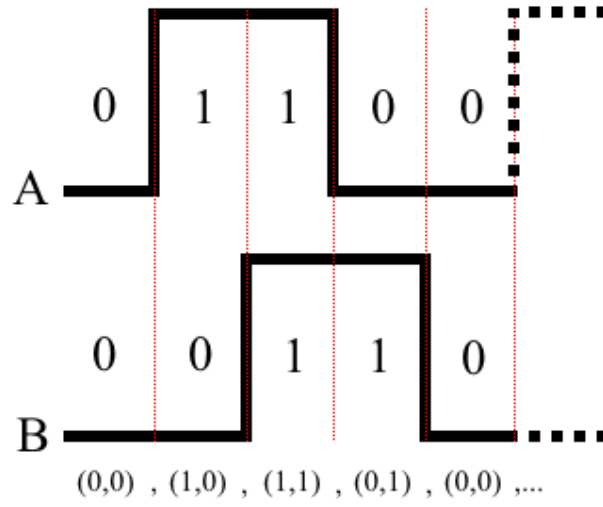
Çalışmada kullanılan ve ikinci bölümde sistemin mekanik donanımına bağlantısından bahsedilen üç fazlı, fırçasız DC servo motor, denetimi yapılan tek girişli, iki çıkışlı sistemin girişi olan araç hareketini sağlamaktadır. Arka kısmında devir başına 2500 işaret üreten dahili enkodere sahip olan motorun etiket değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir (<http://www.femsan.com>).

Çizelge 3.1 Çalışmada kullanılan DC servo motorun etiket değerleri

Nominal					Durma	Tepe		Enkoder (ppr)
Moment (Nm)	Hız (rpm)	Akım (A)	Gerilim (V)	Moment Sabit (Nm/A)	Moment (Nm)	Moment (Nm)	Akım (A)	
2	3000	4	220	0.5	2.3	6	10	2500

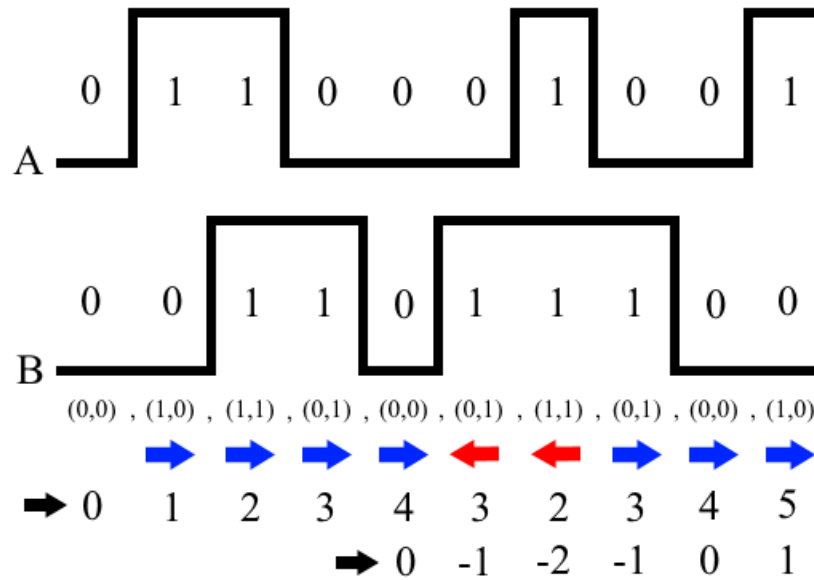
3.2 Sarkaç ve Motor Enkoderleri

Tek girişli, iki çıkışlı ters sarkaç sisteminin denetimi için sistemin çıkışları olan sarkaç açısı ve araç konumu, sarkaca ve motora bağlı artımsal optik enkoderler ile gerçek zamanlı olarak ölçülmektedir. Sarkaç açısını ölçen enkoderin sarkaç ve araçla bağlantısı ikinci bölümde anlatıldığı gibidir. Araç konum bilgisi ise motorun arkasında bulunan kendi dahili enkoderinden alınmaktadır. Sarkaç enkoderinin mili sarkaçla birlikte, motor enkoderi ise motor miliyle, yani araç hareketiyle birlikte dönerek işaret üretmekte, bu işaretler işlenerek de sarkaç açısı ve araç konumu anlık olarak belirlenmektedir.



Şekil 3.1 Encoder kanal işaretleri

Artımsal enkoderlerde aralarında 90° faz farkı bulunan iki kanal, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi sıralı iki bitlik lojik işaretler üretmekte ve bu işaretlerden oluşan işaret dizileri Şekil 3.2’deki gibi yorumlanarak yön ve yer değişim bilgisi elde edilmektedir.



Şekil 3.2 Encoder işaret dizilerinin sayımı

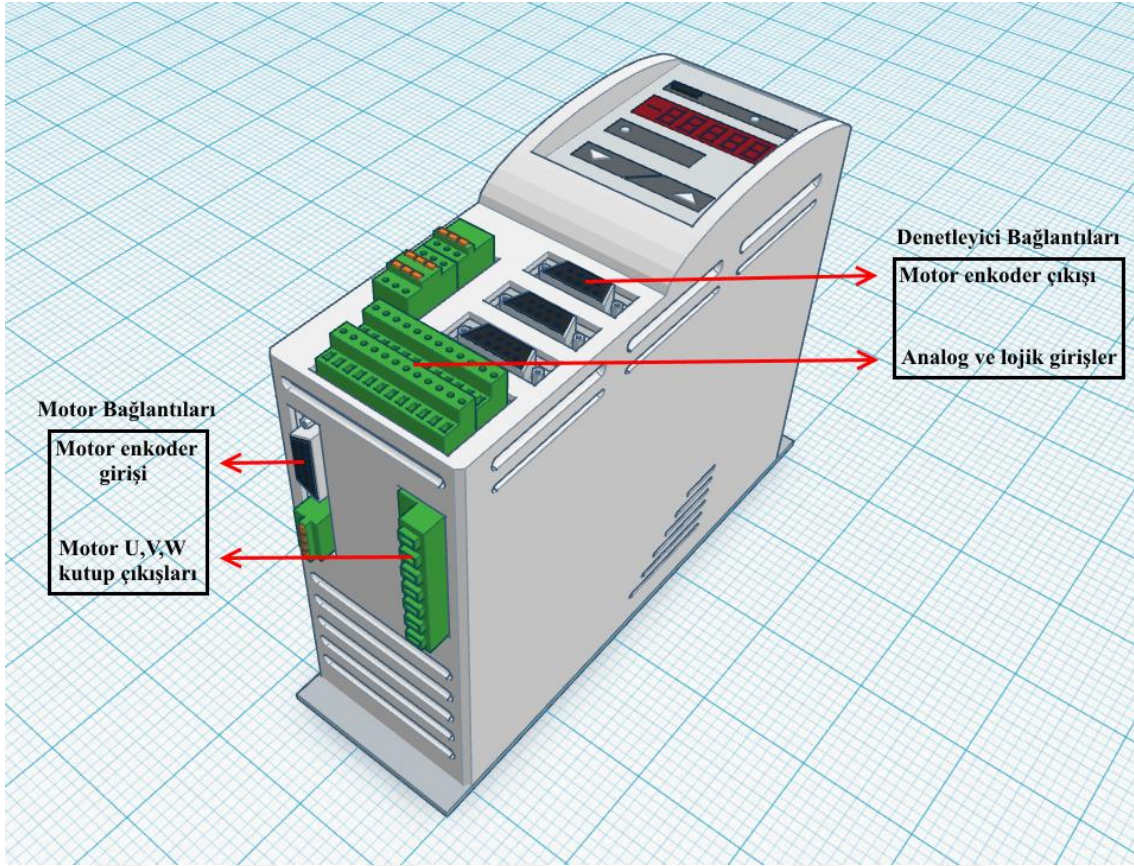
Şekil 3.2’de görülebileceği gibi enkoder işaretlerinden yön ve yer değişim bilgisinin elde edilmesi enkoder milinin hangi pozisyonunda olduğunun yazılımsal olarak tespiti için yeterli değildir. Çünkü enkoderden alınan işaretlerin sayımı sistemin başlatıldığı anda enkoder milleri hangi pozisyonunda olursa olsun sıfırdan başlamaktadır. Örneğin çalışmaya konu olan sistem başlatıldığı anda araç pistin hangi noktasında olursa olsun, o andan itibaren aracın hangi yönde ve ne kadar yol aldığı bilinse de motor enkoderinin ürettiği iki bitlik sıralı dizi araç konumunun belirlenmesi için yeterli olmayacaktır. Aynı belirsizlik sarkaç enkoderi için de geçerlidir. Sistem başlatıldığı anda sarkaç zaten hareket halinde ise enkoderden gelen bilgilerin sayılmaya başladığı anda sarkacın açısı her ne olursa olsun, o nokta yazılımda referans kabul edilecek, açı bilgisinde kayma oluşacaktır.

Tüm bunlar ele alındığında her iki enkoder için de bir referans noktasına ihtiyaç duyulduğu ortadadır. Bu referansların sarkaç enkoderi için yerçekimi yönü, araç enkoderi için de pistin orta noktası olması uygun olacaktır. Sistem başlatılmadan önce sarkaca dışarıdan bir kuvvet uygulanmadığı sürece yerçekimi nedeniyle aşağı denge noktasında hareketsiz olacak ve bu nokta sistem başlatıldığında sıfır kabul edilecektir. Sarkaç için gerekli referansı yerçekimi sağlar iken, aracı referans noktasına, yani pistin ortasına getirecek bir kuvvet yoktur. Aracı pist ortasına her sistem başlangıcından önce elle götürmektense, gerekli referans ikinci bölümde değinilen sınır anahtarları ile sağlanmıştır.

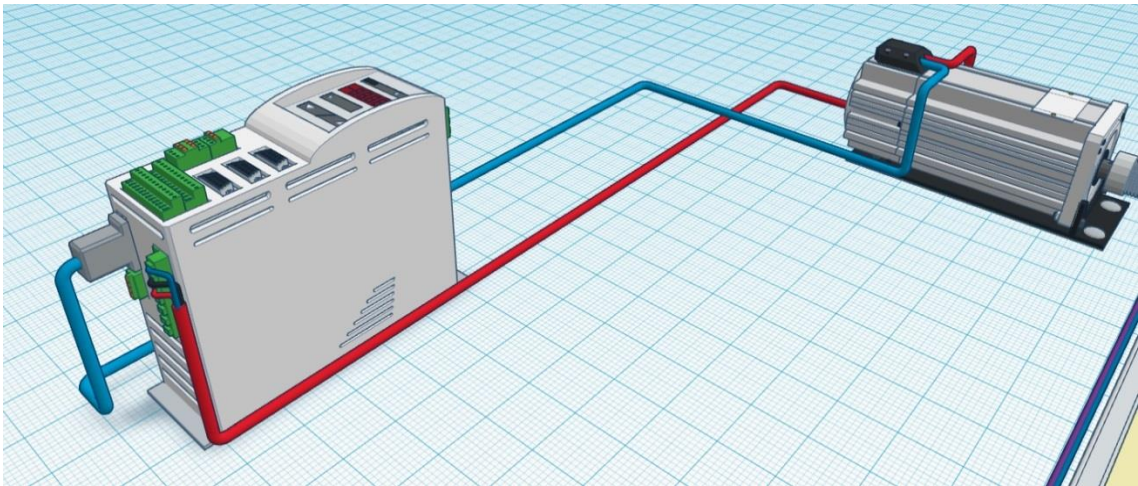
3.3 Motor Sürücü

Araç pistine bağlanan 3 fazlı DC servo motorun denetiminin verimli bir şekilde yapılabilmesi için kullanılan motor sürücünün teknik özellikleri EK.1’de, elektriksel bağlantı şeması EK.2’de verilmiştir. Sürücünün genel görünümü ve çalışmada kullanılan bağlantıları Şekil 3.3’te, motor ile bağlantısı ise Şekil 3.4’teki gibidir. Çalışmada kullanılan analog ve lojik sürücü girişleri ise Şekil 3.5’te görülmektedir (<http://www.tdemacno.com>).

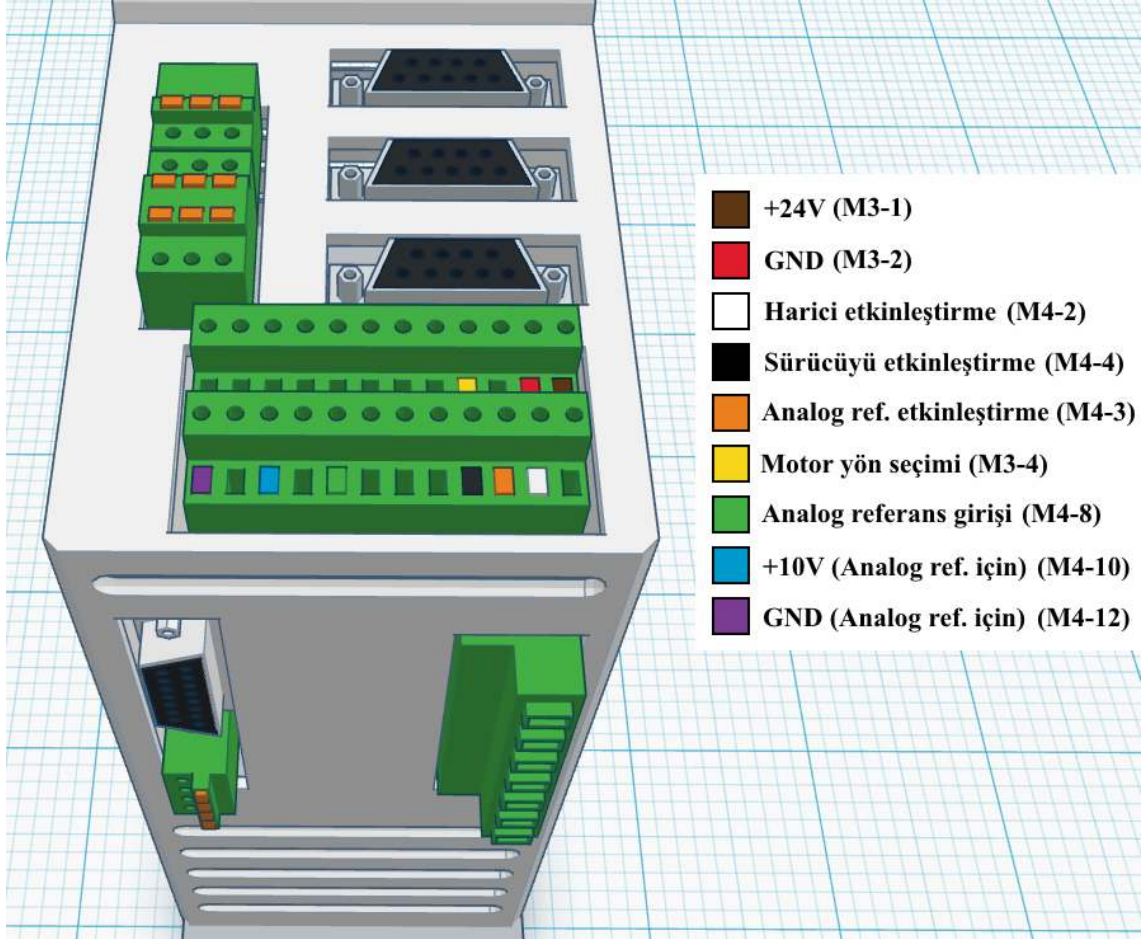
Sürücü ve motor bağlantısı yapıldıktan sonra motor enkoder çıkışı ve analog referans girişinde büyük değerlerde gürültü ile karşılaşmıştır. Motorun enerjili ve enerjisiz durumlarında var olan gürültü osiloskop ile ölçülmüş ve motor enerjiliyken gürültünün büyük oranda arttığı görülmüştür. Motor ve sürücü şasilerinin birleştirilerek şebekenin toprak hattına bağlanmasıyla gürültü probleminin büyük ölçüde önüne geçilmiştir.



Şekil 3.3 Motor sürücünün genel görünümü ve kullanılan bağlantılar



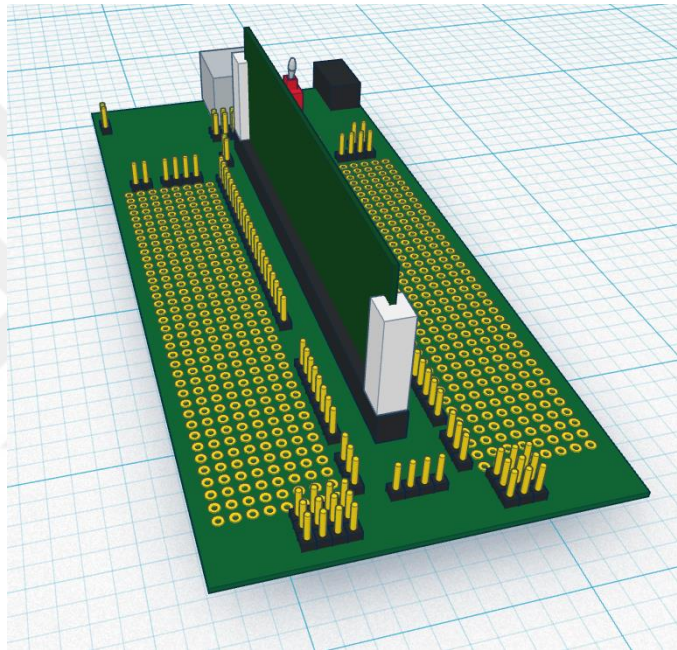
Şekil 3.4 Sürücünün motor ile olan bağlantıları



Şekil 3.5 Çalışmada kullanılan analog ve lojik sürücü girişleri

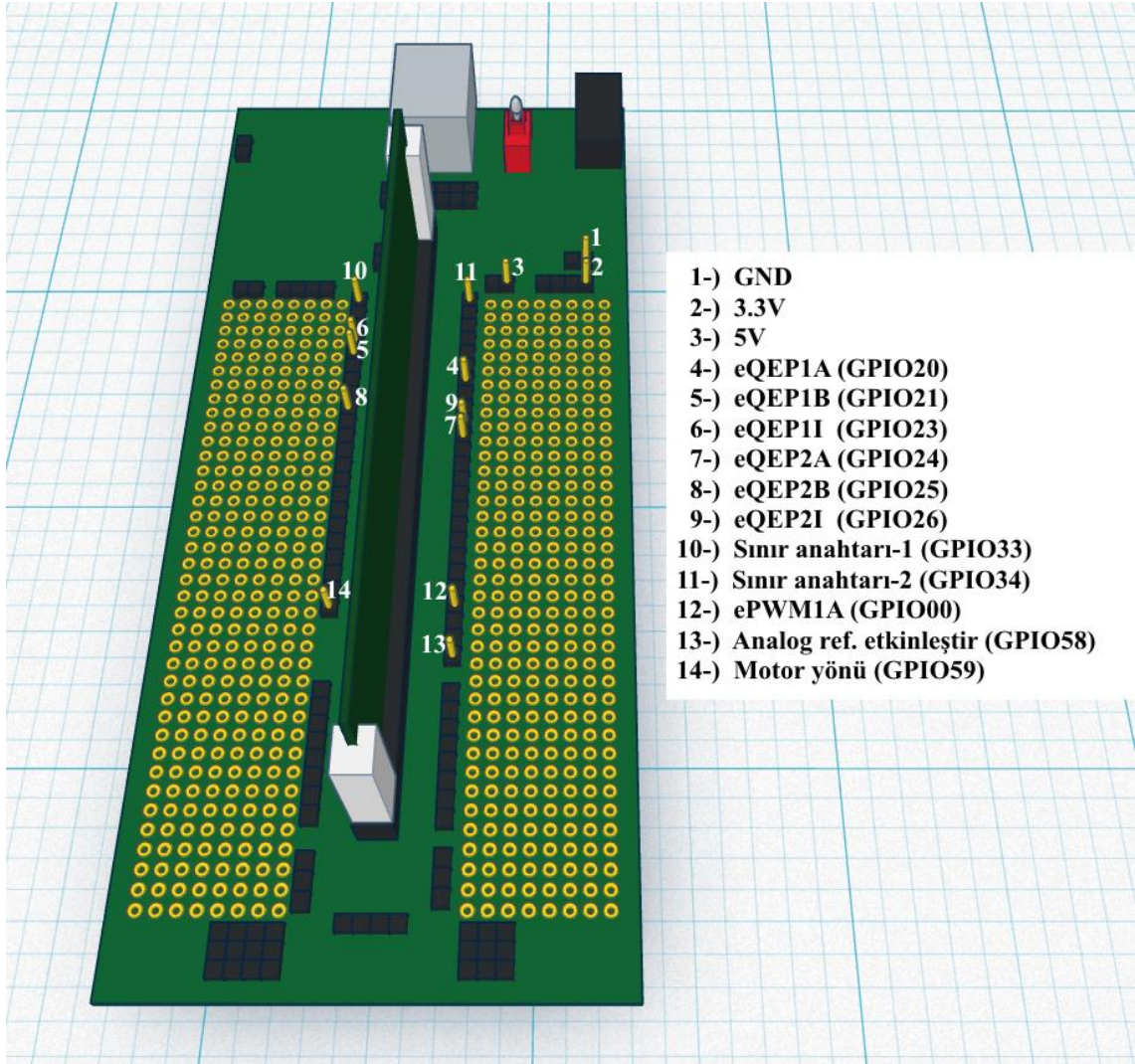
3.4 Sayısal İşaret İşleyici

Sistemin denetimi için sarkaç ve motorun enkoder işaretlerinin okunarak işlenmesi ve bulunan hataları düzeltecek olan uygun motor hızı için gerekli PWM görev çevriminin hesaplanması gerekmektedir. Sistemin tüm mekanik ve elektronik donanımı içinde, asıl denetim işini yapan eleman Texas Instruments firmasının TMS320F28335 mikrodenetleyiciye sahip, TMDSDOCK28335 Experimenter Kit sayısal işaret işleme kartı olup, genel görünümü Şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6 TMS320F28335 Experimenter Kit

Sistemi denetleyen TMDSDOCK28335 kartı 150 MHz saat hızına ve yüksek performanslı 32-bit merkezi işlem birimine sahip olup, kayan noktalı işlem yapabilmektedir. 16 kanallı 12-bit analog-dijital dönüştürücüye, 9 adede kadar 16-bit ve 8 adede kadar 32-bit zamanlayıcıya, 18 adede kadar PWM, 6 adede kadar ePWM çıkışına, 2 adede kadar eQEP enkoder modülüne ve 88 adede kadar ayrı ayrı programlanabilir, çoğullanmış GPIO pinine sahiptir. Çalışmada kullanılan sayısal işaret işleyici pinleri kullanım amaçlarıyla birlikte Şekil 3.7'de görülmektedir (<http://www.ti.com>).



Şekil 3.7 Denetim kartında kullanılan pinler ve kullanım amaçları

3.5 Elektronik Donanım Elemanları Arasındaki Bağlantılar

Ters sarkaç sisteminin elektronik donanımında bulunan denetleyici, motor sürücü ve enkoderler arasındaki bağlantının sağlıklı bir şekilde kurulabilmesi için gerekli gerilim dönüşümlerini yapan, bağlantıları kolay ve anlaşılır hale getirerek hepsini tek çatı altında toplayan, denetim kartına kolaylıkla takılıp çıkarılabilen bir ara kart tasarlanarak uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ara kart üzerinde bulunan gerilim dönüştürücü devreler, devre elemanları ve konnektörler hakkında bilgi verilmiş, devre şemaları çizilerek açıklanmıştır.

3.5.1 Sistemin giriş ve çıkışlarının gerilim seviyeleri

Ters sarkaç sisteminin denetiminde kullanılan TMDSDOCK28335 sayısal işaret işleyicisi 3,3V giriş/çıkış gerilimine sahiptir. Sistemin doğru bir şekilde çalışması için bu gerilim seviyesi denetleyicinin diğer elektronik elemanlarla olan bağlantılarında göz önünde bulundurulmalı ve gerekli gerilim dönüşümleri yapılmalıdır. Denetleyiciye giren işaretler kartın zarar görmemesi için işaret kaynağının geriliminden 3,3V'a düşürülmeli, denetleyiciden çıkan işaretler ise 3,3V'tan işaretin gireceği cihazın giriş gerilimine yükseltilmelidir. Gerçeklenen ters sarkaç sisteminin giriş/çıkışları ve bunların gerilim seviyeleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Sistemin giriş ve çıkışlarının gerilim seviyeleri

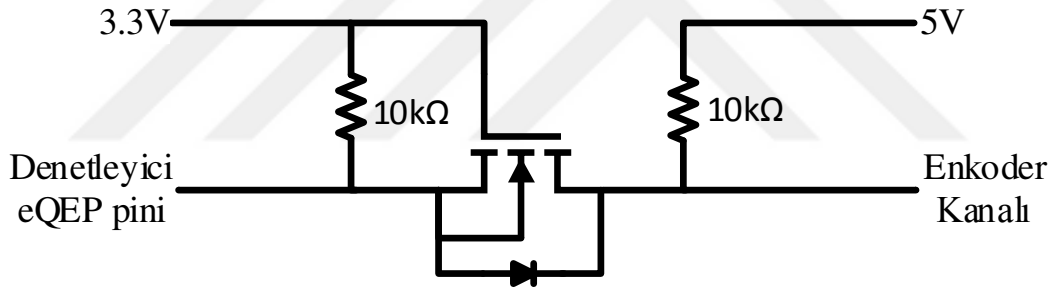
GİRİŞLER							ÇIKIŞLAR	
Sarkaç Enkoder Kanalları			Motor Enkoder Kanalları			Sınır Anahtarları	Motor Sürücü	
							Analog Referans	Lojik Girişler
A	B	I	A	B	I			
5-30V			5V			3,3V	0-10V	24V

3.5.2 Sarkaç ve araç enkoderlerinin denetleyici ile bağlantısı

Denetimin girişini oluşturan sarkaç ve araç enkoderlerinden alınan lojik işaretler denetleyici kartın pinlerine bağlanmadan önce bir gerilim dönüştürme yöntemiyle denetleyicinin giriş/çıkış gerilimi olan 3,3V'a dönüştürülmeleri gerekmektedir. Uygun yöntemin bulunabilmesi için öncelikle enkoderlerin kanal işaret gerilimleri incelenmelidir.

Sarkaç enkoderinin giriş gerilimi 5-30V aralığında olup, besleme uçlarına uygulanan bu aralıktaki bir gerilim eşit olarak A, B ve I kanallarından alınmaktadır. Harici bir kaynak kullanmamak için sarkaç enkoderinin minimum besleme gerilimi olan 5V seçilmiş ve bu besleme denetleyici kartın 5V çıkış pininden alınmıştır. Dolayısıyla enkoder kanallarından alınan işaretlerin gerilimi de 5V olmuştur. Motora bağlı araç enkoderinin çıkışı ise motor sürücünün frekans giriş konnektörüne bağlanmış, denetleyiciye girecek olan enkoder bilgisi sürücünün simüle edilmiş enkoder çıkışından alınmıştır. Araç enkoderi kendi beslemesine sahip olup harici bir kaynağa ihtiyaç duymamaktadır ve kanallarından alınan işaretlerin genliği 5V'tur.

