

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

EKSİK TAHRİKLİ İKİ BACAĞI BİR
ROBOTUN TASARIMI VE YÜRÜYÜŞ
KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ERMAN SELİM

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Musa ALCI

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi: 24.08.2020

Bornova-İzmir

2020

Erman SELİM tarafından Doktora tezi olarak sunulan " **EKSİK TAHRİKLİ İKİ BACAĞI BİR ROBOTUN TASARIMI VE YÜRÜYÜŞ KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ** " başlıklı bu çalışma E.Ü. Fen Bilimleri Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve **24.08.2020** tarihinde yapılan tez savunma sınavında oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri üyeleri

İmza

Jüri Başkanı : Prof.Dr. Musa ALCI

Raportör Üye : Prof.Dr. Aydoğan SAVRAN

Üye : Prof.Dr. Enver TATLICIOĞU

Üye : Prof.Dr. Erkan MEŞE

Üye : Prof.Dr. Zeki KIRAL

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum " **EKSİK TAHRİKLİ İKİ BACAĞI BİR ROBOTUN TASARIMI VE YÜRÜYÜŞ KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ** " başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

24/08/2020

Erman SELİM



ÖZET

EKSİK TAHRİKLİ İKİ BACAĞI BİR ROBOTUN TASARIMI
VE YÜRÜYÜŞ KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

SELİM, Erman

Doktora Tezi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Musa ALCI

Ağustos 2020, 114 sayfa

Bu tezde iki ayaklı yürüyen robotların dinamik yürüme algoritmaları üzerine çalışılmış ve tasarlanan mekanik model üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında dinamik yürümenin temel özelliklerini yansıttığı ve görece daha sade bir yapıya sahip olduğu için beş bağılı düzlemsel robot modeli temel alınmıştır.

Yürümenin doğası gereği ayağın yer ile temas ettiği her an yaşanan çarpışma sistem dinamiklerinde süreksizliğe yol açmaktadır. Bu durum dikkate alınarak matematiksel model hibrit sistem olarak elde edilmiştir. Matematiksel model ile uyumlu olacak şekilde robotun CAD çizimleri yapılarak fiziksel model üretilmiştir. Benzetim sonuçlarında görülen elektro-mekanik şartları sağlayacak eklem yapısı, tasarlanıp üretilmiş ve robot üzerinde test edilmiştir.

Belirli yürüme özelliklerini sağlayacak eklem yörüngeleri önerilen değişken zaman aralıklı eniyileme yöntemi ile belirlenmektedir. Sanal kısıtlar yöntemi yardımıyla yörüngelerin uygulanması sağlanmaktadır. Sanal kısıtlar yönteminin eksiklikleri ortaya konularak çözüm olarak faz kontrolü yöntemi geliştirilmiştir. Yürüme sonuçları hem benzetim ortamında, hem de fiziksel modelde elde edilmiştir. Yanı sıra farklı bir yaklaşımla biyolojik temellere dayalı olan ve yürüme parametrelerinin ayarlanabilir olmasına imkan tanıyan merkezi örüntü üretici ile de robotun yürümesi sağlanmıştır.

Her iki yöntemin avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurarak kararlı ve periyodik dinamik yürümeyi sağlayacak, aynı zamanda yörünge eniyileme yapmadan yürüyüş özelliklerini ayarlayabilecek faz kontrol olarak isimlendirdiğimiz yöntem önerilmiştir.

Anahtar Sözcükler: iki ayaklı robotlar, dinamik yürüme, robot tasarımı, yörünge eniyileme ve takibi, sanal kısıtlar, merkezi örüntü üretici.

ABSTRACT**DESIGN AND GAIT CONTROL OF AN UNDERACTUATED
BIPEDAL ROBOT**

SELİM, Erman

PhD. in Electrical-Electronics Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Musa ALCI

August 2020, 114 pages

In this thesis, dynamic walking algorithms of bipedal walking robots have been studied and experimental tests have been carried out on the designed mechanical model. In the scope of the thesis, five-link planar robot model is used because it has a simple mechanical structure and can demonstrate the basic features of dynamic walking.

Due to the nature of walking, any collision that occurs when the foot comes in contact with the ground causes a discontinuity in system dynamics. Taking this situation into consideration, the mathematical model is obtained as a hybrid system. The experimental setup has been produced according to CAD drawings that are compatible with the mathematical model.

The joint trajectories that will provide certain gait characteristics are determined by the proposed variable time interval optimization method. After that, trajectories are applied to the robot with the help of virtual constraints method. By revealing the weaknesses of the virtual constraints method, the phase control method has been developed as a solution. Walking results are obtained both in the simulation environment and experimental study. In addition, the robot is able to walk with the central pattern generators and allows the walking parameters to be adjusted.

Considering the advantages and disadvantages of both methods, we have proposed a method called phase control, which will provide stable and periodic dynamic walking and at the same time adjust gait characteristics without trajectory optimization.

Key Words: bipedal robots, dynamic walking, robot design, trajectory optimization and tracking, virtual constraints, central pattern generator.

ÖNSÖZ

Robotik ve otonom sistemler günümüzün yadsınamaz gerçekleri olmuştur. Bir çok alanda insanlara avantaj sağlamaktadırlar. Fakat, insanların kendilerine göre düzenlediği çevrede tekerlekli mobil robotlar hareket sorunu yaşamaktadır. Alternatif olarak geliştirilen yürüyen robotlar ise bu tür ortamlarda avantajlı olmasına rağmen kendilerine özgü mekanik ve kontrol problemleri barındırmaktadır. Yürüyen robotların eksik tahrikli olmaları ve matematiksel modelinin süreksizlik barındırması kontrolcü tasarımı zorlaştıran en önemli unsurlardır. Bilimsel yazında bu zorlukların üstesinden gelecek kontrol yöntemleri önerilmiş olsa da kesin bir çözüm yöntemi bulunmamaktadır. Önerilen yöntemlerin yetersiz ve geliştirmeye açık yanları bulunmaktadır.

Bu çalışmada, iki ayaklı yürüyen robotların, dinamik yürüme konusunda mevcut açık problemlerini çözebilecek kontrolcü önermek ve aynı zamanda tasarlanıp üretilen mekanik model üzerinde uygulamasının yapılması temel motivasyon kaynağı olmuştur.

İZMİR

24/08/2020

Erman SELİM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK	i
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
1 GİRİŞ	1
1.1 Motivasyon	1
1.2 Problem Tanımı	6
1.3 Tez Katkısı	7
1.4 Organizasyon Planı	8
2 LİTERATÜR ÖZETİ	10
3 İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELİ 15	
3.1 Giriş	15
3.2 Genel Bilgi	15
3.3 Kinematik Model	16
3.4 Dinamik Model	18
3.5 Çarpışma Modeli	20
3.6 Hibrit Model	22
4 MEKANİK MODEL TASARIMI	23
4.1 Giriş	23

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2 Genel Bilgi	23
4.3 Eklem Tasarımı	25
4.4 Fırçasız DC Motor Kontrolü	29
4.5 Sensörler	32
4.6 Veri Hattı	34
4.7 Taşıyıcı Platform	36
5 YÜRÜME YÖRÜNGE PLANLANMASI	38
5.1 Giriş	38
5.2 Doğrusal Ters Sarkaç Modeli	38
5.3 Yörünge Eniyilemesi	44
5.4 Değişken Zaman Aralıklı Yörünge Eniyileme	51
6 YÜRÜME YÖRÜNGE KONTROLÜ	55
6.1 Giriş	55
6.2 Sanal Kısıtlamalar	55
6.3 Yürüme Kontrolü Benzetimi	58
6.4 Yürüme Kontrolü Mekanik Modelleme Benzetimi	64
6.5 Yürüme Kontrolü Mekanik Model Gerçeklemesi	66
6.5.1 Ana kontrolcü	67
6.5.2 Yerel kontrolcü	69
6.5.3 Gerçek model yürüme sonuçları	71
7 YÖRÜNGE FAZ KONTROLÜ	74
7.1 Giriş	74
7.2 Sanal Kısıtların Yörünge Seçimine ve Başlangıç Şartlarına Karşı Hassasiyeti	74

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.3	Senkronizasyon Açısının Faz Kontrolü 77
7.4	Senkronizasyon Açısının Fazı ile Yürüme Hız Kontrolü 79
8	MERKEZİ ÖRÜNTÜ ÜRETİCİ YÜRÜME KONTROLÜ 83
8.1	Giriş 83
8.2	Merkezi Örüntü Üretici 83
8.3	Nöron Modeli 85
8.3.1	Van der Pol osilatör 85
8.3.2	Hopf osilatör 87
8.3.3	Matsuoka osilatör 88
8.4	Ağ Modeli 91
8.5	Genetik Algoritma ile Parametre Eniyileme 96
8.6	Yürüme Benzetimleri 99
8.7	Sonuç 102
9	SONUÇLAR 103
10	ÖNERİLER 106
	KAYNAKLAR DİZİNİ 114
	TEŞEKKÜR 115
	ÖZGEÇMİŞ 116

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Dört Ayaklı Robotlar	2
1.2 ASIMO	3
1.3 HUBO	3
1.4 ATLAS	4
1.5 CHIMP	5
1.6 CASSIE	5
1.7 Bölümler Arası Bağlantı Şematığı	9
3.1 Vücut Anatomi Eksenleri (Behnke, 2012)	15
3.2 Robot Eklem ve Bağ Yerleşimi	17
4.1 İki Ayaklı Robot Test Modeli	24
4.2 İki Ayaklı Robot Test Düzenegi	25
4.3 Robotik Sistemlerde Kullanılan Redüktörler	26
4.4 Bütünleşik Eklem tasarımı	28
4.5 Eklem Bağlantı Örneği	29
4.6 Alan Yönlendirmeli Kontrol Şeması Nidec Motor Corporation (2019)	30
4.7 Cogging Torkunun Akım Üzerinde Etkisi	31
4.8 Adaptive Feedforward Cancellation Diagramı	31
4.9 Fırçasız DC Motor Sürücü Kartı	32
4.10 Sensör Kartı	33
4.11 Robot Ayak Tasarımı	34
4.12 Veri Hattı	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.13 SPI Hattı Veri Paketi	36
4.14 Taşıyıcı Platformun Ölçüleri	37
4.15 Taşıyıcı Platform	37
5.1 Doğrusal Ters Sarkaç Modeli	39
5.2 Ters Sarkaç Faz Portresi	40
5.3 Salınım Bacağı Kütleli Doğrusal Ters Sarkaç Modeli	40
5.4 Salınım Ayağının Ağırlığına Göre ZMP Değişimi	42
5.5 Adım Yüksekliğine Göre ZMP Değişimi	42
5.6 Adım Mesafesine Göre ZMP Değişimi	43
5.7 Yürüme Frekansına Göre ZMP Değişimi	43
5.8 Trapezoid Collocation Yöntemine Göre Eklem Açıları	47
5.9 Trapezoid Collocation Yöntemine Göre Eklem Açısız Hızları	47
5.10 Trapezoid Collocation Yöntemine Göre Eniyileme Hatası	48
5.11 Hermite-Simpson Collocation Yöntemine Göre Eklem Açıları	50
5.12 Hermite-Simpson Collocation Yöntemine Göre Eklem Açısız Hızları	50
5.13 Hermite-Simpson Collocation Yöntemine Göre Eniyileme Hatası	51
5.14 Yeni Collocation Noktanı Ekleme Gösterimi	52
5.15 Sabit Zaman Aralıklı ve Değişken Zaman Aralıklı Eniyileme Yönteminin Karşılaştırılması	53
6.1 Simulink Yürüme Benzetimi	58
6.2 Yürüme Senkronizasyon Açısı	59
6.3 Referans Yörüngeler ve Eklem Açıları	59
6.4 Yörünge Takip Hata Değerleri	60
6.5 Eklem Faz Portreleri	60

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.6 Yavaş Yürümenin <i>Poincaré</i> Map Grafiği	61
6.7 Robot Yürüme Pozları	61
6.8 Hızlı Yürüme Eklem Açıları	62
6.9 Hızlı Yürüme Faz portreleri	62
6.10 Hızlı Yürümenin <i>Poincaré</i> Map Grafiği	63
6.11 Gövde Eğimi Etkisi	63
6.12 Robot Simscape Mekanik Modeli	64
6.13 Simscape Yürüme Animasyon Dizisi (0.2s aralıklı)	65
6.14 Yüzey ile Ayak Arasındaki Kuvvetler	66
6.15 Robot Kontrol Algoritması Çalışma Yerleri	67
6.16 Labview Arayüzleri	68
6.17 Yerel Kontrolcü Diagramı	69
6.18 Yerel Kontrolcü Pozisyon Takibi (osiloskop ölçeği: $1V \rightarrow 110deg$)	70
6.19 Yerel Kontrolcü Hız Takibi (osiloskop ölçeği: $1V \rightarrow 3600deg/s$)	71
6.20 Yerel Kontrolcü Akım Takibi (osiloskop ölçeği: $1V \rightarrow 1.2A$)	71
6.21 Robot Eklem Açıları	72
6.22 Robot Yürüme Videosu Fotoğrafları (0.4s aralıklı)	73
7.1 Aday Yörüngeye Göre Robot Hareketleri	75
7.2 Aday Yörüngelerin Zamana Göre Benzetim Sonucu	75
7.3 Aday Yörüngelerin Faz Portrelerinin Değişimi	76
7.4 Aday Yörüngelerin <i>Poincaré</i> Map Gösterimi	77
7.5 Senkron Açık Kontrol Şeması	77
7.6 Faz Kontrollü Yörünge Takibi Eklem Açıları Değişimi	78
7.7 Faz Kontrollü Yörünge Takibi Eklem Faz Portreleri	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.8 Faz Etkisi ile Artı Yönde Hız Kontrolü, Yürünen Yol ve Yürüme Hızı	79
7.9 Faz Etkisi ile Artı Yönde Hız Kontrolü, Senkron Açı ve Toplam	
Kinetik Enerji	80
7.10 Faz Etkisi ile Eksi Yönde Hız Kontrolü, Yürünen Yol ve Yürüme Hızı	81
7.11 Faz Etkisi ile Eksi Yönde Hız Kontrolü, Senkron Açı ve Toplam	
Kinetik Enerji	81
8.1 Hayvan Hareketinin Kontrol Şematığı (Ijspeert, 2008)	84
8.2 Van der Pol Osilatör μ 'ye Göre Değişimi	86
8.3 Van der Pol Osilatör p 'ye Göre Değişimi	86
8.4 Van der Pol Osilatör w 'ye Göre Değişimi	86
8.5 Hopf Osilatörünün ω 'ya Göre Değişimi	87
8.6 Hopf Osilatörünün μ 'ye Göre Değişimi	88
8.7 Bir Çift Matsuoka Osilatörden Oluşan CPG nöronu	89
8.8 Matsuoka CPG Nöronunun β 'ya Göre Değişimi	89
8.9 Matsuoka CPG Nöronunun τ_u ve τ_v 'ye Göre Değişimi	90
8.10 Matsuoka CPG Nöronunun Kazançlara Göre Değişimi	90
8.11 Matsuoka CPG Nöronunun u_e 'ye Göre Değişimi	90
8.12 Dört Nöronlu Tam Bağlantı Yapısı	91
8.13 Dört Nöronlu Tam Bağlantı Yapısı Sinyal Çıkışları	92
8.14 Dört Nöronlu Komşu Bağlantı Yapısı	93
8.15 Dört Nöronlu Komşu Bağlantı Yapısı Sinyal Çıkışları	93
8.16 İki Kademeli CPG Ağ Yapısı	94
8.17 Programlanabilir CPG Ağ Yapısı	95
8.18 Robot Modeli Temelli CPG Ağ Yapısı	95

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.19 CPG Ağının GA ile Eniyileme Grafiği	99
8.20 Test-1 Şartlarına Göre Eklem Açıları	100
8.21 Test-1 Şartlarına Göre Yürüme Pozisyonları	100
8.22 Test-2 Şartlarına Göre Eklem Açıları	101
8.23 Test-2 Şartlarına Göre Yürüme Pozisyonları	101



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Fiziksel Model Parametreleri	23
4.2 Planet Dişli, Harmonic Drive, Cycloid Dişli Avantaj ve Dezavantajları	27
4.3 Gartt 5010 Fırçasız DC Motor Parametreleri	30
5.1 Robot ve Yürüme Parametrelerinin ZMP'ye etkisi	44
5.2 Farklı robotlar için CoT değerleri	54
6.1 Temas Yüzeyi Özellikleri	65
8.1 Dört Nöronlu Tam Bağlantı Örnek Parametreleri	91
8.2 Dört Nöronlu Komşu Bağlantı Örnek Parametreleri	92
8.3 Matsuoka Nöron İç Parametreleri	97
8.4 GA Parametre Puanlama Tablosu	98
9.1 Yürüme Yöntemlerinin Karşılaştırılması	105

1 GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Robotik teknolojilerin gelişmesiyle beraber birçok hareketli robot üretilmiştir. Hareketli robotlar çok çeşitli formlarda olabilmektedir. Günlük hayatımızda sıklıkla karşılaştığımız bir türü, çeşitli boyutlardaki uçan insansız hava araçlarıdır. Fakat uçan araçların temel sorunu taşıma kapasitesi ve uçuş süresidir. Bu temel problemden dolayı karada ilerleyen araçlar avantaj kazanmaktadır. Kara araçlarının ise en çok tercih edilen formları tekerlekli araçlardır. Tekerlekli robotlar engebeli olmayan düz yollarda şüphesiz daha verimli olsa da, birçok ortam bu ideal şartlara yaklaşmamaktadır. İnsanlar olarak yaşadığımız ortamları, tekerlekli robotlar için büyük ölçüde uygun olmayacak şekilde yaratırız. Bu da tekerlekli robotların insanlara özgü tasarlanan ortamlarda verimsiz olmasına yola açar.

Kara araçları önceden belirlenmiş bir ortamda seyahat etmek için tasarlanmıştır, ancak bacaklı robotların tekerlekli robotlara göre daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, bu tür araçları çevreye uyarlama girişimlerine rağmen, tekerleklerin engebeli araziye uygun olmamasıdır. Bacaklı robotların avantajlı olmasının ilk nedeni, tekerlekli robotlarda gerekli olan sürekli destek poligonunun bacaklı robotlarda parçalı olabilmesidir. Destek tabanının değişken konfigürasyonu da esnekliğini arttırmaktadır. Ayrıca, bacaklar vücudun ayaklardan farklı bir yörünge boyunca hareket etmesini sağlayan yerleşik bir süspansiyon sistemi olarak da işlev görebilir. Bu sayede taşınan bir yükün yörüngesi ortamın pürüzlü ve engebeli olmasına rağmen düzgün olabilir. Bu nedenle, bacaklı robotların insan ortamlarında daha verimli ve çok yönlü olması doğaldır. Etrafımızda gördüğümüz birçok bacaklı robot örnekleri doğadan ilham alınarak robotik teknolojilerine aktarılmaktadır.

Bacaklı yürümeyi başlayabilen ilk makinelerden biri, 1969 yılında Mosher tarafından inşa edilen “*General Electric Quadruped*” olarak da bilinen dört ayaklı yürüyüş kamyonudur Mosher (1969). Bu araç, 3x3 m boyutunda ve 1400 kg ağırlığında olup, hidrolik eyleyiciler ile hareket ettirilmektedir. Bacakları kontrol eden on iki servo kontrolcü robotun üzerinde bulunan operatör ile kontrol edilebilmektedir. Robot 220 kg taşıma kapasitesine ve yaklaşık 2 m/s

azami hıza sahiptir. Dört bacaklı robotların önemi arttıkça endüstri odaklı birçok robot üretilmiştir. Yeni nesil bu robotlar yüksek enerji verimi, yüksek güç ve çevikliklerinin yanı sıra çevreyi algılayan sensörler ve yapay zeka algoritmaları sayesinde insan görevlerini üstlenebilmektedirler. Bazı dört ayaklı robotlar Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Dört Ayaklı Robotlar

Benzer şekilde iki ayaklı yürüyen robotlarda da tekerlekli robotlarla yarışacak şekilde başarılı modeller üretilmiştir. Bu alanda ilk üretilen modellerden birisi 1969 yılında üretilen WAP-1'dir. Kato tarafından yapılan çalışmaların geliştirilmesiyle WAP-3 iki ayaklı olarak üç boyutlu dünyada yürüyen ilk robot olmuştur Lim and Takanishi (2007). Bu öncü makinelere ek olarak, son yıllarda birçok başka prototip geliştirildi(Lim and Takanishi, 2007).

Bilimsel yazında, iki ayaklı yürüme robotlarının yapısı, serbestlik derecesi, yürüme yetenekleri veya iki ayaklı yürüyüşlerin kontrolü ve analizi bakımından farklılık gösteren birçok prototip üretildi. Üretilen modellerin en çok bilinenlerinden birisi ASIMO'dur. Honda yıllar içinde ASIMO robotunu sürekli geliştirmektedir. Gelişmiş dengeleme kapasitesi, dış ortam tanıma yeteneği ve operatörden bağımsız davranış belirleme yeteneği eklenmiştir. Teknik gelişmeler sayesinde ASIMO, merdivenlerden inip çıkabilmekte, ileri ve geri yürüyebilmekte, dans edebilmekte ve saatte 5 km hızla koşabilmektedir. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, ASIMO yaklaşık 130 cm boyunda ve 119 kg ağırlığındadır. Yaklaşık bir saatlik hareket süresi boyunca çalışabilmektedir (Sakagami et al., 2002).

Araştırma gruplarının geliştirdiği bazı robotlar 2015 yılında, Amerika Birleşik Devletleri Savunma Gelişmiş Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA), insan açısından tehlikeli olabilecek bir ortamda kurtarma görevlerini yerine getirebilen insansı robot geliştirmeyi amaçlayan “*DARPA Robotics Challenge*”



Şekil 1.2: ASIMO

adlı dünya çapındaki yarışmada boy göstermiştir. Yarışma kapsamında robotlara tamamlanması gereken görevler verilmiştir. Bu görevler; araç sürme, kapı açma ve içinden geçme, moloz üzerine ve merdivene çıkma gibi sekiz bölümden oluşmaktadır. Yarışmaya katılan 25 robottan sadece üçü bütün görevleri başarıyla yapabilmıştır.

Yarışmadan sekiz tam puanlardan birisi Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (KAIST) tarafından geliştirilen HUBO'dur. HUBO (KHR-3) 1,25 km/s hız ile kendi kendine yürüyebilmektedir. Beş parmak ve kırk bir eklemi bulunan insansı robot insanlara özgü işleri gerçekleştirebilmektedir. HUBO Şekil 1.3'te gösterilmiştir (Park et al., 2005).



Şekil 1.3: HUBO

Yüksek manevra kabiliyeti gösteren bir diğer robot ise Boston Dynamics tarafından üretilen ATLAS'tır. Robot düz olmayan zeminlerde de yürüyebilmekte, kutuları yerden kaldırmakta ve devrilirse kendi kendine ayağa kalkabilmektedir. ATLAS'ın öngörülemez bir zeminde yürüyebilmesi, teknoloji için önemli bir adımdır. ATLAS yaklaşık 160 cm boyunda, 165 kg ağırlığında ve 25 kg yük taşıyabilmektedir(Feng et al., 2014). ATLAS Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4: ATLAS

Yüksek başarı gösteren diğer bir robot ise Carnegie Mellon Üniversitesi Ulusal Robotik Mühendislik Merkezi tarafından üretilen CHIMP robotudur. CHIMP, karşılaşacağı engebeli araziye geçebilmek için kollarında ve bacaklarında paletler içermektedir. Robotun hem paletlerle yere yakın hem de gerektiğinde ayağa kalkmasına izin verecek şekilde bacaklı ve tekerlekli hareket etmesini sağlamaktadır. Robot bir operatör tarafından bilgisayar ile izlenebilmektedir. Buna ek olarak otonom hareket için kullanılan sensörler sayesinde ortamın üç boyutlu modeli çıkarılabilmekte ve operatör tarafından otonom kontrole de geçirilebilmektedir Atkeson et al. (2018). Chimp Şekil 1.5'te gösterilmiştir.

Endüstriyel uygulamalar hedeflenerek geliştirilen bir diğer robot ise Agility Robotics tarafından üretilen Cassie'dir. Cassie diğer robotlardan farklı olarak dinamik bir yürüyüşçüdür, yani görmeye alıştığımız kamera



Şekil 1.5: CHIMP

sensöründen gelen bilgilerine göre statik bir şekilde ilerleyen iki ayaklı robotlar yerine insanlar gibi dinamik yürüyüş sergilemektedir (Reher et al., 2019). Kontrol algoritmasındaki bu temel farklılık sayesinde daha kısa sürede adım atma kararı verebilmektedir. Agility Robotics Cassie'yi arama kurtarma ve felaketlerde yardımcı olabilmenin yanı sıra kargo teslimatları yapabilmesini de hedeflemiştir. Cassie Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6: CASSIE

Mobil robotlar alanında bir çok gelişme yaşandığı gözlemlenmektedir.

İnsanlara uygun tasarlanan şehirler ve fabrikalar gibi ortamlarda fiziksel güç gerektiren işler için iki ayaklı robotların uygun oldukları açık bir gerçektir. Fakat hem mekanik tasarım hem de kontrol algoritması geliştirmenin zorluğundan dolayı araştırmacılar için ilgi çekici başlıklardan olmaktadır.

1.2 Problem Tanımı

İki ayaklı robotların kullanılmasının birçok alanda yararı olması rağmen çözülmesi gereken temel problemleri vardır. Problemler, mekanik ve kontrol temelli olmak üzere iki bölüme ayrılabilir. Mekanik tasarım, uygun malzemenin belirlenmesi, model üretimi, robotun aktif kuvvetini ve tepki süresini etkilemektedir. Bunun yanı sıra mekanik tasarıma bağlı olarak eklem sertliğinin ayarlanabilmesi anlık tepkilere karşı dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

Kontrol problemi ise robotun yürümesi için başa çıkılması gereken en temel problemdir. Matematiksel denklemlerinden açıkça görülebileceği üzere sistem modeli doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Bacak yörüngeleri doğrusallaştırılabilir bölgenin dışındadır, bu sebepler yüzünden doğrusal olmayan dinamiklerin hesaba katılması gerekir. Ayrıca iki ayaklı yürüme dinamikleri, tek destekten çift desteğe ve tekrar tek desteğe geçerken süreksizlik oluşur. Sistem denklemleri sürekli olmadığından, Lyapunov fonksiyonlarının belirlenmesi veya diğer geleneksel tekniklerin uygulanması zordur. Kontrolcü tasarımının bu iki problemin üstesinden gelecek şekilde tasarlanması yine de robotun kararlı yürüyüşünü garanti etmez. Ancak eklemlerin yörüngeleri takip edeceğini garanti eder.

Yürüyen robotların eksik tahrikli sistem olmalarından dolayı her yörünge takip edilebilir değildir. Ancak belirli şartları sağlayan yörüngeler takip edilebilir. Bu yörüngelerin gerçek zamanlı veya ön tanımlı olarak belirlenmesi gerekir. Robotun yürüme başarısı hem yörünge planlama başarısına hem de yörünge takibine bağlıdır.

İki ayaklı yürüyen robotların tasarım ve kontrolü birçok zorlayıcı problemin birlikte çözümünü gerektirdiği için araştırmacılar tarafından farklı bakış açılarına göre çeşitli çözümler önerilmiştir.

1.3 Tez Katkısı

Bu çalışmada iki ayaklı düzlemsel beş bağı robotun dinamik yürüyüşü hedeflenmiştir. Bu kapsamda öncelikle matematiksel model belirlenerek yapılan benzetimler yardımıyla eklemlerin ihtiyaç duyduğu tork ve hız limitleri belirlenmiştir.

Matematiksel model ile uyumlu mekanik model tasarlanmıştır. Yüksek hız ve yüksek tork ihtiyacına uygun eklem yapısı tasarlanmış ve seri elastik eyleyici olarak üretilmiştir. Klasik motor-redüktör bağlantısından farklı olarak eklem kendisi redüktör olarak tasarlanmış ve bu sayede bütünleşik bir tasarım elde edilmiştir. Buna ek olarak eklem kuvvet aktarım bağlantılarının simetrik olması dengeli yük aktarımını sağlamaktadır. Tasarlanan robot mobil deney düzeneği olarak planlanıp farklı algoritmaların çalıştırılmasına imkan tanıyan esneklikte üretilmiştir.

Eksik tahrikli sistem olan yürüyen robotun yürümesini sağlayacak yörüngeler farklı en iyileme yöntemleri ile türetilip avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. Buna ek olarak, sabit zaman aralıklı yörünge eniyileme yöntemlerinin hatasını azaltacak değişken zaman aralıklı eniyileme yöntemi önerilmiş ve yürümeye olan etkisi karşılaştırılmıştır.

Yörüngelerin sanal kısıtlar yöntemiyle takip edilmesi sayesinde periyodik, kararlı dinamik yürüme sağlanmıştır. Fakat sanal kısıtlar yönteminin başlangıç değeri ve yörüngelere karşı duyarlı olması yöntemin zayıflığıdır. Çözüm olarak faz kontrolü olarak isimlendirdiğimiz yöntem önerilmektedir. Faz kontrolü yöntemi sayesinde senkron açının geri besleme ile değişken hızda hareketi gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede robotun yürüme hızının, herhangi bir yörünge eniyileme ihtiyacı duymadan ayarlanmasının yanı sıra başlangıç şartına ve yörüngelere karşı duyarlılığı da giderilmiş olmaktadır. Faz kontrolü sayesinde mantık çerçevesinde türetilen herhangi bir yörünge eksik tahrikli robota uygulanarak yürümesi sağlanabilmektedir. Hız kontrolünün yanı sıra negatif referans hız ile robotun ters yönde yürümesi de sağlanmaktadır. Önerilen bu yöntem sayesinde beş bağı iki ayaklı düzlemsel robotun dinamik yürümesi, hem eniyilemeye ihtiyaç duymadan hem de ayarlanabilen yürüme özelliklerine sahip olarak gerçekleştirilmiştir.

Farklı bir yaklaşımla yürüme kontrolü sağlayan merkezi örüntü üretici

yardımıyla da robotun yürümesi benzetim ortamında sağlanmıştır. Merkezi örüntü üretici de yürüme sırasında yürüyüş parametrelerinin değiştirilebilir olmasından dolayı tercih edilen bir yöntemdir. Fakat öncesinde ağ parametrelerinin belirlenmesi işlem yükü getirmesinin yanı sıra sezgisel kurallara dayalı belirlenen katsayılar beklenmedik sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Farklı kurallara göre elde edilen sonuçlar incelenerek önerdiğimiz yöntemle göre avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.

1.4 Organizasyon Planı

Bu tez giriş bölümü dahil toplam sekiz bölümden oluşmaktadır;

İkinci kısım olan "*LİTERATÜR ÖZETİ*" bölümünde yürüyen robotlar ve kontrolü hakkında literatürde bulunan çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir.

Üçüncü kısım olan "*İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELİ*" bölümünde tez kapsamında ele alınacak olan iki ayaklı dinamik yürüyen robotun temel özellikleri ve matematiksel modeli açıklanmıştır.

Dördüncü kısım olan "*MEKANİK MODEL TASARIMI*" bölümünde matematiksel model ile uyumlu mekanik modelin tasarımı, üretimi ve elektromekanik özellikleri açıklanmaktadır.

Beşinci kısım olan "*YÜRÜME YÖRÜNGE PLANLANMASI*" bölümünde iki ayaklı yürüyen robotun dinamik yürümesini sağlayacak yörüngelerin üretilmesi açıklanmaktadır.

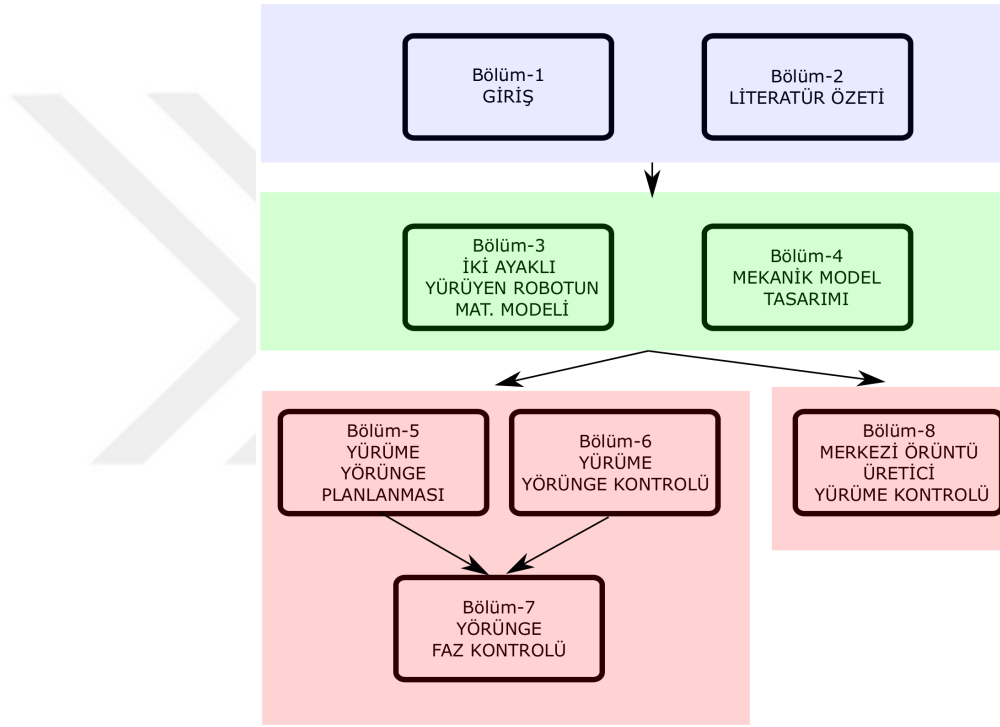
Altıncı kısım olan "*YÜRÜME YÖRÜNGE KONTROLÜ*" bölümünde eksik tahrikli sistem olan robotun belirlenen yörüngeleri takip etmesi için uygulanan sanal kısıtlar yöntemi açıklanmaktadır. Ayrıca bu yöntemin fiziksel model üzerinde test edilmesi ve fiziksel modele aktarılırken yapılan değişiklikler de açıklanmaktadır.

Yedinci kısım olan "*YÖRÜNGE FAZ KONTROLÜ*" bölümünde sanal kısıtlar yönteminin zayıf noktaları belirlenerek bu zayıflıklara çözüm olarak önerilen faz kontrol yöntemi ve faz kontrolü ile hız kontrolünün sağlanması açıklanmaktadır.

Sekizinci kısım olan "*MERKEZİ ÖRÜNTÜ ÜRETİCİ YÜRÜME KONTROLÜ*" bölümünde biyomimetik yaklaşım olan merkezi örüntü üretici ile

robotun yürüyüşünün sağlanması ve bu yöntemin avantaj/dezavantajları açıklanması yapılmaktadır.

Sekiz bölümden oluşan bu tez, mantıksal olarak üç seviyede incelenebilir. İlk seviye, konu hakkında genel bilginin verildiği Bölüm-1 ve literatür taramasının yapıldığı Bölüm-2'dir. İkinci seviye, robotun matematiksel denkleminin tanımlandığı Bölüm-3 ve fiziksel tasarım ile yürüme özelliklerinin anlatıldığı Bölüm-4'tür. Üçüncü seviye ise, farklı yöntemler ile robotun yürüyüşünün gerçekleştirildiği Bölüm-5, Bölüm-6, Bölüm-7 ve Bölüm-8'dir. Bölümlerin birbiri arasındaki ilişki Şekil 1.7'de gösterilmektedir.



Şekil 1.7: Bölümler Arası Bağlantı Şematifi

Matematiksel Gösterim: Tez çalışmasındaki matematiksel gösterim için genel bir simgelenim dikkate alınmıştır. Buna göre sayısal sabitler ve değişkenler; harf veya simgenin küçük veya büyük puntolarında, italik olarak (i , K , β) yazılmıştır. Vektörler ve vektörel değişkenler; harf veya simgenin, kalın ve küçük puntosunda (\mathbf{x} , $\boldsymbol{\phi}$, \mathbf{q}_s) yazılmıştır. Matrisler ve matrisel değişkenler ise; büyük harf veya simgenin, kalın puntosunda ($\boldsymbol{\Theta}$, $\boldsymbol{\Gamma}$) yazılmıştır. Skaler değerler italik iken vektörel ve matris değerler italik değildir. Vektörün veya matrisin devriği ise üstsimge "T" ile gösterilmektedir (D^T : D matrisinin devriği).

2 LİTERATÜR ÖZETİ

İki ayaklı yürüyen robotlar üzerinde yapılan çalışmalar farklı bakış açılarına sahiptir. İki ayaklı robotların model zorluğundan dolayı basitleştirilmiş modeller temel alınarak yürüme algoritmaları önerilmiştir.

Yürüme analizi için iki boyutlu modeller sıklıkla tercih edilmektedir. Hatta herhangi bir eyleyicisi olmayan çerçevesiz tekerlek (rimless wheel) pasif yürüyüşü çarpışma analizinde incelenen temel modeldir. Rimless wheel en basit pasif dinamik yürüteç olup her zaman asimptotik olarak kararlıdır. Bunun nedeni, asimptotik kararlılığı garanti etmek için otomatik olarak iki gerekli koşula ulaşmasıdır. Bunlar, çarpma duruşu üzerindeki kısıtlama ve restore edilmiş mekanik enerji üzerindeki kısıtlamadır. Bir serbestlik derecesine sahip katı gövde olarak yerçekimi etkisinde düşen yürüteç, potansiyel enerji kaybı yaşar. Kaybedilen potansiyel enerji kinetik enerji olarak modelin hareket etmesini sağlar. Fakat çarpışma sırasında kinetik enerji kaybı yaşanarak devrilme hızı belirli sınırlar arasında tutulabilmektedir (Asano, 2015; Gomes and Ahlin, 2015; Asano and Tokuda, 2015). Rimless wheel modeli kapsamında pürüzlü yüzey üzerinde de yürümeyi sağlayacak eğim gereksinimleri incelenmiştir. Belirli açıdaki eğimi ve belirli sayıdaki bacaklar için ortalama adım sayısı analiz edilmektedir (Vardhan Saloni, 2014).

Belirli bir eğim üzerinde pasif yürüyüşü gerçekleştirebilen rimless wheel'in düz yolda yürüyebilmesi için model değiştirilerek üç bağılı yürüyen robota çevrilebilmektedir. Pusula yürüyüşü (compass gait) modeli olarak da bilinen bu model düz yolda yürüme yeteneğine sahip en temel yürüyücüdür. İki bacaklı bu yürüyücü teorik olarak yürüme yetisine sahip değildir. Bacak boyları eşit olduğu ve diz eklemi bulunmadığı için salınım ayağı destek ayağının önüne geçememektedir. Fakat bacak boylarını değiştirecek eyleyiciler yardımıyla fiziksel olarak da yürümesi sağlanabilir (Boudali et al., 2017). Yapılan çalışmalarda hem teorik hem de fiziksel modeller üzerinde yürüme algoritmaları geliştirilmiştir. Yürüme algoritmalarında; PD (Proportional-Derivative) temelli yörünge takibi, limit çevrim ile periyodik kararlılık ve düz olmayan yollarda da yürüme yöntemleri incelenmektedir (Kolathaya, 2020; La Hera et al., 2013; Manchester et al., 2011).

İki boyutta tasarlanan bu robotların yanı sıra gerçek yürümeye en

yakın modeller diz eklemine sahip olan modellerdir. Beş bağı veya ayak bileği olduğu durumlarda yedi bağı olarak ele alınmaktadır. Beş bağı nokta ayaklı modelin toplam dört eklemi bulunmaktadır. Bir serbestlik dereceli eksik tahrikli sistemdir. Dinamik yürüme davranışı gösterilebildiği için sıklıkla incelenen bir modeldir. Bilimsel yazında, deneysel çalışmalar için tasarlanmış öne çıkan modellerden birisi AMBER'dir. AMBER1 61 cm boyunda ve toplam ağırlığı 3,3 kg'dır. Ağırlığı azaltmak için karbon fiber ve alüminyumdan imal edilmiştir. Dört DC motorla çalışmakta olup, *LabView* yazılımı tarafından kontrol edilebilmektedir. Nokta ayak ve bir koşu bandında yapılan yürüyüş ile dinamik robot yürüyüşü incelenmektedir (Yadukumar et al., 2012; Pasupuleti et al., 2012).

Bilimsel yazında öne çıkan diğer bir yürüme test platformu RABBIT'dir. Toplam ağırlığı 32 kg ve boyu yaklaşık 1.5 m olan RABBIT, taşıyıcı platform ile dengelenmektedir. Geri bildirim kontrolcü tasarımı, geleneksel olarak kullanılan yörünge izleme yönteminden farklıdır. Planlanmış bir yörüngeyi takip etmemektedir. Kontrol algoritması duruş prensibine dayanmaktadır, dizlerin göreceli açıları ve gövde ile bacaklar arasındaki göreceli açılar, duruş ayağına göre robotun kütle merkezinin açısının bir fonksiyonu olarak kontrol edilmektedir. Bu nedenle, kütle merkezi geriye doğru hareket ederse salınım ayağı geriye doğru, kütle merkezi öne doğru hareket ederse salıncak ayağı ileri doğru hareket ederek yerle temasa hazırlanır. Kontrolcü, osilatörlere benzer asimptotik olarak kararlı bir yörünge oluşturur, ancak darbelerden kaynaklanan ek gürültülerin bastırılması gereklidir. Kontrolcü ile robot, periyodik bir yörüngeye yaklaştırılmaktadır (Chemori and Alamir, 2006; Chevallereau et al., 2003).

Bilimsel yazında öne çıkan bu iki boyutlu test düzeneklerinin yanı sıra benzer modeller de araştırmacılar tarafından üretilip, yazılım geliştirme amaçlı kullanılmaktadır. Hız ayrışması temelli yürüme kontrolcüsü, gürbüz bileşik kontrolü ve gövde hareketiyle hızlı yürüme çalışmaları gösterilmiştir (Fevre et al., 2018; Arcos-Legarda et al., 2019; Bao and Geng, 2018).

Beş bağı yürüyen robot modelinin en büyük dezavantajı sadece iki boyutlu düzlemde yürüebilmesidir. Üç boyutlu uzayda yürüyebilmek için ayak ve ayak bileği de eklenmelidir. Üç boyutlu uzayda yürüyebilen en temel model

ise yedi bağılı robottur. Bilimsel yazında öne çıkan yedi bağılı robotlardan birisi AMBER Laboratuvarı tarafından üretilen AMBER2'dir. Altı DC motorla çalışan, dairesel bir taşıyıcı ile sınırlanan silindirik düzlem hareketine sahip bir robottur. Benzerlerine göre en büyük farkı topuk ve ayak parmağı eklemlerine sahip özel tasarlanmış ayaklar yapısıdır. Özellikle insan benzeri çoklu temaslı robotik yürüyüşe ulaşmak için kullanılmaktadır (Lack et al., 2014; Kolathaya et al., 2015; Lack, 2013).