Hem sarkaç, hem de araç enkoderlerinin 5V büyüklüğündeki kanal işaret gerilimlerinin denetleyici kartın giriş/çıkış gerilimi olan 3,3V'a düşürülmeleri için sırası ile gerilim bölücü devre, gerilim regülatörü ve lojik seviye dönüştürücüler test edilmiştir. Kurulan gerilim bölücü devrelerde hem sarkaç hem de araç enkoderinin iç dirençlerinden dolayı işaretler arasında farklı gerilim seviyeleri ve gerilim düşümleri gözlenmiş, sabit bir 3,3V gerilim elde edilememiştir. Gerilim regülatöründe ise enkoder işaretlerinden sabit bir 3,3V gerilim elde edilmiş, fakat bu yöntem regülatör devresindeki kapasitörlerin dolup ve boşalması nedeniyle hızlı enkoder işaret değişimlerine karşı yavaş kalmıştır. Dolayısıyla aç ve konum bilgileri doğru şekilde okunamamıştır. Yapılan testlerde lojik seviye dönüştürücülerin bu çalışma için her açıdan doğru seçim olduğu görülmüştür. 4 kanaldan oluşan, her bir kanalında Şekil 3.8'deki gibi bir N-tipi MOSFET, iki pull-up dirençli devre bulunan 5V/3,3V dönüştürücülerden biri sarkaç, biri araç enkoderi için olmak üzere iki adet kullanılmıştır. Enkoderlerin A,B ve I kanalları kendilerine ait lojik seviye dönüştürücünün dört kanalından üçüne bağlanmıştır.

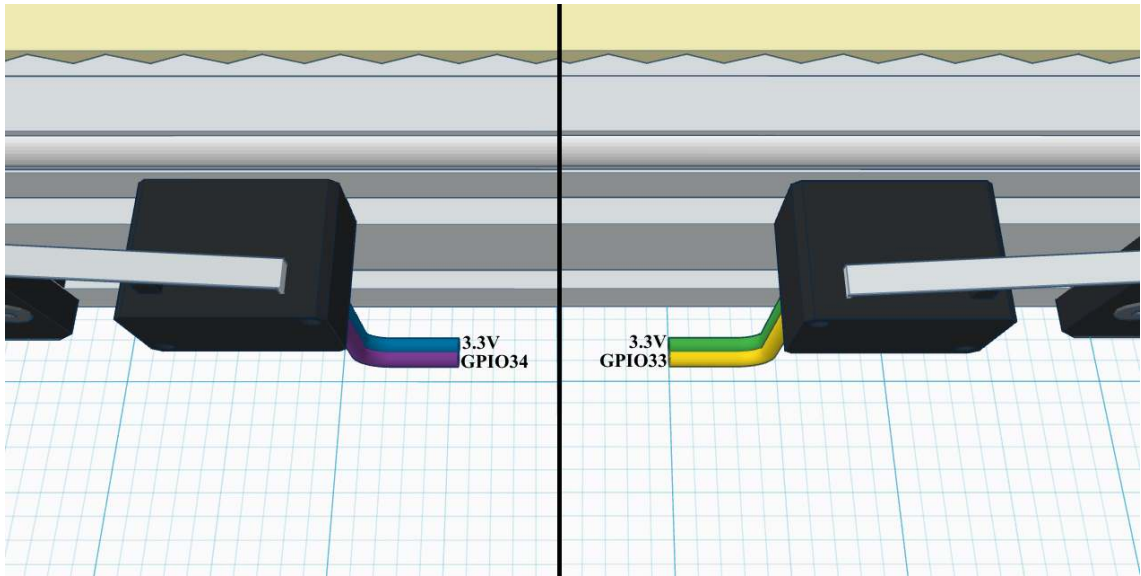


Şekil 3.8 Lojik seviye dönüştürücü devre şeması

Kullanılan 5V/3,3V lojik seviye dönüştürücüler devre şemasından da görülebileceği üzere iki yönlü dönüşüm yapabilmektedirler. Bilgi akışının enkoderlerden denetleyiciye doğru tek yönlü olması nedeniyle dönüştürücülerin 5V tarafının besleme ucu iptal edilerek sadece enkoder kanal bağlantıları yapılmış, 3,3V tarafının beslemesi ise denetleyici kartın 3,3V çıkış pinine bağlanmıştır. Yani denetleyici kartın eQEP pinlerine gelen bilginin kaynağı enkoder kanalları olsa da, gelen bilginin gerilim kaynağı kartın kendisine ait 3,3V çıkışıdır. Bu yönleriyle, lojik seviye dönüştürücülerin belli bir seviyede izolasyon sağladıkları ve gürültüyü azalttıkları da söylenebilir.

3.5.3 Sınır anahtarlarının denetleyici ile bağlantısı

Sistem başlangıcında aracın pist üzerindeki konumunun tespit edilmesi, sistemin devamında da istendiği takdirde aracın referans noktasının değiştirilebilmesi amacıyla pistin her iki ucuna da bağlanan sınır anahtarları temelde basit, mekanik bir buton gibi çalışmaktadırlar. Normalde açık ve normalde kapalı kontakları bulunan anahtarların normalde açık uçları Şekil 3.9’da görüldüğü gibi denetleyicinin GPIO33 ve GPIO34 pinlerine, ortak uçları da 3,3V çıkışına bağlanmıştır. Böylece anahtarlar açık iken GPIO33 ve GPIO34 bitleri 0 olurken, anahtarlar kapandığında 1 olmaktadır.



Şekil 3.9 Sınır anahtarlarının denetleyici üzerindeki bağlantıları

3.5.4 Motor sürücünün denetleyici ile bağlantısı

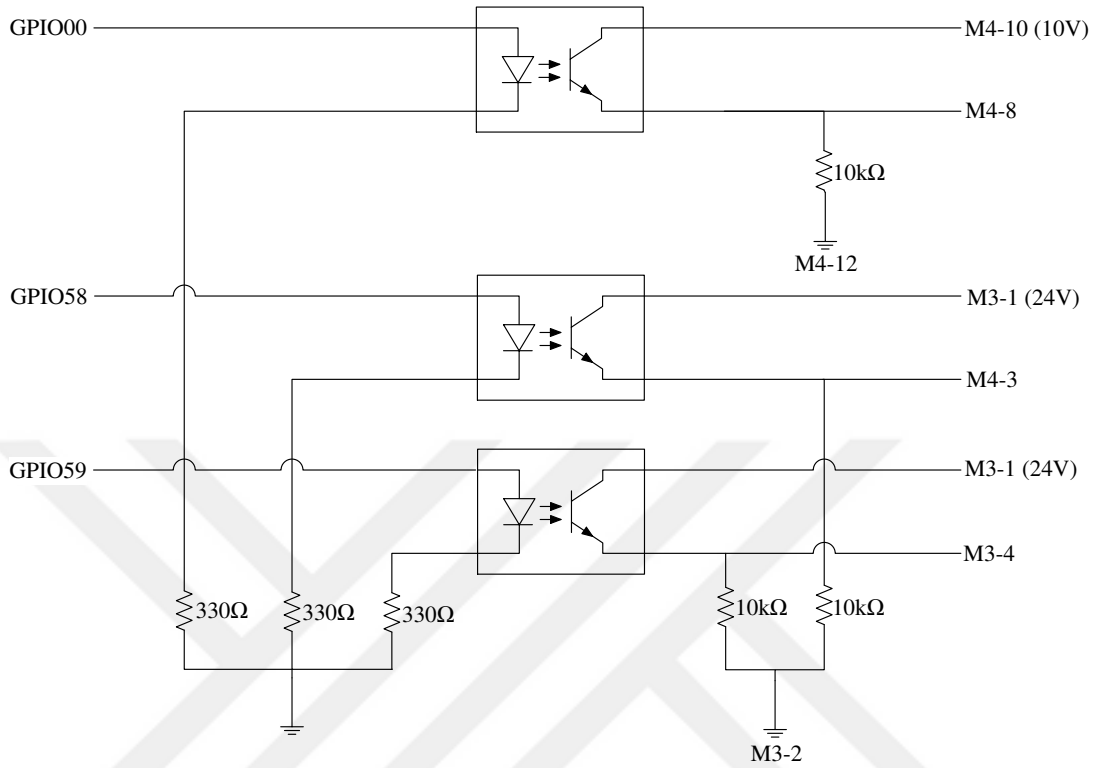
Sistemde kullanılan DC servo motorun denetiminin yapılabilmesi için sayısal işaret işleyici ile motor sürücü arasındaki bağlantıyı sağlayan bir devre tasarlanarak kurulmuştur. Kurulan devrenin girişine bağlanan denetleyici pin ve görevleri ile devrenin çıkışına bağlanan motor sürücü girişleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Denetleyici çıkış pinleri ve motor sürücü tarafındaki bağlantıları

	SAYISAL İŞARET İŞLEYİCİ	MOTOR SÜRÜCÜ
PWM	GPIO00	M4-8
Analog Referans Girişini Etkinleştir	GPIO58	M4-3
Motor Yönü (Saat yönü için 1, tersi için 0)	GPIO59	M3-4

Denetleyicinin 3,3V gerilime sahip çıkışları ile motor sürücünün 24V lojik, 10V analog gerilim seviyeli girişlerinin kontrol edilebilmesi ve aynı zamanda denetleyici ile motor sürücü arasında elektriksel izolasyonun da sağlanması için bilgi transferinin ışıkla sağlandığı optokuplörler kullanılmıştır. Bir infraruj led ve bir fotodiyot veya fototransistörden oluşan optokuplörlerin girişine gerilim uygulandığında girişte bulunan infraruj led ışık yaymakta, çıkışta bulunan ışığa duyarlı fotodiyot veya fototransistör iletme geçmektedir. Bilgi transferi ışık vasıtasıyla gerçekleştiği için, optokuplörün girişine ve çıkışına bağlı devreler arasında elektriksel bir bağlantı yoktur. Dolayısıyla gerilim farkı yüksek iki devre izole edilmiş, olası sinyal bozulmalarının önüne geçilmiş olur.

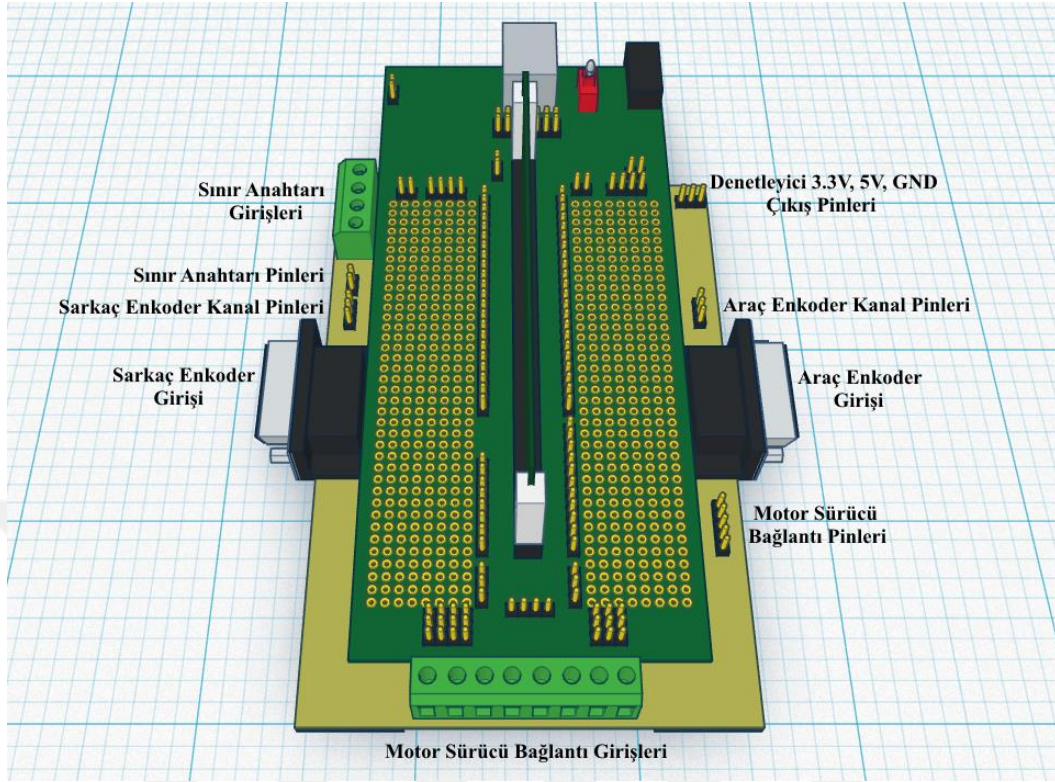
Denetleyici ile motor sürücüyü bağlayan devrenin şeması Şekil 3.10'da verilmiştir. Sürücü üzerindeki M4-2 (harici etkinleştirme) ve M4-4 (sürücüyü etkinleştirme) lojik girişlerinin denetleyiciden alınmasına gerek duyulmamıştır. M4-2 girişi sürücü üzerinde doğrudan M3-1 girişine bağlanarak sürekli etkin kalması sağlanırken, M4-4 ile M3-1 girişleri arasına bir buton bağlanmıştır. Sistem başlangıcında motor bu buton ile enerjilendirilip, istendiği takdirde aynı buton ile motorun enerjisi kesilebilmektedir.



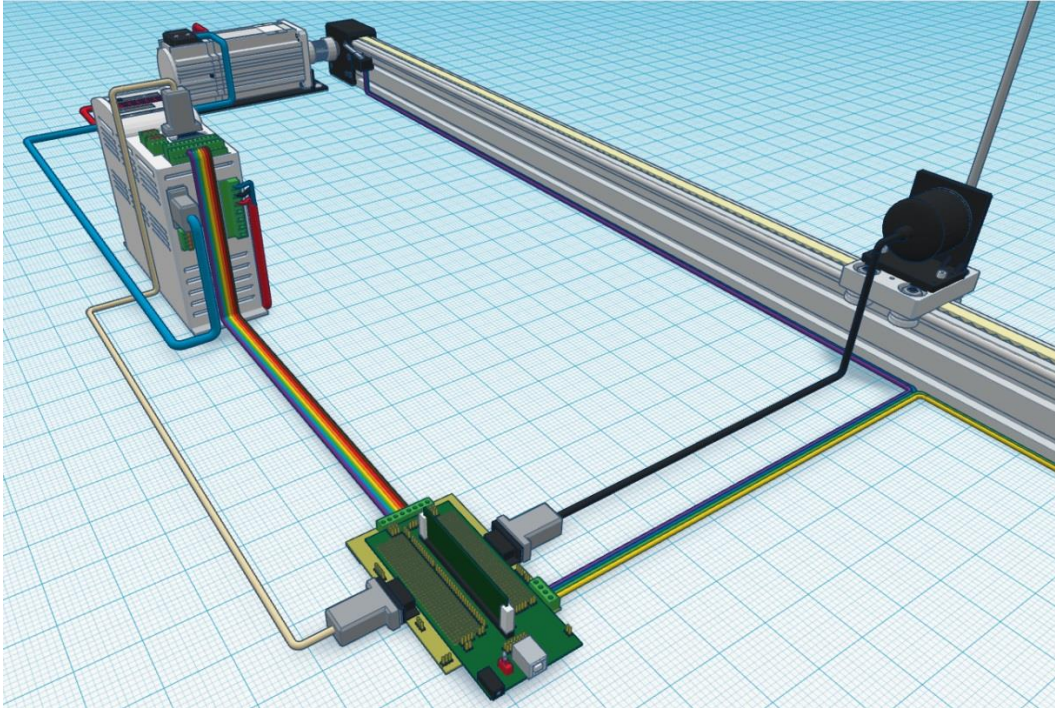
Şekil 3.10 Denetleyici ile motor sürücü bağlantısı için kurulan devrenin şeması

3.5.5 Ara kart

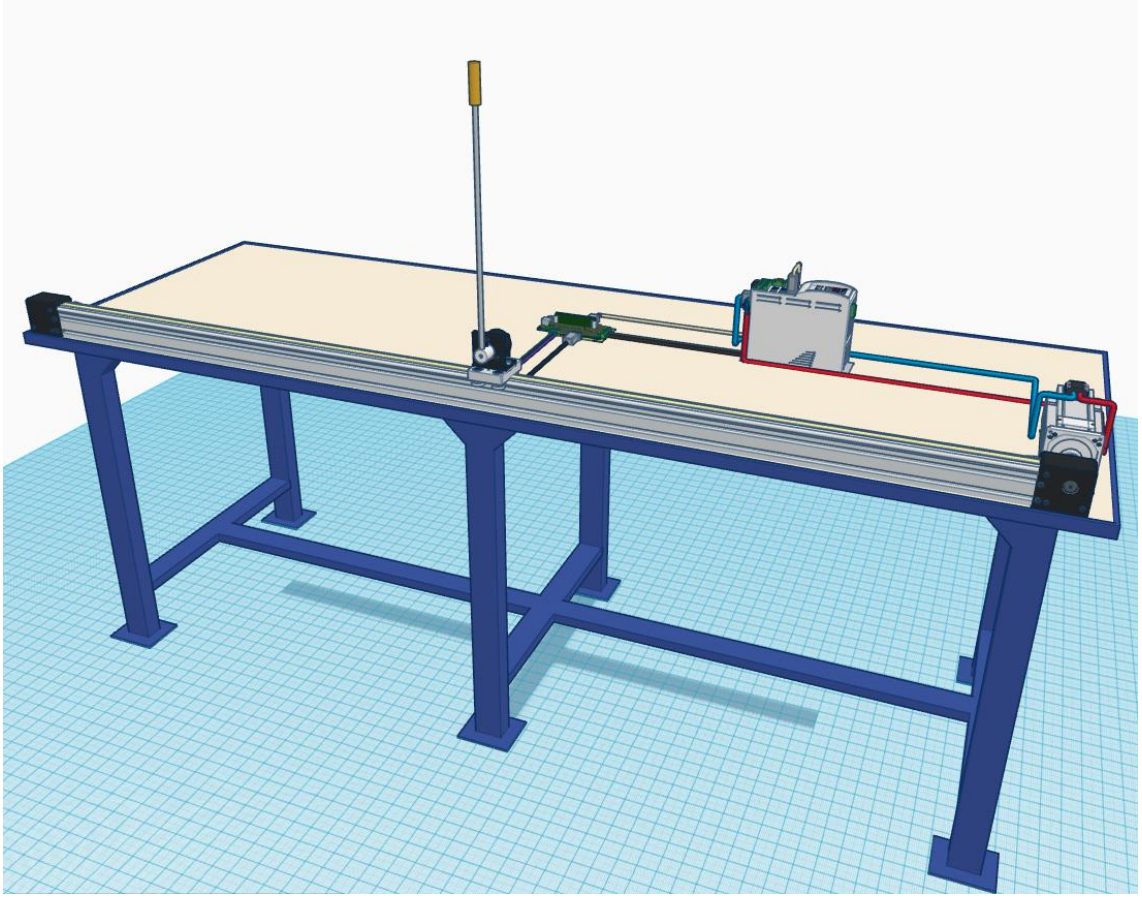
Sayısal işaret işleyicinin sarkaç ve araç enkoderleri, sınır anahtarları ve motor sürücüsüyle olan bağlantılarının kolay ve anlaşılır olması, dağınıklığın önlenmesi ve gürültünün azaltılması amacıyla hepsi tek bir kartta toplanmıştır. Kart tasarımının sade olması ve mümkün olduğunca az yer kaplaması amacıyla, TMDSDOCK28335 denetleyicisinin altına takılıp çıkarılabilen bir yapı tercih edilmiştir. Sarkaç ve araç enkoderlerinin kartla bağlantıları enkoder tarafında erkek, kart tarafında dişi uçlu, 9 pinli d-sub konnektörleri ile yapılmış, sınır anahtarları ve motor sürücüsü için de vidalı klemens konnektörleri kullanılmıştır. Denetleyicinin tüm giriş ve çıkış pinleri için ara kart üzerine de pinler bağlanmış, iki kartın ilgili pinleri arasındaki bağlantı jumper kablolar ile sağlanmıştır. Tasarlanan kartın görünümü ve konnektör tanımları Şekil 3.11’de, denetleyici üzerindeki tüm bağlantılar Şekil 3.12’de, sistemin tüm donanım ve bağlantılarının bir araya gelmesiyle oluşan genel modeli ise Şekil 3.13’te görülmektedir.



Şekil 3.11 Ara kartın tasarımı ve konnektör tanımları



Şekil 3.12 Denetleyicinin tüm elektronik donanım ile bağlantısı



Şekil 3.13 Tüm sistemin genel görünümü

4 ENKODER BİLGİLERİNİN OKUNMASI VE PWM İŞARETLERİNİN ÜRETİLMESİ

Ters sarkaç sisteminin denetimi için, öncelikle sistemin çıkışları olan sarkaç açısı ve araç konumunun enkoderlerden okunması, sonra bu çıkışlara karşı sistemin yeni girişinin, yani motor hızının belirlenmesi için gerekli PWM işaretlerinin üretilmesi gerekmektedir. Tüm bu bilgi alma ve bilgi verme işlemi denetim boyunca gerçek zamanlı olarak TMDSDOCK28335 sayısal işaret işleyicisi tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde enkoder bilgilerinin okunması ve PWM işaretlerinin üretilmesi için kullanılan denetleyici arayüzleri, kullanılan kaydediciler ve enkoderlerden okunarak sayılan işaretlerin denetimde kullanılan birimlere dönüşümleri açıklanmıştır.

4.1 Enkoder Bilgilerinin Okunması ve Birim Dönüşümleri

4.1.1 Sarkaç enkoder bilgilerinin okunarak açı birimine dönüştürülmesi

Enkoder mili etrafında 360° dönebilen sarkacın denetiminde açı birimi olarak radyan yerine derece kullanılması tercih edilmiştir. Sarkaç enkoderi bir tam turunda 20 bin işaret üretirken, bu işaretler kullanılan enkoder arayüzünün işaret sayacı tarafından birer birer sayılmaktadır. Dolayısıyla sayacın aldığı değerler anlık olarak bir katsayı ile çarpılmalı, sarkaç açısı derece cinsinden elde edilmelidir. Bu katsayı 20 bin enkoder işaretine karşılık 360° dönen sarkacın 1 enkoder işaret değişiminde aldığı yolun açı cinsinden ifadesi olup, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_s = \frac{açı_{l_T} (^\circ)}{işaret_T} = \frac{360^\circ}{20000} = 0,018^\circ \quad (1)$$

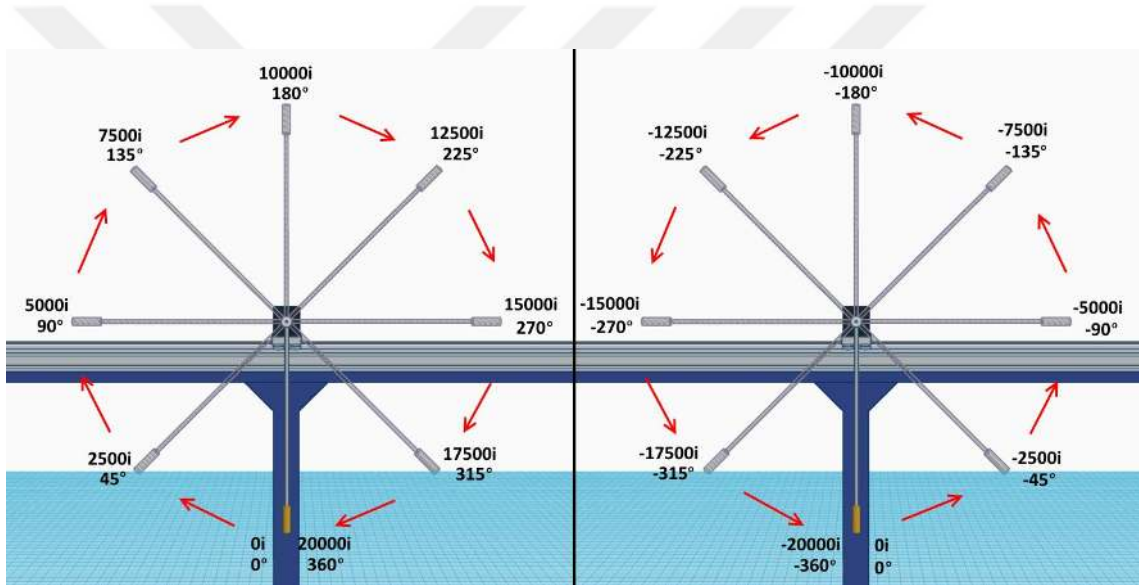
Burada k_s sarkaç enkoderinin işaret sayacı ile çarpılacak değer, $açı_{l_T}$ sarkacın bir turda derece cinsinden katettiği açı ve $işaret_T$ sarkaç enkoderinin bir turda ürettiği işaret sayısıdır.

Sarkaç enkoder işaretlerinin sayımı TMDSDOCK28335 kartının eQEP1 modülü üzerinden yapılmakta olup, modülün blok diyagramı EK.3'te, modülde bulunan kaydediciler ise EK.4'te verilmiştir (<http://www.ti.com>).

İşaretlerin sayımını onaltılık sayı sisteminde yapan QPOSCNT kaydedicisinin içeriği öncelikle onluk tabana çevrilerek bir değişkende tutulmakta olup, bu değişken enkoder işaret sayılarının ham bilgisini, yani sarkacın ham açısını vermektedir. Ham açı ise eşitlik (1)'deki gibi

hesaplanan k_s ile çarpılarak ayrı bir değişkende tutulmakta, böylece sarkacın açısı derece cinsinden elde edilmektedir.

Denetim kartında bulunan eQEP modülleri, işaret dizilerinden enkoder milinin hareket yönünü tespit edebilmektedir. Böylece sarkacın saat yönündeki hareketleri işaret sayısını tutan QPOSCNT kaydedicisini artırırken, saat yönünün tersinde azaltmaktadır. Yani sarkaç aşağı denge noktasında iken işaret sayımına başlanıp saat yönünde bir tam tur attığında sarkaç açısı bilgisini tutan değişken 360° , saat yönünün tersinde ise -360° değerini almaktadır. Sarkacın her iki yöndeki hareketlerinde enkoder işaretlerinin sayısı ve derece cinsinden karşılıkları Şekil 4.1’de görülmektedir.