Mekanik tasarımların yanı sıra bir çok kontrol yöntemi de önerilmektedir. Zero Moment Point (ZMP) algoritması, üzerine çok sayıda çalışma yapılmış bir yürüme algoritmasıdır. ZMP, aktif kuvvetlerin toplam momentlerinin sifira eşit olduğu yerdeki nokta olarak tanımlanır. ZMP, ayaklar ile zemin arasındaki tüm temas noktalarının dışbükey gövdesi içindeyse, dinamik olarak dengeli yürüme hareketi elde edilebilir (Olcaç and ÖZKURT, 2017). İnsan hareketinde, ZMP asla sabit bir konumda kalmaz, hareket yönünde ilerler. Bundan dolayı bazı araştırmacılar ZMP için yörünge belirleyip takibini sağlarken tek destek fazında destek ayağının altında sabit tutulmaya çalışıldığı uygulamalar yapmışlardır. İstenen ZMP referans yörüngesi, gerekli kalça veya gövde hareketini üretmek için kullanılır. ZMP referans yörüngelerini Fourier serisine dönüştürerek üst vücut hareketi oluşturmak için yöntem sunulmaktadır (Hashimoto et al., 2015). Basit ve etkili bir yürüyüş deseni sağlayan polinomal yörünge algoritması ile üst vücut yörüngesini ve ayak bileği/ayak parmağı ekleminin rotasyonunu ayarlayarak ZMP dengesi sağlanmaktadır (Panwar and Sukavanam, 2018).

Ayağı olmayan modellerde is ZMP yöntemi uygulanamamaktadır. Nokta ayaklı modeller için Hybrid Zero Dynamic (HZD) temelli yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. HZD, hibrit modelimizi daha düşük boyutlu bir uzay üzerinde yeniden tanımlamamızı sağlar. Daha düşük boyutlu bir model kullanmak, daha hızlı bir şekilde eniyileme yapılabilmesinin yanı sıra eksik tahrikli sistemi daraltılmış hareket alanında tam tahrikli sisteme dönüştürülmesini de sağlar (Westervelt et al., 2003; Hereid et al., 2015). HZD temelli farklı yaklaşımlar önerilmiştir. Bu yöntemler arasında; ayağın kaymasına göre robot dengesinin geri sağlanması (Trkov et al., 2019), Lyapunov temelli yaklaşım ile gürbüz kontrolcü tasarımı (Ames et al., 2014) ve bozucuların filtrelenmesine dayalı

yöntemler vardır (Post and Schmedeler, 2014).

ZMP veya HZD temelli yürüme algoritmalarında eklem yörüngelerinin türetilmesi gereklidir. Araştırmacılar kontrol algoritmalarının başarısını artırmak için yörünge eniyileme üzerine de çalışmalar yapmışlardır. Verimlilik açısından popüler olan, dinamik programlama (Kuindersma et al., 2016), iteratif doğrusal quadratic gaussian (Todorov and Li, 2005), sıralı doğrusal quadratic kontrol (Sideris and Bobrow, 2005) gibi algoritmalar yörünge eniyileme için önerilmektedir. Gerçek zamanlı hesaplamaya yakın, hızlı sonuçlar üretebilen bu yöntemler sayesinde önemli çözümler elde edilmiştir (Neunert et al., 2016; Hereid et al., 2016).

Doğrusal olmayan haritalama kapasitesi sayesinde yapay sinir ağları yürüme kontrolünde kullanılmaktadır. Sinir ağlarının adaptif parametre ayarı sayesinde yürüme yörünge takibinde klasik PI kontrolcülerine göre avantajlı sonuçlar elde edilebilmektedir (Li et al., 2016). Ayrıca yapay sinir ağlarının kendi öğrenen yöntemler ile desteklenmesi hem modelden hem de yoldan kaynaklanan belirsizliklerin giderilmesini sağlamaktadır (Sun et al., 2016; He et al., 2016).

İki ayaklı robotların yürüyüşünün gürültüye karşı sağlamlığını artırmak için öğrenme yöntemleri incelenmiştir. Öğrenme süreci, eğitim deneyimlerini önceden kullanmak yerine yürüme politikasını elde etmek için deneme yanılma yaklaşımına dayanır. Ajanlar tarafından toplanan deney verilerine göre çevre ile yapılan etkileşim politikası güncellenmektedir. Elde edilen deney verilerinin değerlendirilmesi için ZMP tercih edilen bir parametredir (Lee and Oh, 2009). Bunun yanı sıra yürümeyle ilgili özel değerlendirme kriterleri de uygulanmaktadır. Uzun süreli öğrenmenin ardından, sistem mevcut ortama uygun bir yürüyüş politikası geliştirmiş olmaktadır (Hwang et al., 2016).

Yürüme konusunda bir başka yaklaşım da biyomimetik çalışmalar ile önerilmiştir. Hayvanların sinir devreleri içinde ritmik örüntü üreticileri bulunduğu gözlemlenmiştir. Çevresel değişikliklerle başa çıkmak için kendi kendini tetikleyecek özelliklere sahip Merkezi Örüntü Üretici (Central Pattern Generator - CPG) denetleyicilerini araştırmak için birçok girişimde bulunulmuştur (Ijspeert, 2008; Nakanishi et al., 2004; Szczecinski et al., 2017). Düzlemsel iki ayaklı model için bir CPG kontrol yöntemi başarıyla uygulanmıştır. Eklem

aktivasyonu için kaslar, sinir osilatörler kullanılarak kontrol edilmektedir. Uygun sinirsel bağlantılar ve biyolojik temelli geri bildirim yolları ile birlikte istikrarlı iki ayaklı hareket ortaya konulmaktadır (Li et al., 2015). Basit sinir osilatörlerin ve bağlantılarının iki ayaklı hareket için yeterli olması şaşırtıcıdır. Bununla birlikte, parametrelerin belirlenmesi için ortaya konmuş kesin analitik bir yol yoktur. Osilatörün parametrelerini deneyerek ayarlamak için de çok çaba gerekmektedir. Bu nedenle, iki ayaklı hareket için CPG'nin parametrelerini eniyileme yapacak genetik algoritma temelli öğrenme yöntemleri önerilmektedir. Bu yöntemler, eniyileme çözümünü elde etmek için çok sayıda deneme yapmaktadır (Hong and Lee, 2016; Lu et al., 2018).



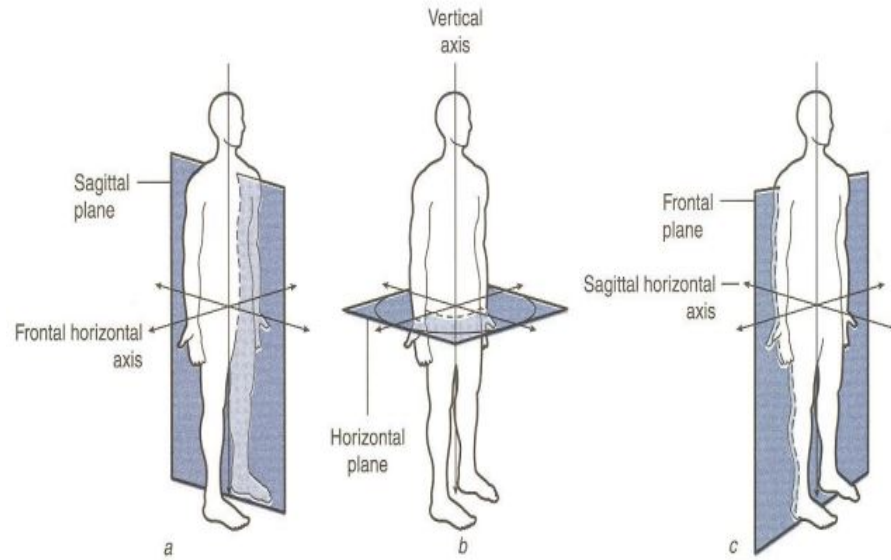
3 İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELİ

3.1 Giriş

Bu bölümde iki ayaklı düzlemsel robotun eksenleri, eklem-bağ yapıları ve genel davranışı açıklanarak salınım ve destek fazları için matematiksel modeli türetilmiştir.

3.2 Genel Bilgi

Yürüme, insanın konum değiştirmesinin en doğal yoludur. Yürüme sırasında duruş dengesi sağlanırken aynı zamanda vücudu ileri hareket ettirecek uzuvlar hareket ettirilir. Yürüme, beyin, omurilik, periferik sinirler, kaslar, kemikler ve eklemleri içeren periyodik ve karmaşık bir süreçten oluşmaktadır. Yürümenin dinamiği ve analizi incelenerek robotik uygulamalara aktarılabilir. Yürüyüş analizi, anatomi, fizyoloji ve biyomekanik yaklaşımların incelenmesiyle açıklanmaktadır.



Şekil 3.1: Vücut Anatomi Eksenleri (Behnke, 2012)

Anatomiye göre vücudun pozisyonu, Şekil 3.1'de gösterilen referans düzlemler ile tanımlanmaktadır (Behnke, 2012). "*Sagittal*" düzlem, vücudu sağ ve sol kısımlara, "*frontal*" düzlem ön ve arka bölümlere, "*transverse*" düzlem

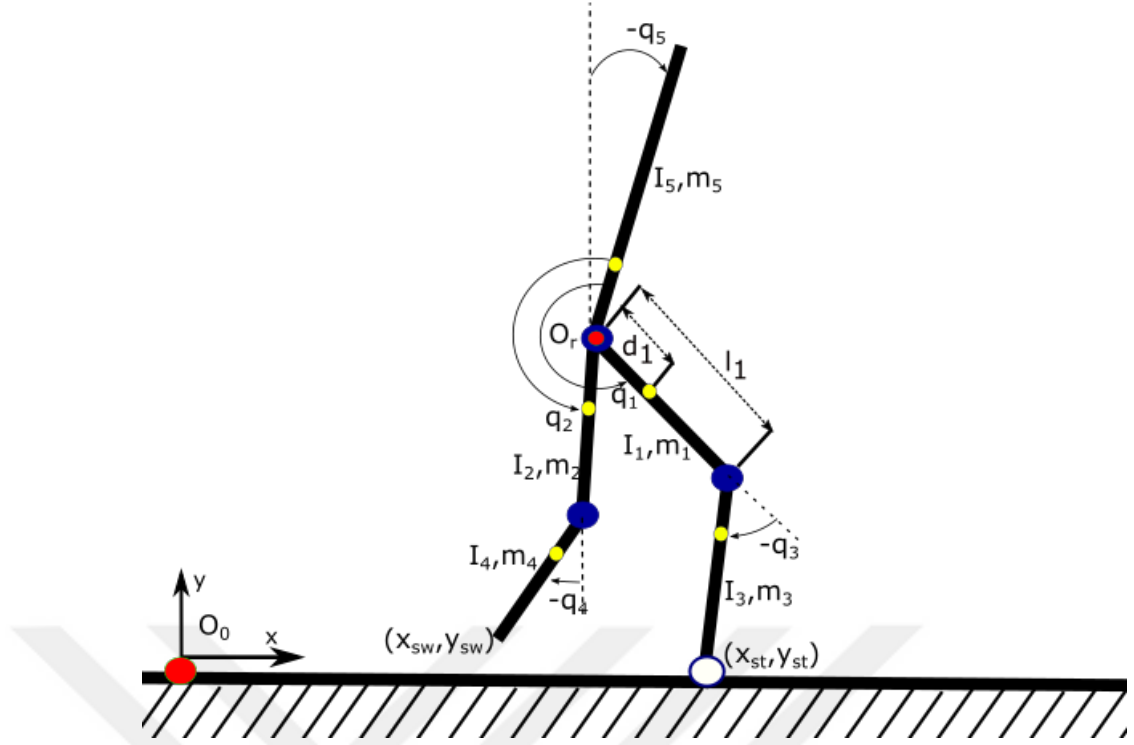
üst ve alt bölümlere ayırmaktadır. Yürüyüş sırasında; kemikler, eklemler ve kaslar hareketin temel yapısını oluştururken beyin, omurilik ve sinirler yürüyüşün kontrol merkezidir.

Tez kapsamında çalışılacak model sagittal düzlem üzerinde hareket edebilen iki ayaklı yürüyen robottur. Bu robotun beş bağı ve nokta şeklinde ayakları bulunmaktadır. Yürüme sırasında sadece bir ayak yer ile temas halindedir. Yer ile temas halinde olan bu ayak destek ayağı ve bu ayağa bağlı bacak destek bacağı olarak isimlendirilir. Diğer ayak ise yeni adım hedefine doğru salınım yaptığı için salınım ayağı ve bağlı bacak da salınım bacağı olarak isimlendirilir. Yürümenin temel dinamiklerini sergileyebilen bu robotun toplam beş bağı vardır. Bu bağlar gövde (torso), kalça kemiği (femur), kaval kemiği (tibia) olarak isimlendirilir. Salınım ayağı hedef adım noktasına ulaştığında anlık olarak iki ayak da yere temas halindedir. Bu duruma çift destek durumu denir. Çift destek durumu, daha önceden destek ayağı olan ayağın yerden kopması ve salınım ayağına dönüşmesiyle sonlanır. Ve tekrar yine sadece bir ayağın yere bastığı tek destek durumu fazına geçilmiş olur. Yürüme eylemi bu şekilde tek destek ve çift destek fazlarının peş peşe tekrarlanmasıyla sağlanır.

3.3 Kinematik Model

Robotta bulunan dört eyleyiciden ikisi kalça noktasında diğer ikisi ise diz eklemlerinde bulunmaktadır. Robot nokta ayaklı olduğu için ayak bileğinde herhangi bir eyleyici bulunmamaktadır. Eklemlerin ve bağların yerleşimi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Şekil 3.2'de kullanılan semboller;

- m_i : i'inci bağıın kütleini,
- l_i : i'inci bağıın uzunluğunu,
- d_i : i'inci bağıın ağırlık merkezinin bağılandığı ekleme uzaklığı,
- I_i : i'inci bağıın ataletini,
- q_i : i'inci eklemin açısını göstermektedir.
- O_o : sabit koordinat eksenlerini,
- O_r : robot koordinat eksenlerini göstermektedir.
- (x_{st}, y_{st}) : destek ayağıın uç nokta koordinatlarını,



Şekil 3.2: Robot Eklem ve Bağ Yerleşimi

- (x_{sw}, y_{sw}) : salınım ayağının uç nokta koordinatlarını göstermektedir.

Tek destek fazında gösterilen robotun kalça noktasında robot koordinat sistemi yerleştirilmiştir. Bu koordinat sistemine göre robotun üç kinematik zincirden oluştuğu görülmektedir. Torso tek bağdan oluşan açık uçlu, salınım bacağı iki bağdan oluşan açık uçlu ve destek bacağı ise iki bağdan oluşan sabitlenmiş uçlu zincirlerdir.

Destek ayağının uç noktası orijin olarak kabul edilmekte ve kalça noktasının koordinatları $hip := (hip_x, hip_y)$ olarak isimlendirilmektedir. Bağlı açılar $\mathbf{q}_s := [q_s(1), q_s(2), q_s(3), q_s(4), q_s(5)]$ ' robot modelinde gösterilmişlerdir. Bağlı açılara göre küresel açılar $\mathbf{q}_g \in R^{5 \times 1}$ Denklemler 1-5'te türetilmektedir.

$$q_g(5) = q_s(5) \quad (1)$$

$$q_g(1) = q_g(5) + q_s(1) \quad (2)$$

$$q_g(2) = q_g(5) + q_s(2) \quad (3)$$

$$q_g(3) = q_g(1) + q_s(3) \quad (4)$$

$$q_g(4) = q_g(2) + q_s(4) \quad (5)$$

Buna göre eklemlerin uç nokta ve ağırlık merkezi koordinatları Denklemler 6-15 ile hesaplanır.

$$\mathbf{torso}_{com} = \mathbf{hip} + d_{MT} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(5)) \\ \cos(q_g(5)) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{torso}_{tip} = \mathbf{hip} + l_T \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(5)) \\ \cos(q_g(5)) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{femurST}_{com} = \mathbf{hip} + d_T \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(1)) \\ \cos(q_g(1)) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{femurST}_{tip} = \mathbf{hip} + l_T \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(1)) \\ \cos(q_g(1)) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{tibiaST}_{com} = \mathbf{femurST}_{tip} + d_{Mt} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(3)) \\ \cos(q_g(3)) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{tibiaST}_{tip} = \mathbf{femurST}_{tip} + l_t \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(3)) \\ \cos(q_g(3)) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{femurSW}_{com} = \mathbf{hip} + d_{Mf} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(2)) \\ \cos(q_g(2)) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{femurSW}_{tip} = \mathbf{hip} + l_f \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(2)) \\ \cos(q_g(2)) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{tibiaSW}_{com} = \mathbf{femurSW}_{tip} + d_{Mt} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(4)) \\ \cos(q_g(4)) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{tibiaSW}_{tip} = \mathbf{femurSW}_{tip} + l_t \cdot \begin{bmatrix} -\sin(q_g(4)) \\ \cos(q_g(4)) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Yürüyen robotlar çevre ile etkileşim halinde oldukları için matematiksel modelleri süreksizlik içermektedir. Dolayısıyla hem sürekli zaman denklemlerinin hem de süreksizlik denklemlerinin elde edilmesi gereklidir. İki denklem kümesi birleştirilerek hibrit sistemin matematiksel modeli elde edilebilir.

3.4 Dinamik Model

Tek destek fazında robotun sürekli zaman denklemleri Lagrange yöntemiyle elde edilmektedir. Mekanik sistemlerin Lagrange fonksiyonu \mathcal{L}_s , toplam kinetik enerji K_s ve toplam potansiyel enerji V_s 'in farkı olarak Denklem 16'da

yazılmaktadır.

$$\mathcal{L}_s(q_s, \dot{q}_s) = K_s(q_s, \dot{q}_s) - V_s(q_s) \quad (16)$$

Mekanik modelin toplam kinetik ve potansiyel enerjileri bağların ağırlık merkezlerine göre Denklem 17 ve 18'de yazılmaktadır.

$$K_s = \sum_{N=5}^{i=1} \frac{1}{2} \dot{q}_s^T \left[m_i \left(\frac{\partial d_i}{\partial q_s} \right)^T \left(\frac{\partial d_i}{\partial q_s} \right) + I_i \left(\frac{\partial q_{gi}}{\partial q_s} \right)^T \left(\frac{\partial q_{gi}}{\partial q_s} \right) \right] \dot{q}_s \quad (17)$$

$$V_s = \sum_{N=5}^{i=1} m_i g d_i \quad (18)$$

Lagrange fonksiyonunun ilgili türevlerinin farkı Denklem 19'da yazıldığı gibi toplam tork ve kuvvetler vektörüne eşittir. Toplam tork ve kuvvetler vektörü olarak $\mathbf{\Gamma}$ tanımlanmaktadır.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}_s}{\partial \dot{\mathbf{q}}_s} - \frac{\partial \mathcal{L}_s}{\partial \mathbf{q}_s} = \mathbf{\Gamma} \quad (19)$$

Buna göre ikinci merteye diferansiyel denklem, Denklem 20'deki şekilde yazılabilir.

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}_s) \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{C}(\mathbf{q}_s, \dot{\mathbf{q}}_s) \dot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{G}(\mathbf{q}_s) = \mathbf{\Gamma} \quad (20)$$

Mekanik sistemlere özgü özelliklerden yararlanarak sistem matrisleri kolaylıkla belirlenebilir Westervelt et al. (2018). Kinetik enerji quadratik olarak Denklem 21'deki gibi yazılabilir, ve bu sayede $\mathbf{D}(\mathbf{q}_s)$ matrisi belirlenebilir.

$$K(q_s, \dot{q}_s) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_s^T \mathbf{D}(\mathbf{q}_s) \dot{\mathbf{q}}_s \quad (21)$$

Yer çekiminden kaynaklanan potansiyel enerjiye göre $\mathbf{G}(\mathbf{q}_s)$ matrisi Denklem 22'deki şekilde yazılmaktadır.

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}_s) = \frac{\partial V(\mathbf{q}_s)}{\partial \mathbf{q}_s} \quad (22)$$

\mathbf{C} matrisi, \mathbf{D} matrisinin belirlenmesinin ardından Denklem 23'e göre belirlenmektedir. Denklem 23 ile birden fazla \mathbf{C} matrisi elde edilebilir. Genel olarak çözüm, Denklem 24'teki gibi bulunabilir.

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}_s, \dot{\mathbf{q}}_s) \dot{\mathbf{q}}_s = \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_s} (\mathbf{D}(\mathbf{q}_s) \dot{\mathbf{q}}_s) \right) \dot{\mathbf{q}}_s - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_s} (\mathbf{D}(\mathbf{q}_s) \dot{\mathbf{q}}_s) \right)^T \dot{\mathbf{q}}_s \quad (23)$$

$$C_{kj} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \left(\frac{\partial D_{kj}}{\partial q_{s_i}} + \frac{\partial D_{ki}}{\partial q_{s_j}} - \frac{\partial D_{ij}}{\partial q_{s_k}} \right) \dot{q}_{s_i} \quad (24)$$

Robotun her ekleminde eyleyici bulunmamaktadır. Bu kapsamda $\mathbf{u}=[u_1; u_2; u_3; u_4]$ kontrol girişlerine göre $\mathbf{\Gamma}$, Denklem 25 ve 26'da yazılmıştır.

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{B}_s \mathbf{u} \quad (25)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{4 \times 4} \\ \mathbf{0}_{1 \times 4} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (26)$$

Denklem 20'de yazılan ikinci derece diferansiyel denklem aşağıdaki gibi durum uzay yapısında yeniden yazılabilir.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q})[-\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{B}\mathbf{u}] \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (28)$$

Tek destek fazında dinamik modeli türetilen beş bağılı iki ayaklı robotun Denklem 27'de tanımlanan sistem matrislerinin elde edilmesini sağlayan *Matlab* dosyası ve elde edilen matrisler Ek-A'da verilmiştir.

3.5 Çarpışma Modeli

İki ayaklı robot tek destek noktası üzerinde hareket ederken dinamik modele göre tanımlanmış olan denklemleri sağlamaktadır. Fakat bu faz salınım ayağının yer ile temas etmesiyle sonlanmaktadır. Salınım ayağı yer ile temas ettiği anda ayak ile zemin arasında çarpışma meydana gelir. Yaşanan çarpışmada enerjinin korunumu geçerli olmamasına rağmen momentumun korunumu geçerlidir. Çarpışma anı anlık bir eylem olarak kabul edilmektedir. Çarpışmanın t^- anında yere basan ayak önceki adımın destek ayağı iken t^+ anda yeni adımın salınım ayağı olmaktadır. t^+ anında başlangıç hızları hesaplanıp sistem değişkenlerine yüklenmektedir. Sistem değişkenlerine yeni değer yüklemek süreksizliğe yol açmakta ve robotun modelinin hibrit sistem olmasına neden olmaktadır (Hurmuzlu and Marghitu, 1994).

Çarpışma noktasının koordinatları $\mathbf{p}_e = (p_{e_x}, p_{e_y})'$ dir. Robot eklemlerine çarpışma uç noktası koordinatları da eklenerek yeni değişkenler $\mathbf{q}_e = (q_s; p_e)$ olarak elde edilir. Çarpışma anı anlık dürtü olarak modellenmekte ve dinamik

denkleme δF_{ext} kuvvet/tork girişi olarak eklenmektedir.

$$\mathbf{D}_e(\mathbf{q}_e)\ddot{\mathbf{q}}_e + \mathbf{C}_e(\mathbf{q}_e, \dot{\mathbf{q}}_e)\dot{\mathbf{q}}_e + \mathbf{G}_e(\mathbf{q}_e) = \mathbf{B}_e(\mathbf{q}_e)\mathbf{u} + \delta\mathbf{F}_{ext} \quad (29)$$

Denklem 29 sadece anlık tepki süresince geçerlidir. Bu süre boyunca alınan integral ile Denklem 31 elde edilir.

$$\int_{t^-}^{t^+} \left(\mathbf{D}_e(\mathbf{q}_e)\ddot{\mathbf{q}}_e + \mathbf{C}_e(\mathbf{q}_e, \dot{\mathbf{q}}_e)\dot{\mathbf{q}}_e + \mathbf{G}_e(\mathbf{q}_e) - \mathbf{B}_e(\mathbf{q}_e)\mathbf{u} \right) d\tau = \int_{t^-}^{t^+} \delta\mathbf{F}_{ext} d\tau \quad (30)$$

$$\int_{t^-}^{t^+} \left(\mathbf{D}_e(\mathbf{q}_e)\ddot{\mathbf{q}}_e d\tau \right) + \int_{t^-}^{t^+} \left(\mathbf{C}_e(\mathbf{q}_e, \dot{\mathbf{q}}_e)\dot{\mathbf{q}}_e + \mathbf{G}_e(\mathbf{q}_e) - \mathbf{B}_e(\mathbf{q}_e)\mathbf{u} \right) d\tau = \int_{t^-}^{t^+} \delta\mathbf{F}_{ext} d\tau \quad (31)$$

$$\left(\mathbf{D}_e(\mathbf{q}_e^+)\dot{\mathbf{q}}_e^+ - \mathbf{D}_e(\mathbf{q}_e^-)\dot{\mathbf{q}}_e^- \right) + \int_{t^-}^{t^+} \left(\mathbf{C}_e(\mathbf{q}_e, \dot{\mathbf{q}}_e)\dot{\mathbf{q}}_e + \mathbf{G}_e(\mathbf{q}_e) - \mathbf{B}_e(\mathbf{q}_e)\mathbf{u} \right) d\tau = \mathbf{F}_{ext} \quad (32)$$

Çarpışma süresi anlık kabul edildiğinden dolayı $d\tau := 0$ olarak değerlendirilebilir. Bundan dolayı Denklem 31'de eşitliğin sol tarafındaki ikinci integralin sonucunu sıfır kabul edilebilmektedir. $\dot{\mathbf{q}}_e^+$, çarpışma hızının çarpışma sonrası zamanını, $\dot{\mathbf{q}}_e^-$ ise çarpışma öncesi hızını göstermektedir. Çarpışma anında robotun kinematik pozisyonları değişmediği için $\mathbf{q}_e^+ = \mathbf{q}_e^-$ 'dir. Buna göre çarpışma öncesi ve sonrası hız arasındaki ilişki Denklem 33'te verilmiştir.

$$\mathbf{D}_e(\mathbf{q}_e^+)\dot{\mathbf{q}}_e^+ - \mathbf{D}_e(\mathbf{q}_e^-)\dot{\mathbf{q}}_e^- = \mathbf{F}_{ext} \quad (33)$$

Çarpışma sonrasında salınım ayağına dönüşen ayağın yerden kalkması sırasında zeminle etkileşimi olmadığı ve yeni destek ayağının kaymadığı kabul edilmiştir. Salınım ayağının uç noktasına çarpışma anında etki eden toplam kuvvet, sanal iş prensibine (ing. principle of virtual work) göre Denklemler 34-35 ile yazılmaktadır.

$$\mathbf{E}_2(\mathbf{q}_e^-) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_e} \mathbf{p}_e \quad (34)$$

$$\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{E}_2(\mathbf{q}_e^-)' \mathbf{F}_2 \quad (35)$$

$$\mathbf{E}_2(\mathbf{q}_e^-)\dot{\mathbf{q}}_e^+ = 0 \quad (36)$$

Üstte $\mathbf{F}_2 = (F_2^T; F_2^N)$, salınım ayağına etki eden kuvvettir. Denklem 36 ile

Denklem 33'ün tek denklem altında birleştirilmesiyle Denklem 37 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} D_e(q_e^-) & -E_2(q_e^-)' \\ E_2(q_e^-) & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_e^+ \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e(q_e^-) \dot{q}_e^- \\ \mathbf{0}_{2 \times 1} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Denklem 37'nin çözümüne göre \dot{q}_e^+ , Denklem 38'de bulunabilmektedir.

$$\dot{q}_e^+(q_s^-) = D_e^{-1} E_2' \Delta_{F_2} + \dot{q}_e^- \quad (38)$$

$$\Delta_{F_2} = -(E_2 D_e^{-1} E_2')^{-1} E_2 \begin{bmatrix} I_{5 \times 5} \\ \frac{\partial}{\partial q_s} p_e \end{bmatrix} \quad (39)$$

3.6 Hibrit Model

Yürüyen robot modeli süreksizlikler barındırdığı için öncelikle tek destek noktası için dinamik model Denklem 27'deki yapıda elde edilmiştir. Tek destek fazının bitmesiyle yaşanan süreksizlik ve buna bağlı olarak hız vektörünün yeniden hesaplanması Denklem 38'e göre belirlenir. Sürekli ve süreksiz zaman denklemlerin birleştirilmesiyle hibrit model elde edilir.

$$\sum : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})\mathbf{u} & \mathbf{x}^- \notin S \\ \mathbf{x}^+ = \Delta(\mathbf{x}^-) & \mathbf{x}^- \in S \end{cases} \quad (40)$$

$\Delta(\mathbf{x}^-)$ çarpışma dönüşüm matrisidir.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\Delta(\mathbf{x}^-) = \begin{bmatrix} Rq_s^- \\ [R \quad \mathbf{0}_{5 \times 2}] \dot{q}_e^+(q_s^-) \end{bmatrix} \quad (42)$$

S yürüme yüzeyi düz yol olarak kabul edilmesi durumunda salınım ayasının yüksekliğinin sıfır olmasıyla belirlenir ve bu bilgiye göre tetiklenir. Fakat benzetim ve gerçek uygulamalar için bu bilgi yerine ayaklardan alınacak sensör bilgileri kullanılmaktadır.

4 MEKANİK MODEL TASARIMI

4.1 Giriş

Bu bölümde matematiksel model ile uyumlu olan fiziksel modelin tasarım ve üretim basamakları anlatılmaktadır. Robotun hareketi için en önemli kısım olan eklemlerin elektro-mekanik özellikleri, motor kontrolü için tasarlanan sürücü ve sensör kartlarının özellikleri, dağıtılmış işlemciler arasındaki haberleşme protokolünün avantaj/dezavantajları ve son olarak test platformunun özellikleri detaylı olarak açıklanmaktadır.

4.2 Genel Bilgi

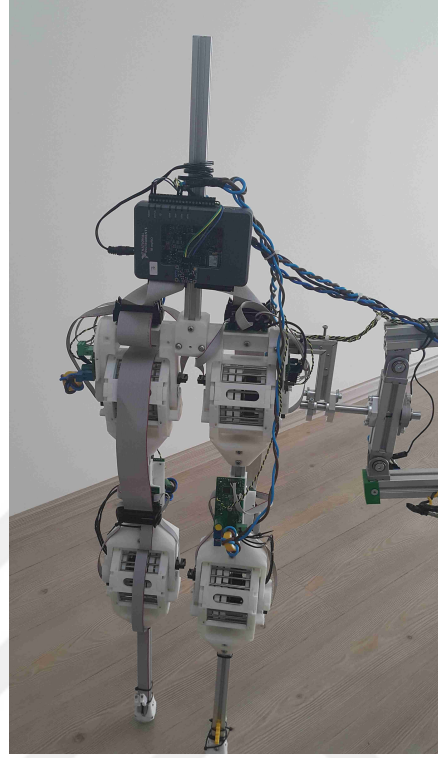
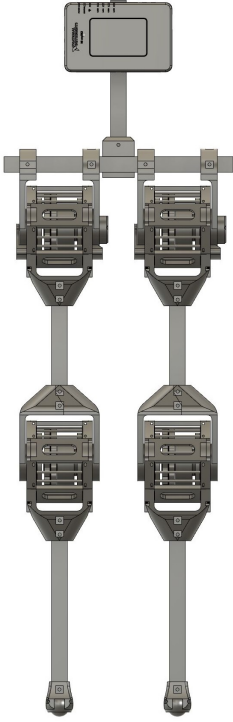
Model düşey eksene göre simetrik tasarlanmış olup toplam dört eklemi vardır. Her bir eklem aynı güç ve hız profiline sahip olarak üretilmiş olup, diz veya kalça eklemi olmasına göre farklı bağlantı yapıları göstermektedir. Fiziksel model parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Fiziksel Model Parametreleri

Bağ Tanımı	Parametre Tanımı	Parametre Değeri
Gövde (Torso)	Ağırlık	1.45kg
	Toplam uzunluk	0.4m
	Ağırlık merkezi uzaklığı	0.18m
	Atalet	0.0470kgm ²
Üst Bacak (Femur)	Ağırlık	1.10kg
	Toplam uzunluk	0.33m
	Ağırlık merkezi uzaklığı	0.12m
	Atalet	0.0158kgm ²
Alt Bacak (Tibia)	Ağırlık	0.80kg
	Toplam uzunluk	0.33m
	Ağırlık merkezi uzaklığı	0.12m
	Atalet	0.0115kgm ²

Bağlantı parçaları ve eklem tasarımları *Fusion 360* programında modellenip üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Bunun dışında kalan torso, tibia ve

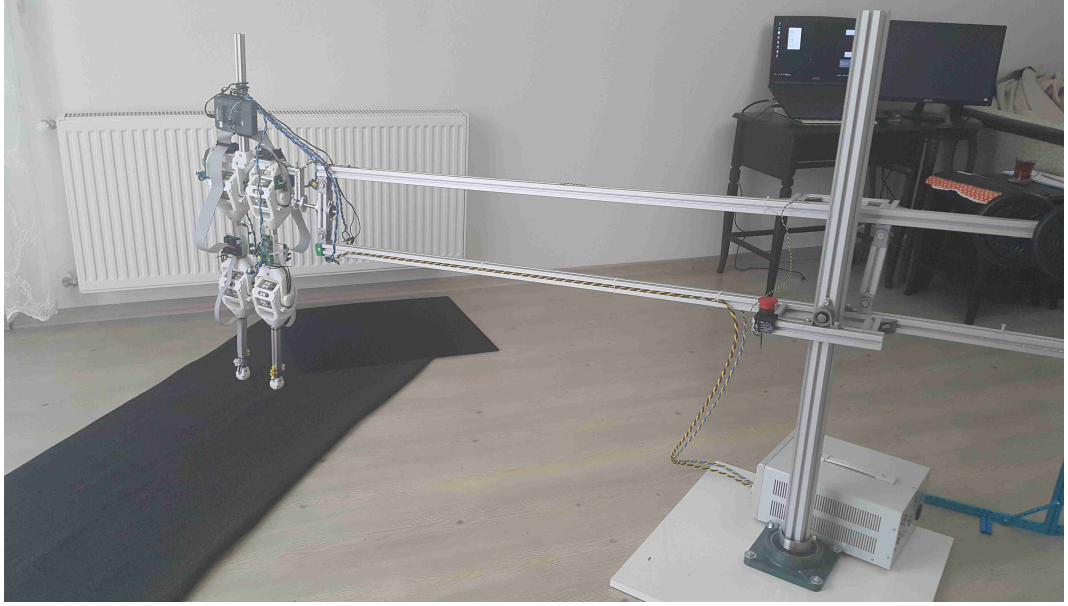
femur bağları için sigma profil kullanılmıştır. İki ayaklı yürüyen robotun CAD çizimleri Şekil 4.1a'da, üretilmiş model Şekil 4.1b'de ve test platformunun resmi Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



(a) İki Ayaklı Robot CAD Çizimi (b) İki Ayaklı Robot Fiziksel Modeli

Şekil 4.1: İki Ayaklı Robot Test Modeli

MyRio merkez kontrol kartı olarak kullanılmıştır. MyRio kartında bulunan Xilinx ZYNQ çip sayesinde FPGA ile yüksek hızlı işlemler gerçekleştirilirken gerçek zamanlı işlemci ile kontrol algoritması ve uzak bilgisayarla veri aktarımı sağlanmaktadır. Yerel kontrol kartı olarak hazırlanan fırçasız DC motor sürücü kartı, sensörler ve taşıyıcı platformun detayları bu bölüm altında detaylı açıklanmaktadır.

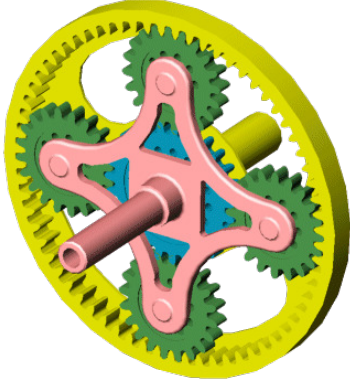


Şekil 4.2: İki Ayaklı Robot Test Düzenegi

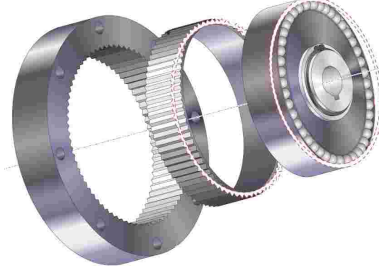
4.3 Eklem Tasarımı

Robot hareketinin başarılı olabilmesi eklemlerin istenildiği gibi çalışabilmesine bağlıdır. Bunun için eklem ters tepkisinin sıfıra yakın olması ve hassas kontrol edilebilmesi istenilir. Ters tepki, mekanik bir sistemin herhangi bir parçasının, bir sonraki parçaya kayda değer kuvvet veya hareket uygulanmadan hareket ettirebileceği maksimum mesafe veya açı olarak tanımlanabilir. Genellikle mekanik sistemlerdeki dişlilerden kaynaklanmaktadır. Ters tepki değeri büyüdükçe kontrol edilemeyen bölge artacaktır. Bu da hassas kontrolü engelleyecektir. Çözüm olarak robotik uygulamalarda klasik redüktör mekanizmaları yerine düşük ters tepki değeri sunan redüktörler tercih edilmektedir. Bundan dolayı robotik uygulamalarda Harmonic drive, planet dişli ve cycloid dişli sıklıkla kullanılmaktadır. Redüktörlerin mekanik yapıları Şekil 4.3'te gösterilmektedir.

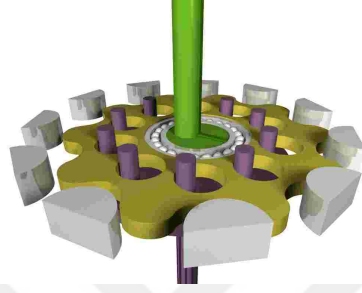
Planet dişli mekanizması, merkez dişli etrafına dizilmiş olan dişlilerden ve bütün dişlileri çevreleyen halka dişliden oluşmaktadır. Güneş olarak isimlendirilen merkez dişli redüktör girişidir. Gezegen olarak isimlendirilen dişlilerini merkezlerini birleştiren parça ise redüktör çıkışıdır. Planet dişli yüksek güç aktarım özelliğine sahip olsa da dönüşüm oranı Harmonic drive ve Cycloid dişli kutusuna göre düşük kalmaktadır. Harmonik dişli, güç aktarımını flex spline parça üzerinden yapmaktadır. Aralarında bir veya iki gibi az sayıda



(a) Planet Dişli (Mathworks, 2011)



(b) Harmonic Drive (Toulas, 2018)



(c) Cycloid Dişli (Wikipedia, 2018)

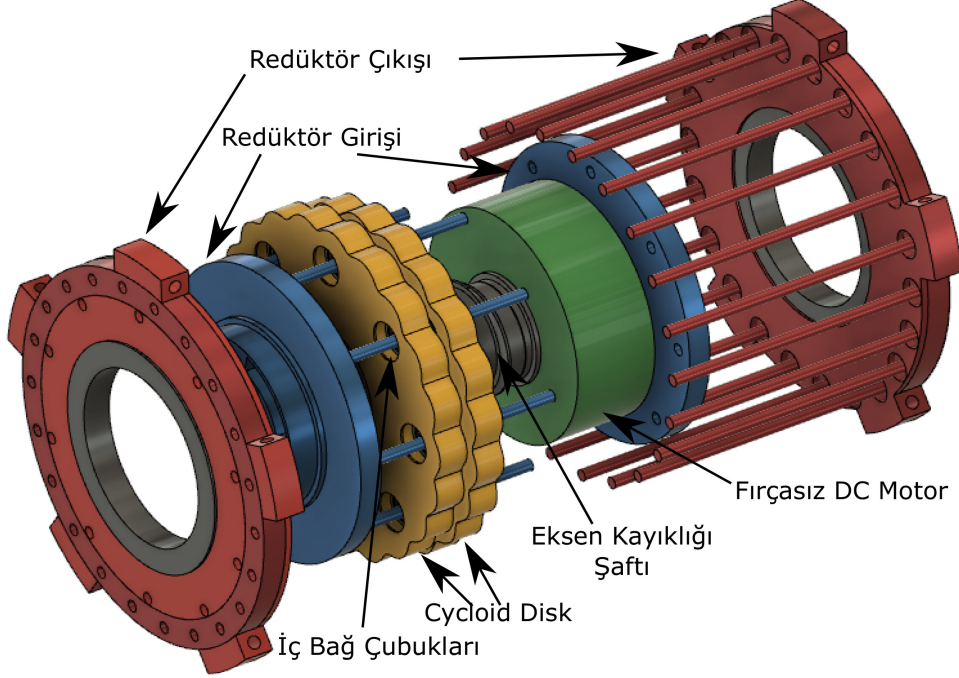
Şekil 4.3: Robotik Sistemlerde Kullanılan Redüktörler

dişli sayısı farkı olan iki dişli diskinin birbiri üzerinde kaymasıyla oluşan fark redüktörün dönüş oranını belirler ve dar alanda yüksek dönüşüm oranı sağlayabilmektedir. Fakat esnek parçanın üretimi ve yüksek güç aktarımında dayanıksız olması temel problemlerindendir. Cycloid dişli ise giriş shaftı etrafında sanal bir dairenin döndürülmesiyle oluşan yüzey üzerinde hareket etmektedir. Belirlenen yüzey üzerinde hareket edecek olan disklerin fiziksel sınırları çıkış shaftının pinleri ileri oluşturulmaktadır. Cycloid dişli, harmonik drive kadar yüksek dönüşüm oranlarına çıkamasa da yüksek güç aktarımı ve görece daha dayanıklı olmalarından dolayı tercih edilmektedir. Sıklıkla kullanılan üç redüktörün özellikleri Çizelge 4.2'de karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 4.2: Planet Dişli, Harmonic Drive, Cycloid Dişli Avantaj ve Dezavantajları

	Redüktörün avantajları	Redüktörün dezavantajları
Planet Dişli	<ul style="list-style-type: none"> * Kompakt boyut ve hafiflik * Yüksek güç yoğunluğu * Yüksek hassaslık ve düşük diş boşluğu * Çevrim oranı 3:1'den 1:10'a kadar değişebilmesi * Modüler yapı ile seri bağlanabilme 	<ul style="list-style-type: none"> * Gürültülü çalışma * Dişiler arasında dengesiz güç dağılımı olabilir * Rulman kuvveti fazla olduğu için erken bozulabilir. * Yüksek çevrim oranı gerektiğinde uzun yapı oluşturur. * Uzun ömürlü ve düşük diş boşluğu özelliğine sahip olanlar yüksek maliyete neden olur.
Harmonic Drive	<ul style="list-style-type: none"> * Konumsal doğruluk ve tekrarlanabilirlik * Yüksek tork kapasitesi * Tek kademeli yüksek çevrim oranı * Sıfır backlash * Yüksek verim * Geri sürülebilirlik 	<ul style="list-style-type: none"> * Esnek yapısı * Rezonans titreşimi * Mekanik şoklar ve burkulmadan dolayı zaman içinde bozulma
Cycloid Dişli	<ul style="list-style-type: none"> * Sıfır veya çok düşük backlash, redüktörün ömrü boyunca nispeten sabit kalır. * Kayar kontak yerine yuvarlanmalı kontak * Düşük aşınma * Ani yük şoklarına karşı dayanıklıdır. * Yassı ve kompakt tasarımı * Düşük hacimde yüksek çevrim oranı (200: 1'i aşan oranlar) * Sessiz çalışma 	<ul style="list-style-type: none"> * Yüksek maliyet * Tork ve hız dalgalanması yaratabilir. * Kütle dengesizliği oluşabilir.