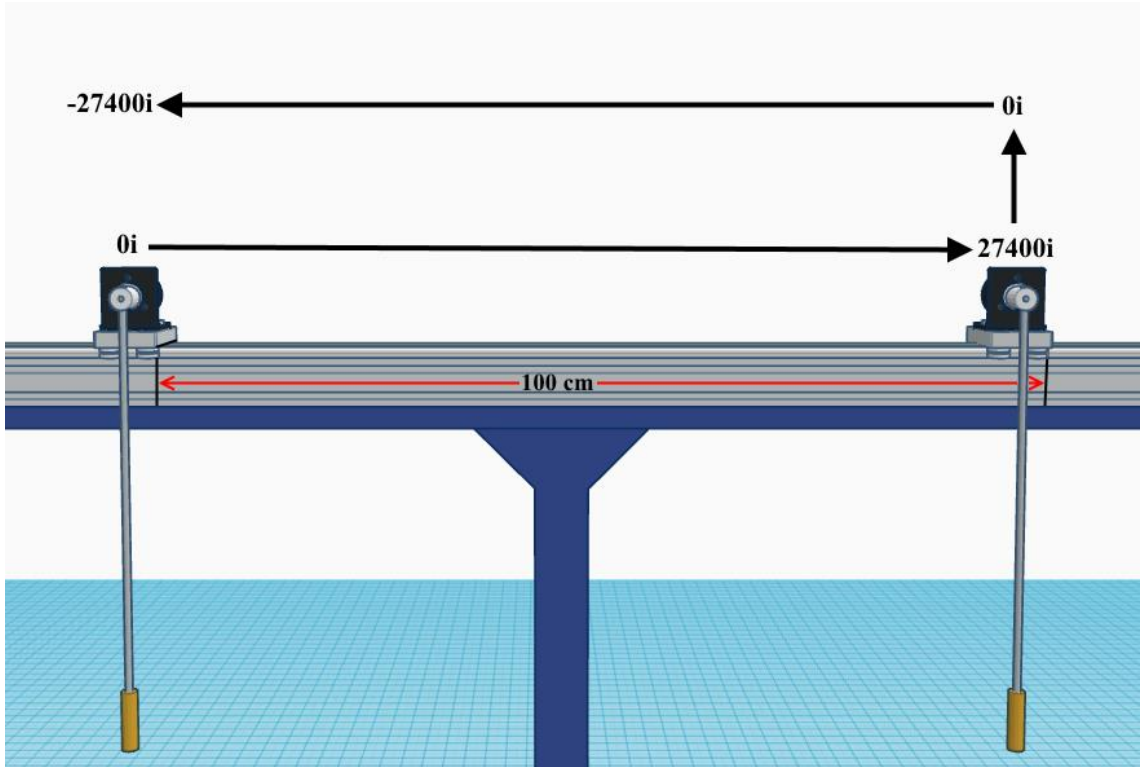
Şekil 4.1 Sarkaç yönüne göre enkoder işaret sayıları ve açı karşılıkları

4.1.2 Araç enkoder bilgilerinin okunarak uzunluk birimine dönüştürülmesi

Devir başına 2500 işaret üreten motor enkoderinin kanalları sayısal işaret işleyicinin ikinci enkoder arayüzü olan eQEP2 modülüne bağlanarak aracın konum bilgisi elde edilebilmektedir. Motor milinin açısal hareketi, mile bağlı olan pist üzerindeki araca doğrusal hareket kazandırmaktadır. Dolayısıyla aracın pist üzerindeki konumunun birimi de açı değil, uzunluk birimi olmalıdır. Bunun için öncelikle motor enkoderinin ürettiği her bir işarete karşılık aracın pist üzerinde ne kadar yol aldığı bulunmalıdır.

Denetleyicinin eQEP2 modülüne ait QPOSCNT kaydedicisi tarafından kaydı tutulan enkoder işaret sayısını pratik olarak uzunluk birimine dönüştürebilmek için pist üzerinde 1 metrelik bir bölüm ölçülerek işaretlenmiş, araç bu ölçülen yolun başına el ile getirildikten sonra

motor enerjilendirilmeden sistem başlatılmıştır. Daha sonra araç tekrar el ile 1 m'lik yolun sonuna Şekil 4.2'deki gibi götürülmüştür. Enkoder işaretlerini onaltılık tabanda sayan QPOSCNT kaydedicisinin içeriğini onluk tabanda tutan değişkenin değeri not edildikten sonra sistem baştan başlatılarak, bu kez araç eski yerine, yani 1 m'lik yolun başına getirilmiştir. Motor enkoderinin yol boyunca ürettiği işaret sayısının her iki yönde de yaklaşık olarak 27400 olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2 Motor enkoderinin 1 m'de ürettiği işaret sayısının ölçümü

27400 enkoder işaretine karşılık 100 cm yol alan motorun 1 enkoder işaretinde aldığı yol aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$k_A = \frac{yol_T (cm)}{işaret_T} = \frac{100 \text{ cm}}{27400} \cong 0,00365 \text{ cm} \quad (2)$$

Burada k_A motor enkoderinin işaret sayacı ile çarpılması gereken katsayı, yol_T testte kullanılan yolun uzunluğu ve $işaret_T$ motor enkoderinin yol_T boyunca ürettiği işaret sayısıdır. Motor enkoder işaretlerini onaltılık tabanda sayan QPOSCNT kaydedicisinin içeriği öncelikle onluk tabana dönüştürülerek bir değişkende tutulmakta, sonra bu değişkenin aldığı değerler k_A

ile çarpılarak aracın pist üzerindeki konumu, yani referans noktasından uzaklığı cm cinsinden elde edilmektedir.

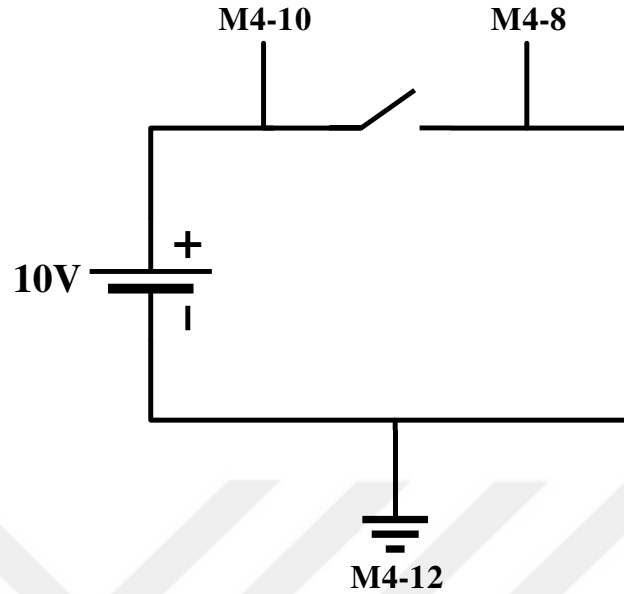
Motorun saat yönündeki açısal hareketi aracı pist üzerinde sağa, saat yönünün tersindeki hareketi ise sola çekmektedir. Sarkaç enkoderi gibi, motor enkoderi de QPOSCNT kaydedicisinin değerini saat yönünde artırırken, saat yönünün tersinde azaltmaktadır. Bu durumda araç pistin tam orta noktasında iken sistemin başlatıldığı düşünülürse, QPOSCNT kaydedicisi pistin sağ tarafında pozitif, sol tarafında negatif değerler alacaktır. Böylece aracın pistte kullanabildiği 186 cm'lik yol üzerindeki konumu birim dönüşümü ile $[-93 \text{ cm}, 93 \text{ cm}]$ aralığında olmaktadır.

Hem sarkaç, hem de araç enkoderlerinde bulunan, her bir devirde tek bir işaret üreterek olası işaret sayım hatalarını düzelter I kanalının ara kart üzerindeki bağlantıları yapılmış, fakat her iki enkoder için de yapılan testlerde bir sayım hatası ile karşılaşılmadığı için çalışmanın son halinde bu kanallar kullanılmamıştır.

4.2 PWM İşaretlerinin Üretilmesi

Ters sarkaç denetiminin temelinde, sarkaç ve araç enkoderlerinden alınan bilgilerin denetim kartında işlenerek, sistemi dengeye getirecek olan motor yön ve hızının sağlanması yatmaktadır. Motorun hareketi, sayısal işaret işleyici tarafından üretilen PWM işaretleri ile sağlanmakta olup, hızı da bu işaretlerin genişliğine bağlıdır. PWM işaret çıkışı kimi çalışmalarda doğrudan motorun giriş geriliminin kaynağı olurken, bazısında motor hızını belirleyen referans değerini sağlamaktadır.

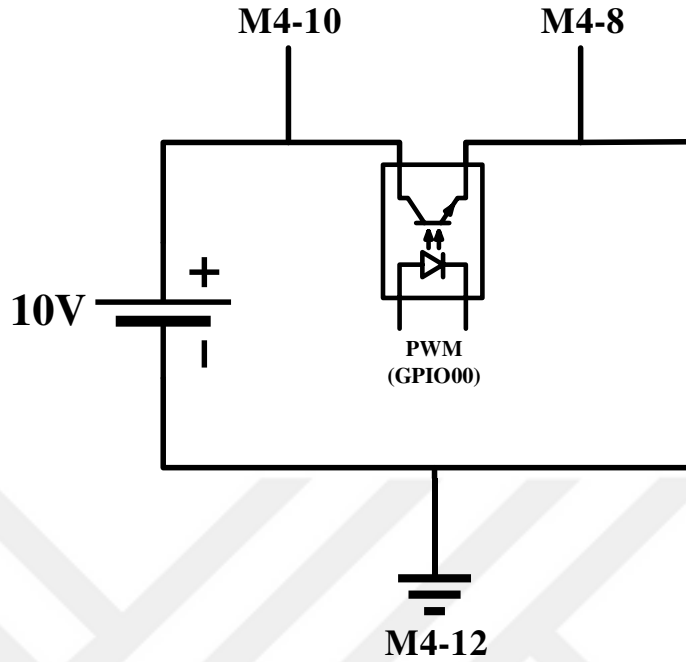
Çalışmada kullanılan motorun U,V,W kutuplarına uygulanan gerilim motor sürücü tarafından sağlanmakta ve uygulanan gerilimin büyüklüğü motorun hızını belirlemektedir. Uygulanan gerilimin referansı ise sürücünün M4-8 numaralı analog referans girişi olup, bu girişe uygulanan 0-10V aralığındaki gerilimler, motora uygulanacak olan gerilimi belirlemektedir. M4-8 girişine sürücünün M4-10 numaralı bağlantısından alınan 10V'luk gerilim direkt olarak uygulandığında motor maksimum hızla dönmekte, herhangi bir gerilim uygulanmadığında ise motor durmaktadır. Sürücünün M4-8, M4-10 ve bunların ortak nötr hattına bağlı olan M4-12 girişleri arasındaki bağlantı basitçe Şekil 4.3'teki gibidir.



Şekil 4.3 Sürücünün M4-8, M4-10 ve M4-12 girişleri arasındaki bağlantının devre şeması

Şekil 4.3'te görülen anahtarı kapatmak, M4-8 analog referans girişine maksimum referans olan 10V'luk gerilimi uygulamaktadır. Anahtar belli bir periyotta kapatılıp açılırsa, M4-8 girişine uygulanan gerilimin ortalama değeri ile birlikte motor hızı da değişecektir. PWM işaretleri bu kapatıp açma işleminin saniyede binlerce kez yapılabilmesine olanak sağlayarak M4-8 girişine uygulanan ortalama gerilimi 0-10V aralığında sabit bir değerde tutar. Anahtarın bu açma-kapatma periyotlarının ne kadarında açık, ne kadarında kapalı olduğuna göre analog referans girişine uygulanan ortalama gerilim değiştirilebilmekte, böylece motorun hız kontrolü yapılabilmektedir.

Sayısal işaret işleyici ile motor sürücü bağlantısı için kurulan devrede Şekil 4.3'teki anahtarın yerine Şekil 4.4'teki gibi bir optokuplör bağlanmıştır. Denetim kartı tarafından üretilen 3,3V genlikli PWM işaretleri optokuplörün girişine uygulanmaktadır. Optokuplör çıkışında bulunan fototransistör M4-8 ile M4-10 girişleri arasını PWM frekansında anahtarlama, böylece 3,3V genlikli PWM işareti sürücü tarafında 10V genlikli olacak şekilde elde edilmektedir.



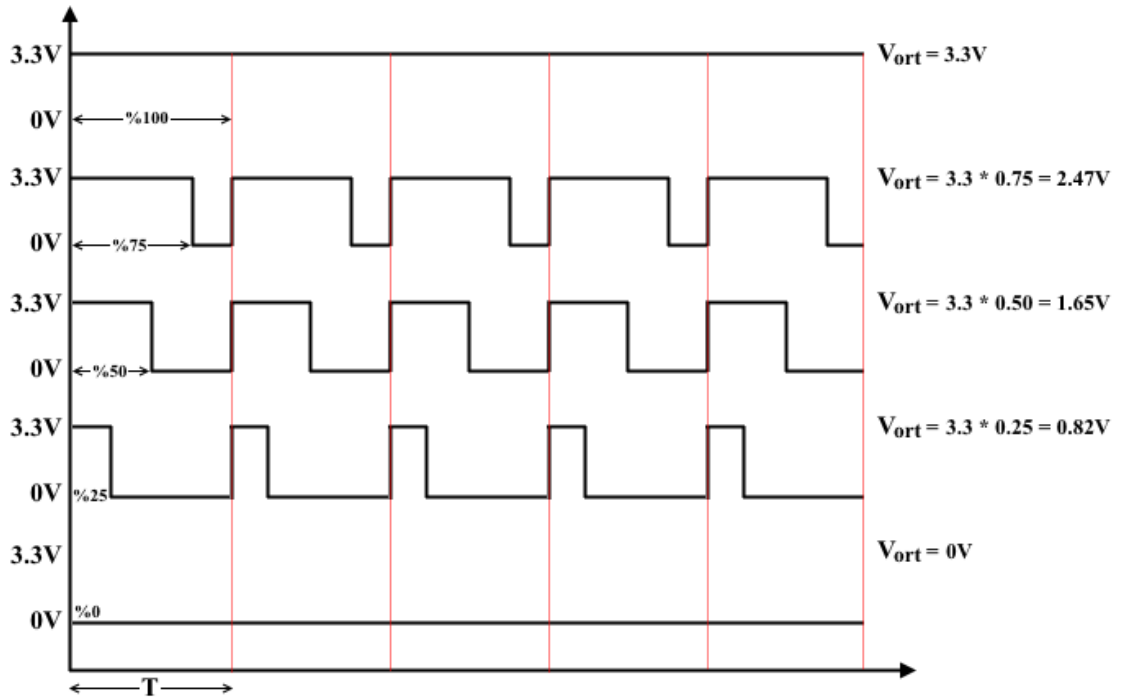
Şekil 4.4 PWM işaretinin optokuplör ile analog referans girişine uygulanması

Optokuplör girişine uygulanan PWM işaretleri için TMS320F28335 kartında bulunan, blok diyagramı EK.5'teki gibi olan ePWM1 modülünün A kanalı kullanılmıştır (<http://www.ti.com>).

10 kHz frekanslı ePWM1A işaretleri denetleyicinin GPIO00 çıkışından alınarak optokuplör girişine bağlandığında motor sürücünün M4-8 ve M4-10 girişleri arası saniyede 10 bin kez anahtarlanabilmektedir. PWM periyodunu belirleyen TBPRD kaydedicisine 7500 değeri verilmiştir. 10 kHz frekansı için PWM periyodu 100 μ s olmakta ve her bir periyottaki PWM işaret genişliğinin PWM periyoduna oranı görev çevrimini vermektedir. PWM ortalama gerilimi görev çevrimi ile doğru orantılı olup, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_{ort} = V_{max} \cdot \frac{I}{T} \quad (3)$$

Burada V_{ort} PWM ortalama gerilimi, V_{max} PWM işaret genliği, I PWM işaret genişliği, T ise PWM periyodudur. Bu durumda $\frac{I}{T}$ ifadesi görev çevrimini vermekte olup, bazı görev çevrimleri için PWM işaretlerinin şekli ve sağladıkları ortalama gerilimler Şekil 4.5'teki gibidir.



Şekil 4.5 Bazı görev çevrimleri için PWM işaret şekilleri ve sağladıkları ortalama gerilimler

Sayısal işaret işleyicinin PWM çıkışı ile motor sürücünün analog referans girişi arasında kullanılan optokuplörün anahtarlama sırasındaki yükselme ve düşme sürelerinin uzun olması, sürücü tarafında elde edilen 10V genlikli PWM işaretinin tam bir kare dalga olmamasına, dolayısıyla analog referans girişine uygulanan ortalama gerilimin beklenenden yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu durum motorun da beklenenden hızlı olmasına neden olarak denetimi güçleştirmektedir. Bu nedenle PWM çıkışına farklı optokuplörler bağlayıp dalga şekilleri osiloskop ile incelenmiş, en kısa yükselme ve düşme sürelerine sahip olan optokuplör seçilmiştir. PWM ortalama gerilimleri farklı görev çevrimleri için hem denetleyici, hem de motor sürücü tarafında voltmetre ile ölçülmüş, ölçülen değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Denetleyici ve motor sürücü tarafındaki PWM ortalama gerilimleri

Görev Çevrimi (%)	PWM ORTALAMA GERİLİMLERİ (V)	
	Sayısal İşaret İşleyici	Motor Sürücü
0	0,005	0,003
10	0,337	1,343
20	0,669	2,276
30	1,002	3,131
40	1,334	3,970
50	1,667	4,806
60	1,999	5,639
70	2,332	6,473
80	2,664	7,300
90	2,997	8,140
100	3,329	8,830

Çizelge 4.1 incelendiğinde sayısal işaret işleyici tarafındaki PWM ortalama geriliminin görev çevrimi ne olursa olsun tutarlı bir grafik sergilediği görülmektedir. Motor sürücü tarafındaki PWM ortalama gerilimi ise %40 görev çevriminde yaklaşık olarak ideal sonuç verirken, bunun altındaki oranlarda kazanç, üstündekilerde ise kayıplar göze çarpmaktadır. Bu durumun sebebi ideal olmayan optokuplörün yükselme ve düşme karakteristikleri olmakla birlikte, Çizelge 4.1’de görülen değerlerin farklı optokuplörlerle yapılan ölçümler arasında elde edilen en iyi sonuçlar olduğunu belirtmek gerekir. Bunun yanında, motor sürücü analog referansındaki kazanç ve kayıpların sistem denetimine olumsuz etkisinden bahsedebilmek için, bu durumun motor hızına olan yansıması incelenmelidir. Bu amaçla aracın farklı görev çevrimlerindeki hızını incelemek için bir test kodu yazılmıştır. Yazılan koda göre araç pist uçları arasında sabit hızda hareket etmekte, bir sınır anahtarı kapandığında yön değiştirerek diğer sınır anahtarına doğru gitmektedir. Araç hızının görev çevrimiyle orantılı olup olmadığının tespiti için teste çok küçük bir görev çevrimi ile başlanmış, araç hızı kaydedildikten sonra görev çevrimi her seferinde iki katına çıkarılmıştır. Alınan sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Motor piste bağlı iken farklı görev çevrimlerindeki araç hızları

GÖREV ÇEVİRİMİ (%)	ARAÇ HIZI (cm/s)
0,2	3,3
0,4	6,9
0,8	11,7
1,6	20,5
3,2	38,6

Çizelge 4.2’de görülebileceği gibi, görev çevrimi ile araç hızı arasında sabit bir orantı olmasa da, alınan sonuçlar kabul edilebilir seviyede olup, sistem denetimine engel teşkil etmemektedir. Araç Şekil 4.2’de test edilen küçük görev çevrimlerinde dahi oldukça hızlı hareket ettiği için daha yüksek görev çevrimlerinde sınır anahtarlarını geçerek pist uçlarına çarpmaktadır. Bu nedenle teste devam edebilmek için motor ve pist ayrılarak teste baştan başlanmış, daha yüksek görev çevrimleri de test edilmiştir. Bu testte motor sürtünmesiz ve ideal bir piste bağlıymışçasına, varsayımsal araç hızları ölçülmüştür. Sonuçlar Çizelge 4.3’teki gibidir.

Çizelge 4.3 Motor pistten ayrı iken farklı görev çevrimlerindeki varsayımsal araç hızları

GÖREV ÇEVİRİMİ (%)	ARAÇ HIZI (cm/s)
0,2	3,3
0,4	6,9
0,8	11,7
1,6	20,5
3,2	38,6
6,4	71,6
12,8	123,2
25,6	210,4
51,2	371,8

Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 incelendiğinde, motor piste bağlı ve pistten ayrı iken test edilen ilk beş görev çevrimindeki hızların eşit olduğu görülmektedir. Bu durumda pistteki sürtünme kuvvetlerinin motor hızına etkisi ihmal edilebilecek seviyededir. Çizelge 4.3'teki sonuçların tamamı incelendiğinde, görev çevrimi her seferinde iki katına çıkarılırken, motor hızının ortalama 1,75 katına çıktığı görülmektedir. Özellikle yüksek görev çevrimlerinde kayıplar hissedilir ölçüde artsa da sistemin denetiminde araç hiçbir zaman bu hızlara çıkmayacaktır. Daha düşük görev çevrimlerinde görece düşük olan kazanç ve kayıpların denetime etkisinin de düşük olduğu düşünülmektedir.

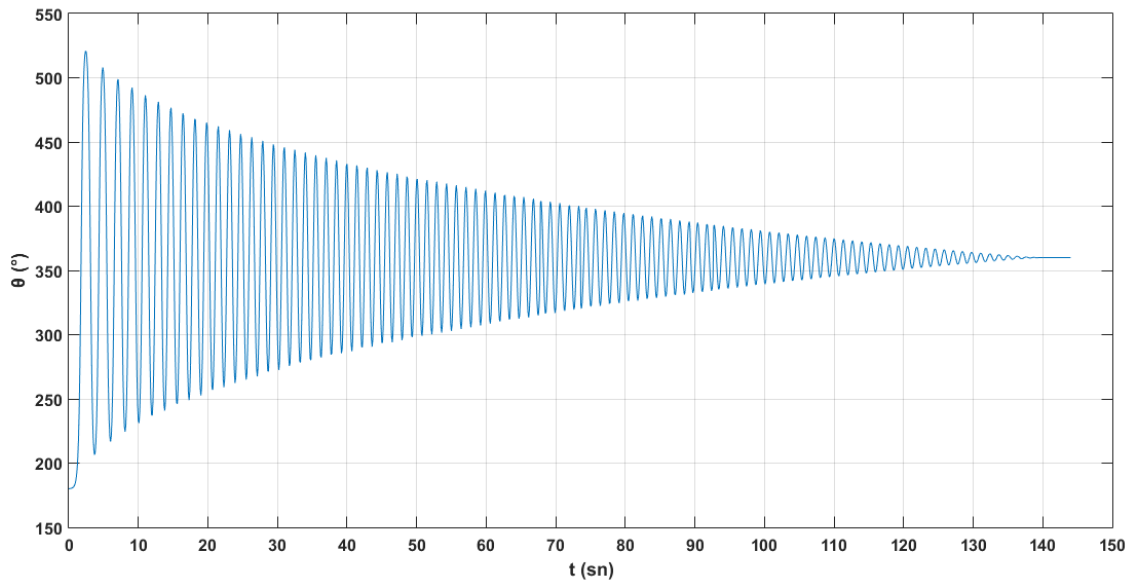


5 TERS SARKAÇ SİSTEMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

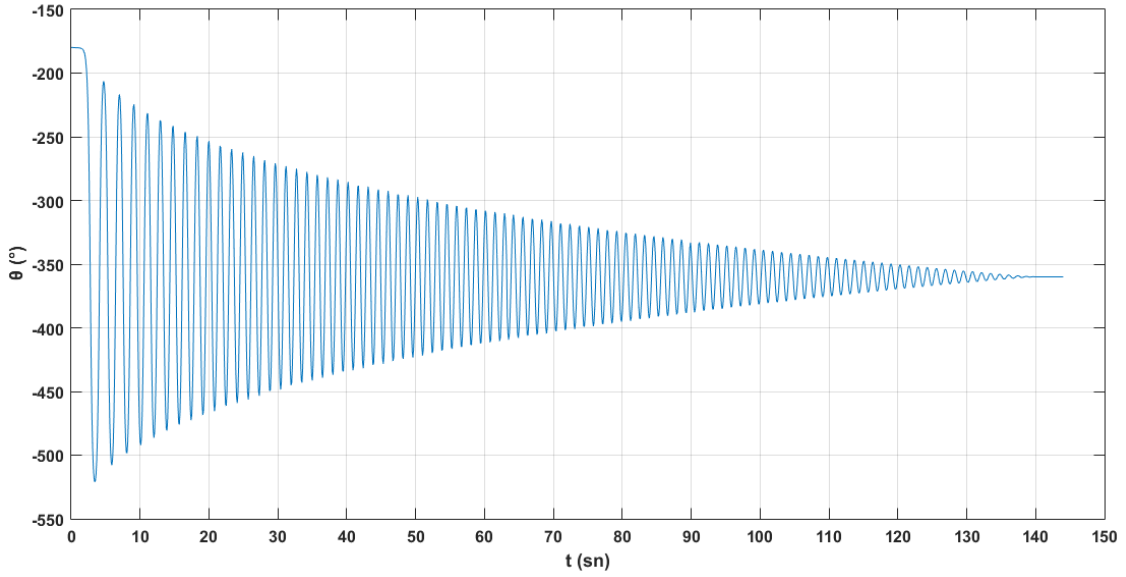
Ters sarkaç sisteminin denetimine geçilmeden önce, sistemin bazı davranış ve dinamikleri deneysel olarak incelenmiştir. Sistemi denetleyen TMDSDOCK28335 kartının programlanmasında kullanılan Code Composer Studio derleyicisi sistemin giriş ve çıkışlarını, değişkenlerin ve kaydedicilerin anlık değerlerini gerçek zamanlı olarak izlemeye ve kaydetmeye imkân tanımaktadır. Yapılan deneyler için test kodları yazılmış ve ölçümü yapılan değerlerden alınan örnekler tanımlanan bir diziye kaydedilmiştir. Her bir deneyin sonunda kaydedilen dizilerin içeriği MATLAB programına kopyalanarak gerekli grafikler elde edilmiş, karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır (Gün, 2007).

5.1 Sarkacın Serbest Düşme Hareketi

Yukarı denge noktasından serbest düşmeye bırakılan sarkaç aşağı denge noktasında durana kadar geçen zaman ve yaptığı salınımlar incelenmiştir. Sistem başlangıcında aşağı denge noktasında olan sarkaç önce pozitif, sonra negatif yönde yukarı denge noktasına el ile kaldırılmış, sonra küçük kuvvetlerle dengesi bozularak düşmesi sağlanmıştır. Sarkacın serbest düşme sırasında yaptığı salınımlar pozitif yönde Şekil 5.1’de, negatif yönde ise Şekil 5.2’deki gibidir.



Şekil 5.1 Pozitif yönde serbest düşen sarkacın salınımları

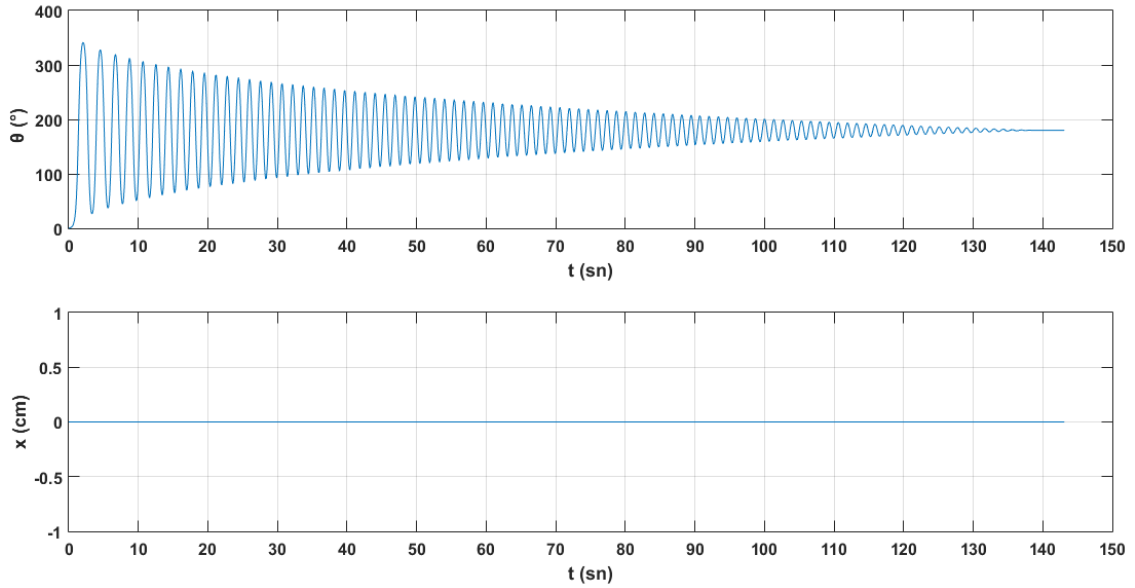


Şekil 5.2 Negatif yönde serbest düşen sarkacın salınımları

Sarkacın her iki yönde de serbest düşme grafikleri incelendiğinde çok benzer sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir. Pozitif yönde aşağı denge noktası 360° , negatif yönde -360° olan sarkaç her iki deneyde de yaklaşık 140 saniyede dengeye gelmiştir. Sarkacın enerjisini zamanla kaybederek aşağı denge noktasında durmasını sağlayan kuvvetler yerçekimi ve sürtünme kuvvetleridir. Yerçekimi yukarı denge noktasındaki sarkaca potansiyel enerji, serbest düşme sırasında ise kinetik enerji kazandırırken, sarkaç enkoderinin milindeki sürtünme ve hava direnci sarkacın enerjisini zamanla sönmleyen kuvvetlerdir.

5.2 Sarkaç Salınımının Araç Konumuna Etkisi

Araç hareketinin sarkaç açısına olan doğrudan etkisi kadar olmasa da, sarkaç da salınımları sırasında araca belli ölçüde kuvvet uygulamaktadır. Sarkaç salınımına karşılık araç konumundaki değişikliği gözlemleyebilmek için sarkaç yukarı denge noktasına el ile çıkarılıp dengelendikten sonra sistem başlatılmış, sonrasında sarkaç küçük bir kuvvetle serbest düşmeye bırakılmıştır. Sarkaç salınımları sırasında hem sarkaç açısı, hem de araç konumundan örnekler alınarak grafikleri elde edilmiştir. Şekil 5.3'te sarkacın aşağı denge noktasında durana kadar olan salınımları ve sarkaç salınımları sırasındaki araç konumu görülmektedir.



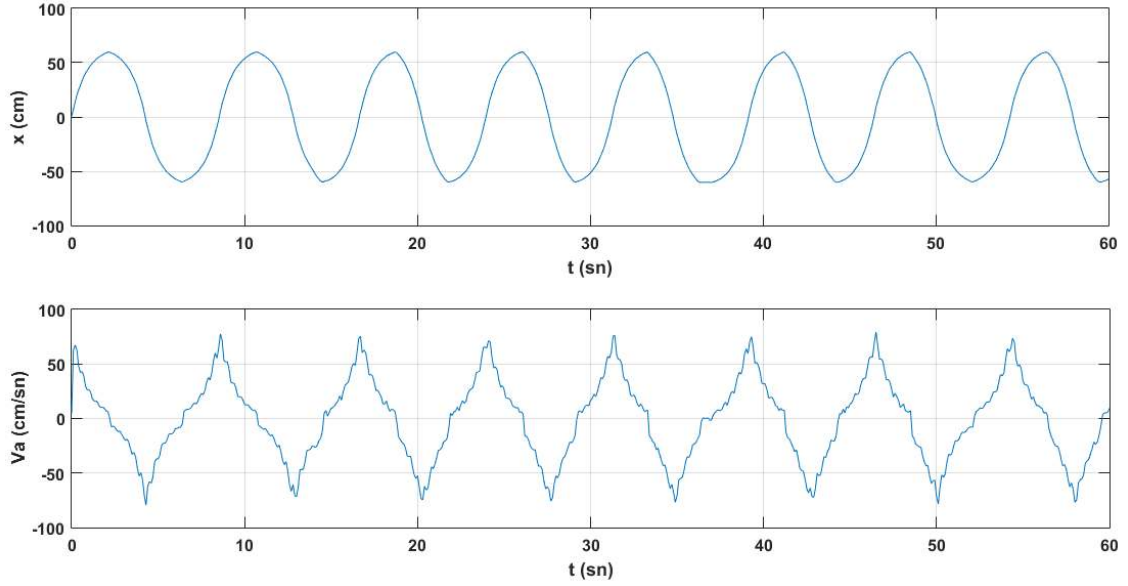
Şekil 5.3 Sarkaç salınımları ve araç konumu

Şekil 5.3'e göre, aracın konumu sarkaç salınımlarından etkilenmemektedir. Araç ile pist arasındaki, piste bağlı motorun milindeki, kayış ve kasnaklardaki toplam sürtünme kuvveti, sarkacın araca uyguladığı kuvvete karşı gelerek aracı yerinde tutacak kadar fazladır. Buna göre, denetim sırasındaki sarkaç hareketlerinin araç konumu üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı sonucu çıkarılabilir.

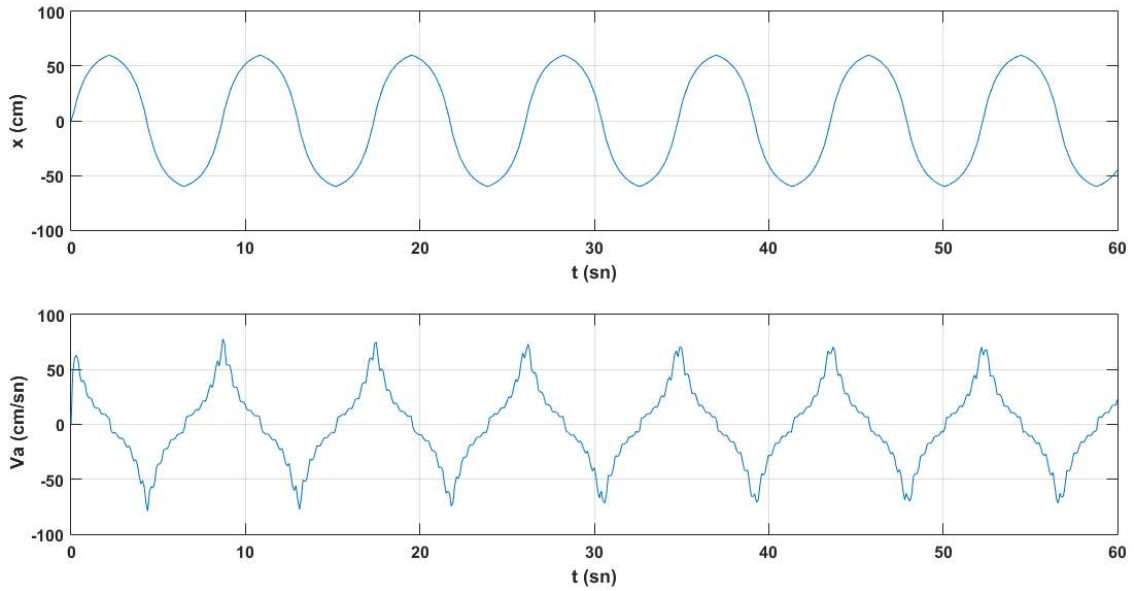
5.3 Pistteki Sürtünme Kuvvetinin Araç Hızına Etkisi

Motorun bağlı olduğu pistte oluşan başlıca sürtünme kuvveti araç ile pist arasındaki sürtünme iken, toplam sürtünme kuvvetine kayış ile pist arasındaki, pist uçlarındaki kasnaklar ile kayış arasındaki ve pist ile kasnaklar arasındaki sürtünmeler de eklenmektedir. Şekil 5.3'te aracı yerinde tutan kuvvet, bu sürtünmelerdir. Pistteki toplam sürtünmenin motor hızına olan etkisini gözlemlemek amacıyla aracı pistin 120 cm'lik bir bölümünde sağa ve sola farklı hızlarla hareket ettiren bir test kodu yazılmıştır. Koda göre başlangıç konumu 0 cm olan araç [-60 cm , 60 cm] aralığında her iki yönde de hareket ederken, başlangıç konumundan uzaklaştıkça yavaşlamakta, başlangıç konumundan geçerken ise maksimum hıza sahip olmaktadır. Pist sürtünmesinin araç hızına etkisini gözlemleyebilmek için öncelikle motor ile pist arasındaki bağlantı kesilmiş, hız testi pistten bağımsız olarak yapılmıştır. Test sırasında motorun sürtünmesiz ve ideal bir piste bağlı olduğu varsayılarak 1 dakika boyunca varsayımsal aracın konum ve hızından örnekler alınmıştır. Daha sonra motor ile pistin bağlantısı yapılarak deney tekrarlanmış ve her iki deneyde

de alınan örneklerin grafikleri elde edilmiştir. Aracın konum ve hız grafikleri motor pistten ayrı iken Şekil 5.4'te, motor piste bağlı iken ise Şekil 5.5'teki gibidir.



Şekil 5.4 Motor pistten ayrı iken varsayımsal araç konumu ve hızı



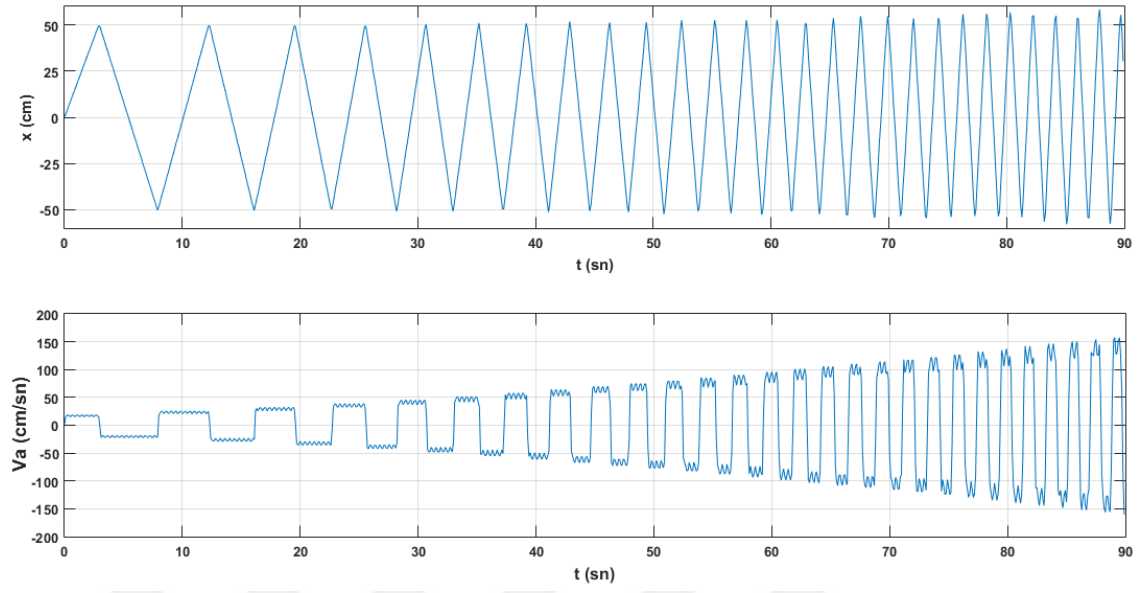
Şekil 5.5 Motor piste bağlı iken araç konumu ve hızı

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te pistteki sürtünmenin motor hızına etkisi ilk bakışta fark edilmese de, dikkatle karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir. Aracın [-60 cm , 60 cm] aralığındaki konum grafiklerinde iki tepe arası bir periyot kabul edilirse, motor piste bağlı iken, bir dakikada yaklaşık bir periyot, yani 2,4 metre daha az hareket etmiştir. Bu kayıp motor pistten ayrı iken aracın aldığı toplam yolun yaklaşık %13'üne tekabül etmektedir. Hız grafiklerinde ise motor pistten ayrı iken eğim yüksek, piste bağlı iken düşüktür. Bu bilgiler doğrultusunda, pistteki sürtünmenin motorun ivmelenmesine, dolayısıyla aracın birim zamanda aldığı toplam yola doğrudan etkisi olsa da, bu etkinin kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir. Motorun momenti, pistteki sürtünmenin denetim üzerindeki olumsuz etkilerini büyük oranda azaltacak kadar yüksektir.

5.4 Motor Ataleti

Bir ters sarkaç sisteminin denetiminde kullanılan motorun, denetim sırasındaki komutlara hızlı tepki verebilmesi, yani aracın yapması gereken ani yön değişimlerini kayıpsız sağlayabilirken, momentinin de yüksek olması beklenir. Yüksek çıkış momentine rağmen düşük atalet momentine sahip olmalarıyla bilinen DC servo motorlar, ters sarkaç denetiminde kullanılmak için uygun bir seçimdir. Çalışmada kullanılan üç fazlı DC servo motorun eylemsizliğini gözlemlemek amacıyla bir test programı yazılmıştır. Yazılan koda göre, araç [-50 cm , 50 cm] aralığında hareket etmekte, sınırlardan birine ulaştığında yön değiştirerek diğer sınıra doğru gitmektedir. Test boyunca her yön değişiminde motorun hızı kademeli olarak artırılmakta, bu sırada da aracın konum ve hız bilgisinden örnekler alınmaktadır. 90 saniye boyunca alınan örnekler ile elde edilen araç konum ve hız grafikleri Şekil 5.6'daki gibidir.

Aracın sınırlara düşük hızlarla ulaşmasında dahi mikron düzeyinde aşma meydana geldiği bilinen bir gerçektir. Bu aşımalar ya enkoder hassasiyetinin işaret göndermeye yetmeyeceği kadar küçük olmakta, ya da örnekleme periyodunun yetersiz kalacağı bir zaman diliminde gerçekleşmektedir. Alınan örnekler ve Şekil 5.6 incelendiğinde, gözle görülür ilk aşımın yaklaşık 28. saniyede ortalama 0,4 m/sn hızla gerçekleştiği görülmektedir. Milimetrik seviyede olan bu aşımdan itibaren hızın kademeli olarak artmasıyla gözle görülür aşımalar da kademeli olarak artmıştır. Testin sonlarına doğru araç hızı saniyede 1,5 metreye ulaşmış, bu anlarda 8 cm'lik aşımalar gözlemlenmiştir. Fakat denetim sırasında çok büyük bir bozucu etki olmadığı sürece araç bu hızlara çıkmayacağı için, testin genelinde gözlemlenen aşımalar kabul edilebilir düzeydedir.



Şekil 5.6 Motorun eylemsizlik testinde ölçülen araç konum ve hızları

6 TERS SARKAÇ SİSTEMİNİN DENETİMİ

Önceki bölümlerde mekanik ve elektronik donanımından, donanımlar arası bağlantılarından, denetim giriş ve çıkışlarının üretilmesi ve okunmasından bahsedilen ters sarkaç sisteminin tüm işleyişi, sistemin başlatıldığı ilk andan denetimin son aşamasına kadar bu bölümde tanıtılmıştır. Sarkacın aşağı denge konumundan yukarı denge konumuna çıkarılarak bu konumda tutulmasına kadar olan tüm süreçler alt başlıklar altında anlatılmış, gerekli ölçümler alınarak bu başlıklarda incelenmiş ve her bir sürecin algoritması akış şemaları ile birlikte verilmiştir.

Sistemin denetimini gerçekleştiren TMS320F28335 sayısal işaret işleyicisinin programlanmasında Code Composer Studio derleyicisi kullanılmaktadır. Sistemin başlangıcından itibaren birbirinden bağımsız çalışması gereken, sadece belli şartların gerçekleşmesi halinde bir diğerine geçiş yapılan süreçlere proses denilmiş, bu prosesler derleyicide bir if-else if kod yapısı içerisinde programlanmıştır. Öyle ki, bir prosesin çalışmaya başlaması, bir önceki proses içerisinde bulunan şartın sağlanmasına bağlıdır. Her bir proses içerisinde bu şart sürekli kontrol edilmekte, şart sağlandığı anda bir sonraki prosese geçilmektedir. Bu prosesler bölüme ait alt başlıklarda tanıtılan süreçler olup, işleyişleri ve geçiş şartları bu başlıklarda detaylıca anlatılmıştır.

6.1 Enkoder Referanslarının Ayarlanması

Ters sarkaç sistem denetiminin çıkışları olan sarkaç açısı ve araç konumunu ölçen artımsal enkoderler sistem başlatıldığı anda hangi pozisyonda ise, eQEP1 ve eQEP2 modüllerindeki QPOSCNT kaydedicileri sayma işlemine o pozisyondan başlamaktadır. Dolayısıyla sarkaç açısı ve araç konumunun doğru değerlerinin yazılımsal olarak ayarlanabilmesi için, referans noktalarına ihtiyaç vardır. Bu referanslar sarkaç ve araç için ayrı ayrı elde edilmekte olup, hangi noktaların referans alınarak ne şekilde elde edildikleri program algoritmalarıyla birlikte anlatılmıştır.

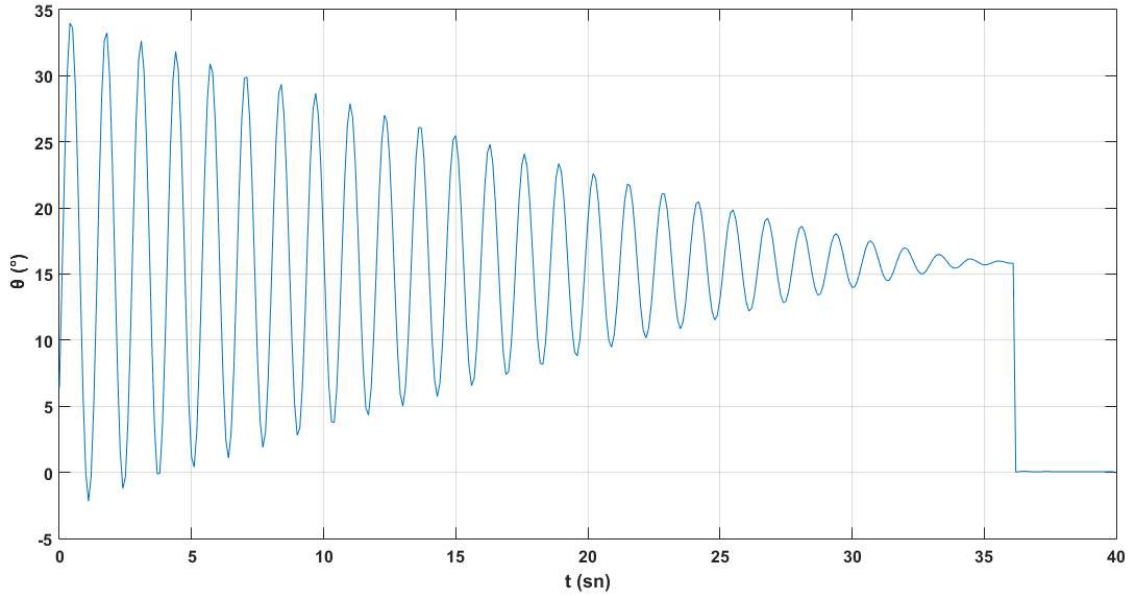
6.1.1 Sarkaç enkoder referansının ayarlanması

Sistemde açılı denetimi yapılan sarkaç için referans olarak yer çekimi yönü, yani sarkacın aşağı denge noktası seçilmiştir. Yani sarkaç sistem başlatılmadan önce farklı yönde bir kuvvete maruz kalmamış ise zaten aşağı denge konumunda olacak, sistem başlatıldığı andan itibaren açılı ölçümü doğru bir şekilde yapılacaktır. Fakat sarkaç sistem başlatıldığı anda salınım halinde ise, enkoder işaretlerinin sayılmaya başladığı anda salınım yaptığı aralıktaki herhangi bir noktadan geçiyor olabilir. Bu durum yerçekimi yönünde olması gereken sarkaç referansının kaymasına, dolayısıyla da açılı bilgisinin yanlış ölçülmesine neden olmaktadır. Sistemin sarkaç salınım halinde

iken de doğru şekilde başlatılabilmesi için başlangıç anında sarkacın hareket halinde olup olmadığı yazılımsal olarak tespit edilmelidir.

Sarkacın başlangıç anında aşağı denge noktasında veya salınım halinde olma durumlarının ayırt edilebilmesi için değişim faktöründen yararlanılmıştır. Aşağı denge konumunda sarkacın açı bilgisi sabit ve sıfır iken salınım yapmakta olan sarkacın enkoderi bir işaret dizisi göndermekte, açı bilgisi bu işaretlere bağlı olarak zamanla değişmektedir. Açı bilgisi zamanla değişen sarkacın hızı sıfırdan farklı olacağından, sarkaç enkoderinin referans ayarlamasında bu farktan yararlanılmıştır. Sistemin başlangıç anı için tanımlanan bir P0 prosesinde sadece sarkaç hızı kontrol edilmekte, başka hiçbir işlem yapılmamaktadır. Bir sonraki prosese geçiş koşulu sarkaç hızının sıfır olmasıdır. Başlangıç anında aşağı denge konumunda olan sarkacın hızı sıfır olacağı için doğrudan bir sonraki prosese geçilmektedir. Aşağı denge konumunda olmayan sarkaç ise fizik kuralları gereği salınım yapmakta olup, hızı sıfırdan farklıdır. Bu durumda P0 prosesi çalışarak sarkaç hızının sıfır olmasını beklemektedir. Salınım yapan bir sarkacın enerjisi sürtünmelerin etkisi ile zamanla sönümlendiğinden er ya da geç aşağı denge konumunda durmakta, böylece hızı 0 cm/sn olmaktadır. P0 prosesinden çıkma koşulu sağlandığı anda sarkaca ait QPOSCNT kaydedicisinin içeriği sıfırlanarak bir sonraki prosese geçilmektedir. Böylece sarkacın referans noktası olan yerçekimi yönündeki açı bilgisinin 0° olması sağlanarak izleyen proseslerdeki açı ölçümü doğru şekilde yapılmaktadır.

Şekil 6.1’de verilen grafikte sarkaç salınım yapmakta iken başlatılan sistemde açı referansının düzeltilmesi görülmektedir. Sarkacın aşağı denge durumu el ile bozularak salınım yapması sağlanmış, hemen sonrasında da sistem başlatılarak sarkaç açısından örnekler alınmıştır. Şekil 6.1’e göre sarkacın aşağı denge konumundaki açısı saat yönünde yaklaşık 16° kaymıştır. Sarkaç yaklaşık 36. saniyede aşağı denge noktasında durduğunda açı bilgisi sıfırlanmış ve P0 prosesi sona ermiştir.



Şekil 6.1 Sistem başlangıcında salınım yapmakta olan sarkacın açı referansının düzeltilmesi

6.1.2 Araç enkoder referansının ayarlanması

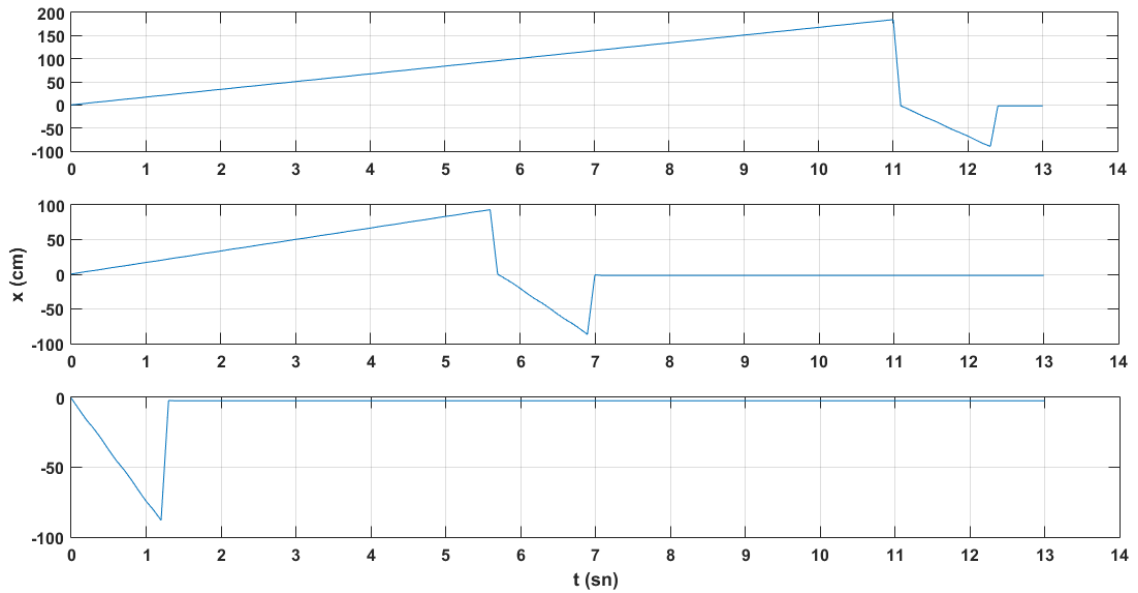
2 metre uzunluğundaki pist üzerinde konum denetimi gerçekleştirilen araca referans olarak pistin orta noktası seçilmiştir. Araç konum bilgisinin pist ortasında 0 cm, pistin sağ yarısında [0 cm , 93 cm], sol yarısında ise [-93 cm , 0 cm] aralığında olması araç konumunun daha anlaşılır olmasını sağlarken, denetimini de kolaylaştıracaktır. Fakat tıpkı sarkaçta olduğu gibi, motor enkoderinin işaretleri de sistemin başlangıç anından itibaren sayılmaya başlamakta, bu nedenle sistem araç pistin tam ortasında iken başlatılmadığı sürece araç konum referansında kayma oluşmaktadır. Araç sistem başlangıcında pistin neresinde ise konum bilgisi o noktada 0 cm olmakta ve bu konum yazılımsal olarak tespit edilememektedir.

Aracın her sistem başlangıcından önce pistin ortasına elle götürülmesi yerine, sistem başlatıldığı anda nerede olursa olsun hem pistin ortasına gitmesi, hem de bu noktadaki konumunun 0 cm olması istenmektedir. Bunun sağlanabilmesi için araç pist üzerindeki bir noktada olduğunda denetleyiciye işaret gönderen mekanik bir anahtar yeterlidir. Sistem başlangıcında araç bu anahtarı arayacak, bulduğu anda ise konumu belli olacaktır. Bu anahtar mutlaka pist sınırlarından birinde olmalıdır. Böylece araç arama işini sadece tek yönde yaparak o noktaya kesinlikle ulaşacaktır.