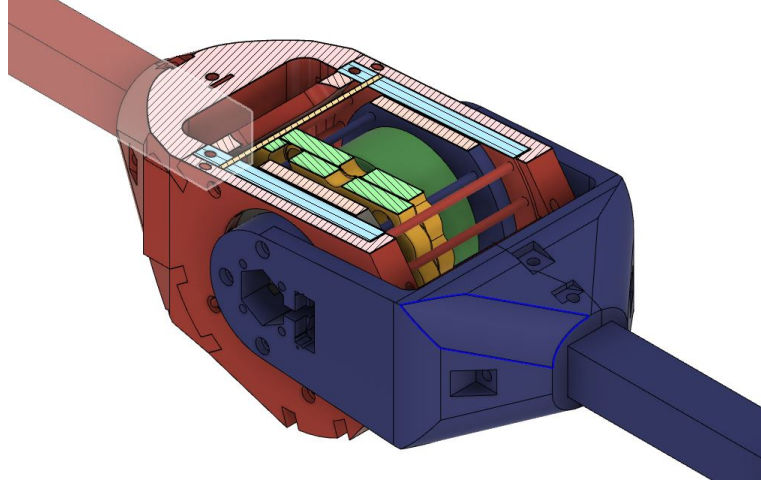
Çizelge 4.2'de yapılan karşılaştırmaya göre iki ayaklı yürüyen robot tasarımı için cycloid dişlinin uygun olduğu görülmektedir. Eklem tasarımı için motor ve redüktörün iç içe konumlandırıldığı bütünleşik bir tasarım uygulanmıştır. Şekil 4.4'te redüktör tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Bütünleşik Eklem tasarımı

Motor (yeşil), giriş şaftına (gri) direkt bağlanmaktadır. Giriş şaftı $0.5mm$ eksen kaçıklığı olan iki daireden oluşmaktadır ve bu iki daireye cycloid diskler (sarı) yerleştirilmiştir. Birbirine zıt eksen kaçıklığı ile yerleştirilen diskler olası sarsıntıları ve tek noktadan dokunmayı azaltarak dengeli yük aktarımı sağlamaktadır. Disklerin dönme alanını kısıtlamak için sekiz adet iç çubuk (mavi) kullanılmıştır. İç çubuklar karşılıklı olarak motorun monte edildiği (mavi) kısım ile birleştirilmiştir. İç çubukların, disk dönüşünü sınırlamasıyla diskler merkez eksen etrafında dönemeyip iç çubuklar etrafında dönerler. Bu dar alandaki dönüş dış çubuklar (kırmızı) ile oluşturulan yüzeye aktarılır. Motorun bir turluk dönüşü, disklerin eksen kaçıklığı olan şaft etrafında bir tur dönüşü anlamına gelir. Eksen kaçıklığı olan şaft etrafında yapılan bir turluk dönüş ise dış çubuklar arasında bir adım ilerleme sağlar. Bu sayede motor dönüşü dış çubuk sayısı oranında yavaşlatılmış olmaktadır. Tasarımda redüktör çevrim oranı $44 : 1$ olarak belirlenmiştir. Dış çubuklar redüktör çıkışıyla, iç çubuklar ise redüktör girişiyle birleştirilmiştir. Bu sayede eklem giriş ve

çıkışları simetrik olarak tasarlanmaktadır. Örnek olarak diz eklemi Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5: Eklem Bağlantı Örneği

Eklem tasarımında önem taşıyan bir diğer parametre de eklem sertliğidir. Genel olarak bir eyleyici ile yük arasındaki bağlantının mümkün olduğunca sert olması istenmektedir. Buna rağmen, bağlantı sertliğinin azaltılması, daha fazla şok toleransı, daha düşük yansıtılmış atalet, daha doğru ve kararlı kuvvet kontrolcüsü tasarımı, çevreye daha az zarar verme ve enerji depolama kapasitesi dahil bir dizi avantaj sunar (Pratt and Williamson, 1995). Bundan dolayı yüke bağlantı kısmı olan dış çubuklar, esnek materyal ile bağlanmaktadır. Esnek bağlantı, üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Malzemenin gerilme dayanımı sabit olup, $52MPa$ 'dır. Fakat tasarıma göre bağlantı parçasının esnekliği değiştirilebilmektedir. Uygun esnek bağlantılı tasarım deneysel yolla bulunarak eklemin seri elastik eyleyici yapısında olması sağlanmıştır.

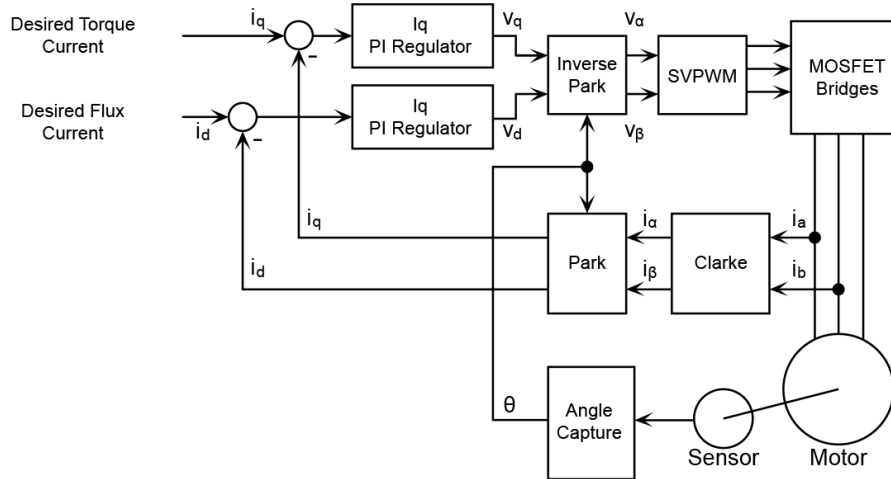
4.4 Fırçasız DC Motor Kontrolü

Eklem hareket kaynağı olarak fırçasız DC motor kullanılmıştır. Fırçasız DC motorlar, daha yüksek tork/ağırlık oranı, giriş gücü başına artan tork ve artan verimlilik, daha düşük bakım gereksinimleri, daha uzun kullanım ömrü gibi avantajlar sunmaktadır (Xia, 2012). Yapılan benzetimlere göre bir eklemin sürekli olarak $4Nm$, anlık olarak $10Nm$ tork sağlaması gerektiği ön görülmüştür. Buna göre Gartt5010 model motor tercih edilmiştir. Motorun parametreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: Gantt 5010 Fırçasız DC Motor Parametreleri

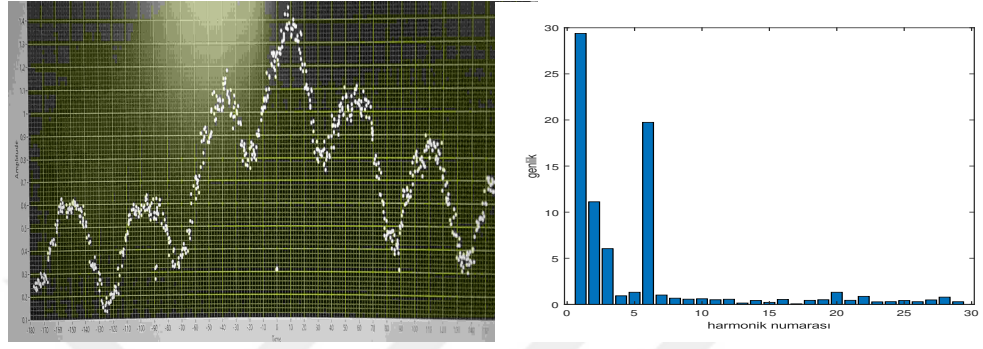
Motor Parametresi	Değeri
Motor Kv	300Kv <i>RPM/V</i>
Motor Direnci	0.0946 Ω
Yüksüz Akım ($I_o/10V$)	0.3A/10V
Maksimum Sürekli Akım	36 A
Maximum Sürekli Güç	850 W
Ağırlık	193 g
Kutup Sayısı	12N14P

Fırçasız DC motorun bir çok avantajı olmasına rağmen üç fazlı olduğu için kontrolü fırçalı motorlara göre karmaşıktır. Yüksek verimde ve düşük kalkış hızlarında çalıştırabilmek için "Alan Yönlendirmeli Kontrol" (Field Oriented Control - FOC) yöntemi uygulanmıştır. FOC yöntemi, 3 fazlı motorların torkunu yüksek doğruluk ve bant genişliği ile kontrol etmek için akım kontrolü kullanır. FOC yapısı, gerçek faz akımlarının Clarke ve Park dönüşümüne dayanır. Dönüşümler sonucu ortaya çıkan koordinat sisteminin sadece iki boyutu vardır. İlk bileşen motorun manyetik akısı ile orantılı olan d eksen, ikincisi ise motorun torku ile orantılı olan q eksenidir. Bu iki boyut, bir vektör olarak görselleştirilebilen dikey bileşenlerdir, bu nedenle FOC vektör kontrolü olarak da bilinir (Hughes and Drury, 2019; Hanselman, 2003; Pyrhonen et al., 2013). FOC genel şematığı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Alan Yönlendirmeli Kontrol Şeması Nidec Motor Corporation (2019)

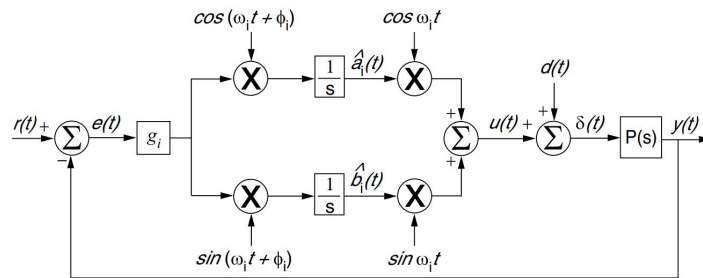
FOC ile tork kontrolü yapılmasına rağmen tork çıkışı sabitlenemeyebilir. Bunun temel nedeni motorun mekanik yapısından kaynaklanan cogging tork etkisidir (Islam et al., 2004). Kullandığımız motor yedi kutuplu olduğu için temel dönüş frekansının yedinin katlarındaki frekanslarda tork dalgalanmaları oluşmaktadır. Tork dalgalanması I_q akımı üzerinde de gözlenmektedir. I_q akımının rotor açısına göre değişimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

(a) Açığa Göre I_q Akımı

(b) Baskın Harmonikler

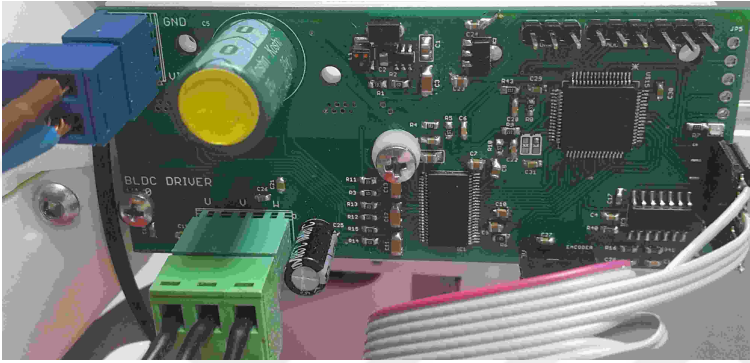
Şekil 4.7: Cogging Torkunun Akım Üzerinde Etkisi

I_q akımında altıncı harmonik beklenmedik derecede fazla etki göstermektedir. Bu etkiyi elimine etmek için "Uyarlanabilir İleri Beslemeli Çıkarma" (Adaptive Feedforward Cancellation - AFC) uygulanmıştır. AFC, belirli frekanstaki sinyallere hassas olarak hata kazancını artırmakta ve kontrolcünün bastırmasını kolaylaştırmaktadır (Cattell, 2003). Cogging torkunu bastırmak için temel dönüş frekansının altı katı referans frekans olarak seçilmektedir. AFC çıkışında referans frekansa göre hata sinyali üretilerek I_q akım kontrolünde kullanılan PI kontrolcünün hesaplanan hata değerine eklenmektedir. Bu sayede periyodik bozucu sinyal önceden belirlenerek bastırılmaktadır. AFC diyagramı Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8: Adaptive Feedforward Cancellation Diagramı

Motor kontrolü için gerekli olan akım sensörleri, mosfet köprüleri ve işlemcinin bulunduğu sürücü kartı hazırlanmıştır. Maksimum akım sınırının 30A olması planlanmıştır. Hazırlanan sürücü kartı ile yalnız bir eklem sürülmesi planlanmıştır. Sürücü ile ana kontrolcü arasında yüksek hızlı iletişim hattı kurulacağı için sürücü kartı elektromanyetik gürültüye karşı dayanıklı hazırlanmıştır. Yerel kontrol algoritması ve FOC algoritması sürücü üzerinde bulunan *STM32F3* serisi işlemcide koşturulmaktadır. Hazırlanan fırçasız DC motor sürücü kartı Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

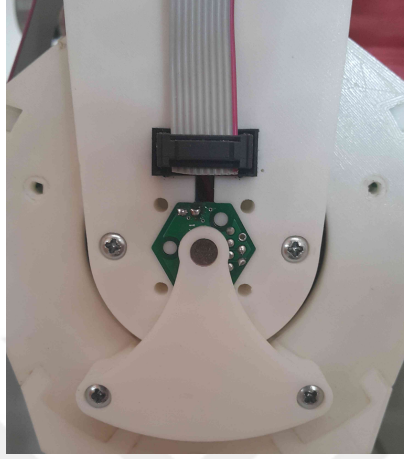


Şekil 4.9: Fırçasız DC Motor Sürücü Kartı

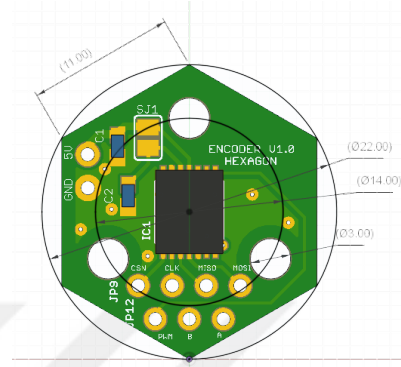
4.5 Sensörler

İki ayaklı robotun kontrolünün sağlanabilmesi için robotun eklem açıları bilinmelidir. Eklem açıları sürücü kartı yardımıyla motor açısının redüktör oranıyla çarpılmasıyla elde edilmektedir. Fakat eklemlerin seri elastik eyleyici olarak tasarlanmış olmasından dolayı sürücü kartı üzerinden elde edilen açı eklem açısına eşit olmayacaktır. Eklem açılarını kaymadan etkilenmeden doğrudan ölçebilmek için As5047 manyetik encoder kullanılmıştır. Kullanılan iki sensör sayesinde hem motora göre eklem açısı hem de direk eklem açısı ölçülmekte ve uygulanan kuvvet ile orantılı kayma bulunabilmektedir. As5047 manyetik encoderi mutlak koordinat sistemi kullandığı için herhangi bir başlangıç protokolü uygulamadan eklem açısı elde edilir. As5047 sensörü ABI, PWM, SPI çıkışları ile açı bilgisini ondört bit çözünürlükte iletebilmektedir. Bunun yanı sıra "*Dinamik Açı Hata Telafisi*" bloğu sayesinde hesaplama gecikmesinden kaynaklanan hatalar telafi edilebilmektedir. As5047 entegresi, fırçasız DC motor kontrolü ve robotik uygulamalar için uygun bir

çözüm olsa da montajı ve eksen merkezlemesi optik sensörlere göre zordur. Montaj ve merkezlemeden kaynaklanan hatalar açının yanlış ölçülmesine yol açabilmektedir. Bunu önlemek için tasarlanan ekleme uyumlu montaj kartı hazırlanmıştır. As5047 manyetik encoder montaj kartı Şekil 4.10a'da ve sensör kart ölçüleri Şekil 4.10b'de gösterilmiştir.



(a) Sensör Kartının Yerleşimi



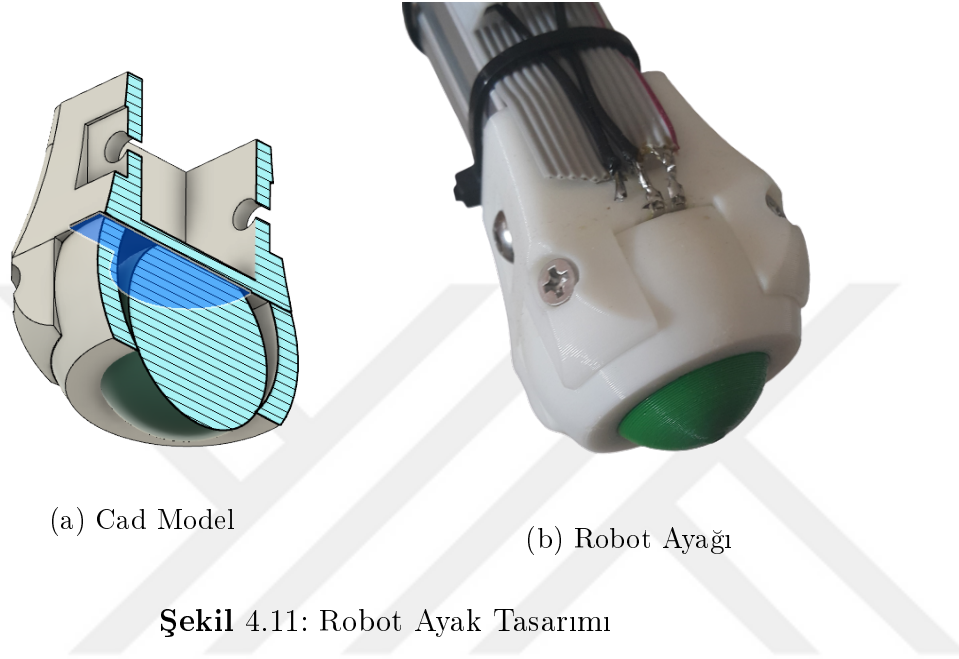
(b) Sensör Kartının Ölçüleri

Şekil 4.10: Sensör Kartı

Sadece eklem açıları kullanılarak robotun yerel koordinat sistemine göre pozisyonu bulunabilir. Küresel koordinat sistemine göre pozisyonların belirlenmesi için gövde eğiminin bilinmesi ve yerel koordinat sisteminin genel koordinat sistemine indirgenmesi gerekir. Gövde eğimi dokuz eksenli BNO055 IMU sensörü ile ölçülebilmektedir. BNO055 sensörü, tek çip içinde manyetik sensör, ivme sensörü ve gyroscope'dan oluşmaktadır. Üç sensör verisi birleştirilerek altı serbestlik dereceli uzayda mutlak koordinat bilgisi elde edilmektedir. BNO055 sensörü ile ana işlemci arasında veri aktarımı I2C protokolü ile sağlanmaktadır.

Sistem değişkenleri, hangi ayağın yere bastığına göre belirlenmektedir. Hangi ayağın yere bastığının öğrenilebilmesi için basınç sensörleri kullanılmaktadır. Basınç sensörü yüzeye uygulanan basınca göre değişen direnç etkisi göstermektedir. Direncin üzerindeki gerilim ADC ile ölçülerek basınç seviyesi elde edilir. Fakat bu tür sensörlerin en büyük dezavantajı doğrusal davranış göstermemeleri ve gürültüye duyarlı olmalarıdır. Tasarlanan ayak yapısıyla 0.6 kg altındaki basınçların dikkate alınmaması ve yaklaşık 2 kg'a kadar da maksimum okuma limitine ulaşması sağlanmıştır. Bu sayede olası hatalı sinyaller giderilmiştir. Hazırlanan iki ayaklı yürüyen robot, beş eklemlilikte

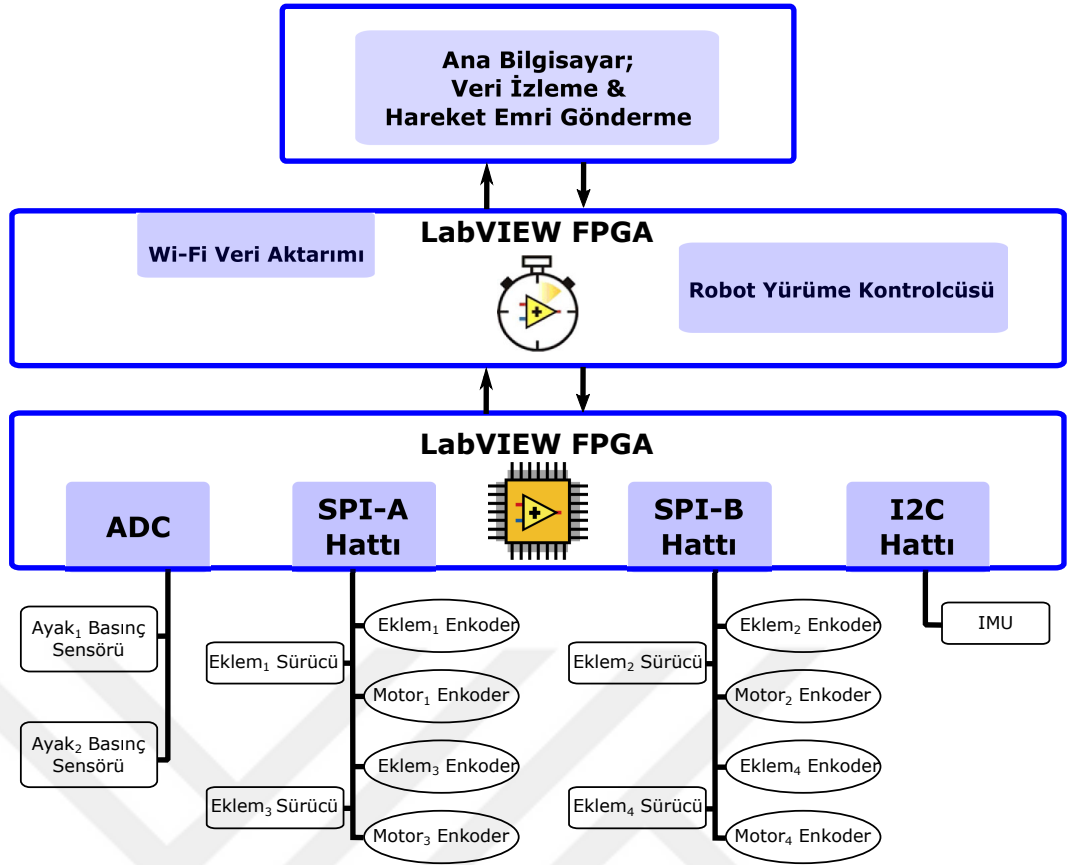
ayaklı model temel alınarak tasarlandığı için olabildiğince dar temas alanı hedeflenmiştir. Hedefleri sağlayacak ve problemleri giderecek ayak tasarımı yapılmıştır. Ayak tasarımı Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Yeşil renk ile gösterilen ve esnek malzemedan üretilmiş olan küre, bir taraftan yer ile temas ederken diğer taraftan basınç sensörü ile temas halindedir. Basınç sensörü, kürenin ayak iç tarafına yerleştirilmiştir.



4.6 Veri Hattı

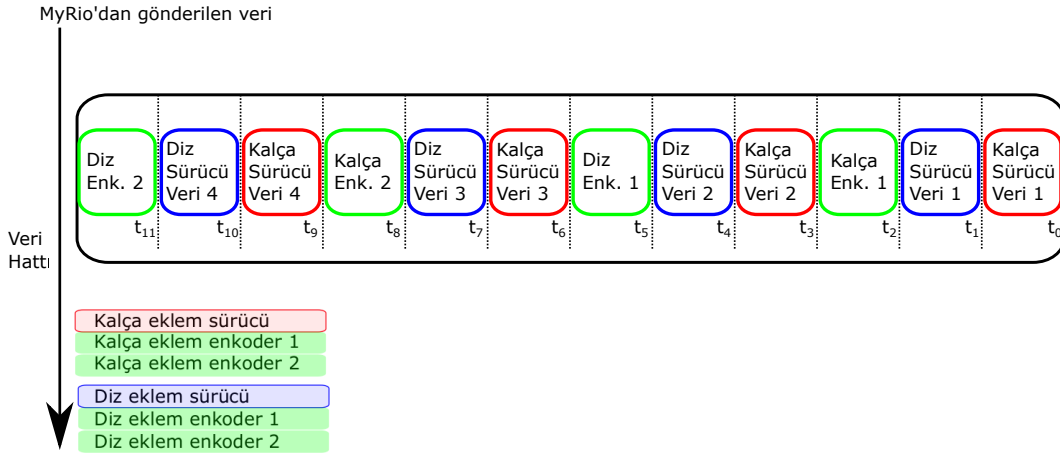
Robot motor kontrolcülere ve ana kontrolcünün dağıtık sistem olması arasındaki iletişim ve senkronizasyonun önemini artırmaktadır. Ana işlemciden sürücülere gönderilen açma komutları veya sürücülerden ana işlemciye iletilen sensör bilgilerinin hatalı olması robotun beklenmedik hareketler yapmasına yol açabilir. Bu tür hataları önlemek için güvenli iletişim hattı geliştirilmiştir. Robot üzerinde çalıştırılan veri hattı Şekil 4.12’de sembolik olarak gösterilmiştir.

Robot üzerinde her bacak için ayrı bir seri haberleşme hattı oluşturulmuştur. Bir seri haberleşme hattı üzerinde iki eklem sürücüsü ve her eklem için iki sensör bulunmaktadır. Toplam altı cihaz ile kurulan iletişim hattında sürücüler dört veri, sensörler bir veri paylaşmaktadır. Bir hat üzerinde bir çevrimde iletilen bu oniki veri, paket olarak isimlendirilmektedir. SPI hattı üzerindeki veri paket dizilimi Şekil 4.13’te gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Veri Hattı

Motor sürücü ile ana işlemci arasındaki veri dizilimi; 1: CRC kodu, 2: Data1, 3: Data2, 4: Senkronizasyon Kodu sıralamasındadır. Normal çalışma şartlarında ana işlemciden sürücüye iletim sırasında Data1 referans pozisyon, Data2 referans hızdır. Fakat başlatma protokolünde Data1 eklem açısının mutlak değeri Data2 başlangıç protokolünde olduğunu gösteren koddur. Sürücüden ana işlemciye iletilen datalarda ise Data1 seçilmiş bir sürücü parametresini (I_q , I_d , hız, pozisyon, PID hata miktarı vb...) Data2 ise bu parametrenin kodunu göndermektedir. Data1 ve Data2'nin anlamı dinamik olarak değişmekte ve bu da veri hattının daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır.

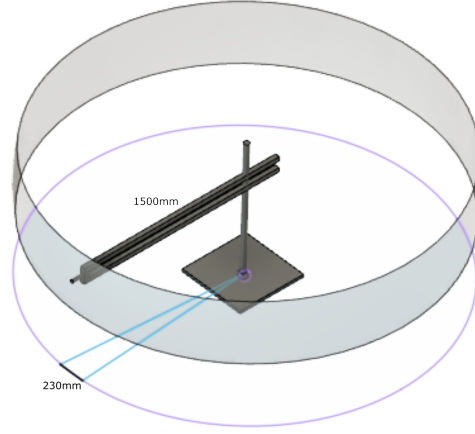


Şekil 4.13: SPI Hattı Veri Paketi

Veri güvenliği için sensör bilgisi parity ile kontrol edilmektedir. Veri paket güvenliği için CRC kod üretilmektedir. Kullanılan on altı bitlik CRC yöntemi hataları yaklaşık %99.77 oranında yakalamaktadır. SPI ve CRC işlemleri yüksek hızda çalışabilmesi için ana işlemci olarak kullanılan MyRio kartının FPGA bölgesi kullanılmıştır. Gerekli işlemler FPGA üzerinde mantıksal kapılar ile gerçekleştirilmiştir. Bu sayede $4MHz$ sinyal frekansında çalışan SPI hattı bir çevrimi $100\mu s$ 'den kısa sürede tamamlayabilmektedir. Kontrol algoritması $1ms$ örnekleme süresiyle çalıştırıldığı için bir kontrol çevrimi süresince en az dört SPI okuma çevrimi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Okunan dört datadan hatalı olanlar elendikten sonra kalanların ortalaması alınarak FPGA'dan işlemciye aktarılmaktadır.

4.7 Taşıyıcı Platform

Tez kapsamında hazırlanan robot, sagittal düzlem üzerinde hareket edebilen iki ayaklı robottur. Fiziksel olarak gerçekleştirilmesi için üç boyutlu uzayın iki boyutlu uzayda sınırlandırılması gerekir. Taşıyıcı platform robotun kontrolüne herhangi bir etkiye bulunmadan sadece hareket uzayını sınırlamaktadır. Belirli şartlar altında sınırlı ama sonsuz yürünebilir yol elde edebilmek için taşıyıcı platform silindirik koordinatlara göre hazırlanmıştır. Kendi etrafında sonsuz tur atabilen kuleye bağlı paralel kol mekanizması yerleştirilmiştir. Paralel kol mekanizması sayesinde robotun bağlantı noktası her zaman yere paralel tutulabilmektedir. Hazırlanan taşıyıcı platform Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Taşıyıcı Platformun Ölçüleri

Elde edilen sınırlı hareket uzayı yaklaşık olarak silindir kabul edilebilir. Yeterince uzun kol uzunluğu koşulu altında, yürüme yolu doğrusal bir yol olarak kabul edilebilir. Doğrusallaştırma hata oranının adım uzunluğunun %2'sinden az olması amaçlanmıştır. 23cm'lik maksimum adım uzunluğuna göre, hata miktarı 4.6mm'dir. Bu nedenle, hedeflenen koşulları sağlayacak kol uzunluğu en az 1,5m olmalıdır. Yörünge planlayıcısı adım uzunluğunun maksimum değeri aşmamasını sağlar. Tasarlanan taşıyıcı platform ölçüleri Şekil 4.14'te ve hazırlanan taşıyıcı platform da Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Taşıyıcı platformun kol ağırlığının robot tarafından taşınmaması için ters ağırlık eklenmiştir.



Şekil 4.15: Taşıyıcı Platform

5 YÜRÜME YÖRÜNGE PLANLANMASI

5.1 Giriş

Bu bölümde, iki ayaklı yürüyen robotun dinamik yürüyüşü için uygun olan eklem yörüngelerinin belirlenmesi anlatılmaktadır. Eklem yörüngelerinin, doğrusal ters sarkaç modellemesine göre ve yörünge en iyileme yöntemleriyle nasıl belirleneceği detaylı olarak açıklanmaktadır.

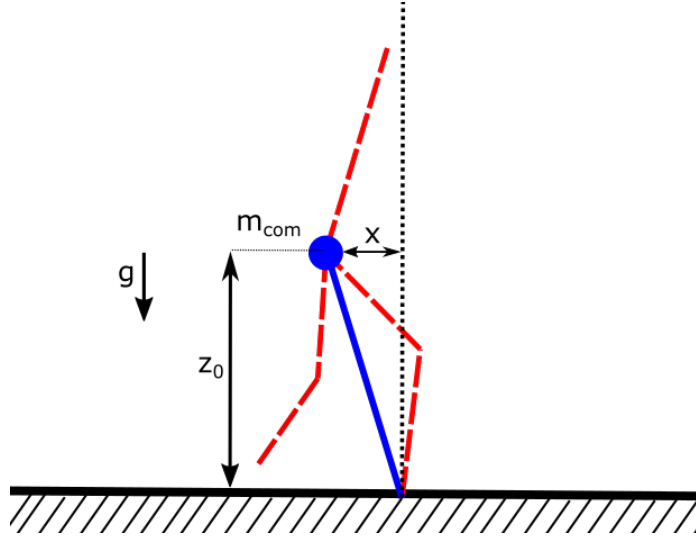
5.2 Doğrusal Ters Sarkaç Modeli

İki ayaklı yürüyen robotların tek destek fazında eksik tahrikli sistemler olduğu matematiksel modellerinden görülmektedir. Dolayısıyla serbestlik derecesine göre tanımlanan uzay kontrol edilebilir değildir. Ancak belirli yörüngeler için kararlı ve kontrol edilebilirdir. Karmaşık bir model olan iki ayaklı robot için yörünge türetilmesi de karmaşık olmaktadır. Problemi sadeleştirmek için robotun bütün kütlelerinin gövdede olduğu ve bu noktanın yere doğrusal çubuk ile tutturulduğu ters sarkaç modeli kullanılabilir.

Doğrusal Ters Sarkaç Modeli (LIPM) araştırmacılar tarafından iki ayaklı robotun yörüngelerini tasarlamak için kullanılmaktadır (VAN HUAN, 2011). Bu modelde, robotun toplam kütlelerinin Kütle Merkezi (CoM) adı verilen bir noktada yoğunlaştığı ve bacakların kütleli olduğu kabul edilir. Kalça yüksekliğinin diz eklemine kontrol ederek doğrusal bir yol izlediği varsayılır. Bacağı temsil eden çubuğun uzunluğu değişkendir. Doğrusal Ters Sarkaç Modeli, Şekil 5.1'deki gibi gösterilmiştir. Ayak bileği torkunun sıfır olduğu varsayıldığında, modelin dinamik denklemi Denklem 43'teki gibi yazılmaktadır. x noktasal kütlelerin yatay koordinatı, z_0 vücudun sabit yüksekliği ve g yer çekimi sabitidir. En temel yaklaşımla yükün yapacağı hareket robotun yapacağı hareketle örtüşeceği için yükün takip edeceği yörünge robotun yörüngesi olarak belirlenmektedir. Salınım ayağının yer değiştirmesi ve yeni adım yeri seçimi bu yörüngeye göre belirlenir.

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_0} x \quad (43)$$

Denklem 43'ün her iki tarafının da hız ile yani \dot{x} ile çarpılması ve integralinin alınması ile Denklem 44 elde edilir. Bu eşitliğin bir sabite eşit



Şekil 5.1: Doğrusal Ters Sarkaç Modeli

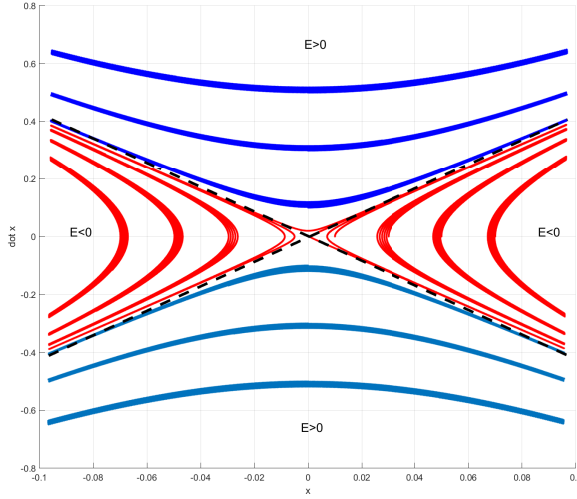
olduğu ve sabit sayının orbital enerjisi temsil ettiği (Kajita et al., 1992) tarafından belirtilmiştir. Eşitliğin sol tarafı birim kütleyle göre kinetik enerji ve potansiyel enerji ile orantılıdır.

$$\frac{1}{2}\dot{x}^2 - \frac{g}{2z_0}x^2 = E \quad (44)$$

Ters sarkaç modelinin faz portresi üzerinde toplam enerjinin değerine göre iki ayaklı robotun yürüme kararlılığı incelenebilir. Şekil 5.2'de gösterilen faz portresinde farklı başlangıç şartlarına göre benzetimi yapılarak davranışlar gözlenmiştir. Buna göre toplam enerjinin eksi olduğu kısımlar kırmızı ile gösterilmiştir. Bu bölgelerde periyodik yürüme kararlılığı sağlanamadığı için robot çift destek noktasında durur. Faz portresindeki mavi bölgeler ise enerjinin artı olduğu ve periyodik yürümenin sağlandığı kısımlardır. Koyu mavi bölge ileri yönde yürümeyi açık mavi bölge ise geri yönde yürümeyi göstermektedir.

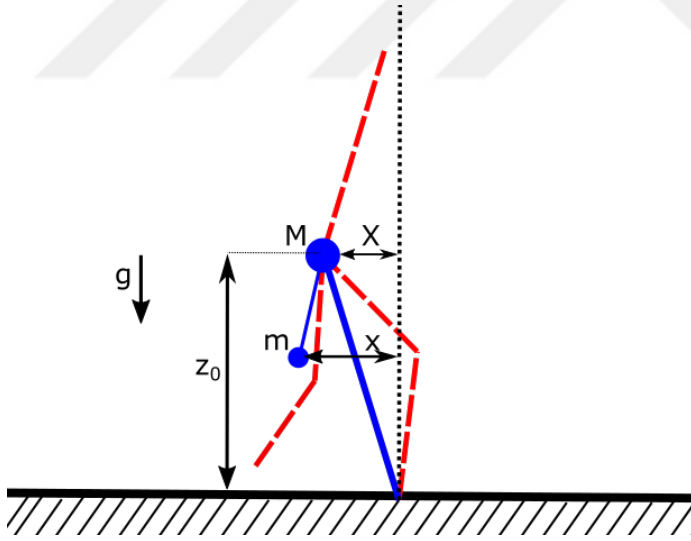
Fakat ters sarkaç modelinin en büyük eksiği bacakların kütsüz olduğu varsayımdır. Gerçek bir iki ayaklı robotun yürüme yörüngeleri oluşturulurken ters sarkaç modelinin kullanılmasının iki olası durumu vardır. Ya salınım bacağının kütlesi toplam vücudun kütlesine kıyasla çok küçüktür ve nominal yörünge kolayca gerçekleştirilebilir, yada salınım bacağının kütlesi ihmal edilemeyecek kadar ağırdır ve salınım bacağının etkisi robotu beklenmedik hareketlere yönlendirir.

Ters sarkaç modeline salınım bacağının kütlesi de eklenerek model



Şekil 5.2: Ters Sarkaç Faz Portresi

geliştirilebilir. Buna göre, kalça noktası M ağırlıklı ve salınım bacağı m ağırlıklı iki nokta olarak temsil edilir. X , kalça noktasının yatay uzaklığı, x ise salınım ayağının uzaklığıdır. Ters sarkaç modeline salınım bacağının eklenmesiyle elde edilen model Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Salınım Bacağı Kütleli Doğrusal Ters Sarkaç Modeli

Ters sarkaç modelinde izlenen yöntemle benzer şekilde, vücut kütlelerinin yatay olarak hareket ettiği ve sabit bir z_0 yüksekliğini koruduğu varsayılır. Ayak bileği torkunun olmadığı varsayılır. Bu modelden moment denklemi, Denklem 45'teki gibi türetilebilir.

$$M\ddot{X}z_0 - MgX + m\ddot{z} - m\ddot{x} - mgx = 0 \quad (45)$$

Denklem 45 yeniden düzenlenirse eşitliğin sol tarafı Denklem 43'e benzer hale getirilebilir. Bu durumda eşitliğin sağ tarafı salınım bacağına ters sarkacın ağırlık merkezine yaptığı kuvvet olacaktır.

$$\ddot{X} - \frac{g}{z_0}X = -m\ddot{x}z + m\dot{z}\dot{x} + mgx \quad (46)$$

Bu modelde, ters sarkaçtan farklı olarak, ayak bileği torku sıfır olarak kabul edilmez, yani ayak bileği eklemde eyleyici olduğu ve ayak bileği eklemine mevcut olduğu kabul edilir. Salınım bacağına kütlesi ve hızının bütün robot hareketlerine etkisi incelenmektedir. Buna göre ayak genişliği belirlenebilir. Salınım bacağına etkisini test edebilmek için olası bir salınım bacağı yörüngesi Denklem 47'deki gibi belirlenebilir. h_f yerden maksimum yükseklik, S adım açıklığı ve w_f adım frekansdır.

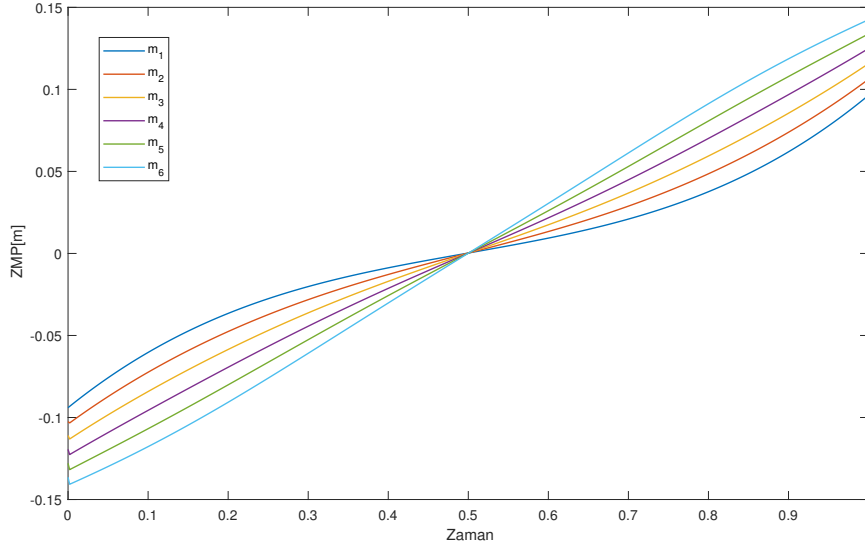
$$\begin{aligned} x(t) &= S \sin(w_f t) \\ z(t) &= \frac{h_f}{2} (1 - \cos(2w_f t)) \end{aligned} \quad (47)$$

Robotun genel dinamiklerine göre dengede olup olmadığını anlamak için ZMP noktası belirlenmeli ve sınırlar dahilinde olup olmadığı incelenmelidir. ZMP denkleminin genel formu Denklem 48'de verilmiştir. İki kütleli robot modeli ise Denklem 49'da verilmiştir.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^N m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^N m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (48)$$

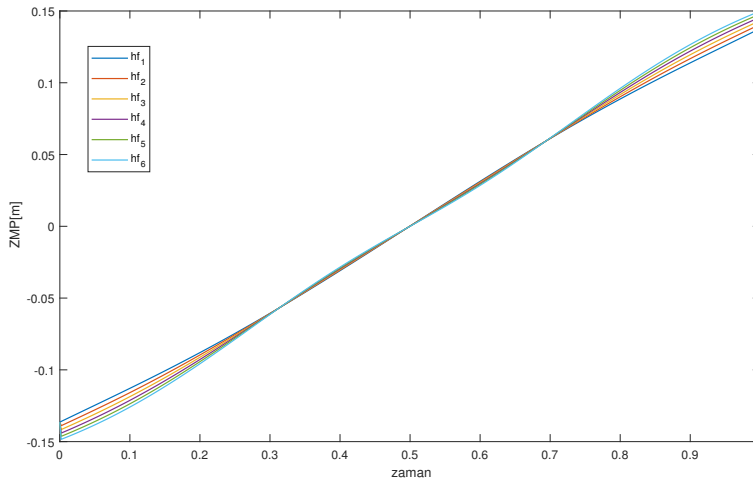
$$x_{zmp} = \frac{M (\ddot{z}_g + g) x_g + m (\ddot{z}_f + g) x_f - M \ddot{x}_g z_g - m \ddot{x}_f z_f}{M (\ddot{z}_g + g) + m (\ddot{z}_f + g)} \quad (49)$$

Salınım ayağının farklı kütleleri için ZMP değerindeki değişimi Şekil 5.4'te incelenmiştir. Tasarlanan robotun ağırlığı yaklaşık 6 kg'dır. Bir bacağın ağırlığının toplam ağırlığın %10, %20 ve %30 olduğu durumlar için test edilmiştir.



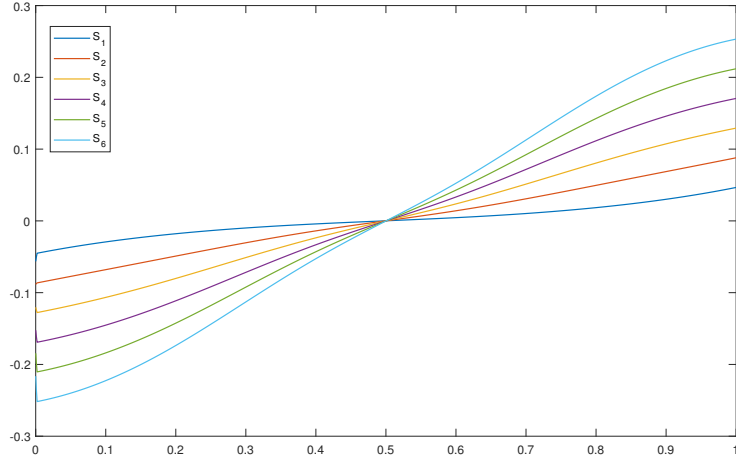
Şekil 5.4: Salınım Ayağının Ağırlığına Göre ZMP Değişimi

Robot parametrelerinin yanı sıra yürüme parametreleri de ZMP'yi önemli ölçüde etkilemektedir. Yürüme parametrelerinden birisi de h_f adım yüksekliği ve S adım mesafesidir. h_f ve S 'in değişimine göre ZMP değişimi Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir. ZMP değişimini etkileyen bir diğer etken de yürüme frekansıdır. w_f olarak tanımlanmış olan yürüme frekansının farklı değerlerine göre ZMP değişimi Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

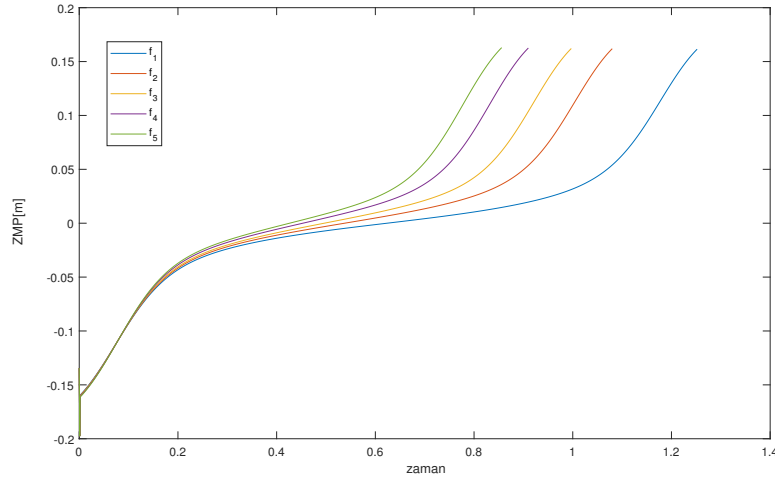


Şekil 5.5: Adım Yüksekliğine Göre ZMP Değişimi

Salınım ayağının ZMP etkisine göre yapılan analizlerde kütlelerin sıfır dışında bir değer olması durumunda ZMP'de kaymaya yol açmaktadır. Salınım ayağının kütlelerinin artması ise ZMP'deki kaymanın daha da artmasına yol



Şekil 5.6: Adım Mesafesine Göre ZMP Değişimi



Şekil 5.7: Yürüme Frekansına Göre ZMP Değişimi

açmaktadır. Yürüme hızı ise ters etki yapmaktadır. Yani yürüme hızı arttıkça ve doğal yürüyüşe yaklaşıldıkça ZMP'deki kayma azalmaktadır. Yavaş yürüme için kayma miktarı artmaktadır. Adım uzaklığı da kütle artışına benzer şekilde uzun mesafelerde ZMP kayma miktarını artırmaktadır. Robot ve yürüme parametrelerinin değişiminin ZMP'ye etkisi Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1: Robot ve Yürüme Parametrelerinin ZMP'ye etkisi

Yürüme Parametresi	Parametre Sembolü	ZMP Değişimine Etkisi	ZMP Değişim Aralığı
Salınım ayağı kütlesi	m	dikkat edilmeli	$0.09m$ ile $0.14m$
Yürüme frekansı	f	etkilenmez	
Adım yüksekliği	h_f	neredeyse etkisiz	$0.14m$ ile $0.15m$
Adım aralığı	S	çok etkili	$0.04m$ ile $0.25m$

5.3 Yörünge Eniyilemesi

Doğrusal Ters Sarkaç Modeli, iki ayaklı yürüyüşü analiz etmek için çok kullanışlı bir modeldir. Basit yürüyüş planlamasına izin veren kompakt analitik bir çözüme sahiptir. Yürüme sırasında yörünge enerjisinin korunması, yürüyüş planlamasını desteklemek için kullanılabilir önemli bir bulgudur. Ancak, bu modelin dezavantajları da vardır. Robot bütün olarak nokta kütle ters sarkaç olarak modellenmiş olduğundan, salınım bacakları ve kollar gibi bağımsız olarak hareket eden parçaların dinamiği göz önünde bulundurulmamıştır. Bu modellenmemiş dinamikler robotu istenen yürüyüş hareketine etki eden bozucu kuvvetler üretmektedir.

Tasarlanan robot özelinde bacak ağırlıklarının toplam robot ağırlığına oranının yüksek olması, geniş tabanlı ayak yerine nokta ayak kullanılmış olması ters sarkaç modelinin başarısını oldukça azaltmaktadır. Ayak tabanı dar bir alanda kaldığı için ZMP değişiminin çok dar olması gerekmektedir. Bu yüzden yörünge planlaması için robot dinamiğinin bütünüyle hesaba katıldığı yörünge eniyileme yöntemlerinin kullanılması tercih edilmiştir. Yörünge eniyileme problemi, dinamik sistem için, maliyet işlevlerini en aza indirirken bazı kısıtlamaları karşılayan bir yörünge bulmaya çalışır. Optimal kontrol problemini çözmek için transkripsiyon yöntemleri tercih edilmektedir. Transkripsiyon yöntemleri, sürekli sistemde tanımlanan bir problemi doğrusal olmayan programlama problemine dönüştürerek çözmektedir. Bu dönüşümü yapan çeşitli transkripsiyon algoritmaları vardır ve "atış yöntemleri" ile "eş zamanlı yöntemler" olarak iki ana sınıfa ayrılırlar. İki yöntem arasındaki fark, sistem dinamikleri üzerindeki kısıtlamayı nasıl uyguladıklarıdır. Atış

yöntemleri, sistem dinamiklerini uygulamak için bir simülasyon kullanır. Eş zamanlı yöntemler ise yörünge boyunca bir dizi noktada dinamikleri parça parça uygular.

Tekli atış yöntemi, optimal kontrol probleminin çözümü için pratik bir yöntem önermektedir. Fakat tekli atış yöntemi basit problemler için başarılı olmasına rağmen karmaşık problemlerde sıklıkla başarısız olmaktadır. Bunun nedeni, karar değişkenleri ile kısıtlama fonksiyonları arasındaki ilişkinin doğrusal modelle yakınsanamamasıdır. Eş zamanlı yöntemler ve atış yöntemleri arasındaki fark, eş zamanlı yöntemlerin, karar değişkenlerini kullanarak durum yörüngesini doğrudan temsil etmesi ve daha sonra, sadece yörüngedeki özel noktalardaki dinamik kısıtlamaları karşılamasıdır (Kelly, 2017).

Yörünge eniyileme problemlerini çözmek için kullanılan yöntemlerin bir başka sınıflandırması da eniyilemeyi sürekli yada süreksiz zamanda yaptığına göre dir. Bunlar doğrudan ve dolaylı olarak isimlendirilir. Doğrudan yöntemin temel özelliği, yörünge eniyileme probleminin kendisini doğrusal olmayan bir programa dönüştürmesidir. Bu dönüştürme işlemi transkripsiyon olarak bilinir. Genel olarak, doğrudan transkripsiyon yöntemleri, problem ifadesindeki tüm sürekli fonksiyonları polinom olarak kestirerek, sürekli yörünge eniyileme problemine çevirir (Von Stryk and Bulirsch, 1992). Polinomlar iki avantajlı özelliğe sahip oldukları için kullanılır. Bu avantajlar, az sayıdaki katsayı dizisi ile temsil edilmeleri ve bu katsayılar açısından polinomların integrallerinin ve türevlerinin kolay hesaplanabilir olmalarıdır.

Direct collocation yönteminin kurgulanabilmesi için problem aşamalarında uygulanacak yöntemler belirlenmelidir. İlk olarak durumu ve kontrol değişkenlerini temsil etmek için polinom seçilir. Durum değişkenleri için kübik polinomlar iyi bir seçimdir. Öte yandan probleme özgü polinomlar da seçilmektedir. Yürüyen robotların yörünge eniyilemesinde Bezier polinomları tercih edilmektedir. İkinci olarak maliyet fonksiyonunun nasıl uygulanacağı belirlenmelidir. Maliyet fonksiyonunun bütün yörüngeleri kapsayacak toplamsal bir terim olarak seçilmesi uygundur. Bu duruma en uygun fonksiyon genellikle kontrol sinyallerinin toplamı olmaktadır (Hereid et al., 2016). Son olarak belirlenen kesik noktaların tekrar nasıl birleştirileceği belirlenmelidir.

Eniyileme problemi genel olarak iki terimden oluşmaktadır. Sınır şart-

larını gösteren $\Phi(\cdot)$ ve yörünge boyunca sistem dinamiklerinden kaynaklanan $\mathcal{L}(\cdot)$ 'dir. Bu eniyileme problemi Denklem 50'deki gibi Bolza formunda tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} \min_{t_0, t_f, u(t), x(t)} \quad & J = \Phi(x_0, x_f) + \int_{t_0}^{t_f} \mathcal{L}(t, x, u) d\tau \\ \text{s.t.} \quad & \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \\ & x_{min} \leq x(t) \leq x_{max} \\ & u_{min} \leq u(t) \leq u_{max} \end{aligned} \quad (50)$$

Problem kolaylığı açısından maliyet fonksiyonunun sistem dinamiklerinden kaynaklanan terimi sadece eklemelerin uyguladığı güç olarak ele alınabilir. Başlangıç ve bitiş değerleri de periyodik bir sinyal üretmek istediğimiz için eşit olacaktır. Ve başlangıç değerleri kullanıcı tarafından belirleneceği için maliyete etkisi olmayacaktır. Bu durumda genel problem tanımı Denklem 51'deki özel forma dönüştürülür.

$$\begin{aligned} \min_{u(t), x(t)} \quad & \int_0^t u(\tau)^2 d\tau \\ \text{s.t.} \quad & \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \\ & x_{min} \leq x(t) \leq x_{max} \\ & u_{min} \leq u(t) \leq u_{max} \end{aligned} \quad (51)$$

İkinci aşamada zamana bağlı olan kontrol ve durum değişkenleri N sayıda nokta için ayrıklaştırılmaktadır. Bunun yanı sıra maliyet fonksiyonunda kullanılan integral işlemi ve zamana bağlı tanımlanan sistem dinamiklerini de ayrıklaştırmak gerekmektedir. Denklem 52'den Denklem 56'ya kadar olan işlemler sayesinde trapezoid yöntemine göre ayrıklaştırma uygulanmaktadır.

$$t \rightarrow [t_0, t_1, \dots, t_N] \quad (52)$$

$$x(t) \rightarrow [x_0, x_1, \dots, x_N] \quad (53)$$

$$u(t) \rightarrow [u_0, u_1, \dots, u_N] \quad (54)$$

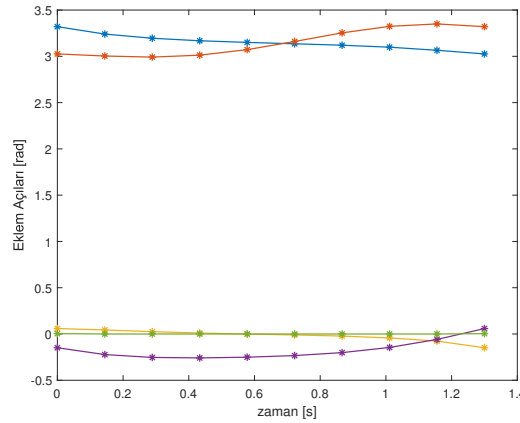
$$\int_0^t u(\tau)^2 d\tau \rightarrow \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(u_k^2 + u_{k+1}^2)}{2} \Delta t \quad (55)$$

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \rightarrow x_{k+1} = x_k + \frac{(f_{k+1} + f_k)}{2} \Delta t \quad (56)$$

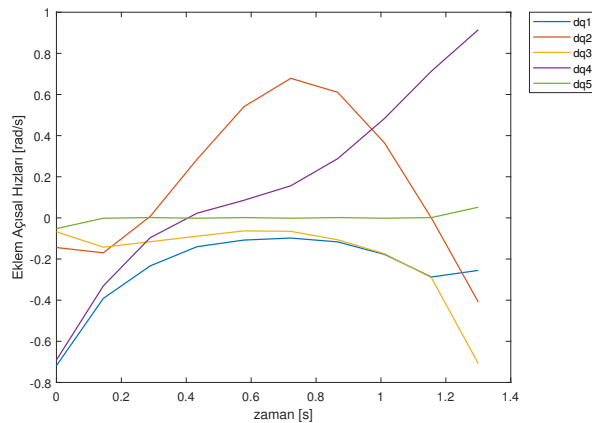
Bu sayede sürekli zamanda zor çözülebilecek olan bir eniyileme problemi ayırık zamanlı doğrusal olmayan programlama problemine dönüştürülmüştür. Her bir ayırık nokta kendi başına minimize edilecektir. Minimizasyon işlemi uygulanırken sistem dinamikleri sınır şartı olduğu için noktalar arasındaki bağlantı sistem dinamiklerine uygun olacaktır. Doğrusal olmayan programlama çözümü birçok farklı yazılımla yapılabilir. Bu çalışmada *Matlab* ile benzetim yapıldığından dolayı *fmincon* fonksiyonu kullanılmıştır. Sistem değişkenleri için Denklem 57’de gösterilen ikinci dereceden, kontrol sinyalleri için Denklem 58’de gösterilen birinci dereceden spline uygulanmıştır.

$$x(t) = x_k + (t - t_k)f_k - (t - t_k)^2 \frac{(f_k - f_{k+1})}{2\Delta t} \quad (57)$$

$$u(t) = u_k + (t - t_k) \frac{u_k - u_{k+1}}{\Delta t} \quad (58)$$



Şekil 5.8: Trapezoid Collocation Yöntemine Göre Eklem Açılıları

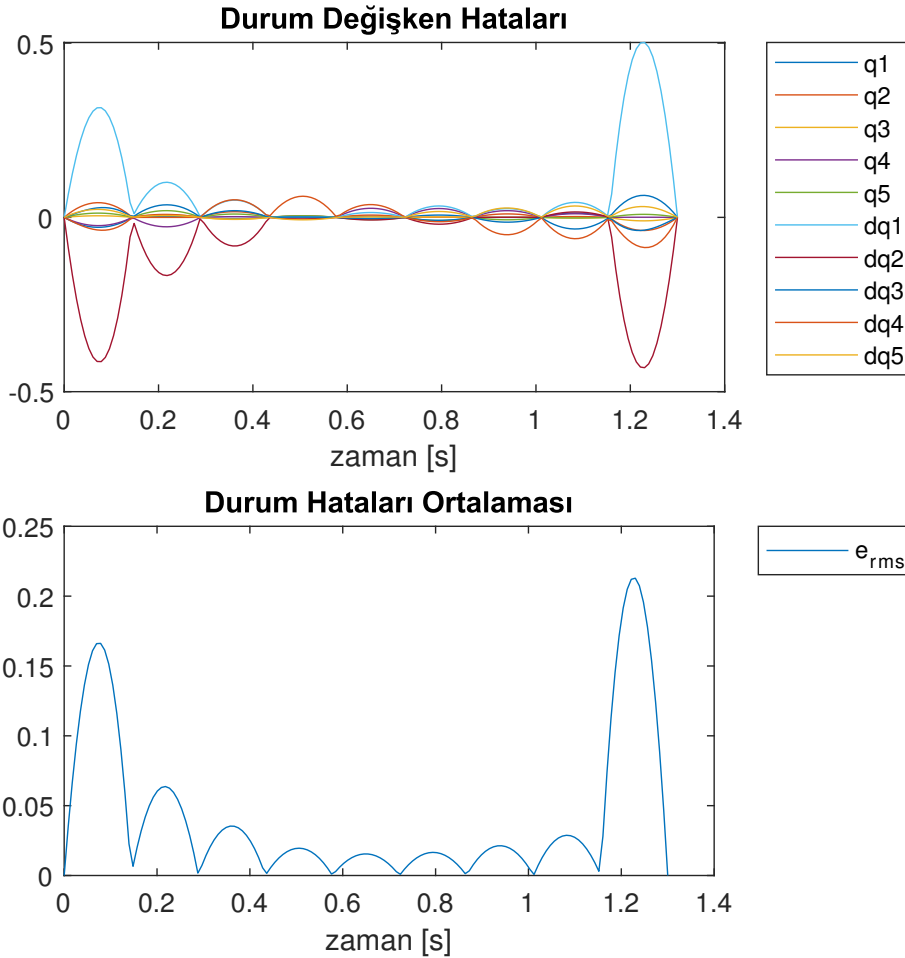


Şekil 5.9: Trapezoid Collocation Yöntemine Göre Eklem Açıl Hızları

Robotun yürüme yörüngesi bu şekilde eniyilenebilir. Başlangıç ve bitiş noktaları aynı olduğu için yörüngeler her adımda periyodik olarak tekrarlanabilmektedir. Eklem açıları ve eklem açısal hızları Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

Çözümlerin bütün zaman boyunca değil de belirli noktalar için yapılmış olmasından dolayı yörüngeler bire bir sistem dinamiklerini karşılayamaz. Noktalar arasında sistem dinamiklerinden uzaklaşmalar olacaktır. Hata miktarını sistem denklemini ileri yönde tekrar çalıştırarak Denklem 59'daki gibi bulabiliriz. Eniyileme ile bulunan değerler "tilde" sembolüyle gösterilmiştir. Hatanın zamana göre grafiği Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Hata değeri, eklem açıları [rad] ve eklem açısal hızlarına [rad/s] göre hesaplandığı için birimsizdir.

$$e(t) = \tilde{x}(t) - f(t, \tilde{x}(t), \tilde{u}(t)) \quad (59)$$



Şekil 5.10: Trapezoid Collocation Yöntemine Göre Eniyileme Hatası

Hata değerlerini azaltmak için farklı yöntemler uygulanmaktadır. N örnekleme sayısını artırmak bunlardan birisidir. Fakat örnek sayısının artması ve dolayısıyla Δt 'nin azalması işlem yükünü artıracak ve direct collocation yönteminin avantajını ortadan kaldıracaktır. Örnek sayısı sabit aralıkla artırmak yerine dinamik olarak artırmak bir çözüm olabilmektedir (Saglam and Byl, 2015). Diğer çözümler ise spline derecesini artırmak ve/veya collocation yöntemini değiştirmektir. Spline derecesini artırmak sistem dinamiklerine bağlı olarak işlem yükünü etkilemektedir. Dolayısıyla bu durum her zaman avantaj sağlamayabilir. Bu yüzden trapezoid yerine Hermite-Simpson yöntemi de test edilmiştir.

Hermite-Simpson yönteminde sistem dinamikleri ve kontrol değişkenleri üçüncü derece polinomlar ile tanımlanırken durum değişkenleri ikinci derece fonksiyon ile tanımlanmaktadır. Hermite-Simpson collocation yöntemi Denklem 60'tan Denklem 65'e kadar olan kısımlarda yazılmıştır.

$$\mathbf{t} \rightarrow [t_0, t_1, \dots, t_N] \quad (60)$$

$$\mathbf{x}(\mathbf{t}) \rightarrow [x_0, x_{1/2}, x_1, x_{3/2}, \dots, x_N] \quad (61)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) \rightarrow [u_0, u_{1/2}, u_1, u_{3/2}, \dots, u_N] \quad (62)$$

$$\int_0^t \mathbf{u}(\tau)^2 d\tau \rightarrow \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(u_k^2 + 4u_{k+1/2}^2 + u_{k+1}^2)}{6} \Delta t \quad (63)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})\mathbf{u} \rightarrow x_{k+1} = x_k + \frac{(f_{k+1} + 4f_{k+1/2} + f_k)}{6} \Delta t \quad (64)$$

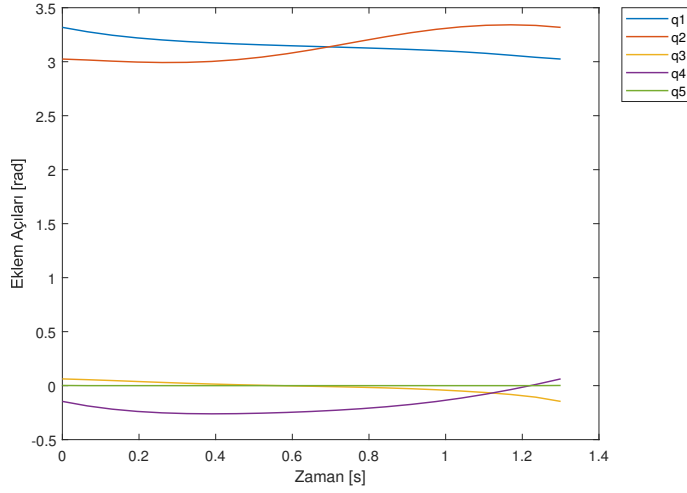
$$x_{k+1/2} = \frac{(x_k + x_{k+1})}{2} + \frac{(f_k - f_{k+1})}{8} \Delta t \quad (65)$$

Trapezoid yöntemdeki gibi çözüm yine *Matlab*'in *fmincon* fonksiyonu ile yapılmıştır. Elde edilen çözüm noktaları Denklem 66'da yazılan ikinci derece ve Denklem 67'de yazılan üçüncü derece spline fonksiyonlarıyla yapılmaktadır.

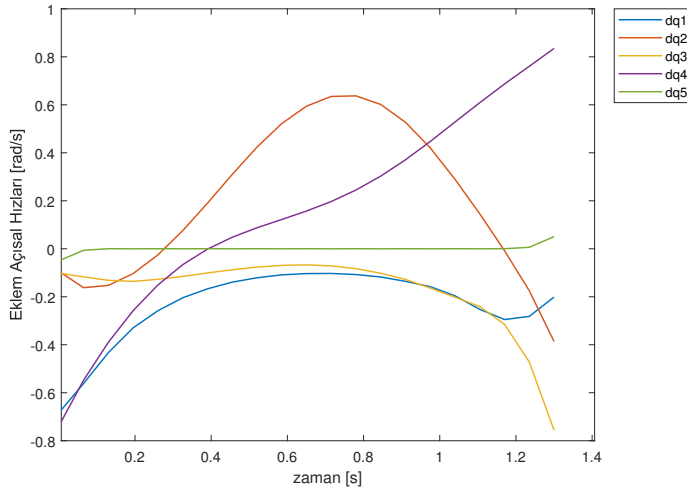
$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) = u_k - (t - t_k) \frac{(3u_k - 4u_{k+1/2} + u_{k+1})}{\Delta t} + (t - t_k)^2 \frac{2(u_k - 2u_{k+1/2} + u_{k+1})}{\Delta t^2} \quad (66)$$

$$\mathbf{x}(\mathbf{t}) = x_k + (t - t_k)f_k - (t - t_k)^2 \frac{(3u_k - 4u_{k+1/2} + u_{k+1})}{2\Delta t} + (t - t_k)^3 \frac{2(u_k - 2u_{k+1/2} + u_{k+1})}{3\Delta t^2} \quad (67)$$

Hermite-Simpson yöntemine göre bulunan eklem açıları Şekil 5.11’de ve eklem açısal hızları Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



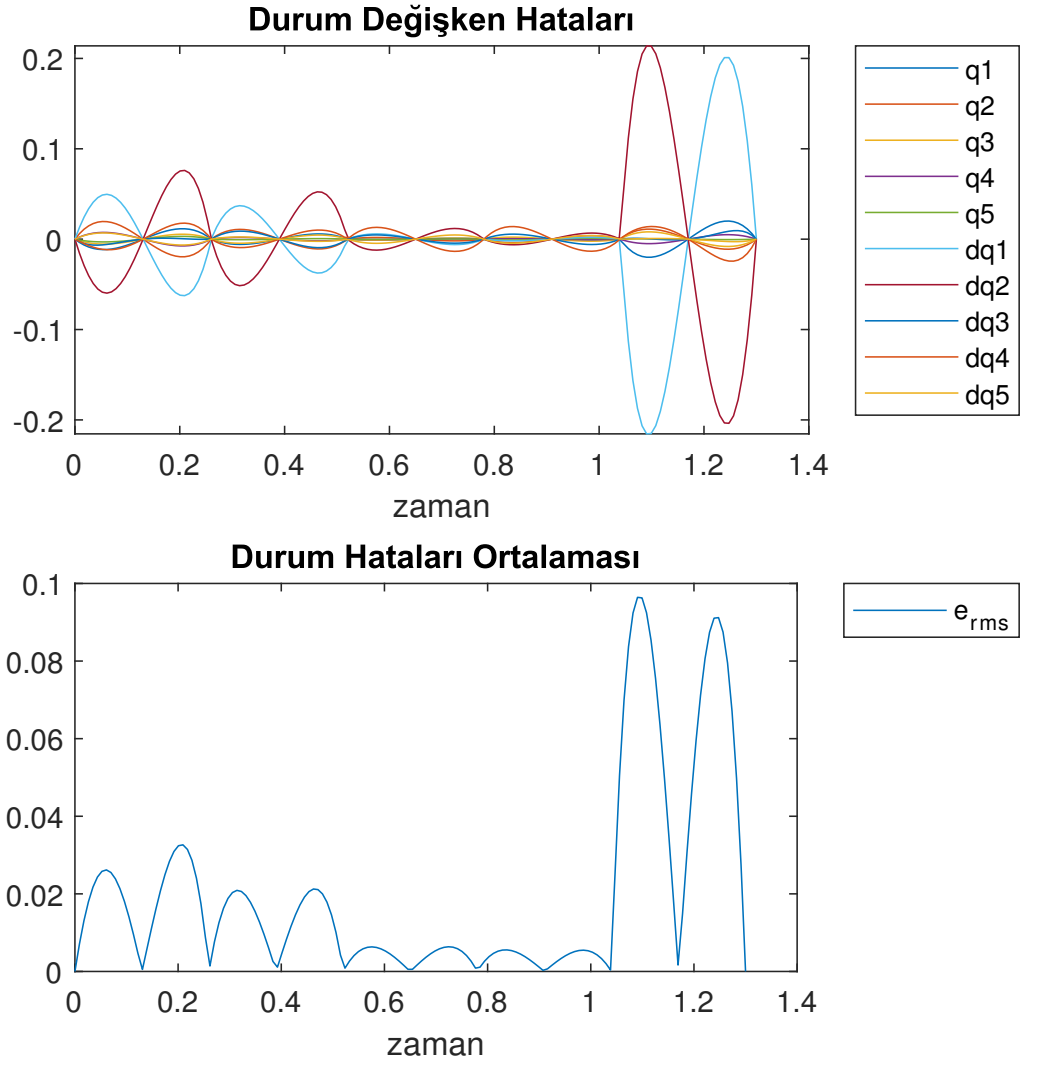
Şekil 5.11: Hermite-Simpson Collocation Yöntemine Göre Eklem Açıları



Şekil 5.12: Hermite-Simpson Collocation Yöntemine Göre Eklem Açısal Hızları

Eniyileme hatası trapezoid kuralda kullanılan Denklem 59 ile aynı şekilde bulunabilmektedir. Zamana göre eniyileme hatası Şekil 5.13’te gösterilmiştir.

Hermite-Simpson yöntemine göre eniyileme yapılan yörüngelerin hata oranının, trapezoid yöntemine göre elde edilen yörüngelerin hata oranından çok daha az olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni ayrıklaştırma derecesinin yüksek olmasıdır. İşlem yükü ve hesaplama süresi daha uzun olsa da yürüyen robotlarda yörünge planlaması yörünge takibi kadar önemli olduğu için Hermite-Simpson yöntemine göre bulunan yörüngeler tercih edilmektedir.



Şekil 5.13: Hermite-Simpson Collocation Yöntemine Göre Eniyileme Hatası

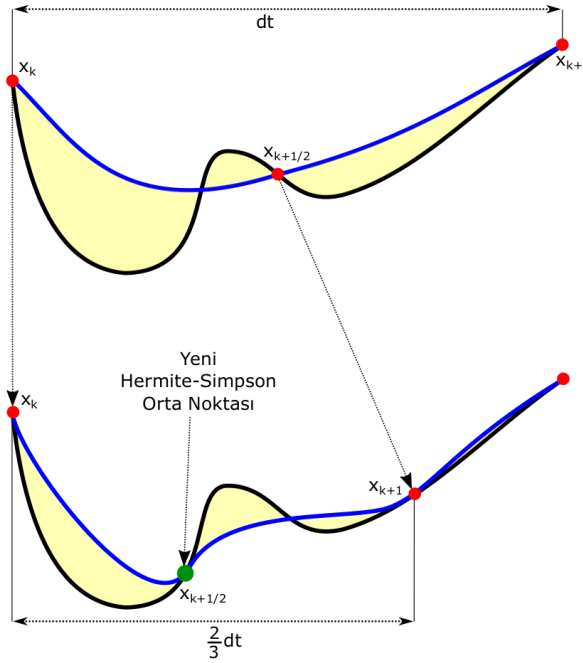
5.4 Değişken Zaman Aralıklı Yörünge Eniyileme

Şekil 5.13'te eniyileme hatalarından görülebileceği gibi senkron açının uç değerlerinde, yani ayağın yere yeni bastığı ve yerden yeni ayrıldığı anlarda hata oranı ortalamanın çok üzerine çıkmaktadır. Bu da adım anında sistem dinamiklerinden uzaklaşıldığı gösterir. Hedeflenen yörüngelerin sistem dinamiklerinden uzaklaşması yürüme performansını düşürmektedir. Düşük eniyileme doğruluğundan kaynaklanan problemleri gidermenin en basit yolu örnek nokta sayısını arttırmaktır. Fakat örnek sayısını arttırmak NLP çözüm süresini üstel değerle arttırmaktadır.

NLP çözüm süresini koruyarak, eniyileme doğruluğunu arttıracak bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem ile collocation noktaları sabit zaman

arlıkları yerine değişken zaman aralıklarını temel almaktadır. Bu sayede hata oranı düşük bölgelerde az sayıda collocation noktası yeterli olurken yüksek hata oranı olan bölgelerde yeni collocation noktaları eklenmektedir.

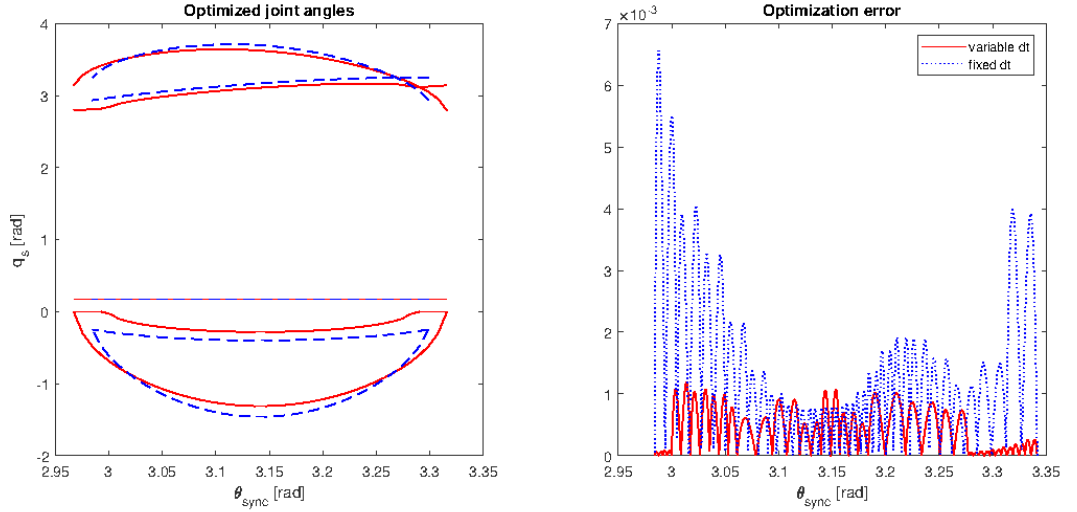
Uygulanan collocation yöntemine göre yeni noktanın yerinin belirlenmesi başarıyı arttırmaktadır. Hermite-Simpson yönteminde iki nokta arasında bir adet orta nokta bulunmaktadır. Çözünürlüğü arttırmak için iki nokta arasına iki ara nokta eklenerek yeni eklenen noktalardan ilki yeni orta nokta ikincisi ise yeni uç nokta olmaktadır. Bu sayede örnekleme zaman aralığı $2/3$ oranında azaltılmış olur. Hata değerinin belirlenen eşik değerinin üzerindeki noktalarda yeni nokta eklenmesi iteratif olarak tekrarlanmaktadır. Şekil 5.14'te yeni nokta eklenmesi temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.14: Yeni Collocation Noktası Ekleme Gösterimi

Yürüyen robotun yörüngeleri sekiz collocation noktasından başlayarak her bir segmentin hata değeri $1.2 \cdot 10^{-3}$ 'ü aşmayacak şekilde eniyileme yapıldığında toplam 42 segmentte sonlanmaktadır. Zaman çözünürlüğü değişmeden aynı sayıda segment ile yapılan eniyileme ($N = 21$) segment hatalarının limit hata değerinin çok üzerine çıktığı görülmektedir. Şekil 5.15'te önerilen değişken zaman çözünürlüklü eniyileme ile aynı sayıda segmente sahip direct collocation eniyileme yönteminin karşılaştırılması gösterilmektedir.

Eklem yörüngelerinin özellikle ayağın yere basma ve yerden ayrılma



Şekil 5.15: Sabit Zaman Aralıklı ve Değişken Zaman Aralıklı Eniyileme Yönteminin Karşılaştırılması

anlarında farklılık gösterdiği ve hata değerleri arasındaki fark Şekil 5.15'te görülmektedir. Önerilen değişken zaman aralıklı yörünge eniyileme yönteminin hatayı her segmentte belirli seviyenin altına indirebildiği açıkça görülmektedir. Buna ek olarak hatayı minimize ederken eklenen yeni noktalar işlem süresi sınırlı miktarda arttırmaktadır. Aynı segment sayısına sahip sabit zaman aralıklı eniyileme yöntemi 45.44s sürerken, önerilen değişken zaman aralıklı eniyileme yöntemi 51.62s sürmektedir (ölçümler, Intel i7700HQ işlemci üzerinde *Matlab 2020a* ile yapılmıştır).

Yürüyen robotlar için yürüme performansını belirleyen en önemli parametre Taşıma Maliyeti (Cost of Transport-CoT) 'dir. Kütlelden arındırılan bu parametre, birim yol başına harcanan toplam enerjiyi göstermektedir. CoT hesabı, Denklem 68'de tanımlanmaktadır Arcos-Legarda et al. (2019).

$$C_t = \frac{1}{mg |hip^h(t_f) - hip^h(t_0)|} \int_{t_0}^{t_f} |\dot{q}_s^T B u| dt \quad (68)$$

Sabit zaman aralıklı ve önerilen değişken zaman aralıklı direct collocation yöntemlerinin CoT değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler literatürde bilinene diğer düzlemsel beş bağı robotlar ile Çizelge 5.2'de karşılaştırılmaktadır.

Önerilen yöntem, özellikle ayağın yere basma ve yerden ayrılma anlarındaki eniyileme hatasını azalttığı için çarpışma sırasında gerçekleşen enerji kaybını azaltmaktadır. Bu sayede daha verimli yürüme sağlanmaktadır.

Çizelge 5.2: Farklı robotlar için CoT değerleri

Robot	C_T
RABBIT Grizzle and Chevallereau (2017)	0.38
MABEL Sreenath (2011)	min: 0.14 max: 0.29
Saurian Arcos-Legarda et al. (2019)	0.129
tez kapsamında yapılan robot *sabit zaman aralıklı eniyileme yöntemine göre	0.121
tez kapsamında yapılan robot *değişken zaman aralıklı eniyileme yöntemine göre	0.094
Cornell Biped Collins et al. (2005)	0.055

Eksik tahrikli sistemlerin kontrolünde referans yörüngelerin etkisi in-
kar edilemez. Bundan dolayı, yörünge eniyileme işlemi de en az kontrolcü
tasarımı kadar önemlidir. Eniyileme doğruluğunu arttırmak için collocation
nokta sayısını arttırmak etkili olsa da problem çözüm süresi üstel arttığı için
uygulanabilir değildir. Bu bölümde NLP çözüm süresini koruyarak eniyileme
doğruluğunu arttıracak yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem değişken zaman
aralığına dayalı olup, eniyileme doğruluğunun her segmentte eşik değerin
altında kalmasını sağlamaktadır.

6 YÜRÜME YÖRÜNGE KONTROLÜ

6.1 Giriş

Bu bölümde, robotun yürümesi için uygun olan yörüngelerin takibi açıklanmaktadır. Yörünge takibi için sanal kısıtlar yönteminin nasıl kullanıldığı açıklanıp, benzetim ve deneysel test platformu üzerinde uygulaması gösterilmektedir.

6.2 Sanal Kısıtlamalar

Sanal kısıtlamalar, istenen yörüngeleri elde etmek için robotun durumlarına bağlı geri besleme kontrolü ile hareket uzayını sınırlayan bir kontrol olarak tanımlanır. "Sanal" terimi, bu kısıtlamaların fiziksel bir bağlantıdan ziyade, robot üzerine geri besleme kontrolü yoluyla sağlanıyor olmasından kaynaklanır. Sanal sınırlar ile sıfır dinamiği yöntemini birlikte uygulanması eksik tahrikli sistemlerin kontrolünde avantaj sağlamaktadır. Sıfır dinamiği yönteminin arkasındaki ana fikir, uygun sanal sınırlar seçilerek sistem çıktılarının sıfıra sürülmesidir. Seçilen sanal sınırlar, sistem dinamiklerine göre daha düşük boyutta alt manifold elde etmeyi sağlar (Westervelt et al., 2018).

Robot modeli tek destek fazı için Denklem 27'de tanımlanmıştır. Sistem dinamikleri $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{pmatrix}$ olarak verilmektedir. Sistem çıkışları sadece eklem açılarına bağlı olarak Denklem 69'da yazılmaktadır.

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{q}) \quad (69)$$

Çıkış fonksiyonunun birinci derece türevi Denklem 73'te verilmiştir.

$$\frac{d\mathbf{y}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} \quad (70)$$

$$\frac{d\mathbf{y}}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{q}} & \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{D}^{-1}[-\mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{D}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} \mathbf{u} \right] \quad (71)$$

$$\frac{d\mathbf{y}}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{q}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{D}^{-1}[-\mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{D}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (72)$$

$$\frac{d\mathbf{y}}{dt} = \mathbf{L}_f \mathbf{h} + \mathbf{L}_g \mathbf{h} \mathbf{u} \quad (73)$$

Mekanik modelin yapısı gereği ve aynı zamanda $\mathbf{L}_g\mathbf{h}$ sıfır olduğu için çıkışın ilk türevinde giriş terimi bulunmamaktadır. İkinci derece sistem olan robot modelinin çıkış fonksiyonunun ikinci türevi Denklem 76'da yazılmıştır.

$$\frac{d^2\mathbf{y}}{dt^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{q}} \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \dot{\mathbf{q}} \right) & \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \ddot{\mathbf{q}}} \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{D}^{-1}[-\mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{D}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} \mathbf{u} \right] \quad (74)$$

$$\frac{d^2\mathbf{y}}{dt^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{q}} \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \dot{\mathbf{q}} \right) & \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \ddot{\mathbf{q}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{D}^{-1}[-\mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}] \end{bmatrix} + \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{D}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{u} \quad (75)$$

$$\frac{d^2\mathbf{y}}{dt^2} = \mathbf{L}_f^2\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{L}_g\mathbf{L}_f\mathbf{h}(\mathbf{q})\mathbf{u} \quad (76)$$

Çıkış fonksiyonunun ikinci türevinin ilk terimi olarak yazılan $\mathbf{L}_g\mathbf{L}_f\mathbf{h}$ matrisi yalnızca eklem açılarına bağlıdır ve decoupling matrisi olarak isimlendirilmektedir. Bu matris belirli bir noktada tersine çevrilebilirse, o noktanın komşuluğunda sıfır dinamiklerin varlığı garanti edilir. Bu nedenle, tek destek fazı için sıfır dinamiklerini sağlayacak \mathbf{h} fonksiyonu aşağıdaki şartları sağlamak kaydıyla belirlenebilir.