Aracın pist üzerindeki konumunu algılayarak denetleyiciye işaret gönderme fonksiyonu motor tarafındaki sınır anahtarına verilmiştir. Sarkacın açı referansının elde edildiği P0 prosesini izleyen P1 prosesinde araç sadece sağ yönde ilerlemektedir. Aracın sağ yönde hareketi için motor

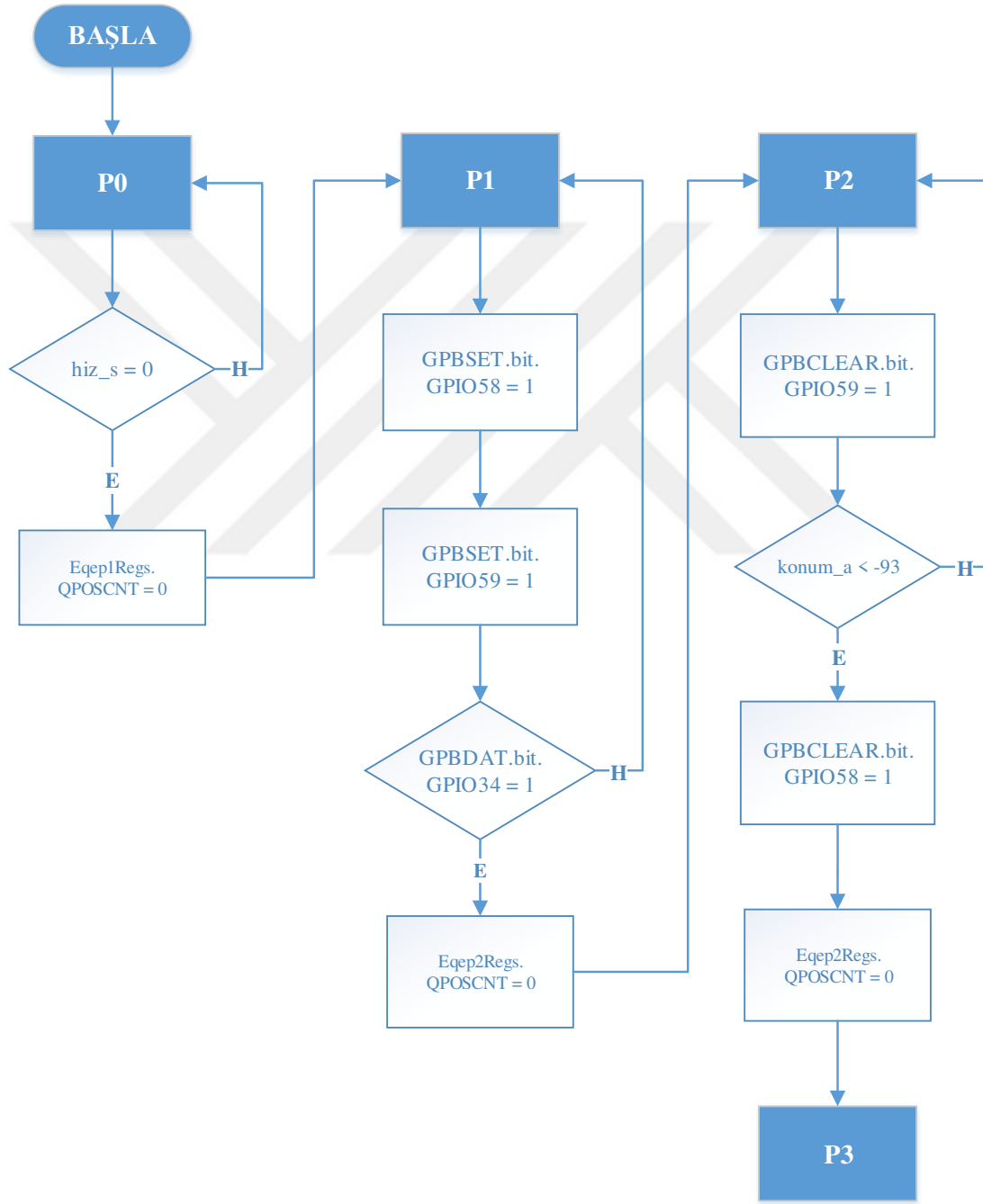
yönünü belirleyen GPIO59 biti 1 yapılmakta ve proses boyunca 1 olarak kalmaktadır. P1 prosesinden çıkma koşulu motor tarafındaki sınır anahtarının kapanarak GPIO34 bitinin 1 olmasıdır. Bu koşul sağlandığı anda aracın pist üzerindeki konumu artık bilinmekte olup, P2 prosesine geçilmeden önce motor enkoder işaretlerini sayan QPOSCNT kaydedicisi sıfırlanmaktadır. Bu aşamada araç 0 cm konum bilgisi ile pistin en sağındadır.

Sınır anahtarını arayan P1 prosesinin bitmesiyle başlayan ve görevi aracı pistin ortasına getirmek olan P2 prosesinde GPIO59 biti 0 yapılarak motorun saat yönünün tersinde dönmesi, yani aracın sol yönde ilerlemesi sağlanmaktadır. 2 metre uzunluğundaki pistin uçlarına sınır anahtarlarının bağlanmasıyla aracın bir sınır anahtarından diğerine kadar aldığı yol 186 cm olarak ölçülmüştür. Bu durumda bir sınır anahtarından başlayarak diğerine doğru 93 cm yol alan araç, pistin orta noktasına gelecektir. Bu nedenle aracı motor tarafındaki sınır anahtarından pistin ortasına götüren P2 prosesinden çıkma şartı, araç konum bilgisinin -93 cm'den küçük olmasıdır. Bu şart sağlandığı anda bir sonraki prosese geçilmeden önce QPOSCNT kaydedicisinin içeriği tekrar sıfırlanmakta, böylece araç istenildiği gibi pistin ortasında, konum bilgisi de 0 cm olmaktadır. Şekil 6.2'de sistem başlatıldığı anda sırası ile pistin en solunda, ortasında ve en sağında bulunan araçların P1 ve P2 prosesleri boyunca ölçülen konum grafikleri görülmektedir.



Şekil 6.2 Konum referanslarının ayarlanması sırasındaki araç konum grafikleri

Sistemin başlangıcından P2 prosesinin sonuna kadar sadece sarkaç açısı ve araç konumunun referans noktaları ayarlanmakta olup, bu bölümün akış diyagramı Şekil 6.3'teki gibidir. P2 prosesinin sonunda sarkaç 0° açısı bilgisiyle aşağı denge noktasında, araç ise 0 cm konum bilgisiyle pistin ortasındadır.

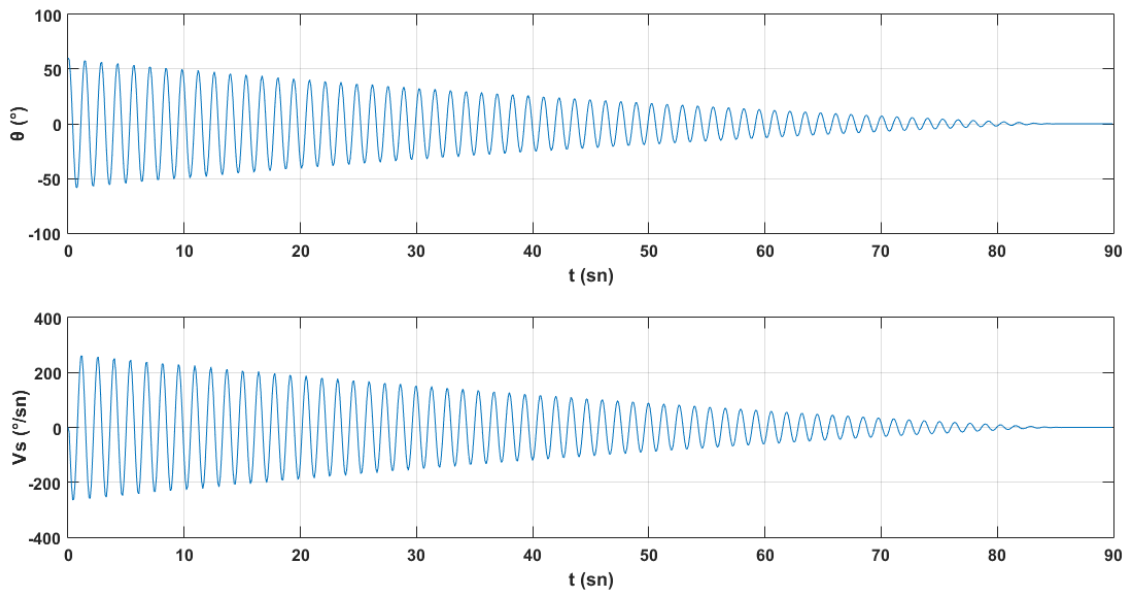


Şekil 6.3 Sistemin P2 prosesinin sonuna kadar olan akış diyagramı

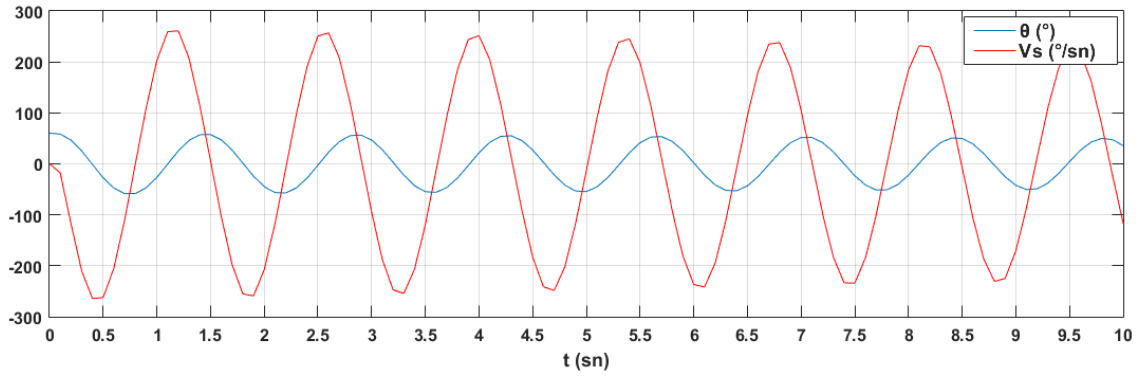
6.2 Sarkacın Yukarı Denge Noktasına Kaldırılması

Sarkaç açısı ve araç konumu için referansları ayarlanan ters sarkaç sisteminde, araç pist ortasına getirilse dahi, sarkaç halen yerçekimi yönünde olan aşağı denge konumundadır. Sarkacın yukarı denge konumundaki açı denetiminin yapılabilmesi için öncelikle yerçekimine ters yöndeki bu noktaya kaldırılması gerekmektedir. Aşağı denge konumunda potansiyel enerjisi sıfır olan sarkacı potansiyel enerjisinin maksimum olacağı yukarı denge konumuna elle taşımak yerine, araç hareketleriyle salınım yaptırılarak ve her bir salınımda biraz daha enerji kazandırılarak kaldırılması amaçlanmıştır.

Sarkaca salınım yaptırmak ve her salınımda biraz daha yükseklik kazandırarak tepe noktasına ulaştırmak, araç hareketleriyle mümkün olmaktadır. Fakat araç doğrusal, sarkaç ise açısal hareket yapmakta olduğu için, aracın doğrusal hızının sarkaca maksimum açısal hızı kazandıracağı yöntem belirlenmelidir. Araçtan sarkaca enerji transferinin yapılacağı açı bölgelerinin tespiti için, sarkacın doğal salınımindaki hızları incelenmiştir. Yaklaşık 60°'den serbest düşmeye bırakılan sarkacın aşağı denge konumunda durana kadar yaptığı salınımlar ve sarkacın bu salınımlar sırasındaki hızı Şekil 6.4'teki gibidir. Şekle göre sarkacın her bir salınımda taradığı alan azaldıkça hızı da azalmaktadır. Sarkacın hangi açıda hangi hıza sahip olduğunu görebilmek için 10. Saniyeye kadar olan açı ve hız örneklerinin grafiği aynı eksenle çizdirilerek Şekil 6.5'te verilmiştir.

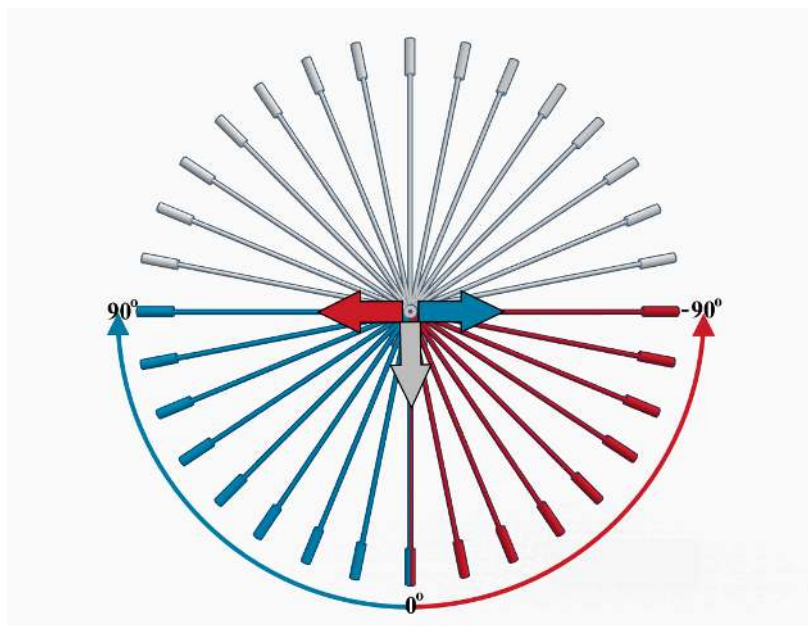


Şekil 6.4 Serbest düşme sırasındaki sarkaç açı ve hızları



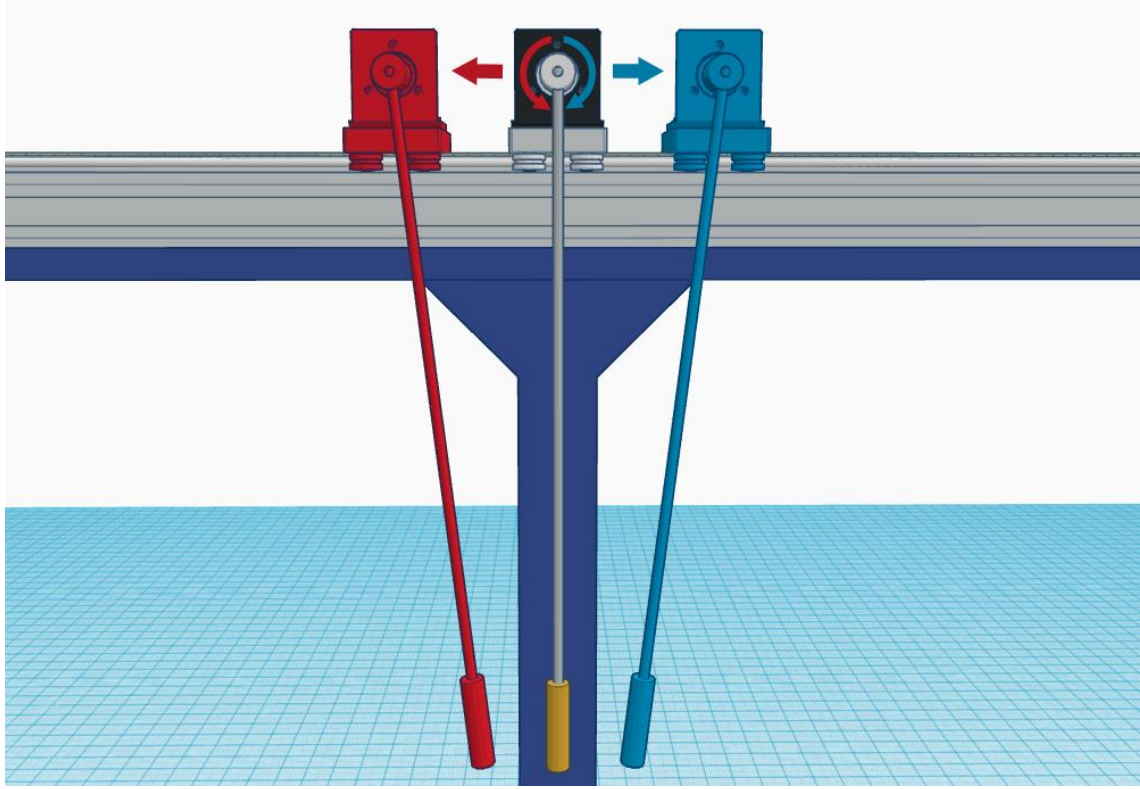
Şekil 6.5 Serbest düşme sırasında 0-10 sn. arasındaki sarkaç açısı ve hızları

Şekil 6.5 incelendiğinde sarkacın açısı ve hız grafikleri arasında 90° faz farkı olduğu görülmektedir. Yani salınım sırasında sarkaç açısının maksimuma ulaştığı anlarda hızı sıfır iken, açısının minimum olduğu anlarda da hızı maksimuma ulaşmaktadır. Bu durumda sarkaç her salınımında aşağı denge noktasına hızlanarak gelmekte, bu noktadan maksimum hızla geçtikten sonra diğer yönde yavaşlayarak durmaktadır. Sarkaca her bir salınımında biraz daha fazla yükseklik kazandıracak olan aracın, her iki yöndeki hareketine de sarkaç aşağı denge noktasından geçerken başlaması isabetli olacaktır. Araç hareketinin duracağı sarkaç açıları ise sarkacın yere paralel olduğu 90° ve -90° olarak seçildiğinde, aracın düşük hız ve yer değiştirmeyeyle dahi sarkaca yükseklik kazandırabildiği görülmüştür. Şekil 6.6'da sarkacın salınım yönü ve açı aralıklarına karşılık aracın hareket yönleri görülmektedir.



Şekil 6.6 Sarkaç yukarı denge noktasına kaldırılırken açı bölgelerine göre araç yönleri

Sarkacın aşağı denge noktasından geçiş yönüne göre aracın pist üzerindeki hareket yönleri şekil 6.7'deki gibidir.



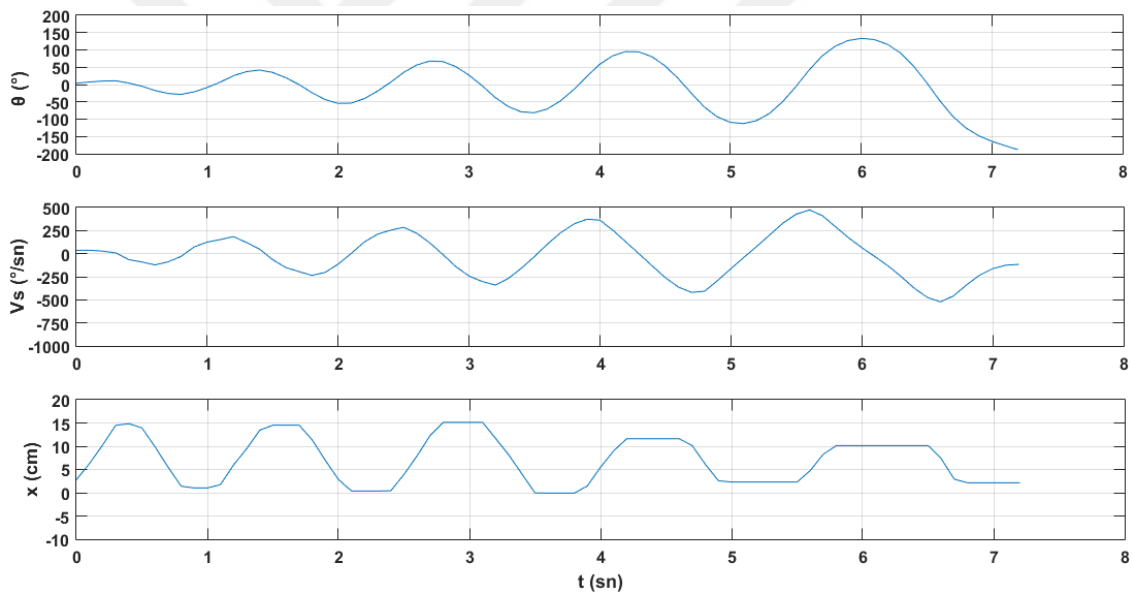
Şekil 6.7 Sarkacın aşağı denge noktasından geçiş yönüne göre aracın hareket yönleri

Sarkaç açısı ve araç konumu için referansların elde edildiği P0, P1 ve P2 proseslerini takip eden P3 prosesinde aşağı denge konumundaki sarkaca araç hareketleriyle kuvvet uygulanarak salınım yaptırılmaktadır. Her salınımda sarkaca biraz daha yükseklik kazandırılarak P3 prosesinin sonunda yukarı denge noktasına ulaşması amaçlanmıştır.

Sarkaca uygulanan kuvvetin yönü, sarkacın salınım yönüne bağlı olup, Şekil 6.6 ve 6.7'deki gibidir. Sarkacın salınım yön bilgisi QEPSTS durum kaydedicisinden alınmaktadır. QEPSTS kaydedicisi içinde enkoder yön bilgisini tutan bit saat yönünde 1 iken, saat yönünün tersinde 0 olmaktadır. Bu bilgi bir değişkene kaydedilerek, bu değişkenin aldığı değer P3 prosesi boyunca sürekli kontrol edilmektedir. Aracın hangi sarkaç salınım yönü için, hangi açı aralıklarında ve hangi yönde kuvvet uygulayacağına P3 içerisinde, bir koşul içerisinde koşul yapısıyla karar verilmektedir. Saat yönünde salınım yapan sarkaca sadece $[0^\circ, 90^\circ]$, saat yönünün tersinde ise sadece $[-90^\circ, 0^\circ]$ açı aralıklarında kuvvet uygulanmaktadır. Yapılan testlerde bu açı aralıklarında gerçekleşen zıt yönlerdeki araç hareketlerinin birbirini dengeleyerek aracı pistin

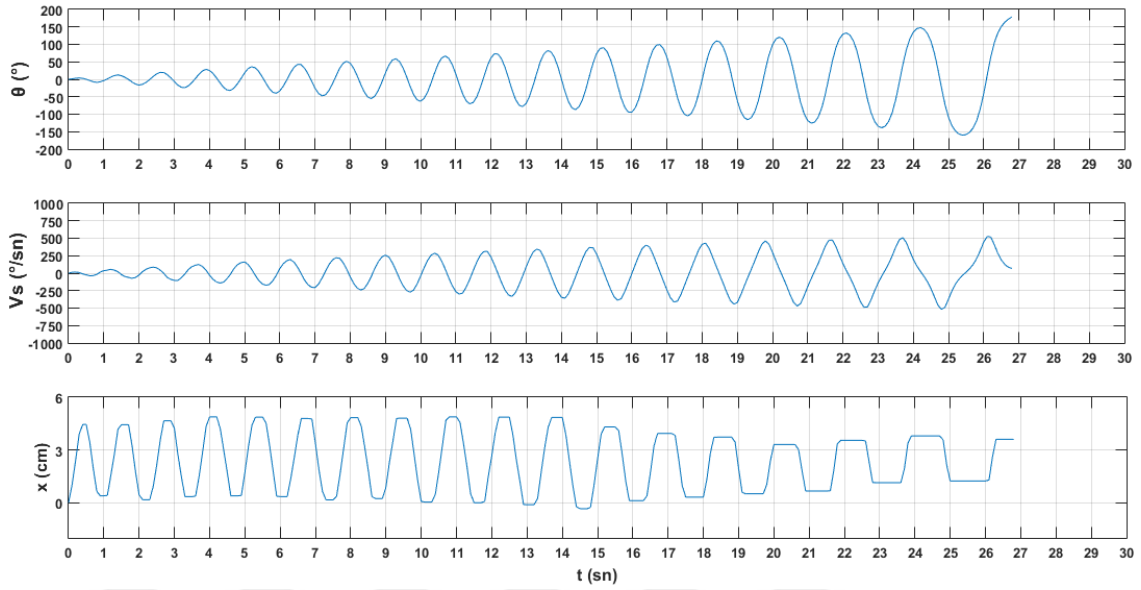
ortasından uzaklaştırmadığı görülmüş, dolayısıyla P3 prosesinde araç konum denetimine ihtiyaç duyulmamıştır.

Aşağı denge noktasındaki sarkacı yukarı denge noktasına kaldırmak birkaç salınımla mümkün olsa da, sarkacın tepe noktaya yüksek hızla ulaşması istenmeyen bir durumdur. Çünkü sarkacın tepe noktaya yaklaştığı anda P3 prosesi sona erecek ve sarkacın yukarı denge konumundaki denetimini yapan P4 prosesi başlayacaktır. Bu geçiş sırasında sarkaç hızının yüksek olması P4 prosesinin sarkacı yakalayarak dengelemesini güçleştirmektedir. Yapılan ilk testlerde sarkacın yukarı denge noktasına en kısa sürede, en az sayıda salınımla kaldırılması amaçlanmış ve büyük ölçüde bu amaca ulaşılmıştır. Şekil 6.8’de %3 PWM görev çevrimi ile yukarı denge noktasına kaldırılan sarkacın sırayla sarkaç açısı, sarkaç hızı ve araç konumu grafikleri görülmektedir.