- \mathbf{h} fonksiyonu sadece eklem açılarına bağlı olmalıdır.
- $\mathbf{L}_g\mathbf{L}_f\mathbf{h}$ decoupling matrisi kare ve tersi alınabilir olmalıdır.
- kompleks olmayan pürüzsüz $\Theta(\mathbf{q})$ fonksiyonu ile serbestlik derecesi boyundaki hareket uzayı alt uzaya sınırlandırılabilirdir.
- sınırlandırılmış alt uzayın en az bir noktasında \mathbf{h} fonksiyonu sonlanmalıdır.

Şartların sağlanması durumunda geri besleme kontrol sinyali Denklem 77'deki gibi yazılabilir ve elde edilen sistem sıfır dinamik alt manifoldudur.

$$\mathbf{u}^*(\mathbf{x}) = -(\mathbf{L}_g\mathbf{L}_f\mathbf{h}(\mathbf{x}))^{-1} \mathbf{L}_f^2\mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad (77)$$

$$f_{zero}(\mathbf{z}) = f(\mathbf{z}) + g(\mathbf{z})\mathbf{u}^*(\mathbf{z}) \quad (78)$$

Sanal kısıtlara göre geri besleme yapılarak kontrol edilen sistem, başlangıç şartları da sanal kısıtları sağlayacak şekilde ayarlanmışsa sistem çıkışları tam olarak sıfır olacaktır. Başlangıç şartları sanal sınırları karşılamıyor olsa bile kapalı döngü sistemi sayesinde asimtotik davranışla çıkışlar sıfıra sürülebilmektedir. Bunun yanı sıra sanal sınırların en büyük avantajı çalışma

uzayımı alt manifoldda indirgemesidir. Eksik tahrik derecesi bir olan beş bağı yürüyen robot için çalışma uzayının bir derece düşürülmesi yeni sistemin tam eyleyicili olmasını sağlar. Sanal kısıtlar yürüme döngüsünün tek destek fazında olduğu gibi sürekli zaman dinamik sistemler için başarıyla uygulanmaktadır. Çift destek anında çarpışmadan dolayı yeni döngünün başlangıç şartları değişecektir. Farklı başlangıç şartları için de sistem sıfıra sürülebildiği için yörünge takibi kararlılığı sağlanabilmektedir.

Robotun ritmik hareketini belirleyen $\Theta(\mathbf{q})$ açısı kalça ile destek ayağı arasındaki açı olarak belirlenmektedir. Θ açısı Denklem 80'de verilmiştir.

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -1/2 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (79)$$

$$\Theta(\mathbf{q}) = \mathbf{c}\mathbf{q} \quad (80)$$

Dört eyleyicisi olan robotun çıkış fonksiyonu dört elemanlı olmaktadır ve referans yörüngelere göre Denklem 81'deki gibi yazılmıştır.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} - \mathbf{h}_d(\Theta(\mathbf{q})) \quad (81)$$

Referans yörüngeler 'Yürüme Yörünge Planlaması' bölümünde açıklanmıştır. Fakat elde edilen yörüngeler zamana bağlı olduğu için h fonksiyonu olarak kullanılamaz. Zamana bağlı yörüngeler bir periyot için Bezier polinomu olarak yeniden yazılabilir. Bezier polinom denklemi ve Bezier polinomu türev denklemi aşağıda verilmiştir. Bezier polinom katsayıları yörünge eniyileme ile elde edilen katsayılardır.

$$b_i(s) = \sum_{k=0}^M a_k^i \frac{M!}{k!(M-k)!} s^k (1-s)^{M-k} \quad (82)$$

$$\frac{\partial b_i(s)}{\partial s} = \sum_{k=0}^{M-1} (a_{k+1}^i - a_k^i) \frac{M!}{k!(M-k-1)!} s^k (1-s)^{M-k-1} \quad (83)$$

Bezier polinomu s parametresine göre 0 ile 1 arasına normalize edilmiştir. Normalizasyon işlemi Denklem 84'te verilmiştir.

$$s(\mathbf{q}) = \frac{\Theta(\mathbf{q}) - \Theta_{min}}{\Theta_{max} - \Theta_{min}} \quad (84)$$

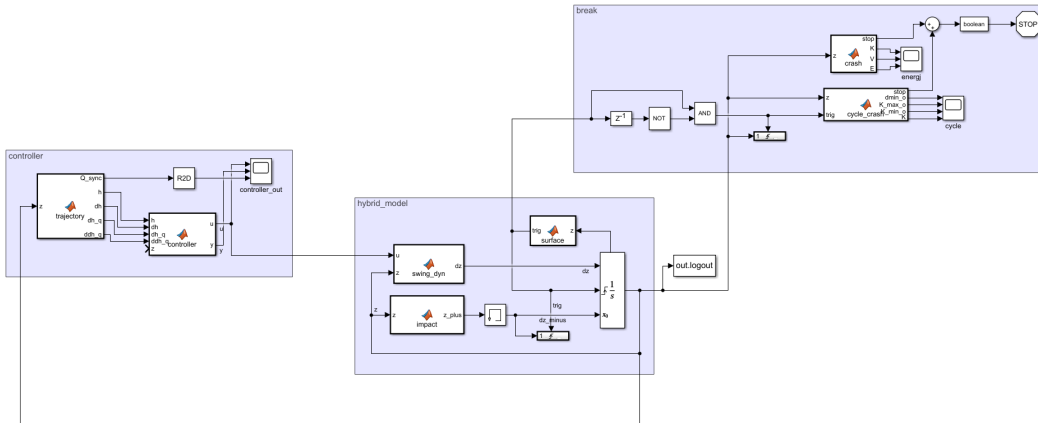
Belirlenen yörüngelere göre türetilen Bezier polinomu ile sanal sınırlar oluşturulmuştur. Buna göre Denklem 85'te kullanılan geri besleme kuralı ile beş bağılı yürüyen robotun yörüngeleri takip edilebilmektedir.

$$\mathbf{u} = (\mathbf{L}_g \mathbf{L}_f \mathbf{h})^{-1} (\mathbf{v} - \mathbf{L}_f^2 \mathbf{h}) \quad (85)$$

$$\mathbf{v} = -K_p \mathbf{y} - K_d \dot{\mathbf{y}} \quad (86)$$

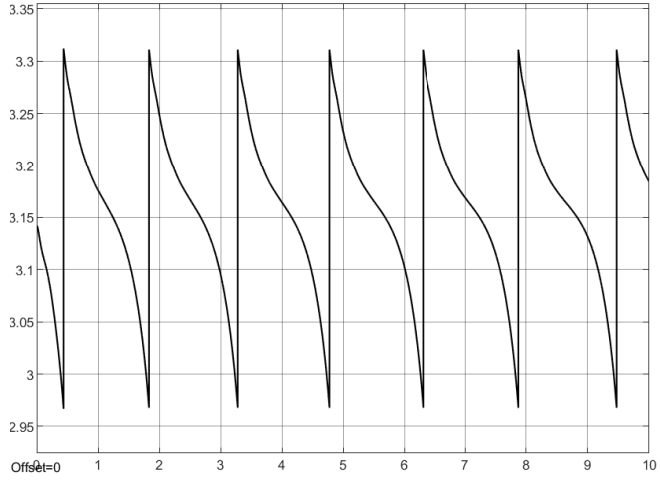
6.3 Yürüme Kontrolü Benzetimi

Beş bağılı yürüyen robotun yürüme kontrolü benzetimi yapılmıştır. Optimize edilen yörüngeler, sanal kısıtlar yöntemi ile modele uygulanmıştır. Doğrusallaştırılmış geri besleme ile PD kontrol uygulanarak eklem açılarının referans yörüngelere yakınsaması sağlanmaktadır. Benzetim ortamı Şekil 6.1'de gösterildiği gibi *Matlab-Simulink* üzerinde yapılmıştır. Durum değişkenleri integralin t^- zaman bilgisine göre çarpışma olup olmadığını kontrol etmekte ve eğer çarpışma varsa ikili destek modeline göre yeni durum değişkenleri hesaplanarak durum değişkenlerini güncellemektedir.

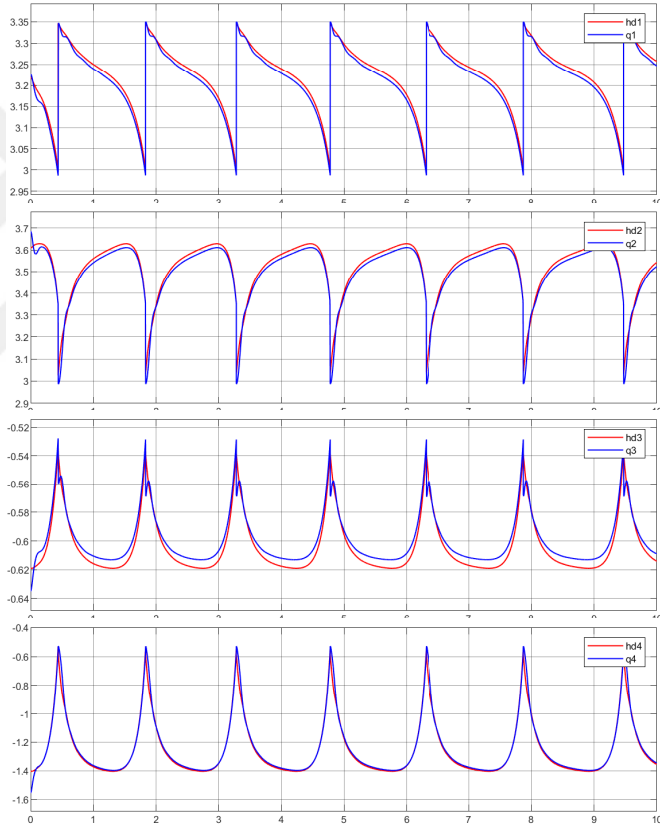


Şekil 6.1: Simulink Yürüme Benzetimi

Benzetim sonuçlarına göre Θ senkronizasyon açısı Şekil 6.2'de ve eklemlerin referans yörüngeleri ile gerçek yörüngelerin değişimleri Şekil 6.3'te gösterilmiştir.

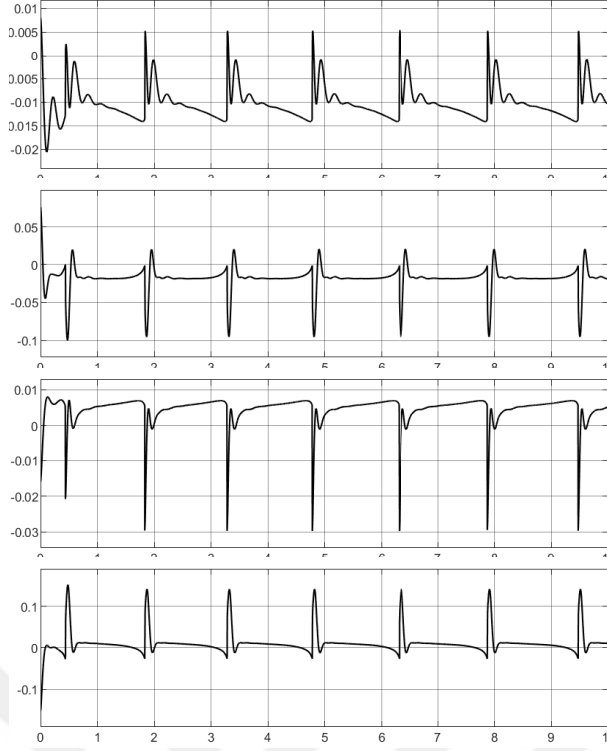


Şekil 6.2: Yürüme Senkronizasyon Açısı



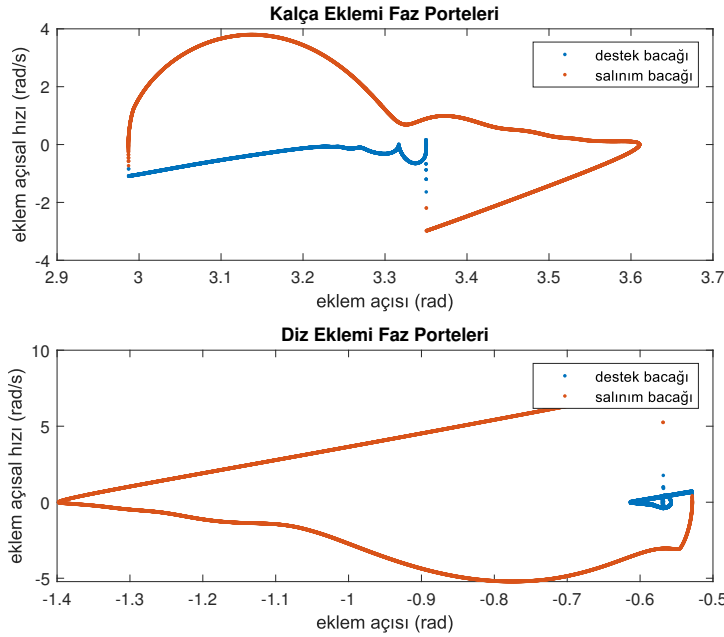
Şekil 6.3: Referans Yörüngeler ve Eklem Açıları

Sonuçlardan görüldüğü gibi, eklemler yörüngeleri başarıyla takip edilebilmektedir. Her yeni adım başlangıcında ayağın yere çarpmasıyla oluşan tepki sistem dinamiklerinde süreksizliğe yol açmakta ve anlık hata değerinin artmasına yol açmaktadır. Şekil 6.4'te eklemlerin takip hata değeri radyan cinsinden gösterilmiştir. Hata miktarı çarpışma anında yüksek olsa da belirli sınırlar dahilinde kalmakta ve adım içerisinde azalmaktadır.



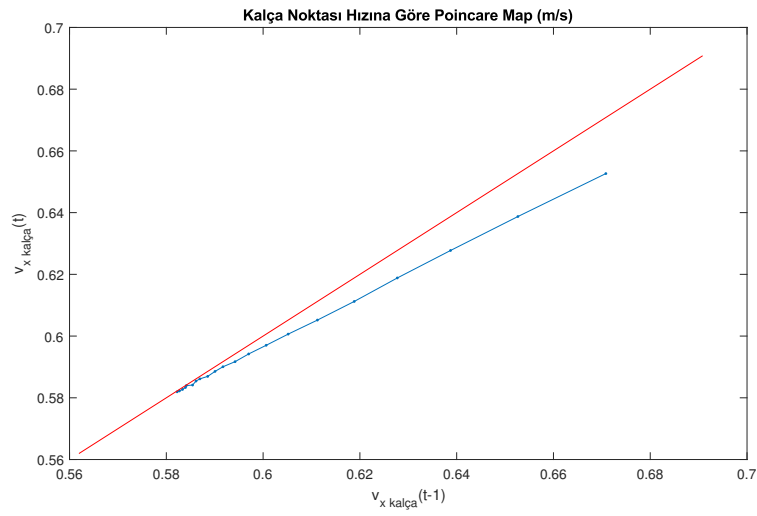
Şekil 6.4: Yörünge Takip Hata Değerleri

Dinamik yürüyüş için bir önemli nokta da periyodikliğin ve limit çevrimin sağlanmasıdır. Ancak bu şartlar da sağlanırsa yürüyüşün kararlı olduğu söylenebilir. Eklemlerin faz portreleri Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Görülebileceği gibi kararlı limit çevrim oluşturulmuştur.



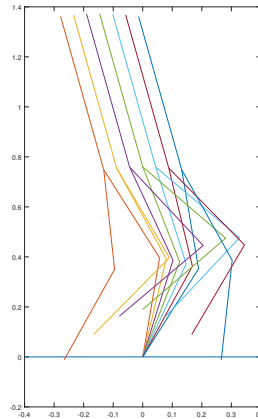
Şekil 6.5: Eklem Faz Portreleri

Limit çevrim, faz portreleri üzerinde gözlemlenebilmektedir. Buna ek olarak *Poincaré* map Şekil 6.6'da gösterilmiştir. *Poincaré* map, süreksizliğin yaşandığı her an için alınan ölçümlerin bir önceki değeri ile karşılaştırılmasına dayanır. Dinamik yürümenin periyodikliği ve kendi doğasına göre olan yürüme hızı bu şekilde gözlemlenebilir. Dinamik yürümenin yörüngelere göre belirlenen yürüme hızı başlangıç şartlarından bağımsızdır. *Poincaré* map üzerinde iki farklı başlangıç şartına göre adım atma periyodu gösterilmiştir. Daha yüksek hızda yürümeye başlayan robotun yürüme hızı yaklaşık $0.59m/s$ 'ye yakınsamaktadır.



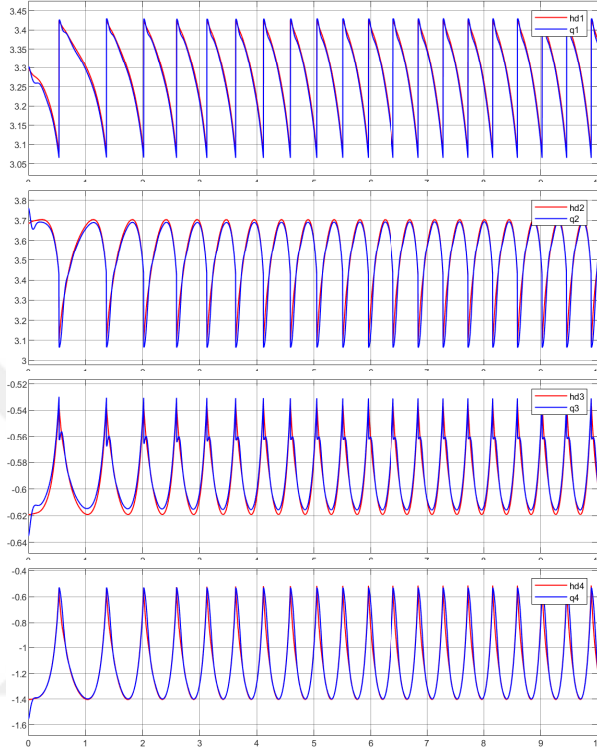
Şekil 6.6: Yavaş Yürümenin *Poincaré* Map Grafiği

Robotun yürüme pozlarının anlık değişimlerinin birleştirilmesiyle yürüme Şekil 6.7'deki gibi ortaya çıkar.

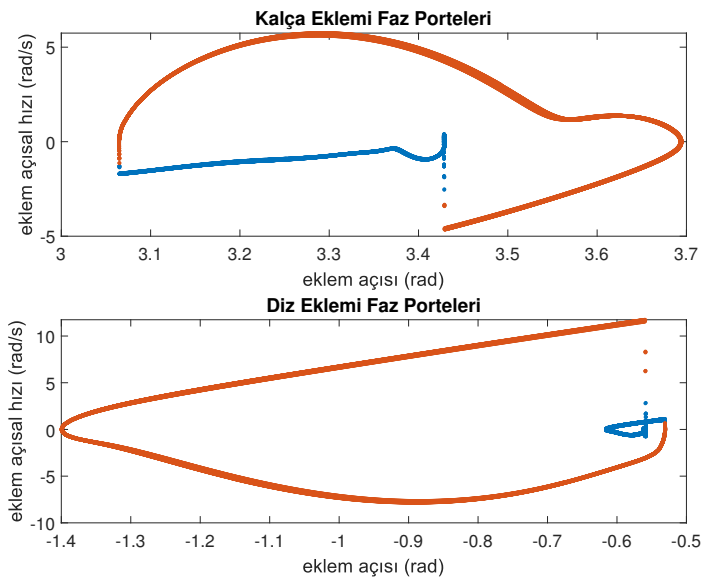


Şekil 6.7: Robot Yürüme Pozları

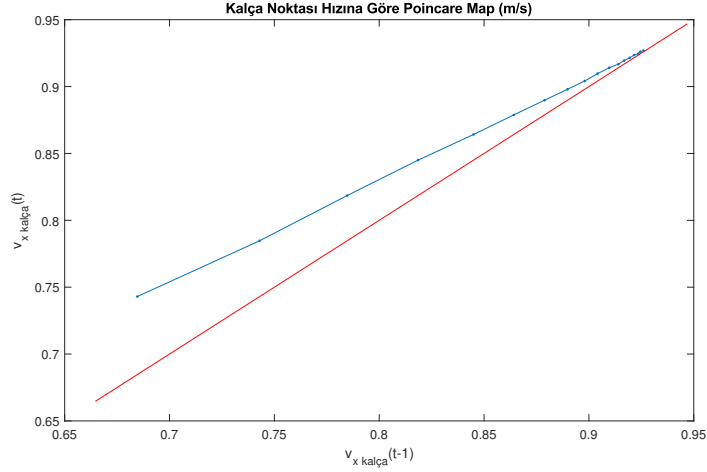
Dinamik yürüme hızının, planlanan yörüngelere bağlı olduğunu daha net ortaya koyabilmek için farklı bir yörünge seti test edilebilir. Yörünge eniyilemede gövde eğimi ayarlanarak daha hızlı bir yürüyüş test edilmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 6.8'den Şekil 6.10'a kadar olan grafiklerde gösterilmiştir. Buna göre yürüme hızı yaklaşık $0.94m/s$ 'ye yakınsamaktadır.



Şekil 6.8: Hızlı Yürüme Eklem Açıları

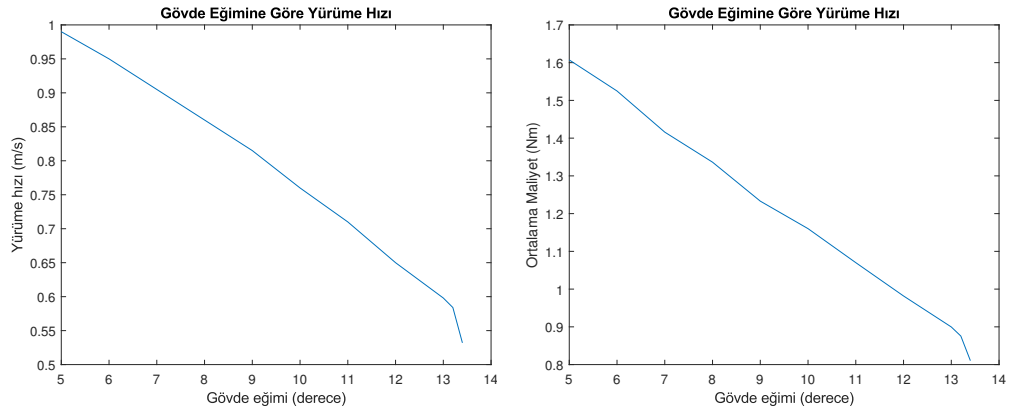


Şekil 6.9: Hızlı Yürüme Faz portreleri



Şekil 6.10: Hızlı Yürümenin *Poincaré* Map Grafiği

Robotun yürüme sırasında daha hızlı veya daha yavaş yürümesi istenilirse veya adım aralığı, adım yüksekliği gibi yürüyüş parametrelerinin değiştirilmesi istenilirse önceden oluşturulmuş yörünge veri tabanından uygun olan seçilebilir. Yörüngeler arasında doğrudan bir bağlantı olmadığından dolayı ağırlıklı olarak birleştirilmesi durumunda kararlı yürüyüş garanti edilemez. Direk kontrol edilemeyen ancak bir yörüngeyi takip etmesi sağlanabilen gövdenin eğimi eniyileme ile kontrol sinyallerini minimize edecek şekilde belirlenir. Bunun yerine gövde eğimi belirli sınırlar arasında sabit bir açıda tutularak kontrol işaretleri minimize edilmemiş olsa da yürüme hızı değiştirilebilir. Gövdenin dik açıda tutulduğu duruma göre planlanan yörüngeler temel alınarak gövde eğiminin değişimine göre oluşan yürüme hızları ve toplam harcanan güç grafikleri Şekil 6.11a'da ve Şekil 6.11b'de gösterilmiştir.



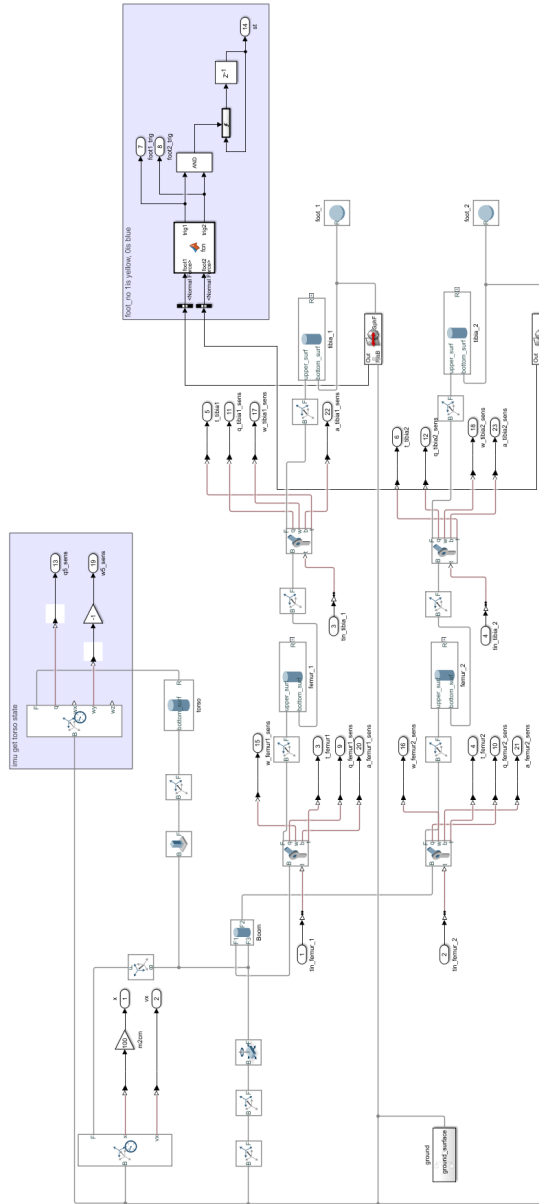
(a) Gövde Eğimine Göre Yürüme Hızı

(b) Gövde Eğimine Göre Maliyet

Şekil 6.11: Gövde Eğimi Etkisi

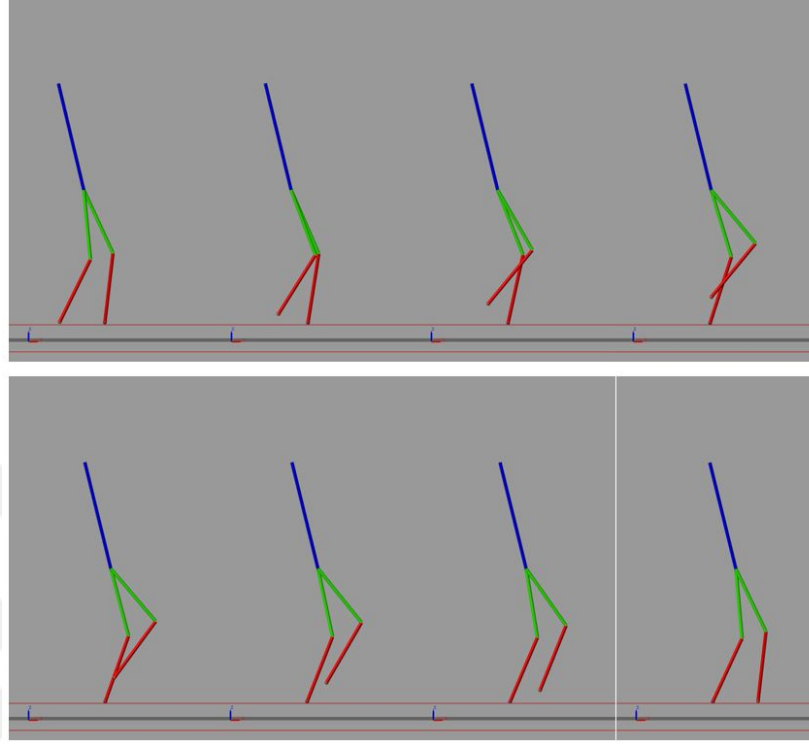
6.4 Yürüme Kontrolü Mekanik Modelleme Benzetimi

Başarılı bir benzetim gerçek dünya etkilerini en çok yansıtan benzetimdir. Matematiksel modele göre yapılan benzetimler robotun tek destek fazındaki dinamik modelini başarıyla karşılarken ayağın yere çarptığı an için yeterli olamayabilir. *Matlab Simulink Simscape Multibody* toolbox sayesinde aynı robot matematiksel model yerine katı kütleler ve eklemler ile de modellenebilmektedir. İki boyutlu veya üç boyutlu problemlerin sürtünme ihmal edilmeden kuvvet modellerine göre benzetimleri yapılabilir. Düzlemsel beş bağlı yürüyen robot modelinin üç boyutlu uzayda Simscape modeli Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.12: Robot Simscape Mekanik Modeli

Matematiksel modelde yapıldığı gibi sanal kısıtlar ve referans yörüngeler uygulanarak mekanik modele dayalı yürüme benzetimi elde edilmiştir. Yürüme animasyonundan alınan parçalı görüntüler dizisi Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



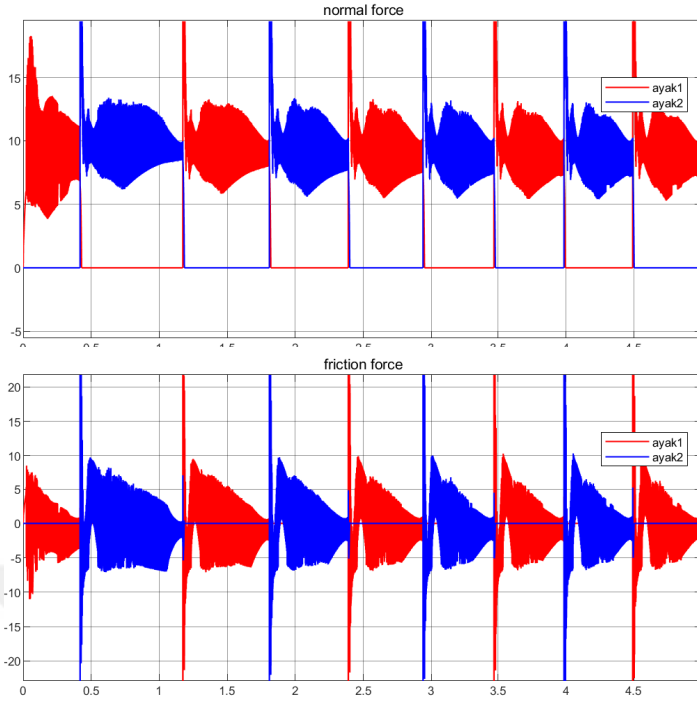
Şekil 6.13: Simscape Yürüme Animasyon Dizisi (0.2s aralıklı)

Matematiksel modelden farklı olarak temas yüzeyi özellikleri ve sürtünme kuvveti de dikkate alınmaktadır. Farklı malzemeler arasındaki temas yüzeyi parametreleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Temas Yüzeyi Özellikleri

	Kinetik Sürtünme Katsayısı	Statik Sürtünme Katsayısı
Kauçuk ile Beton	0.68	0.90
Kauçuk ile Asfalt	0.70	0.85

Yüzey ve ayaklar arasındaki sürtünme ve tepki kuvvetleri Şekil 6.14'te gösterilmektedir. Robot hareketlerinde direngenlik kontrolü yapılmamıştır. Tepkiyi azaltmak için temas yüzeyi esnek malzemeden üretilmektedir. Dolayısıyla belirli bir seviyenin üzerindeki tepki kuvvetleri ayaklar tarafından sönmölendirilemediği için robotun iki ayağının da yerden temasını kesebilmektedir.



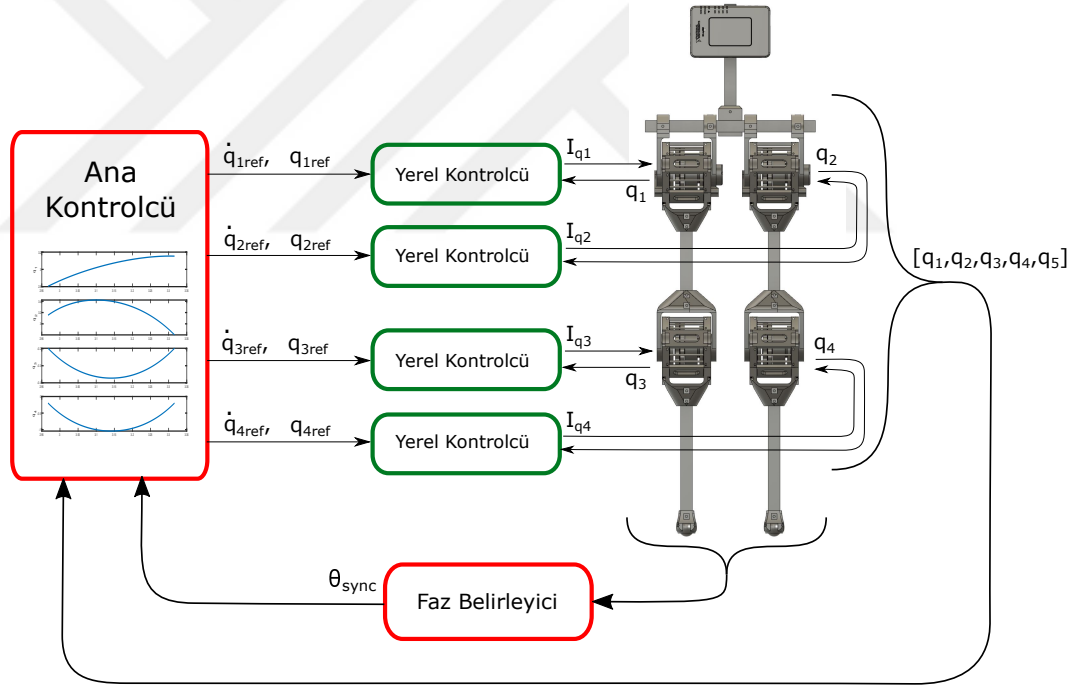
Şekil 6.14: Yüzey ile Ayak Arasındaki Kuvvetler

6.5 Yürüme Kontrolü Mekanik Model Gerçeklemesi

Matematiksel modele dayalı olarak sanal kısıtlar tanımlanmıştır. Kısıtları sağlayan yörüngeler önce zamana göre planlanmış olsa da robot durum değişkenlerine göre normalize edilerek uygulanabilmektedir. Simscape modeline göre de mekanik model tasarlanıp aynı kontrol yöntemi test edilmiştir. Temas yüzeylerinin özelliklerine göre çarpışma incelenmiştir. Yapılan testler ve elde edilen bilgiler ışığında tasarlanan mekanik model üzerinde yürüme çalışması yapılmıştır.

Üretilen mekanik modelde kontrol algoritması *NI-myRIO* kartı üzerinde çalıştırılmaktadır. Bu kart hakkında detaylı bilgi "Mekanik Model Tasarımı" bölümü altında anlatılmıştır. Kısaca iki temel işlem bölümü olduğu birisi hızlı ve paralel çalışabilen FPGA, diğeri ise yüksek hızlı ARM işlemcisi olduğu söylenebilir. Sürücü kartları ile olan haberleşme, sensör okumaları gibi donanım ile direkt bağlantılı olan fonksiyonlar FPGA tarafından yürütülmektedir. Donanım ile ilgili olan bu işlemler FPGA kapasitesini doldurmakta ve kontrol algoritması için yer kalmamaktadır. Kontrol algoritması

işlemci üzerinde gerçek zamanlı olarak yürütülmektedir. ARM işlemci üzerinde bulunan Gerçek zamanlı linux işletim sistemi sayesinde döngüler ve host haberleşmeleri gerçek dünyadaki kontrol akışına uygun olabilmektedir. Fakat buna rağmen benzetimde kullanılan örnekleme hızına yetişilememektedir. Buna ek olarak sürücüler arasındaki iletişim gecikmeleri de kontrol algoritması üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Çözüm olarak kontrol algoritmasının tek noktadan yapılmasının uygun olmayacağına karar verilmiştir. Alternatif olarak yörünge takibinin sürücülere dağıtılması ve merkezi tek kontrolcü olan *myRIO*'nun yörünge planlamasını üstlenmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu sayede 2 ms örnekleme süresiyle çalışan ana kontrolcü yörüngeleri üretmekte, üretilen referans sinyaller sürücüler üzerinde $90 \mu s$ çevrimle takip edilebilmektedir. Kontrol algoritmasının robot üzerinde çalıştırılma yerleri Şekil 6.15'te gösterilmiştir.

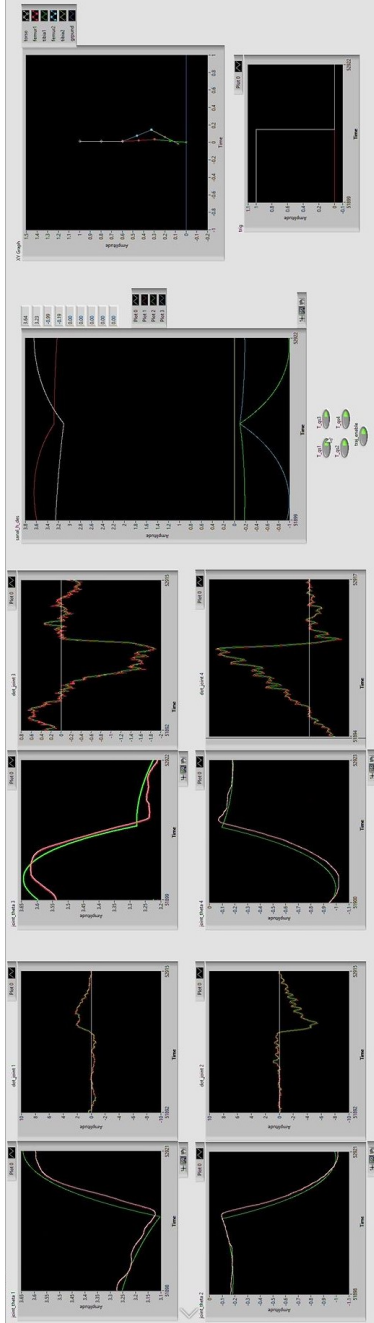


Şekil 6.15: Robot Kontrol Algoritması Çalışma Yerleri

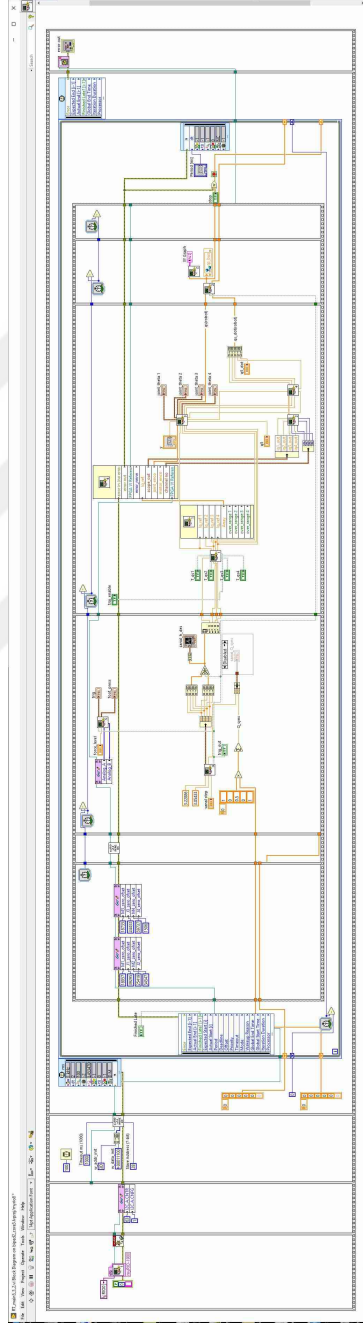
6.5.1 Ana kontrolcü

MyRIO üzerinde çalıştırılan ana işlemci algoritması *Labview* ile hazırlanmıştır. Dört eklemden ve ivme sensöründen gelen açı bilgilerine göre robotun global koordinat üzerindeki yerini belirleyebilmektedir. Ayrıca ayaklardan gelen basınç bilgisine göre de hangi fazda olduğu belirlenmektedir.

Bu bilgilere göre Bezier polinomu türetilip referans yörünge olarak sürücülere yönlendirilmektedir. Ayrıca kullanım kolaylığı için yörüngelerin takip bilgisi, robotun anlık pozisyon bilgisi de görselleştirilmektedir. *Labview* kontrol paneli ve akış kontrolü Şekil 6.16a ve Şekil 6.16b'de gösterilmiştir.



(a) Labview Kontrol Paneli

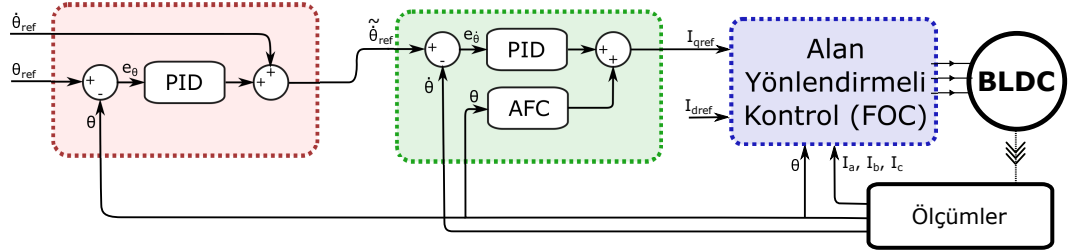


(b) Labview Akış Diyagramı

Şekil 6.16: Labview Arayüzleri

6.5.2 Yerel kontrolcü

Yerel kontrolcüler her bir eklemin sürülmesi için tasarlanmıştır. Sürücü kontrolünde hem BLDC motorun akım kontrolü yapılmakta hem de referans yörüngelerin takibi yapılmaktadır. Yerel kontrolcünün genel şematığı Şekil 6.17'de gösterilmiştir.



Şekil 6.17: Yerel Kontrolcü Diagramı

BLDC motor kontrolü FOC yöntemi ile sağlanmaktadır. FOC yöntemi ile motor akımlarını, tork bileşeni I_q ve manyetik akı bileşeni I_d olarak ikiye ayrılmaktadır. BLDC motor, manyetik akısını sabit mıknatıslardan sağladığı için I_d akımının sıfır olması istenir. Referans I_q akımı ise talep edilen tork'a göre ayarlanır. Diz ve kalça eklemlerinin dinamik davranışları ve matematiksel modelleri birbirinden farklı olduğu için modelden bağımsız PID kontrolcü kullanılmaktadır. Hem eklem açısını hem de açısal hızını belirli sınırlar dahilinde kontrol edebilmek için kaskat kontrolcü oluşturulmuştur. Kaskat kontrolcünün birinci katında pozisyon ile hız kontrol edilmektedir. Hız kontrolcüsü Denklem 89'da tanımlanmaktadır.

$$e_\theta = \theta_{ref} - \theta \quad (87)$$

$$\dot{e}_\theta = \dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta} \quad (88)$$

$$\dot{\theta}_{ref} = \left(K_p \cdot e_\theta + K_I \int_0^t e_\theta(\tau) d\tau + K_d \cdot \dot{e}_\theta \right) + K_{ff} \cdot \dot{\theta}_{ref} \quad (89)$$

Kaskat kontrolün ikinci katında ise hıza göre akım (tork ile orantılı I_q akımı) kontrol edilmektedir. Tork kontrolcüsü, pozisyon kontrolcüsüne göre yaklaşık on kat hızlı tepki verecek şekilde ayarlanmıştır. Tork kontrol katının agresif hızlı ayarlanmış olmasına rağmen motorun mekanik yapısından kaynaklanan cogging tork'u bastırmakta yeterli olamamaktadır.

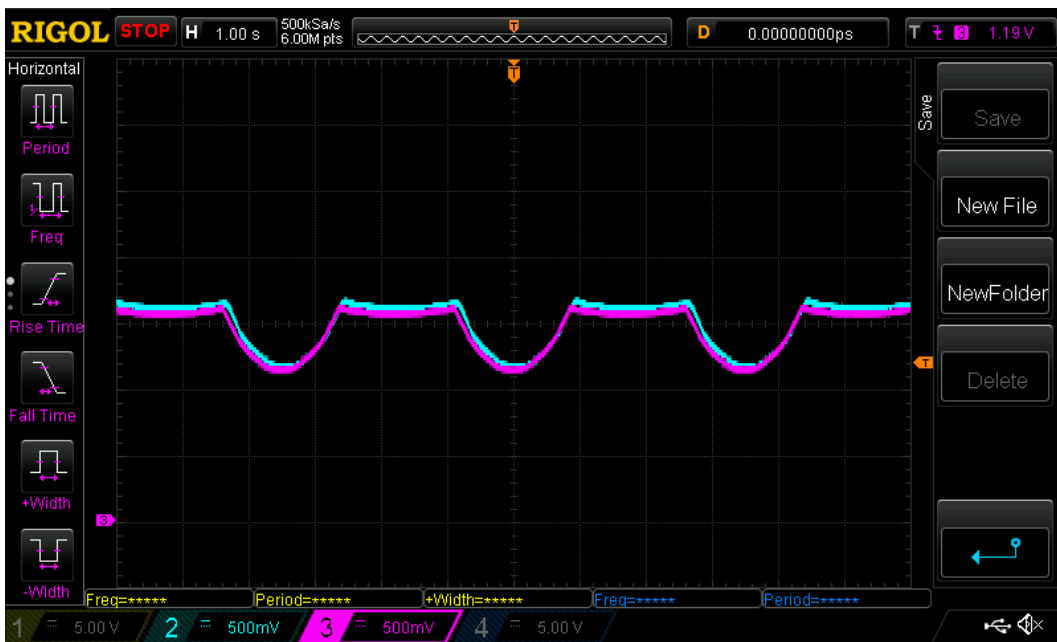
Cogging tork, motorun rotor açısına ve kutup sayısına bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan motor yedi kutba sahip olduğu için, cogging tork yedinin

tam sayı çarpanlarındaki frekanslarda gözlemlenmektedir. Fourier analizine göre, altıncı harmoniğin baskın frekansın olduğu gözlenmektedir. Cogging tork, PID ile yeteri kadar bastırılmadığı için AFC uygulanmaktadır. AFC, pozisyon bilgisine dayalı periyodik bozucuları bastırmakta önemli etki göstermektedir. Tork kontrolcü katmanı Denklem 91 'de yazılmaktadır.

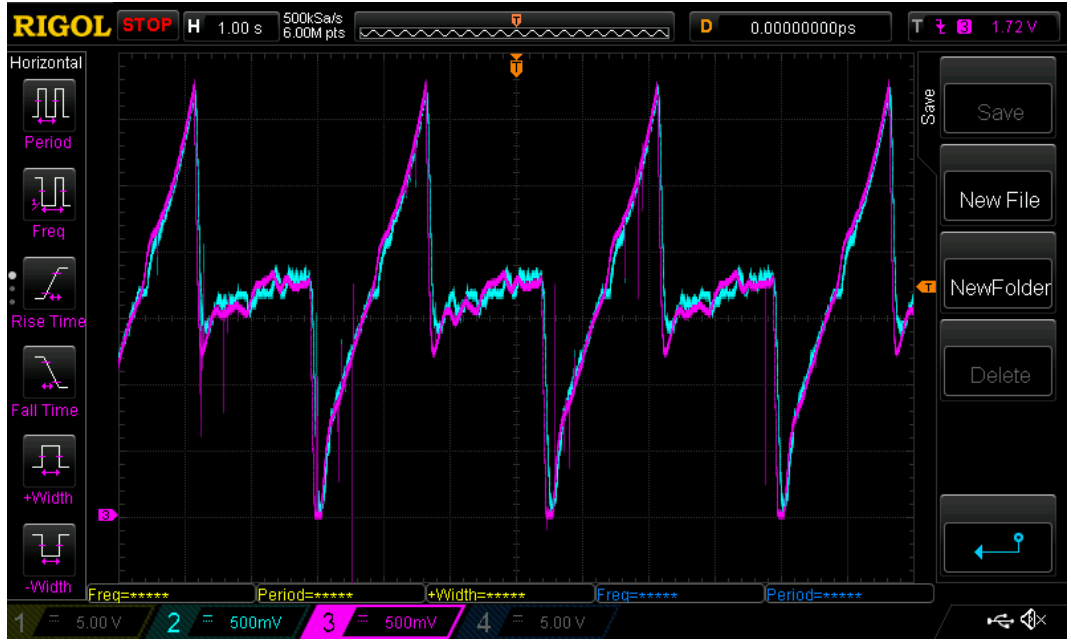
$$e_{\dot{\theta}} = \dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta} \quad (90)$$

$$I_{qref} = \left(K_p e_{\dot{\theta}} + K_I \int_0^t e_{\dot{\theta}}(\tau) d\tau + K_d \dot{e}_{\dot{\theta}} \right) + \cos(6\theta(t)) \int_0^t K_{afc} \cos(6\theta(\tau)) d\tau + \sin(6\theta(t)) \int_0^t K_{afc} \sin(6\theta(\tau)) d\tau \quad (91)$$

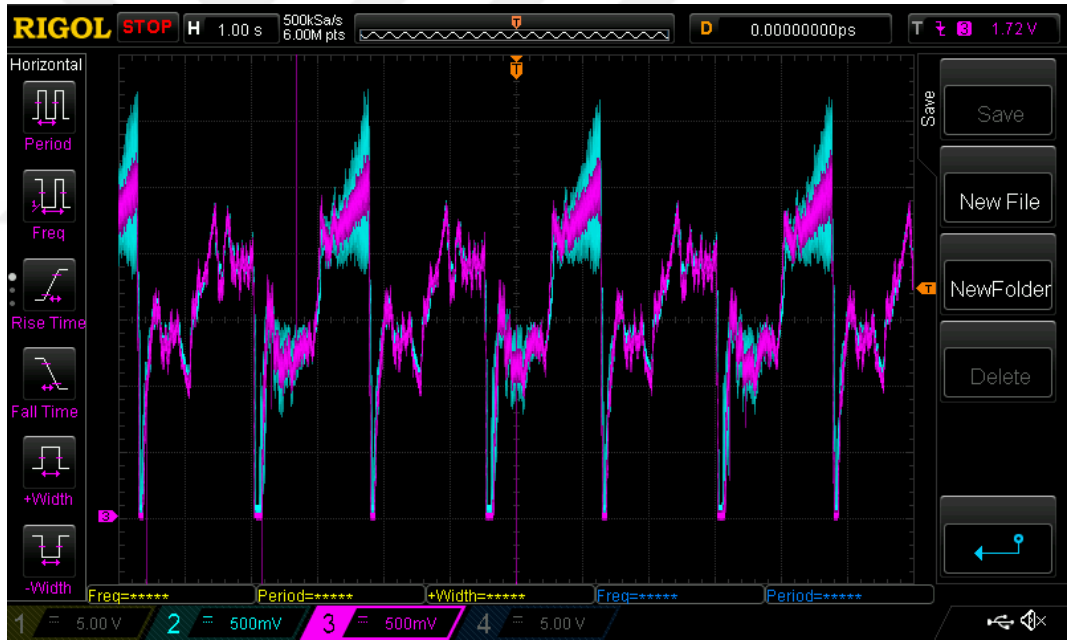
Yerel kontrolcü robot üzerinde test edilmeden önce bağımsız olarak yük ve hız testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar anlık olarak analog sinyale çevrilerek osiloskop üzerinden okunmaktadır. Örnek olarak diz eklemine bulunan yerel kontrolcünün pozisyon, hız, akım değerleri (Ch2: mavi) ve referans sinyal değerleri (Ch3: mor) Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de gösterilmiştir.



Şekil 6.18: Yerel Kontrolcü Pozisyon Takibi (osiloskop ölçeği: 1V → 110deg)



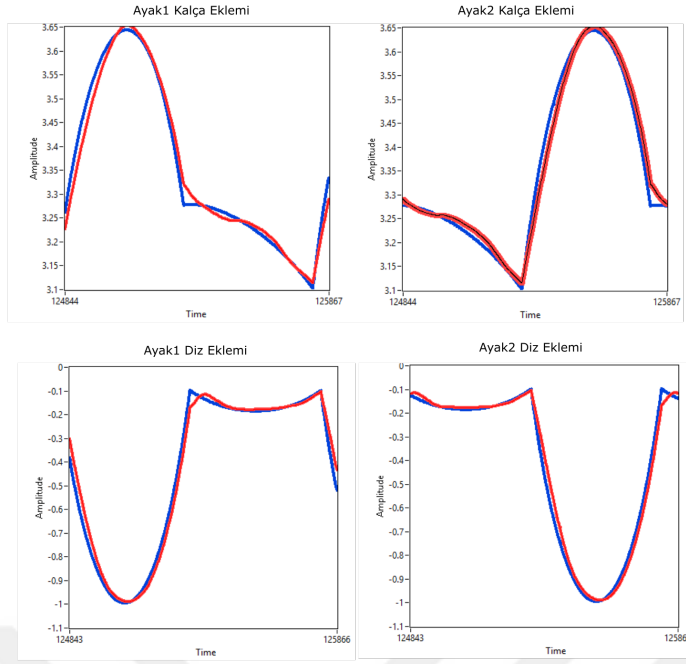
Şekil 6.19: Yerel Kontrolcü Hız Takibi (osiloskop ölçeği: $1V \rightarrow 3600deg/s$)



Şekil 6.20: Yerel Kontrolcü Akım Takibi (osiloskop ölçeği: $1V \rightarrow 1.2A$)

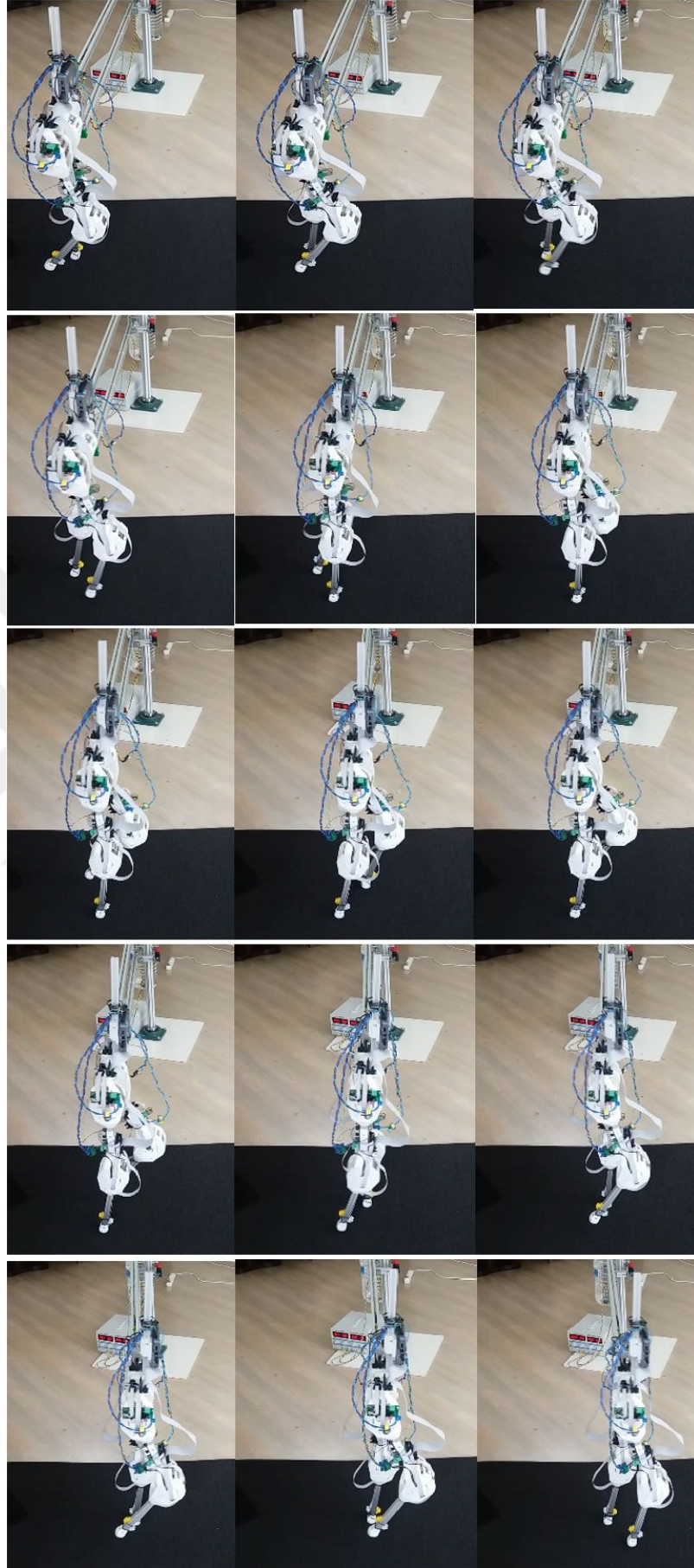
6.5.3 Gerçek model yürüme sonuçları

Yerel kontrolcüler ve ana kontrolcülerin birlikte çalışmasıyla robotun yürümesi gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir ayak yere basmadığı zaman referans yürüme hızına göre açık çevrim kontrol yapılmaktadır. Ayaklar yere bastığı zaman geri besleme kontrolü devreye girmektedir. Taşıyıcı platform etrafında yürüyen robotun eklem açıları Şekil 6.21'de gösterilmiştir.



Şekil 6.21: Robot Eklem Açıları

Silindirik yol boyunca yürüme videosu kaydedilen robotun 0.4s aralıklarla çekilen fotoğraf dizisi Şekil 6.22'de gösterilmiştir. Adım periyodu referans yörüngelere göre yaklaşık 1.3s'dir.



Şekil 6.22: Robot Yürüme Videosu Fotoğrafları (0.4s aralıklı)

7 YÖRÜNGE FAZ KONTROLÜ

7.1 Giriş

Bu bölümde, sanal kısıtlar yönteminin zayıf yönleri vurgulanarak, bu zayıflığı çözebilecek bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yöntemin avantaj ve dezavantajları belirlenerek, yörünge en iyileme yapmadan yürüme hız kontrolünün nasıl sağlandığı detaylı olarak açıklanmaktadır.

7.2 Sanal Kısıtların Yörünge Seçimine ve Başlangıç Şartlarına Karşı Hassasiyeti

Sanal kısıtlar yöntemiyle sınırlandırılan yörüngeler eksik tahrikli robotun geri besleme ile kontrolüne imkan tanımaktadır. Bu yöntem hakkında detaylı bilgi "Yürüme Yörünge Kontrolü" bölümünde açıklanmıştır. Sanal kısıtlar bir çok avantaj sunsa da başlangıç şartları ve ön tanımlı seçilen yörüngelere karşı hassasiyeti bulunmaktadır.

Beş serbestlik derecesine sahip yürüyen robotun dört kontrol girişi ile kararlı yürüyüşü ancak belirli yörüngeler için sağlanabilmektedir. Türetilen yörüngeler kontrol sinyallerini minimize etmenin yanı sıra ZMP, sistem dinamikleri ve eklem sınır şartlarını sağladığı için başarıyla yürüme hareketini sağlamaktadır. Çarpışma anında yaşanan yörünge sıçraması da yörünge takibi sayesinde kontrol altına alınabilmektedir. Fakat mantıklı bir yürüme hareketi sergilemeye aday eklem yörüngeleri eniyileme ile elde edilmediği için başarıyla yürüyememektedir. Denklem 92 ile Denklem 96 arasında eklem yörüngeleri için aday yürüme yörüngeleri tanımlanmıştır.

$$Q_{sync} = \frac{n\pi}{6} \quad n \in [0 : 6] \quad (92)$$

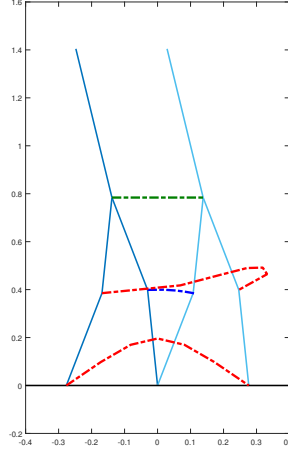
$$Q_{stance} = -2\gamma \frac{Q_{sync}}{\pi} + (\pi + \gamma) \quad (93)$$

$$Q_{swing} = 2\gamma \frac{Q_{sync}}{\pi} + (\pi - \gamma) \quad (94)$$

$$r_{stance} = \left| \frac{0.98(l_{tibia} + l_{femur})}{\cos(Q_{stance})} \right| \quad (95)$$

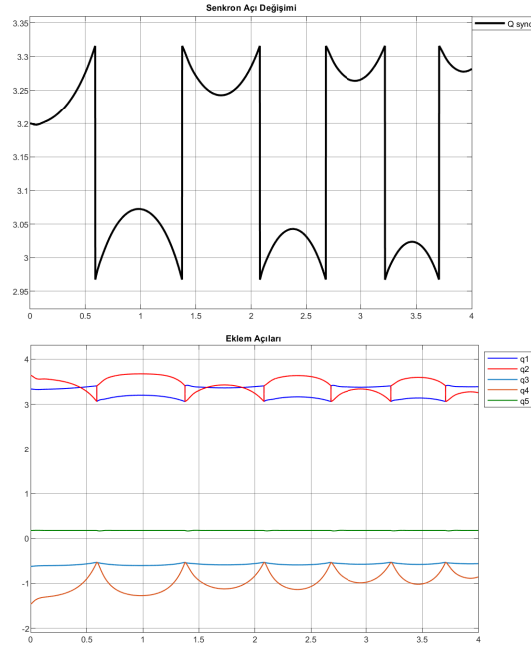
$$r_{swing} = \left| \frac{0.98(l_{tibia} + l_{femur})}{\cos(Q_{stance})} \right| \left(1 - 0.25 \sin(Q_{sync}) \right) \quad (96)$$

Yörüngeler, sabit kalça yüksekliği, γ bacak açıklığı ve h_{step} salınım ayağı yüksekliği şartlarını sağlayacak şekilde üretilmiştir. Yörüngelerin uygulanmasıyla robotun alması gereken hareketler Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



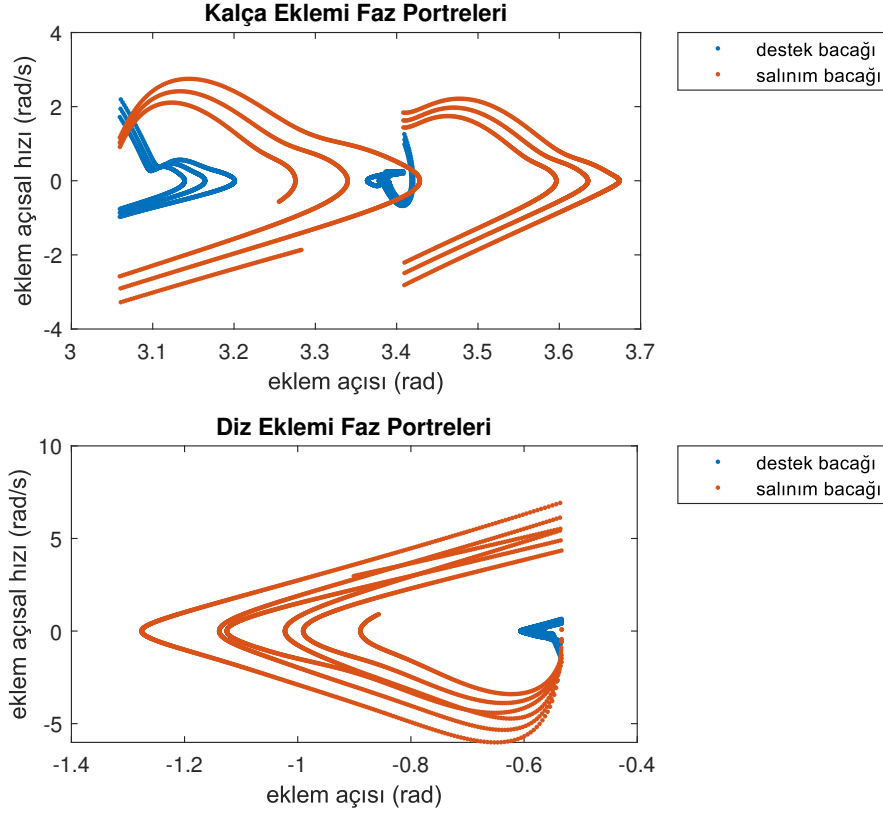
Şekil 7.1: Aday Yörüngeye Göre Robot Hareketleri

Aday yörüngelerin başlangıç pozisyonu salınım ayağının yerden kalktığı an ve başlangıç hızları sıfır olarak kabul edilirse robotun sınırlandırılmış yörüngeleri takip ettiği ama yürüyemediği görülecektir. Bu durumun benzetim sonuçlarının zamana göre değişimi Şekil 7.2'de, eklemlerin faz portrelerinin değişimi Şekil 7.3'te gösterilmiştir.



Şekil 7.2: Aday Yörüngelerin Zamana Göre Benzetim Sonucu

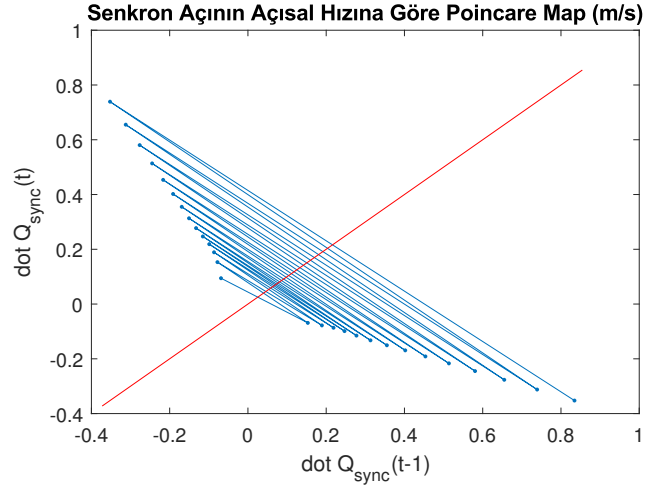
Senkron açının sürekli olarak tek yönde ilerlemediği görülmektedir. Bu durum robotun ileri geri salınım yaptığı ve yürüyemediği anlamına gelmektedir. Aynı durum faz portrelerindeki kararsızlıktan da görülebilmektedir.



Şekil 7.3: Aday Yörüngelerin Faz Portrelerinin Değişimi

Aday yörüngelerin takip edilebilmesine rağmen yürümenin gerçekleşmediği görülmektedir. Çünkü aday yörüngelere göre iki kararlı çalışma noktası oluşmaktadır. Birisi sürekli ve periyodik yürümenin sağlandığı çalışma noktası, diğeri ise çift destek ayağı ile dengenin sağlandığı çalışma noktasıdır. "Yürüme Yörünge Kontrolü" bölümünde periyodik ve kararlı yürümenin *Poincaré* map ile sabit hıza yakınsadığı gösterilmiştir. Benzer şekilde aday yörüngelerin yürümeyi sağlayamadığı ve çift destek noktasına yakınsadığı Şekil 7.4'te gösterilen *Poincaré* map ile anlaşılmaktadır.

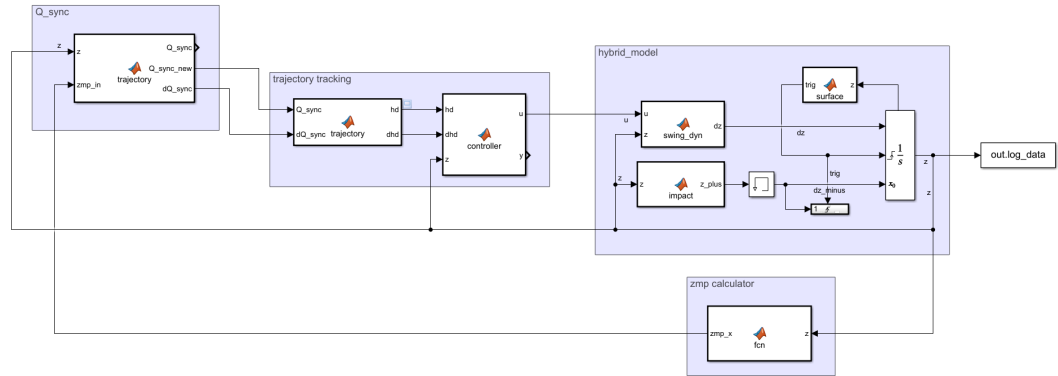
Mantık çerçevesinde üretilmiş olan aday yörüngelerin, çeşitli başlangıç şartlarına göre sanal kısıtlar yardımıyla sınırlandırılmış olması, periyodik yürümenin garanti edilemeyeceğini göstermektedir. Bu da bize sanal kısıtların başlangıç şartlarına bağlı olduğunu ve yörünge eniyilemeye ihtiyaç duyduğunu gösterir.



Şekil 7.4: Aday Yörüngelerin *Poincaré* Map Gösterimi

7.3 Senkronizasyon Açısının Faz Kontrolü

Optimal yörüngeler ile yürüyen robotun doğrusal senkron açı değişimi gösterdiği görülmüştür. Bu da senkron açı değişiminin sabit örnekleme aralığı ile gerçekleştiğini gösterir. Fakat mantık çerçevesinde türetilen aday yörüngelerde ZMP dikkate alınmadığı için sabit hızla değişen senkron açı kararlı yürüyüş sergileyememiştir. ZMP'yi ve robotun yürüme hızını dikkate alarak senkron açığı kontrol etmek aday yörüngeleri de uygulanabilir kılmaktadır. Senkron açı kontrolünü gösteren şematik Şekil 7.5'te gösterilmiştir.

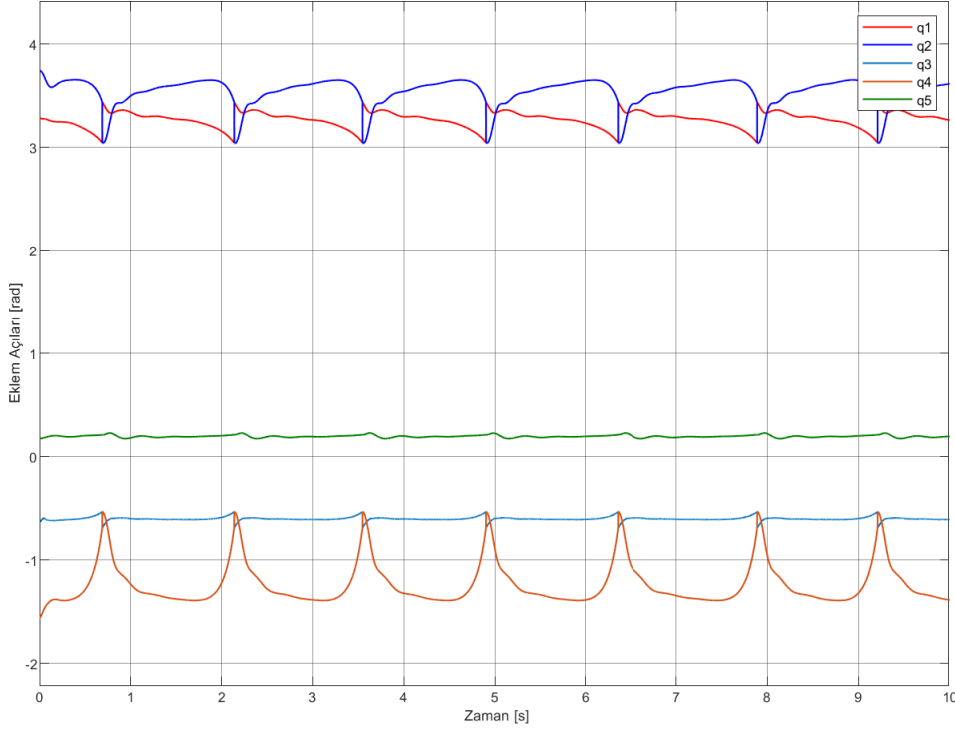


Şekil 7.5: Senkron Açık Kontrol Şeması

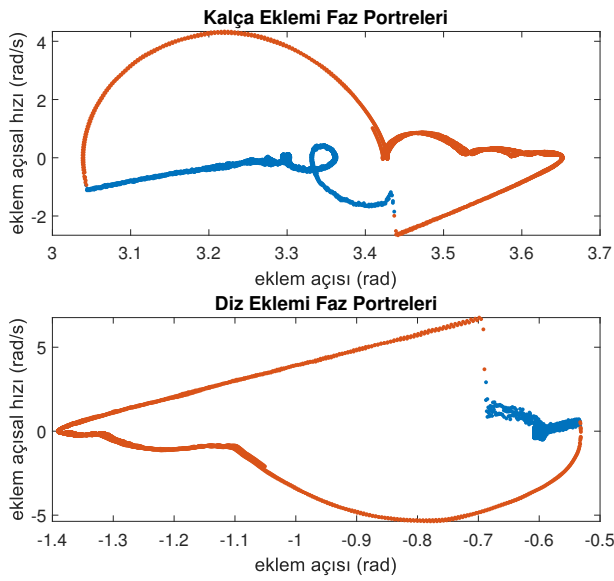
Senkron açı, referans ZMP'yi takip edecek şekilde Denklem 97'de gösterilen ϕ faz değişkeni ile kontrol edilmektedir.

$$Q_{sync} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -1/2 & 0 & -1 \end{bmatrix} q_s + \phi \quad (97)$$

Bu sayede mantık çerçevesinde türetilmiş herhangi bir yürüme yörüngesi, başlangıç şartlarından bağımsız olarak yürümeyi sağlayabilmektedir. Benzetim sonuçlarının zamana göre değişimi Şekil 7.6'da, eklem faz portreleri Şekil 7.7'de gösterilmektedir.



Şekil 7.6: Faz Kontrollü Yürüme Takibi Eklem Açıları Değişimi

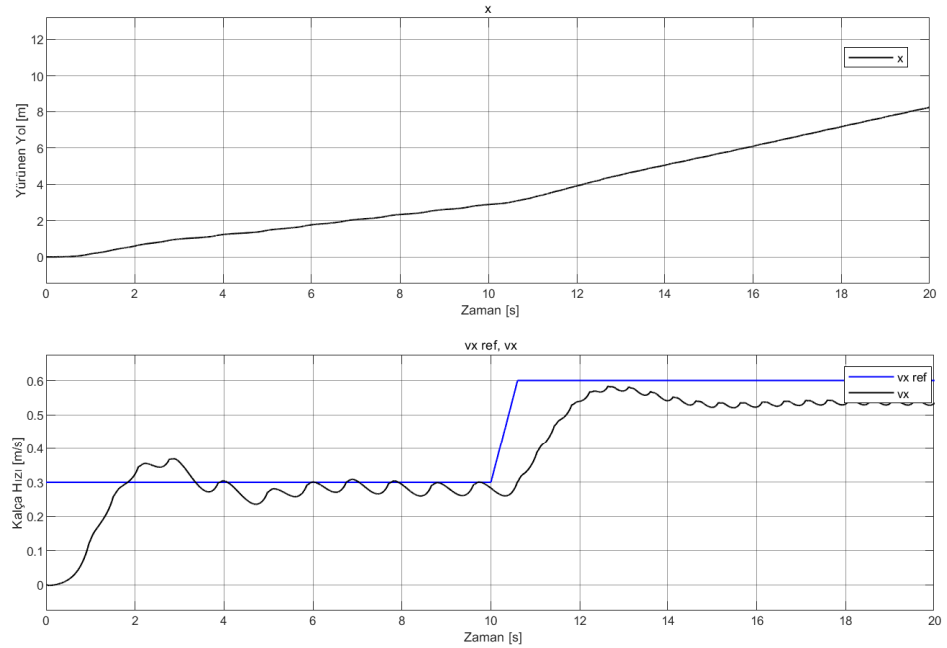


Şekil 7.7: Faz Kontrollü Yürüme Takibi Eklem Faz Portreleri

7.4 Senkronizasyon Açısının Fazı ile Yürüme Hız Kontrolü

Senkron açının değişken faz farkıyla kontrol edilmesi yürümlerin uygulanabilirliğini kolaylaştırmaktadır. Referans yürüme hızı alınan geri beslemeye göre kapalı çevrimde kontrol edilerek faz kayması olarak uygulanmaktadır. Bu sayede robotun yürüme hızı kontrol edilebilmektedir. Onuncu saniyede 0.3 olan yürüme hızı referansı 0.6'ya çıkarılmaktadır.

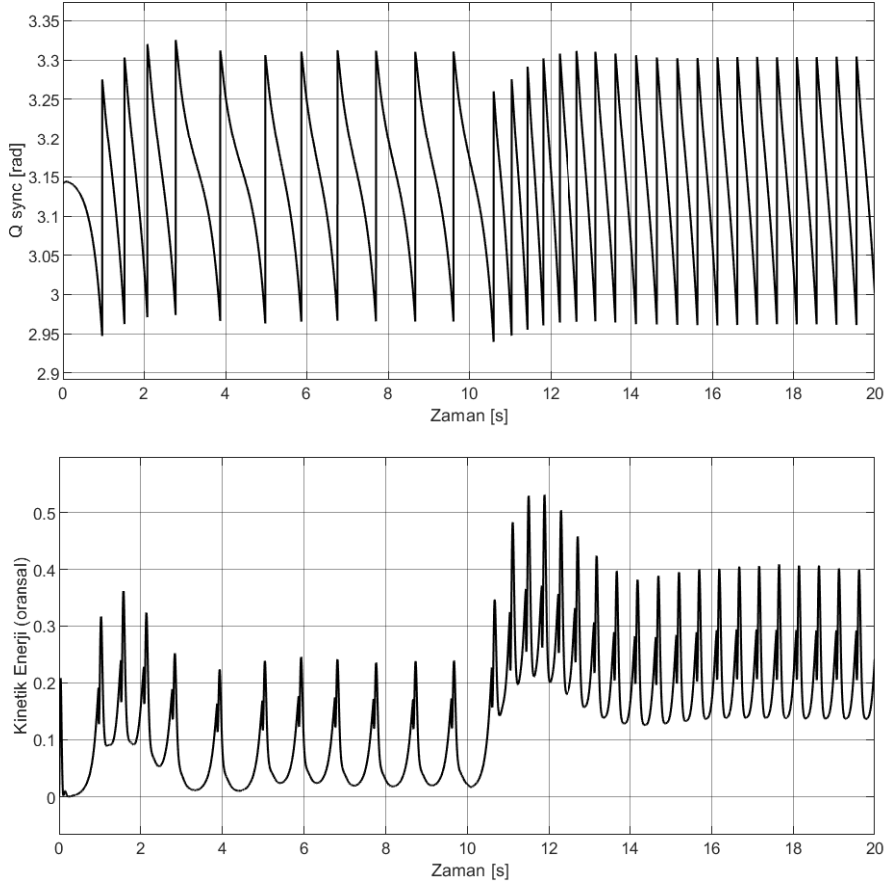
Buna göre robotun yürüdüğü uzaklık ve hız değerleri Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Yürümede yaşanan bu değişim senkron açısı ve kinetik enerji üzerinde Şekil 7.9'daki gibi gözükmemektedir. Robotun pozisyonunu gösteren ilk grafikte yaklaşık onuncu saniyeden sonra eğimin değiştiği açıkça görülmektedir. Robotun hızını gösteren ikinci grafikte ise, siyah ile gösterilen robotun yürüme hızı mavi ile gösterilen yürüme hızını takip etmektedir. Fakat robotun salınarak yürümesinden ve her adımda ayağın yere çarpmasından dolayı yürüme hızında doğal bir dalgalanma oluşmaktadır.



Şekil 7.8: Faz Etkisi ile Artı Yönde Hız Kontrolü, Yürünen Yol ve Yürüme Hızı

Kinetik enerjinin herhangi bir anda sıfır olması bundan sonra herhangi bir yönde yürümenin sağlanamayacağı anlamına gelir. Dolayısıyla robotun

kinetik enerjisini artırmakta yürüme hızını artırmak anlamına gelmektedir. Yaklaşık onuncu saniyeden sonra referans hızın değiştirilmesi hem senkron açının frekansından hem de enerji değişiminden görülmektedir.

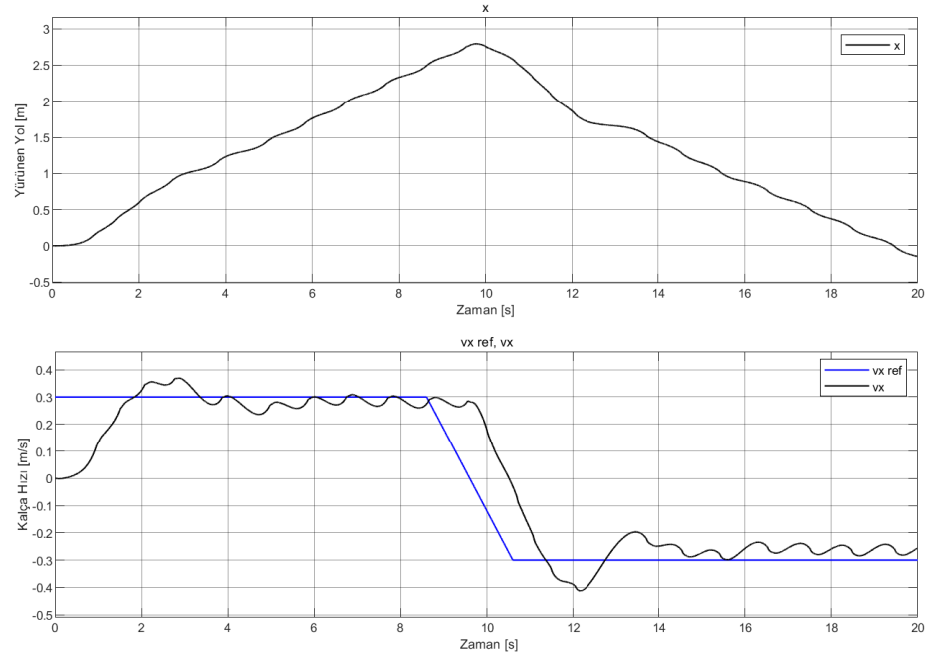


Şekil 7.9: Faz Etkisi ile Artı Yönde Hız Kontrolü, Senkron Açısı ve Toplam Kinetik Enerji

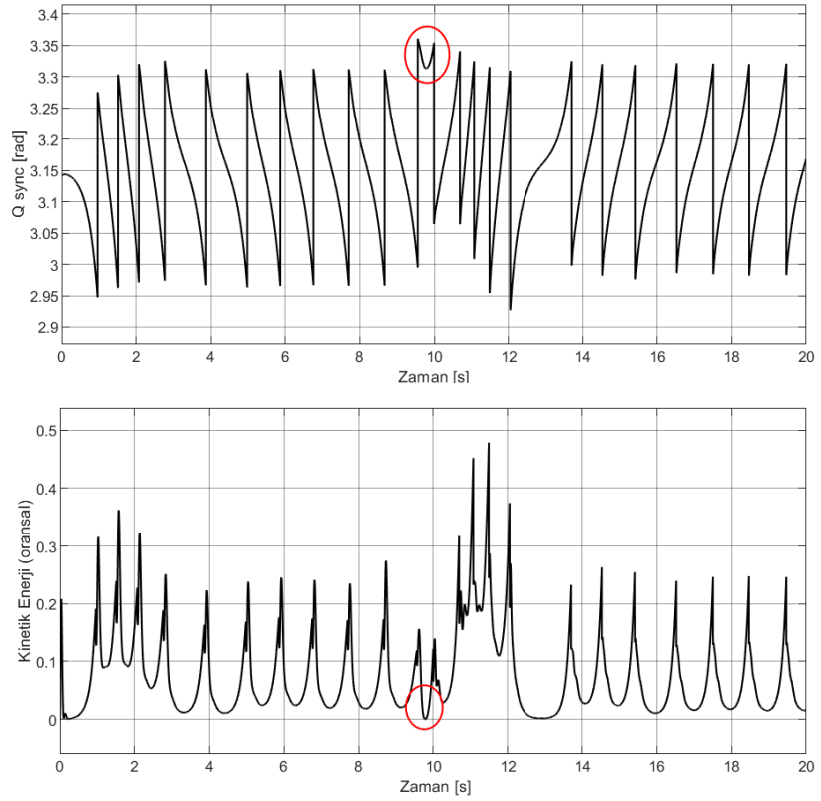
Faz kayması ile toplam kinetik enerji kontrol edilerek robotun yürüyüş hızı istenilen değere ayarlanabilmektedir. Faz değerinin eksi olması ise artı faz ile aynı şekilde toplam kinetik enerjiyi arttırmaktadır. Fakat bu sefer yürüyüş hızını ters yönde arttırmakta ve robotun geri yürümesini sağlamaktadır. Bu sayede aynı yörüngeler için robotun hem ileri hem de geri yürüyüşü sağlanmış olmaktadır. Pozitif hız değişiminde uyguladığımız senaryoya benzer şekilde yaklaşık 8.5s 0.3 olan hız referansını -0.3 yaparak robotun ters yönde yürümesi sağlanmıştır.

Şekil 7.10'da yürünen yol ve yürüme hızı gösterilmiştir. Grafikte onuncu saniyeden sonra yaşanan hız değişimi ve ilerlemenin ters yöne döndüğü görülmektedir. Yürümede yaşanan bu değişim senkron açısı ve kinetik enerji

üzerinde Şekil 7.11'de görülmektedir.



Şekil 7.10: Faz Etkisi ile Eksi Yönde Hız Kontrolü, Yürünen Yol ve Yürüme Hızı



Şekil 7.11: Faz Etkisi ile Eksi Yönde Hız Kontrolü, Senkron Açığı ve Toplam Kinetik Enerji

Sanal kısıtlar yönteminin geliştirilmesiyle, optimize olmayan yörüngelere göre de yürüme sağlanmıştır. Faz portresi üzerinde zamandan bağımsız olarak takip edilen senkron açının kontrolü hem yürüme kararlılığı sağlarken hem de ileri ve geri yönde hız kontrolü yapmaya olanak tanımaktadır.