Şekil 6.8 %3 görev çevrimindeki sarkaç açısı, sarkaç hızı ve araç konumu

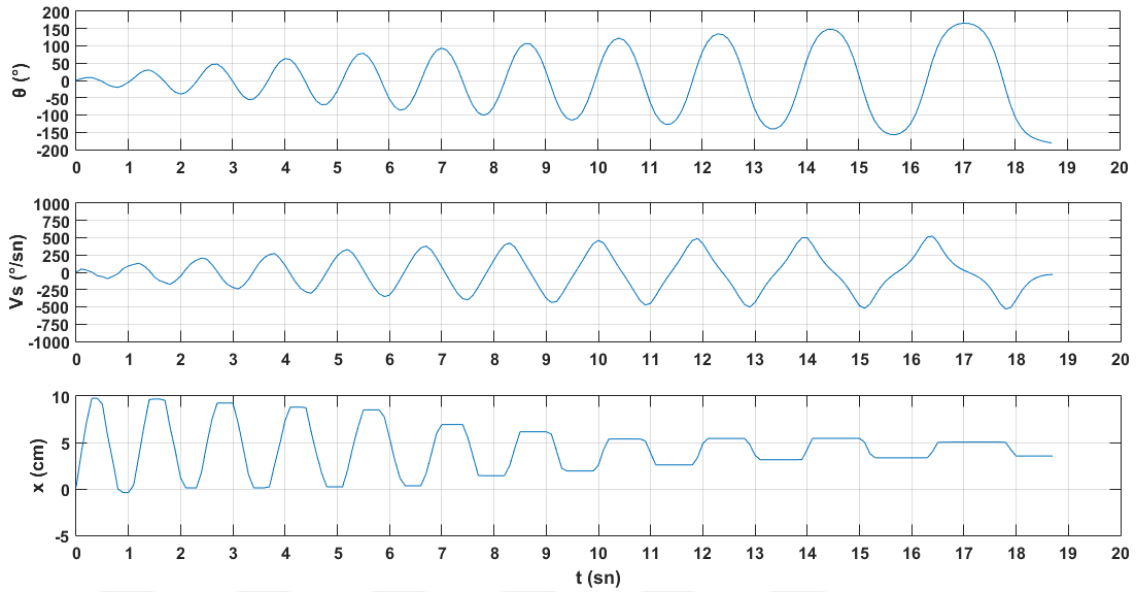
Grafikler incelendiğinde sarkacın %3 gibi düşük bir görev çevriminde dahi 10 salınımla yaklaşık 7 saniyede yukarı denge noktasına ulaştığı görülmektedir. Fakat sarkacın negatif salınım yönünden -180° 'ye ulaştığı andaki hızı yaklaşık olarak $140^\circ/\text{sn}$ 'dir. Yukarı denge noktasına böylesi bir hızla ulaşan sarkacın bir sonraki proses olan P4 tarafından yakalanarak dengelenmesi güçtür. Bu nedenle sistemin P3 prosesinden P4 prosesine zorlanmadan geçebilmesi için sarkacın yukarı denge noktasına yavaş ulaşması gerekmektedir. Aynı test %1 görev çevrimi ile tekrarlandığında Şekil 6.9'daki sonuçlar alınmaktadır.



Şekil 6.9 %1 görev çevrimindeki sarkaç açısı, sarkaç hızı ve araç konumu

Şekil 6.9'a göre sarkacın %1 görev çevrimi ile yukarı denge noktasına kaldırılması 35 salınımla, yaklaşık 27 saniyede gerçekleşmektedir. Sarkacın saat yönünden 180° 'ye ulaştığı andaki hızı ise yaklaşık $65^\circ/\text{sn}$ olarak ölçülmüştür. Bu hız ilk teste kıyasla daha kabul edilebilir olsa da, 27 saniye bu işlem için çok uzun bir süredir. Sarkacın yukarı denge noktasına daha az salınımla, daha kısa sürede, daha düşük bir hızla ulaşması amaçlanmaktadır. Bu amaca yönelik olarak uygulanan yöntemde görev çevrimi sabit olmayıp, sarkacın salınımları boyunca ulaştığı maksimum yüksekliğe bağlıdır.

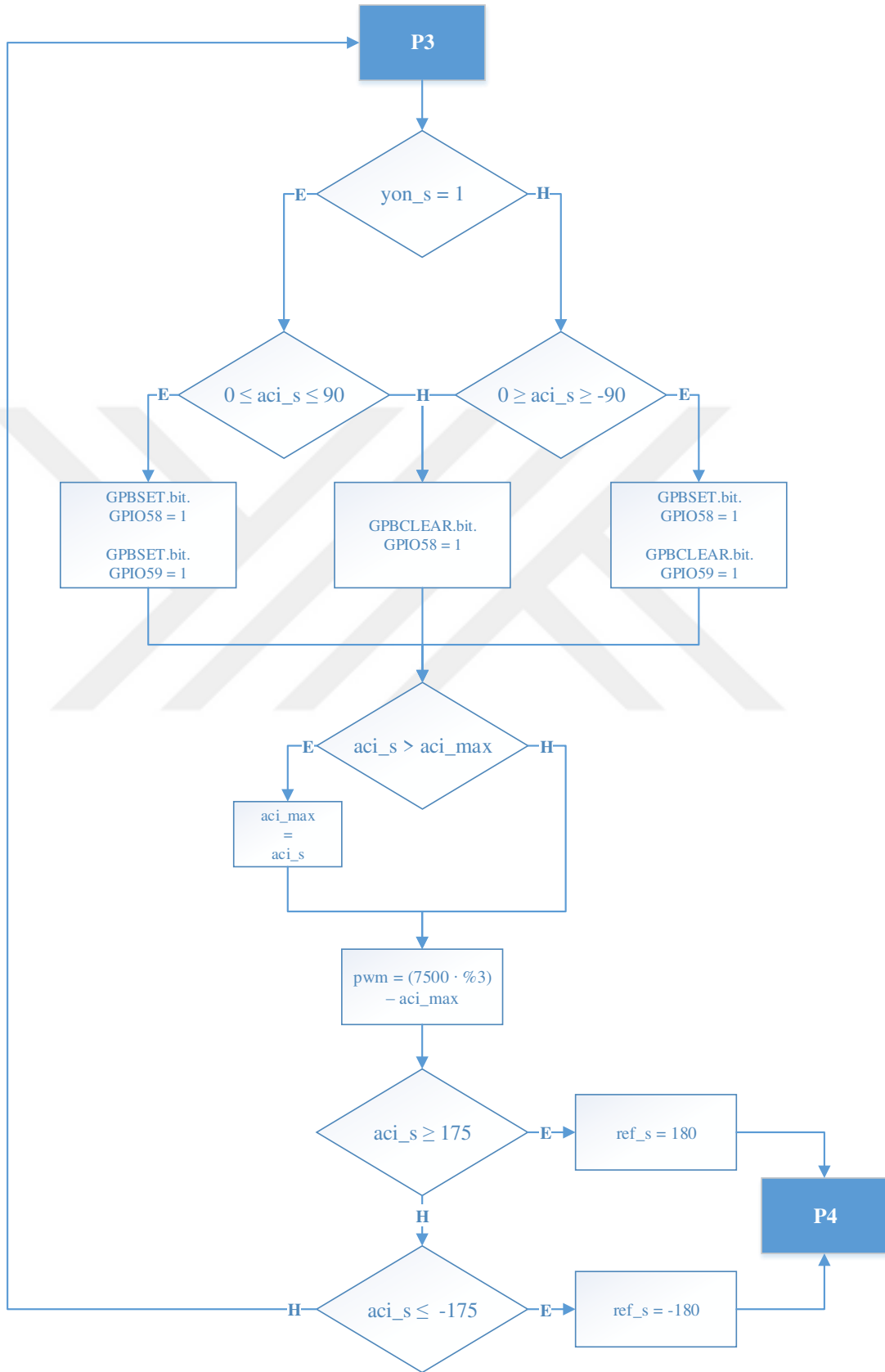
Sarkacı yukarı denge noktasına düşük hızla ve işlem süresinden çok fazla taviz vermeden ulaştırmak için uygulanan yöntemde yaklaşık %3 oranıyla başlatılan görev çevrimi, sarkaç her bir salınımda yükseklik kazanarak yukarı denge noktasına yaklaştıkça azaltılmaktadır. Sarkacın P3 boyunca aldığı açıların mutlak değeri bir değişken ile karşılaştırılmakta, bu değerler değişkenden büyük olduklarında değişken güncellenmektedir. Sarkacın yukarı denge noktasına ne kadar yaklaştığı bilgisini tutan bu değişken arttıkça görev çevrimi azaltılmakta, proses sonunda da %0,5'e kadar düşmektedir. Böylece sarkacın hem küçük salınımlarda vakit kaybetmemesi, hem de yukarı denge noktasına ilk iki teste kıyasla daha düşük bir hızla ulaşması sağlanmıştır. Uygulanan bu yöntemle alınan sonuçlar Şekil 6.10'daki gibidir.



Şekil 6.10 Değişken görev çevrimindeki sarkaç açısı, sarkaç hızı ve araç konumu

Şekil 6.10'a göre, sarkacın yukarı denge noktasına değişken görev çevrimiyle kaldırılması 22 salınımla yaklaşık 19 saniye sürmüştür. Sarkacın saat yönünün tersinden -180° 'ye ulaştığı andaki hızı ise yaklaşık $30^\circ/\text{sn}$ 'dir. Bu hız P3 prosesinden yukarı denge konumundaki denetimin yapılacağı P4 prosesine zorlanmadan geçilebilmesi için oldukça uygundur. P3 prosesinin sona erdiği andaki araç konumu yaklaşık 3,5 cm olup, referans noktasından uzaklığı P4 prosesine geçiş anında güçlük yaratacak seviyede değildir.

Sarkacın aşağı denge konumundan yukarı denge konumuna kaldırıldığı P3 prosesinin akış diyagramı Şekil 6.11'deki gibidir.



Şekil 6.11 P3 prosesinin akış diyagramı

6.3 Sistemin Yukarı Denge Konumundaki Denetimi

Sistemin buraya kadar olan süreçlerinde sırasıyla sarkaç ve araç enkoderleri için referans noktaları elde edildikten sonra aşağı denge konumundaki sarkaç salınım yaptırılarak yukarı denge konumuna kaldırılmaktadır. Bu noktada ters sarkaç sistemindeki asıl denetimin yapıldığı P4 prosesi başlamakta, sarkaç açısı ve araç konumu birlikte denetlenerek sistem kararlı hale getirilmektedir.

Denetimi gerçekleştirilen ters sarkaç sisteminin kararlı hali sarkacın yukarı denge noktasında, aracın ise pist ortasında olmasıdır. Kararlı halde iken sarkaca uygulanan her kuvvet birer bozucu etkidir. Sistemin bu etkilere karşı vereceği tepkilerle hem sarkaç açısında, hem de araç konumunda oluşan hataları düzelterek kararlı hale geri dönebilmesi amaçlanmıştır. Sistemin denetimi PID denetleyici ile yapılmakta olup, denetleyicinin terimleri alt başlıklarda açıklanmış, nasıl hesaplandıkları ve ne şekilde sayısal ortama aktarıldıkları anlatılmıştır. Denetim testlerinden alınan ölçüm grafikleri sunularak incelenmiş, gerekli açıklamalar yapılmıştır.

6.3.1 Sarkaç ve araç hatalarının hesaplanması

P3 prosesi boyunca her salınımında yukarı denge noktasına biraz daha yaklaşan sarkacın bu noktaya ulaştığı son salınım saat yönünde veya saat yönünün tersinde olabilmektedir. Bu durumda aşağı denge konumundaki açısı 0° olan sarkaç yukarı denge konumuna saat yönünde ulaşırsa 180° , saat yönünün tersinde ulaşırsa -180° açısına sahip olmaktadır. Sarkacın yukarı denge noktasındaki denetimi için referans alınacak olan açı da sarkacın bu noktaya hangi yönden ulaştığına göre belirlenmektedir. Şekil 6.11'deki akış diyagramında görüldüğü gibi, P3 prosesinden P4 prosesine geçiş şartı, sarkacın yukarı denge noktasına en az 175° yaklaşmasıdır. Sarkaç saat yönünden 175° 'ye veya saat yönünün tersinden -175° 'ye ulaştığı anda P4 prosesine geçiş şartı sağlanmakta, yukarı denge konumundaki açı referansı kaydedildikten sonra sarkaç yakalanarak dengeye getirilmektedir. 180° veya -180° olarak kaydedilen referanslar sarkacın açı denetimindeki hedeflerdir. Yani sarkaç açısının herhangi bir anda sahip olduğu hata, sarkacın o andaki açısının bu hedeflerden uzaklığı kadardır. Bu durumda sarkaç hatası (E_s) sarkaç yukarı denge noktasına saat yönünde ulaşmış ise eşitlik (4)'teki gibi, saat yönünün tersinde ulaşmış ise eşitlik (5)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_s = \theta - 180 \quad (4)$$

$$E_s = \theta - (-180) \quad (5)$$

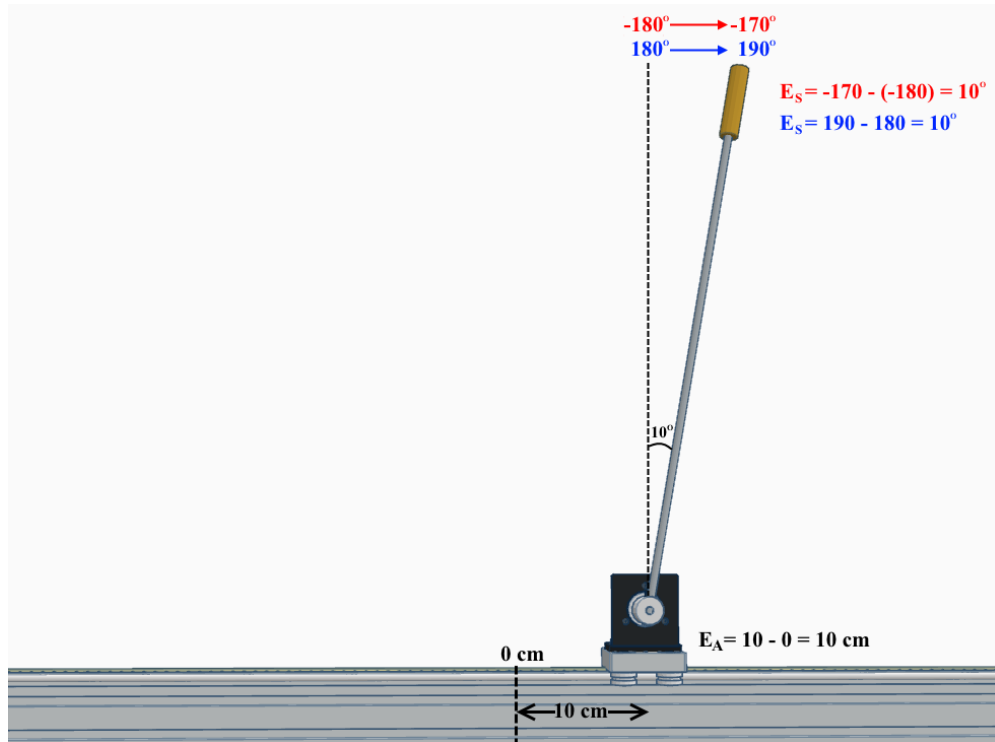
Denetim sırasındaki araç hatası ise, konum referansı değiştirilmediği sürece konum bilgisine eşit olmaktadır. Aracın referans noktası olan pist ortasındaki konum bilgisi 0 cm olduğu için, aracın herhangi bir andaki konumu referans noktasından uzaklığına, yani konum hatasına eşittir.

$$E_A = x \quad (6)$$

Araç konum referansı pist uçlarındaki sınır anahtarlarıyla değiştirildiğinde hesaplanan hata da değişmekte, böylece araç pist üzerindeki yeni konumuna doğru ilerlemektedir. Bu durumda araç hatası eşitlik (7)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_A = x - ref_A \quad (7)$$

E_s ve E_A hataları sistemin denetimi boyunca Şekil 6.12'deki gibi sürekli olarak hesaplanmakta ve PID denetleyicinin girişlerini oluşturmaktadırlar.



Şekil 6.12 Sarkaç ve araç hatalarının hesaplanması

6.3.2 PID denetim

Ters sarkaç sisteminin yukarı denge noktasındaki denetimini gerçekleştiren PID denetleyici, ismini “proportional-integral-derivative”, yani “oransal-integral-türev” terimlerinin baş harflerinden almaktadır. Her bir terimin denetimdeki görevi, nasıl hesaplandığı ve sayısal ortama nasıl aktarıldığı alt başlıklarda ayrı ayrı açıklanmıştır.

6.3.2.1. P terimi

PID denetimdeki oransal terimi temelde denetlenen sistemin anlık hatasının doğrudan bir katsayıyla çarpılarak denetim değişkeninin bulunmasından ibaret olup, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_p(t) = K_p \cdot E(t) \quad (8)$$

Eşitlik (8)'de görüldüğü gibi, bir t anındaki $u_p(t)$ denetim değişkeni, denetlenen sistemin t anındaki $E(t)$ hatası ile doğru orantılıdır. Denetimi yapılan ters sarkaç sisteminde oransal denetim değişkenleri sarkaç ve araç için ayrı ayrı hesaplandıktan sonra toplam denetim değişkeni bulunmaktadır. Sarkaç için

$$u_{p_s}(t) = K_{p_s} \cdot E_s(t) \quad (9)$$

araç için

$$u_{p_A}(t) = K_{p_A} \cdot E_A(t) \quad (10)$$

şeklinde hesaplanan denetim değişkenleri

$$u_{p_T} = u_{p_s} + u_{p_A} \quad (11)$$

şeklinde toplanarak P terimi için toplam denetim değişkeni olan u_{p_T} elde edilmektedir. P denetimi anlık hataya doğrudan yanıt verdiği için hızlıdır. Fakat diğer terimlerin yokluğunda kararlı hal hatası bırakmaktadır. K_p oransal sabitleri denetlenen sistemin dinamiklerine uygun olarak titizlikle ayarlanmalıdır.

6.3.2.2. I terimi

Denetlenen sistemdeki hatanın zamana göre integralini alan I terimi için denetim değişkeni

$$u_i(t) = K_i \cdot \int_0^t E(t) dt \quad (12)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Buradaki K_i katsayısı integral sabiti olup, I teriminin sistem denetimi üzerinde ne kadar etkili olacağını belirlemektedir. Sürekli zaman için eşitlik (12)'deki gibi hesaplanan I terimi ayrık zamanda

$$u_i(n) = K_i \cdot T_s \cdot \sum_0^N E(n) \quad (13)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada görülen T_s ayrık zamandaki örnekleme periyodudur. Eşitlik (13)'ten anlaşılacağı üzere I terimi denetlenen sistemde oluşan tüm hatalarının kaydını tutarak toplamaktadır. Bu özelliğiyle P teriminin bıraktığı kararlı hal hatasını azaltabilmektedir. Ters sarkaç sisteminin denetiminde I terimi sarkaç için

$$u_{i_s}(n) = K_{i_s} \cdot T_s \cdot \sum_0^N E_S(n) \quad (14)$$

şeklinde, araç için de

$$u_{i_A}(n) = K_{i_A} \cdot T_s \cdot \sum_0^N E_A(n) \quad (15)$$

şeklinde hesaplanarak eşitlik (16)'daki gibi toplanmakta, sistemin I terimi için toplam denetim değişkeni u_{i_T} elde edilmektedir.

$$u_{i_T} = u_{i_s} + u_{i_A} \quad (16)$$

6.3.2.3. D terimi

PID denetleyicinin son terimi olan D, sistemde oluşan hatanın zamana göre türevini almaktadır. Zamana göre türev birim zamandaki değişimi, dolayısıyla da hızı verdiği için, sistemde denetimi yapılan sarkaç ve aracın hızı ne kadar yüksekse, D terimi denetim üzerinde o kadar etkili olmaktadır. P terimi anlık hataya, I terimi geçmişteki hatalara tepki verirken, D teriminin gelecekte oluşacak hataları öngörerek sistemi frenlediği söylenebilir. Terimin denetimde ne kadar etkili olacağı K_d türev sabiti ile belirlenmekte olup, denetim değişkeninin sürekli zamandaki hesabı

$$u_d(t) = K_d \cdot \frac{dE(t)}{dt} \quad (17)$$

şeklinde, ayrık zamandaki hesabı ise

$$u_d(n) = K_d \cdot \frac{[E(n) - E(n-1)]}{T_s} \quad (18)$$

şeklindedir. Burada T_s 'nin örnekleme periyodu, $E(n)$ 'nin n anındaki hata, $E(n-1)$ 'in de bir önceki hata olduğu düşünülürse, K_d ile çarpılan ifadenin hız hesabı olduğu görülmektedir. D teriminin denetim değişkeni sarkaç için

$$u_{d_s}(n) = K_{d_s} \cdot \frac{[E_s(n) - E_s(n-1)]}{T_s} \quad (19)$$

şeklinde, araç için de

$$u_{d_A}(n) = K_{d_A} \cdot \frac{[E_A(n) - E_A(n-1)]}{T_s} \quad (20)$$

şeklinde hesaplanarak eşitlik (21) deki gibi toplanmakta, böylece sistemin D terimi için toplam denetim değişkeni elde edilmektedir.

$$u_{d_T} = u_{d_S} + u_{d_A} \quad (21)$$

P, I ve D terimleri sarkaç ve araç hataları için ayrı ayrı hesaplanıp toplanarak u_{p_T} , u_{i_T} ve u_{d_T} denetim değişkenleri elde edilmiştir. PID denetiminin toplam denetim değişkeni u_{pid_T} ise eşitlik (22)'deki gibi bütün terimler toplanarak hesaplanmaktadır.

$$u_{pid_T} = u_{p_T} + u_{i_T} + u_{d_T} \quad (22)$$

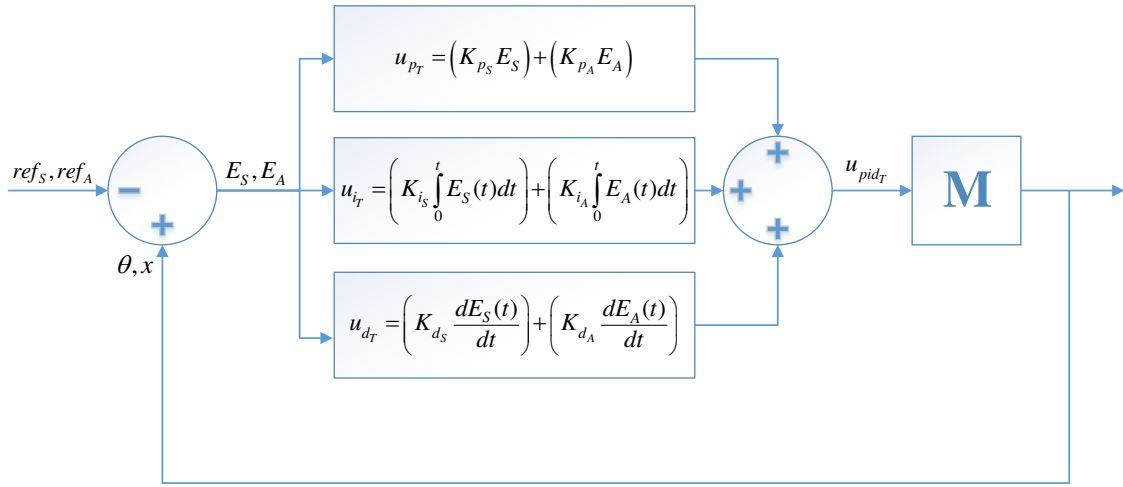
6.3.3 PID denetimin ters sarkaç sistemine uygulanması

Eşitlik (22)'de hesaplanan u_{pid_T} denetim değişkeni, motor sürücünün analog referans girişine uygulanan PWM işaretinin darbe genişliğini belirleyerek sarkaç ve araç hatalarını düzeltecek olan motor hızını sağlamaktadır. Motor yönünü belirleyen denetleyici çıkışları ise u_{pid_T} 'nin işaretine bağlı olarak Çizelge 6.1'deki gibi ayarlanmaktadır.

Çizelge 6.1 Denetim değişkeninin işaretine göre motora yön veren denetleyici çıkışları

	$u_{pid_T} < 0$	$u_{pid_T} = 0$	$u_{pid_T} > 0$
GPIO58	1	0	1
GPIO59	0	-	1

Sisteme uygulanan ve blok gösterimi Şekil 6.13'teki gibi olan PID denetiminde K_p , K_i ve K_d katsayılarının sistem tepkilerine göre titizlikle ayarlanması gerekmektedir. P,I ve D terimleri denetim değişkenine sırayla eklenerek sistemde yarattıkları olumlu ve olumsuz tepkiler gözlenmiş, gözlemlere dayalı olarak en uygun katsayıların bulunması amaçlanmıştır. Denetim sisteminin son halinin oluşturulmasında izlenen süreç tekrar edilerek alt başlıklarda açıklanmış, her birinde sarkaç açısı ve araç konumundan örnekler alınarak gerekli grafikler elde edilmiştir.



Şekil 6.13 Sisteme uygulanan PID denetimin blok gösterimi

6.3.3.1 Örnekleme Periyodunun Belirlenmesi

Bir denetim sisteminde, denetimi yapılan değerdeki hatanın hesaplanma hızı, değer in ölçüm hızından çok daha düşük olmalı, değerin değışimi için zaman tanınmalıdır. Hata hesabının yapıldığı denetim döngüsünün çalışma periyodu olan T_s , sistem dinamiklerine ve ölçüm cihazlarının hassasiyetine bağı olarak dikkatle seçilmelidir. Çalışmaya konu olan ters sarkaç sisteminde sarkaç açısı ve araç konumu ePWM1 frekansında (10 kHz) bir kesme ile ölçülmekte iken, bu ölçümlerden örnek alma işlemi için farklı örnekleme periyotları test edilmiş, en uygun T_s değeri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Sistemin oransal denetiminde anlık hata gerçek zamanlı olarak hesaplandığında yüksek hata hassasiyetinden dolayı sarkaçta titreşim oluşmaktadır. Bu nedenle örnekleme periyodu artırılarak sarkaç açısı ve araç konumundan saniyede alınan örnek sayısı azaltılmış, 250Hz - 10Hz aralığındaki farklı örnekleme frekansları oransal denetim için test edilmiştir. Sarkaç titreşiminin 100 Hz ve altındaki örnekleme frekanslarında kesildiği görölse de, saniyede alınan örnek sayısının fazla azalması denetim sırasındaki sistem davranışını olumsuz etkilemektedir. Sistemin oransal denetimi için hem sarkaç titreşiminin görölmediği, hem de örnekleme hızının denetim için yeterli olduğu 100 Hz örnekleme frekansı, yani 10 ms örnekleme periyodu seçilmiştir.

Sarkaç açısı ve araç konumunun anlık hata örnekleme periyodu için eQEP1 modülünün kesme bayrağı kullanılmaktadır. Modülde bulunan QUPRD periyot kaydedicisine 1500000 değeri verildiğinde modül periyodu 10 ms olmakta, böylece modülün kesme bayrak kaydedicisi olan QFLG saniyede 100 kere kesme üretmektedir. Kesme bayrağının 1 olması koşulu

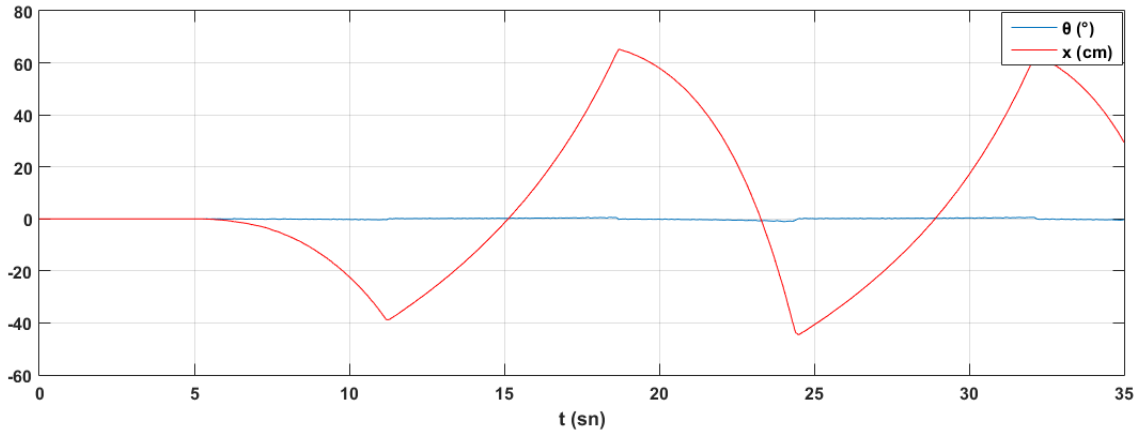
sağlandığında sarkaç ve aracın anlık hataları hesaplanmakta, koşuldan çıkmadan önce de kesme bayrağı QCLR kaydedicisi ile temizlenmektedir. Böylece sarkaç açısı ve araç konumundan her 10 ms’de bir örnek alınarak anlık hatalar hesaplanmakta, bu hatalar da oransal denetimde kullanılmaktadır.