8 MERKEZİ ÖRÜNTÜ ÜRETİCİ YÜRÜME KONTROLÜ

8.1 Giriş

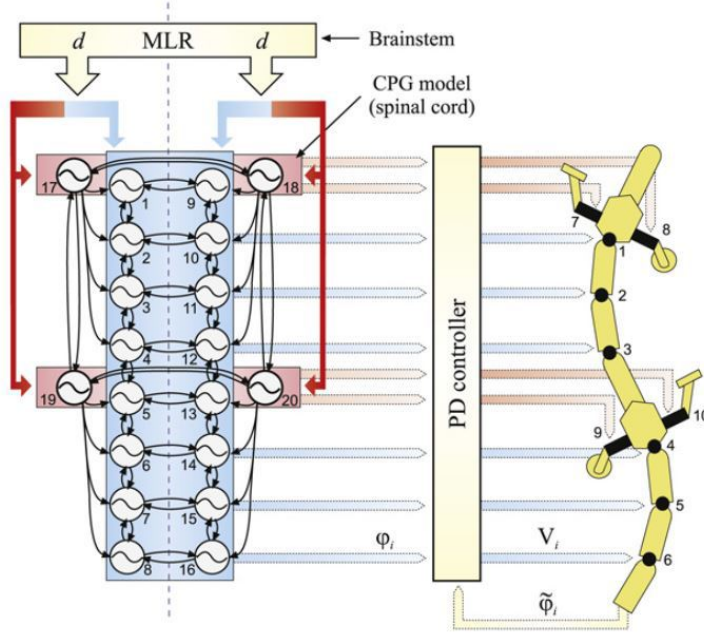
Bu bölümde, merkezi örüntü üretici (Central Pattern Generator-CPG) yöntemi ile yürüyen robot kontrolü açıklanmaktadır. Biyomimetik çalışmalar ile robotik kontrol alanına aktarılmış olan yöntemin avantaj/dezavantajlarının tartışılmasının yanı sıra benzetim çalışmalarına göre elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmaktadır.

8.2 Merkezi Örüntü Üretici

Hayvanların hareketleri, iskelet ve kas sistemlerinin aktivitesiyle oluşmaktadır. Fakat kas sisteminin tetiklenmesi ve kontrolü nörolojik aktiviteler tarafından sağlanmaktadır. Fleksör ve ekstansör kasılmasının ritmik aktiviteleri sayesinde motor yürüyüş modeli oluşturulmaktadır. Nörofizyoloji çalışmaları, bu motor modellerin omurilikteki karmaşık bir nöron ağı tarafından üretildiğini göstermektedir. Omurilik hasarına uğramış kedilerin temel yürüme yeteneğini kaybedeceği gösterilmiştir. Fakat ayak bileği fleksöründe ve ekstansörde bazı ritmik alternatif kasılmalar tetiklenebildiği görülmektedir. Buna ek olarak düşük beyin sinyalleri sergileyen fakat sağlam omuriliği olan kedilerin koşu bandı üzerinde basabildiklerini ve ritmik motor hareketlerini üretebildiklerini göstermiştir. Diğer birçok araştırmacı tarafından yapılan deneylerde, ritmik çıktı üreten bu sinir ağlarının sadece kedilerde değil, diğer birçok omurgalı hayvanda da bulunduğunu kanıtlanmıştır. Omurilikte ritmik motor örüntüsü oluşturan bu sinir ağlarına Merkezi Örüntü Üretici denilmektedir. CPG'ler kısaca, ritmik girdiler almadan ritmik örüntü üretebilen nöral devreler olarak tanımlanabilir.

Biyolojik bir yaklaşım olan CPG, biyomimetik çalışmalar ile robotik uygulamalara aktarılmıştır. Kontrol perspektifinden bakıldığında, hayvanların hareket kontrolcüsü ileri besleme ve geri bildirim kontrol sistemi olarak ele alınabilir. Üst düzey merkezi sinir sistemi, hareket başladığında hareket parametrelerinin başlangıç değerlerini göndermek için ileri beslemeli bir kont-

rolör kullanmakta, çevrenin ve bozucuların bilgileri, hareketin kararlılığını sağlamak için geri bildirim olarak alınmaktadır. Hayvanlarda olan ve robotik uygulamalara aktarılan CPG temelli ritmik hareketler Şekil 8.1'deki şematikte gösterilmiştir.



Şekil 8.1: Hayvan Hareketinin Kontrol Şematığı (Ijspeert, 2008)

CPG, çeşitli matematiksel modelleri ve esnek ağ yapıları sayesinde birçok robotik çalışmada kullanılmıştır. Özellikle yürüyen robot çalışmalarında sunduğu avantajlardan dolayı sıklıkla tercih edilmektedir. Robotlarda yürüme kontrolü olarak CPG ağları kullanılması aşağıdaki avantajları sağlamaktadır;

- Herhangi bir sensör veya yüksek dereceli giriş olmadan periyodik kontrol sinyalleri üretebilirler. Bu da, bir robotun sadece CPG kontrol sinyallerini kullanarak düz yolda hareket edebilmesini sağlar.
- Her CPG ünitesinin bir robotun bir eklemine kontrol ettiği ve tüm ağın bir hareketi tam olarak koordine ettiği dağıtılmış bir kontrol sistemi oluşturur.
- Aynı model üzerinde farklı parametreler kullanılarak farklı yürüyüşler oluşturulabilir. Bu, hareket sırasında yürüyüş geçişinin gerçekleştirilmesine izin verir.

- Sensör ve daha yüksek seviyeli girişler sisteme bağlanabilir, böylece yürüyüş çevreye uyum sağlar. Bu sayede, CPG temelli yöntemler kullanarak, robotlar açık döngü kontrolü ile düz yolda yürüyebilir veya kapalı döngü kontrolü ile bozuk yolda da yürüyebilir.

Bu yöntem, yürüyen robotlar arasında sadece iki ayaklı değil, aynı zamanda dört ve altı ayaklı robotların yürümesinde de kullanılmaktadır. Dört ve altı ayaklı yürüyen robotlarda farklı yürüme türleri, aynı modelin parametrelerinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Buna ek olarak amfibi robotlarda da kullanılmaktadır. Karada yürüme deseni uygulanırken suya girdiği zaman yürümeden yüzmeye dönen hareket sinyalleri aynı CPG ağı ile üretilmektedir.

Yürüyen robotlarda CPG kullanılmadan önce üç ana nokta belirlenmelidir.

- Kullanılacak CPG nöron modeli belirlenmelidir.
- Robotun eklem yapısına göre CPG ağ bağlantısı belirlenmelidir.
- Yürüme başarı kriterleri belirlenerek ağ parametreleri eğitilmelidir.

8.3 Nöron Modeli

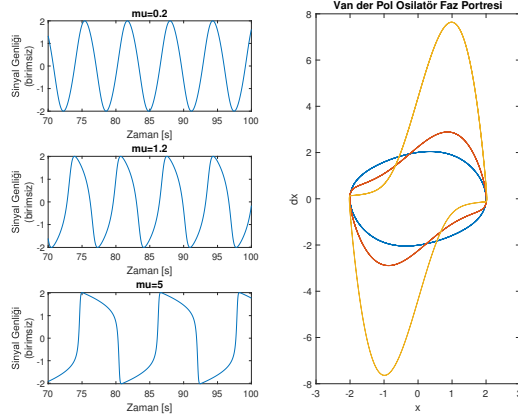
CPG nöronları yapısı gereği kendi kendine salınım yapabilmektedir. Dolayısıyla bu durumu matematiksel olarak en iyi karşılayan denklemler osilatörlerdir. Biyolojik yaklaşımlarla nöral osilatörler ve doğrusal olmayan osilatörler tanımlanmıştır, bu osilatörlerin her birisi farklı kararlılık şartları ve farklı salınım grafikleri sergilemektedir. Yürüme kontrolünde kullanılan osilatörlerin bazıları incelenmektedir.

8.3.1 Van der Pol osilatör

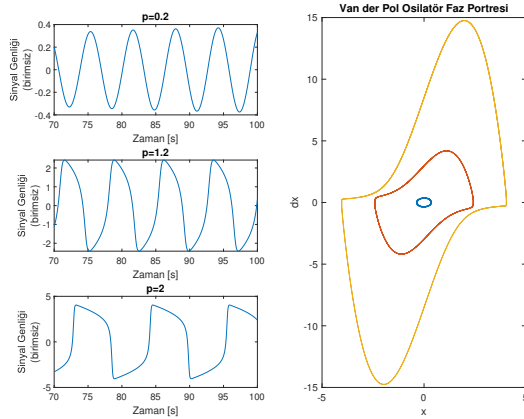
Van der Pol (1926) tarafından keşfedilen Van der Pol osilatörü, korunumlu sistem olmayan (non-conservative) kararlı bir osilatördür. Bu osilatör, elektrik devrelerinin ve kalp atışı modellerinin analizi ile nöronlardaki aksiyon potansiyeli gibi fiziksel ve biyolojik alanlarda sıklıkla kullanılmıştır. İkinci mertebe diferansiyel denklemi, Denklem 98'de verilmiştir.

$$\ddot{x} + \mu(x^2 - p^2)\dot{x} + w^2x = 0 \quad (98)$$

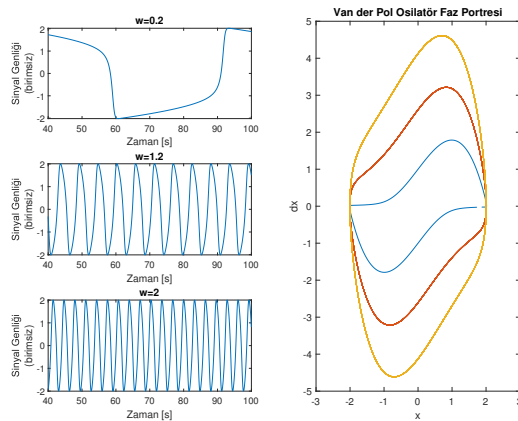
x sistem değişkeni, μ ve p direnç parametreleri ve w osilatör giriş katsayısıdır. Osilatör parametrelerine göre sistem değişkenlerinin zamana göre değişimi ve faz portresi aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 8.2: Van der Pol Osilatör μ 'ye Göre Değişimi



Şekil 8.3: Van der Pol Osilatör p'ye Göre Değişimi



Şekil 8.4: Van der Pol Osilatör w'ye Göre Değişimi

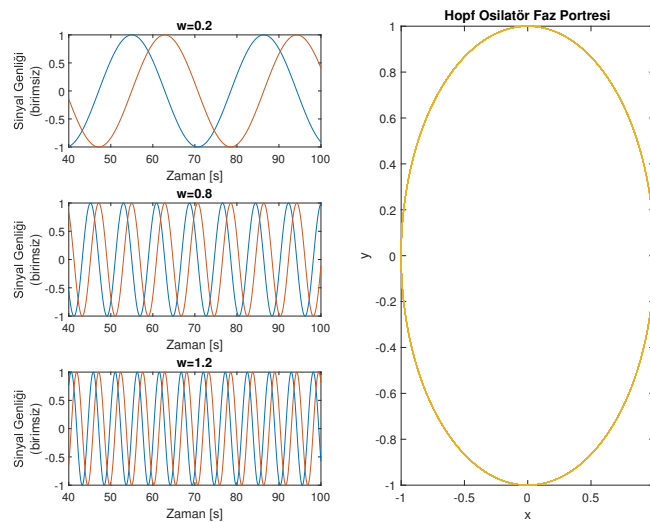
8.3.2 Hopf osilatör

Frekans kontrolünün daha kolay ayarlanabilir olmasından dolayı robotik uygulamalarda tercih edilmiştir. Buna ek olarak Hopf osilatörler çevresel bozulmalara karşı dayanıklı olup her zaman kararlı limit çevrim üretebilmektedir. Bu özellikler Hopf osilatörlerini mobil robotların hareket kontrolü için uygulanabilir kılar. Hopf osilatörlerine dayanan programlanabilir bir CPG modeli insansı robot ve dört ayaklı robotların hareket kontrolüne uygulanmıştır. Hopf osilatörlerinin birleştirme yöntemlerine göre çeşitli faz farklılıkları elde ederek her bir serbestlik derecesini kontrol eden osilatör kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan osilatör denklemi, Denklem 99 ve 100'de verilmiştir.

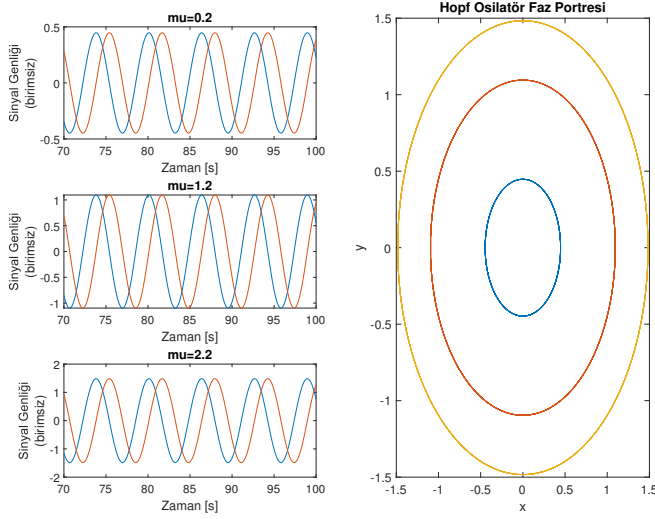
$$\dot{x} = (\mu - r^2)x - \omega y \quad (99)$$

$$\dot{y} = (\mu - r^2)y + \omega x \quad (100)$$

Üstte $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ durum değişkenlerinin genliğini, ω sinyal frekansını tanımlamaktadır. $\mu > 0$ şartı ise salınımin kararlılığını belirlemektedir. Osilatör parametrelerine göre sistem değişkenlerinin zamana göre değişimi ve faz portresi Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi Hopf osilatörün avantajı genlik ve frekansın birbirinden bağımsız olmasıdır. μ 'ile genlik ayarlanırken ω ile frekans ayarlanmaktadır.



Şekil 8.5: Hopf Osilatörünün ω 'ya Göre Değişimi



Şekil 8.6: Hopf Osilatörünün μ 'ye Göre Değişimi

8.3.3 Matsuoka osilatör

Matematik temelli osilatörlerin dışında biyolojik temelli tasarlanan osilatörler de CPG için uygun osilatörlerdir. Matsuoka osilatör bu türün en temel modelidir. Matsuoka tarafından önerilen en temel CPG modeli, hem basit hem de etkili olduğu için robotik sistemlere yaygın olarak uygulanan doğrusal olmayan bir osilatördür. Denklem 101-103 ile verilen diferansiyel denklemlerde sistem değişkenleri u ve v , çıkış y 'dir. Osilatör parametresi olan τ_u ve τ_v zaman sabitleri, w_{ij} nöronlar arası bağ katsayısıdır. f_i terimi, çıkış genliğini kontrol etmek ve çıkış sinyallerini periyodik bir giriş sinyali ile senkronize etmek için kullanılabilen geri besleme değişkenidir. Matsuoka osilatör her zaman kararlı limit çevrim üretememektedir. Kararlılık için Denklem 104'te verilen eşitsizliğin sağlanması gereklidir.

$$\tau_u \dot{u}_i = -u_i - \sum_{j=1}^N w_{ij} y_j - \beta v_i + u_e + f_i \quad (101)$$

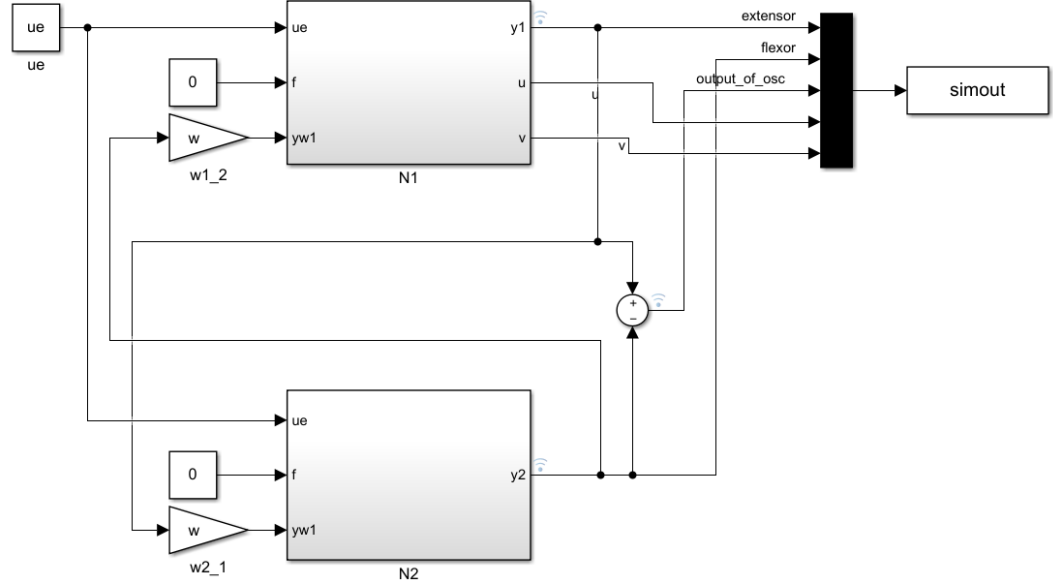
$$\tau_v \dot{v}_i = -v_i + y_i \quad (102)$$

$$y_i = \max(0, u_i) \quad (103)$$

$$1 + \frac{\tau_u}{\tau_v} < w < 1 + \beta \quad (104)$$

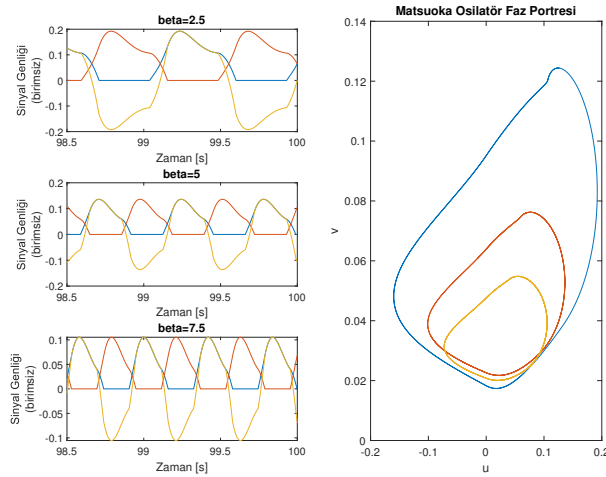
Matsuoka osilatör biyolojik bir yaklaşımla tasarlandığı için kasların eklemleri hareket ettirmesine benzer bir şekilde sinyal üretmektedir. Yani bir eklemi hareket ettirmek için kasların uyguladığı iki yönlü kuvvet iki ayrı

osilatör tarafından sağlanmakta ve bunların toplamı eklem hareket açısını belirlemektedir. Nöronlardan birisi extensor diğeri ise flexor olarak isimlendirilmektedir. İki nöron birbirini tetikleyerek senkronizasyonu sağlamaktadır. Nöronların besleme girişlerinde gösterilen işaret katkımın uyarıcı (pozitif) veya sönümlendirici (negatif) olduğunu göstermektedir. Extensor ve flexor nöronlarının bağlantısı ve çıkış sinyali Şekil 8.7’de gösterilmiştir.

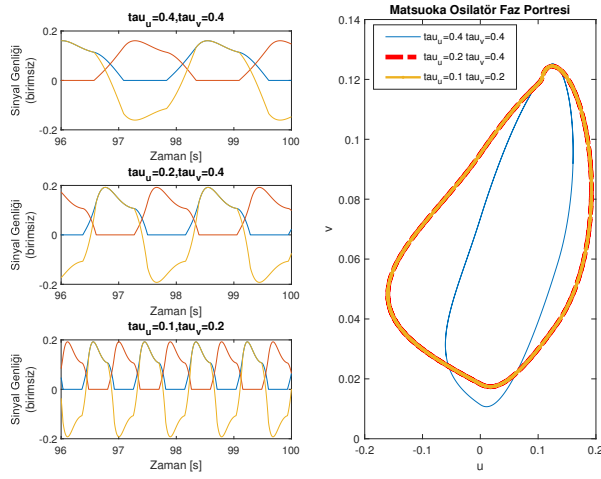


Şekil 8.7: Bir Çift Matsuoka Osilatörden Oluşan CPG nöronu

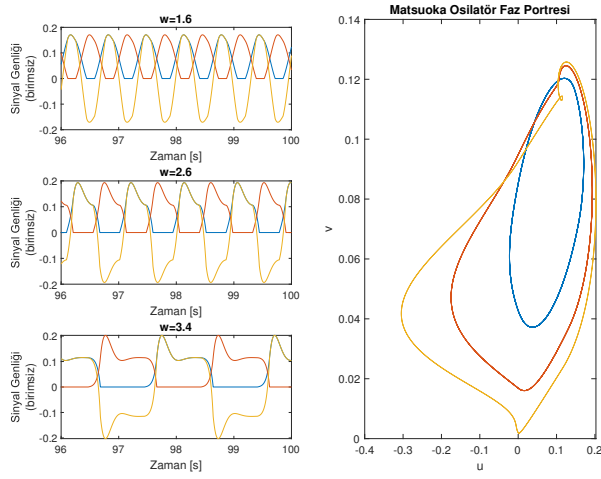
Bir çift Matsuoka osilatör modelinden oluşan CPG nöronunun parametrelerin değişiminin zaman düzlemindeki grafiği ve faz portresi Şekil 8.8, Şekil 8.9, Şekil 8.10 ve Şekil 8.11’de gösterilmiştir.



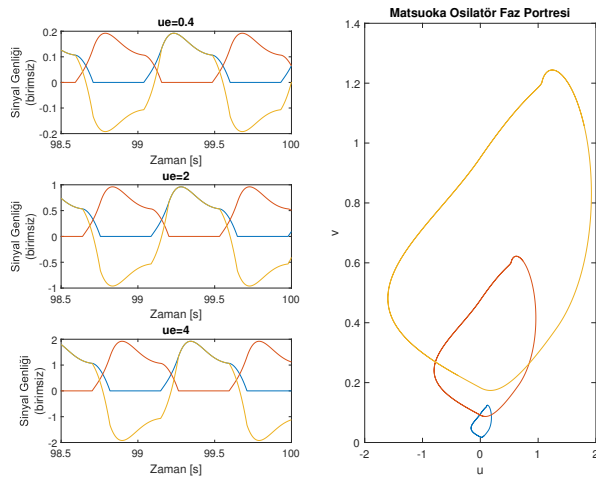
Şekil 8.8: Matsuoka CPG Nöronunun β 'ya Göre Değişimi



Şekil 8.9: Matsuoka CPG Nöronunun τ_u ve τ_v 'ye Göre Değişimi



Şekil 8.10: Matsuoka CPG Nöronunun Kazançlara Göre Değişimi



Şekil 8.11: Matsuoka CPG Nöronunun u_e 'ye Göre Değişimi

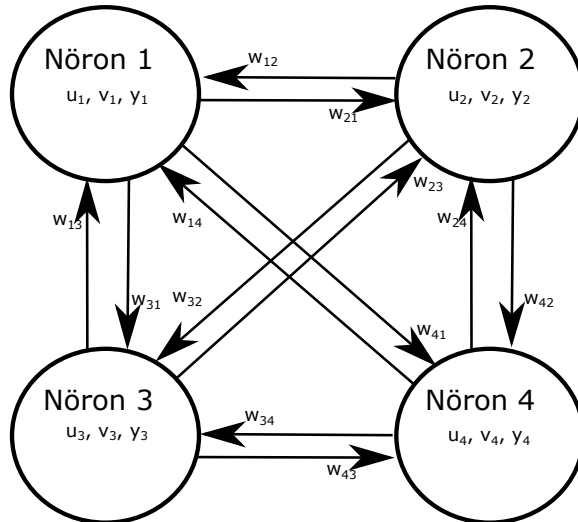
8.4 Ağ Modeli

CPG nöronları eklem yapısına göre bağ kurabilmektedir. Normal şartlarda her eklem için bir nöron kullanılmaktadır. Ağların simetrik veya asimetrik bağlarına göre üretilen sinyallerin fazları ayarlanabilmektedir. Nöron yapısı farklı olmasına rağmen ağ modelleri kendi içinde benzerlik göstereceği için ağ yapısı Matsuoka nöronları kullanılarak incelenmiştir.

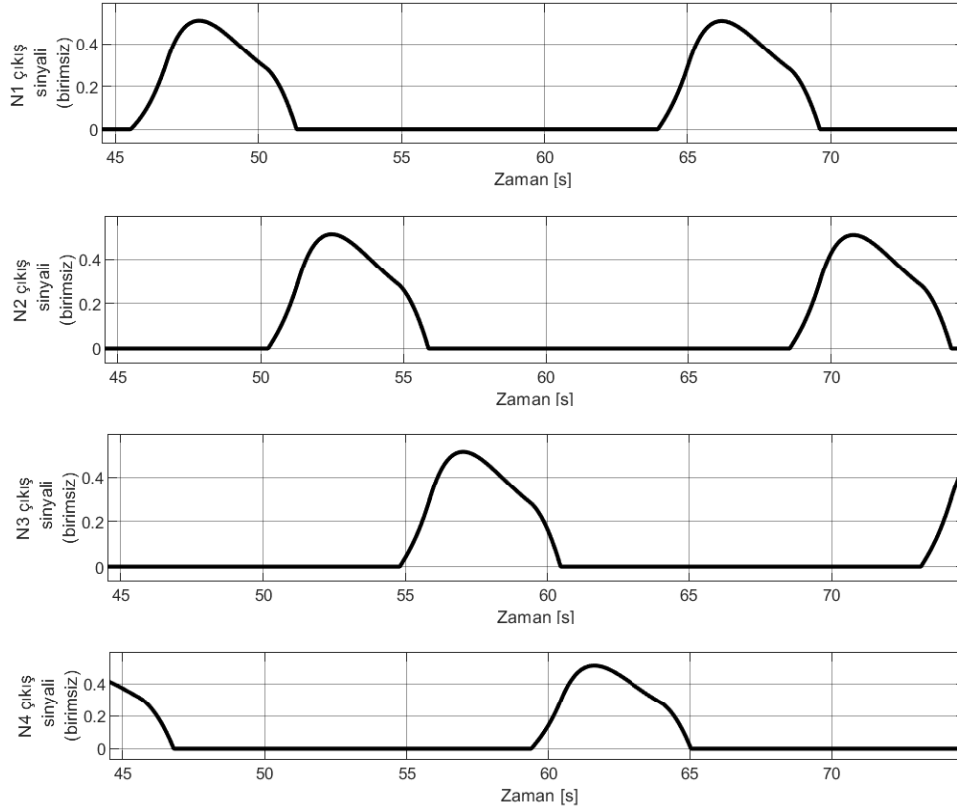
Temel bir formasyon olduğu için dört nöronlu ağ modeli incelenmiştir. Şekil 8.12'de verilen yapıda bütün nöronların birbirine karşılıklı olarak bağlandığı yapının çıkış sinyalleri Şekil 8.13'te gösterilmiştir. Bu bağlantıda sinyallerin dört faza bölündüğü görülmektedir. Örnek sonuçlarda kullanılan nöron parametreleri Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1: Dört Nöronlu Tam Bağlantı Örnek Parametreleri

Parametre	Değeri
β	5
u_e	1
τ_u	1
τ_v	10
w_{ij}	$i == j$ ise $w_{ij} = 0$ diğer, $w_{ij} = 2$



Şekil 8.12: Dört Nöronlu Tam Bağlantı Yapısı

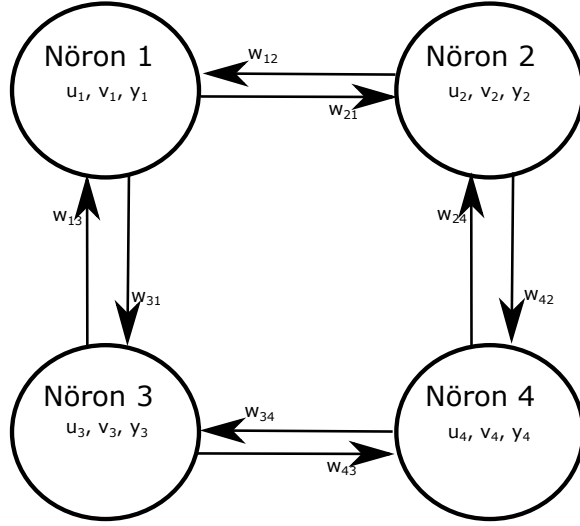


Şekil 8.13: Dört Nöronlu Tam Bağlantı Yapısı Sinyal Çıktıları

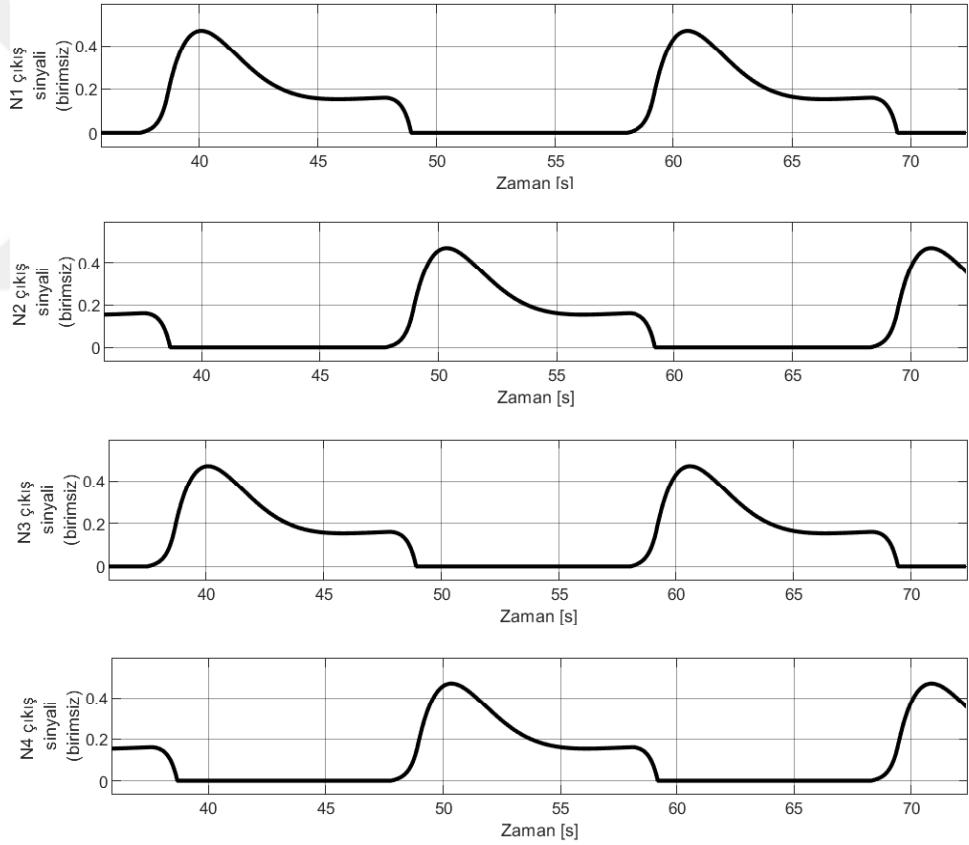
Aynı nöron yapısında köşegen bağlantılar iptal edilirse, her nörona toplam iki sinyal girişi olacaktır. Bu yapı Şekil 8.14'te gösterilmiştir. Katsayıların aynı olduğu durum için çıkış sinyalleri iki faza yerleşmektedir. Toplam dört çıkış sinyali olduğu için bir ve dört numaralı nöronlar ile iki ve üç numaralı nöronlar eşleşerek aynı karakteristiği üretmektedir. Dört nöronun çıkış sinyalleri Şekil 8.15'te gösterilmiştir. Örnek sonuçlarda kullanılan nöron parametreleri Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2: Dört Nöronlu Komşu Bağlantı Örnek Parametreleri

Parametre	Değeri
β	5
u_e	1
τ_u	1
τ_v	10
w_{ij}	$i == j$ veya $i + j = 5$ ise $w_{ij} = 0$ diğer, $w_{ij} = 2$



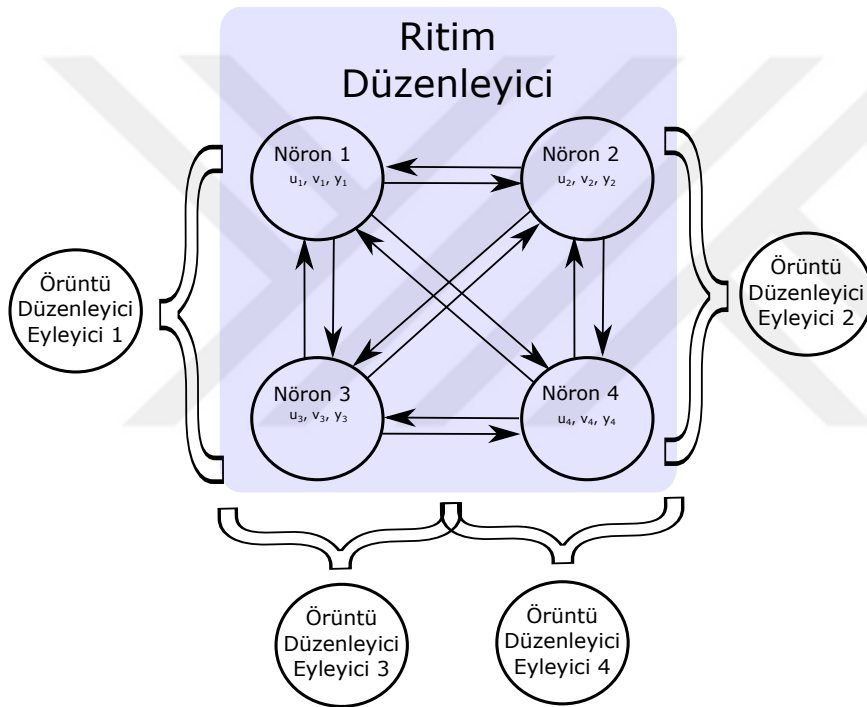
Şekil 8.14: Dört Nöronlu Komşu Bağlantı Yapısı



Şekil 8.15: Dört Nöronlu Komşu Bağlantı Yapısı Sinyal Çıkışları

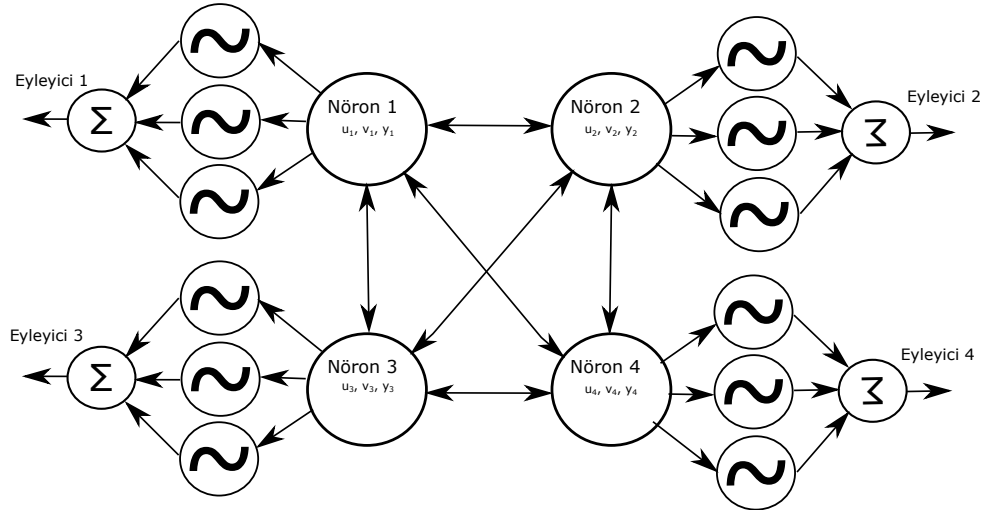
CPG ağ yapısı hakkında genel geçer bir model önerilememiştir. Şekil 8.12 ve Şekil 8.14'te kullanılan az sayıdaki nöron yapısında bile bir bağıın eklenmesi veya çıkarılması üretilen sinyaller üzerinde büyük farklılıklara yol açmaktadır. Fakat genel olarak yürüyen robotlar için üç farklı yapı önerilmektedir.

Birinci ağ yapısı, görece daha karmaşık ve yüksek serbestlik derecesine sahip robotlar için uygun olan iki kademeli CPG ağ yapısıdır. İlk kademede Şekil 8.12’de gösterildiği gibi çekirdek ritim düzenleyici bulunur. Yürümenin fazlarına göre nöronların senkronize olması ve yürüme ritmini üretmesi sağlanır. Yürüme hızı bu çekirdek tarafından kontrol edilir. İkinci katta ise ritim sinyallerine göre motorlara uygulanacak açı değerlerinin üretildiği örüntü şekillendirici bulunmaktadır. Örüntü şekillendirici CPG ağı veya NN ağı ile de üretilebilmektedir. Bu yönetime örnek ağ yapısı Şekil 8.16’da gösterilmiştir (Van der Noot et al., 2018; Nassour et al., 2014).



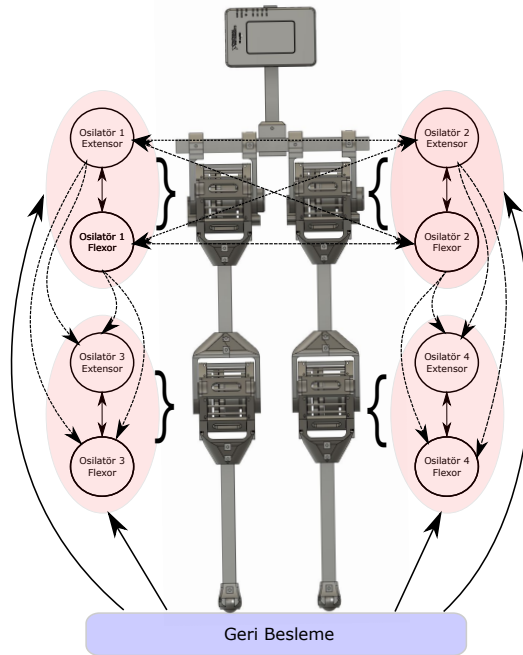
Şekil 8.16: İki Kademeli CPG Ağ Yapısı

İkinci ağ yapısı, yürüme için türetilmiş yörüngelerin temel frekanslarının belirlenerek osilatörler ile tekrar üretilmesini sağlayan programlanabilir CPG ağ yapısıdır. Bu yapıda nöronların denetimli öğrenme ile yörüngeleri öğrenmesi sağlanır. Geri besleme olarak uygulanan öğrenme algoritması sayesinde kompleks eniyileme algoritmalarına ihtiyaç duyulmaz. Fakat karmaşık yörüngelerin aktarılmasında yüksek sayıda nöron kullanım ihtiyacı ve bu tür sinyallerin tam olarak tekrar üretilmemesi problem yaratmaktadır. Örnek ağ modeli Şekil 8.17’de gösterilmiştir (Righetti and Ijspeert, 2006; Santos et al., 2017).



Şekil 8.17: Programlanabilir CPG Ağ Yapısı

Üçüncü ağ yapısı ise, robot modelinin kopyası olarak üretilen ağ yapısıdır. Robot modelinde motor olan yerlere bir çift extensor ve flexor osilatör yerleştirilir (Liu et al., 2008; Baydin, 2012). Fiziksel olarak bağlı olan eklemler aynı zamanda belirli katsayılar ile nörolojik bağla da bağlanır. Bu yapı robot modeline göre türetilmesi kolay olsa da asıl zorluğu parametrelerin belirlenmesidir. Görece az serbestlik derecesi olan robotlarda tercih edilir. Parametre belirleme eniyileme yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Beş bağlı robot modeli için örnek ağ yapısı Şekil 8.18’de gösterilmiştir.



Şekil 8.18: Robot Modeli Temelli CPG Ağ Yapısı

8.5 Genetik Algoritma ile Parametre Eniyileme

Genetik algoritma (GA), genetik ve doğal eleme prensiplerine dayanan arama tabanlı bir eniyileme tekniğidir. Sıklıkla, kompleks ve çözülmesi uzun sürecek olan problemlerin optimal çözüm noktasını bulmak için kullanılır. CPG ve makine öğrenimi problemlerinin çözümü için de tercih edilmektedir. Genetik algoritmalarda olası çözümlerden oluşan bir havuzun olduğu kabul edilir. Çözüm kümelerinin bir maliyet fonksiyonuna göre puanı belirlenir. Yüksek puana sahip kümelerin birleşiminden yeni nesil çözüm kümeleri türetilir ve yeni nesil çözümlerin de puanları hesaplanarak aynı mantıkla neslin devamı sağlanır. Bu işlem belirli adım sayısı boyunca veya maliyet fonksiyonu belirli bir eşiğe ulaşınca veya nesiller arasındaki değişim azaldığı zaman sonlandırılır. Yeni nesil çözüm kümelerinin üretiminde doğadan esinlenerek rekombinasyon ve mutasyon uygulanır. Rekombinasyon, genetik algoritmada en önemli aşamadır. Eşleştirilecek her ebeveyn çifti için, genlerin içinden rastgele bir geçiş noktası seçilir. Mutasyonda ise, oluşan bazı yeni yavrularda, genlerinin bazıları düşük rastgele olasılıkla bir değişime maruz bırakılabilir. Bu değişim, parametre dizesindeki bazı değerlerin rastgele değer atanması anlamına gelir. Bu, Darwin'in uyum sağlayanın hayatta kalması teorisi ile örtüşmektedir.

Genetik algoritmaların çözümünde eniyileme kullanılmasının öne çıkaran birçok avantajı vardır;

- Sistem modelinden bağımsızdır
- Türev almayı gerektirmez
- Paralel işlem yapabilmeye olanak tanır
- Probleme bağlı olmakla beraber sıklıkla geleneksel yöntemlerden daha hızlı çözüm bulur
- Çözüm kümesi geniş olan çok bilinmeyenli problemlerde hızlıca çözüm aralığını daraltabilir.
- Sistem modelinin sadece sürekli zaman modeli olması gerekmez, hibrit sistemler için de kullanılabilir.

Genetik algoritmaların bir çok avantajı olmasına rağmen eksik kaldığı kısımlar da vardır;

- Basit ve türevi alınabilir problemlerde klasik yöntemler daha kesin ve hızlı çözüm üretebilirken GA yavaş kalabilmektedir.
- Doğru kombinasyon ile kurgulanmayan genetik algoritmalar doğru sonuca yaklaşamayabilir.
- Mutlak bir çözümden ziyade olası en iyi çözümü aradığı için bulunan çözüm garanti değildir.
- Bazı problemlerde maliyet fonksiyonunu hesaplamak yüksek işlem gücü ihtiyacına neden olabilmektedir.