10 ms örnekleme periyodu sistemin oransal denetimi için uygun olsa da, aynı periyot D terimi için hız hesabında kullanıldığında sistemin osilasyona girdiği görülmüştür. Bu olumsuz durum K_{p_s} , K_{p_A} , K_{d_s} ve K_{d_A} katsayıları değiştirilerek yapılan bütün testlerde devam ettiği için 10 ms örnekleme periyodunun hız hesabı için fazla kısa olduğuna kadar verilmiştir. Bu nedenle sarkaç ve aracın anlık hatalarından farklı olarak I ve D terimleri için örnekleme periyodu 100 ms’ye çıkarılmış, hata toplamı ve hız için saniyede 10 örnek alınmıştır. I ve D terimlerinde örnekleme periyodu için eQEP2 modülünün QUPRD kaydedicisine 15000000 değeri verilmiş, anlık hata örneklemesinde olduğu gibi modülün QFLG kesme bayrağı kullanılmıştır.

6.3.3.2. Sarkacın P denetimi

Sarkaç açısı ve araç konumunun PID denetiminde toplam denetim değişkenini oluşturan altı unsur vardır. Bunlar sarkaç ve aracın anlık hataları, hızları ve hata toplamaları olmakla birlikte, hangi unsurun denetim üzerinde ne kadar etkili olacağı K_{p_s} , K_{p_A} , K_{i_s} , K_{i_A} , K_{d_s} , K_{d_A} katsayıları ile belirlenmektedir. Bu katsayıların sistem tepkileri gözlemlenerek sezgisel olarak ayarlanmasında izlenecek sıra büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle denetim değişkenine eklenen ilk unsur sistemin kararsız çıkışı olan sarkaç açısının anlık hatası olmuştur. Sarkaç açısı ve araç konumunun birlikte denetimine geçilmeden önce, sadece sarkaç için oransal denetim uygulanarak sistem davranışı gözlenmiştir.

Sarkacın anlık hatasının denetim değişkeni üzerinde ne kadar etkili olacağını belirleyen K_{p_s} oransal sabiti makul bir değerden başlatılarak yavaş yavaş artırılmış, sistemin osilasyona girmeye başladığı değer tespit edilmiştir. Daha sonra K_{p_s} bu değer yarisına düşürülmüş, sistem tepkileri gözlemlenerek artırılmış veya azaltılmıştır. Yapılan testlerde araç el ile pistin ortasına getirilmiş, sarkaç da yukarı denge noktasına çıkarılarak dengelenmiştir. Daha sonra sistem direkt olarak P4 prosesinden başlatılarak sarkaç açısı ve araç konumundan örnekler alınmıştır. Sarkacın oransal denetim testi sırasında sarkaç açısı ve araç konumundan alınan örneklerle elde edilen grafikler Şekil 6.14’teki gibidir.



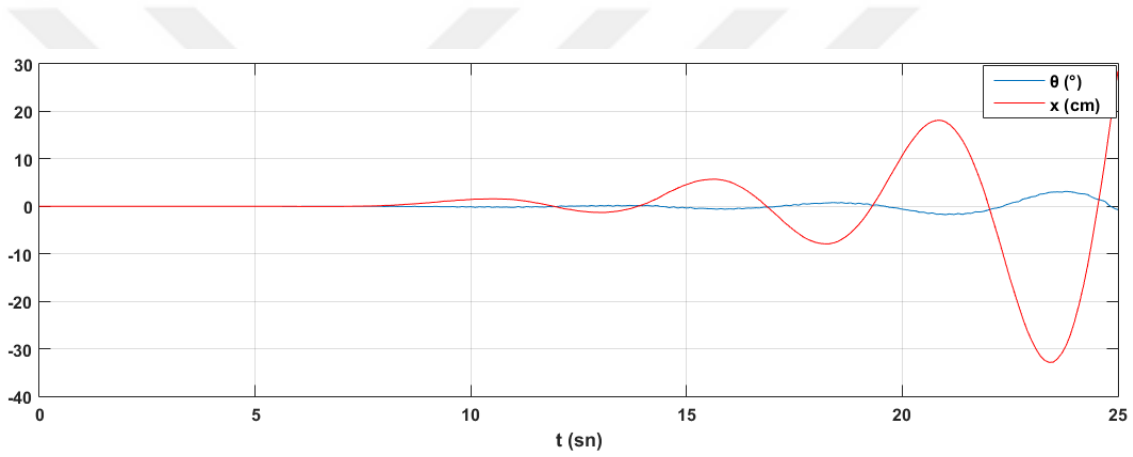
Şekil 6.14 Sarkacın P denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu

Sistemde araç konum denetimi olmaksızın sadece sarkaç açısı denetlendiğinde Şekil 6.14'te görüldüğü gibi sarkaç yukarı denge noktasında tutulabilmekte, fakat araç pist ortasında kalamamaktadır. Sistem başlatıldıktan yaklaşık 5 saniye sonra sarkacın dengesi küçük bir kuvvetle bozulduğunda sarkaç yukarı denge noktasında tutulmaya devam etse de araç hızlanarak -40 cm'ye kadar gitmiş, bu noktada sarkaca el ile müdahale edilerek yön değiştirmesi sağlanmıştır. Test boyunca her iki yönde de pist ortasından hızlanarak uzaklaşan araca pist sınırlarına ulaşmaması için müdahale edilmeye devam edilmiştir. Açı denetimi sırasında aracın her iki yönde de hareket etmesi için K_{ps} oransal sabiti artırılarak hata işaretini değiştirebilecek büyüklükte bir araç hızı sağlanmıştır. Fakat bu büyüklükte bir hız ile sistem osilasyona girmektedir. Osilasyon halinde iken araç pist ortasından daha yavaş uzaklaşsa da bir süre sonra müdahaleye ihtiyaç duymaktadır.

Bu test göstermektedir ki sistemde sadece açı denetimi yapılarak aracı pist ortasında tutmak pratik olarak mümkün değildir. Sistemin oransal denetimi için toplam denetim değişkenine aracın oransal denetim değişkeni olan u_{pA} da eklenmelidir.

6.3.3.3. Sarkaç ve aracın P denetimi

Ters sarkaç sisteminde hem sarkaç açısının, hem de araç konumunun oransal denetiminin yapılabilmesi için toplam oransal denetim değişkeni u_{p_r} sarkaç ve aracın oransal denetim değişkenleri olan u_{p_s} ve u_{p_A} 'nın toplamlarından oluşmalıdır. Toplam denetim değişkenine u_{p_A} eklendikten sonra aracın K_{p_A} oransal sabiti sıfırdan başlatılarak yavaş yavaş artırılmış, gerektiği takdirde K_{p_s} azaltılmıştır. Yapılan testlerde sistem davranışı gözlemlenerek K_{p_s} ve K_{p_A} oransal sabitleri arasındaki uygun oran belirlenmiştir. Sistemin oransal denetimi sırasında sarkaç açısı ve araç konumu Şekil 6.15'teki gibidir.



Şekil 6.15 Sistemin P denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu

Sistemin oransal denetim değişkenine aracın oransal denetimi de eklendiğinde, araç pist ortasını geçtikten sonra müdahaleye gerek duymaksızın yavaşlayarak durmakta ve yön değiştirmektedir. Fakat Şekil 6.15'te aracın her bir yön değişiminde pist ortasından daha fazla uzaklaştığı görülmektedir. Sisteme bozucu etki uygulandığı andan itibaren araç pist ortasından her geçişinde daha fazla hız kazanmış, bu nedenle diğer yöndeki açı ve konum hataları giderek artmıştır. Sisteme müdahale edilmediği sürece araç ortalama 8 yön değişiminde pist sınırlarına ulaşmaktadır. K_{p_s} ve K_{p_A} oransal sabitlerinin artırılması aracın pist ortasından her geçişinden sonraki uzaklaşma oranını azaltsa da aynı olumsuzluk devam etmekte, araç bir süre sonra pist sınırlarına ulaşmaktadır.

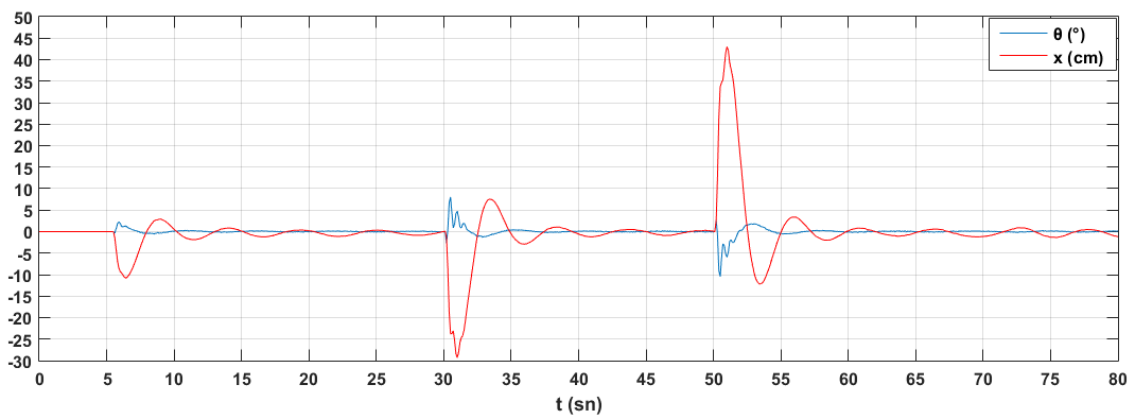
Sistemin oransal denetiminde karşılaşılan bu problemin başlıca sebebi sarkacın yukarı denge konumundan geçtiği andaki hızıdır. Bu hız sarkaç ve aracın referans noktalarında duramamasına, dolayısıyla da pistin diğer tarafında bir öncekine göre daha fazla hatanın

oluşmasına sebep olmaktadır. Sistem sadece oransal denetim ile kararlı hale getirilememekte, sarkaç ve araç hızının pistin diğer tarafında neden olacağı hataları öngörerek aracı yavaşlatan D terimine ihtiyaç duyulmaktadır.

6.3.3.4. Sarkaç ve aracın PD denetimi

Lineer olmayan, tek giriş ve iki çıkışlı ters sarkaç sistemi için oransal denetimin yeterli olmadığı görülmüştür. Sarkaç ve aracın anlık hatalarının büyüklüğüyle doğru orantılı olarak çıkış üreten oransal denetim, sistemin kararlı hale gelmesine engel olan sarkaç ve araç hızlarına karşı etkisizdir. Bu nedenle sarkaç ve aracın oransal denetim değişkenlerine ilave olarak toplam denetim değişkenine eklenen ilk terim, etkisini hız üzerinde gösteren D terimidir.

Sarkaç ve araç hızı ile doğru orantılı olan D teriminin denetim üzerinde ne kadar etkili olacağı K_{d_s} ve K_{d_A} türev sabitleriyle belirlenmektedir. D teriminin toplam denetim değişkenine eklenmesi sürecinde bu katsayılar sıfırdan başlatılarak yavaş yavaş artırılmış, istenilen etkinin sağlandığı değerler tespit edilmeye çalışılmıştır. Türev sabitlerinin küçük olması D teriminin aracı yeterince yavaşlatamamasına, dolayısıyla araç pistin orta noktasından geçtikten sonra yapılan aşımaların fazla olmasına neden olmaktadır. Türev sabitleri gereğinden fazla artırıldığında ise osilasyon gerçekleşmekte, sistem kararlı hale getirilememektedir. Yapılan testler neticesinde sezgisel olarak belirlenen uygun K_{d_s} ve K_{d_A} değerleri oransal denetimde karşılaşılan olumsuzluğu gidermekte, sistemin kararlı hale gelmesini sağlamaktadır. Sistemin PD denetimi sırasında sarkaç açısı ve araç konumundan alınan örneklerden elde edilen grafikler Şekil 6.16'daki gibidir.



Şekil 6.16 Sistemin PD denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu

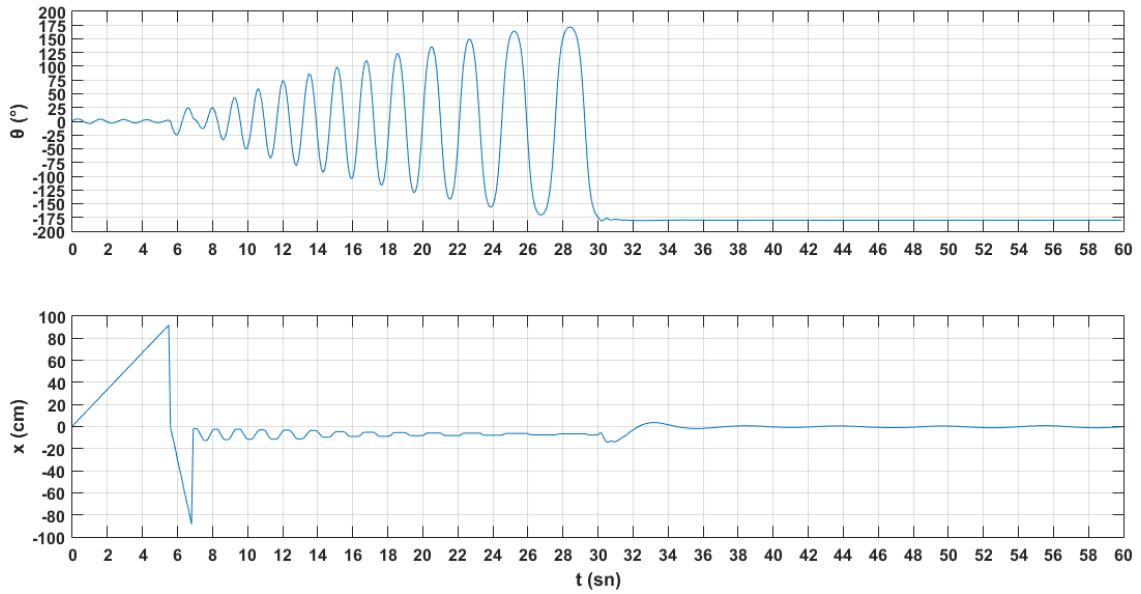
Şekil 6.16'ya göre toplam denetim değişkenine D teriminin eklenmesi oransal denetimde görülen olumsuzluğu gidererek sistemi oldukça kararlı hale getirmektedir. Sarkaç yukarı denge konumunda, araç ise pistin ortasında iken başlatılan sisteme yaklaşık 5. saniyede ilk bozucu etki uygulanmıştır. Sarkaç açısında oluşan hatayı düzeltmek için pist ortasından ayrılan aracın tekrar pist ortasına dönerek kararlı hale döndüğü görülmektedir. Kararlı haldeki sisteme 30. saniyede saat yönünün tersinde, 50. saniyede ise saat yönünde daha güçlü bozucu etkiler uygulanmış, her üç bozucu etkiye karşı sistemin ortalama 5 saniyede kararlı hale döndüğü görülmüştür. Kararlı hal hataları yaklaşık olarak sarkaç için $0,2^\circ$ ve araç için 1 cm olup, oldukça kabul edilebilir seviyededir.

6.3.3.5. Sarkaç ve aracın PID denetimi

Çalışmaya konu olan ters sarkaç sisteminde PD denetimin yeterli performansı sağladığı görülse de, toplam denetim değişkenine I terimi de eklenerek terimin kararlı hal hatası üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Sarkaç ve araca ait K_{i_s} ve K_{i_a} integral sabitleri hata toplamalarının denetim üzerinde ne kadar etkili olacağını belirlemektedir. Sisteme uygulanan ısrarlı bozucu etkiler hata toplamalarını fazla artırdığı için, bozucu etki ortadan kalktığı anda araç diğer yönde fazla hızlanmakta, istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bu problemin önüne geçebilmek için hem sarkaç, hem de aracın hata toplamaları için üst limitler belirlenmiştir. Bu sayede bozucu etkiler ne kadar süreyle devam ederse etsin hata toplamalarının bu sınırlarda kalması sağlanmıştır.

Sistemin toplam denetim değişkenine sarkaç ve aracın toplam integral denetim değişkeni olan u_{i_t} de eklendiğinde sistemin PID denetim değişkeni u_{pid_t} elde edilmektedir. Yapılan testlerde K_{i_s} , K_{i_a} katsayıları ve hata toplam sınırları sezgisel olarak değiştirilmiş ve sistemin kararlı hal hataları gözlemlenmiştir. Alınan en iyi sonuçların dahi PD denetimde gözlemlenen kararlı hal hatalarına çok yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle sistemin denetim performansını büyük oranda P ve D terimlerinin belirlediği söylenebilir.

PID denetimi gerçekleştirilen ters sarkaç sistemi sarkaç aşağı denge konumunda, araç ise pistin orta noktasında iken en baştan başlatılarak tüm prosesler boyunca sarkaç açısı ve araç konumundan örnekler alınmıştır. 1 dakika boyunca alınan örneklerden elde edilen sarkaç açısı ve araç konumunun grafikleri Şekil 6.17'deki gibidir.



Şekil 6.17 Sistemin PID denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu

Şekil 6.17’ya göre pistin orta noktasından harekete başlayan araç motor tarafındaki sınır anahtarına kadar gittikten sonra pist ortasına geri dönmüştür. Salınımlarla yükseklik kazandırılan sarkaç saat yönünün tersinde -175° ’ye ulaştığında açı referansı -180° yapılarak PID denetleyici tarafından yakalanmıştır. 35. saniyede kararlı hale gelen sistemin test sonuna kadar durumunu koruduğu görülmektedir.

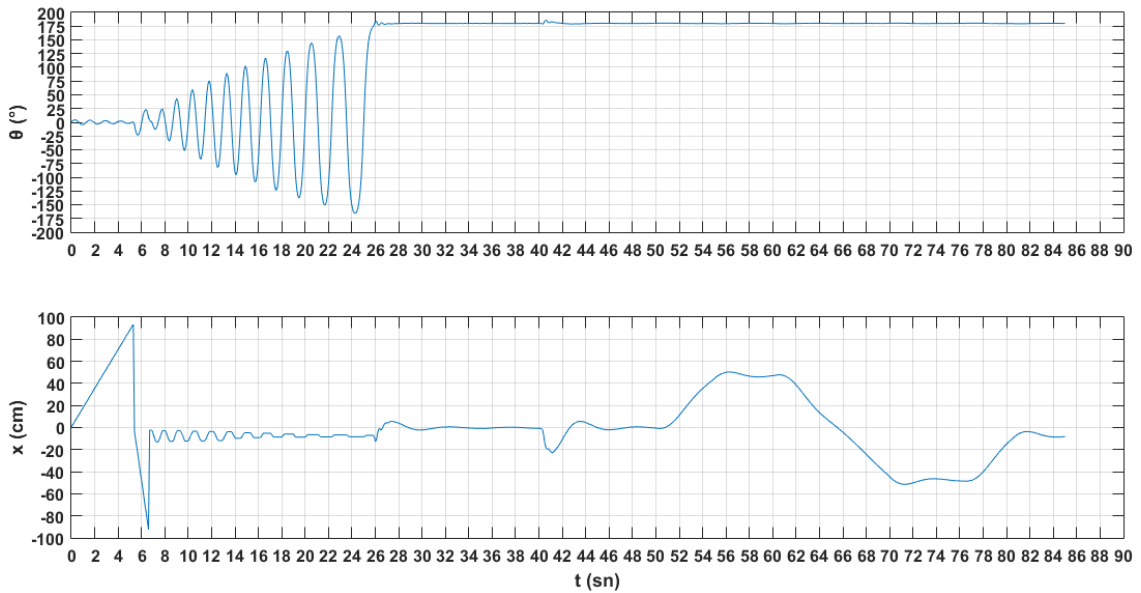
6.3.3.6. Aracın konum referansının değiştirilmesi

Yukarı denge konumunda PID denetimi gerçekleştirilen sistemde sarkaç açısının referansı $\pm 180^\circ$ iken, araç konumunun referansı 0 cm’dir. Enkoder referansları elde edildikten sonra aracın 0 cm konum bilgisine sahip olduğu yer pistin orta noktası olmakta, dolayısıyla sistem kararlı halde iken araç pist ortasında kalmaktadır. 2 metre uzunluğundaki pistin araç tarafından kullanılabilen bölümü pist uçlarına sınır anahtarlarının bağlanmasıyla 186 cm’ye düşmüştür. Bu nedenle pist ortasındaki konum bilgisi 0 cm olan aracın hareket aralığı $[-93 \text{ cm}, 93 \text{ cm}]$ olmaktadır. Bu aralığın bir ters sarkaç denetim sistemi için fazlasıyla uzun olduğu söylenebilir. Kararlı haldeki sisteme çok büyük bozucu etkiler uygulandığında dahi araç hiçbir zaman pist sınırlarına kadar ilerlememektedir. Dolayısıyla sistemin denetimi çoğunlukla pistin orta noktasına yakın bölgelerde gerçekleşmektedir. Pist uzunluğunun sağladığı esneklikten yararlanmak için sistemin sadece pistin ortasında değil, her noktasında denetlenebilmesi amaçlanmıştır.

Aracı denetim sırasında ve denetimi etkilemeksizin pistin istenilen bir noktaya taşıyabilmek için araç konum referans değişkeni kullanılmıştır. Değiştirilmediği sürece sistem

başlangıcından itibaren 0 cm olan konum referansı, pist uçlarında bulunan sınır anahtarlarıyla artırılıp azaltılabilmektedir. Pist başında bulunan sınır anahtarı aracın konum referansını azaltarak sol yönde, motor tarafındaki sınır anahtarı ise konum referansını artırarak sağ yönde hareket sağlamaktadır. Konum referansı ile birlikte konum hatası da değiştirilmiş olduğu için, referans değişiminin hızlı olması sistem denetimini olumsuz etkilemektedir. Sistemin kararlı halini bozmadan aracı yeni konumuna taşıyabilmek için sınır anahtarlarının bağlı olduğu GPIO33 ve GPIO34 girişleri 100 ms periyotlu eQEP2 kesme bayrağı ile kontrol edilmektedir. Bu sayede sınır anahtarlarının durumu saniyede 10 kere kontrol edilerek referans değişim hızı sınırlandırılmaktadır. Bir sınır anahtarının kapatılması her bir kontrolde konum referansını 1 cm artırmakta veya azaltmaktadır. Örneğin motor tarafındaki sınır anahtarı 1 saniye boyunca kapalı tutulduğunda yeni konum referansı 10 cm olmaktadır.

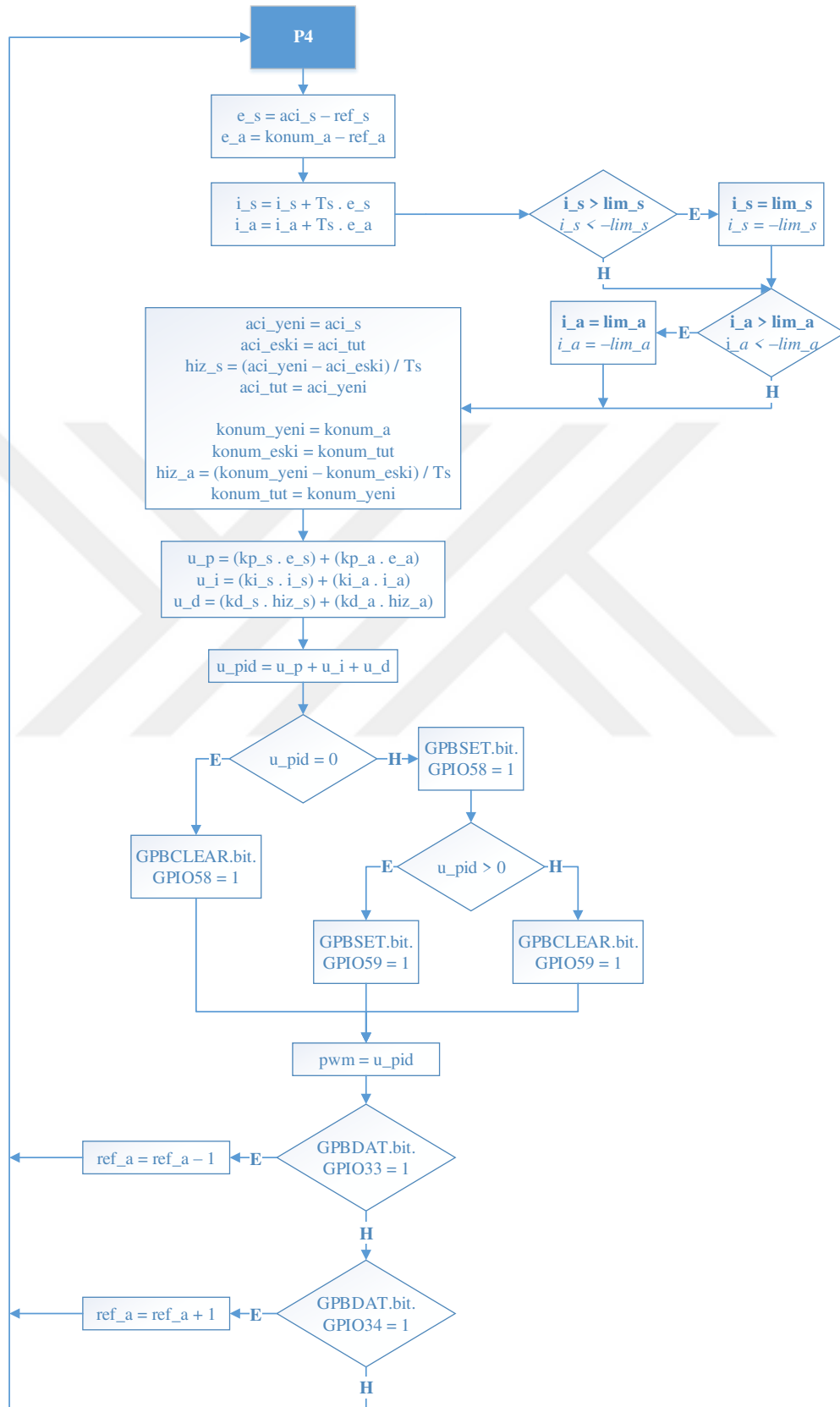
Araç konum referansının değiştirilebilir olması ile pistin her noktası denetim sırasında kullanılabilir hale gelmiştir. Çalışmanın son halini değişken konum referansı ile birlikte test etmek için sistem baştan başlatılarak kararlı hale geldikten sonra önce bozucu bir etki uygulanmış, daha sonra her iki yönde de araç konumu değiştirilmiştir. Test boyunca sarkaç açısı ve araç konumundan alınan örneklerin grafiği Şekil 6.18'deki gibidir.



Şekil 6.18 Sistemin değişken araç referanslı PID denetiminde sarkaç açısı ve araç konumu

Şekil 6.18’de yukarı denge noktasına saat yönünde ulaşan sarkaç PID denetleyici tarafından yakalandıktan sonra sistemin 32. saniyede kararlı hale geldiği görülmektedir. 40. saniyede uygulanan bozucu etkiden sonra sistem yaklaşık 5 saniyede kararlı hale geri dönmüştür. 50. saniyeden itibaren aracın konum referansı motor tarafındaki sınır anahtarı ile 45 cm’ye kadar artırılmış, daha sonra diğer sınır anahtarı ile -45 cm’ye kadar azaltılmıştır. Aracın tekrar motor tarafındaki sınır anahtarı ile pist ortasına yaklaştırılmasıyla test sona erdirilmiştir. Test boyunca gerçekleştirilen konum değişimlerinin denetim üzerinde olumsuz bir etkisi olmamıştır.

Ters sarkaç sisteminde değişken araç referanslı PID denetimin gerçekleşmesi ile sistemin tüm prosesleri tamamlanmış olmaktadır. Sistemin yukarı denge konumundaki denetiminin gerçekleştirildiği P4 prosesinin akış diyagramı Şekil 6.19’daki gibidir.



Şekil 6.19 P4 prosesinin akış diyagramı

7 SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında tek giriş ve iki çıkışlı bir ters sarkaç denetim sistemi tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Denetim sisteminin girişi olan araç hızı sayısal işaret işleyici tarafından üretilen PWM işaretleri ile sağlanırken, sistemin çıkışları olan sarkaç açısı ve araç konumunun ölçümleri artımsal enkoderler ile yapılmıştır. Enkoder kanallarının çıkış gerilimlerinin denetleyicinin giriş gerilimine düşürülmesi için farklı yöntemler test edilmiş ve en verimli yöntemin lojik seviye dönüştürücüler olduğu görülmüştür. Denetleyicinin eQEP1 ve eQEP2 enkoder modülleri tarafından birer birer sayılan sarkaç ve araç enkoder işaretleri, gerekli dönüşüm hesapları yapılarak açı ve uzunluk birimlerine dönüştürülmüştür. Enkoder işaretlerinin sayımında karşılaşılan gürültü problemi, gerekli topraklama bağlantıları yapılarak çözülmüştür.

Sarkaç ve araç hatalarını giderecek olan uygun araç hızı, motor sürücünün analog referans girişine uygulanan PWM işaretleri ile elde edilmiştir. Sayısal işaret işleyicinin PWM işaret genliği ile motor sürücünün maksimum analog referans gerilimi eşit olmadığı için, PWM işaretleri motor sürücüye optokuplörli bir devre üzerinden uygulanmıştır. PWM işaretlerinin görev çevrimi değiştirildiğinde motor sürücünün analog referans girişine uygulanan ortalama gerilim değişmektedir. Bu sayede motorun hız denetimi gerçek zamanlı olarak yapılabilmiştir.

Fiziksel sistemde sarkacın serbest düşme hareketi, sarkaç salınımlarının araç konumuna etkisi, pistteki sürtünmenin araç hızına etkisi ve motorun eylemsizliği deneysel olarak test edilmiş, elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Sistem donanımında denetime engel teşkil edecek bir durumla karşılaşılmamıştır.

Sarkaç açısı ve motor konumunun ölçüldüğü optik enkoderler artımsal oldukları için işaret sayımının başlayacağı referans noktalarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu referansların sarkaç için aşağı denge konumu, araç için ise pistin orta noktası olması tercih edilmiştir. Sistem başlatıldığında denetime geçilmeden önce sarkaç ve aracın referans noktalarında bulunması ve enkoder işaret sayaçlarının bu noktalarda sıfır olması sağlanmıştır.

Sistemin yukarı denge konumundaki denetiminin yapılabilmesi için aşağı denge konumundaki sarkaca araç hareketleriyle kuvvet uygulanarak yukarı kaldırılmıştır. Araç hareketlerinin gerçekleşeceği açı aralıkları ve hareket yönleri belirlendikten sonra sarkaca uygulanan kuvvet PWM görev çevrimleri ile değiştirilmiştir. Sarkaca her bir salınımda uygulanan kuvvetin düşük olması yukarı denge noktasına ulaştığı andaki hızının da düşük olmasını sağlamakta, fakat işlem süresini uzatmaktadır. Sarkaca uygulanan kuvvet yüksek olduğunda ise işlem daha kısa sürmekte, fakat sarkaç yukarı denge noktasına ulaştığı anda yüksek hıza sahip

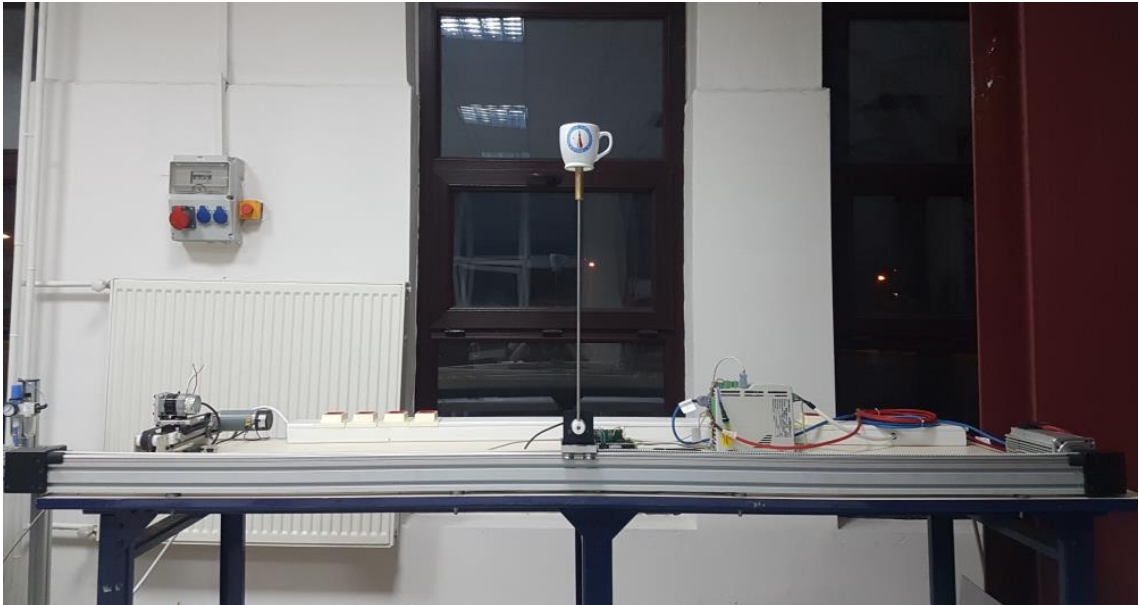
olmaktadır. Hem işlem süresinin makul uzunlukta olması, hem de sarkacın yukarı denge noktasına ulaştığı anda düşük hıza sahip olması için değişken görev çevrimi kullanılmıştır. Sarkaca uygulanan kuvvet başlangıçta yüksek iken, sarkaç yükseklik kazandıkça PWM görev çevrimiyle birlikte kuvvet de azaltılmıştır. Bu yöntemle sarkacın yukarı denge noktasına ulaştığı andaki hızının düşük olması sağlanmış iken, işlem ortalama 19 saniye sürmektedir.

Yukarı denge noktasına kaldırılan sarkacın PID denetleyici tarafından kolayca yakalanmasından sonra sistem yaklaşık 5 saniyede kararlı hale gelmektedir. Bu aşamadan sonra sisteme uygulanan bozucu etkilerin neden olduğu sarkaç hatası araç tarafından düzeltilmekte iken, bu sırada oluşan konum hatası da aracın pist ortasına dönmesiyle giderilmektedir. Sistemin yukarı denge konumundaki denetimini gerçekleştiren PID denetleyicinin terimleri denetim değişkenine P, D ve I sırası ile eklenirken, sarkaç ve araca ait oransal, türev ve integral katsayıları sezgisel olarak belirlenmiştir. Sistem sadece oransal denetim kullanılarak tüm uğraşlara rağmen kararlı hale getirilememiştir. Denetim değişkeninin sadece anlık hataya bağlı olduğu oransal denetim, lineer olmayan, tek girişe karşı iki çıkışın birlikte denetlendiği ters sarkaç sistemi için yetersiz kalmış, frenleyici etkiye sahip olan türevsel denetime ihtiyaç duyulmuştur. Denetim değişkenine D terimlerinin ilave edilmesiyle sarkaç ve araç hızları da denetimde etkili hale getirilmiş, böylece gerekli frenleme sağlanmıştır. Sisteme uygun P ve D sabitleri belirlendiğinde, I teriminin yokluğunda dahi oldukça yüksek kararlılık elde edilmiştir. PD denetimdeki kararlı hal hataları yaklaşık olarak sarkaç için $0,2^\circ$ ve araç için 1 cm olarak ölçülmüştür. Bozucu etkilerden sonra kararlı hale dönme süresi ise ortalama 5 saniyedir. Denetime I teriminin eklenmesi hali hazırda oldukça düşük olan kararlı hal hataları üzerinde hissedilir bir etki yaratmasa da, küçük integral katsayı ve sınırları ile denetimde kalması tercih edilmiştir.

Denetim sisteminde hata hesabı için farklı örnekleme periyotları test edilmiştir. Oransal denetimde anlık hata hesabı için test edilen 10 ms altındaki periyotlarda sarkaç titreşimi meydana gelmekte iken, daha uzun periyotlar denetim için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle oransal denetim için her iki olumsuz durumun da görülmediği 10 ms örnekleme periyodunda karar kılınmıştır. PID denetimin D teriminde kullanılan hız hesabı için de 10 ms periyodu test edildiğinde sistemin osilasyona girdiği görülmüştür. Bu nedenle denetim sisteminin farklı terimleri için farklı örnekleme periyotları kullanılması yoluna gidilmiş, türev ve integral hesabı için 100 ms periyodu seçilmiştir. Denetim sırasında sarkaç ve aracın anlık hataları 10 ms’de bir hesaplanırken, hız ve toplam hata hesapları için açı ve konum bilgileri 100 ms’de bir örneklenmektedir. İzlenen bu yol titreşim ve osilasyon gibi olumsuz durumları ortadan kaldırarak sistemin kararlı çalışmasına olanak sağlamıştır.

Ters sarkaç sisteminde araç hareketlerinin gerçekleştiği 2 m uzunluğundaki pistin uçlarına sınır anahtarları bağlanmış, bu nedenle araç tarafından kullanılabilen yolun uzunluğu 186 cm'ye düşmüştür. Motor tarafındaki sınır anahtarı sistem başlangıcında araç konum referansının elde edilmesi için kullanılmış, yukarı denge konumundaki denetim sırasında ise her iki sınır anahtarına da araç konum referansını değiştirme fonksiyonu verilmiştir. Pist başındaki sınır anahtarı başlangıçta 0 cm olan konum referansını azaltarak aracı pistin sol tarafına, motor tarafındaki sınır anahtarı ise konum referansını artırarak sağ tarafına çekmektedir. Sınır anahtarlarının bağlı olduğu denetleyici girişleri 100 ms periyoduyla kontrol edilerek her kontrolde 1 cm artırılmakta, böylece aracın konumu saniyede 10 cm değiştirilebilmektedir. Bu hızda bir konum değişiminin denetime olumsuz bir etkisi olmamakta, böylece denetim sırasında konum referansı değiştirilen sistem kararlı halini koruyarak yeni konumuna doğru ilerleyebilmektedir. Değişken konum referansı ile pistin her noktası denetim sırasında kullanılabilir hale gelmiştir.

Tasarlanan ve gerçekleştirilen ters sarkaç denetim sisteminin kararlılığı ve bozucu etkilere karşı tepki performansı oldukça tatminkâr seviyededir. Sistem kararlı halde iken sarkaç üzerine yerleştirilen çeşitli ağırlık ve hacimlerdeki cisimlerle yapılan gürbüzlük testlerinde başarılı sonuçlar vermektedir. Pek çok farklı denetim algoritması için oldukça müsait bir test ortamı sunan ters sarkaç sisteminin mevcut performansı, gelecek çalışmalarda genetik algoritmalar, yapay sinir ağları, bulanık çıkarım yöntemleri vb. ile iyileştirilebilir. Şekil 7.1'de denetim sırasındaki bir fotoğrafı görülen sistemin görüntü kaydı tez ekinde CD ile sunulmuştur.



Şekil 7.1 Ters sarkaç denetim sistemi

KAYNAKLAR DİZİNİ

Arda, M., (2012), Çift Eksenli Ters Sarkaç Tasarımı ve Kontrolü Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Elibol, G., (2015), Bir Ters Sarkaç Denetimi Gerçeklenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Ertuğrul, İ., (2015), Bir Ters Sarkaç Sisteminde Kullanılan Genel Kontrol Algoritmalarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gani, A., Açıkgoz, H., Kılıç, E., Şit, S., (2014), Ters sarkacın bulanık mantık esaslı denetimi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu ELECO'14, s.347-350.

Gezer, G., (2011), Ters Sarkaç Sisteminin Bulanık Mantık ve Kayan Kipli Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S., Rufer, A.C., (2002), JOE: A mobile, inverted pendulum, IEEE Transactions on Industrial Electronics 49(1), s.107-114.

Gün, A., (2007), Yetersiz Uyarımlı Bir Elektromekanik Sistem Gerçeklenmesi ve Denetimi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

<http://www.femsan.com/index.php?id=100000&dil=TR&cid=110000&scid=111000&pid=111100>

<http://www.tdemacno.com/engine/public/base/dwl.php?co=78&ftp=storage-eng/MANUALS/Automation/MiniOPDE%20Family/Brushless%20V 4.1.pdf>

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf>

<http://www.ti.com/lit/ug/sprug04a/sprug04a.pdf>

<http://www.ti.com/lit/ug/sprug05a/sprug05a.pdf>

Huang, J., Ding, F., Fukuda, T., Matsuno, T., (2013), Modeling and velocity control for a novel narrow vehicle based on mobile wheeled inverted pendulum, IEEE Transactions on Control Systems Tech. 21(5), s.1607-1617.

Huang, S.J., Huang, C.L., (2000), Control of an inverted pendulum using grey prediction model, IEEE Transactions on Industry App. 36(2), s.452-458.

Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K., Hirukawa, H., (2001), The 3D linear inverted pendulum mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation, International Conference on Intelligent Robots and Systems, s.239-246.

Kharola, A., Patin, P., Raiwani, S., Rajput, D., (2016), A comparison study for control and stabilisation of inverted pendulum on inclined surface (IPIS) using PID and fuzzy controllers, Recent Trends in Engineering and Material Sciences 8, s.187-190.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Lozano, R., Fantoni, I., Block, D.J., (2000), Stabilization of the inverted pendulum around its homoclinic orbit, System & Control Letters 40, s.197-204.

Pathak, K., Franch, J., Agrawal, S.K., (2005), Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by a partial feedback linearization, IEEE Transactions on Robotics 21(3), s.505-513.

Sharif, B.A., (2013), A Sliding Mode Control For Inverted Pendulum System, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.

Sugihara, T., Nakamura, Y., Inoue, H., (2002), Realtime humanoid motion generation through ZMP manipulation based on inverted pendulum control, International Conference on Robotics & Automation, s.1404-1409.

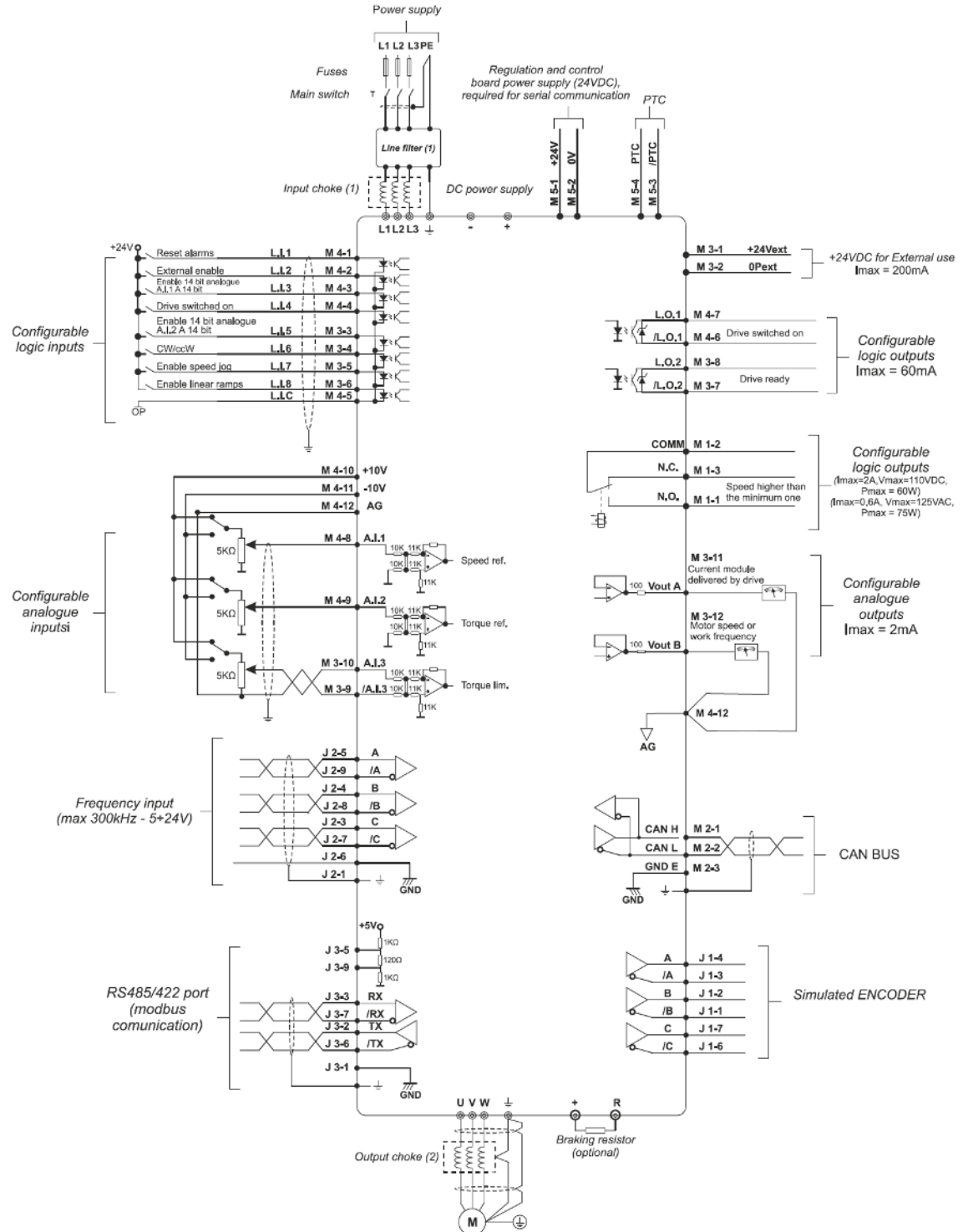


EKLER

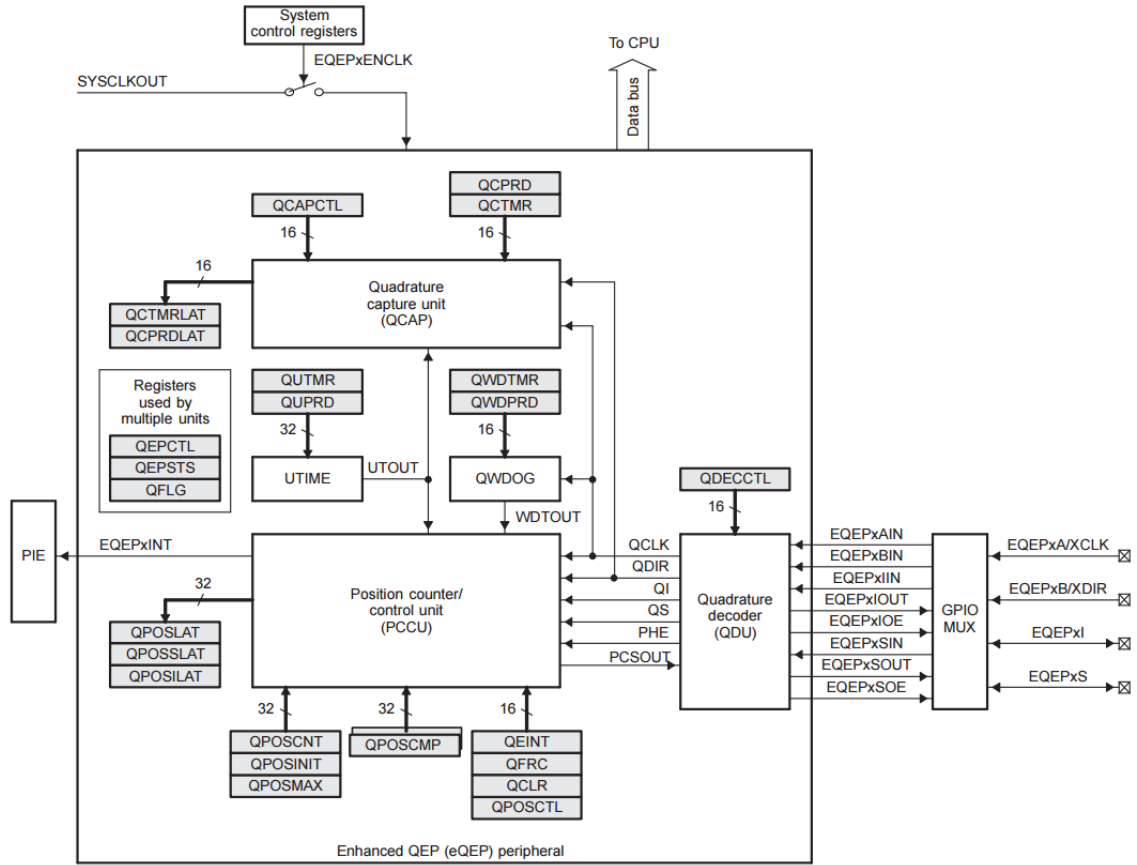
EK.1 Motor Sürücünün Teknik Özellikleri

Mod. MiniOPDE		2-04	2-11	2-22	2-30	4-08	4-15	4-30	
Power supply									
Input Voltage (Vi) (nominal power referred to rated voltage)		Vrms	110V -10% ÷ 240+10%, 1-Ph / 3Ph (Rated voltage: 230Vac)				230V -10% ÷ 460+10%, 3Ph (Rated voltage: 400Vac)		
Frequency		Hz	50 ÷ 60Hz ±5%						
D.C. Voltage		VDC	310 ±10%				560 ±10%		
Input current at rated power (without inductance)	1 Ph single phase	Ams	5	11,5	17	20	--	--	--
	3 Ph three-phase		3	7,5	11	13	3	5	9
Input current at rated power (With inductance ΔV=3%)		Ams	4	8,5	12,5	15	--	--	--
Output									
Output Voltage		Vrms	Vout max. = Vi x 0,94						
Output Frequency		Hz	0 ÷ 1100						
(1) C56 = 0		Overload 120% for 30 s (Arms)							
Rated Output Current In (2)[A]		2,7	6,7	9,9	11,8	2,7	4,5	8	
Transitory Overload 30 s f>2,5Hz [A]		3,2	8	11,9	14,2	3,2	5,4	9,6	
C56 = 1		Overload 150% for 30 s							
Rated Output Current In (2)[A]		2,4	5,9	8,8	10,5	2,4	4	7,1	
Transitory Overload 30 s f>2,5Hz[A]		3,6	8,9	13,2	15,8	3,6	6	10,7	
C56 = 2		Overload 200% for 30 s (Arms)							
Rated Output Current In (2)[A]		1,9	4,8	7,2	8,5	1,9	3,2	5,8	
Transitory Overload 30 s f>2,5Hz[A]		3,9	9,6	14,3	17,1	3,9	6,4	11,6	
C56 = 3		Overload 200% for 3 s and 155% for 30 s (Arms)							
Rated Output Current In (2)[A]		2,3	5,6	8,4	10	2,3	3,8	6,8	
Transitory Overload 1 30 s f>2,5Hz[A]		4,6	11,2	16,8	20	4,6	7,6	13,6	
Transitory Overload 2 30 s f>2,5Hz[A]		3,6	8,7	13	15,5	3,6	5,9	10,5	

EK.2 Motor Sürücünün Elektriksel Bağlantı Şeması



EK.3 TMS320F28335 eQEP Modülü Blok Diyagramı



EK.4 TMS320F28335 eQEP Modülünde Bulunan Kaydediciler

Name	Offset	Size(x16)/ #shadow	Reset	Register Description
QPOSCNT	0x00	2/0	0x00000000	eQEP Position Counter
QPOSINIT	0x02	2/0	0x00000000	eQEP Initialization Position Count
QPOSMAX	0x04	2/0	0x00000000	eQEP Maximum Position Count
QPOSCMP	0x06	2/1	0x00000000	eQEP Position-compare
QPOSILAT	0x08	2/0	0x00000000	eQEP Index Position Latch
QPOSSLAT	0x0A	2/0	0x00000000	eQEP Strobe Position Latch
QOSLAT	0x0C	2/0	0x00000000	eQEP Position Latch
QUTMR	0x0E	2/0	0x00000000	QEP Unit Timer
QUPRD	0x10	2/0	0x00000000	eQEP Unit Period Register
QWDTMR	0x12	1/0	0x0000	eQEP Watchdog Timer
QWDPRD	0x13	1/0	0x0000	eQEP Watchdog Period Register
QDECCTL	0x14	1/0	0x0000	eQEP Decoder Control Register
QEPCTL	0x15	1/0	0x0000	eQEP Control Register
QCAPCTL	0x16	1/0	0x0000	eQEP Capture Control Register
QPOSCTL	0x17	1/0	0x0000	eQEP Position-compare Control Register
QEINT	0x18	1/0	0x0000	eQEP Interrupt Enable Register
QFLG	0x19	1/0	0x0000	eQEP Interrupt Flag Register
QCLR	0x1A	1/0	0x0000	eQEP Interrupt Clear Register
QFRC	0x1B	1/0	0x0000	eQEP Interrupt Force Register
QEPSTS	0x1C	1/0	0x0000	eQEP Status Register
QCTMR	0x1D	1/0	0x0000	eQEP Capture Timer
QCPRD	0x1E	1/0	0x0000	eQEP Capture Period Register
QCTMRLAT	0x1F	1/0	0x0000	eQEP Capture Timer Latch
QCPRLAT	0x20	1/0	0x0000	eQEP Capture Period Latch
reserved	0x21 to 0x3F	31/0		

EK.5 TMS320F28335 ePWM Modülü Blok Diyagramı