İki boyutlu beş bağılı yürüyen robot modelinin toplam dört motoru olduğu ve her bir motora iki nöron bağlandığı için toplam sekiz Matsuoka osilatör kullanılmaktadır. Her bir osilatörün β , τ_u , τ_v , u_e parametreleriyle ağlar arasındaki w_{ij} kazançları vardır. Her bir parametre birbirinden bağımsız ele alınırsa toplam doksan altı parametre olmaktadır. *Matlab-Simulink* ortamında *simscape* mekanik modeli ile modellenen robotun çok sayıda parametre ile eniyileme yapılması uzun zamanlar almaktadır. İşlemi kısaltmak için parametre sayısı sınırlandırılmıştır. Osilatör iç parametreleri Çizelge 8.3'te gösterildiği gibi sabit sayılar olarak kabul edilmiştir. Kullanılan parametrelere göre osilatör sınır şartları Denklem 106'daki şekilde sabit tutulmaktadır.

Çizelge 8.3: Matsuoka Nöron İç Parametreleri

parametre	değeri
β	2.5
u_e	0.4
τ_u	0.1120
τ_v	0.1991

$$1 + \frac{\tau_u}{\tau_v} < w_{ij} < 1 + \beta \quad (105)$$

$$1.5626 < w_{ij} < 3.5 \quad (106)$$

Parametre sınırlamasına göre osilatör iç parametreleri sabit tutulduğu için sadece ağlar arasındaki kazançlar ayarlanmalıdır. Fakat bütün kazanç

matrisi parametre almak zorunda değildir. Nöronun kendi kendine etki ettiği köşegen matrisinin sıfır olması gereklidir. Buna göre toplam dokuz parametre Denklem 107'deki matriste olduğu gibi belirlenmiştir. Parametreler arasında p_1 değerlerinden farklı olarak nöronlar arası katsayıyı değil, nöron çiftlerinin kendi arasındaki katsayıyı göstermektedir.

$$w = \begin{bmatrix} 0 & p_1 & p_2 & p_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_1 & 0 & p_4 & p_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_2 & p_4 & 0 & p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_3 & p_5 & p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_6 & p_7 & 0 & 0 & 0 & p_1 & 0 & 0 \\ p_8 & p_9 & 0 & 0 & p_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_6 & p_7 & 0 & 0 & 0 & p_1 \\ 0 & 0 & p_8 & p_9 & 0 & 0 & p_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (107)$$

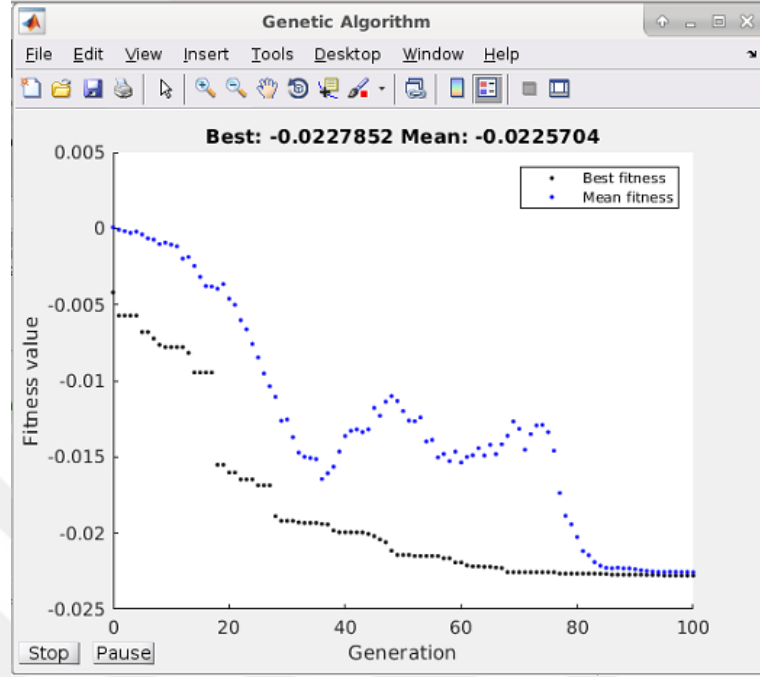
Maliyet fonksiyonu robotun yürüme performansına göre belirlenmektedir. Bunun için robotun sergilediği bazı davranışlar olumlu bazı davranışlar ise olumsuz not ile puanlandırılmaktadır. Performans puanı olumlu puanların çarpılması, olumsuz etkilerin bölünmesiyle belirlenir. Tablo 8.4'te olumlu puanlar ve olumsuz puanlar listelenmiştir.

Çizelge 8.4: GA Parametre Puanlama Tablosu

Olumlu Puanlar	Olumsuz Puanlar
x eksenini boyunca ilerlenen yol	toplam harcanan enerji
toplam adım sayısı	kontrol sinyali türev büyüklüğü
hatasız benzetim süresi	eklem açısız hız büyüklüğü
periyodikliğin sağlanıp sağlanmadığı	benzetim hata ile bitmesi

Matlab üzerinde *Simscape* mekanik modellemesi ile 10s'lik bir test, gerçek zamanlı olarak yaklaşık 22s sürmektedir. Bu süre farkı, kullanılan bilgisayar özellikleri ve benzetim parametrelerine bağlıdır. Fakat GA ile 100 popülasyon ve 100 nesil süren bir eniyileme işlemi için bu testin 10000 kez tekrarlanması gerekmekte olup, toplam süre yaklaşık 61 saat olmaktadır. İşlem süresini kısaltmak için GA algoritmasının da uyumlu çalışabildiği paralel işlem özelliği kullanılmıştır. On iki fiziksel çekirdeği bulunan bir iş istasyonunda aynı

eniyeleme işlemleri yaklaşık 4 saatte tamamlanmıştır. GA algoritmasının nesiller boyunca gelişimini gösteren maliyet grafiği Şekil 8.19'da gösterilmiştir.

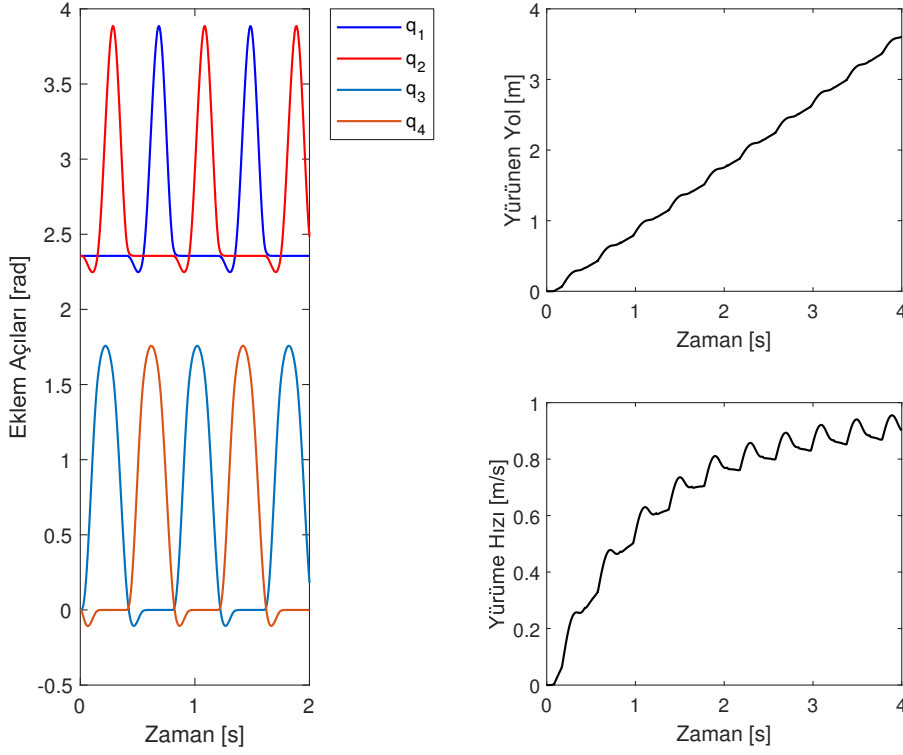


Şekil 8.19: CPG Ağının GA ile Eniyileme Grafiği

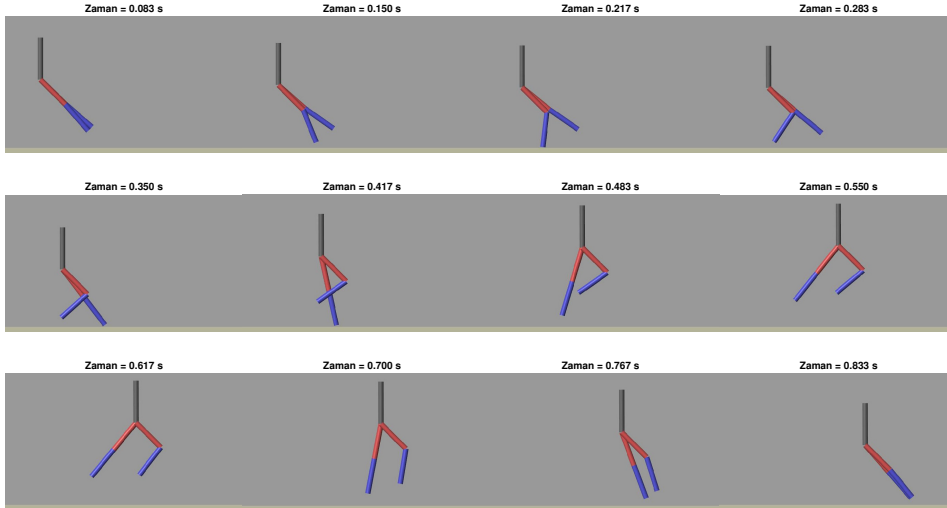
8.6 Yürüme Benzetimleri

Genetik algoritma ile eğitilen CPG ağları, maliyet fonksiyonunun puanlamasına göre çok farklı sonuçlar üretebilmektedir. Bunun yanı sıra yüksek popülasyon sayısı ve çok sayıda nesil üzerinde denenmesi ile daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Şartları sağlayan iki farklı puanlama yöntemine göre elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 8.4'te verilen puanlamalara göre birinci test için yürünen yol ve benzetim süresi artı puan olarak belirlenmiştir. Bu şartlara göre Şekil 8.20'de gösterilen eklem hareketleri elde edilmiştir. Şekil 8.21'de ise bir periyotluk yürümenin zamana göre fotoğrafları gösterilmiştir. Buna göre şartları sağlamasına rağmen yere basmadan uçarak gittiği ve mantıklı bir yürüme sergilemediği görülmektedir.



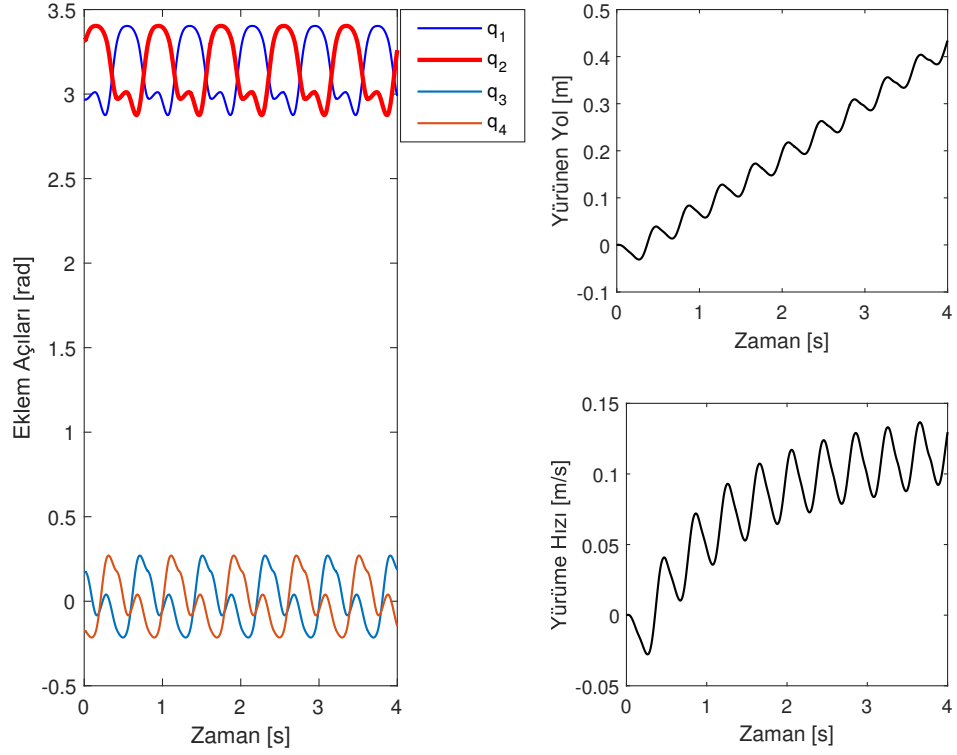
Şekil 8.20: Test-1 Şartlarına Göre Eklemler Açılımları



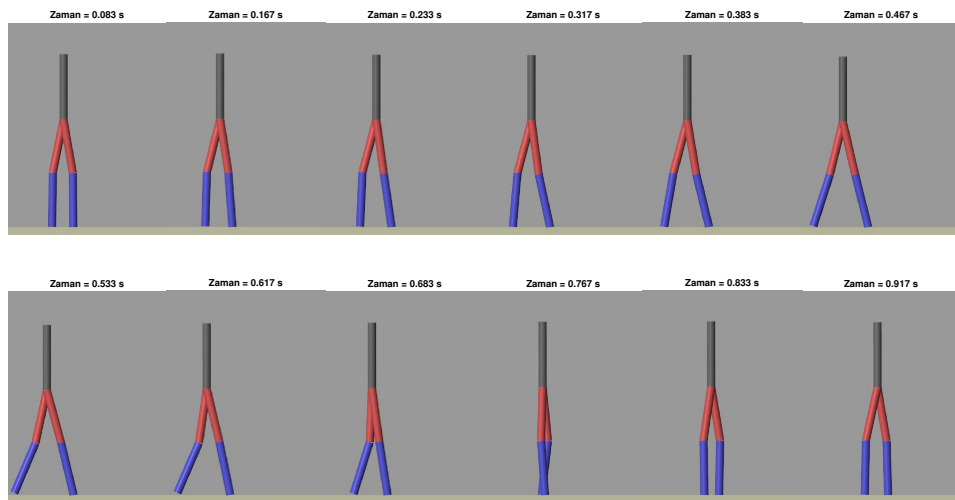
Şekil 8.21: Test-1 Şartlarına Göre Yürüme Pozisyonları

İkinci testte ise ilk testteki gibi uçarak ilerleme olmaması için aynı anda iki ayağın yerden kalkması ceza olarak eklenip, ortalama kontrol sinyalinin minimize edilmesi pozitif şart olarak eklenmiştir. Bu şartlara göre Şekil 8.22'de gösterilen eklem hareketleri elde edilmiştir. Şekil 8.23'te de bir periyotluk

yürümenin zamana göre fotoğrafları gösterilmiştir. Buna göre yine şartları sağlamasına rağmen bu sefer de adım aralığının çok dar olduğu görülmektedir.



Şekil 8.22: Test-2 Şartlarına Göre Ekleme Açılıları



Şekil 8.23: Test-2 Şartlarına Göre Yürüme Pozisyonları

8.7 Sonuç

Bu b6l6mde, yapılan benzetimlerde farklı n6ron ve ağ yapılarının davranışları incelenmiş, iki ayaklı d6zlemsel robot için belirlenen uygun bir ağ yapısı oluşturulup genetik algoritma ile ağ eğitimi yapılmıştır. Ağ eğitiminde performans kriterinin farklı kurallar kullanmasıyla oluşan y6r6me değişikliği g6sterilmiştir. Merkezi 6r6nt6 6retici ile kontrol edilen robotun, ayak basınc sens6r6 ve benzeri geri besleme sinyalleriyle çevreye karşı uyumlu hareket edebildiği ve y6r6me parametrelerinin kolaylıkla ayarlanabilir olduğu g6r6lm6řt6r. Fakat, ağ katsayılarının belirlenmesinin sezgisel y6ntemlere dayanması durumunda elde edilen y6r6me sonuçları beklenilenin dışında olabildiği de g6r6lm6řt6r.



9 SONUÇLAR

Tez kapsamında, iki ayaklı düzlemsel robotun salınım fazı dinamik denklemleri ve çarpışma modeli türetilmiştir. Türetilen matematiksel modellere göre robotun yürüme benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Daha gerçekçi bir benzetim modeli için sürtünme ve zemin ile etkileşimin de dikkate alındığı *Simulink-simscape* modeli hazırlanarak benzer yürüme benzetimleri tekrarlanmıştır.

Yapılan benzetim sonuçlarına göre robotun kalça ve diz eklemlerinin açılma hız ve tork gereksinimleri belirlenmiştir. Yüksek hız ve yüksek tork gereksiniminden dolayı eklem hareket kaynağı olarak BLDC motor kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür. Verimli ve hassas pozisyon kontrolü için BLDC motor FOC yöntemi ile sürülmüştür. Eklemler için özel tasarlanan sürücü kartlarına FOC algoritması yazılarak yapılan testlerde BLDC motorun performansı gözlenmiştir. BLDC motor hız limiti $8000deg/s$, akım limiti $15A$ olarak belirlenmiştir. Motorda yaşanan cogging tork etkisini gidermek için FOC yanı sıra AFC de eklenerek torkda gözlenen periyodik bozulma giderilerek hassas ve hızlı pozisyon kontrolü başarıyla gerçekleştirilmiştir. Klasik motor-redüktör bağlantısının simetrik güç aktarımı için uygun olmayacağı görülerek farklı bir redüktör yapısı tasarlanmıştır. Redüktör aynı zamanda eklem kendisi olacak şekilde bütünleşik bir tasarımla yapılmıştır. Cycloid dişli temel alınarak tasarlanan redüktör hızı 44 kat düşürerek uygulanan torku artırmaktadır. Yapılan yük kaldırma testlerinde sürekli çalışmada yaklaşık $15Nm$ tork sağlayabildiği görülmüştür. Yürüme kontrol algoritmasının olası işlem yükünden dolayı ana işlem birimi olarak hem FPGA hem de ARM işlemciye sahip olan myRIO kartı kullanılmıştır. Ana işlem birimi ile sürücüler arasında iletişim hattı olarak $4MHz$ sinyal frekansında çalışan SPI hattı kurulmuştur. Yüksek sinyal hızlarında yaşanan veri kaybını önlemek için hem donanımsal hem de yazılımsal önlemler alınmıştır. Kullanılan CRC algoritması sayesinde hata kolaylıkla anlaşılabilir. Bunun yanı sıra geliştirilen iletişim protokolü sayesinde hatanın düzeltilmesi de sağlanmaktadır. Bu sayede *Labview* arayüzü ile uzaktan kolaylıkla kontrol edilebilen iki ayaklı yürüyen robot test platformu geliştirilmiştir.

Yürüme algoritması için öncelikle yörünge en iyileştirme yapılarak yörünge setleri belirlenmiştir. Yörünge eniyileme sistem dinamiklerini, eklem

ve kontrol sinyali sınır şartlarını sağlayacak şekilde kontrol sinyalini minimize etmek için uygulanmaktadır. Yörünge eniyileme için kullanılan direct collocation yöntemi özellikle ayağın yere bastığı ve yerden ayrıldığı anlarda ortalamanın üzerinde eniyileme hatasına neden olmaktadır. Eniyileme hatasını her zaman belirli bir eşik değerin altında tutabilmek için zamanla değişen aralıklı eniyileme yöntemi önerilmiş ve sonuçlar bilimsel yazındaki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Zamana göre belirlenen yörüngeler ne yazık ki eksik tahrikli sisteme uygulanamamaktadır. Sanal kısıtlar yardımıyla hareket uzayı bir derece düşürülerek eklemlerin hedef yörüngeleri takip etmesi sağlanabilmektedir. Sanal kısıtlar yöntemiyle belirlenen yörünge takip edildiği için yörünge türetilirken belirlenen yürüyüş parametreleri geçerli olmaktadır. Yürüme hızı gibi yürüyüş parametrelerinin değiştirilmesinin istenmesi durumunda var olan yörüngeler değiştirilerek yenisinin uygulanması gerekmektedir. Bunun yanı sıra yürümenin başlatılabilmesi için belirli başlangıç şartlarını da sağlaması gerekmektedir.

Sanal kısıtlar ile yörünge takibinin zayıflıklarını gidermek için faz kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem ile robottan alınan ZMP, yürüme hızı gibi geri besleme bilgilerine göre senkron açının değişimi kontrol edilebilmektedir. Bu sayede belirli yörüngelere sınırlandırılan eklemlerin yörüngeler üzerindeki ilerleme hızları da kontrol edilebilmektedir. Önerilen yöntemin getirdiği bir diğer katkı da yörüngelerin önceden en iyileme yapılmış olmasına ihtiyaç duymamasıdır. Mantık çerçevesinde belirlenmiş herhangi bir yürüme yörüngesi eksik tahrikli robota uygulanabilmektedir. Yapılan testlerde robotun $0.3m/s$ hız ile ilerlerken yürüme sırasında $0.6m/s$ hıza çıkabildiği ve yine $0.3m/s$ hızla ilerlerken yavaşlayıp ters yönde hızlandığı gözlemlenmiştir.

Önceden yörünge belirlenmesine ihtiyaç duymayan bir başka yöntem de biyomimetik çalışmalar sonucunda robotik kontrole aktarılabilmiş olan merkezi örüntü üreticidir. Nöral ağ yapısına sahip olan ve her nöronu bir osilatör olarak çalışan kontrol yönteminin en büyük dezavantajı ağlar arasındaki katsayıların seçilmesidir. Genetik algoritma gibi global minimum nokta çözümünü arayan yöntemler yardımıyla ağ katsayıları belirlenebilmektedir. Fakat maliyet fonksiyonunun sezgisel yöntemlere göre belirlenmesi elde edilen sonuçların beklenmedik davranışlar göstermesine sebep olmaktadır. Merkezi örüntü üretici ile

belirlenen farklı maliyet fonksiyonlarına karşı yürüme sonuçları elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, hem merkezi örüntü üretici gibi yürüme sırasında yürüyüş parametresi değiştirilebilen hem de yörünge en iyileme ve sanal kısıtların birlikte sağladığı gibi mantıklı yürüme, önerilen yöntem ile elde edilmektedir. Tez kapsamında test edilen yürüme yöntemlerinin ve önerilen yöntemin avantaj ve dezavantajları Çizelge 9.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 9.1: Yürüme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yürüme Yöntemi	Özellikleri
Yörünge en iyileme	<ul style="list-style-type: none"> + Sistem dinamiklerini ve sınır şartlarını dikkate alır. + Periyodik ve kararlıdır. - Belirli yürüyüş özellikleri için bir set yörünge belirlenir. - Eksik tahrikli sisteme uygulanamaz.
En iyi olmayan yörünge en iyileme yönteminin sanal kısıtlar ile takip edilmesi	<ul style="list-style-type: none"> - Sanal kısıtlar ile eksik tahrikli sistem uygulanabilir fakat yürüme garanti edilemez.
En iyileme ile belirlenen yörünge en iyileme yönteminin sanal kısıtlar ile takip edilmesi	<ul style="list-style-type: none"> + Periyodik ve kararlıdır. + Yürüyüş özelliklerini sağlayacak dinamik yürüyüş garanti edilir. - Yörüngelere göre yürüyüş özellikleri sabittir.
Merkezi örüntü üretici	<ul style="list-style-type: none"> + Yürüyüş özellikleri yürüyüş sırasında değişebilir. + Yürüyüş öncesinde yörünge belirlenmesi gerekmez. - Ağ eğitimi uzun zaman sürebilir. - Ağ eğitimi beklenmedik sonuçlar verebilir.
Faz kontrol (önerilen yöntem)	<ul style="list-style-type: none"> + Periyodik ve kararlıdır. + Yürüyüş öncesinde yörünge en iyileme gerekmez. + Yürüyüş özellikleri yürüyüş sırasında değişebilir. + Eksik tahrikli sisteme uygulanabilir.

10 ÖNERİLER

İki ayaklı yürüyen robotlar, insanlara uygun tasarlanan ortamlarda tekerlekli mobil robotlara göre avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlarından dolayı birçok araştırmacının ilgisini çekmekte ve üzerinde çalışılmaktadır. Literatürde kabul görmüş yöntemler olmasının yanı sıra bu yöntemlerin eksik ve yetersizlikleri de vardır.

Bilimsel yazında bulunan yöntemler sıklıkla yürüme öncesi yüksek işlem gücü gerektiren ön hazırlığa ihtiyaç duymaktadır. Başarılı sonuçlar üretse de parametre değişikliği gerektiğinde tekrar tekrar bu işlemlerin yapılması yorucu olmaktadır. Aynı sonuçların daha az işlem ile elde edilebilmesi önemli bir başarı olacaktır.

Sezgisel yöntemlere göre belirlenen parametreler beklenmedik sonuçlar üretebilmektedir. Bu tez kapsamında da kullanıldığı gibi maliyet fonksiyonunun sezgisel yöntemler ile (genetik algoritmalar) en aza indirilmesi farklı yürüyüşler oluşturmuştur. Maliyet fonksiyonu olabilecek uygun kuralların belirlenmesi veya kuralların üretilmesi literatüre katkı sağlayacaktır.

Tez kapsamında önerilen faz kontrollü yürüme kontrolcüsü iki boyutlu beş bağı robot için geliştirilmiştir. Fakat senkron açının üç boyutlu uzaya taşınmasıyla, üç boyutlu yürüyen robotlar için de geçerli olup olmadığı incelenmeye değer bir konu olacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ames, A.D.; Galloway, K.; Sreenath, K.; and Grizzle, J.W.**, 2014. Rapidly exponentially stabilizing control Lyapunov functions and hybrid zero dynamics. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(4):876–891.
- Arcos-Legarda, J.; Cortes-Romero, J.; and Tovar, A.**, 2019. Robust compound control of dynamic bipedal robots. *Mechatronics*, 59(5):154–167.
- Asano, F.**, 2015. Fully analytical solution to discrete behavior of hybrid zero dynamics in limit cycle walking with constraint on impact posture. *Multibody System Dynamics*, 35(2):191–213.
- Asano, F. and Tokuda, I.**, 2015. Indirectly controlled limit cycle walking of combined rimless wheel based on entrainment to active wobbling motion. *Multibody System Dynamics*, 34(2):191–210.
- Atkeson, C.G.; Babu, B.; Banerjee, N.; Berenson, D.; Bove, C.; Cui, X.; DeDonato, M.; Du, R.; Feng, S.; Franklin, P.; et al.**, 2018. What happened at the DARPA robotics challenge finals. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 1:667–684.
- Bao, R. and Geng, T.**, 2018. Fast walking with rhythmic sway of torso in a 2D passive ankle walker. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4363–4368.
- Baydin, A.G.**, 2012. Evolution of central pattern generators for the control of a five-link bipedal walking mechanism. *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics*, 3(1):45–53.
- Behnke, R.S.**, 2012. *Kinetic anatomy*. Human Kinetics.
- Boudali, A.M.; Kong, F.H.; Martinez, J.; Tang, J.Z.; and Manchester, I.R.**, 2017. Design and modeling of an open platform for dynamic walking research. In *International Conference on Mechatronics*, pages 85–92.
- Cattell, J.H.**, 2003. *Adaptive feedforward cancellation viewed from an oscillator amplitude control perspective*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Chemori, A.** and **Alamir, M.**, 2006. Multi-step limit cycle generation for rabbit's walking based on a nonlinear low dimensional predictive control scheme. *Mechatronics*, 16(5):259–277.
- Chevallereau, C.; Abba, G.; Aoustin, Y.; Plestan, F.; Westervelt, E.; De Wit, C.C.; and Grizzle, J.**, 2003. Rabbit: A testbed for advanced control theory. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(5):57 – 79.
- Collins, S.; Ruina, A.; Tedrake, R.; and Wisse, M.**, 2005. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 307(5712):1082–1085.
- Feng, S.; Whitman, E.; Xinjilefu, X.; and Atkeson, C.G.**, 2014. Optimization based full body control for the ATLAS robot. In *International Conference on Humanoid Robots*, pages 120–127.
- Fevre, M.; Goodwine, B.; and Schiedeler, J.P.**, 2018. Design and experimental validation of a velocity decomposition-based controller for underactuated planar bipeds. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3):1896–1903.
- Gomes, M.W. and Ahlin, K.**, 2015. Quiet (nearly collisionless) robotic walking. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 5761–5766.
- Grizzle, J.W. and Chevallereau, C.**, 2017. Virtual constraints and hybrid zero dynamics for realizing underactuated bipedal locomotion. *arXiv preprint arXiv:1706.01127*.
- Hanselman, D.C.**, 2003. *Brushless permanent magnet motor design*. McGraw-Hill.
- Hashimoto, K.; Kondo, H.; Lim, H.O.; and Takanishi, A.**, 2015. Online walking pattern generation using fft for humanoid robots. *Motion and Operation Planning of Robotic Systems*, 29:417–438.
- He, W.; Yin, Z.; and Sun, C.**, 2016. Adaptive neural network control of a marine vessel with constraints using the asymmetric barrier Lyapunov function. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 47(7):1641–1651.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Hereid, A.; Cousineau, E.A.; Hubicki, C.M.; and Ames, A.D.**, 2016. 3D dynamic walking with underactuated humanoid robots: A direct collocation framework for optimizing hybrid zero dynamics. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1447–1454.
- Hereid, A.; Hubicki, C.M.; Cousineau, E.A.; Hurst, J.W.; and Ames, A.D.**, 2015. Hybrid zero dynamics based multiple shooting optimization with applications to robotic walking. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 5734–5740.
- Hong, Y.D. and Lee, K.B.**, 2016. Stable walking of humanoid robots using vertical center of mass and foot motions by an evolutionary optimized central pattern generator. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(1):27.
- Hughes, A. and Drury, B.**, 2019. *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. Newnes.
- Hurmuzlu, Y. and Marghitu, D.B.**, 1994. Rigid body collisions of planar kinematic chains with multiple contact points. *The International Journal of Robotics Research*, 13(1):82–92.
- Hwang, K.S.; Lin, J.L.; and Li, J.S.**, 2016. Biped balance control by reinforcement learning. *Journal of Information Science and Engineering*, 32(4):1041–1060.
- Ijspeert, A.J.**, 2008. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review. *Neural Networks*, 21(4):642–653.
- Islam, M.S.; Mir, S.; and Sebastian, T.**, 2004. Issues in reducing the cogging torque of mass-produced permanent-magnet brushless dc motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(3):813–820.
- Kajita, S.; Yamaura, T.; and Kobayashi, A.**, 1992. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(4):431–438.
- Kelly, M.P.**, 2017. Transcription methods for trajectory optimization: a beginners tutorial. *arXiv preprint arXiv:1707.00284*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Kolathaya, S.**, 2020. Local stability of pd controlled bipedal walking robots. *arXiv preprint arXiv:2001.00145*.
- Kolathaya, S.; Ma, W.L.; and Ames, A.D.**, 2015. Composing dynamical systems to realize dynamic robotic dancing. In *Algorithmic Foundations of Robotics XI*, pages 425–442. Springer.
- Kuindersma, S.; Deits, R.; Fallon, M.; Valenzuela, A.; Dai, H.; Permenter, F.; Koolen, T.; Marion, P.; and Tedrake, R.**, 2016. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Autonomous Robots*, 40(3):429–455.
- La Hera, P.X.M.; Shiriaev, A.S.; Freidovich, L.B.; Mettin, U.; and Gusev, S.V.**, 2013. Stable walking gaits for a three-link planar biped robot with one actuator. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(3):589–601.
- Lack, J.; Powell, M.J.; and Ames, A.D.**, 2014. Planar multi-contact bipedal walking using hybrid zero dynamics. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2582–2588.
- Lack, J.T.**, 2013. *Planar multicontact locomotion using hybrid zero dynamics*. Ph.D. thesis, Texas A & M University.
- Lee, J. and Oh, J.H.**, 2009. Biped walking pattern generation using reinforcement learning. *International Journal of Humanoid Robotics*, 6(1):1–21.
- Li, T.H.S.; Kuo, P.H.; Ho, Y.F.; Kao, M.C.; and Tai, L.H.**, 2015. A biped gait learning algorithm for humanoid robots based on environmental impact assessed artificial bee colony. *IEEE Access*, 3:13–26.
- Li, Z.; Huang, Z.; He, W.; and Su, C.Y.**, 2016. Adaptive impedance control for an upper limb robotic exoskeleton using biological signals. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(2):1664–1674.
- Lim, H.O. and Takanishi, A.**, 2007. Biped walking robots created at waseda university: W1 and wabian family. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1850):49–64.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Liu, G.L.; Habib, M.K.; Watanabe, K.; and Izumi, K.**, 2008. Central pattern generators based on matsuoka oscillators for the locomotion of biped robots. *Artificial Life and Robotics*, 12(1-2):264–269.
- Lu, Q.; Zhang, Z.; and Li, W.**, 2018. Parameter optimization of cpg and its application in robot. In *MATEC Web of Conferences*, page 3018.
- Manchester, I.R.; Mettin, U.; Iida, F.; and Tedrake, R.**, 2011. Stable dynamic walking over uneven terrain. *The International Journal of Robotics Research*, 30(3):265–279.
- Mathworks**, 2011. Planetary gear. "<https://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/planetarygear.html>", (Erişim tarihi : 24 Ağustos 2020).
- Mosher, R.S.**, 1969. Exploring the potential of a quadruped. *SAE Transactions*, pages 836–843.
- Nakanishi, J.; Morimoto, J.; Endo, G.; Cheng, G.; Schaal, S.; and Kawato, M.**, 2004. Learning from demonstration and adaptation of biped locomotion. *Robotics and Autonomous Systems*, 47(2-3):79–91.
- Nassour, J.; Hénaff, P.; Benouezdou, F.; and Cheng, G.**, 2014. Multi-layered multi-pattern cpg for adaptive locomotion of humanoid robots. *Biological Cybernetics*, 108(3):291–303.
- Neunert, M.; Farshidian, F.; and Buchli, J.**, 2016. Efficient whole-body trajectory optimization using contact constraint relaxation. In *International Conference on Humanoid Robots*, pages 43–48.
- Nidec Motor Corporation**, 2019. Field oriented control. "<https://www.roboteq.com/technology/field-oriented-control>", (Erişim tarihi : 24 Ağustos 2020).
- Olçay, T. and ÖZKURT, A.**, 2017. Design and walking pattern generation of a biped robot. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(2):761–769.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Panwar, R.** and **Sukavanam, N.**, 2018. Trajectory tracking using artificial neural network for stable human-like gait with upper body motion. *Neural Computing and Applications*, 32(2020):2601–2619.
- Park, I.W.;** **Kim, J.Y.;** **Lee, J.;** and **Oh, J.H.**, 2005. Mechanical design of humanoid robot platform khr-3 (kaist humanoid robot 3: Hubo). In *International Conference on Humanoid Robots.*, pages 321–326.
- Pasupuleti, M.;** **Yadukumar, S.N.;** and **Ames, A.**, 2012. Human-inspired bipedal robotic walking: From theory to experimental implementation on amber.
- Post, D.C.** and **Schmiedeler, J.P.**, 2014. Velocity disturbance rejection for planar bipeds walking with hzd-based control. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4882–4887.
- Pratt, G.A.** and **Williamson, M.M.**, 1995. Series elastic actuators. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 399–406.
- Pyrhonen, J.;** **Jokinen, T.;** and **Hrabovcova, V.**, 2013. *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons.
- Reher, J.;** **Ma, W.L.;** and **Ames, A.D.**, 2019. Dynamic walking with compliance on a cassie bipedal robot. In *European Control Conference*, pages 2589–2595.
- Righetti, L.** and **Ijspeert, A.J.**, 2006. Programmable central pattern generators: an application to biped locomotion control. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1585–1590.
- Saglam, C.O.** and **Byl, K.**, 2015. Meshing hybrid zero dynamics for rough terrain walking. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 5718–5725.
- Sakagami, Y.;** **Watanabe, R.;** **Aoyama, C.;** **Matsunaga, S.;** **Higaki, N.;** and **Fujimura, K.**, 2002. The intelligent ASIMO: System overview and integration. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2478–2483.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Santos, C.P.; Alves, N.; and Moreno, J.C.**, 2017. Biped locomotion control through a biomimetic cpg-based controller. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 85(1):47–70.
- Sideris, A. and Bobrow, J.E.**, 2005. An efficient sequential linear quadratic algorithm for solving nonlinear optimal control problems. *American Control Conference.*, pages 2275–2280.
- Sreenath, K.**, 2011. *Feedback Control of a Bipedal Walker and Runner with Compliance*. Ph.D. thesis, University of Michigan Dept. of Electrical Engineering.
- Sun, C.; He, W.; Ge, W.; and Chang, C.**, 2016. Adaptive neural network control of biped robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(2):315–326.
- Szczecinski, N.S.; Hunt, A.J.; and Quinn, R.D.**, 2017. Design process and tools for dynamic neuromechanical models and robot controllers. *Biological Cybernetics*, 111(1):105–127.
- Todorov, E. and Li, W.**, 2005. A generalized iterative lqg method for locally-optimal feedback control of constrained nonlinear stochastic systems. *American Control Conference.*, pages 300–306.
- Toulas, B.**, 2018. How does a harmonic drive work? why are they used? "<https://www.engineeringclicks.com/harmonic-drive/>", (Erişim tarihi: 24 Ağustos 2020).
- Trkov, M.; Chen, K.; and Yi, J.**, 2019. Bipedal model and hybrid zero dynamics of human walking with foot slip. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 14(10):101002–101014.
- Van der Noot, N.; Ijspeert, A.J.; and Ronsse, R.**, 2018. Bio-inspired controller achieving forward speed modulation with a 3d bipedal walker. *The International Journal of Robotics Research*, 37(1):168–196.
- VAN HUAN, D.**, 2011. *Augmented Linear Inverted Pendulum Model for Bipedal Gait Planning*. Ph.D. thesis, Department Of Mechanical Engineering National University Of Singapore.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Vardhan Saloni, G.M.W.**, 2014. Dynamic analysis of a rimless wheel on randomly generated rough terrain. In *Proceedings of the International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics*, page 67.
- Von Stryk, O.** and **Bulirsch, R.**, 1992. Direct and indirect methods for trajectory optimization. *Annals of Operations Research*, 37(1):357–373.
- Westervelt, E.R.; Grizzle, J.W.; Chevallereau, C.; Choi, J.H.; and Morris, B.**, 2018. *Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion*. CRC press.
- Westervelt, E.R.; Grizzle, J.W.; and Koditschek, D.E.**, 2003. Hybrid zero dynamics of planar biped walkers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(1):42–56.
- Wikipedia**, 2018. Cycloidal drive. "<https://en.wikipedia.org/wiki/Cycloidal-drive>", (Erişim tarihi: 24 Ağustos 2020).
- Xia, C.I.**, 2012. *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*. John Wiley & Sons.
- Yadukumar, S.N.; Pasupuleti, M.; and Ames, A.D.**, 2012. Human-inspired underactuated bipedal robotic walking with amber on flat-ground, up-slope and uneven terrain. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2478–2483.

TEŐEKKÖR

Tez çalıőmamda her zaman destek olan ve yardımlarını esirgemeyen da-
nıőman hocam Prof. Dr. Musa ALCI'ya, tez izleme ve tez savunma komitemde
yer alarak bana yorumlarıyla katkılar sağlayan hocalarım Prof. Dr. Aydoğan
SAVRAN'a, Prof. Dr. Enver TATLICIOğLU'na, Prof. Dr. Erkan MEŞE'ye ve
Prof. Dr. Zeki KIRAL'a çok teőekkÖr ederim.

Her zaman yardım, destek ve arkadaőlıkları ile yanımda bulunan Mert
ALTINTAŐ'a, Dr. Özkan ARSLAN'a ve Dr. İbrahim AKKAYA'ya teőekkÖrü
bir borç bilirim

Hayatımın her evresinde ve her koőulda bana duydukları güvenle destek-
lerini yanımda hissettiğim, en bÖyÖk gÖç kaynağım olan ailem, annem Asuman
SELİM'e ve babam Ertekin SELİM'e gÖstermiő oldukları sabır ve anlayıőtan
dolayı yÖrekte teőekkÖr ederim.

24/08/2020

Erman SELİM

ÖZGEÇMİŞ

10.07.1988 yılında İzmir’de doğdu. İlköğrenimini İzmir’de ve ortaöğrenimini İzmir Atatürk Lisesi’nde tamamladı. Lisans eğitimini 2010 yılında, Yüksek Lisans eğitimini 2013 yılında Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde tamamlayıp doktora eğitimine başladı. 2011 yılında Ege Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde yandal programını tamamladı. 2011 yılında Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı.

YAYINLAR;

- **AKKAYA I., SELİM E., ALTINTAS M., ENGIN M.**, 2018, Power spectral density-based nearinfrared sub-band detection for noninvasive blood glucose prediction in both in-vitro and in-vivo studies, Journal of Innovative Optical Health Sciences
- **SELİM E., ALCI M.**, 2017, Doğrudan Sıralamalı Yörünge Optimizasyonu ile PusulaYürüyüş Modelinin Kontrolü, TOK 2017, Türkiye, 21 - 23 Eylül 2017
- **SELİM E., GÜRCAN E., ÇEKİNİR S., ALCI M.**, 2014, Manyetik Kaldırma Sistemi İçin Bulanık Kazanç Ayarlı PIV Denetleyici Tasarımı ve Gerçeklemesi, TOK2014 Bildiriler Kitabı, 11-13 Eylül 2014, Kocaeli Üniv., Kocaeli.
- **SELİM E., GÜRCAN E., TATLICIOĞLU E., ALCI M.**, 2014, Manyetik Kaldırma Sistemi için Gürbüz Denetleyici Tasarımı ve Gerçeklemesi, TOK2014 Bildiriler Kitabı, 11-13 Eylül 2014, Kocaeli Üniv., Kocaeli.
- **SELİM E., UYAR E., ALCI M.**, 2013 Quadrocopterin Matematiksel Modeli ve Kontrolü, TOK2013, 26-28 Eylül 2013, İnönü Üni., Malatya.
- **SELİM E., UYAR E., ALCI M.**, 2013, Dynamic Analysis and Control of a Quadrocopter, Applied Mechanics and Materials 421 (2013): 616.
- **TARHAN Ü., SELİM E., AKIN Ö., ALAN İ.**, 2011, Design Of A Fpga Controller For A Robotic Arm, 12th International Workshop On Research And Education in Mechatronics, 15 Eylül 2011
- **SELİM E., UYAR E., ALCI M.**, 2011, DC Motorun Doğrusal Olmayan Kaskad Kontrolü ve Analizi, TOK2011, 14-16 Eylül 2011, DEU, İzmir.
- **TARHAN Ü., SELİM E., AYANOĞLU E., KURU İ., SAMARAZ N. E., AKIN Ö.**, 2010, Computation with Education Oriented CISC Processor Implemented by Using FPGA and VHDL, ISCSE 2010 The 1st International Symposium on Computing in Science and Engineering, 05 Haziran 2010, ss.443-448